

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

**RÔMULO SEHNEM**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO  
DE PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL  
EXTENSOMÉTRICA PARA CALÇADO**

Porto Alegre

2012

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

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO  
DE PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL  
EXTENSOMÉTRICA PARA CALÇADO**

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

2012

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

RÔMULO SEHNEM

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO  
DE PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL  
EXTENSOMÉTRICA PARA CALÇADO**

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

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS

Doutor pela Universidade Paderborn, Alemanha

Prof. MSc. Tiarajú Vasconcellos Wagner, UFRGS

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

Porto Alegre, julho de 2012.

## **DEDICATÓRIA**

Inevitavelmente, dedico este trabalho aos meus pais, meu alicerce durante esta longa jornada da graduação. Sou grato pelo apoio e incentivo incondicional dado. Dedico, também, à minha namorada e aos meus avós.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a UFRGS, pela oportunidade de acesso à educação gratuita, e de qualidade.

Aos professores Marcelo Götz e Tiarajú Vasconcellos Wagner por disponibilizarem seu tempo para avaliar meu trabalho.

Ao meu orientador, o professor Alexandre Balbinot, pelo empenho despendido durante este trabalho.

Ao professor Roberto Petry Homrich e ao técnico Julio Moreira por terem usinado as células de carga na máquina de eletroerosão a fio do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia – LMAE – UFRGS.

Ao Mateus Postal, por ter sido voluntário dos ensaios de utilização da plataforma de força móvel.

## RESUMO

A proposta deste trabalho é desenvolver uma plataforma de força móvel a ser engastada em solado de calçado convencional. O intuito é mensurar, em quatro pontos distintos, as forças de reação normais ao solado durante a marcha humana.

A estrutura mecânica de cada plataforma de força móvel é constituída de quatro células de carga, desenvolvidas no *software* SolidWorks®, de modo a suportar uma carga máxima de 203,8 kgF dentro do regime elástico de deformação, considerando o aço inoxidável SAE 420C. Cada célula de carga é sensorizada por quatro extensômetros de resistência elétrica montados em ponte de Wheastone (sendo dois *strain-gages* em função passiva, para compensação de efeitos térmicos), cujo sinal diferencial é condicionado, adquirido por uma placa DAQ NI USB-6009 da National Instruments™, armazenado em microcomputador através do *software* LabVIEW™ 8.6 e processado e gerado os seus gráficos no *software* MatLab.

Foram realizadas simulações de frequência no *software* SolidWorks®, obtendo-se o modo fundamental de vibração da célula de carga em 2242,3 Hz. Por meio de ensaio dinâmico experimental, encontrou-se o valor da frequência fundamental de ressonância, de 2100 Hz, uma diferença de 6% em relação à estimativa teórica.

Cada uma das oito células de carga foi calibrada estaticamente por meio de ensaio padronizado de aplicação progressiva de carga com pesos padrão, atingindo-se um erro de linearidade máximo de 1,25% nas células de carga 1, 3 e 7.

Por fim, para a conformação da forma de curva das forças de reação ao solado de calçado convencional, foi realizado ensaio experimental de utilização dos protótipos de plataforma de força móvel por um voluntário de massa 92,5 kg, aproximadamente. Encontrou-se a clássica curva em forma de “M”, a mesma descrita na literatura.

**Palavras-chaves: Instrumentação, Célula de Carga, Condicionador de Sinais, Plataforma de Força Móvel, *Strain-Gage*, SolidWorks, LabVIEW.**

## ABSTRACT

The purpose of this paper is developing a movable force plate to be mounted in a common shoe sole. The goal is to measure the normal reaction forces to the sole during human gait.

The mechanical arrangement of each movable force plate comprises four load cells, designed in *software* SolidWorks®, in order to withstand a maximum load of 203.8 kgF within the linear elastic deformation range, taking into account the stainless steel SAE 420C. Each load cell is sensed by four electrical resistance strain-gages mounted in a Wheatstone bridge configuration (in which two are in dummy function to compensate thermal effects). Its differential electrical signal goes through an amplification step, data acquisition by National Instruments module DAQ NI USB-6009, stored in a microcomputer by LabVIEW™ 8.6 software and then processed in MatLAB software.

Frequency simulations were performed in SolidWorks®, being 2242.3 Hz the resulting fundamental frequency of the load cell. By a experimental dynamic testing, we found the fundamental frequency value of 2100 Hz, a difference of 6% compared to the theoretical estimation.

Every load cell was statically calibrated by a standardized experimental test by progressive applying of standard weights, achieving a maximum linearity error of 1.25% in the load cells 1, 3 and 7.

Finally, to conforming the curve shape of the reaction forces to the common shoe soles, a experimental testing was performed by a subject, weight about 92.5 kg, walking with the movable force plate prototypes. It was found the classic "M" shaped curve, the same as described in the literature.

**Keywords: Instrumentation, Load Cell, Signal Conditioner, Strain Gage, Movable Force Plate, SolidWorks, LabVIEW.**

# SUMÁRIO

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                                                             | <b>9</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>                                                              | <b>11</b>  |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>                                                         | <b>12</b>  |
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                                 | <b>13</b>  |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                      | <b>15</b>  |
| 2.1 Introdução à extensometria.....                                                       | 16         |
| 2.1.1 Fundamentos teóricos.....                                                           | 17         |
| 2.1.2 O Strain-Gage.....                                                                  | 21         |
| 2.1.3 Uma introdução à Ponte de Wheastone.....                                            | 24         |
| 2.2 A plataforma de força.....                                                            | 29         |
| <b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>                                                   | <b>34</b>  |
| 3.1 Projeto Mecânico e Análise de Alternativas.....                                       | 36         |
| 3.2 Desenvolvimento, Construção e Montagem do Protótipo da Plataforma de Força Móvel..... | 53         |
| 3.3 Projeto do Sistema de Condicionamento.....                                            | 65         |
| 3.4 Cadeia de Medidas.....                                                                | 70         |
| 3.5 Procedimentos de Aquisição dos Sinais.....                                            | 72         |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                                   | <b>74</b>  |
| 4.1 Aferição do Filtro Anti-Aliasing.....                                                 | 75         |
| 4.2 Procedimentos de Calibração.....                                                      | 77         |
| 4.2.1 Calibração Estática.....                                                            | 77         |
| 4.2.2 Calibração Dinâmica.....                                                            | 85         |
| 4.3 Resultados e Desempenho da Plataforma de Força Móvel.....                             | 89         |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                                                 | <b>96</b>  |
| <b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                           | <b>97</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                  | <b>98</b>  |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                                       | <b>100</b> |



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1: ESTRESSE MECÂNICO AXIAL EM UMA BARRA PRISMÁTICA CARREGADA COM FORÇA F. ....                                                                                                                  | 18 |
| FIGURA 2.2: ALONGAMENTO DE UMA HASTE FINA. ....                                                                                                                                                          | 19 |
| FIGURA 2.3: CURVA GENERALIZADA DA RELAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO. ....                                                                                                                                        | 19 |
| FIGURA 2.4: ESBOÇO TRIDIMENSIONAL DO EFEITO DE POISSON. ....                                                                                                                                             | 21 |
| FIGURA 2.5: DIAGRAMA CAUSA/EFEITO DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO <i>STRAIN-GAGE</i> . ....                                                                                                             | 22 |
| FIGURA 2.6: ESTRUTURA TÍPICA DO <i>STRAIN-GAGE</i> DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA UNIXIAL DO TIPO FOLHA. ....                                                                                                   | 24 |
| FIGURA 2.7: PONTE DE WHEASTONE. ....                                                                                                                                                                     | 25 |
| FIGURA 2.8: UTILIZAÇÃO DE <i>STRAIN-GAGE</i> EM FUNÇÃO PASSIVA PARA COMPENSAÇÃO TÉRMICA. ....                                                                                                            | 26 |
| FIGURA 2.9: PONTE DE WHEASTONE COM QUATRO <i>STRAIN-GAGES</i> . ....                                                                                                                                     | 27 |
| FIGURA 2.10: CURVA DA FORÇA DE REAÇÃO NORMAL AO SOLO EM FORMATO “M” DE CARLET, RESULTADO SEMELHANTE À<br>CURVA DE FORÇA DE REAÇÃO VERTICAL PRODUZIDO POR UMA PLATAFORMA DE FORÇA MODERNA. ....           | 30 |
| FIGURA 2.11: PRIMEIRA PLATAFORMA DE FORÇA DE USO CLÍNICO, DESENVOLVIDA POR. ....                                                                                                                         | 31 |
| FIGURA 2.12: PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL ENGASTADA AO SOLADO, DESENVOLVIDA POR PIFFER. ....                                                                                                                | 32 |
| FIGURA 2.13: PICOS DE APOIO DECORRENTES DA MARCHA HUMANA, DETECTADOS PELO PROTÓTIPO DE PIFFER. ....                                                                                                      | 33 |
| FIGURA 3.1: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DESENVOLVIDO. ....                                                                                                                                             | 35 |
| FIGURA 3.2: CÉLULA DE CARGA DE GEOMETRIA S COM INDICAÇÕES DAS POSIÇÕES DE CIMENTAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS. ....                                                                                             | 38 |
| FIGURA 3.3: ESBOÇO INICIAL DA CÉLULA DE CARGA DE GEOMETRIA S, ACRESCENTADA DE ARCO NA EXTREMIDADE INFERIOR. ....                                                                                         | 40 |
| FIGURA 3.4: CÉLULA DE CARGA VARIADA A PARTIR DA GEOMETRIA DO TIPO S. ....                                                                                                                                | 41 |
| FIGURA 3.5: RESULTADOS DE ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA DA GEOMETRIA DE CÉLULA DE CARGA PROPOSTA NA FIGURA 3.4. ....                                                                                           | 43 |
| FIGURA 3.6: MODIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS IMPLEMENTADAS NA CÉLULA DE CARGA PROPOSTA NA FIGURA 3.4. ....                                                                                                       | 44 |
| FIGURA 3.7: RESULTADOS DE ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA DA GEOMETRIA DE CÉLULA DE CARGA PROPOSTA NA FIGURA 3.6. ....                                                                                           | 46 |
| FIGURA 3.8: GEOMETRIA FINAL DA CÉLULA DE CARGA. ....                                                                                                                                                     | 47 |
| FIGURA 3.9: RESULTADOS DE TENSÕES MECÂNICAS POR ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA DA GEOMETRIA FINAL DA CÉLULA DE CARGA<br>DESENVOLVIDA. ....                                                                      | 49 |
| FIGURA 3.10: RESULTADOS DE DEFORMAÇÕES POR ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA DA GEOMETRIA FINAL DA CÉLULA DE CARGA<br>DESENVOLVIDA. ....                                                                           | 50 |
| FIGURA 3.11: REGIÕES DE MAIORES TENSÕES MECÂNICAS NA CÉLULA DE CARGA. ....                                                                                                                               | 51 |
| FIGURA 3.12: FORMA MODAL DE RESSONÂNCIA DA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL DA CÉLULA DE CARGA. ....                                                                                                               | 52 |
| FIGURA 3.13: IMAGEM GERADA EM SOFTWARE DO SUBCONJUNTO DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL DESENVOLVIDA. ....                                                                                                    | 54 |
| FIGURA 3.14: IMAGEM GERADA EM <i>SOFTWARE</i> DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL DESENVOLVIDA ENGASTADA EM SOLADO DE<br>CALÇADO. ....                                                                          | 54 |
| FIGURA 3.15: AS OITO CÉLULAS DE CARGA USINADAS EM AÇO AISI 420C E UM DOS DISCOS NO QUAL FOI RECORTADO DUAS<br>CÉLULAS DE CARGA EM MÁQUINA DE ELETROEROSÃO A FIO. ....                                    | 55 |
| FIGURA 3.16: CÉLULA DE CARGA DESENVOLVIDA USINADA EM AÇO AISI 420C. ....                                                                                                                                 | 56 |
| FIGURA 3.17: OS QUATRO SUBCONJUNTOS DAS DUAS PLATAFORMAS DE FORÇA MÓVEL. ....                                                                                                                            | 56 |
| FIGURA 3.18: AS DUAS PLATAFORMAS DE FORÇA MÓVEL ENGASTADAS AO SOLADO DO CALÇADO. ....                                                                                                                    | 57 |
| FIGURA 3.19: AS DUAS PLATAFORMAS DE FORÇA MÓVEL VISTAS POR UM ÂNGULO DIFERENTE. ....                                                                                                                     | 57 |
| FIGURA 3.20: RESULTADOS DE TENSÕES MECÂNICAS NO EIXO X POR ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA DA CÉLULA DE CARGA. ....                                                                                              | 60 |
| FIGURA 3.21: RESULTADOS DE TENSÕES MECÂNICAS NO EIXO Y POR ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA DA CÉLULA DE CARGA. ....                                                                                              | 61 |
| FIGURA 3.22: RESULTADOS DE TENSÕES MECÂNICAS NO EIXO Z POR ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA DA CÉLULA DE CARGA. ....                                                                                              | 61 |
| FIGURA 3.23: DIPOSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DOS <i>STRAIN-GAGES</i> (O <i>STRAIN-GAGE</i> EM COR VIOLETA REPRESENTA O SENSOR ATIVO E<br>O <i>STRAIN-GAGE</i> EM COR VERDE REPRESENTA O SENSOR PASSIVO). ....     | 62 |
| FIGURA 3.24: AS OITO CÉLULAS DE CARGA COM OS <i>STRAIN-GAGES</i> E OS TERMINAIS DE LIGAÇÃO COLADOS. ....                                                                                                 | 63 |
| FIGURA 3.25: POSICIONAMENTO DAS CÉLULAS DE CARGA EM CADA CALÇADO. ....                                                                                                                                   | 64 |
| FIGURA 3.26: PROTÓTIPO DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL MONTADO. ....                                                                                                                                        | 64 |
| FIGURA 3.27: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DESENVOLVIDO. ....                                                                                                                         | 65 |
| FIGURA 3.28: (A) ESQUEMÁTICO ELÉTRICO DO CIRCUITO DE FILTRO <i>ANTI-ALIASING</i> (B) E O RESPECTIVO GRÁFICO DE BODE<br>DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> FILTERPROTM 3.1.0 DA TEXAS INSTRUMENTS, INC. .... | 66 |
| FIGURA 3.29: ESQUEMÁTICO ELÉTRICO DE UM CANAL DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DESENVOLVIDO. ....                                                                                                          | 67 |
| FIGURA 3.30: FOTO DAS DUAS PLACAS DE CONDICIONAMENTO. ....                                                                                                                                               | 69 |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 3.31: CADEIA DE MEDIDAS PROPOSTA.....                                                                                                                                               | 72 |
| FIGURA 3.32: ROTINA DESENVOLVIDA NO <i>SOFTWARE</i> LABVIEW™ 8.6 PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS. ....                                                                                            | 73 |
| FIGURA 4.1: CARACTERIZAÇÃO DA AMPLIFICAÇÃO NA BANDA PASSANTE DO FILTRO <i>ANTI-ALIASING</i> .....                                                                                          | 76 |
| FIGURA 4.2: AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE CORTE DO FILTRO <i>ANTI-ALIASING</i> . ....                                                                                                         | 76 |
| FIGURA 4.3: FOTO DO ENSAIO EXPERIMENTAL DE CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DAS CÉLULAS DE CARGA. ....                                                                                                  | 79 |
| FIGURA 4.4: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 1. ....                                                                                                                | 80 |
| FIGURA 4.5: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 2. ....                                                                                                                | 81 |
| FIGURA 4.6: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 3. ....                                                                                                                | 81 |
| FIGURA 4.7: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 4. ....                                                                                                                | 82 |
| FIGURA 4.8: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 5. ....                                                                                                                | 82 |
| FIGURA 4.9: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 6. ....                                                                                                                | 83 |
| FIGURA 4.10: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 7. ....                                                                                                               | 83 |
| FIGURA 4.11: CURVA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA A CÉLULA DE CARGA 8. ....                                                                                                               | 84 |
| FIGURA 4.12: ENSAIO EXPERIMENTAL DE CALIBRAÇÃO DINÂMICA. ....                                                                                                                              | 86 |
| FIGURA 4.13: SINAL NO TEMPO DA RESPOSTA AO IMPACTO MECÂNICO IMPRESSO NA CÉLULA DE CARGA. ....                                                                                              | 87 |
| FIGURA 4.14: DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA DO SINAL TEMPORAL DA RESPOSTA AO IMPACTO MECÂNICO IMPRESSO NA CÉLULA DE CARGA. ....                                                           | 87 |
| FIGURA 4.15: VOLUNTÁRIO UTILIZANDO OS CALÇADOS NOS QUAIS A PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL ESTÁ ENGASTADA. ....                                                                                  | 89 |
| FIGURA 4.16: VISTA INFERIOR DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL. ....                                                                                                                             | 90 |
| FIGURA 4.17: RESULTADOS DO PERÍODO 1 DE CAMINHADA DO ENSAIO EXPERIMENTAL DE UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL.....                                                                   | 91 |
| FIGURA 4.18: RESULTADOS DO PERÍODO 2 DE CAMINHADA DO ENSAIO EXPERIMENTAL DE UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL.....                                                                   | 92 |
| FIGURA 4.19: RESULTADOS DO PERÍODO 3 DE CAMINHADA DO ENSAIO EXPERIMENTAL DE UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL. ....                                                                  | 94 |
| FIGURA 4.20: SOMATÓRIO DAS RESPOSTAS DE REAÇÃO NORMAL AO SOLADO DAS OITO CÉLULAS DE CARGA DO PERÍODO 3 DE CAMINHADA DO ENSAIO EXPERIMENTAL DE UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL..... | 95 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 3.1: PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUNS METAIS. ....                                           | 42 |
| TABELA 3.2: PROPRIEDADES QUÍMICO MECÂNICAS DO AÇO AISI 420C.....                                    | 48 |
| TABELA 3.3: OS PRIMEIROS CINCO MODOS DE RESSONÂNCIA SIMULADOS POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS. .... | 52 |
| TABELA 4.1: MEDIÇÕES DE TENSÃO ELÉTRICA PARA O ENSAIO EXPERIMENTAL DE CALIBRAÇÃO ESTÁTICA. ....     | 78 |
| TABELA 4.2: FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE TODAS AS CÉLULAS DE CARGA E ALGUNS PARÂMETROS.....          | 84 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

SG: *Strain-Gage*

FEA: Finite Element Analysis

ADC: Analog-to-Digital Converter

DR: Dynamic Range

## 1. INTRODUÇÃO

O ato de andar é um evento contínuo, que se constitui em transferir o peso de um membro inferior para o outro, com o objetivo de avançar o corpo para frente, como se fossem sucessivos desequilíbrios (ALENCAR, 1999). É de grande relevância para o movimento a manutenção de uma postura estável. Um controle postural eficiente é fundamental para o sucesso de grande parte das atividades da vida diária.

O equilíbrio em bípedes é naturalmente instável (PETERKA, 2004), sendo, no entanto, fundamental para a execução segura da maior parte dos movimentos. Com o avanço da idade, a capacidade de controle postural se degenera, aumentando a predisposição à quedas (PAULA, 2010).

A análise da marcha humana é o estudo sistemático do movimento humano. Esse estudo é usado para avaliar, planejar e tratar pacientes com condições que afetam a sua capacidade de andar. Também é comumente utilizado na biomecânica para ajudar os atletas a executar suas tarefas esportivas de forma mais eficiente e para identificar os problemas relacionados com a postura ou movimento em pessoas com lesões (WHITTLE, 2007). A análise quantitativa do movimento humano insere-se no domínio da biomecânica, ciência que envolve o estudo de sistemas biológicos de uma perspectiva mecânica, englobando a estática e a dinâmica (HALL, 1999).

A análise da marcha pode ser avaliada através de diferentes técnicas, tais como: imagem de vídeo, imagens fotográficas, marcadores reflexivos, eletromiografia e plataforma de força. Plataformas de força são instrumentos de medição que mensuram as forças de

reação do solo geradas por uma pessoa em pé (repouso) ou caminhando sobre a mesma, para quantificar o equilíbrio, a marcha e outros parâmetros de biomecânica.

Assim, em contribuição para o estudo e desenvolvimento da instrumentação biomédica, o presente trabalho tem por objetivo o projeto, desenvolvimento, construção e validação de um protótipo de plataforma de força móvel a ser engastada em solado de calçado masculino convencional. O intuito é conformar as formas de onda das forças normais de reação ao solado do calçado durante a marcha humana em ensaios experimentais, contudo, sem a intenção de realizar qualquer tipo de diagnóstico de possíveis patologias musculares, cerebrais, de articulações ou relacionadas à postura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise estrutural através de cálculos por resistência dos materiais é um método satisfatório quando as cargas componentes são conhecidas qualitativa e quantitativamente. O problema ocorre, particularmente, quando as cargas não são conhecidas ou quando elas podem ser grosseiramente aproximadas. Segundo HOFFMANN (1989), antigamente, o risco de sobrecarregar uma estrutura mecânica era evitado usando margens de segurança, ou seja, através de superdimensionamento.

No entanto, as estratégias modernas de concepção exigem economia do material utilizado, em parte, por razões de custo e em parte para redução da massa, o que é claramente ilustrado, por exemplo na indústria aeronáutica. A fim de satisfazer os requisitos de segurança e para fornecer um tempo de vida útil adequada ao componente mecânico, as tensões mecânicas do material devem ser conhecidas. Portanto, as medições em condições operacionais são necessárias (HOFFMANN, 1989).

Segundo MURRAY & MILLER (1992), a análise experimental de deformações é uma ferramenta importante no projeto e desenvolvimento global de estruturas e máquinas. Enquanto soluções computacionais e técnicas analíticas estão disponíveis durante o período de projeto, os resultados ainda são dependentes de muitas hipóteses que devem ser feitas a fim de adaptá-las ao problema a ser resolvido (MURRAY & MILLER, 1992).

Um método para encontrar os pontos frágeis, e um método que é usado extensivamente, é através da utilização do extensômetro de resistência elétrica. Os *strain-gages* têm um custo relativamente baixo, são facilmente implementados por um técnico

qualificado, não exigem grandes investimentos em instrumentação e, ainda assim, produzem uma riqueza de informações em um tempo relativamente curto (MURRAY & MILLER, 1992).

## **2.1 Introdução à extensometria**

A procura constante por melhoria na concepção de máquinas e partes estruturais levou ao desenvolvimento de várias técnicas experimentais para se determinar a distribuição das tensões mecânicas. Estes métodos experimentais são empregados tanto para a verificação de previsões teóricas, e na avaliação de tensões mecânicas em situações em que abordagens matemáticas não estão disponíveis ou são inadequadas.

No entanto, uma vez que o estresse mecânico não pode ser medido diretamente, os procedimentos experimentais adotados efetuam algum tipo de medida da deformação (MURRAY & MILLER et al., 1992). As deformações mensuradas são, então, convertidas em seus valores equivalentes em termos de estresse mecânico. A fim de alcançar esse objetivo, algum tipo de dispositivo sensível à deformação mecânica ou algum dispositivo de medição é necessário.

Além das aplicações para análise de tensões mecânicas, extensômetros também encontram uma vasta utilização em dispositivos de sensoriamento e de controle. Nessas aplicações, a deformação em alguma parte mecânica é utilizada como uma indicação de força, flexão, torque, pressão, aceleração, ou alguma outra variável relacionada com a deformação mecânica.



### 2.1.1 Fundamentos teóricos

A Lei de Hooke, a lei da elasticidade descoberta pelo cientista inglês Robert Hooke, em 1660, estabelece que, para deformações relativamente pequenas de um objeto, o deslocamento ou o tamanho da deformação é diretamente proporcional à força de deformação. Sob estas condições, o objeto retorna à sua forma e tamanho iniciais após a remoção da força. Matematicamente, a lei de Hooke afirma que a força  $F$  (N) aplicada é igual a constante  $k$  (N/m) vezes o deslocamento ou mudança de comprimento  $x$  (m), ou conforme apresenta a Equação (2.1).

$$F = kx \quad (2.1)$$

A Lei de Hooke apenas é verdadeira para alguns materiais sob certas condições de carga, ou seja, válida somente dentro do regime elástico de deformação do material (isto é, para tensões mecânicas inferiores à tensão de limite de proporcionalidade).

Para o caso simples de um corpo carregado axialmente, por exemplo, uma barra sujeita a tensão mecânica ou compressão por uma força que passa pelo seu centro (veja Figura 2.1), a tensão mecânica ( $\sigma$ ), ou a intensidade de forças internas, pode ser obtida pela divisão da força normal total ( $F$ ) pela área transversal da barra ( $A$ ). No caso de uma barra prismática axialmente carregada, a tensão mecânica  $\sigma$  é representada por um escalar chamado, também, de tensão mecânica nominal que representa uma tensão média ( $\bar{\sigma}$ ) sobre a área, o que significa que a tensão na seção transversal é uniformemente distribuída. Assim, tem-se a Equação (2.2).

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

A força normal  $F$  pode ser uma força de tração se agir para fora da área transversal  $A$ , ou força de compressão se agir para dentro da área transversal  $A$ .

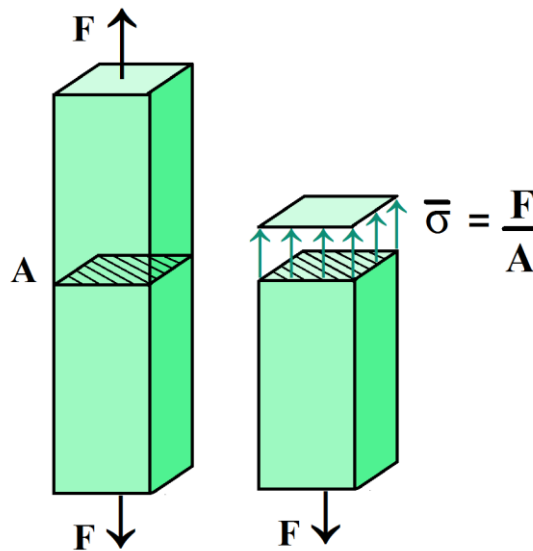


Figura 2.1: Estresse mecânico axial em uma barra prismática carregada com força  $F$ .

Fonte: adaptado de (BEER & JOHNSTON, 2009).

A deformação relativa (*strain*) é expressa como a razão entre a deformação total e a dimensão inicial do material em que as forças são aplicadas. A deformação relativa de uma haste fina (ver Figura 2.2) carregada axialmente é expressa como a alteração no comprimento  $\Delta l$  por unidade de comprimento  $l_0$  original da haste. A deformação é positiva se o material é alongado e negativo se ele é comprimido. Assim, tem-se a Equação (2.3).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.3)$$

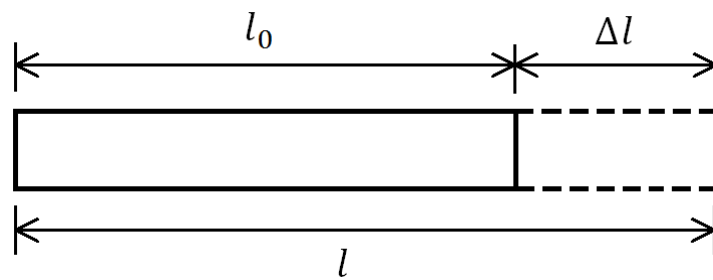


Figura 2.2: Alongamento de uma haste fina.

Fonte: adaptado de (HJELMSTAD, 2005).

A relação entre a tensão e a deformação é conhecida como a curva de tensão-deformação – cada material apresenta uma curva característica. A Figura 2.3 apresenta um esboço generalizado da relação tensão-deformação dos materiais (curvas tensão-deformação variam largamente entre os materiais).

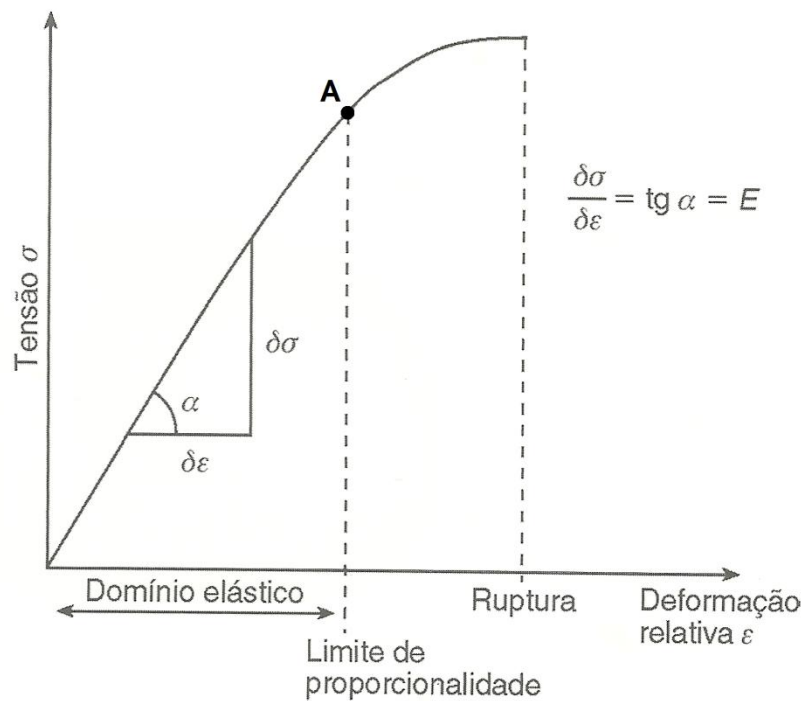


Figura 2.3: Curva generalizada da relação tensão-deformação.

Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007).

No regime elástico da curva, muitos materiais obedecem à lei de Hooke por uma razoável aproximação, de modo que o estresse mecânico ( $\sigma$ ) é proporcional à deformação ( $\varepsilon$ ) com a constante de proporcionalidade sendo o módulo de elasticidade ou módulo de Young ( $E$ ). Portanto, a tensão mecânica pode ser representada pela Equação (2.4).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.4)$$

Um material submetido a uma tensão crescente a partir da origem (deformação relativa  $\varepsilon$  zero) na Figura 2.3 se deforma linearmente à tensão aplicada até o ponto A, o limite proporcional do domínio elástico. Até esse ponto, qualquer material retorna ao seu comprimento inicial, quando retirada a carga aplicada. Elevando-se a tensão aplicada ao material além do ponto A resulta em deformação permanente (ROYLANCE et al., 2001).

Quando um material é sujeito à uma compressão em um certo eixo dimensional, normalmente, o mesmo tende a expandir nas outras duas dimensões. Este fenômeno é chamado de efeito de Poisson. Assim, a relação entre a deformação transversal e a longitudinal, para materiais isotrópicos, aqueles que apresentam as mesmas propriedades mecânicas para todas as direções, é representada pelo coeficiente de Poisson  $\gamma$  (BALBINOT & BRUSAMARELLO et al., 2007), que é representada pela relação apresentada na Equação (2.5).

$$\gamma = -\frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (2.5)$$

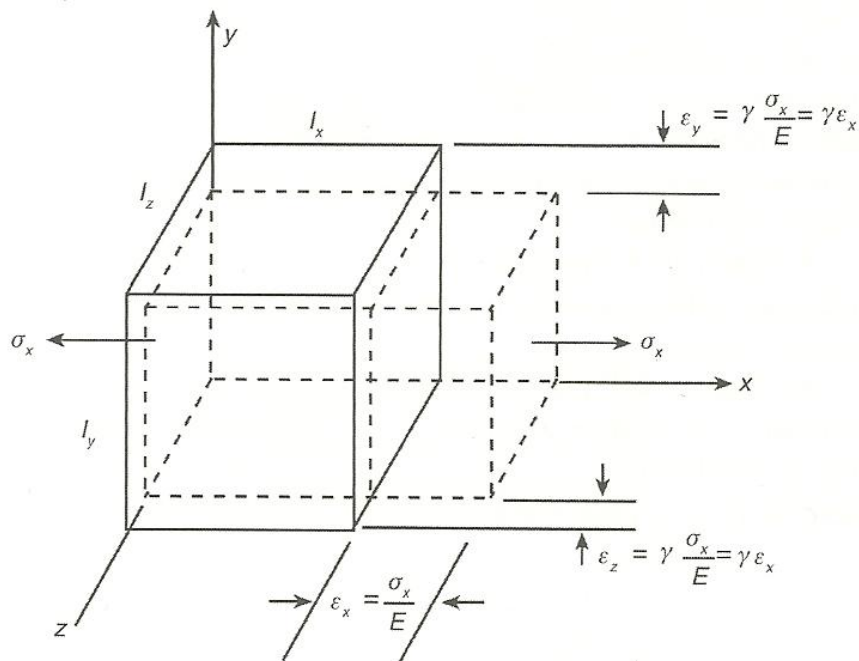


Figura 2.4: Esboço tridimensional do efeito de Poisson.

Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007).

### 2.1.2 O Strain-Gage

Embora existam vários métodos de medição de tensão mecânica, o mais comum é com *strain-gage*, um dispositivo cuja resistência elétrica varia em proporção à quantidade de tensão no material mensurado. Por exemplo, o *strain-gage* piezoresistivo é um dispositivo semicondutor cuja resistência varia não-linearmente com a deformação mecânica. O sensor mais amplamente utilizado, no entanto, é o *strain-gage* de resistência elétrica colável (*bonded metal electrical resistance strain-gage*).

O princípio base da operação de extensômetros de resistência elétrica já é conhecido por um longo tempo. No entanto, a aplicação do princípio de medição para a deformação (em escala comercial) é muito mais recente. Em 1856, Lord Kelvin relatou suas observações de

que certos condutores elétricos, que ele havia estudado, exibiam uma mudança na resistência elétrica com a variação da deformação (MURRAY & MILLER et al., 1992).

Segundo HOFFMANN (1989), foi Arthur Claude Ruge, na faculdade de Sismologia do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, em uma última tentativa para mensurar o estresse mecânico devido a vibrações de terremoto simuladas em um modelo de tanque de água resistente à terremoto, dentre vários outros diferentes dispositivos de medida de deformação sem sucesso, pegou um fio muito fino de resistência, prendeu-o em formato de curva sob um tipo de papel-tecido fino e encerrou os terminais com conexões espessas. A fim de investigar as propriedades desse protótipo, ele colocou o dispositivo em uma viga de flexão (*bending beam*) e comparou as medidas com um manômetro tradicional. Ele encontrou uma boa relação linear entre deformação e os valores apresentados ao longo da faixa de medição. Assim, o "*strain-gage* de resistência elétrica metálica com grelha colada" foi inventado.

A mudança de resistência elétrica do sensor resultante de sua deformação mecânica representa o princípio básico de funcionamento dos extensômetros de resistência elétrica. A Figura 2.5 apresenta o diagrama de causa/efeito do princípio de funcionamento *strain-gage*.



Figura 2.5: Diagrama causa/efeito do princípio de funcionamento do *strain-gage*.

O *strain-gage* de resistência elétrica é constituído por um fio muito fino ou, mais comumente, lâmina metálica disposta em formato de grade (grelha). Os *strain-gages* são feitos de fio de aproximadamente 0,001 mm de diâmetro, ou menos, e em resistências

variando de cerca de 50 ohms a vários milhares de ohms. Os filamentos são montados em bases constituídas de materiais selecionados para aplicações específicas para os quais os extensômetros são destinados (MURRAY & MILLER et al., 1992).

Como normalmente é necessário um fio condutor (o elemento sensível à deformação) de comprimento na ordem de vários centímetros para se obter uma resistência total necessária, e considerando que o tamanho desejado do sensor é quase sempre menor que o comprimento necessário do fio, é necessário dispô-lo em forma de grade, a fim de economizar espaço, e, assim, permitir a redução do comprimento útil para um tamanho adequado. Assim, o padrão de grelha maximiza a quantidade de fio ou lâmina metálica sujeita a deformação na direção paralela.

A grelha é colada a uma fina lâmina, chamada de base, que está em contato (cimentado) direto com a peça mecânica a ser mensurada sua deformação. Portanto, a deformação sofrida pela peça mecânica é transferida diretamente para o *strain-gage*, que responde com uma variação linear da resistência elétrica. Os extensômetros de resistência elétrica estão disponíveis comercialmente com valores nominais de resistência de 30 a 3.000  $\Omega$ , com 120, 350, e 1000  $\Omega$  sendo os valores mais comuns. A Figura 2.6 mostra o modelo de *strain-gage* mais utilizado, o uniaxial do tipo folha. Há, obviamente, variações deste modelo típico.

Um parâmetro fundamental do *strain-gage* é a sua sensibilidade à deformação, conhecido como Fator Gage (K). Fator Gage é definido como sendo a razão entre a variação na resistência elétrica do *strain-gage* e a variação em seu comprimento, dado pela Equação (2.6).

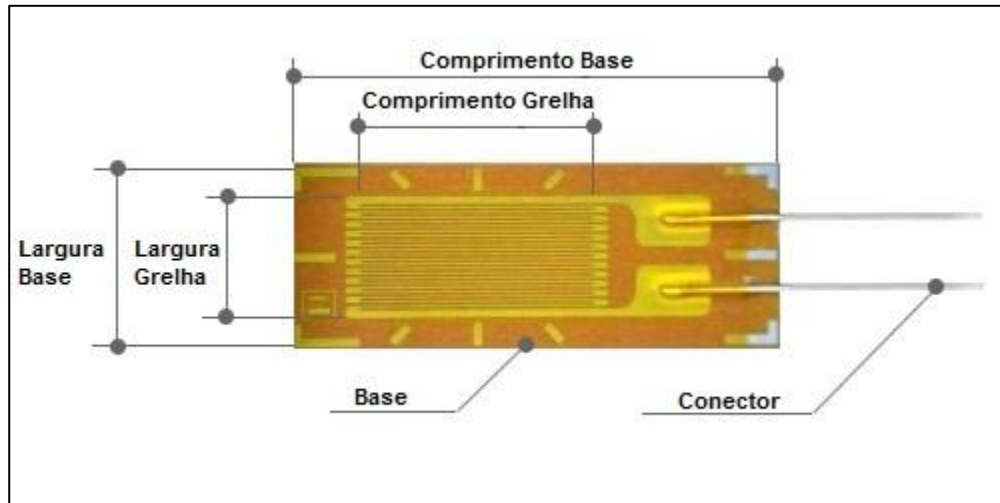


Figura 2.6: Estrutura típica do *strain-gage* de resistência elétrica uniaxial do tipo folha.

Fonte: adaptado de (SHOWA, 2012).

$$K = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

onde  $R_0$  é a resistência inicial do *strain-gage* e  $\Delta R$  a variação em seu valor,  $l_0$  é o comprimento inicial do elemento sensível do *strain-gage* e  $\Delta l$  a variação em seu valor.

### 2.1.3 Uma introdução à Ponte de Wheastone

Considerando que as variações no comprimento da grelha do *strain-gage* são geralmente muito pequenas, e sendo a deformação  $\varepsilon$  uma quantidade adimensional, tipicamente usa-se a unidade *microStrain* ou  $\mu\varepsilon$  ( $\mu m/m$ ) para a deformação relativa do sensor.



Para medir essas pequenas mudanças na resistência, e compensar a sensibilidade à temperatura, *strain-gages* são quase sempre usados na configuração de ponte de Wheastone com uma fonte de excitação de tensão ou corrente. A ponte de Wheastone, ilustrada na Figura 2.7, consiste de quatro segmentos resistivos com uma tensão de excitação ( $V_{ex}$ ), que é aplicada sobre a ponte.

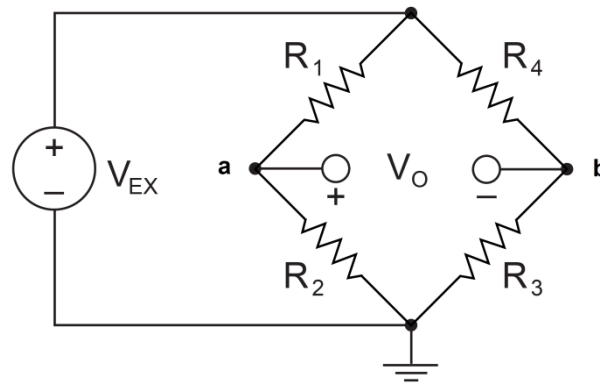


Figura 2.7: Ponte de Wheastone.

A tensão de saída da ponte  $V_o$  da Figura 2.7 é igual a Equação (2.7).

$$V_o = V_{ab} = \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] V_{ex} \quad (2.7)$$

A ponte estará balanceada, ou seja, terá saída zero para  $V_o$ , se a Equação (2.8) for verdade.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (2.8)$$

Qualquer mudança na resistência de algum dos resistores da ponte causa uma saída  $V_o$  não zero. Substituído o resistor  $R_4$  na Figura 2.7 por um *strain-gage* ativo, qualquer mudança na resistência desse sensor irá ocasionar um desbalanço na saída da ponte.

O efeito térmico sob a saída da ponte pode ser atenuado utilizando-se dois ( $\frac{1}{2}$  de ponte) ou quatro (ponte completa) *strain-gages* na ponte de Wheastone, dos quais um ou dois, respectivamente, podem ser implementados em função passiva (*dummy*), sendo o ideal quando for possível implementar a ponte completa com os quatro *strai-gages* em função ativa. O *strain-gage dummy* pode ser ou cimentado próximo ao *strain-gage* ativo e com orientação transversal – sofrendo um estresse mecânico descrito pelo efeito de Poisson – ou em uma região da peça mecânica em que não haja deformação, ou que esta seja desprezível. A Figura 2.8 esboça o *layout* da disposição dos *strain-gages* na técnica de compensação do efeito térmico sob a saída da ponte com *strain-gage dummy*. É importante ressaltar que o uso de *strain-gage* em função passiva não é a única forma de atenuar os efeitos causados pela variação da temperatura.

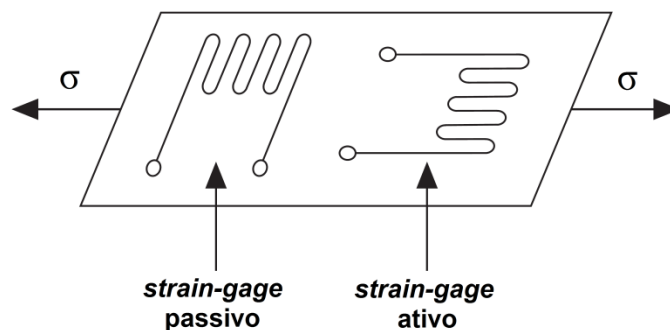


Figura 2.8: Utilização de *strain-gage* em função passiva para compensação térmica.

A máxima sensibilidade na saída da ponte de Wheastone é atingida utilizando-se quatro *strain-gages* ativos, ilustrado na Figura 2.9. Nessa configuração, dois *strain-gages* sofrem compressão ( $-\Delta R$ ) na grelha e dois *strain-gages* sofrem expansão ( $+\Delta R$ ).

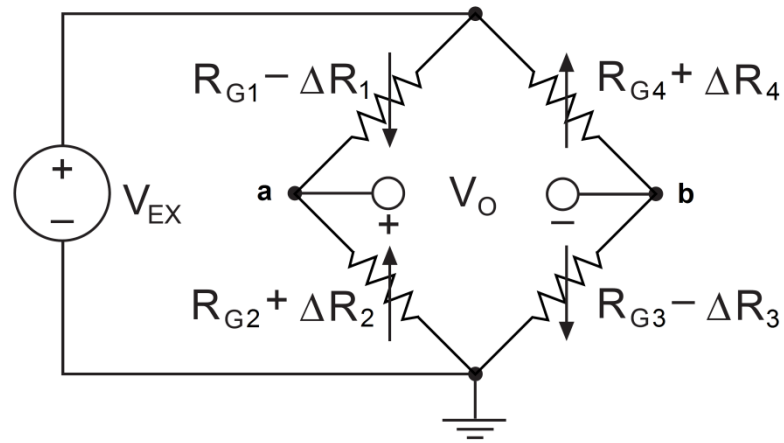


Figura 2.9: Ponte de Wheastone com quatro *strain-gages*.

A tensão de saída da ponte  $V_o$  da Figura 2.9 é igual a Equação (2.9).

$$V_o = V_{ab} = \left[ \frac{R_{G2} + \Delta R_2}{R_{G2} + \Delta R_2 + R_{G1} - \Delta R_1} - \frac{R_{G3} - \Delta R_3}{R_{G4} + \Delta R_4 + R_{G3} - \Delta R_3} \right] V_{ex} \quad (2.9)$$

Considerando que todos os quatro *strain-gages* têm a mesma resistência elétrica inicial e igual a  $R_G$ , a Equação (2.9) se torna a Equação (2.10).

$$V_o = \left[ \frac{(R_G + \Delta R_2)(2R_G + \Delta R_4 - \Delta R_3) - (R_G - \Delta R_3)(2R_G + \Delta R_2 - \Delta R_1)}{(2R_G + \Delta R_2 - \Delta R_1)(2R_G + \Delta R_4 - \Delta R_3)} \right] V_{ex} \quad (2.10)$$

Considerando desprezíveis os termos do tipo  $\Delta R_x \Delta R_y$  e desprezível, no denominador, os termos do tipo  $R_G \Delta R_x$ , a Equação (2.10) pode ser simplificada resultando na Equação (2.11).

$$V_o = \left[ \frac{R_G(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4)}{4R_G^2} \right] V_{ex}$$

$$V_o = \frac{1}{4R_G} (\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4) V_{ex} \quad (2.11)$$

Sendo  $\Delta R/R_0 = \varepsilon K$  (considera-se que todos os *strain-gages* têm o mesmo Fator Gage  $K$ ), então, obtém-se a Equação (2.12).

$$V_o = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) V_{ex} \quad (2.12)$$

Para o caso em que os 4 *strain-gages* são ativos e suas deformações relativas  $\varepsilon$  são, aproximadamente, iguais, pode-se generalizar a Equação conforme a Equação (2.13).

$$V_o = K\varepsilon V_{ex} \quad (2.13)$$

No caso em que se implementa dois dos quatro *strains-gages* da Figura 2.9 em função passiva ( $R_{G1}$  e  $R_{G3}$ ), técnica descrita na Figura 2.8, com o objetivo de compensar o efeito da temperatura na saída da ponte, os mesmos sofrem uma tensão mecânica transversal que é proporcional à longitudinal, pelo coeficiente de Poisson (Seção 2.1.1). Sendo a deformação transversal dada por  $\varepsilon_{tran} = -\varepsilon_{long}\nu$ , a Equação (2.12) torna-se a Equação (2.14).

$$V_o = \frac{K}{4} (-\varepsilon_1\nu + \varepsilon_2 - \varepsilon_3\nu + \varepsilon_4) V_{ex} \quad (2.14)$$

Mas dependendo da situação, a deformação transversal na Equação (2.14) pode ser considerada desprezível, obtendo-se a Equação (2.15).

$$V_o = \frac{K}{4}(\varepsilon_2 + \varepsilon_4)V_{ex} \quad (2.15)$$

## 2.2 A plataforma de força

O conhecimento a respeito das forças e pressões que atuam durante uma atividade física permite compreender mais sobre a maneira como os seres humanos usam o corpo e os membros para atingir resultados desejados e mais detalhes sobre como essas forças são geradas e o efeito delas sob o próprio corpo. Um dos principais objetivos da biomecânica é compreender as forças que produzem movimentos, sendo essencial a medida das forças de reação do solo.

Devido à importância da medição das forças de reação do solo, dispositivos capazes de mensurá-las têm sido desenvolvidos para uma melhor compreensão das mesmas. Estes dispositivos têm sido, tradicionalmente, plataformas de força localizados no solo, devido à importância do contato pé-solo em ambas situações de exercício e esporte (PAYTON, 2008). A plataforma de força é hoje uma ferramenta indispensável na análise do movimento.

A busca por métodos científicos que registrassem a magnitude da força de contato do pé/calcanhar com o solo, segundo SUTHERLAND (2004), começou no século 19. Carlet, e Ampar, seu aluno, desenvolveram um dispositivo capaz de medir a força aplicada ao calcanhar e antepé CARLET (1872). Uma limitação significativa desse método foi que apresentou apenas uma informação unidimensional. No entanto, a curva em forma de “M” se

aproxima muito da curva de força vertical de reação produzida por uma plataforma de força moderna (ver Figura 2.10).

Segundo PAYTON (2008), durante a corrida, ocorrem dois picos de apoio na curva da força de reação vertical do solo, representados pelos pontos A e C na Figura 2.10. O ponto A representa o impacto do calcanhar quando atinge o solo, e o ponto C representa quando o pé sai de contato com o solo.

As pressões aplicadas pelo corpo, através dos pés, ao solo são forças vetoriais. Os primeiros pesquisadores sabiam disso, mas ainda lhes faltavam a tecnologia para separar as componentes da força de reação do solo em três dimensões. Foi Otto Fischer, em 1907, que deduziu as forças tridimensionais de reação do solo a partir de estudos cinemáticos, no entanto, não as mediu diretamente (FISCHER, 1987).

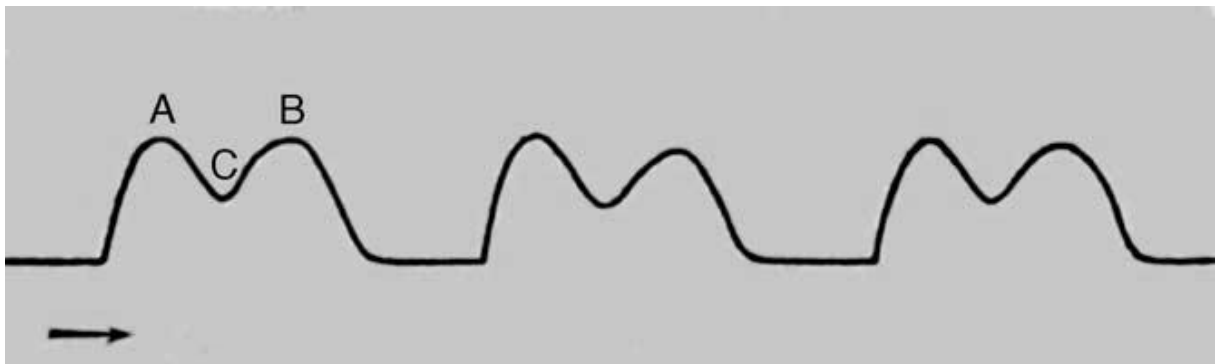


Figura 2.10: Curva da força de reação normal ao solo em formato “M” de Carlet, resultado semelhante à curva de força de reação vertical produzido por uma plataforma de força moderna.

Fonte: (SUTHERLAND, 2004).

Somente com o desenvolvimento do trabalho de CUNNINGHAM & BROWN (1952) que a plataforma de força atingiu as características para o uso clínico. A plataforma dividia as forças de reação do solo em quatro componentes. Isso foi propiciado com a tecnologia da

extensometria, mas os *strain-gages* da época eram extremamente sensíveis à mudança de temperatura. A construção da plataforma era complexa e exigia constante calibração. O tratamento computacional dos dados envolvidos ainda não estava disponível. Assim, o aperfeiçoamento técnico seria necessário antes que uma plataforma de força, adequada ao uso clínico, estivesse comercialmente disponível.

Foi John Hagy, em 1971, quem desenvolveu a primeira plataforma de força para uso clínico, instalada no Laboratório de Marcha do Hospital Shiners, em San Francisco nos Estados Unidos (SUTHERLAND, 2004). A plataforma de força utilizava transdutores de força piezo-resistivos (veja a Figura 2.11).

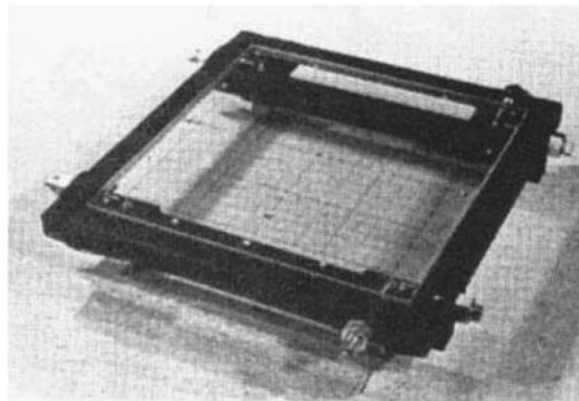


Figura 2.11: Primeira plataforma de força de uso clínico, desenvolvida por John Hagy, em 1971.

Fonte: (SUTHERLAND, 2004).

Com uma abordagem um pouco diferente das tradicionais plataformas de força, placas as quais fixadas e em repouso (estática) sob o solo, Giovanni Piffer desenvolveu uma plataforma de força móvel engastada a solado de calçado (PIFFER, 2010). A plataforma de força de Piffer utiliza células de carga sensoriadas por extensômetros de resistência elétrica. O

objetivo de Piffer foi desenvolver uma tecnologia alternativa às tradicionais, nas quais as plataformas de força são mantidas fixas ao solo. Segue na Figura 2.12 o esboço do protótipo desenvolvido em PIFFER (2010).

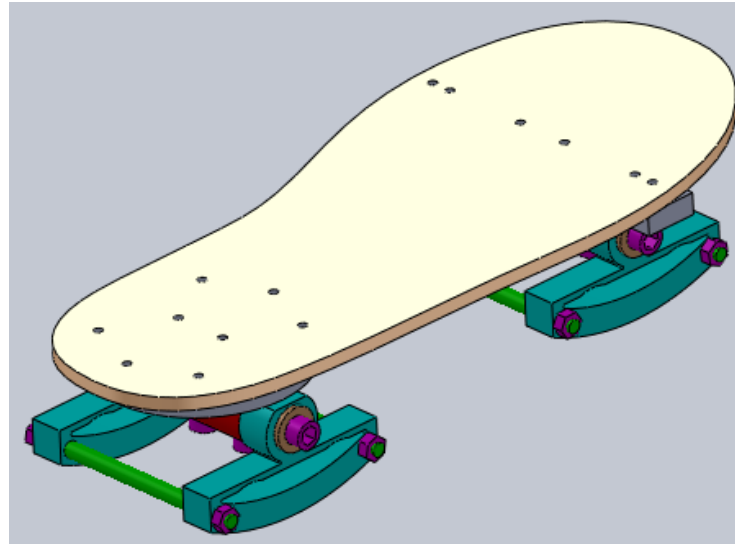


Figura 2.12: Plataforma de força móvel engastada ao solado, desenvolvida por Piffer.

Fonte: (PIFFER, 2010).

Em seu trabalho, Piffer menciona a detecção dos picos de apoio ocorrentes durante a marcha humana, apresentados na Figura 2.13. Mas tais picos que moldam a curva da força normal de reação ao calçado em uma curva em forma de “M”, ocorrem apenas em uma parcela pequena das curvas de reação durante a marcha humana, efeito que é predominante durante a corrida, segundo PAYTON (2008).



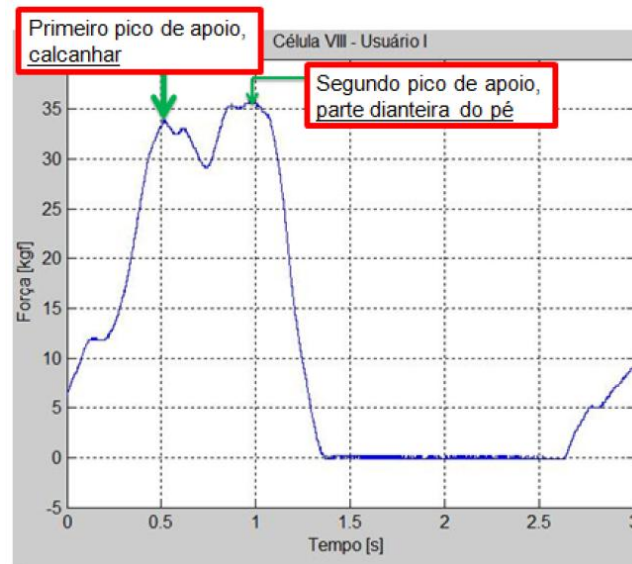


Figura 2.13: Picos de apoio decorrentes da marcha humana, detectados pelo protótipo de Piffer.

Fonte: (PIFFER, 2010).

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados os aspectos construtivos da plataforma de força móvel e os procedimentos para simulações estáticas e dinâmicas, bem como o desenvolvimento do sistema de condicionamento de sinais, a aquisição e o processamento dos sinais no *software* LabVIEW™ 8.6.

Para facilitar a compressão do contexto geral deste trabalho, a Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos resumido do trabalho desenvolvido. A aplicação de força sobre a célula de carga causa a deformação plástica da mesma, e ao mesmo tempo deformação nos extensômetros a ela cimentados. Por conseguinte, ocorre alteração do equilíbrio da Ponte de Wheatstone, formada pelos extensômetros, o que provoca uma ampliação de tensão proporcional à força aplicada.

Já no estágio de condicionamento do sinal, o diferencial de tensão da Ponte de Wheatstone é amplificado por um amplificador de instrumentação. Após, o sinal é filtrado por um filtro *anti-aliasing* de 2ª ordem com frequência de corte de 20 Hz, para a atenuação das componentes espectrais de alta frequência.

Para a aquisição do sinal, é utilizado um módulo de conversão analógico/digital NI USB-6009 da National Instruments, o qual amostra o sinal diferencial de tensão e o envia para um microcomputador portátil do tipo PC. No microcomputador, o sinal digitalizado é coletado e armazenado via *software* LabVIEW™ 8.6. Posteriormente, os dados são processados e apresentados em gráficos pelo *software* MatLab para sua análise e interpretação de resultados.

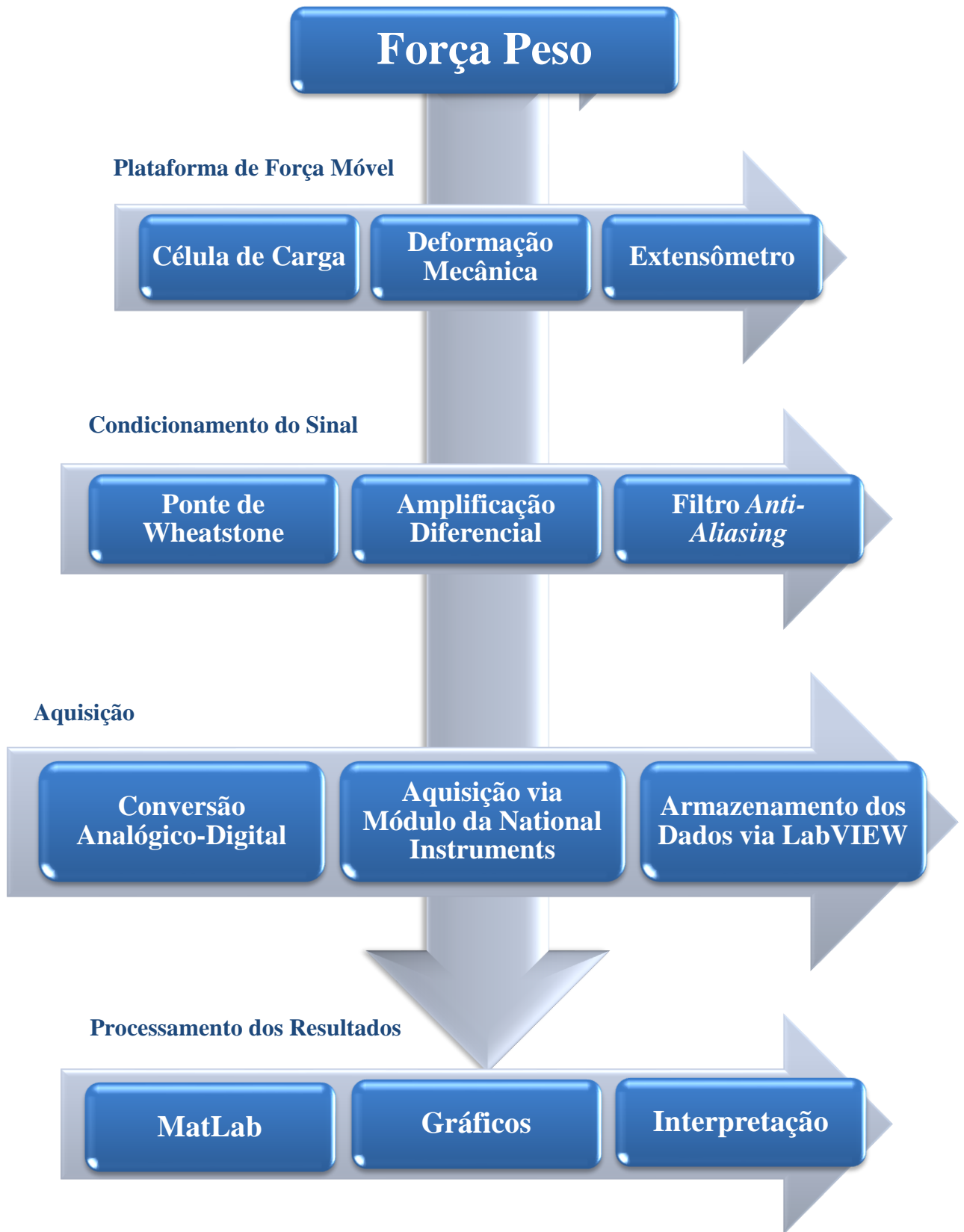


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema desenvolvido.

Cada um dos blocos apresentados na Figura 3.1 será discutido, em detalhes, posteriormente nos sub-capítulos do Capítulo 3.

### **3.1 Projeto Mecânico e Análise de Alternativas**

Para conceber-se a estrutura mecânica propriamente dita, é necessário garantir que a mesma atenda à função primária definida sem que haja colapso (rompimento da estrutura mecânica), deformação plástica ou vibração excessiva. Para tanto, é necessário definir-se os aspectos funcionais (como por exemplo, limitações de dimensões e tipo e faixa de carga), aspectos dinâmicos da aplicação (como por exemplo, tipos de esforços mecânicos e frequência de excitação) e material estrutural a ser utilizado (cada material possui características mecânicas peculiares, o mesmo deve estar adequado aos tipos de esforços solicitantes em função do escopo definido no projeto). Tais especificações para o projeto da estrutura mecânica da célula de carga, que é um dos objetos desse trabalho, serão paulatinamente desenvolvidos e aperfeiçoados durante este subcapítulo, de forma a expor os problemas encontrados durante o seu desenvolvimento.

Dada a aplicação proposta por esse trabalho, considera-se as implicações dadas pela dinâmica da marcha humana, durante a qual há movimento periódico em ambos os pés de uma posição de apoio para a seguinte, na direção de progressão, sempre havendo no mínimo um pé em contato com o solo. Considera-se, para efeitos de definição do escopo deste projeto, que tal movimento periódico não supera 5 Hz, situação na qual o indivíduo completa 10 passos com os dois pés em 1 segundo.

No que tange à definição de carga, foi considerado que o limite de massa corporal do indivíduo a realizar os ensaios de validação do protótipo não excederia os 90 kg. No entanto,

para definir-se a máxima carga de projeto que a célula de carga deve suportar dentro do regime elástico de deformação não pode-se considerar a carga como sendo apenas a massa corporal do indivíduo em seu estado estático (o indivíduo poderia se equilibrar sob apenas uma célula de carga, na situação hipotética do pior caso possível de equilíbrio estático, impondo toda sua força peso sob a mesma), ou seja, deve-se considerar a sua dinâmica.

Levando em conta que a proposta do trabalho é avaliar os esforços de reação normais ao solado durante a marcha humana, deve-se considerar os esforços decorrentes da dinâmica. Desse modo, considera-se que as forças de reação normais ao solado durante a impulsão, momento em que um pé mantém-se apoiado no chão e o outro sai do solo para completar a passada, superam a força peso. Assim, é fundamental considerar um dado fator de segurança na rigidez da estrutura.

Portanto, os desafios propostos para o arranjo mecânico envolvem:

- a robustez estrutural: o arranjo mecânico da plataforma de força móvel deve suportar, dentro do regime elástico de deformação, um valor mínimo de carga (em kgF) juntamente com um dado fator de segurança;
- eficiência em material: otimização do volume do conjunto mecânico a fim de minimizar a quantidade de material necessário, sem comprometer a resistência mecânica requerida;
- a minimização dos efeitos sobre a dinâmica da marcha humana: inevitavelmente, a plataforma de força móvel, quando fixada ao solado do calçado, perturba e agrega imperfeições à dinâmica da caminhada, deixando a mesma desconfortável ao passo, devido à maior elevação do calçado em relação ao solo, pela adição de massa ao conjunto e, também, pela geração de componentes de oscilações mecânicas de maior frequência devido ao choque mecânico entre a plataforma de força móvel (que é de metal) e o solo. Então, para minimizar tais efeitos, é

imprescindível desenvolver-se uma geometria e estrutura de célula de carga que agregue a menor altura de elevação entre o solo e o solado do calçado e a menor massa do conjunto mecânico – sempre atendendo a especificação de mínima resistência mecânica requerida.

Desse modo, definiu-se as especificações e limitações para a geometria final da célula de carga a qual deve atender os seguintes parâmetros do projeto:

- deve ser capaz de suportar, dentro do regime elástico de deformação do material, uma carga máxima de 180 kgF – já considerando-se um fator de segurança 2;
- a altura de elevação do solado em relação ao solo, após a fixação da plataforma de força móvel, não pode exceder 100% da espessura do próprio solado, para atenuar a interferência (por questões de conforto) que a plataforma de força móvel impõem na dinâmica da marcha humana.

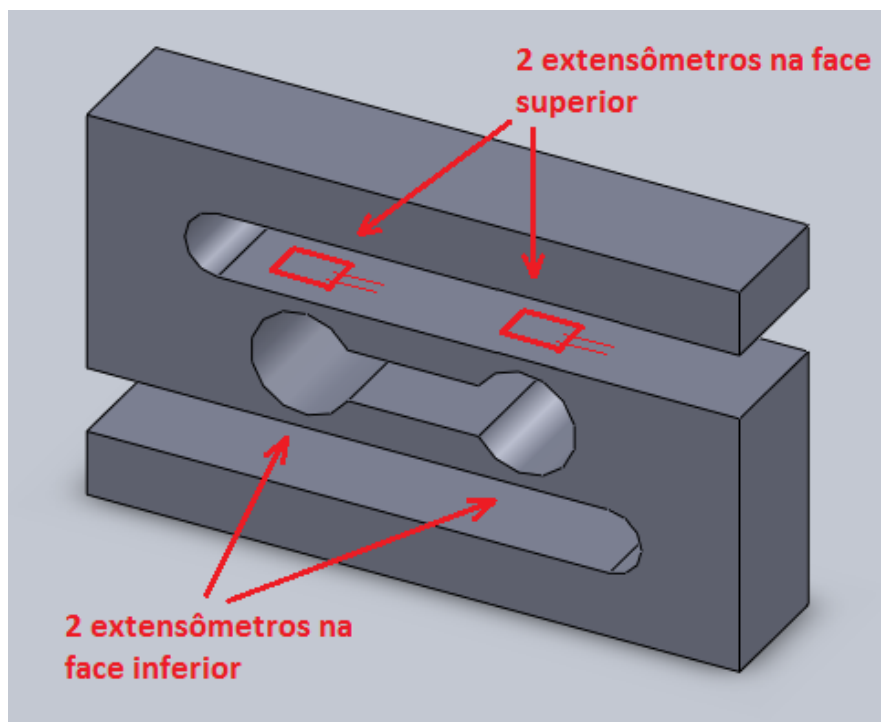


Figura 3.2: Célula de carga de geometria S com indicações das posições de cimentação dos extensômetros.

Para se chegar na geometria final da estrutura mecânica, foi necessário, além das considerações mencionadas, identificar as possíveis opções a partir de uma pesquisa bibliográfica para análise de alternativas, encontrando-se geometrias convencionais utilizadas em aplicações industriais. Realizado o estudo pormenorizado das alternativas tradicionais, baseou-se a célula de carga desenvolvida neste trabalho na tradicional célula de carga de geometria tipo S, apresentada na Figura 3.2.

Tipicamente, células de carga do tipo S são aplicadas à medição de forças de tração e compressão normalmente utilizadas em máquinas de ensaios, balanças eletrônicas e sistemas de automação em geral. Essa estrutura é apropriada pela robustez mecânica inerente e pela capacidade de implementação de ponte completa (quatro extensômetros ativos), característica que atenua a sensibilidade à ruído do sinal. Mas na maneira como ela se apresenta não é possível obter-se uma marcha agradável ao passo. Foi necessário realizar adaptações em sua forma para agregar dinamismo. Dessa maneira, incluiu-se na sua geometria um arco na extremidade inferior para que a passada fosse suave e confortável. Assim, a Figura 3.3 apresenta o esboço inicial da célula de carga desenvolvida neste trabalho, contemplando a modificação empregada.

Realizada a análise da alternativa de implementação dada na Figura 3.3, constatou-se a inadequabilidade da proposição. Encontrar-se-ia dificuldades no processo de cimentação dos extensômetros, atividade obrigatoriamente manual por falta de outros recursos tecnológicos, e um fator preponderante para o sucesso do protótipo. Dado que a altura da plataforma de força móvel não pode exceder 100% da espessura do solado do calçado (considerando-se que solados de calçados convencionais têm média entre 1 cm e 4 cm de espessura), a célula de carga facilmente teria de exceder os 4 cm de altura para a possibilidade de cimentação manual dos sensores.

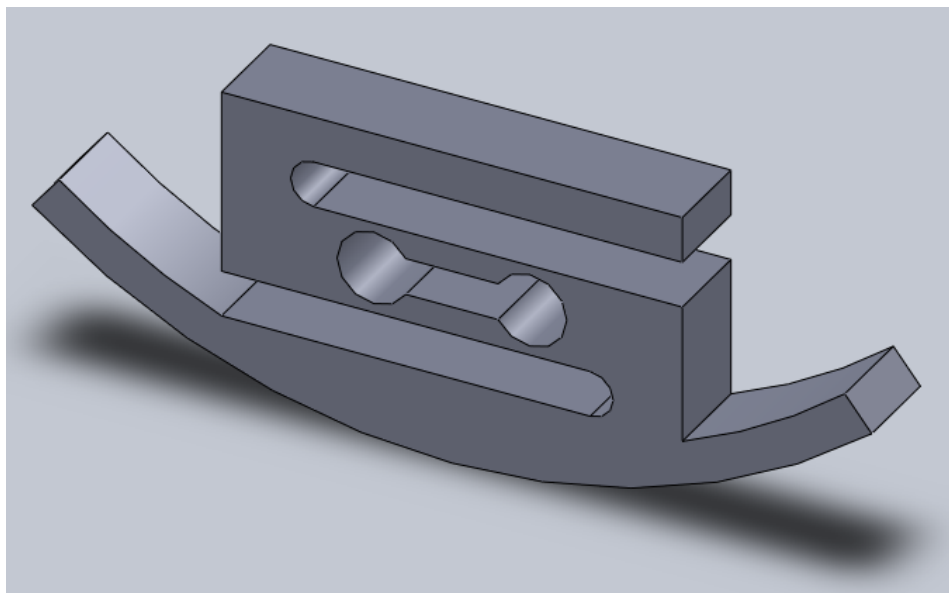


Figura 3.3: Esboço inicial da célula de carga de geometria S, acrescentada de arco na extremidade inferior.

A partir desse ponto foi necessário analisar e estudar as disposições e ordem dos elementos geométricos que compõem a forma da estrutura. A reorganização foi essencial para que se pudesse chegar a uma disposição harmônica e, ao mesmo tempo, funcional. Assim, readaptou-se as formas para se redefinir as posições de máxima deformação mecânica, locais onde deve-se cimentar os extensômetros, para uma posição de fácil acesso para o processo de cimentação. A reformulação da célula de carga do tipo S é exibida na Figura 3.4.

Na Figura 3.4 a área delimitada pelo retângulo em cor vermelha discrimina a face a serem cimentados os extensômetros, e a linha tracejada de cor verde sinaliza a região de maior deformação mecânica do material. Portanto, a nova disposição dos elementos geométricos deslocou o ponto de grande deformação para as extremidades laterais, ao passo que a mesma região na célula de carga do tipo S encontrava-se na parte interna da peça. Dessa forma, criou-se uma alternativa para a fácil cimentação dos extensômetros.



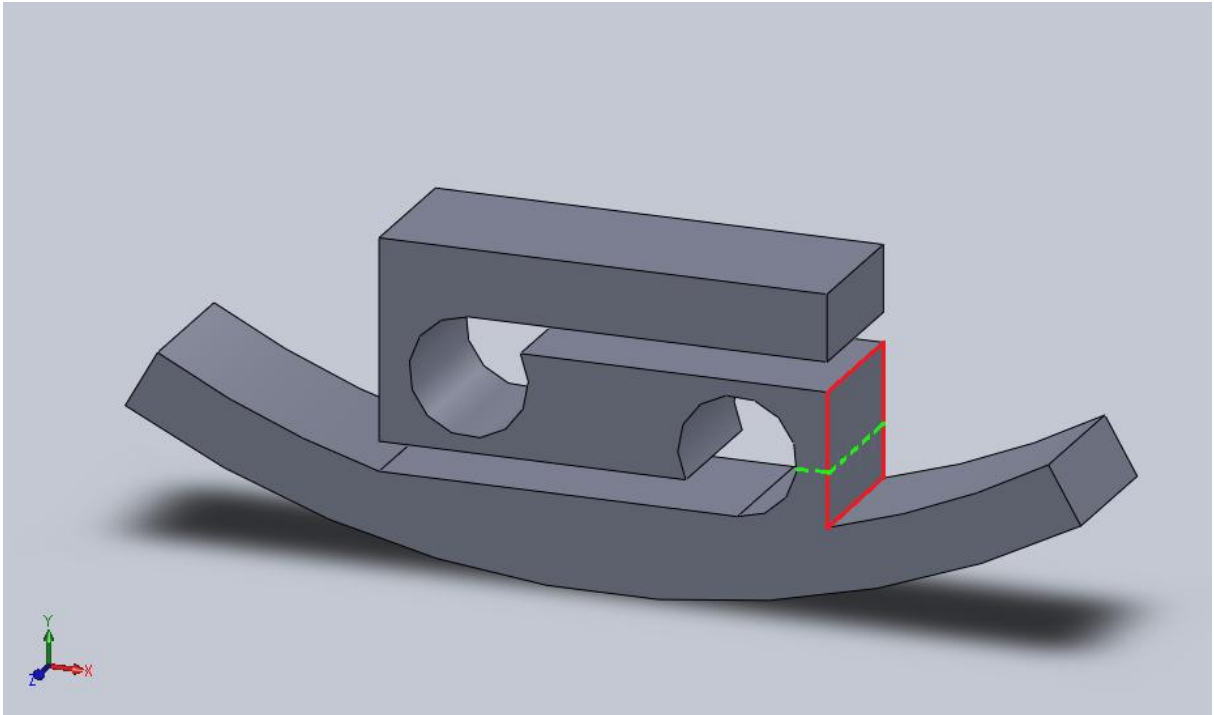


Figura 3.4: Célula de carga variada a partir da geometria do tipo S.

Para avaliar as tensões mecânicas decorrentes da aplicação de carga no modelo de célula de carga proposto e, por fim, validar a resistência mecânica inicialmente requerida, é imprescindível realizar simulação em *software* do modelo mecânico proposto. Assim, utilizou-se a ferramenta SimulationXpress do *software* SolidWorks® Office Premium 2010, o qual utiliza a análise linear estática, baseada no método de elementos finitos, para se determinar as tensões mecânicas.

A análise de tensões mecânicas ou estática calcula os deslocamentos, deformações e tensões mecânicas em uma peça com base nos materiais, acessórios de fixação e cargas. Um material falha quando a tensão mecânica atinge um determinado nível de estresse mecânico. Diferentes materiais falham com diferentes níveis de tensão mecânica. Como ainda não definiu-se o metal a ser utilizado no protótipo e, para fins de avaliação preliminar do potencial de sucesso da proposição de célula de carga, foi executada simulação da peça apresentada na

Figura 3.4 considerando-se o aço SAE 1045, pois o mesmo apresenta um valor de limite de escoamento médio (veja Tabela 3.1), ou seja, dureza média entre os metais.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas de alguns metais.

| Material   |                  | Limite de Escoamento (MPa) | Resistência à tração (MPa) |
|------------|------------------|----------------------------|----------------------------|
| 6063-T4    | Alumínio         | 90                         | 170                        |
| 6063-T6    | Alumínio         | 215                        | 240                        |
| 5052-F     | Alumínio (Naval) | 65                         | 98                         |
| SAE 1010   | Aço Carbono      | 180                        | 325                        |
| SAE 1020   | Aço Carbono      | 350                        | 420                        |
| SAE 1045   | Aço Carbono      | 530                        | 625                        |
| SAE 4340   | Aço Liga         | 710                        | 1110                       |
| UNS C22000 | Cobre            | 69                         | 255                        |
| AG40B      | Zinco            | 285                        | 285                        |
| -          | Ferro (fundido)  | 275                        | 413                        |
| -          | Níquel           | 59                         | 317                        |
| -          | Titânio          | 140                        | 235                        |

Fonte: adaptado de SolidWorks® Office Premium 2010.

Para a simulação de análise linear estática apresentada na Figura 3.5, definiu-se como área fixa a região delimitada pelas setas em cor verde, força de 1 N sendo a carga mecânica na região designada pelas setas em cor violeta e material aço SAE 1045.

Como pretendido, a região de máxima deformação mecânica (ver Figura 3.5) ocorreu nas regiões laterais, locais desejados pelo fácil acesso manual necessário ao processo de cimentação dos sensores. No canto superior direito da Figura 3.5 é apresentado o mínimo fator de segurança de 107,97. Isso significa que a peça suporta aproximadamente 10,8 kgF de carga sem se deformar plasticamente. Esse fator de segurança não atende a especificação do projeto, resistência mecânica requerida de 180 kgF (quase 20 vezes maior).

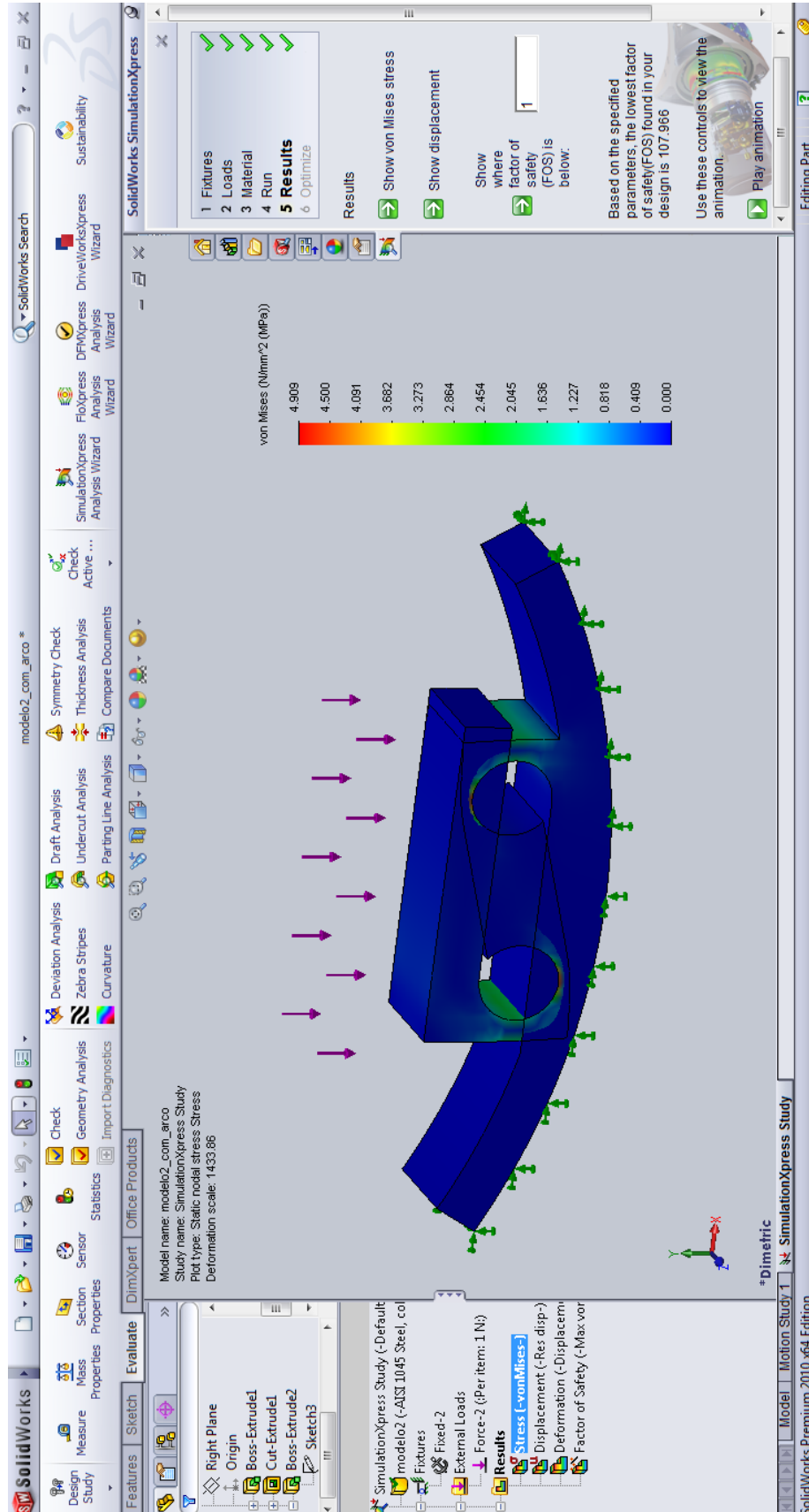


Figura 3.5: Resultados de análise linear estática da geometria de célula de carga proposta na Figura 3.4.

Apesar de a variante apresentada na Figura 3.4 não ter sido suficientemente satisfatória dada sua carência de resistência mecânica – isto é, para se atingir a requisição de resistência mecânica de 180 kgF dentro do regime de deformação elástica do material, necessitar-se-ia aumentar as cotas da peça (maior massa) e, por conseguinte, a altura de elevação do solado em relação ao solo excederia os 100% da espessura do próprio solado – a idéia inicial do modelo de geometria foi válida.

Dessa maneira, para aumentar sua resistência mecânica, foi necessário aplicar algumas modificações nos elementos geométricos do modelo para que se pudesse atingir um resultado satisfatório. A Figura 3.6 exhibe as melhorias implementadas.

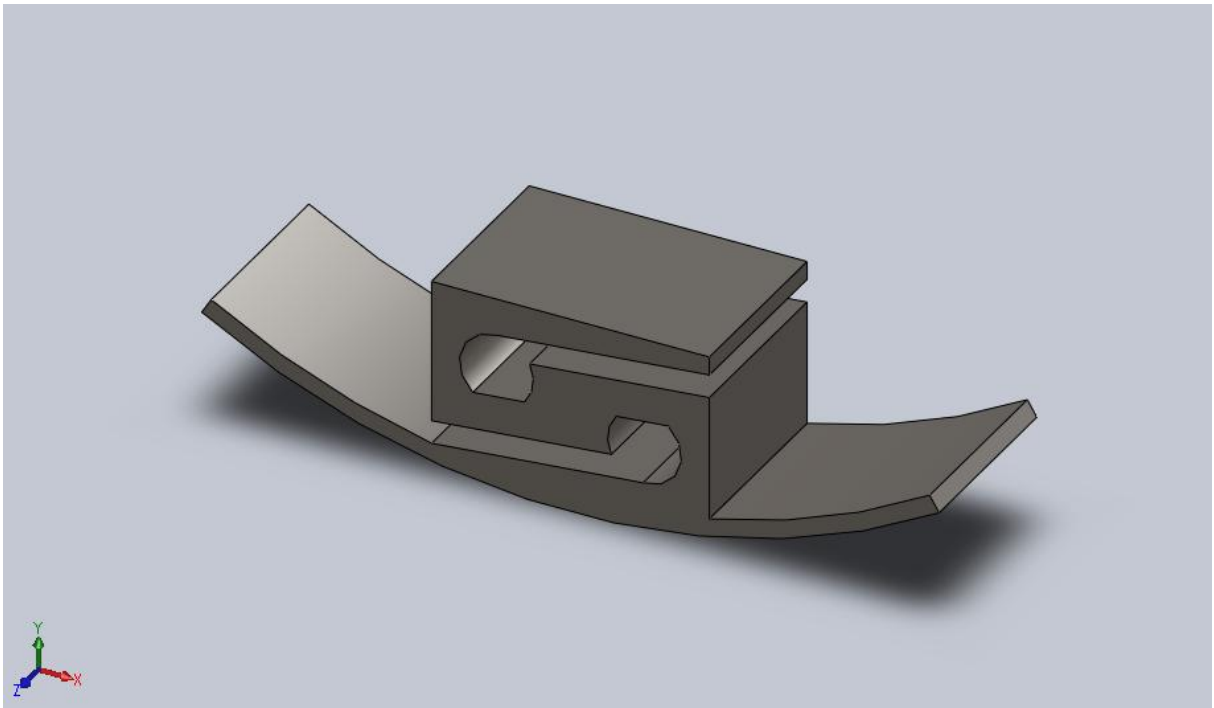


Figura 3.6: Modificações geométricas implementadas na célula de carga proposta na Figura 3.4.

A Figura 3.6 exhibe a geometria da célula de carga com os aperfeiçoamentos atingidos até o momento, incluindo o arco na extremidade inferior, o qual propicia suavidade e conforto

durante a marcha humana, amenizando a interferência que a plataforma de força móvel inevitavelmente introduz na dinâmica da caminhada. Em anexo, encontra-se a Figura A.1, a qual apresenta o desenho técnico da Figura 3.6.

Para avaliar e validar as melhorias implementadas no modelo, foi realizado a simulação mecânica estática, cujos resultados são apresentados na Figura 3.7. Para o resultado da análise por elementos finitos exibido na Figura 3.7, definiu-se como área fixa a região designada pelas setas em cor verde (delimita o arco de circunferência o qual entrará em contato com o chão durante o ato da marcha), força de 1 N sendo a carga mecânica na região designada pelas setas em cor violeta e material aço SAE 1045.

Como pode-se perceber na Figura 3.7, as partes em amarelo e vermelho designam que houve um acréscimo das intensificações das tensões mecânicas (deformações plásticas) nas regiões de interesse, que se localizam nas faces onde serão cimentados os extensômetros. Outra melhoria atingida foi a ampliação do mínimo fator de segurança, que passou a ser de 1095,8, ou seja, houve um aumento na robustez da estrutura mecânica da célula de carga. Isso denota que a peça passou a suportar 109,8 kgF de carga sem se deformar plasticamente, dentro do regime elástico de deformação.

Esse fator de segurança ainda não atende a especificação de máxima carga que a célula de carga deve suportar dentro do regime elástico de deformação (180 kgF). Portanto, foi necessário aplicar ainda algumas modificações nas cotas da geometria da célula de carga proposta na Figura 3.6. Essas alterações agregaram rigidez na estrutura mecânica (amplificou o mínimo fator de segurança à peça), reduziu a massa total da célula de carga e a altura de elevação do calçado em relação ao solo. A forma final da célula de carga é então dada na Figura 3.8 e seu desenho técnico em anexo (ver Figura A.2).

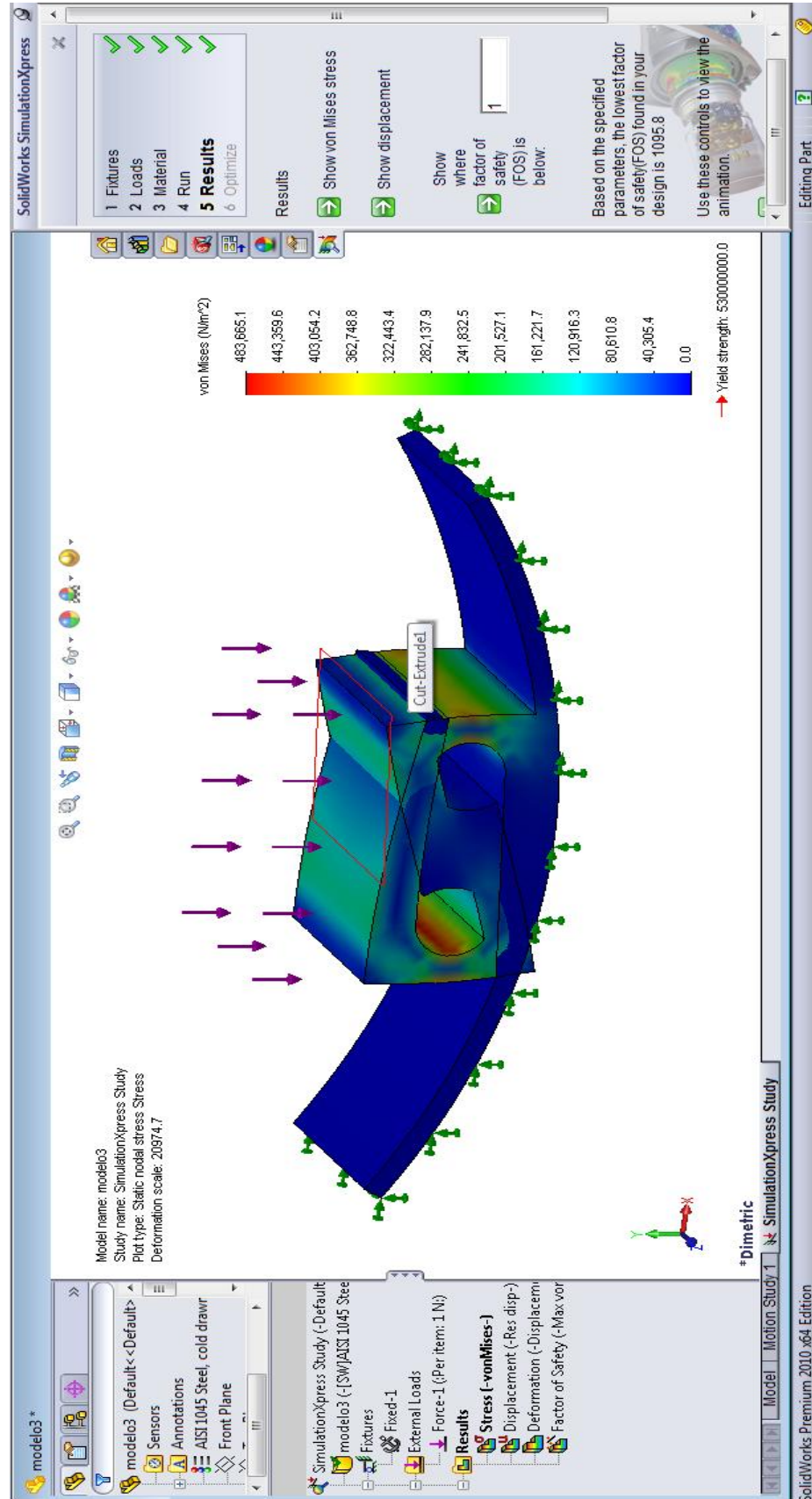


Figura 3.7: Resultados de análise linear estática da geometria de célula de carga proposta na Figura 3.6.

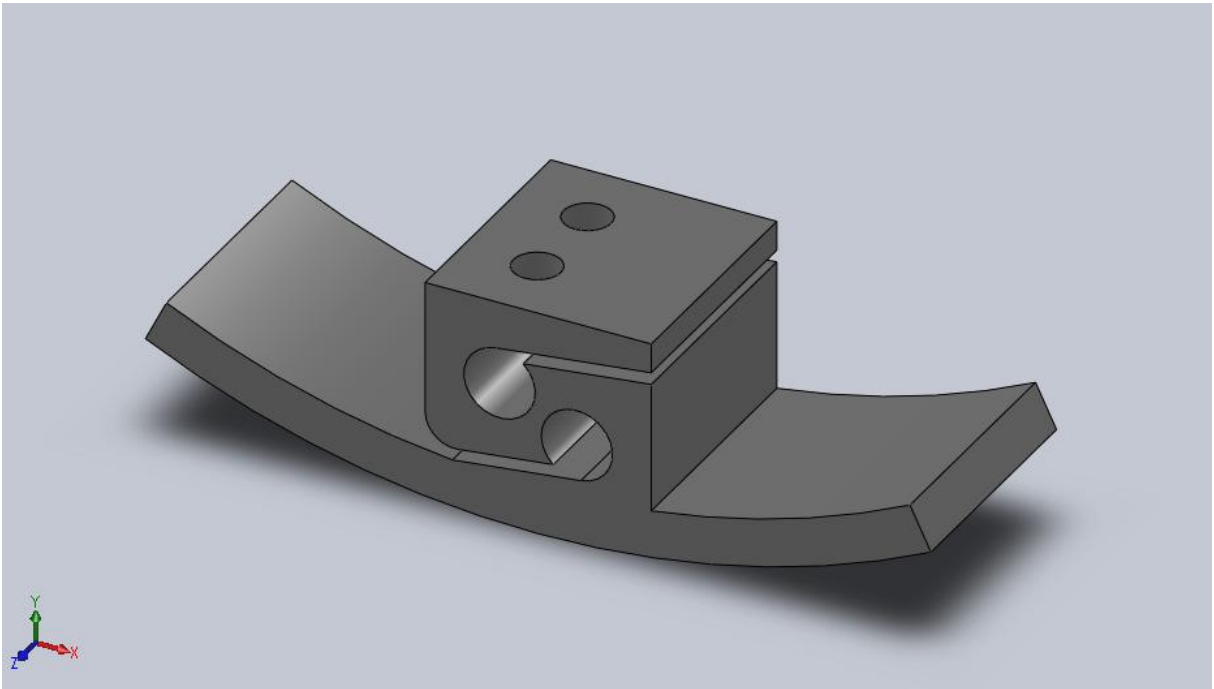


Figura 3.8: Geometria final da célula de carga.

Para a escolha do material a ser utilizado na usinagem das células de carga, levou-se em conta, em especial, seu limite de escoamento (que determina o máximo estresse mecânico dentro da faixa do regime elástico de deformação), mas também sua resistência à corrosão e o seu custo. Feita a pesquisa de mercado dentre os possíveis materiais de serem utilizados, chegou-se a escolha do aço AISI 420C (veja suas propriedades na Tabela 3.2), que é um aço inoxidável martensístico de alta resistência mecânica (endurecido por tratamento térmico) e boa resistência à corrosão. Optou-se por esse material, pois seu limite de escoamento é médio entre os aços e maior que o alumínio, por exemplo. Assim, a célula de carga usinada em aço AISI 420C tem um volume/tamanho menor à uma peça usinada em alumínio para uma mesma resistência mecânica.

Sendo o material escolhido o aço AISI 420C, a célula de carga tem uma massa de 72,7g e volume de 9,27 cm<sup>3</sup>. A simulação mecânica estática da célula de carga com a

geometria na forma final desenvolvida neste trabalho é apresentada na Figura 3.9 (resultados de tensões mecânicas) e na Figura 3.10 (deformações).

Tabela 3.2: Propriedades químico mecânicas do aço AISI 420C.

| <b>Propriedades Químicas (%)</b>  |               |
|-----------------------------------|---------------|
| C                                 | 0,30 – 0,42   |
| Si                                | 1,00          |
| Mn                                | 1,00          |
| Cr                                | 12,00 – 14,50 |
| Mo                                | 1,00          |
| Ni                                | 1,00          |
| P                                 | 0,040         |
| S                                 | 0,030         |
| <b>Propriedades Mecânicas (%)</b> |               |
| Recozimento (°C)                  | 840/870       |
| Têmpera (°C)                      | 980/1030      |
| Dureza (HB)                       | 230 (máx.)    |
| Limite de Escoamento (Mpa)        | 750           |

Fonte: adaptado de (FAVORIT, 2012).

Para o resultado da análise por elementos finitos exibido Figura 3.9, considerou-se como carga mecânica uma força de 1 N e o material aço AISI 420C. Como pode-se visualizar na simulação da Figura 3.9, o mínimo fator de segurança atingiu o valor de 2038,58, ou seja, agora a célula de carga suporta aproximadamente 203,8 kgF de carga sem se deformar plasticamente, dentro do regime elástico de deformação.

Já na Figura 3.10, é apresentado a simulação numérica por elementos finitos com a carga sendo o mesmo valor de mínimo fator de segurança apontado na simulação da Figura 3.9, que é de 2038,58 N. Assim, o resultado indicado na sua escala de deformações aponta que a máxima deformação é de 0,2096 mm, abaixo do limite seguro de máxima deformação dos extensômetros utilizados nesse protótipo, que é de 5 mm.



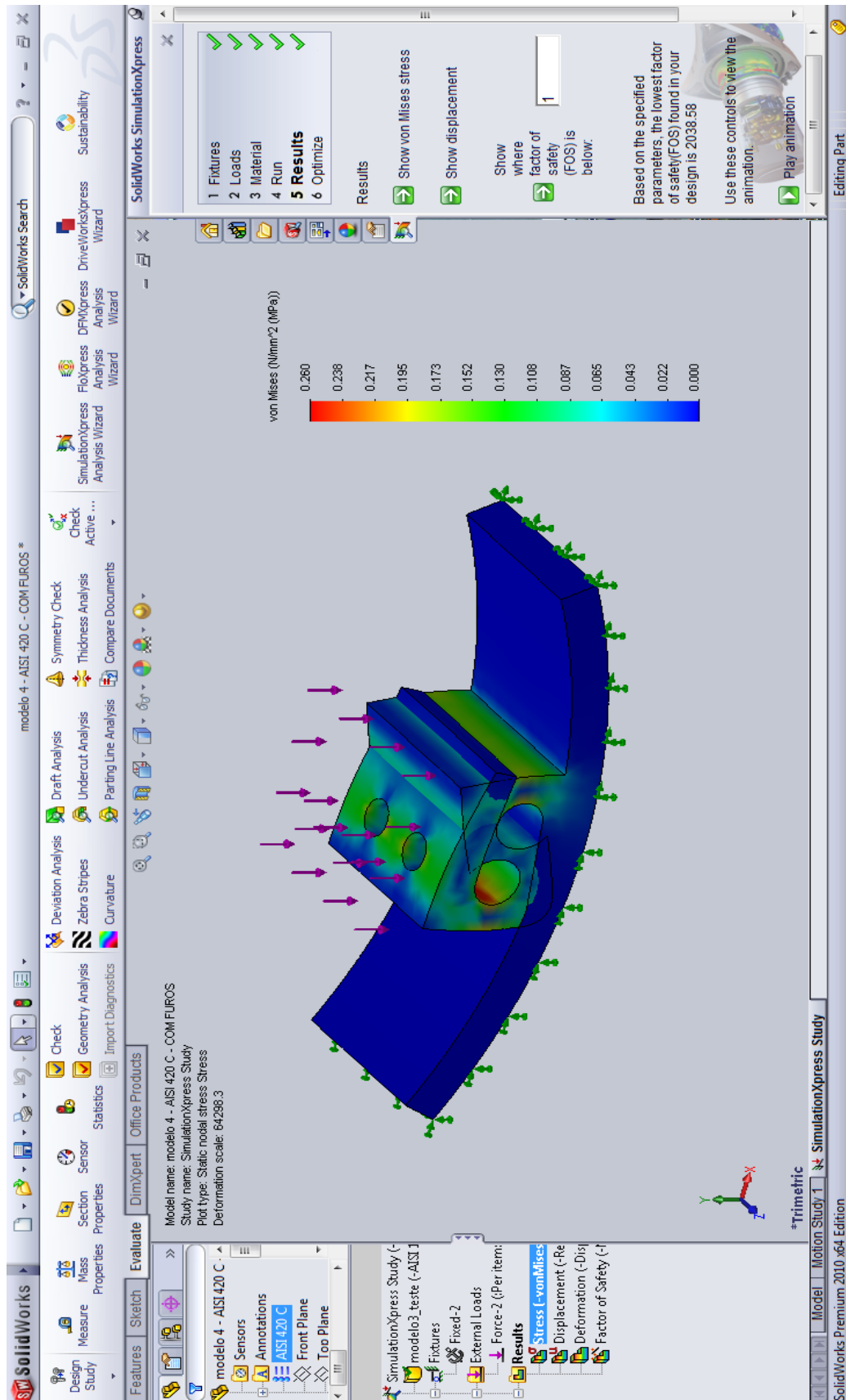


Figura 3.9: Resultados de tensões mecânicas por análise linear estática da geometria final da célula de carga desenvolvida.

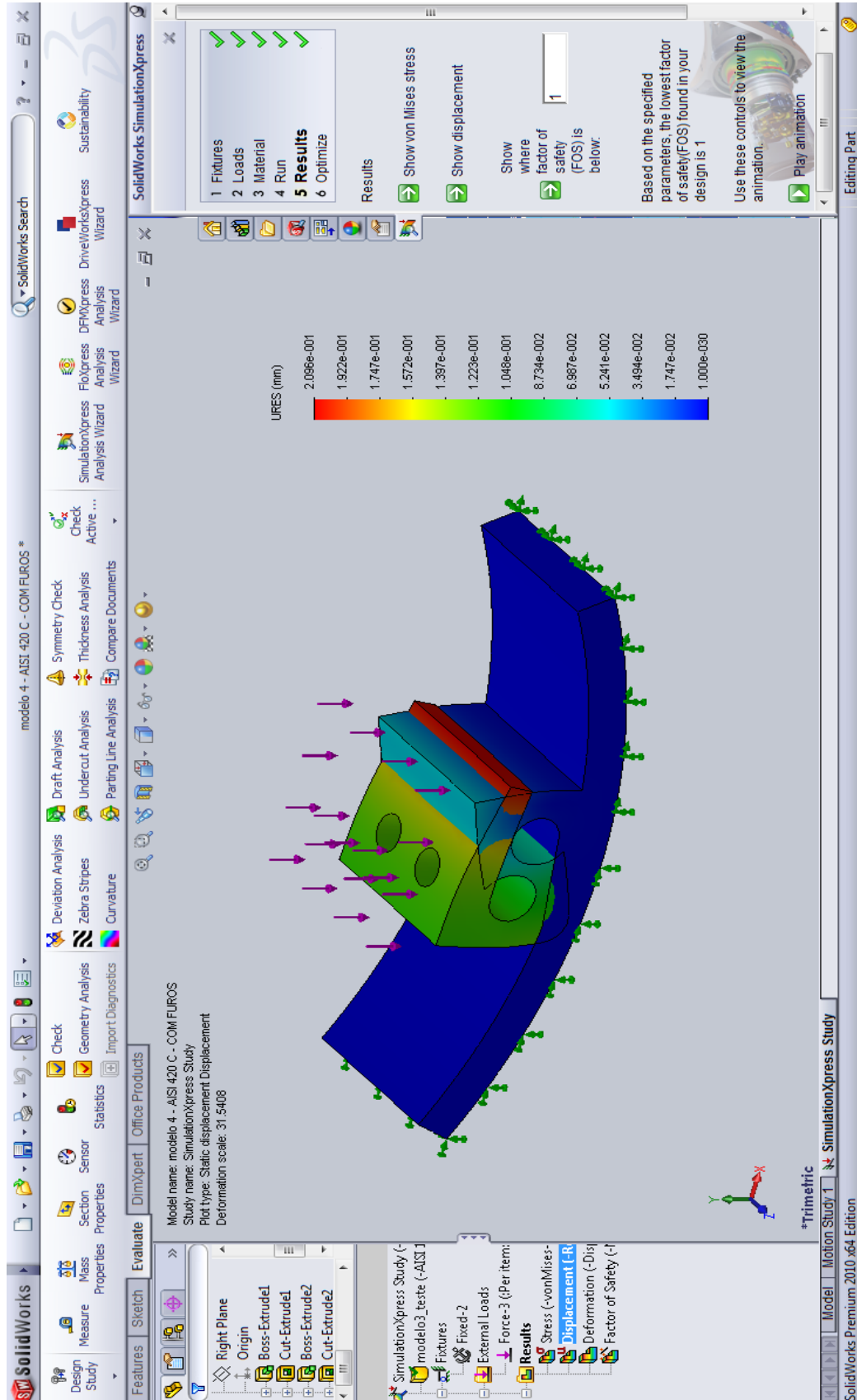


Figura 3.10: Resultados de deformações por análise linear estática da geometria final da célula de carga desenvolvida.

Para ter-se uma melhor idéia de onde ocorrem as maiores tensões mecânicas, segue na Figura 3.11 uma outra simulação por elementos finitos. Nela, as manchas em azul representam as regiões onde ocorrem as máximas tensões mecânicas.

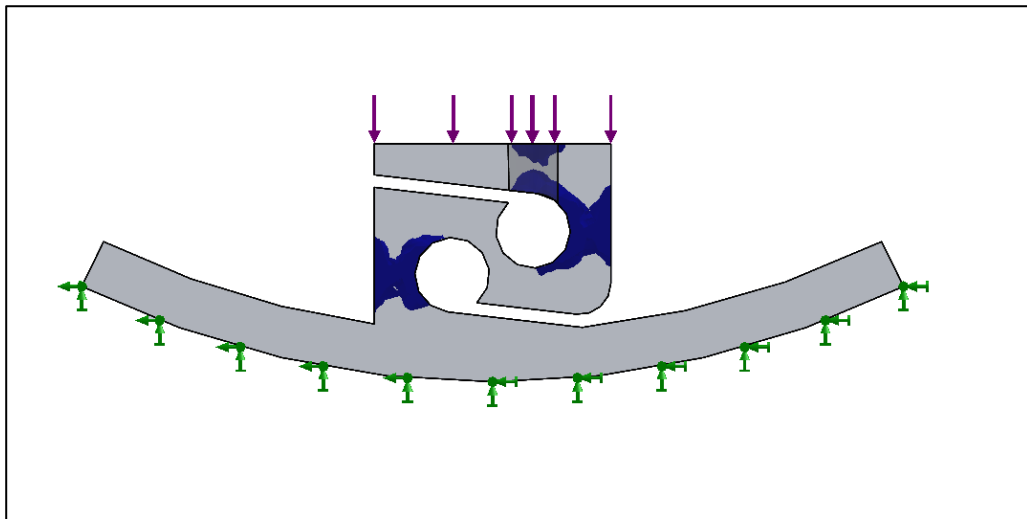


Figura 3.11: Regiões de maiores tensões mecânicas na célula de carga.

Além da análise estática linear, que simula a distribuição das tensões mecânicas por toda a peça, é imprescindível ter conhecimento sobre o comportamento dinâmico da célula de carga. Desprezar essa questão pode comprometer a integridade da plataforma de força móvel, pois se a carga excitar a estrutura mecânica em alguma de suas frequências naturais (frequência na qual há pouco ou nenhum amortecimento), ou até mesmo próximo, a estrutura enfrenta grandes deslocamentos e tensões, provocando deformações plásticas ou, no pior caso, rompimento (colapso) da mesma.

O conhecimento sobre o comportamento dinâmico da célula de carga é, então, obtido por meio de simulação no *software* SolidWorks® Office Premium 2010, conhecido como análise de frequência. O modelo real da célula de carga possui um número infinito de frequências naturais. Todavia, como o fenômeno de interesse a ser mensurado neste trabalho é de baixa frequência, não há necessidade de conhecer todos eles. Apenas alguns dos primeiros

modos são necessários para a esta aplicação. Portanto, foi realizado a simulação dos cinco primeiros modos de vibração para o modelo de célula de carga desenvolvido neste trabalho. A Tabela 3.3 mostra os primeiros cinco modos de vibração da célula de carga e a Figura 3.12 apresenta a forma modal de ressonância da frequência fundamental. As demais formas modais seguem no Anexo, da Figura A.3 à Figura A.6.

Tabela 3.3: Os primeiros cinco modos de ressonância simulados por método de elementos finitos.

| Modo | Frequência (Hertz) |
|------|--------------------|
| 1    | 2242,3             |
| 2    | 5069,3             |
| 3    | 5368,7             |
| 4    | 7360,1             |
| 5    | 9587,2             |

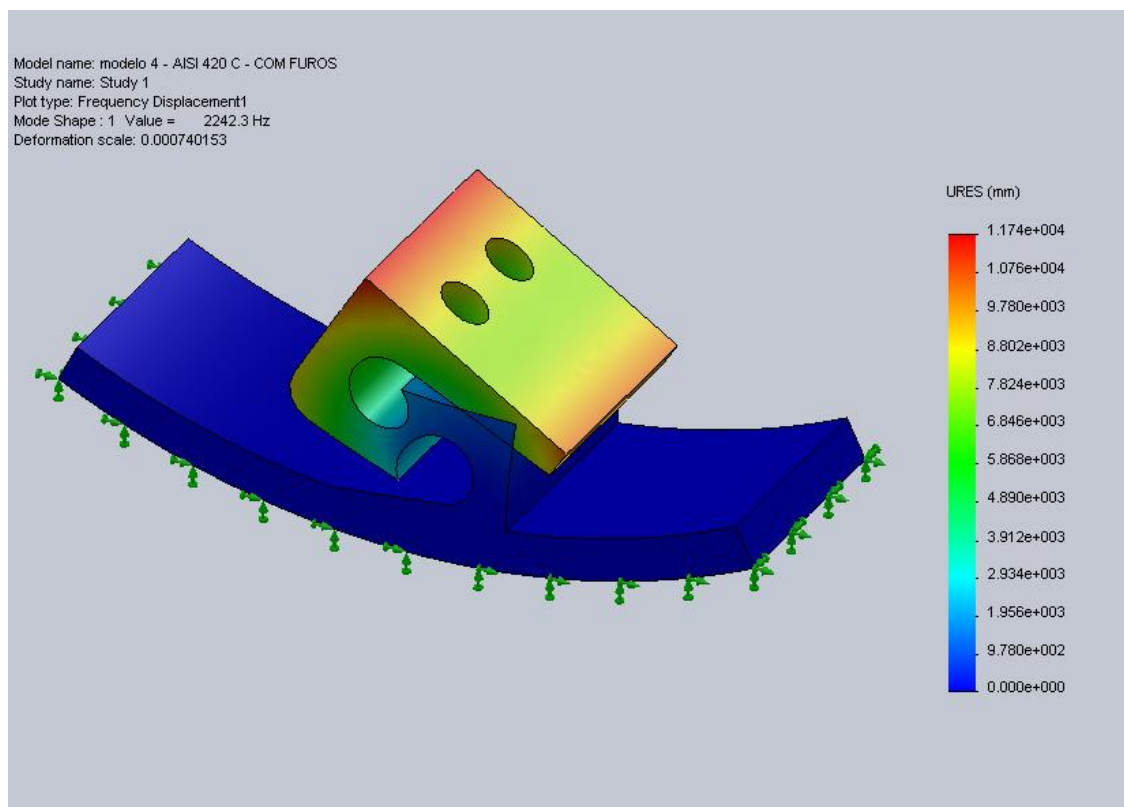


Figura 3.12: Forma modal de ressonância da frequência fundamental da célula de carga.

Para validar os resultados das simulações de análise de frequência por FEM, será apresentado no capítulo 4 os resultados obtidos por ensaio de resposta ao impacto da célula de carga. Nesse ensaio é utilizado um acelerômetro adequado para se medir as vibrações ocasionadas por impacto mecânico impresso na célula de carga.

Como um impulso se constitui por todas as frequências, a célula de carga irá amortecer consideravelmente todas as frequências exceto as fundamentais (modos de vibração). Assim, realizando-se uma transformada de Fourier do sinal adquirido através do acelerômetro, será possível estimar as frequências em que a célula de carga entra em ressonância, através da identificação dos picos ocorridos no gráfico de densidade espectral de potência do sinal.

### **3.2 Desenvolvimento, Construção e Montagem do Protótipo da Plataforma de Força Móvel**

A plataforma de força móvel é constituída de dois conjuntos de duas células de carga usinadas em aço AISI 420C engastadas por parafusos em viga de aço inoxidável. Ambos conjuntos de duas células de carga são engastados por parafusos à sola de um calçado masculino tradicional. A Figura 3.13 apresenta o subconjunto da plataforma de força móvel e a Figura 3.14 mostra a plataforma de força móvel engastada ao solado do calçado, ambas imagens geradas através do *software* SolidWorks® PhotoView 360. Os desenhos técnicos das vigas encontram-se no Anexo, Figura A.7.

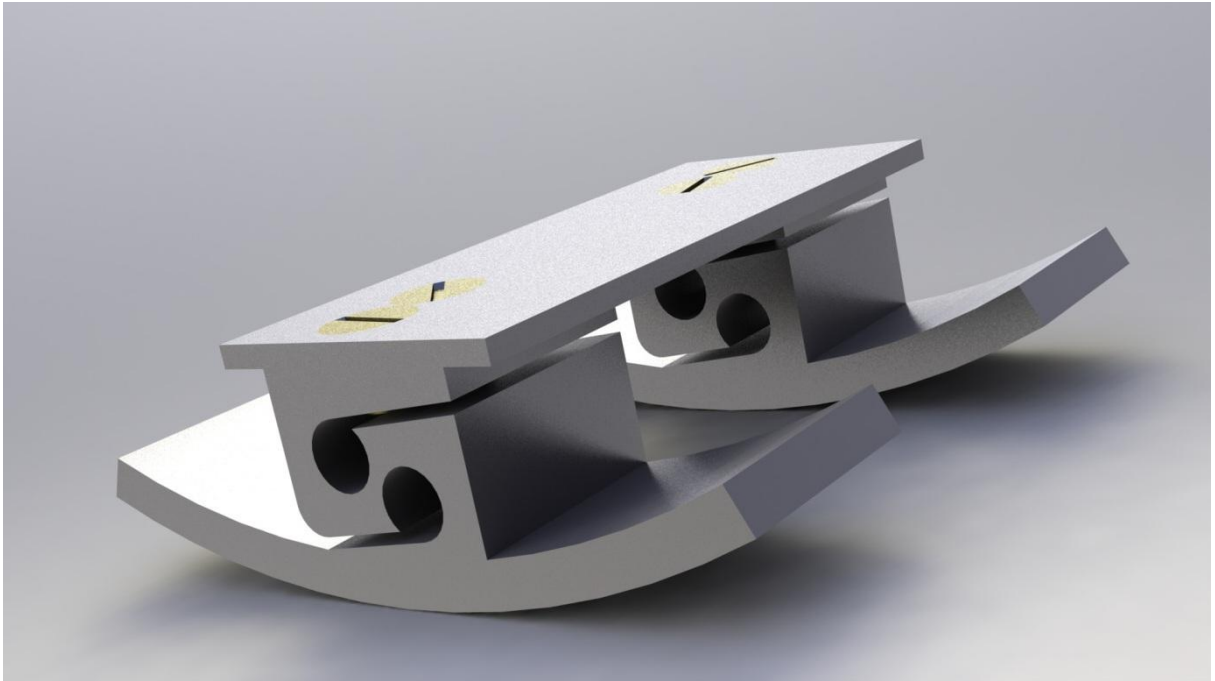


Figura 3.13: Imagem gerada em software do subconjunto da plataforma de força móvel desenvolvida.

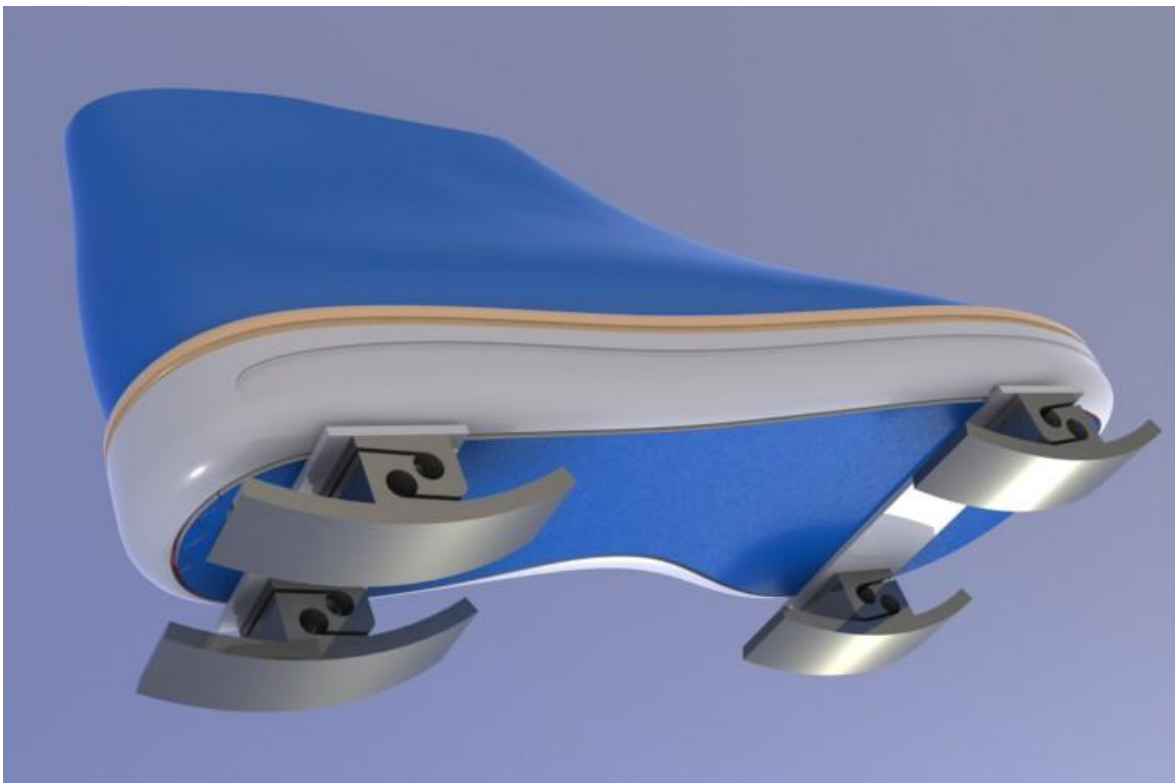


Figura 3.14: Imagem gerada em *software* da plataforma de força móvel desenvolvida engastada em solado de calçado.

Foram usinadas oito células de carga (ver Figura 3.15) em máquina de eletroerosão a fio, quatro engastadas em cada plataforma de força móvel. As vigas são constituídas de chapa de aço inoxidável de espessura 2 mm (ver Figura 3.17).



Figura 3.15: As oito células de carga usinadas em aço AISI 420C e um dos discos no qual foi recortado duas células de carga em máquina de eletroerosão a fio.

Pode-se perceber na Figura 3.15 que as células de carga após a usinagem na máquina de eletroerosão a fio ficam com acabamento ruim, queimadas externamente. As faces da célula de carga com esse acabamento não estão preparadas para a cimentação dos extensômetros. Assim, foi necessário lixar as células de carga com lixas de granulação de números 100, 220 e 400.

A Figura 3.16 apresenta uma das células de carga usinadas já com acabamento. Nela é possível visualizar os dois furos verticais com rosca M4, com os quais a célula de carga é engastada na viga.

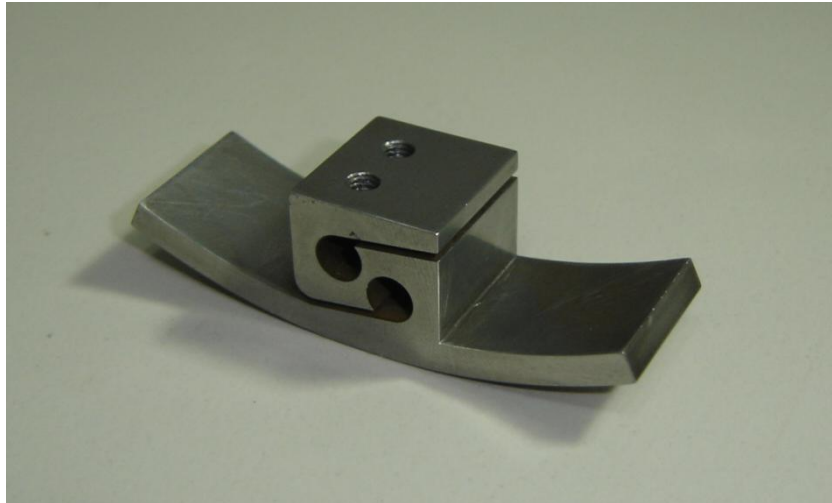


Figura 3.16: Célula de carga desenvolvida usinada em aço AISI 420C.

A Figura 3.16 revela que obtém-se uma boa qualidade na usinagem com máquina de eletroerosão a fio, pois a incerteza nas cotas da célula de carga foi da ordem de décimos de milímetro. Segue na Figura 3.17 uma foto apresentando os quatro subconjuntos das duas plataformas de força móvel e na Figura 3.18 e Figura 3.19 fotos das duas plataformas de força móvel engastadas ao solado dos calçados.

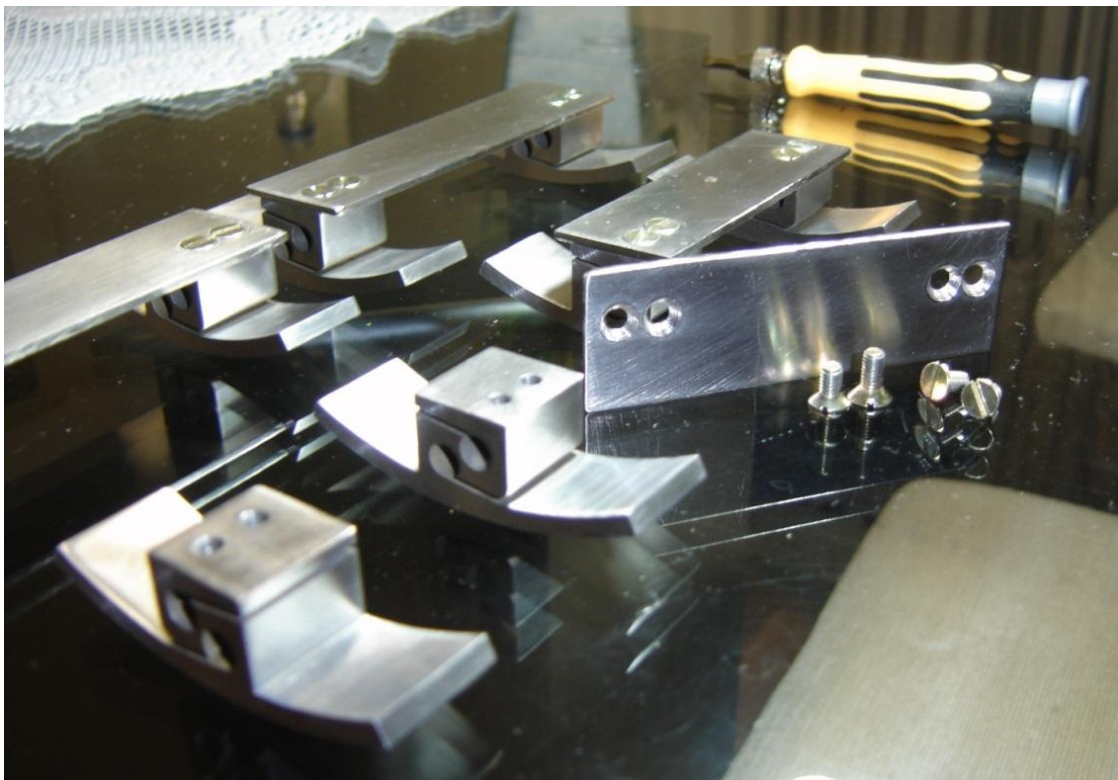


Figura 3.17: Os quatro subconjuntos das duas plataformas de força móvel.





Figura 3.18: As duas plataformas de força móvel engastadas ao solado do calçado.



Figura 3.19: As duas plataformas de força móvel vistas por um ângulo diferente.

Concluída a estrutura mecânica das plataformas de força móvel, a etapa seguinte foi a cimentação dos sensores. Foram adquiridos extensômetros unidirecionais simples de modelo PA-09-062AG-350-L do fabricante Excel Sensores. É importante salientar que esse fabricante

não fornece a incerteza relacionada à resistência nominal do *strain-gage*. As características desse sensor são:

- resistência elétrica: 350  $\Omega$ ;
- material da base: poliamida;
- material do filme metálico: constantan;
- auto-compensação de temperatura: para aço inoxidável;
- dimensões da grelha: 1,57 mm X 1,55 mm.

Optou-se por esse modelo de extensômetro pelas seguintes razões:

- 1) suporta uma tensão de referência maior em comparação a extensômetros de 120  $\Omega$  (em geral, *strain-gages* suportam uma corrente máxima na ordem de 25 mA, se o material onde for cimentado for bom condutor de calor). Além disso, quanto maior a resistência do extensômetro, maior a imunidade à ruídos causados por contatos de conexões (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007);
- 2) como o material utilizado na usinagem das células de carga foi o aço inoxidável AISI 420C, conseqüentemente escolheu-se extensômetros com auto-compensação para aço inoxidável, mesmo embora ainda seja uma compensação térmica genérica, pois o fabricante apenas dispõem de modelos com auto-compensação de temperatura para aço, alumínio e aço inoxidável. O ideal é que ambos os coeficientes térmicos de expansão do material da célula de carga (AISI 420C) e da liga do *strain-gage* sejam iguais. Outro fator que ocasiona desequilíbrio na ponte de Wheastone formada pelos extensômetros é o efeito do gradiente de temperatura devido ao deslocamento espacial entre os *strain-gages*. Assim, é importante que as posições de cimentação dos sensores sejam o mais perto possível;

- 3) sendo 3mm o raio do furo (ver Figura A.2 no Anexo) da célula de carga onde ocorre a região de máxima sensibilidade (maiores tensões mecânicas), o comprimento da grade do extensômetro não deveria exceder 0,3 mm – tipicamente o comprimento da grade não deve ser maior que 10% do raio do furo – (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007). Então, dadas as opções de tamanhos de grelha fornecidas pelo fabricante Excel Sensores, teve-se que optar pelo *strain-gage* de dimensões 1,57 mm X 1,55 mm (o menor entre todos), 52% do raio do furo.

Considerando-se que a célula de carga desenvolvida neste trabalho contém duas faces de interesse (veja na Figura 3.9) – onde ocorrem as grandes deformações, regiões de máximas tensões mecânicas – e sendo que ambas se deformam positivamente no sentido transversal à linha de maior sensibilidade (veja Figura 3.23), a topologia de ponte de Wheastone completa com todos os *strain-gages* ativos não é possível. Assim a configuração de ponte adotada neste trabalho é completa, mas sendo dois *strain-gages* em função passiva (para compensação do efeito da temperatura).

No entanto, a Figura 3.9 não contém a informação completa sobre as orientações das tensões mecânicas nas faces de interesse e, cosequentemente, não é possível se determinar as corretas posições e orientações de cimentação dos *strain-gages* ativos e passivos para a maior sensibilidade possível da ponte de Wheastone. Assim, foi essencial realizar a simulação das tensões mecânicas resultantes nos eixos X (Figura 3.20), Y (Figura 3.21) e Z (Figura 3.22).

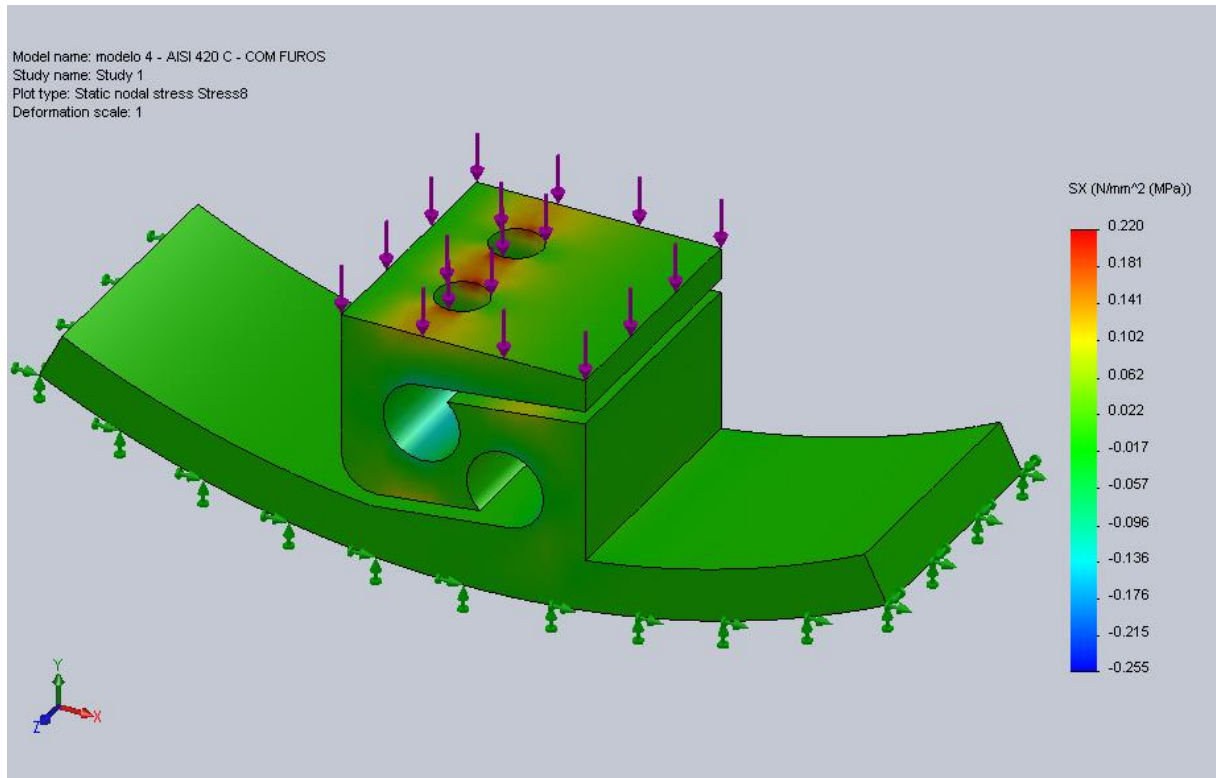


Figura 3.20: Resultados de tensões mecânicas no eixo X por análise linear estática da célula de carga.

As legendas em escala de cores apresentadas nas Figura 3.20 à Figura 3.22 indicam as tensões mecânicas em seu eixo. As tensões mecânicas variam entre seu valor máximo positivo (cor vermelha) e seu valor máximo negativo (cor azul), passando pelo seu valor zero indicado pela cor verde. O sentido positivo da tensão mecânica é de tração. Assim, as tensões mecânicas indicadas pela cor vermelha são de tração e as tensões mecânicas em cor azul são de compressão.

Como as faces de interesse na célula de carga estão no plano YZ, a atenção deve-se voltar à Figura 3.21 e Figura 3.22. Como as cores ocorrentes nas faces de interesse estão na escala entre as cores verde (tensão mecânica zero) e vermelho (máxima tensão mecânica positiva), conclui-se que ocorrem apenas tensões mecânicas positivas nos eixos Y e Z, ou seja, apenas forças de tração em ambos os eixos das faces de interesse.

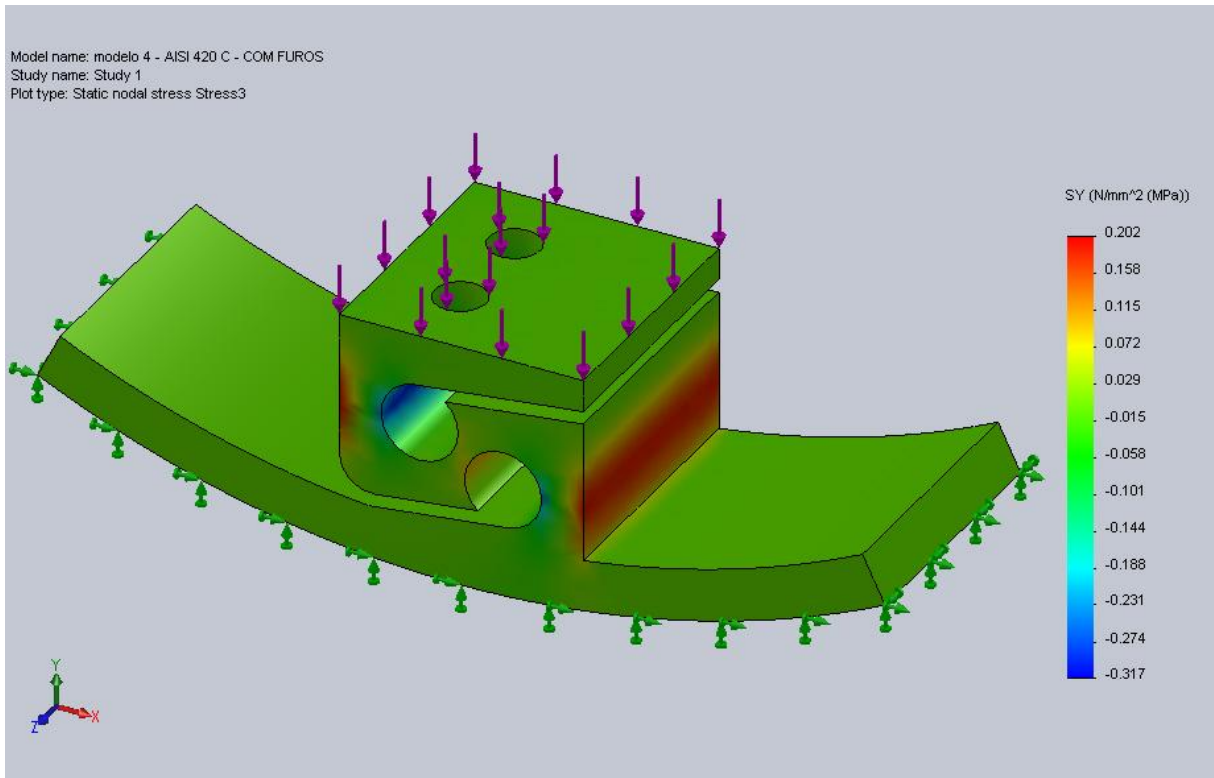


Figura 3.21: Resultados de tensões mecânicas no eixo Y por análise linear estática da célula de carga.

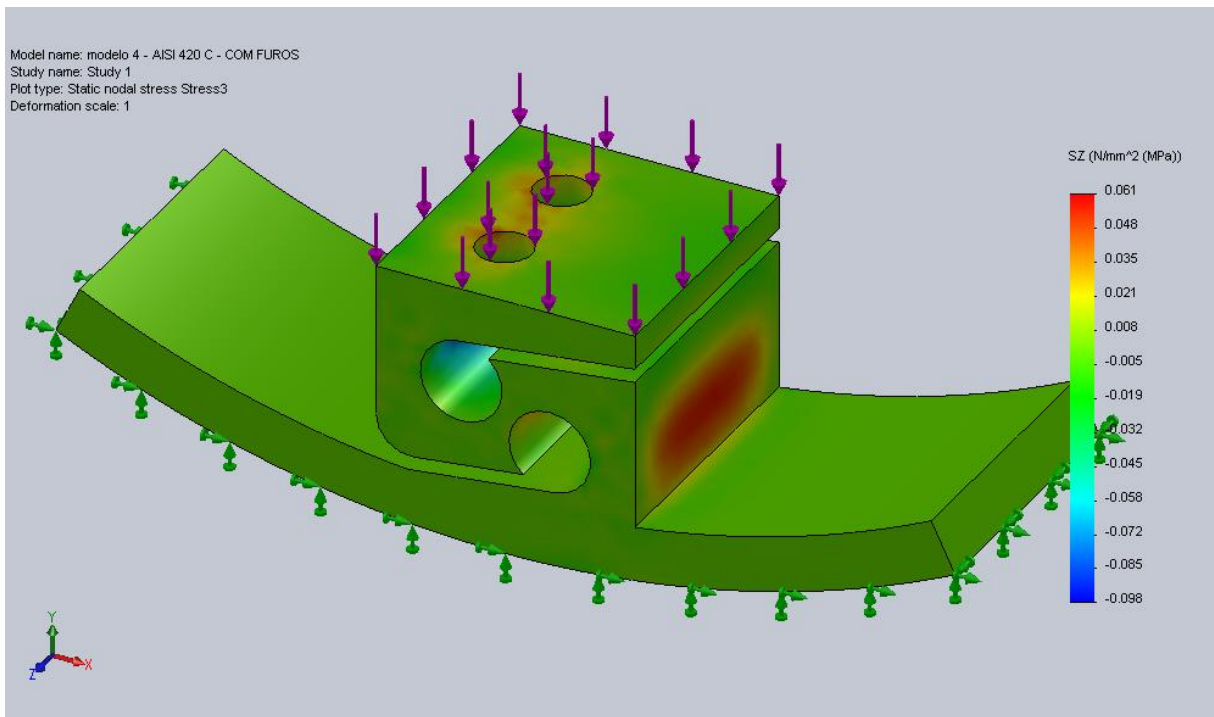


Figura 3.22: Resultados de tensões mecânicas no eixo Z por análise linear estática da célula de carga.

Dessa forma, chega-se a conclusão que o *strain-gage* ativo deve ser cimentado com orientação vertical (paralelo ao eixo Y) sobre a região de cor vermelha, e o *strain-gage* passivo deve ser cimentado com orientação horizontal (paralelo ao eixo Z) sobre a região verde, fora da região amarela/vermelha. A Figura 3.23 apresenta o *layout* de cimentação dos *strain-gages* adotado neste trabalho. A linha em cor vermelha define a região de maior sensibilidade (regiões de máximas tensões mecânicas), o *strain-gage* em cor violeta representa o sensor ativo e o *strain-gage* em cor verde representa o sensor passivo.

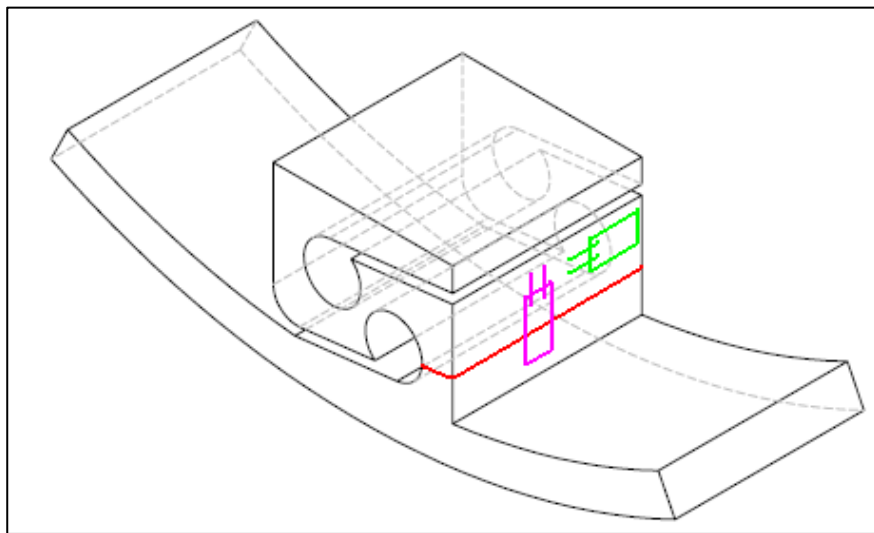


Figura 3.23: Disposição e orientação dos *strain-gages* (o *strain-gage* em cor violeta representa o sensor ativo e o *strain-gage* em cor verde representa o sensor passivo).

Para a cimentação dos *strain-gages* foram realizados os seguintes procedimentos:

- 1) aplicação de lixas com numeração de granulação 100, 220, 400 e 600 (nesta sequência);
- 2) remoção de gorduras e partículas de poeira com álcool isopropílico utilizando pedaços de algodão;
- 3) marcação da linha de maior sensibilidade utilizando grafite e paquímetro;

- 4) posicionamento do *strain-gage* por fita adesiva na posição determinada;
- 5) aplicação de cola (éster de cianoacrilato) na região de cimentação do *strain-gage*;
- 6) impressão de força com dedo sobre o sensor até a secagem da cola.

Após a cimentação dos *strain-gages*, foram colados terminais de ligação. Segue na Figura 3.24 as oito células de carga com os *strain-gages* e os terminais de ligação colados.

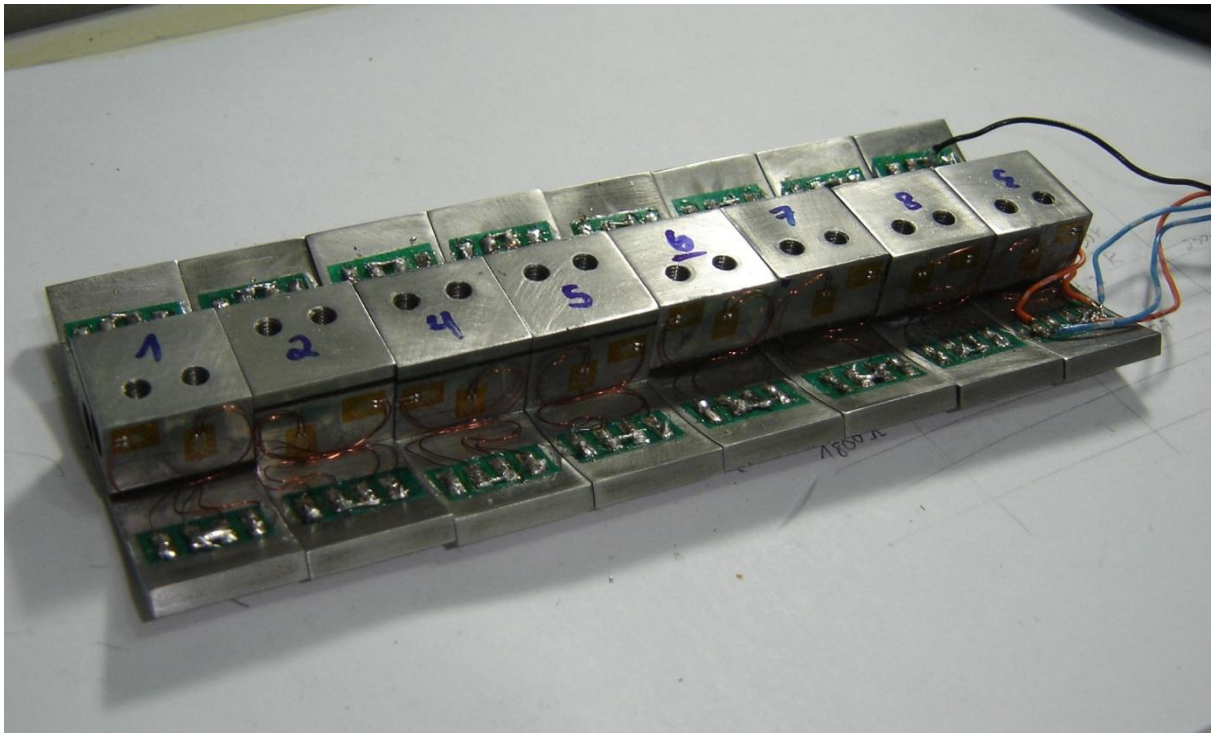


Figura 3.24: As oito células de carga com os *strain-gages* e os terminais de ligação colados.

As células de carga foram engastadas nos calçados conforme o *layout* esboçado na Figura 3.25. O resultado final da montagem da plataforma de força móvel é apresentado na Figura 3.26.

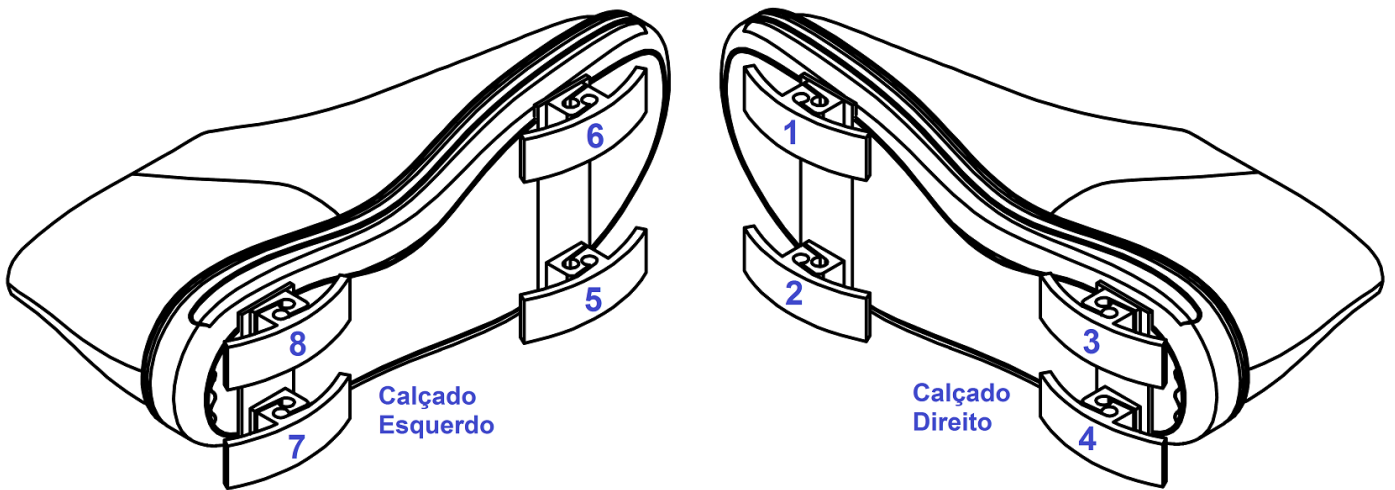


Figura 3.25: Posicionamento das células de carga em cada calçado.

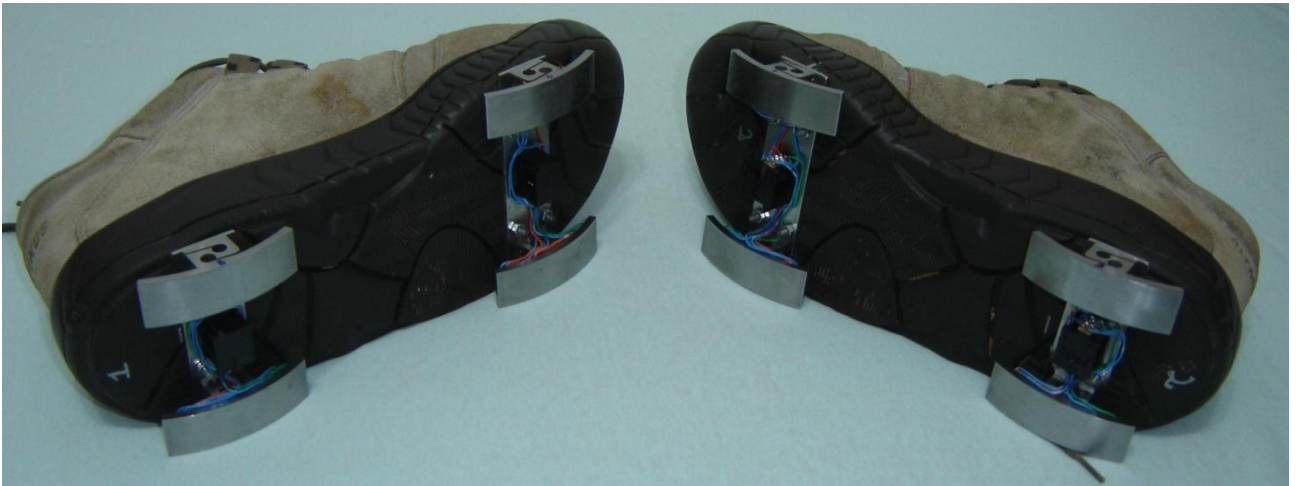


Figura 3.26: Protótipo da plataforma de força móvel montado.



### 3.3 Projeto do Sistema de Condicionamento

O diagrama de blocos da Figura 3.27 representa simplificadaamente os estágios que compõem o sistema de condicionamento desenvolvido neste trabalho. O primeiro bloco compõe o estágio do circuito gerador de tensão de referência de aproximadamente 5 V, através do circuito integrado REF02. O segundo bloco é composto pela ponte completa de *strain-gages* de 350  $\Omega$  (dois sensores ativos e dois passivos). No terceiro bloco é utilizado o amplificador de instrumentação AMP02. O seu ganho é dado pela Equação (3.1).

$$G = \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 \quad (3.1)$$

Sendo o resistor utilizado  $R_G = 56 \Omega$ , o ganho do terceiro estágio é, então, de aproximadamente  $G = 894$ .

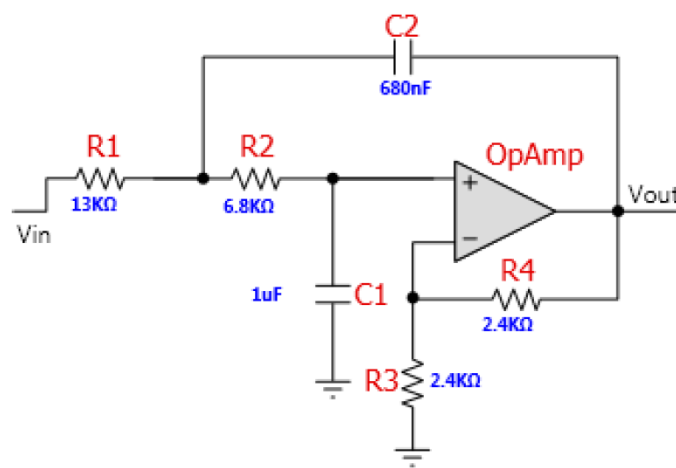


Figura 3.27: Diagrama de blocos do sistema de condicionamento desenvolvido.

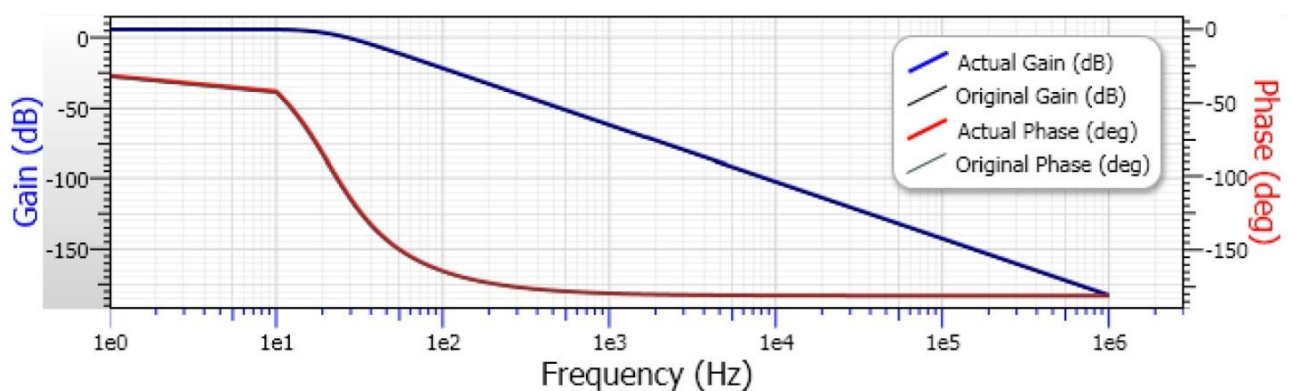
Para o projeto do quarto e último bloco filtro *anti-aliasing* foi utilizado o *software* FilterPro™ 3.1.0 da Texas Instruments, Inc. Segue na Figura 3.28 o esquemático elétrico do circuito de filtro *anti-aliasing* desenvolvido e o respectivo gráfico de bode. O esquemático elétrico do circuito condicionador completo pode ser observado na Figura 3.29. As características de entrada para o *design* do filtro no *software* foram:

- Tipo de filtro: passa-baixa;
- Ganho: 2 (6,02 dB);

- Frequência de corte: 20 Hz;
- Ripple da banda passante: 1 dB;
- Ordem do filtro: 2;
- Função para aproximação matemática: Butterworth;
- Topologia de filtro: Sallen-key;
- Tolerância do resistor e capacitor: 5%;



(a)



(b)

Figura 3.28: (a) Esquemático elétrico do circuito de filtro *anti-aliasing* (b) e o respectivo gráfico de bode desenvolvido no *software* FilterPro™ 3.1.0 da Texas Instruments, Inc.

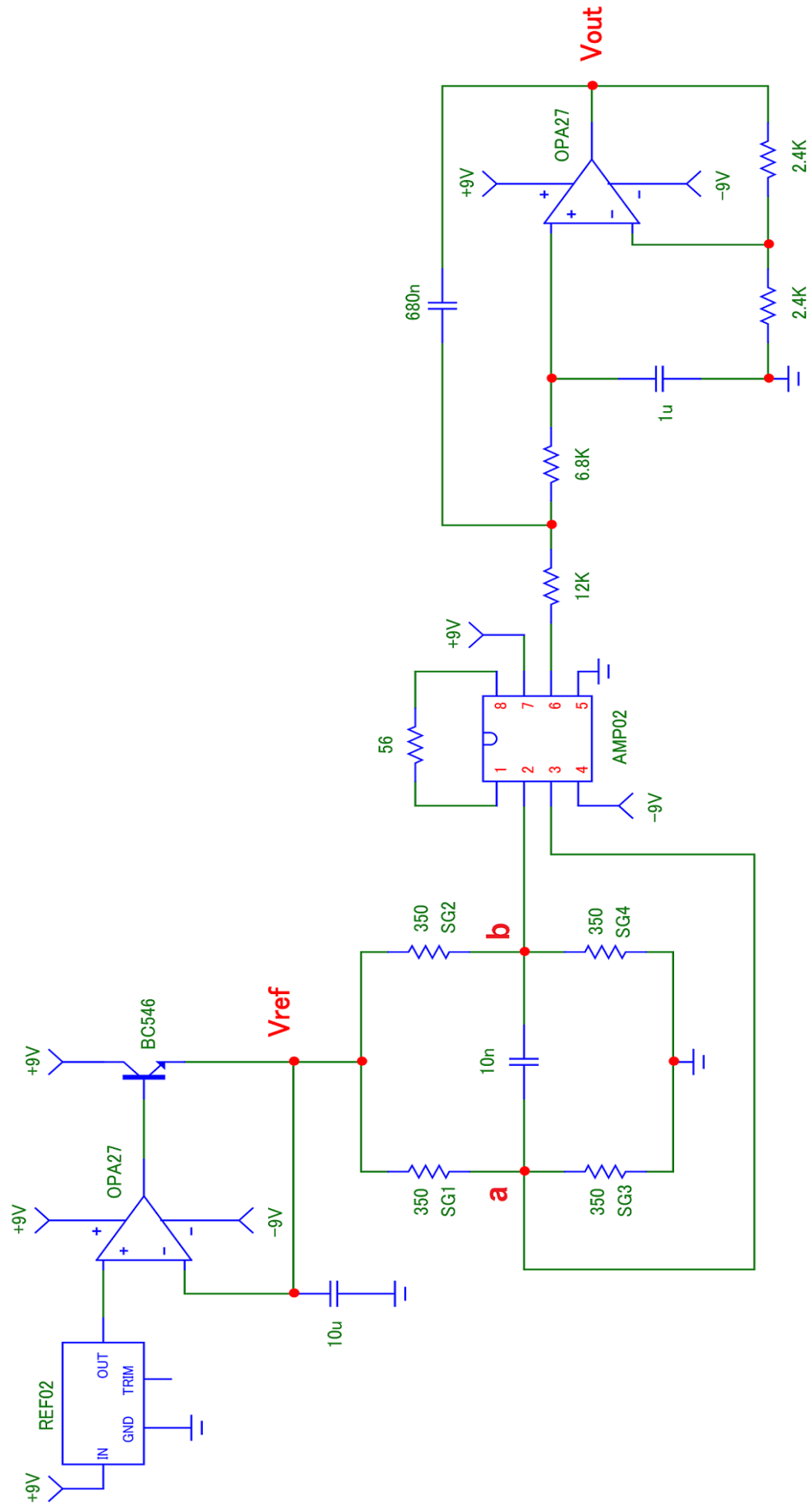


Figura 3.29: Esquemático elétrico de um canal do circuito de condicionamento desenvolvido.

A corrente que passa por cada *strain-gage* é, aproximadamente, dada pela Equação (3.2).

$$I = \frac{V_{ref}}{2R_{SG}} = \frac{5}{2 \cdot 350} = 7,14 \text{ mA} \quad (3.2)$$

Sendo o ganho do bloco diferencial e o ganho do filtro *anti-aliasing* de 894 e 2, respectivamente, então, a relação entre a tensão de saída  $V_{out}$  do circuito de condicionamento e a tensão diferencial da ponte de Wheastone  $V_{ab}$  é dada pela Equação (3.3).

$$V_{out} = 2 \cdot 894 \cdot V_{ab} = 1788V_{ab} \quad (3.3)$$

Considerando a configuração de ponte de Wheastone implementada nesse trabalho é completa (dois *strain-gages* ativos e dois *strain-gages dummy*), a equação teórica que descreve a tensão diferencial da ponte de Wheastone  $V_{ab}$  e a tensão de referência  $V_{ref}$  é dada pela Equação (3.4).

$$V_{ab} = \frac{K}{4} (-\varepsilon_1\gamma + \varepsilon_2 - \varepsilon_3\gamma + \varepsilon_4)V_{ref} \quad (3.4)$$

No entanto, as deformações sofridas pelos *strain-gages* em função passiva podem ser consideradas desprezíveis, análise realizada a partir do resultado de simulação por FEA ilustrado na Figura 3.22. Assim, a Equação (3.4) pode ser aproximada conforme apresenta a Equação (3.5).

$$V_{ab} \cong \frac{K}{4}(\varepsilon_2 + \varepsilon_4)V_{ref} \quad (3.5)$$

Pode-se, agora, reescrever a Equação (3.6) em função da tensão de referência ( $V_{ref}$ ) e as deformações relativas ( $\varepsilon$ ) ficando conforme a Equação (3.6) apresenta.

$$V_{out} \cong 1788 \frac{K}{4}(\varepsilon_2 + \varepsilon_4)V_{ref} \quad (3.6)$$

Para a concepção da placa de circuito impresso do circuito de condicionamento do sinal foi utilizado o *software* Eagle 6.1.0 da CadSoft. Segue na Figura A.8 a *layer* das trilhas da placa de circuito impresso do circuito condicionador e na Figura 3.30 as duas placas (cada uma para tratar do sinal de quatro células de carga de uma das duas plataformas de força móvel) de condicionamento confeccionadas artesanalmente.

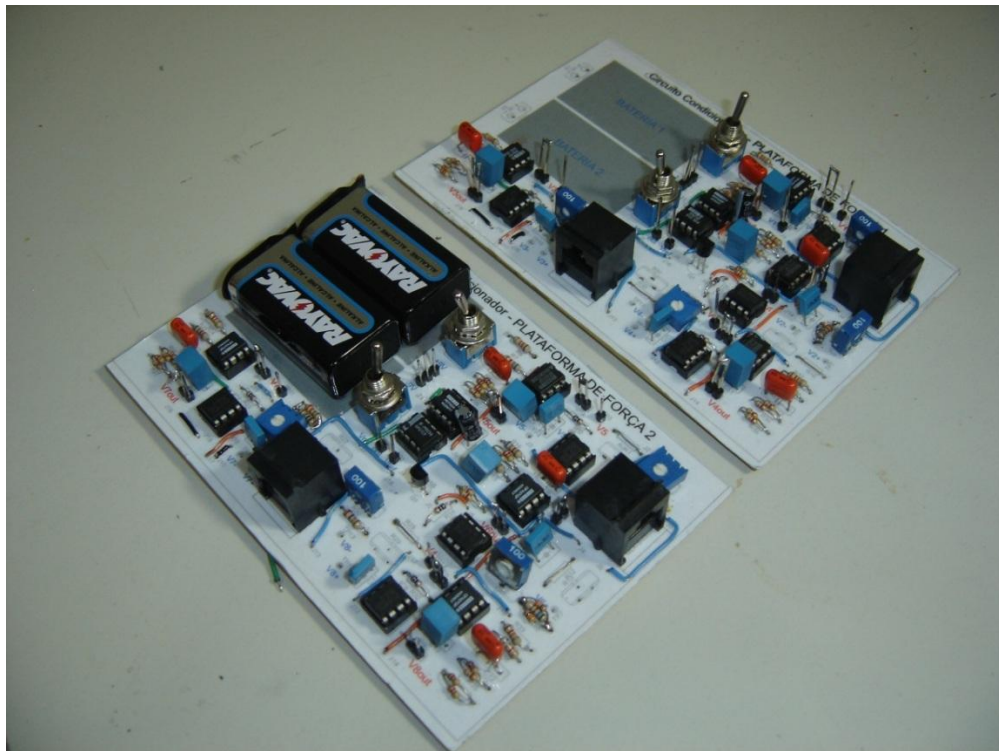


Figura 3.30: Foto das duas placas de condicionamento.

A alimentação das placas de condicionamento é feita por bateria de 9 V. Além disso, é possível visualizar na Figura 3.30 que há conector fêmea do tipo RJ45, pois a conexão elétrica entre os *strain-gages* engastados na plataforma de força móvel se dá através de cabos ethernet comuns. Assim, da mesma forma, são instalados também conectores fêmea do tipo RJ45 nas vigas das plataformas de força móvel. Essa escolha de conexão foi decidida pela praticidade de montagem e desmontagem do sistema e pela proteção aos fios devido ao revestimento do cabo.

### 3.4 Cadeia de Medidas

A Figura 3.31 apresenta a cadeia de medidas proposta neste trabalho. A força peso aplicada ao calçado deforma elasticamente a célula de carga que está engastada ao mesmo. Por conseguinte, o *strain-gage* sofre a mesma deformação relativa da célula de carga a que está cimentado, ocorrendo uma variação em sua resistência. Assim, a tensão diferencial da ponte de wheatstone formada pelos extensômetros é amplificada proporcionalmente à força peso aplicada. O estágio de aquisição digital do sinal será visto mais detalhadamente na seção 3.5.

Sendo a resolução desejada de saída – maior salto da medida em resposta a uma variação infinitesimal do mensurando – do circuito condicionador de sinal de 0,01 V, e sendo a sua faixa de operação desejada de 7,2 V – foi escolhido esse valor pois a alimentação do circuito condicionador de sinal é limitada por bateria de 9 V e devido a perdas de tensão nos componentes eletrônicos – a faixa dinâmica (DR) desejada do sistema é dada pela Equação (3.7).

$$DR = \left| \frac{7,2V - 0V}{0,01V} \right| = 720 \quad (3.7)$$

Assim, a resolução desejada para a variável de entrada do sistema (carga) – a menor variação do sinal de entrada (mensurando) que resulta em uma variação mensurável na saída – é dada pela Equação (3.8).

$$\text{resolução de entrada} = \left| \frac{90kg - 0kg}{720} \right| = 0,125 \text{ kg} \quad (3.8)$$

Dada a faixa dinâmica desejada do sistema pela Equação (3.8), o mínimo número de bits necessário para o ADC é dado pela Equação (3.9).

$$\begin{aligned} 2^n &= 720 \\ \log 2^n &= \log 720 \\ n &= \frac{\log 720}{\log 2} = 9,49 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Arredondando o valor de  $n$  calculado na Equação (3.9) para o primeiro número inteiro maior, tem-se que o mínimo número de bits necessário para discretizar a variável de entrada (carga) que atenda a resolução desejada é de  $10\text{bits}$ .

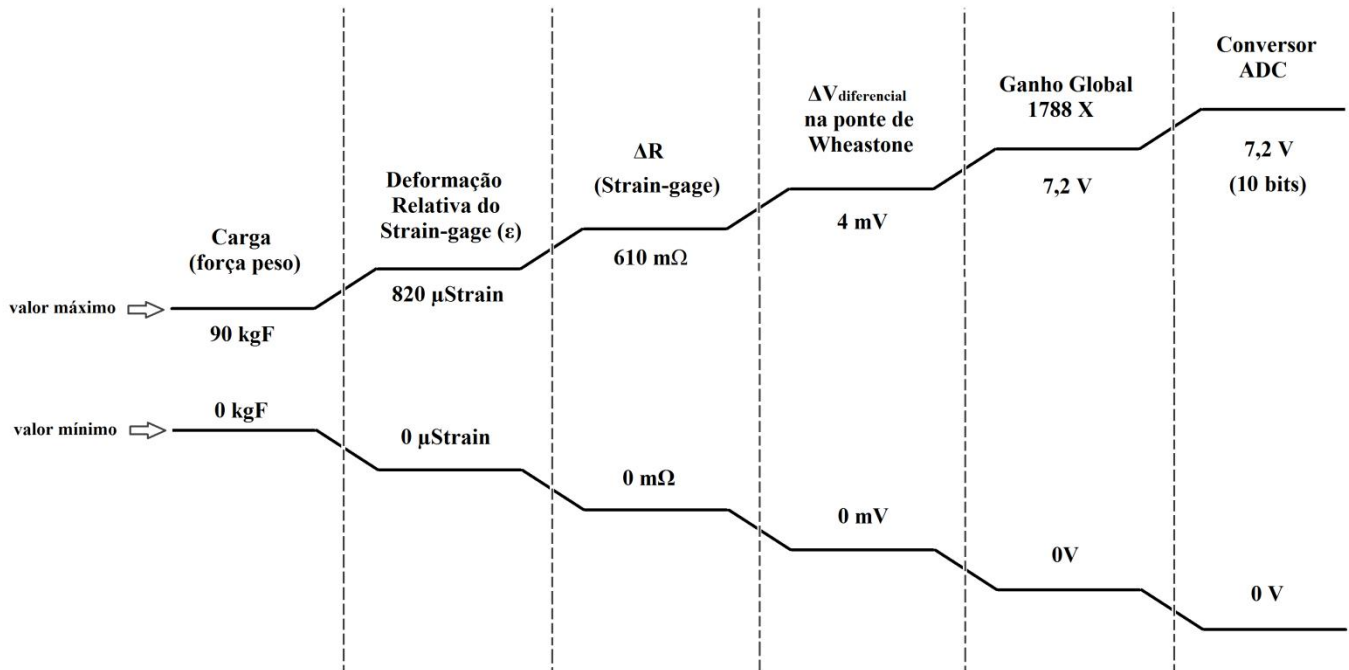


Figura 3.31: Cadeia de medidas proposta.

### 3.5 Procedimentos de Aquisição dos Sinais

Para adquirir os sinais provenientes das oito células de carga, foi implementada a rotina em *software* LabVIEW<sup>TM</sup> 8.6 ilustrada na Figura 3.32. A taxa de amostragem e o número de amostras para o período de aquisição são configurados pelos blocos *rate* e *number of samples*, respectivamente. O bloco DAQ Assistant faz a interface com módulo ADC da National Instruments, NI USB-6009, o qual envia os dados adquiridos via porta USB para o microcomputador portátil. Esse módulo apresenta as seguintes características:

- 8 portas analógicas de entrada (14 bits, 48 kSample/s);
- 2 portas analógicas de saída (12 bits, 150 Sample/s);
- 12 portas digitais I/O;
- Contador de 32 bits.



Para as portas analógicas de entrada, as características são:

- faixa máxima de tensão elétrica:  $\pm 10$  V;
- exatidão na faixa máxima de tensão elétrica: 138 mV
- exatidão na faixa mínima de tensão elétrica (entre 1 V e -1 V): 37,5 mV

Os dados de cada um dos oito canais são escritos (pelo bloco *write to measurement*) em arquivo texto em 8 vetores distintos, e armazenados no disco rígido do microcomputador. Por fim, os dados são geradas as curvas dos ensaios experimentais através do *software* MatLab<sup>®</sup>.

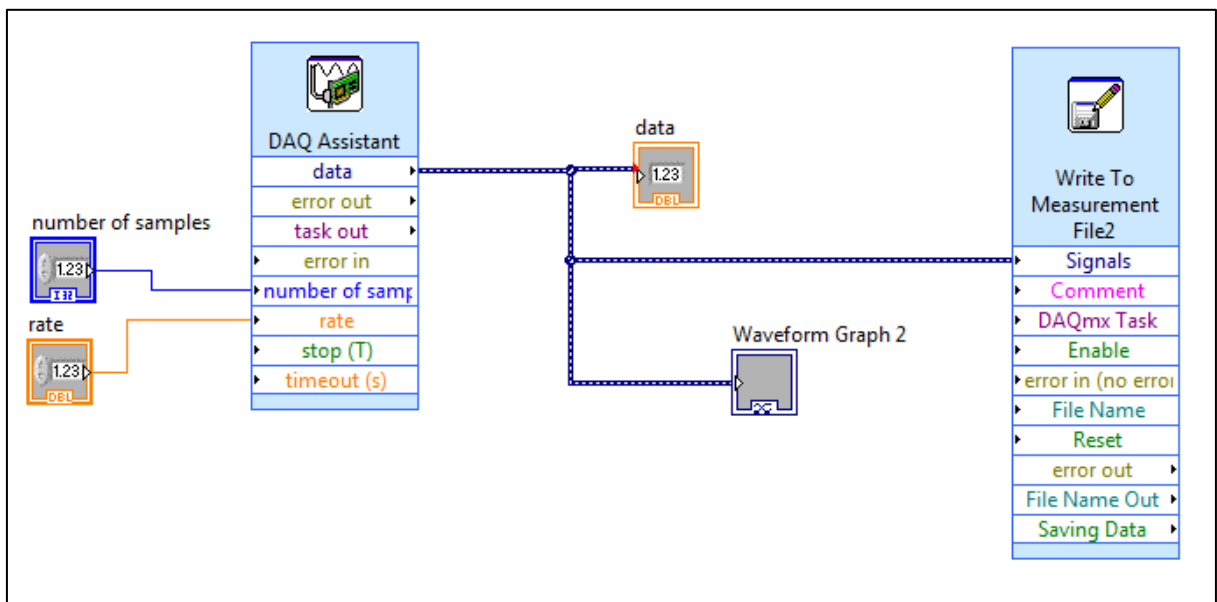


Figura 3.32: Rotina desenvolvida no *software* LabVIEW<sup>™</sup> 8.6 para aquisição dos dados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os métodos e procedimentos de validação por ensaios experimentais das partes e projetos envolvidos neste trabalho. Para os casos aplicáveis, serão feitas comparações com as estimativas teóricas realizadas através de simulações no Capítulo 3.

Na seção 4.1 é apresentado o resultado do ensaio de aferição do filtro *anti-aliasing* projetado para o sistema de condicionamento de sinais desenvolvido neste trabalho. Para avaliar a fidelidade do filtro *anti-aliasing* projetado, será mensurado a amplificação/atenuação de algumas senóides de frequência em torno da frequência de corte de projeto.

Na seção 4.2 são apresentados os resultados da calibração estática das células de carga. Neste ensaio experimental realiza-se o procedimento de aplicação progressiva de carga individualmente em cada célula de carga e mede-se o seu respectivo sinal de saída da placa de condicionamento para se levantar a função de transferência, a fim de se validar a linearidade da resposta do sistema. É, ainda, realizado o levantamento do erro de linearidade e incerteza das medidas realizadas pelo instrumento utilizado nos experimentos.

Ainda na seção 4.2, são apresentados os resultados do ensaio experimental de validação das estimativas – por meio de simulações desenvolvidas na ferramenta Simulation do *software* SolidWorks® Office Premium 2010 – das primeiras frequências de ressonâncias do modelo teórico da célula de carga projetada neste trabalho. Neste ensaio experimental é utilizado um acelerômetro para se medir as ondas mecânicas propagadas na célula de carga originadas a partir de impacto mecânico impresso na peça. Com os dados armazenados em

um microcomputador pessoal portátil através do *software* LabVIEW™ 8.6, é gerado o gráfico do espectro de densidade de potência do sinal digital adquirido. Nesse gráfico é possível se visualizar as frequências mecânicas pouco amortecidas pela estrutura mecânica da célula de carga.

Por fim, na seção 4.3 são apresentados os resultados dos ensaios de conformação da forma de onda das forças normais de reação ao solado do calçado, em que a plataforma de força móvel está engastada, durante a marcha humana.

#### **4.1 Aferição do Filtro *Anti-Aliasing***

O filtro *anti-aliasing* foi projetado para ter ganho de 2 (6,02 dB) na banda passante e frequência de corte de 20 Hz. Para avaliar-se a fidelidade do filtro implementado na placa de condicionamento de sinais ao filtro projetado, foram aplicadas, na entrada do filtro, senoides de baixa frequência e efetuadas medidas com osciloscópio da resposta do sistema para estimativa dos valores de amplificação/atenuação dos sinais e, assim, comparar com o seu respectivo gráfico de bode teórico.

Devido as incertezas quanto aos valores dos componentes (resistores e capacitores) do circuito de filtro *anti-aliasing* e as medidas realizadas, a sua resposta em frequência medida sofre leve variação (como por exemplo o ganho da banda passante e a frequência de corte) em relação à resposta teórica calculada. Levando em conta que a marcha humana dificilmente supera os 5 Hz, leves variações na resposta em frequência do filtro não interferem no desempenho do sistema. Assim sendo, a intenção desta seção não é levantar a real resposta em frequência do filtro *anti-aliasing*, mas, sim, conferir se os parâmetros do filtro se aproximam do projeto.

A banda passante foi avaliada aplicando-se uma senoide de 5 Hz e 2 Vp (ver Figura 4.1). A resposta do sistema foi uma senoide de 5 Hz e 4 Vp, atrasada de aproximadamente 10 ms. Para avaliar a real frequência de corte do filtro *anti-aliasing*, ajustou-se a frequência de uma senoide de 2 Vp, aplicada à entrada do sistema, até que se obtivesse uma resposta com amplitude aproximada de 2,8 Vp (3 dB abaixo da resposta da banda passante). A frequência encontrada foi de, aproximadamente, 23 Hz (veja na Figura 4.2).

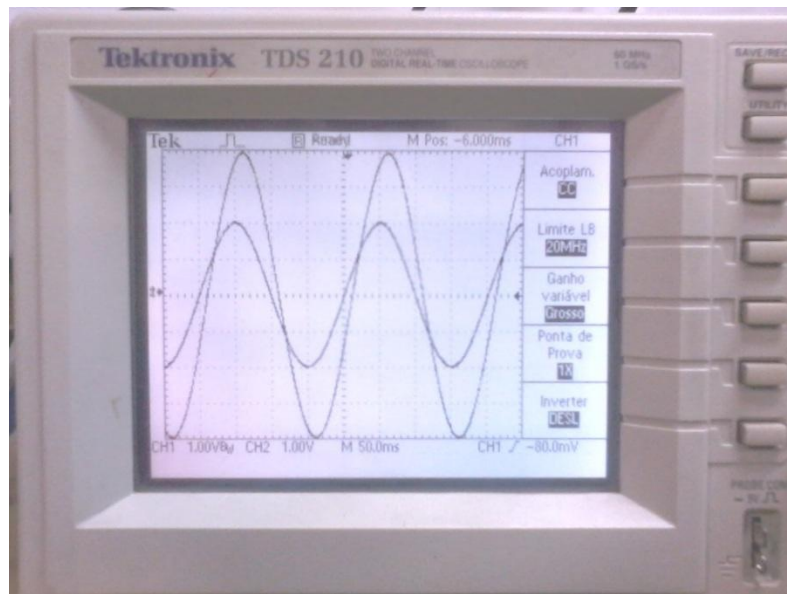


Figura 4.1: Caracterização da amplificação na banda passante do filtro *anti-aliasing*.

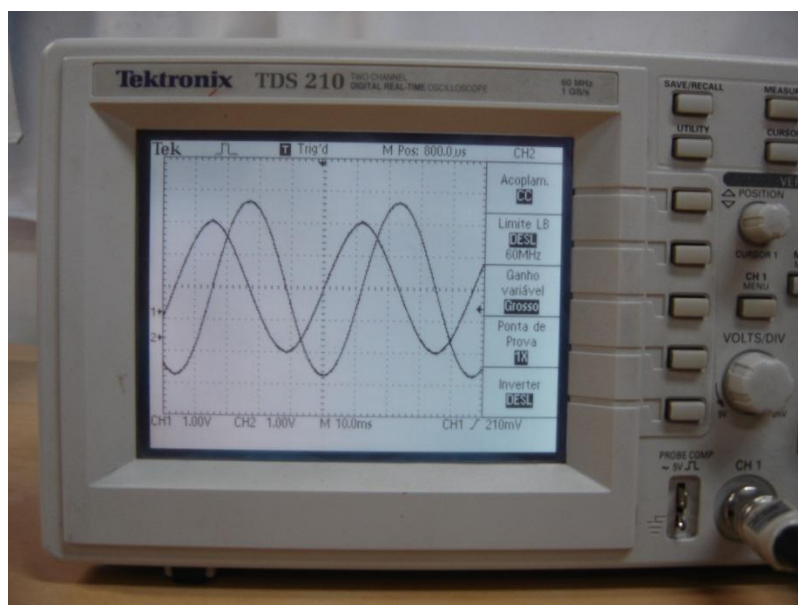


Figura 4.2: Avaliação da frequência de corte do filtro *anti-aliasing*.

## 4.2 Procedimentos de Calibração

Esta seção tem por objetivo avaliar a linearidade da resposta do sistema desenvolvido e a fidelidade das simulações computacionais de ressonância do modelo teórico da célula de carga. A subseção 4.2.1 trata do levantamento das funções de transferências do sistema de condicionamento dos sinais de cada célula de carga, e a subseção 4.2.2 trata da estimação das primeiras frequências de ressonância do protótipo usinado da célula de carga.

### 4.2.1 Calibração Estática

O ensaio de calibração estática consiste em aplicar progressivamente pesos padrão e realizar a leitura da tensão elétrica de saída do sistema de condicionamento do sinal da respectiva célula de carga, sem que a força resultante do peso da carga aplicada oscile durante a leitura do instrumento, ou seja, com a carga em regime de repouso.

A Figura 4.3 ilustra o procedimento do ensaio experimental de calibração efetuado neste trabalho. O procedimento consistiu na suspensão de pesos padrão (1 kg, 2 kg, 5 kg e 10 kg) por fios de *nylon* – sua massa é considerada desprezível – progressivamente, iniciando com 1 kg até 50 kg. Para a medição das tensões de cada saída do sistema de condicionamento de sinais foi utilizado o multímetro MDM 220, da ECB, de 4½ dígitos. A Tabela 4.1 apresenta os resultados das medidas de tensão elétrica do ensaio experimental.

Tabela 4.1: Medições de tensão elétrica para o ensaio experimental de calibração estática.

| Carga (kg) | Célula de Carga     |       |       |       |       |       |        |       |
|------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|            | 1                   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7      | 8     |
|            | Tensão Elétrica (V) |       |       |       |       |       |        |       |
| <b>0</b>   | 0,016               | 0,004 | 0,013 | 0,004 | 0,004 | 0,012 | -0,004 | 0,013 |
| <b>1</b>   | 0,091               | 0,049 | 0,093 | 0,076 | 0,093 | 0,093 | 0,110  | 0,098 |
| <b>2</b>   | 0,174               | 0,088 | 0,167 | 0,134 | 0,168 | 0,175 | 0,186  | 0,182 |
| <b>5</b>   | 0,416               | 0,205 | 0,405 | 0,328 | 0,400 | 0,405 | 0,387  | 0,420 |
| <b>10</b>  | 0,815               | 0,405 | 0,785 | 0,658 | 0,783 | 0,784 | 0,766  | 0,816 |
| <b>15</b>  | 1,186               | 0,594 | 1,206 | 1,005 | 1,158 | 1,220 | 1,129  | 1,192 |
| <b>20</b>  | 1,592               | 0,793 | 1,591 | 1,338 | 1,549 | 1,593 | 1,496  | 1,586 |
| <b>30</b>  | 2,350               | 1,198 | 2,356 | 2,028 | 2,320 | 2,373 | 2,267  | 2,371 |
| <b>40</b>  | 3,263               | 1,582 | 3,098 | 2,738 | 3,082 | 3,125 | 3,113  | 3,169 |
| <b>50</b>  | 4,042               | 1,984 | 3,942 | 3,441 | 3,848 | 3,958 | 3,919  | 3,972 |

Para o ensaio experimental de calibração estática, foi realizado uma série de medidas com aplicação de carga entre 0 kg e 50 kg, progressivamente. A carga 0 kg significa uma carga externa nula, em relação à célula de carga (a única força peso envolvida é a da própria célula de carga), orientada conforme ilustrado na Figura 3.8). Se o ensaio tivesse sido realizado com a célula de carga orientada com o seu eixo Y defasado de 180° em relação à vertical, ter-se-ia outro valor de medida, devido à própria força peso da peça. Para manter os pesos padrão suspensos sob a célula de carga, foi necessário a utilização de uma viga de aço (ver Figura 4.3) com massa de 0,123 kg.

Assim, o ensaio foi realizado com a peça orientada conforme pode ser visualizado na Figura 3.8, isto é, com o eixo Y verticalmente apontando para cima. Para se suspender os pesos padrão, foi utilizado fios de nylon, de massa desprezível, presos a uma viga com quatro furos simetricamente espaçados em suas extremidades (veja Figura 4.3), para que a força peso fosse uniformemente distribuída sobre a face de aplicação da carga, a face com plano paralelo ao plano XZ (veja Figura 3.22).

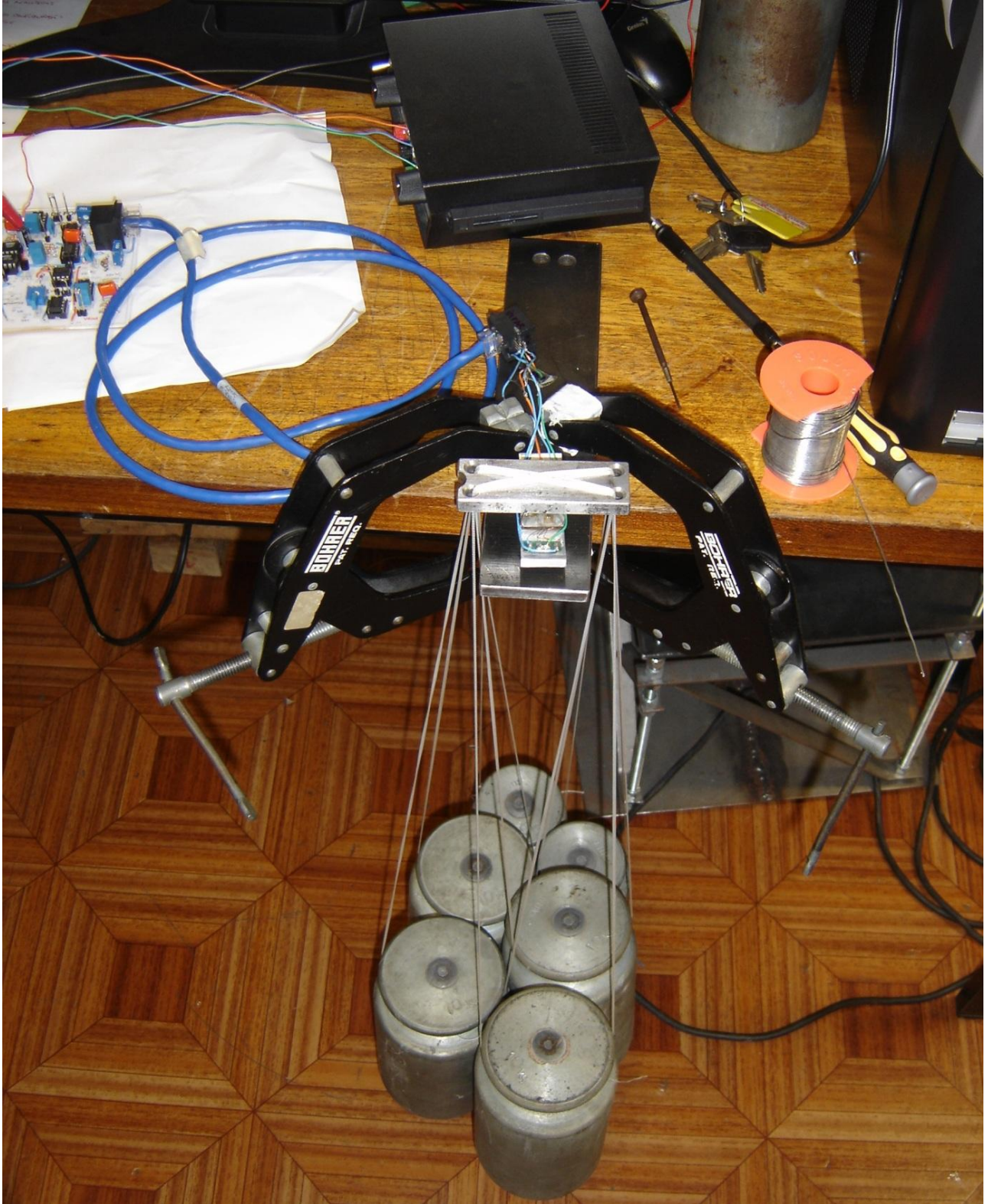


Figura 4.3: Foto do ensaio experimental de calibração estática das células de carga.

Devido à falta de acesso a recursos tecnológicos coerentes a uma execução confiável de ensaio experimental para levantamento dos dados de resposta do sistema, inevitavelmente teve-se que realizar o procedimento descrito. No entanto, para a obtenção de resultados mais precisos, seria necessário utilizar-se uma máquina de ensaios de aplicação de carga.

As Figura 4.4 a Figura 4.11 apresentam os gráficos das funções de transferência das células de carga 1 a 8, respectivamente. As curvas apresentadas foram geradas a partir do ensaio experimental de calibração estática, cujos dados estão expostos na Tabela 4.1. A curva em cor azul representa a curva obtida através do ensaio experimental, e a curva em cor vermelha é a reta analítica obtida através do método dos mínimos quadrados dos pontos da curva azul. Abaixo do gráfico da curva experimental e da curva analítica da função de transferência é apresentado o gráfico dos resíduos (erro), diferença entre o valor medido e a curva analítica obtida, com o objetivo de permitir visualmente se verificar a qualidade do ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

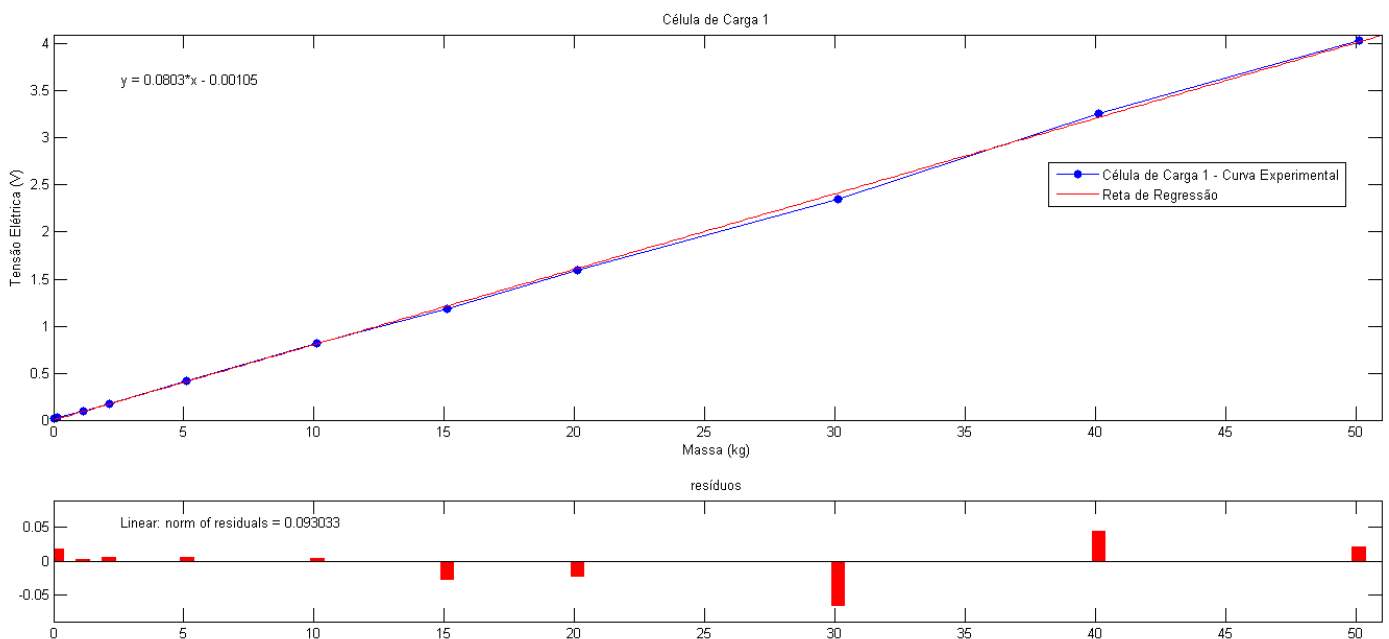


Figura 4.4: Curva da função de transferência para a célula de carga 1.



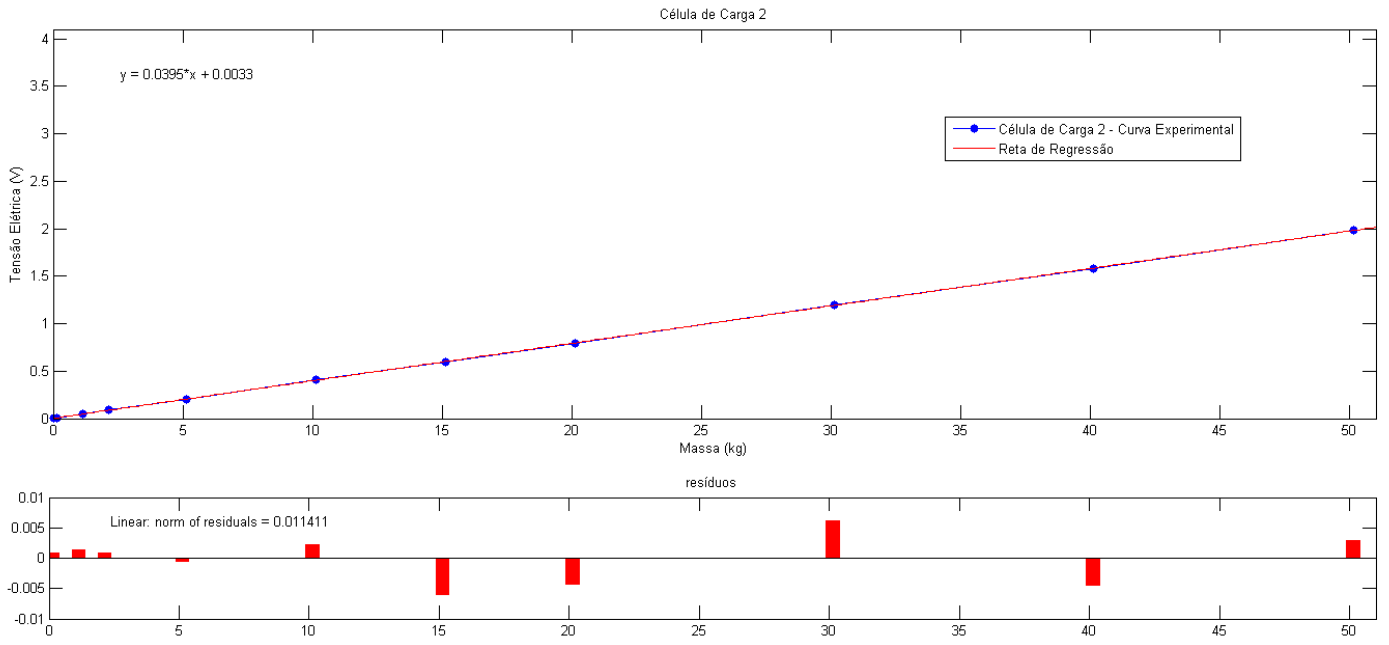


Figura 4.5: Curva da função de transferência para a célula de carga 2.

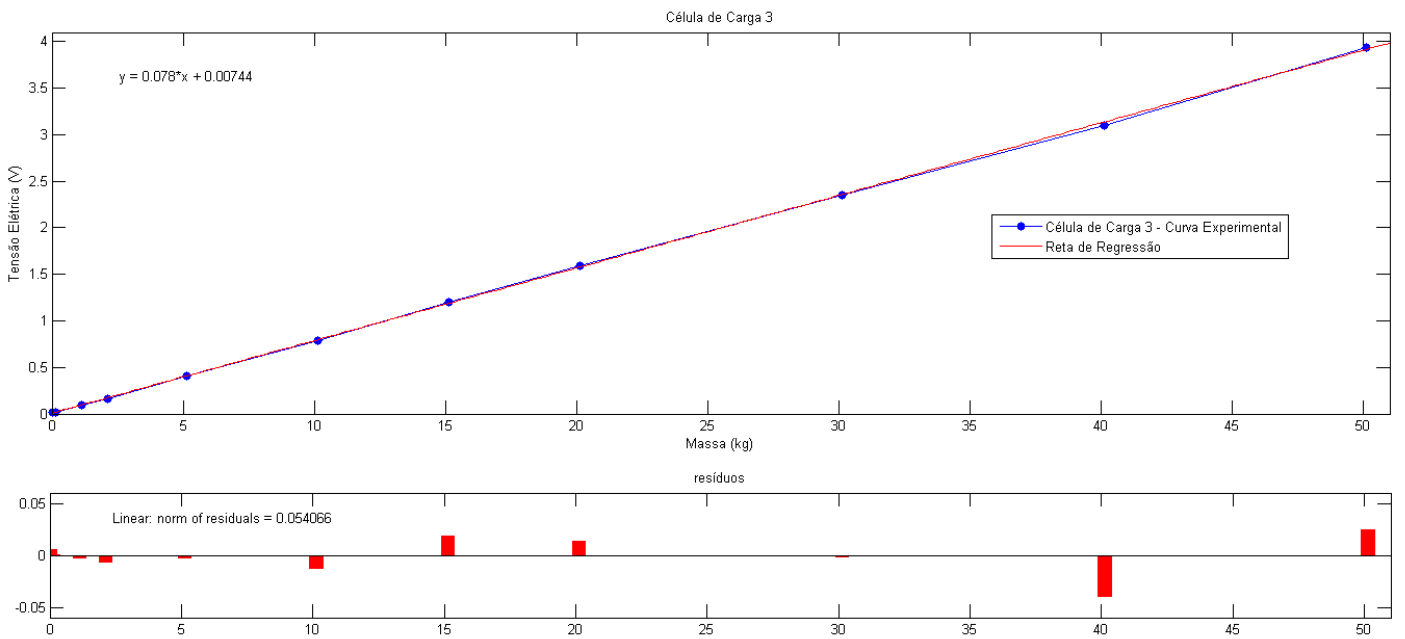


Figura 4.6: Curva da função de transferência para a célula de carga 3.

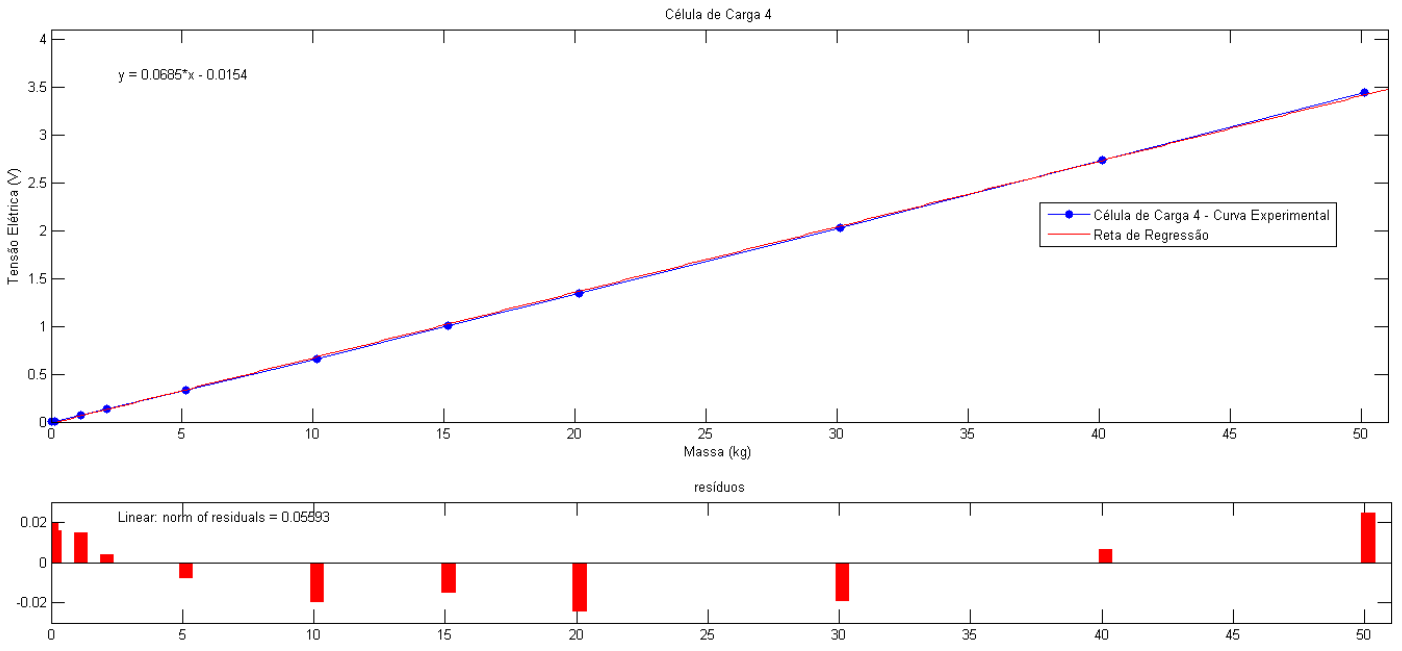


Figura 4.7: Curva da função de transferência para a célula de carga 4.

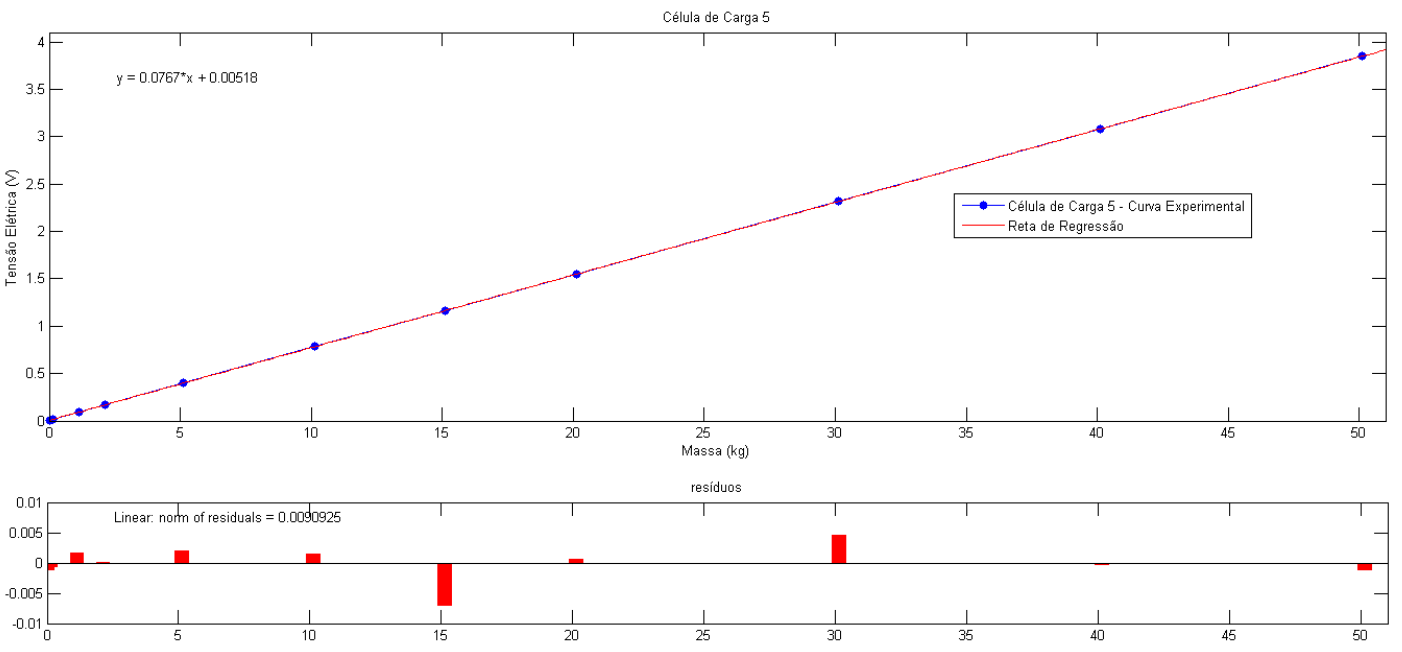


Figura 4.8: Curva da função de transferência para a célula de carga 5.

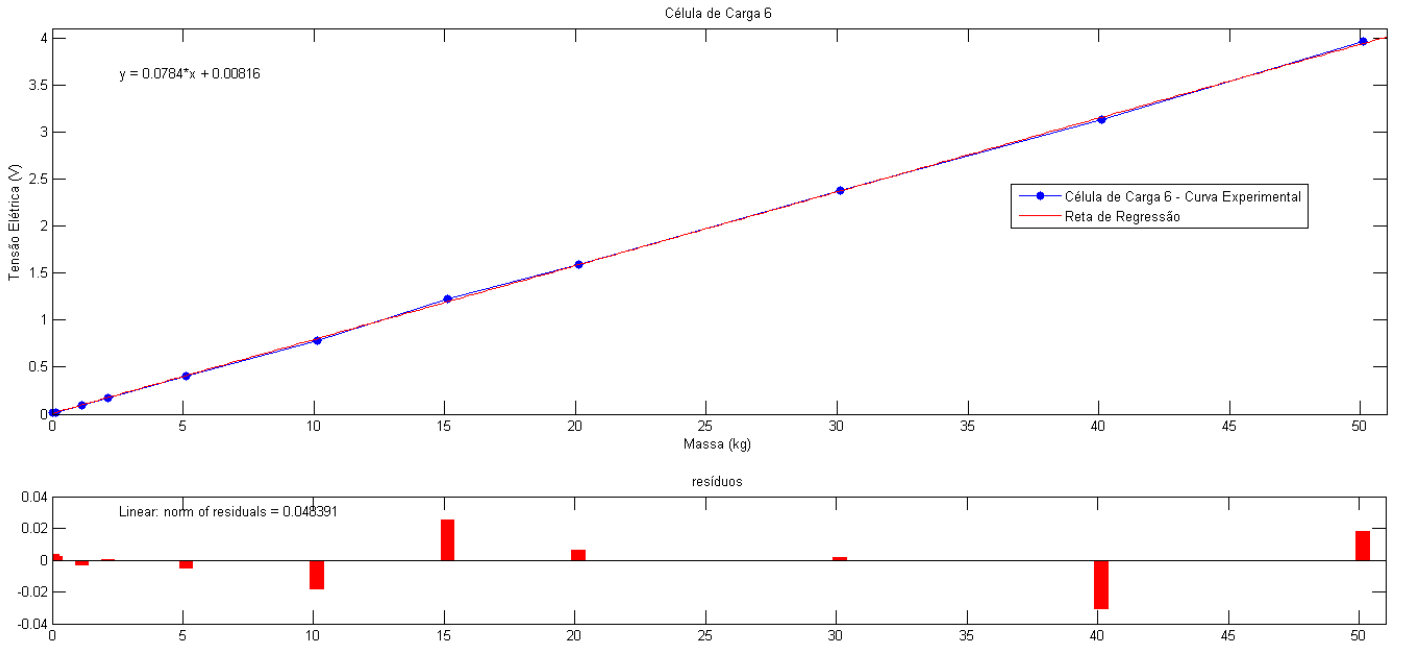


Figura 4.9: Curva da função de transferência para a célula de carga 6.

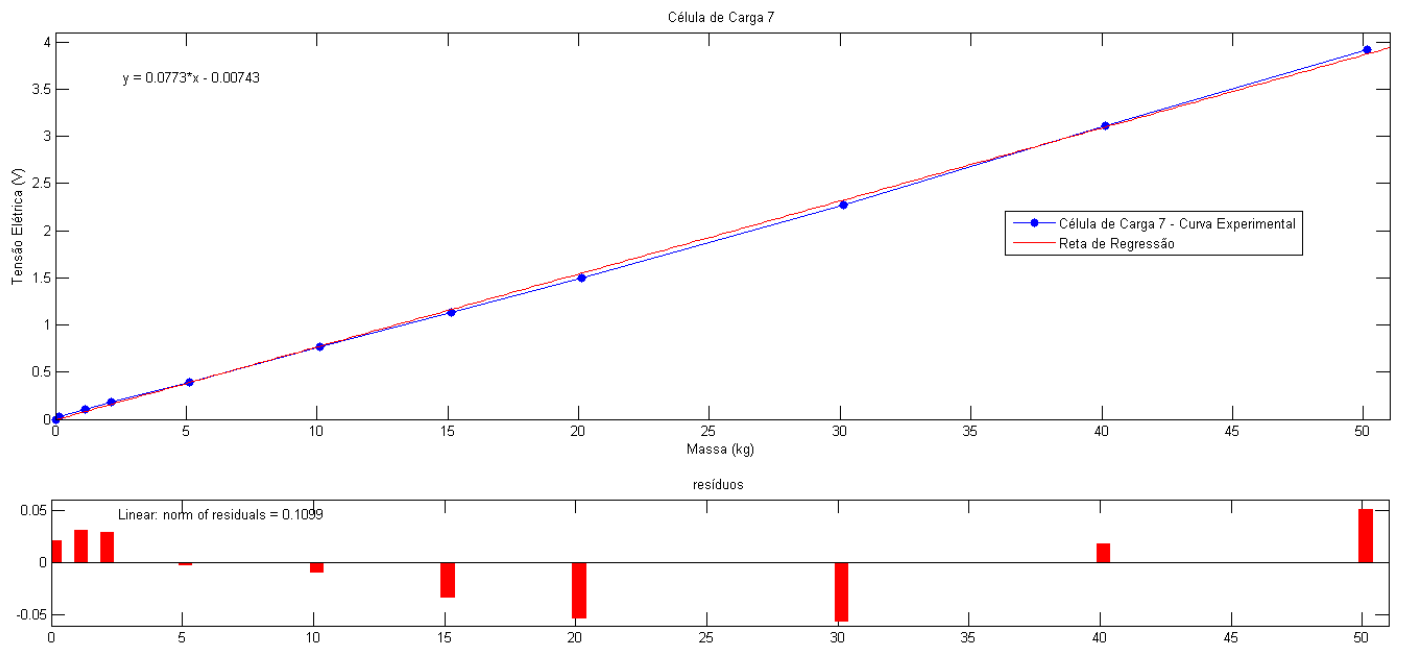


Figura 4.10: Curva da função de transferência para a célula de carga 7.

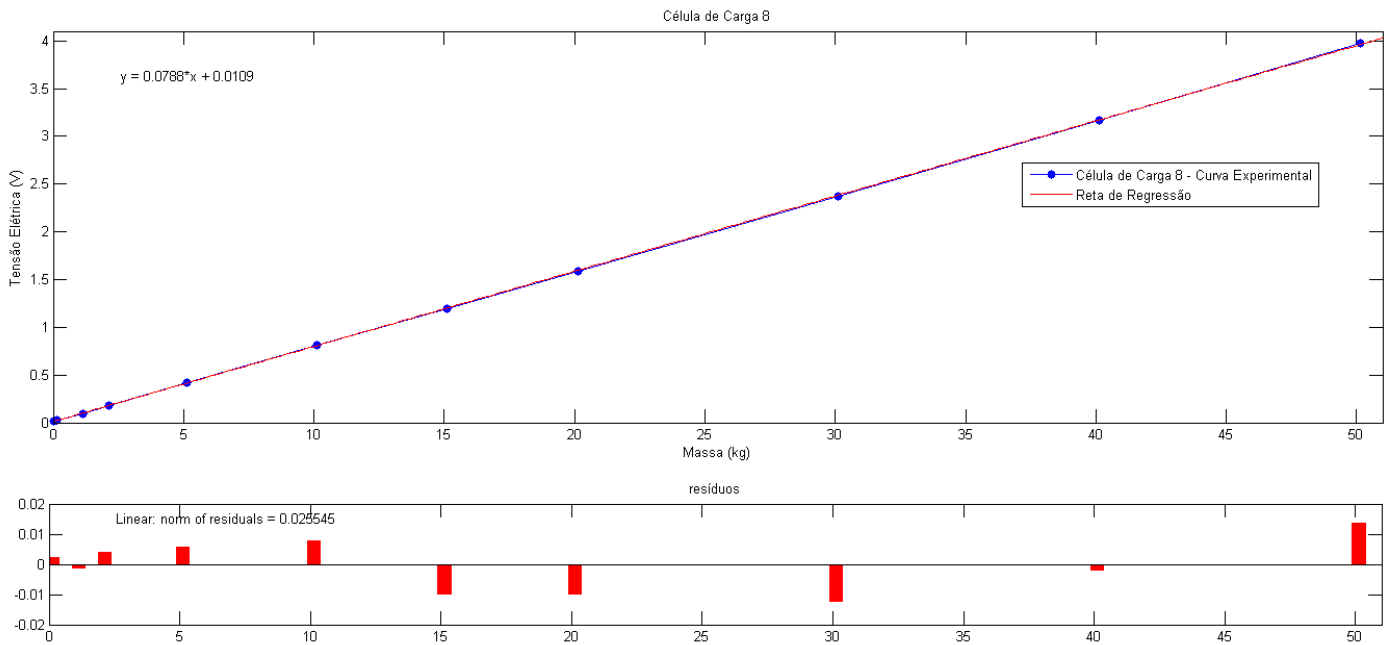


Figura 4.11: Curva da função de transferência para a célula de carga 8.

A Tabela 4.2 apresenta as equações das funções de transferência de todas as células de carga, onde a variável  $x$  representa a massa da carga (em kg) aplicada à respectiva célula de carga e  $y$  é a tensão elétrica (em V) na saída do circuito de condicionamento do sinal. Também são apresentadas alguns parâmetros de cada célula de carga baseado nos dados experimentais.

Tabela 4.2: Funções de transferência de todas as células de carga e alguns parâmetros.

| Célula de Carga         | Função de Transferência Estática | Sensibilidade ( $V/kgF$ ) | Resolução ( $kgF$ ) | Maior erro na medida (V) | Erro de linearidade (%) |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1                       | $y = 0,080x - 0,001$             | 0,080                     | 0,125               | 0,05                     | 1,25                    |
| 2                       | $y = 0,039x + 0,003$             | 0,039                     | 0,253               | 0,01                     | 0,25                    |
| 3                       | $y = 0,078x + 0,007$             | 0,078                     | 0,128               | 0,05                     | 1,25                    |
| 4                       | $y = 0,068x - 0,015$             | 0,068                     | 0,146               | 0,03                     | 0,86                    |
| 5                       | $y = 0,077x + 0,005$             | 0,077                     | 0,130               | 0,01                     | 0,25                    |
| 6                       | $y = 0,078x + 0,008$             | 0,078                     | 0,128               | 0,03                     | 0,75                    |
| 7                       | $y = 0,077x - 0,007$             | 0,077                     | 0,129               | 0,05                     | 1,25                    |
| 8                       | $y = 0,079x + 0,010$             | 0,079                     | 0,127               | 0,02                     | 0,50                    |
| <b>Média Aritmética</b> |                                  | <b>0,072</b>              | <b>0,146</b>        | <b>0,03</b>              | <b>0,8</b>              |

Os valores de erro de linearidade (%) constantes na Tabela 4.2 foram calculados, segundo BALBINOT & BRUSAMARELLO (2007), pela Equação (4.1), que é percentual da razão entre o máximo resíduo  $Res_{m\acute{a}x}$  (a máxima diferença entre o valor experimental medido e o valor teórico calculado pela método dos mínimos quadrados) e o fundo de escala de entrada  $FS_e$ .

$$Erro\ de\ Linearidade\ (\%) = \frac{Res_{m\acute{a}x}}{FS_e} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

O instrumento de medidas usado para caracterizar as repostas dos sistemas de condicionamento dos sinais descrito na Tabela 4.2 foi o multímetro MDM 220, da ECB, sendo utilizada a escala de 20 V. O mesmo tem as seguintes especificações: 4 ½ dígitos e uma incerteza de  $\pm(0,05\% + 1)$  na escala de 20 V. Então, a incerteza relativa ao instrumento para todas as medições de tensão elétrica é dada pela Equação (4.2).

$$incerteza = \sqrt{(\%leitura)^2 + (digitos)^2} = \sqrt{(0,05)^2 + (0,1)^2} = \pm 0,112\ V \quad (4.2)$$

#### 4.2.2 Calibração Dinâmica

O procedimento realizado neste ensaio experimental consistiu-se de aplicação de impacto mecânico na célula de carga. Para isso, engastou-se com fita adesiva de dupla face o acelerômetro piezoelétrico triaxial (sensibilidade aproximada de 10 mV/g nos três eixos) modelo 4520 da Brüel & Kjær. Para o condicionamento do sinal proveniente do acelerômetro, utilizou-se o chassi SCXI-1000 da National Instruments, com os módulos SCXI-1530

(módulo de entrada dos canais do acelerômetro) e SCXI-1600 (módulo de controle e aquisição) instalados. É ilustrado na Figura 4.12 o ensaio experimental de calibração dinâmica realizado.

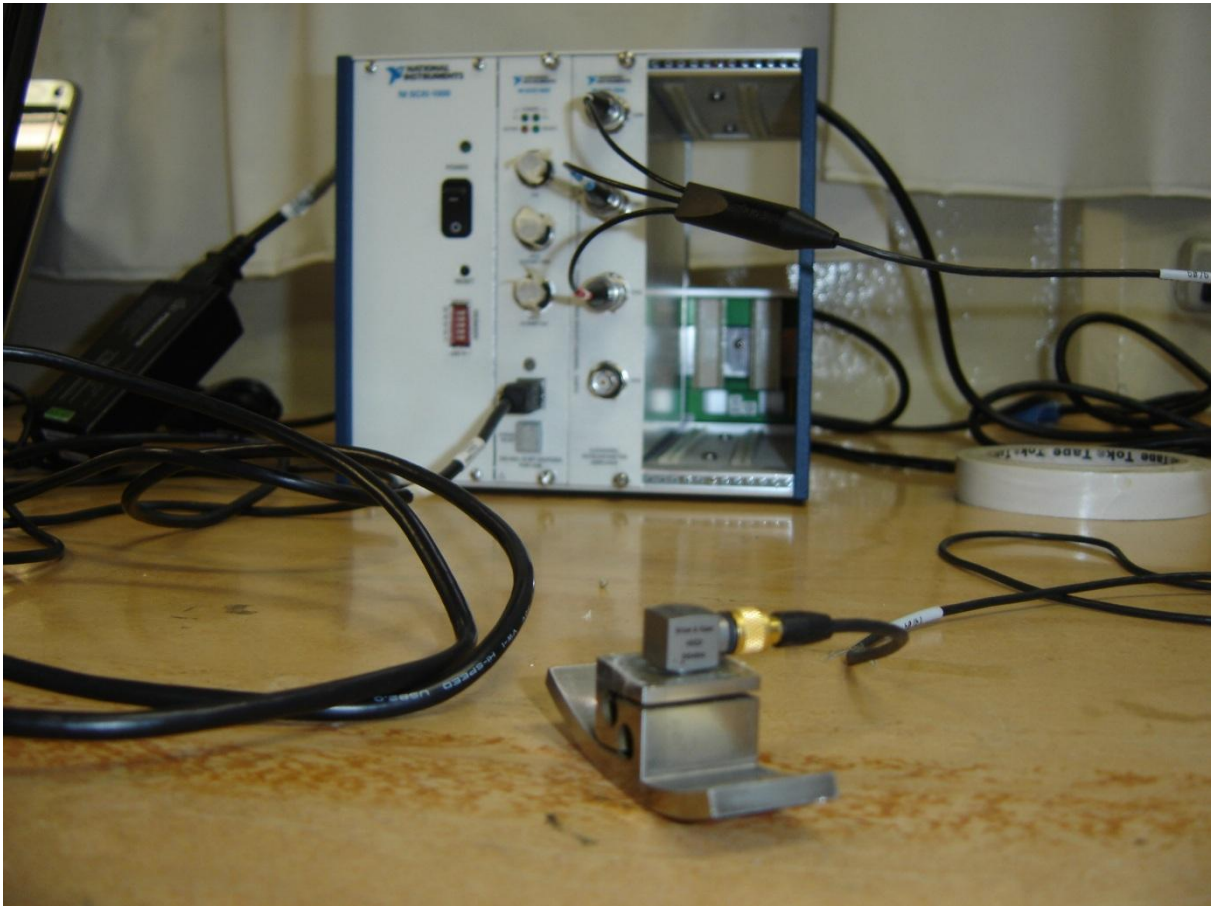


Figura 4.12: Ensaio experimental de calibração dinâmica.

Considerando que um impacto mecânico impresso na célula de carga representa um impulso no tempo, seu espectro de frequência contém todas as frequências. Assim, com o sinal gerado pelo acelerômetro engastado na peça é possível se determinar em quais frequências ocorrem as maiores atenuações das vibrações mecânicas, ou seja, as frequências de ressonância. A Figura 4.13 apresenta o sinal no tempo adquirido a partir de impacto mecânico impresso na célula de carga.

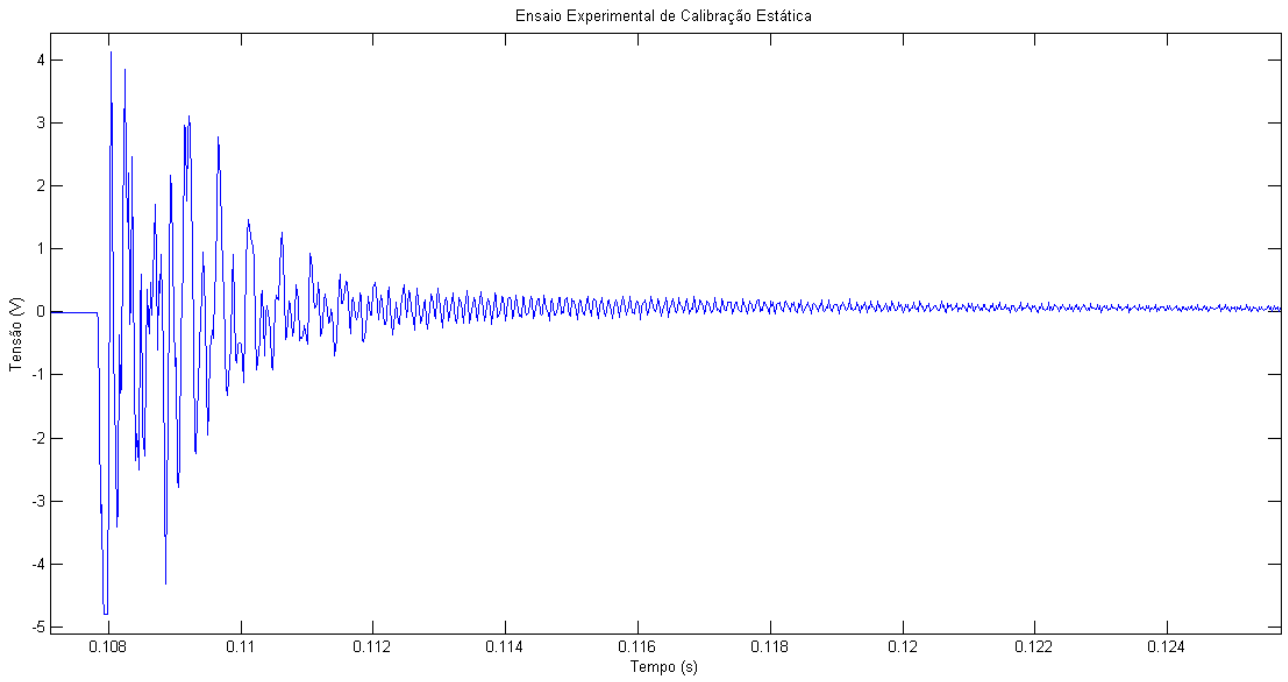


Figura 4.13: Sinal no tempo da resposta ao impacto mecânico impresso na célula de carga.

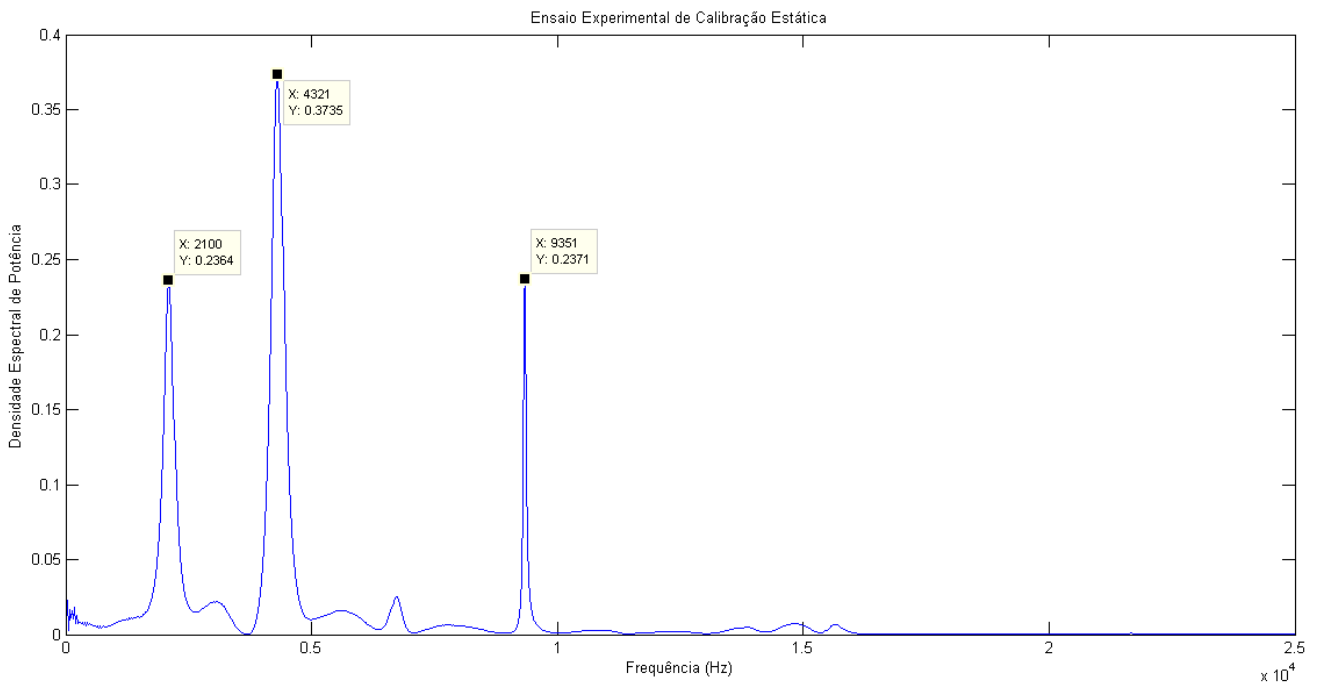


Figura 4.14: Densidade espectral de potência do sinal temporal da resposta ao impacto mecânico impresso na célula de carga.

A partir do sinal temporal de resposta ao impacto mecânico foi determinado a densidade espectral de potência apresentada na Figura 4.14. Como a amostragem do sinal foi feita com frequência de 50 kHz, foi possível levantar as frequências de ressonância ocorrentes até 25 kHz. Dessa forma, as primeiras frequências de ressonância determinadas experimentalmente foram de 2100 Hz, 4321 Hz e 9351 Hz.

Sendo a máxima frequência de excitação estimada proveniente do ato da caminhada de 5 Hz, as frequências de ressonância estimadas na Figura 4.14 não trazem preocupação, pois a estrutura mecânica da célula de carga não vibrará excessivamente, não se deformará plasticamente nem entrará em colapso devido às vibrações geradas durante a caminhada. Portanto, conclui-se que as vibrações geradas sob a plataforma de força móvel durante a marcha humana serão atenuadas e, ainda, o ruído sob o sinal da ponte de Wheastone causado pela propagação das vibrações será desprezível.

Em comparação com os resultados obtidos por meio de simulação no *software* SolidWorks®, apenas o modo fundamental de vibração estimado no ensaio experimental de resposta ao impacto mecânico foi coerente, houve uma diferença de 6%. Os demais modos de vibração encontrados experimentalmente se divergem dos resultados esperados pelas simulações devido, principalmente, ao próprio procedimento de ensaio experimental realizado. O acelerômetro engastado na célula de carga e seu cabo alteram consideravelmente a estrutura mecânica e, por conseguinte, a resposta do sistema ao impacto mecânico. Dever-se-ia utilizar um acelerômetro de massa desprezível frente à massa da peça. Outra questão de essencial relevância sob os resultados obtidos por meio do ensaio experimental é a não idealidade da peça real da célula de carga usinada em relação ao modelo teórico desenhado em *software*.



### 4.3 Resultados e Desempenho da Plataforma de Força Móvel

Os ensaios experimentais apresentados nesta subseção têm por objetivo avaliar o protótipo da plataforma de força móvel desenvolvida neste trabalho. A utilização da plataforma de força móvel visa conformar a forma de onda temporal das forças normais de reação ao solado durante a marcha humana, contudo, sem o propósito de realizar qualquer tipo de diagnóstico de possíveis patologias musculares, cerebrais, de articulações ou relacionadas à postura.

Para a realização dos ensaios experimentais, um voluntário com massa aproximada de 92,5 kg efetuou diversas caminhadas de período 8,2 s. As duas placas de condicionamento dos sinais provenientes das duas plataformas de força móvel, o módulo ADC USB 6009 e o computador portátil foram posicionados dentro de uma mochila a qual era transportada nas costas pelo voluntário durante os ensaios de caminhada, tornando, assim, o sistema portátil.



Figura 4.15: Voluntário utilizando os calçados nos quais a plataforma de força móvel está engastada.



Figura 4.16: Vista inferior da plataforma de força móvel.

Os sinais de cada circuito de condicionamento das células de carga foram adquiridos pelo módulo ADC NI USB-6009 a uma taxa de 1 kSample/s durante os ensaios experimentais de utilização da plataforma de força móvel. Com a rotina desenvolvida no *software* LabVIEW™ 8.6 ilustrada na Figura 3.32, os dados foram armazenados no disco rígido de um microcomputador portátil, sob forma de vetores em arquivo texto.

Posteriormente, os dados foram tratados e reproduzidos em gráficos através do *software* MatLab®. Os gráficos de carga (kg) em função do tempo foram separados por calçado, sendo incluso o somatório total das forças normais de reação de cada calçado. As Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam os resultados de dois períodos de caminhada do ensaio experimental de utilização da plataforma de força móvel.

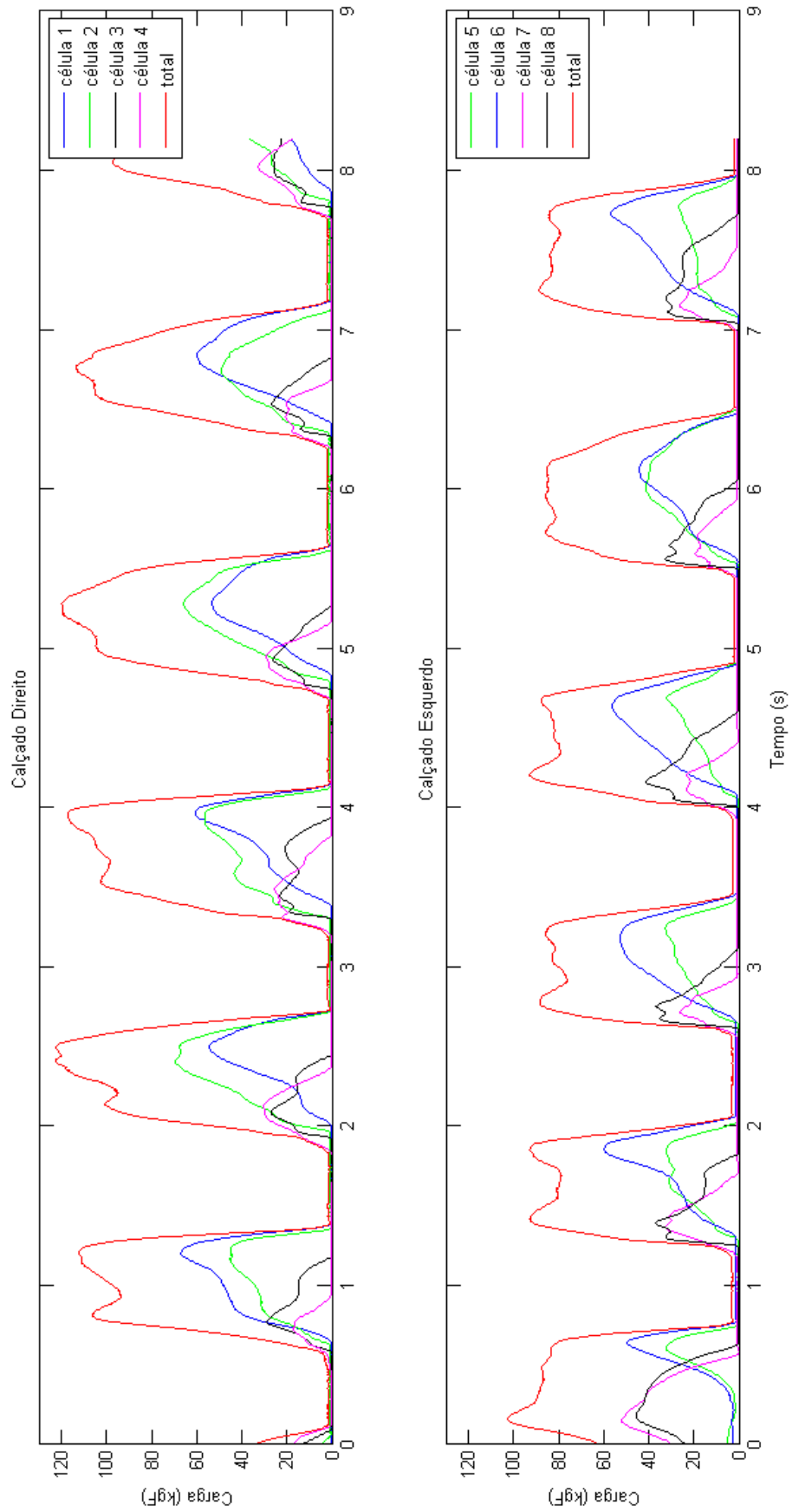


Figura 4.17: Resultados do período 1 de caminhada do ensaio experimental de utilização da plataforma de força móvel.

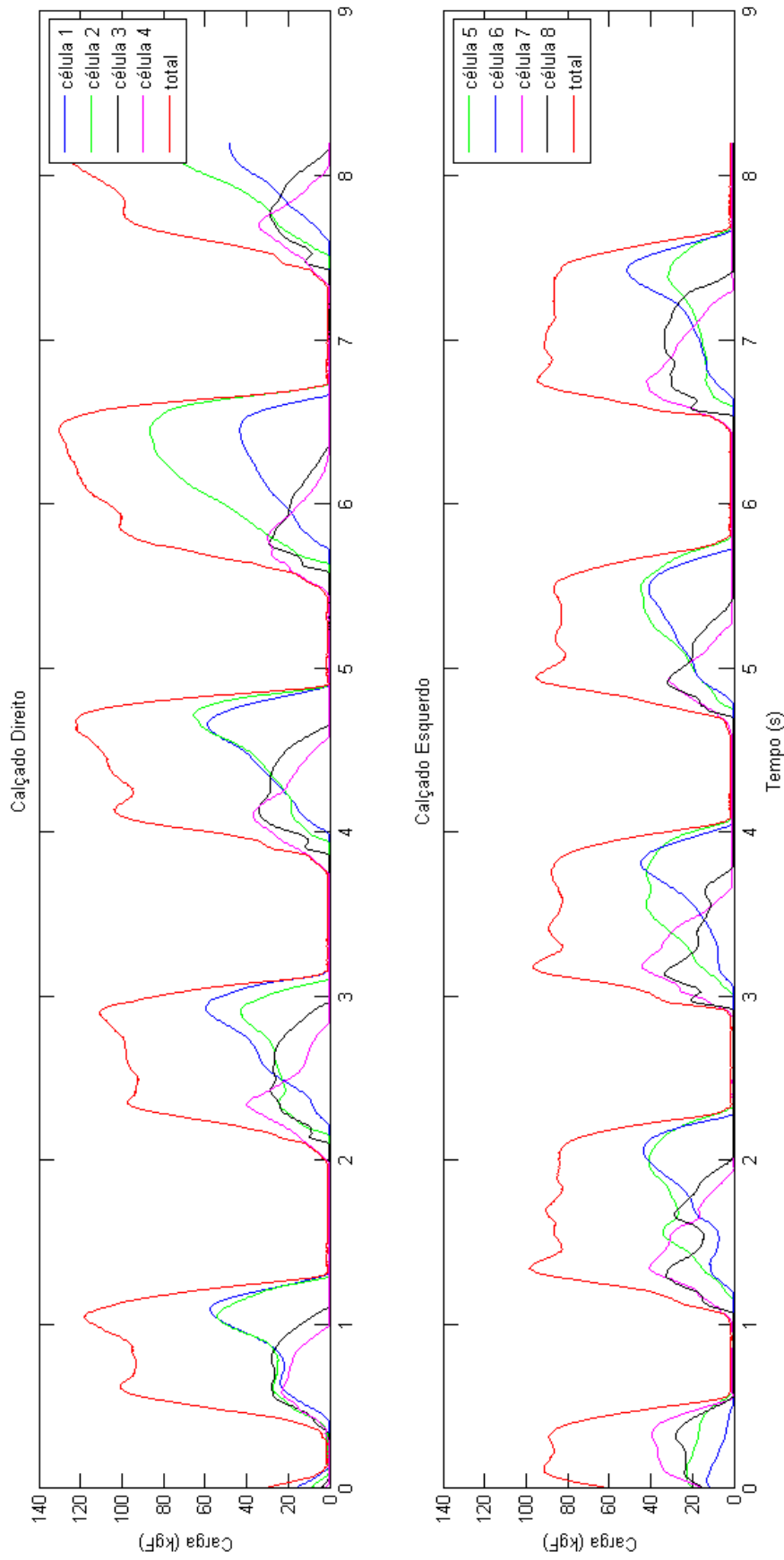


Figura 4.18: Resultados do período 2 de caminhada do ensaio experimental de utilização da plataforma de força móvel.

Quando as curvas em cor vermelha (somatório das respostas de reação normal ao solado das quatro células de carga de um calçado) das Figura 4.17 e Figura 4.18 estão em seu valor mínimo, a plataforma de força móvel (o calçado) está fora de contato com o solo, ou seja, carga zero. Assim, quando o voluntário tira totalmente o contato de uma plataforma de força móvel com o solo, a sua curva de somatório das respostas de cada célula de carga vai para zero, e é o mesmo instante em que a outra plataforma de força atinge valor próximo do valor máximo da carga total aplicada.

As curvas do somatório das reações normais do calçado direito, em cor vermelha, atingem valores maiores que a do calçado esquerdo muito provavelmente devido à trajetória circular percorrida pelo voluntário. Como o sentido do percurso circular foi anti-horário, o calçado direito estava posicionado mais externamente em relação ao centro da trajetória.

É possível visualizar nas figuras as curvas de reação normal ao solo em forma de “M” (as curvas não são exageradamente salientes quanto a curva apresentada na Figura 2.10), curvas já conformadas por Carlet, em 1872. O primeiro pico ocorrente é a reação normal ao solado que desacelera a massa corporal do voluntário quando atinge o solo, e o segundo pico ocorrente, logo após o primeiro, é a reação normal ao solado que acelera a massa corporal do voluntário para o impulsionar no sentido progressivo, realizar o passo e, assim, efetivar a caminhada propriamente dita.

Outro resultado interessante é ilustrado nas Figura 4.19 e Figura 4.20. Nesse período de caminhada, o voluntário procurou ficar estático, ou seja, tentou permanecer quieto durante metade do período 3 de caminhada e manteve as oito células de carga em contato com o solo. É apresentado na Figura 4.20 o somatório das respostas de reação normal ao solado das oito células de carga do período 3 de caminhada, onde é indicado por um *datatip* a carga total de reação normal resultante no período estático do voluntário, que é de 94,57 kgF. Esse valor é bem próximo da massa estimada do voluntário, que é de 92,5 kg, uma diferença de 2,2%.

É importante ressaltar que o sistema desenvolvido neste trabalho é portátil e pode ser utilizado em qualquer ambiente com piso plano e regular, observando-se a autonomia, durante o ensaio de caminhada, das baterias do sistema de condicionamento e do computador portátil posicionados na mochilada utilizada pelo usuário.

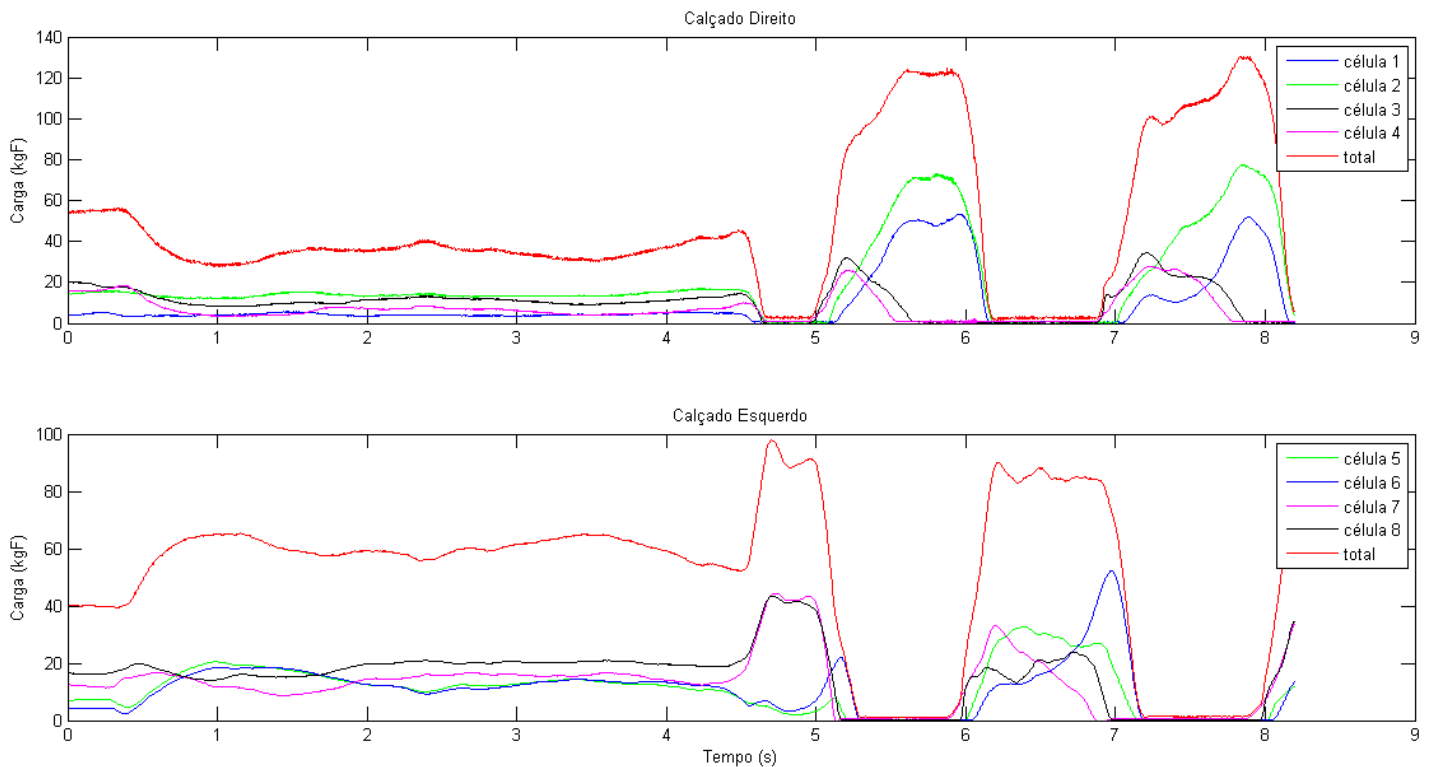


Figura 4.19: Resultados do período 3 de caminhada do ensaio experimental de utilização da plataforma de força móvel.

O trabalho aqui apresentado será continuado e novos ensaios serão realizados, permitindo avaliar parâmetros e métricas importantes na área da marcha humana.

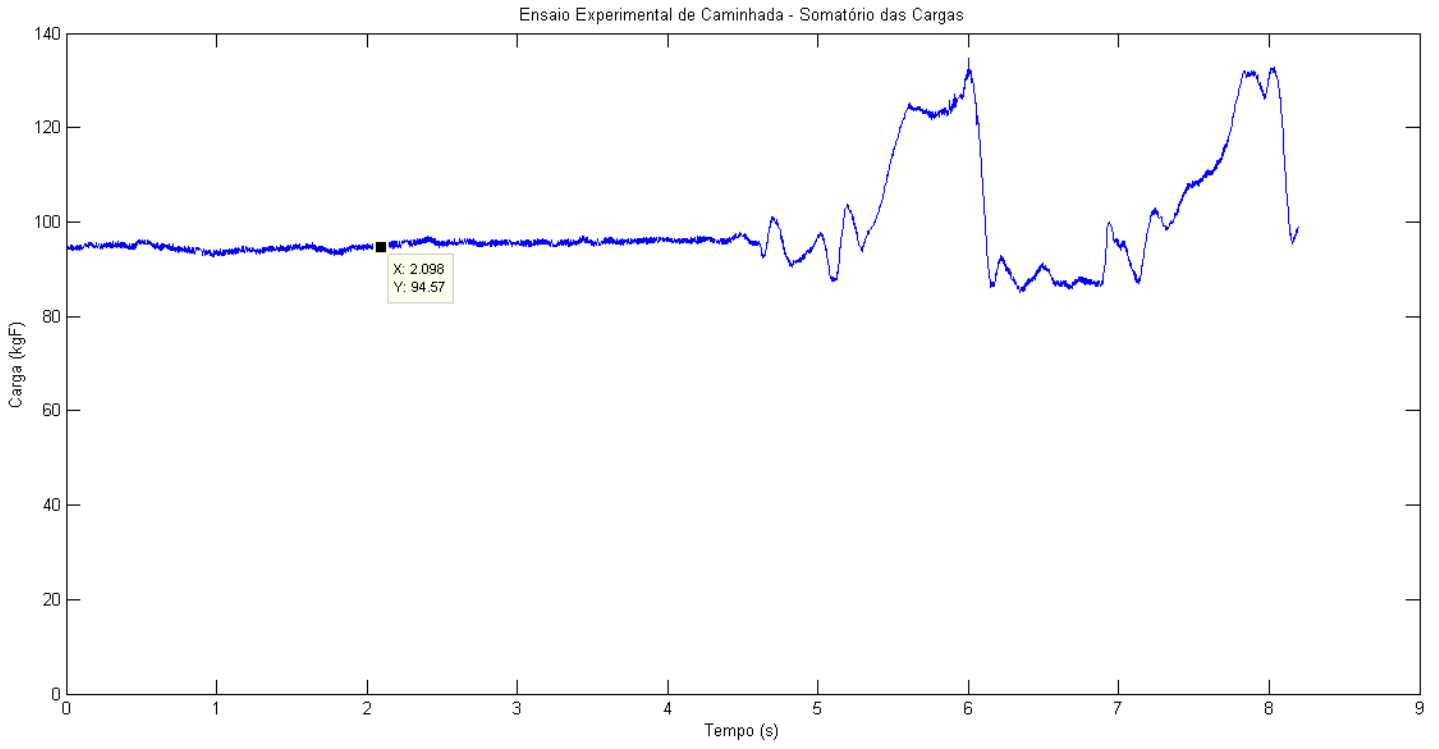


Figura 4.20: Somatório das respostas de reação normal ao solado das oito células de carga do período 3 de caminhada do ensaio experimental de utilização da plataforma de força móvel.

## 5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento em software do modelo teórico da célula de carga foi fundamental para atingir as premissas inicialmente definidas para o projeto do trabalho. As simulações por análise de elementos finitos foi um recurso essencial para que a célula de carga atingisse uma rigidez mecânica capaz de suportar uma carga máxima de 203,8 kgF dentro do regime elástico de deformação.

As simulações de frequência realizadas em software também foram de grande importância para o projeto, pois foi possível estimar com antecedência os modos de vibração da célula de carga, garantindo uma margem, relativamente alta, entre a frequência de excitação produzida pela marcha humana e a frequência fundamental de ressonância. Isso garantiu a segurança na operação da estrutura, assegurando que a mesma dificilmente vibraria excessivamente.

Obteve-se bons resultados nos ensaios dinâmicos de resposta ao impacto mecânico da célula de carga, pois em comparação com os resultados obtidos por meio de simulação em *software*, o modo fundamental de vibração – o mais importante – estimado sofreu um desvio de apenas 6 %.

Já na calibração estática, obteve-se as funções de transferência para cada célula de carga com bons resultados, sendo o máximo erro de linearidade estimado de 1,25 % para as células de carga 1, 3 e 7.



## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a melhoria do protótipo de plataforma de força móvel desenvolvida neste trabalho, são sugeridos os seguintes itens:

1. Redimensionar a célula de carga para se ter a mesma rigidez mecânica considerando a usinagem da peça em alguma liga de alumínio de maior dureza que as ligas tradicionais. É indicada a troca do material da célula de carga por outro de menor densidade para a redução da massa do conjunto mecânico;
2. Buscar outro método de cimentação dos *strain-gages* mais eficaz do que o utilizado neste trabalho ou utilizar outra cola. Encontrou-se dificuldades em colar os sensores com eficácia;
3. Desenvolver uma plataforma de força móvel capaz de mensurar as forças de reação nos 3 eixos cartesianos;
4. Determinar a autonomia do sistema de condicionamento sendo alimentado pelas baterias de 9 V;
5. Desenvolver rotinas mais elaboradas em Labview, contemplando o processamento e apresentação dos gráficos dos dados adquiridos durante os ensaios de caminhada, tanto como análise em tempo real do comportamento da marcha, do centro de pressão (COP), entre outros.

## REFERÊNCIAS

HJELMSTAD, K. D. **Fundamentals of Structural Mechanics**. Second Edition. Editora Springer, 2005.

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

HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages**. Publicado por Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.

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

MURRAY, W. M.; MILLER, W. R. **The Bonded Electrical Resistance Strain Gage**. Editora Oxford University Press. 1992.

PIFFER, G. **Desenvolvimento de um protótipo de plataforma de força de pequeno porte para marcha humana**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Elétrica, UFRGS, 2010.

ROYLANCE, D. **STRESS-STRAIN CURVES**. Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2001.

VAUGHAN, C. L.; DAVIS, B. L.; O'CONNOR; J. C. **Dynamics of Human Gait**. Second Edition. Editora Kiboho Publishers, 1999.

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

PETERKA, R. J.; LOUGHLIN, P. J. **Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control**. Journal of Neurophysiology, 2004.

WINTER, D. A.; PATIA, A. E.; FRANK, J. S. **Assessment of balance control in humans.** Medical Progress Through Technology, 1990.

PAULA, M. E. D. **CONTROLE POSTURAL DE INDIVÍDUOS JOVENS ADULTOS, MEIA-IDADE E IDOSOS.** Trabalho de Conclusão de Curso, Fisioterapia, FEEVALE, 2010.

ALENCAR, J. F.; MARINHO, L. F.; LUCENA, B. A. .; GOMES, J.; MEDEIROS, M. L. **Análise cinemática da marcha em pacientes hemiparéticos tratados no serviço de fisioterapia da UFPB.** Anais do VIII Congresso de Biomecânica, 1999.

HALL, J. **Basic Biomechanics.** Third Edition. New York: WCB/McGraw-Hill, 1999.

SUTHERLAND, D. H. **The evolution of clinical gait analysis part III – kinetics and energy assessment.** Publicado por Elsevier B.V., 2004.

CARLET, M. S. **La locomotion humaine. Etude de la marche.** Annales des Sciences Naturelles, 1872.

CUNNINGHAM, D. M.; BROWN, G. W. **Two devices for measuring the forces acting on the human body during walking.** In Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, 1952.

FISCHER, O.; BRAUNE, W. **The human gait.** Publicado por Springer-Verlag, 1987.

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

SHOWA Measuring Instruments INC. **Types and Specifications of Strain Gages.** [http://www.showa-sokki.co.jp/english/products\\_e/Strain\\_Gage\\_e/strain\\_gage\\_config\\_e.html](http://www.showa-sokki.co.jp/english/products_e/Strain_Gage_e/strain_gage_config_e.html) acesso em 17/06/2012.

FAVORIT Aços Especiais. **Aços Inoxidáveis.** <http://www.favorit.com.br/produtos/categoria/acos-inoxidaveis/aco-aisi-420-c> acesso em 17/06/2012.

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

**ANEXOS**

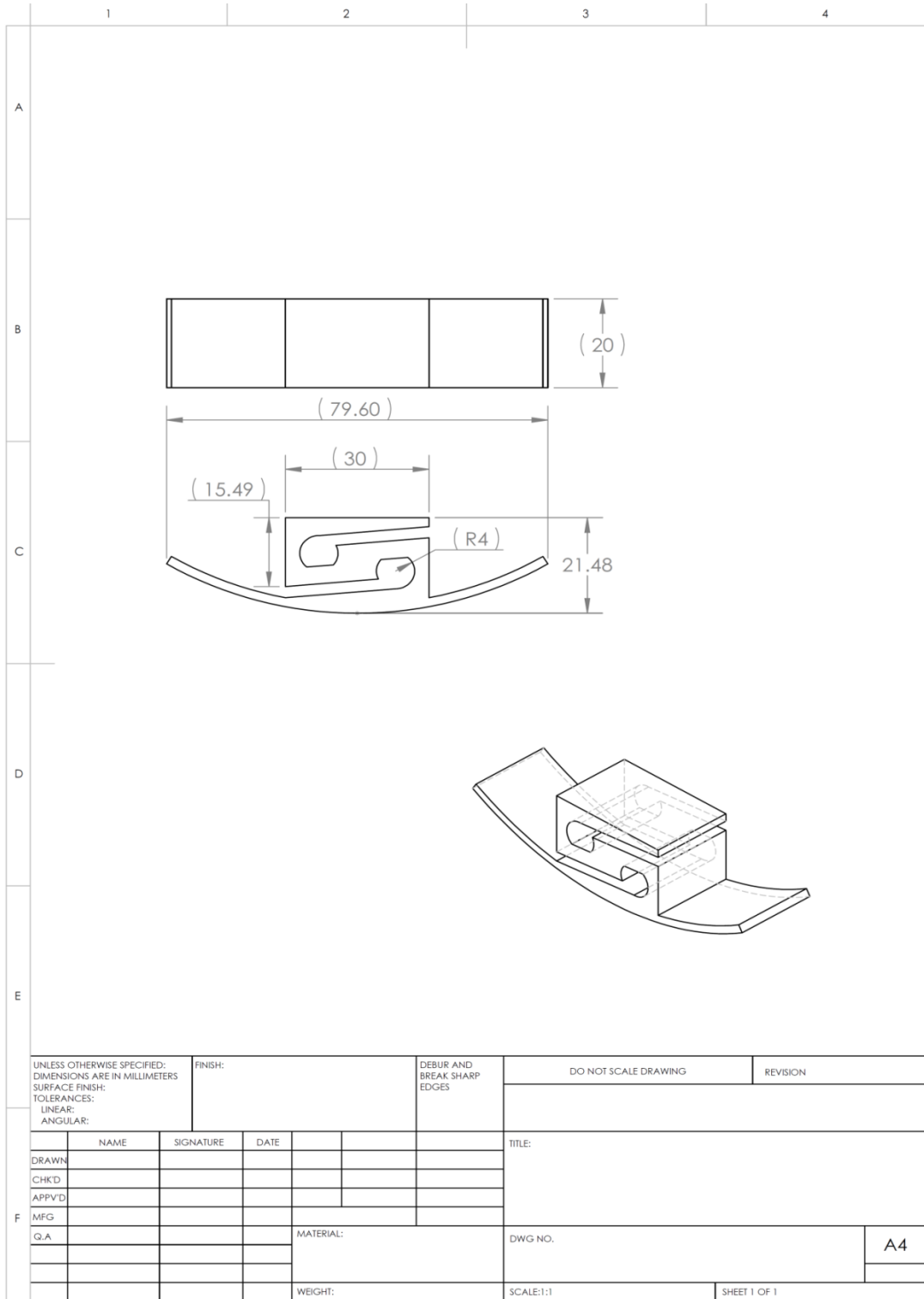


Figura A.1: Desenho técnico da célula de carga

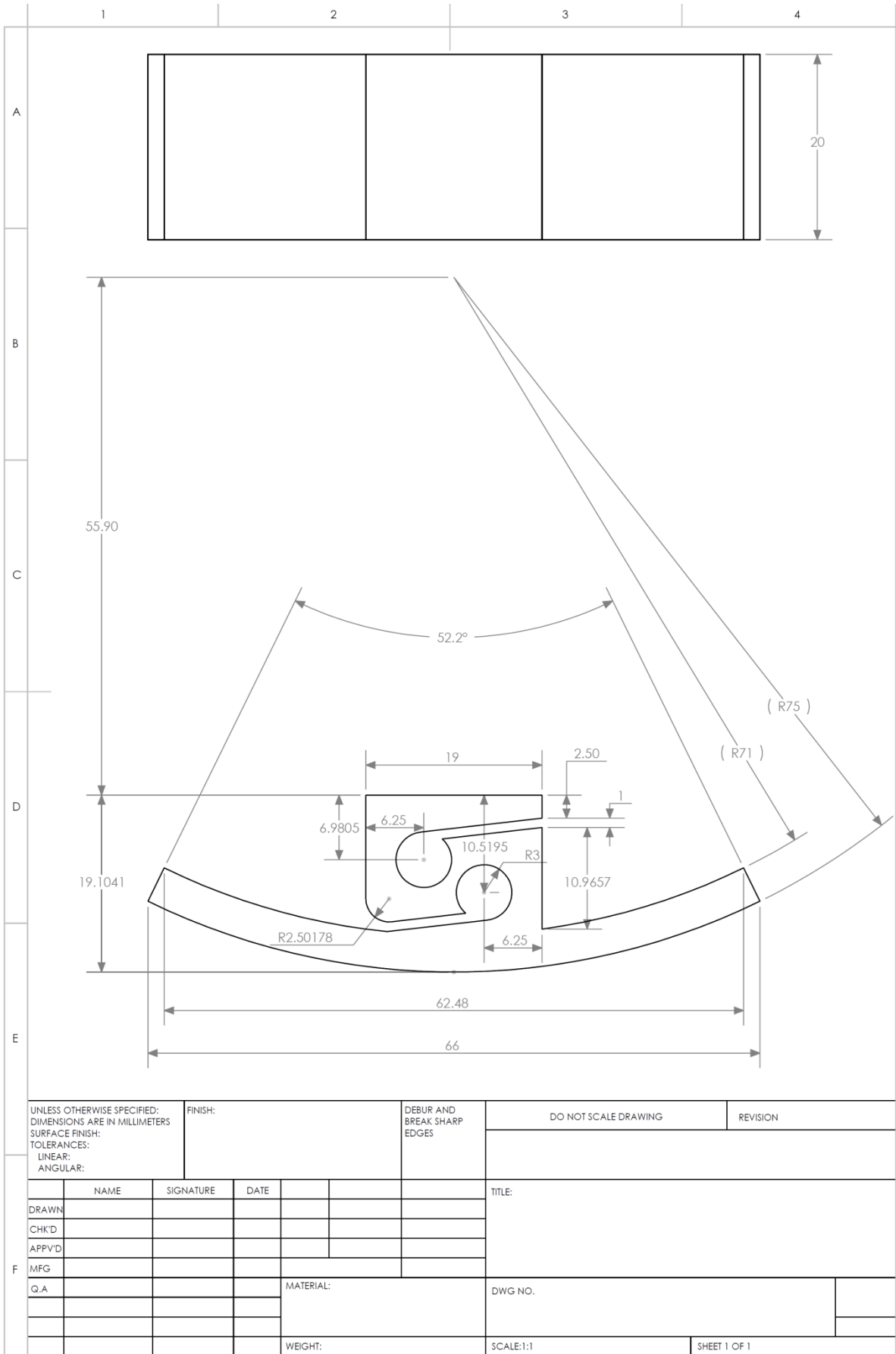


Figura A.2: Desenho técnico da geometria final da célula de carga.

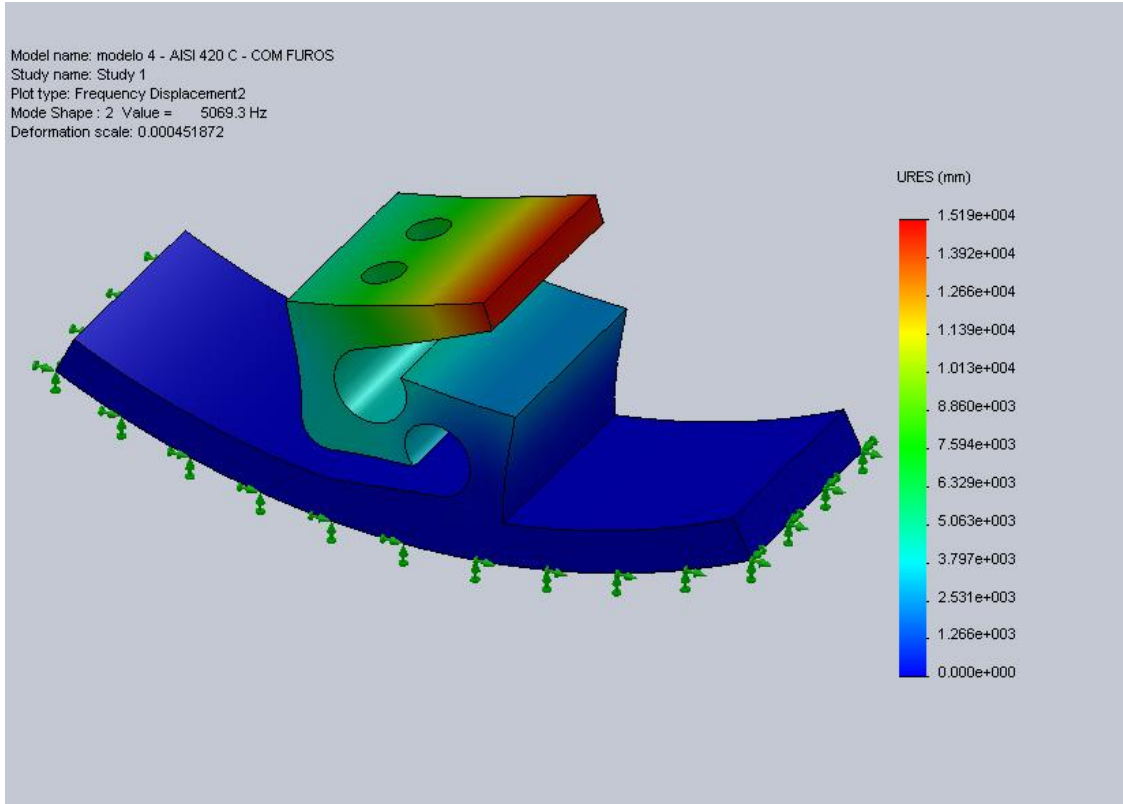


Figura A.3: Segundo modo de vibração da célula de carga.

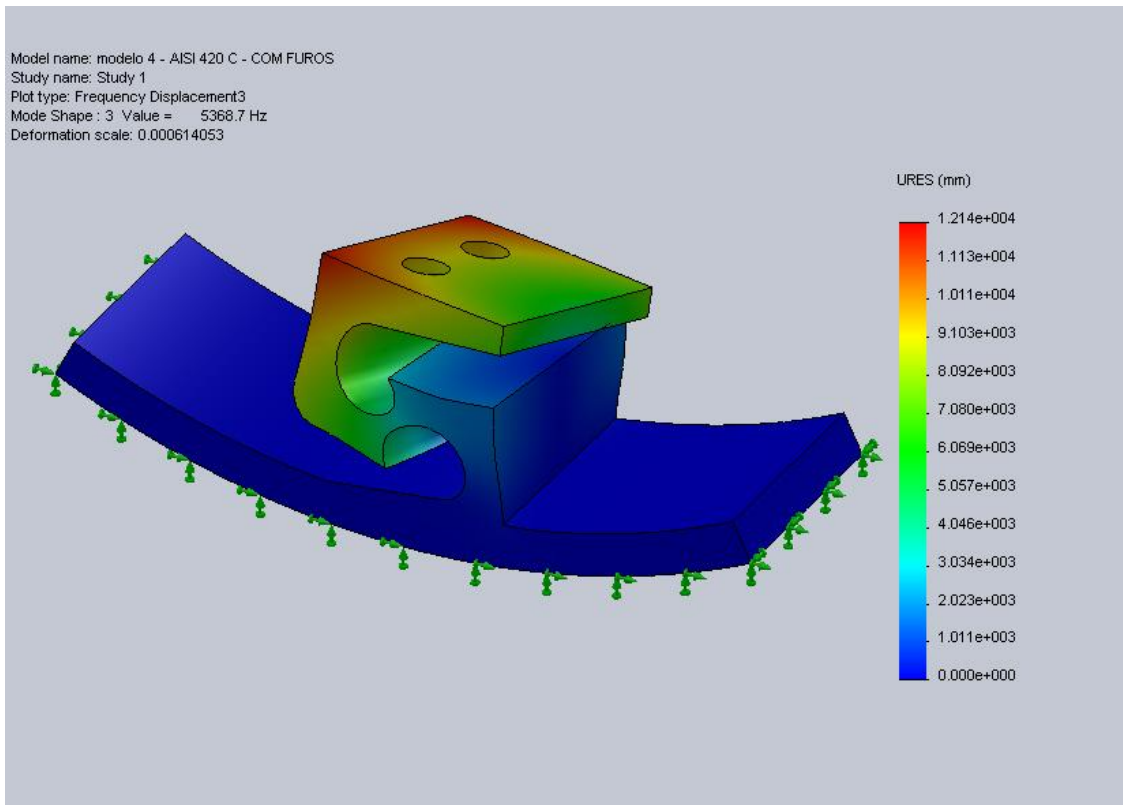


Figura A.4: Terceiro modo de vibração da célula de carga.

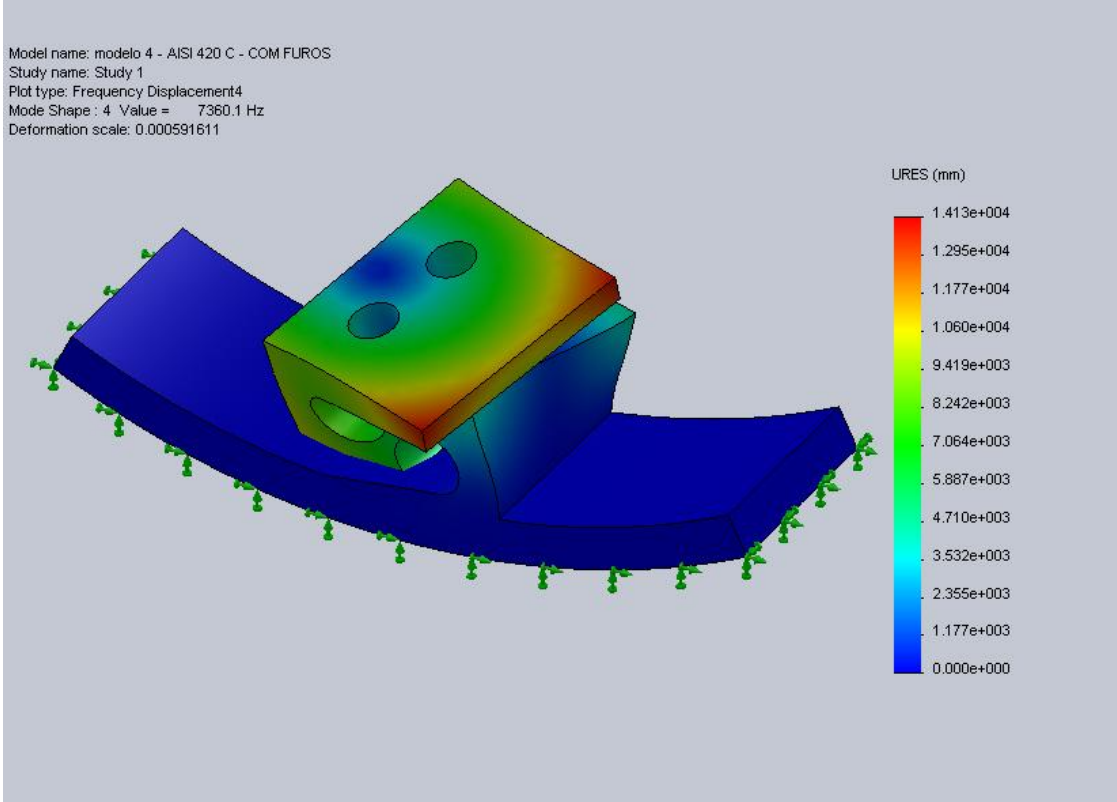


Figura A.5: Quarto modo de vibração da célula de carga.

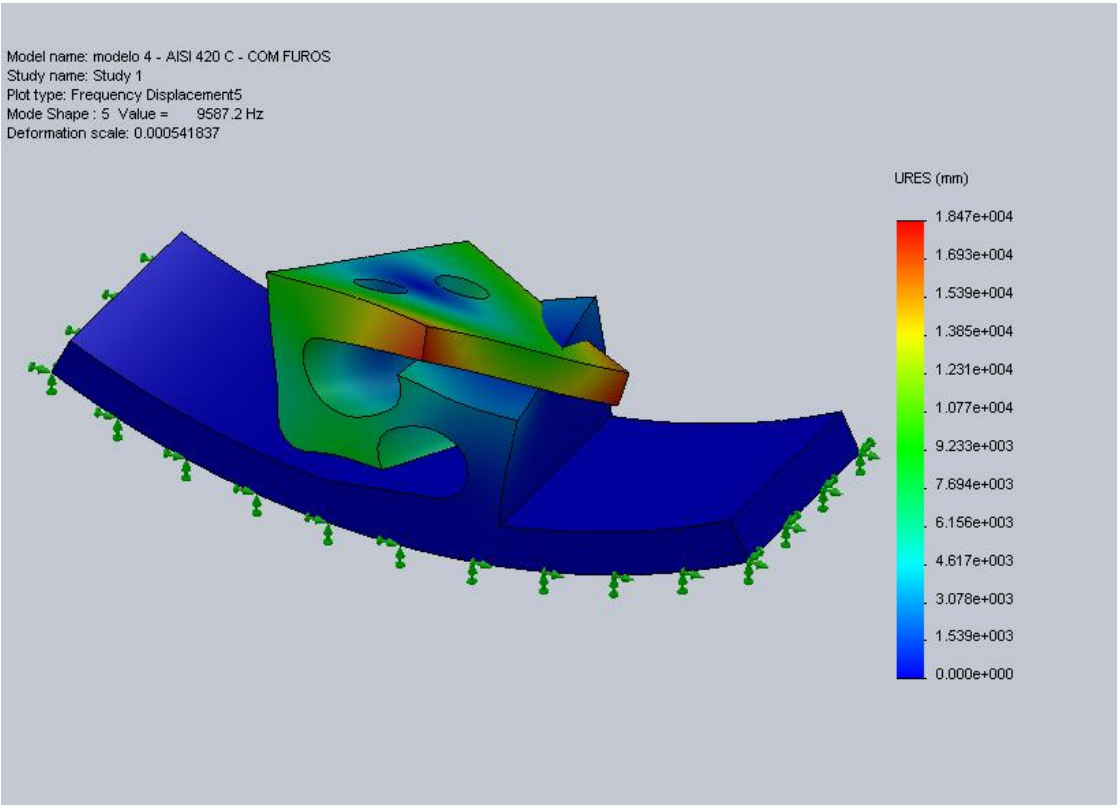


Figura A.6: Quinto modo de vibração da célula de carga.

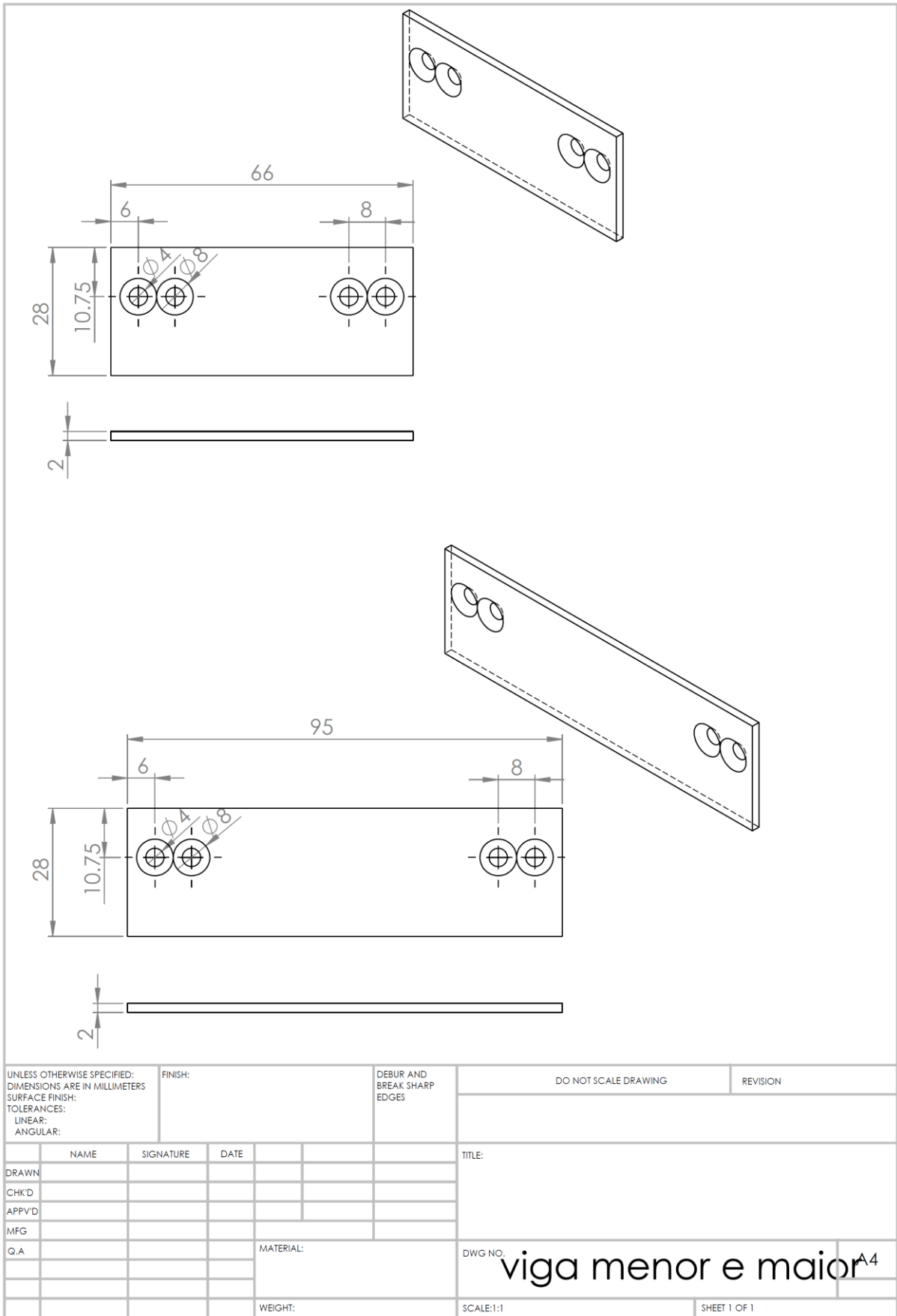


Figura A.7: Desenho técnico das vigas componentes da plataforma de força móvel.



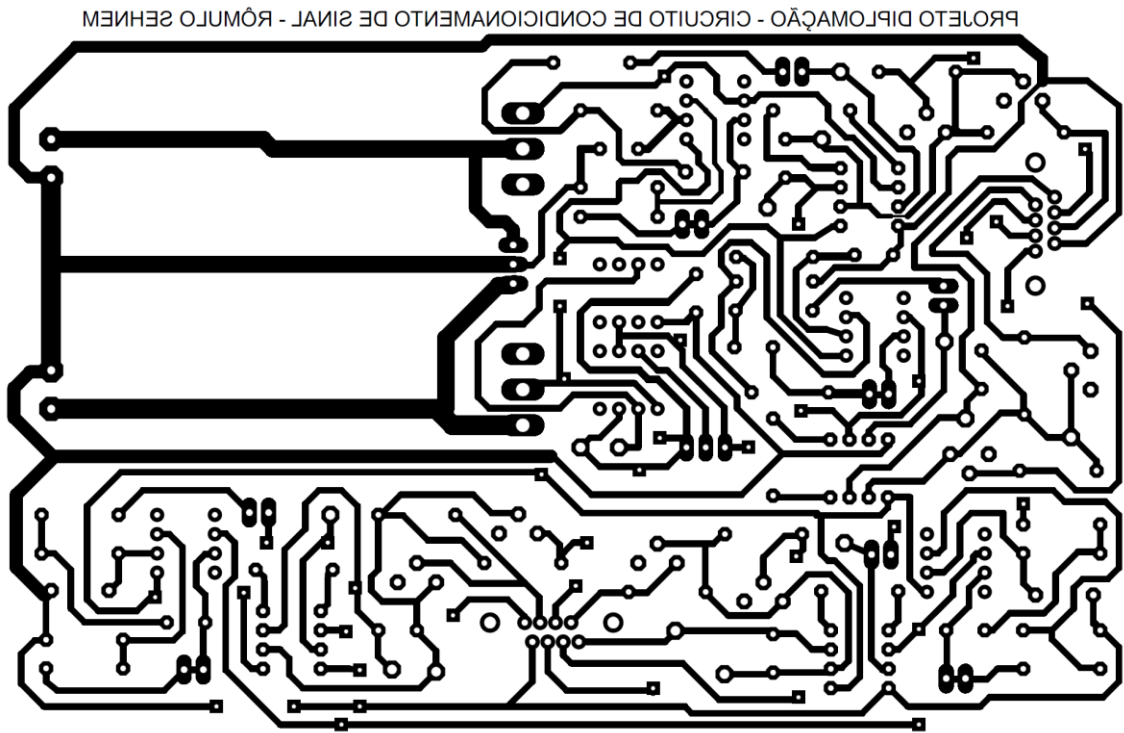


Figura A.8: *Layer* das trilhas da placa de circuito impresso do circuito condicionador.