

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS DE OLIVEIRA ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE
FORÇA BASEADA EM TACOS DE SAPATILHAS PARA
CICLISMO**

Porto Alegre
2021

MATHEUS DE OLIVEIRA ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE
FORÇA BASEADA EM TACOS DE SAPATILHAS PARA
CICLISMO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Porto Alegre
2021

MATHEUS DE OLIVEIRA ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE
FORÇA BASEADA EM TACOS DE SAPATILHAS PARA
CICLISMO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica e aprovada 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. Altamiro Amadeu Susin, UFRGS
Doutor pelo INPG – Grenoble, França

Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Junior, UTFPR
Doutor pela Universidade de Aveiro – Aveiro, Portugal

Prof. Dr. Tiago Oliveira Weber, UFRGS
Doutor pela Universidade de São Paulo – São Paulo, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____
Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner.

Porto Alegre, outubro de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que estiveram próximas a mim durante o longo processo que foi o Mestrado. Estas palavras são especialmente direcionadas à minha família e à minha namorada (também pesquisadora), que enfrentaram junto comigo um período conturbado da história, cheio de dúvidas e incertezas quanto ao futuro da ciência brasileira.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, volto a agradecer o imenso apoio (principalmente emocional, mas também financeiro) que tive de meus pais nestes anos em que desenvolvi meu projeto de Mestrado. Estendo a parte emocional à minha namorada, que me ajudou a continuar focado mesmo diante dos diversos obstáculos que surgiram durante esse período.

Em segundo lugar, gostaria de destacar meus agradecimentos ao Professor Alexandre Balbinot, que me acompanha desde a graduação e contribuiu muito para que eu fosse capaz de desenvolver a ideia do projeto. Aproveito para agradecer aos meus colegas do Laboratório IEE-Bio que participaram de discussões e adicionaram muito à abordagem do trabalho. Também, presto agradecimento especial ao colega Fernando Weimer e ao meu tio, Gilmar Bohr Rocha, que prestaram grande auxílio no projeto e na construção da máquina de calibração.

Por último, fica aqui meu muito obrigado ao Luciano Salerno, que se desdobrou para tornar possível a usinagem das peças, parte imprescindível para que o projeto se concretizasse.

“The cure for a fallacious argument is a better argument, not the suppression of ideas”

Carl Sagan

RESUMO

Nos últimos anos, o ciclismo é cada vez mais apontado como uma das soluções para a resolução dos problemas de transporte existentes nas grandes aglomerações urbanas. Desta forma, é crescente o número de praticantes em todo mundo, com boa parte deles se interessando por questões relacionadas à maximização de sua performance e de seu conforto, buscando longevidade e segurança contra lesões. Logo, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas mais acessíveis que tenham o poder de fornecer as informações acerca da técnica dos usuários deste modal. Este trabalho, portanto, buscou o desenvolvimento de um sistema capaz de mensurar os esforços realizados pelo ciclista durante o movimento de pedalada, revelando parâmetros importantes como potência efetiva e assimetria bilateral. Para tal, dois modelos de células de carga extensométricas substitutas aos tacos utilizados nas sapatilhas foram propostos: o primeiro deles (com 3 graus de liberdade) foi modelado e construído com o intuito de mensurar as forças perpendicular e frontal e o momento frontal exercidos pelo ciclista. Sua calibração revelou um erro de linearidade máximo de 2,35% e incerteza expandida ($k = 2$) máxima de 2,27%. O segundo arranjo (com 6 graus de liberdade) foi modelado e construído com o intuito de mensurar as forças e momentos, caracterizando completamente o movimento de pedalada. Sua calibração revelou um erro de linearidade máximo de 4,73% e incerteza expandida ($k = 2$) máxima de 2,28%. Um conjunto de placas de condicionamento e de aquisição foram projetadas a fim de realizar a transcrição das leituras realizadas por um conversor analógico digital em forças e momentos a partir das funções de transferência experimentais obtidas. A análise estatística revelou que, para as forças efetivas médias, a potência mecânica efetiva média e para a assimetria bilateral média, o modelo de célula de carga é não-significativo mesmo que haja diferenças estruturais e de topologia da organização dos sensores, permitindo a intercambialidade entre as peças. Como resultado, obteve-se um sistema compacto e portátil que não modifica a característica de pedalada do ciclista, permitindo liberdade de movimentos e fácil troca entre bicicletas (desde que o sistema de encaixe seja compatível).

Palavras-chave: Ciclismo, células de carga extensométricas, tacos, 3 graus de liberdade, 6 graus de liberdade.

ABSTRACT

In recent years, cycling has become increasingly pointed out as one of the solutions for solving transport problems in large urban agglomerations. From that, the number of adopters is growing all over the world, with a good part of them becoming interested in issues related to maximizing their performance and/or their comfort, seeking longevity and safety against injuries. Therefore, it becomes necessary to develop accessible tools with the power to provide information about users' techniques. This work, therefore, sought to develop a system capable of measuring the efforts made by the cyclist during the pedaling movement, revealing important parameters such as effective mechanical power and bilateral asymmetry. In order to achieve this, two models of strain gauge load cells to replace the cleats used in cycling shoes were proposed: the first one (with 3 degrees of freedom) was modeled and built in order to measure the perpendicular and frontal forces and the frontal moment exerted by the cyclist. Its calibration revealed a maximum linearity error of 2.35% and expanded uncertainty ($k = 2$) of 1.78%. The second arrangement (with 6 degrees of freedom) was modeled and built in order to measure forces and moments, fully characterizing the pedaling movement. Its calibration revealed a maximum linearity error of 4.73% and maximum expanded uncertainty ($k = 2$) of 2.28%. A set of conditioning and acquisition circuit boards was designed in order to transcribe the readings performed by an analog-to-digital converter into forces and moments related by the determined experimental transfer functions. The statistical analysis revealed that, regarding average effective forces, average effective power, and average bilateral asymmetry, the load cell type was not significant even if there are structural and topology differences in the arrangement of the sensors, allowing interchangeability between models. As a result, a compact and portable system was obtained that does not modify the user's pedaling characteristics, allowing freedom of movement and ease of change between bicycles (provided the docking system is compatible).

Keywords: Cycling, strain gauge load cells, cleats, 3 degrees of freedom, 6 degrees of freedom.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de força e de momento no pedal.	24
Figura 2 - Divisão do ciclo de pedalada em oito setores.	26
Figura 3 - Forças e torques para os membros dominante e não-dominante. . .	28
Figura 4 - Ângulos do sistema pedal-pedivela. a) Ângulo do pedivela - θ ; b) Ângulo relativo - α ; c) Ângulo do pedal - β	30
Figura 5 - Pedais do tipo plataforma	32
Figura 6 - Pedal com firma-pés	33
Figura 7 - Sistema de encaixe referente aos pedais de estrada. a) Sistema desencaixado; b) Sistema encaixado.	35
Figura 8 - Gráfico da tensão mecânica <i>versus</i> deformação.	36
Figura 9 - Modelo genérico de um extensômetro de folha.	38
Figura 10 - Ponte de <i>Wheatstone</i>	39
Figura 11 - Análise de deformações realizada por BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO (2014) (força perpendicular).	42
Figura 12 - Distribuição dos extensômetros no braço do pedivela.	44
Figura 13 - Modelo virtual do pedivela. a) Lado direito; b) Lado esquerdo. . .	45
Figura 14 - Perfil dos esforços obtidos pelo autor.	45
Figura 15 - Modelo virtual do pedal comercial.	46
Figura 16 - Pedal desenvolvido pelos autores em questão.	47
Figura 17 - Pedal desenvolvido pelos autores em questão.	48
Figura 18 - Perfil dos esforços obtidos pelos autores. a) Forças; b) Momentos.	48
Figura 19 - Pedal desenvolvido pelo autor em questão.	49
Figura 20 - Pedal com estruturas em "L" para cimentação dos extensômetros.	50
Figura 21 - Tacos instrumentados propostos no estudo.	51
Figura 22 - Diagrama geral do sistema.	54
Figura 23 - Comparação do taco comercial com o modelo virtual base. a) Taco comercial; b) Modelo virtual base.	57
Figura 24 - Modelo final para a célula de carga de 3 graus de liberdade.	58
Figura 25 - Modelo final para a célula de carga de 6 graus de liberdade.	59
Figura 26 - Pontos de engaste e de aplicação de esforços. a) Taco com 3 graus de liberdade - vista em perspectiva; b) Taco com 6 graus de liberdade - vista em perspectiva; c) Taco com 3 graus de liberdade - vista inferior; d) Taco com 6 graus de liberdade - vista inferior. . .	61
Figura 27 - Localização dos extensômetros - 3 graus de liberdade.	62
Figura 28 - Localização dos extensômetros - 6 graus de liberdade.	63
Figura 29 - Peças usinadas. a) 3 graus de liberdade; b) 6 graus de liberdade. .	64
Figura 30 - Colagem dos extensômetros - célula de 3 graus de liberdade. . . .	66
Figura 31 - Resultado da colagem dos extensômetros. a) 3 graus de liberdade; b) 6 graus de liberdade.	66

Figura 32 - Diagrama de blocos do circuito de condicionamento.	71
Figura 33 - Topologias escolhidas para as pontes de <i>Wheatstone</i> . a) Ponte completa; b) Meia-ponte; c) Meia-ponte dupla.	72
Figura 34 - Resposta em frequência simulada do filtro projetado.	78
Figura 35 - Esquemático - <i>Sallen-key</i> genérico.	79
Figura 36 - Fluxograma do funcionamento do sistema de aquisição.	83
Figura 37 - Placas construídas. a) Placa de controle; b) Placa de condicionamento de 3 canais; c) Placa de condicionamento de 8 canais.	84
Figura 38 - Cadeia de medidas teórica - F_x - 3DoF.	92
Figura 39 - Cadeia de medidas teórica - F_y - 3DoF.	92
Figura 40 - Cadeia de medidas teórica - M_x - 3DoF.	93
Figura 41 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z1 - 6DoF.	94
Figura 42 - Projeto da máquina de calibração.	95
Figura 43 - Máquina de calibração finalizada. a) Chapa de engaste das células de carga; b) Uma das roldanas utilizadas para direcionar os esforços.	96
Figura 44 - Calibração estática em andamento. a) Viga de transferência de esforços; b) Pesos padrão; c) Cabos de direcionamento de esforços; d) Dispositivo de engaste da célula de carga.	97
Figura 45 - Dispositivo de engaste.	97
Figura 46 - Aparato da calibração dinâmica. a) Célula de carga com o acelerômetro acoplado; b) Cabo BNC triaxial; c) Chassi SCXI-1000 com módulo SCXI-1531; d) Estação de trabalho com <i>LabVIEW</i> TM ; e) Martelo de impacto.	98
Figura 47 - Acelerômetro DeltaTron 4520.	99
Figura 48 - Diagrama da disposição do sistema de cinemetria.	100
Figura 49 - Diagrama detalhado dos marcadores e dos ângulos.	102
Figura 50 - Momento da realização de um dos ensaios. a) Câmera (número 5) do sistema de cinemetria; b) Ciclocomputador; c) Rolo de treinamento; d) Conjunto do sistema de medição desenvolvido.	112
Figura 51 - Detalhe do sistema já preparado para o ensaio. 1) Placas e bateria; 2) Cabos de conexão da célula de carga; 3) Conjunto da célula de carga, do pedal e dos marcadores refletivos.	113
Figura 52 - Resultado de simulação - F_x 3DoF.	117
Figura 53 - Resultado de simulação - F_y 3DoF.	117
Figura 54 - Resultado de simulação - M_x 3DoF.	118
Figura 55 - Resultado de simulação - Primeiro modo 3DoF.	119
Figura 56 - Resultado de simulação - Segundo modo 3DoF.	119
Figura 57 - Resultado de simulação - Terceiro modo 3DoF.	120
Figura 58 - Resultado de simulação - F_x eixo com deformação normal ao eixo x 6DoF.	121
Figura 59 - Resultado de simulação - F_z com deformação normal ao eixo z 6DoF.	121
Figura 60 - Resultado de simulação - F_y com deformação normal ao eixo x 6DoF.	122
Figura 61 - Resultado de simulação - F_y com deformação normal ao eixo z 6DoF.	122
Figura 62 - Resultado de simulação - F_z com deformação normal ao eixo x 6DoF.	123

Figura 63 - Resultado de simulação - F_z com deformação normal ao eixo z 6DoF.	123
Figura 64 - Resultado de simulação - M_x com deformação normal ao eixo x 6DoF.	124
Figura 65 - Resultado de simulação - M_x com deformação normal ao eixo z 6DoF.	124
Figura 66 - Resultado de simulação - M_y com deformação normal ao eixo x 6DoF.	125
Figura 67 - Resultado de simulação - M_y com deformação normal ao eixo z 6DoF.	125
Figura 68 - Resultado de simulação - M_z com deformação normal ao eixo x 6DoF.	126
Figura 69 - Resultado de simulação - M_z com deformação normal ao eixo z 6DoF.	126
Figura 70 - Resultado de simulação - Primeiro modo 6DoF.	127
Figura 71 - Resultado de simulação - Segundo modo 6DoF.	128
Figura 72 - Resultado de simulação - Terceiro modo 6DoF.	128
Figura 73 - Função de transferência experimental - F_x - Pé direito.	131
Figura 74 - Função de transferência experimental - F_y - Pé direito.	131
Figura 75 - Função de transferência experimental - M_x - Pé direito.	132
Figura 76 - Função de transferência experimental - F_x - Pé esquerdo.	132
Figura 77 - Função de transferência experimental - F_y - Pé esquerdo.	132
Figura 78 - Função de transferência experimental - M_x - Pé esquerdo.	133
Figura 79 - Funções de transferência experimentais - F_x . a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	136
Figura 80 - Funções de transferência experimentais - F_y . a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	136
Figura 81 - Funções de transferência experimentais - F_z . a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	137
Figura 82 - Funções de transferência experimentais - M_x . a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	137
Figura 83 - Funções de transferência experimentais - M_y . a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	137
Figura 84 - Funções de transferência experimentais - M_z . a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	138
Figura 85 - Cadeia de medida experimental - F_x - Pé direito.	144
Figura 86 - Cadeia de medida experimental - F_y - Pé direito.	145
Figura 87 - Cadeia de medida experimental - M_x - Pé direito.	145
Figura 88 - Cadeia de medida experimental - F_x - Pé esquerdo.	146
Figura 89 - Cadeia de medida experimental - F_y - Pé esquerdo.	146
Figura 90 - Cadeia de medida experimental - M_x - Pé esquerdo.	147
Figura 91 - Cadeia de medida experimental - $Z1$ - Pé direito.	148
Figura 92 - Cadeia de medida experimental - $Z6$ - Pé direito.	149
Figura 93 - Cadeia de medida experimental - $Z8$ - Pé direito.	149
Figura 94 - Cadeia de medida experimental - $Z1$ - Pé esquerdo.	150
Figura 95 - Cadeia de medida experimental - $Z6$ - Pé esquerdo.	150
Figura 96 - Cadeia de medida experimental - $Z8$ - Pé esquerdo.	151
Figura 97 - Teste de impacto - 3DoF - Tempo.	152
Figura 98 - Teste de impacto - 3DoF - Frequência.	152

Figura 99 - Teste de impacto - 6DoF - Tempo.	153
Figura 100 - Teste de impacto - 6DoF - Frequência.	154
Figura 101 - Excerto contendo as informações angulares do sistema - 3DoF - Voluntário 1.	158
Figura 102 - Excerto contendo as informações angulares do sistema - 6DoF - Voluntário 3.	159
Figura 103 - Excerto contendo a cadência instantânea - Voluntário 1.	160
Figura 104 - Excerto contendo a cadência instantânea - Voluntário 3.	161
Figura 105 - Visualização dos esforços em um ciclo de pedalada - Voluntário 3 - 3DoF.	162
Figura 106 - Visualização dos esforços ao longo do tempo - Voluntário 3 - 3DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	164
Figura 107 - Visualização das forças relativa e efetiva - Voluntário 3 - 3DoF. a) Lado direito; Lado esquerdo.	166
Figura 108 - Excerto contendo a potência instantânea - Voluntário 3 - 3DoF. .	168
Figura 109 - Visualização dos esforços em um ciclo de pedalada - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	169
Figura 110 - Visualização dos esforços ao longo do tempo - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	171
Figura 111 - Visualização das forças relativa e efetiva - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	174
Figura 112 - Excerto contendo a potência instantânea - Voluntário 3 - 6DoF. .	175
Figura 113 - Visualização dos momentos - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.	176
Figura 114 - Análise de resíduos - Força resultante direita.	179
Figura 115 - Análise de resíduos - Força resultante esquerda.	179
Figura 116 - Análise de resíduos - Força efetiva direita.	181
Figura 117 - Análise de resíduos - Força efetiva esquerda.	182
Figura 118 - Análise de resíduos - Potência efetiva.	184
Figura 119 - Análise de resíduos - Assimetria bilateral.	185
Figura 120 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z2 - 6DoF.	202
Figura 121 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z3 - 6DoF.	203
Figura 122 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z4 - 6DoF.	203
Figura 123 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z5 - 6DoF.	204
Figura 124 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z6 - 6DoF.	204
Figura 125 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z7 - 6DoF.	205
Figura 126 - Cadeia de medidas teórica para a ponte Z8 - 6DoF.	205
Figura 127 - Cadeia de medida experimental - Z2 - Pé direito.	206
Figura 128 - Cadeia de medida experimental - Z3 - Pé direito.	207
Figura 129 - Cadeia de medida experimental - Z4 - Pé direito.	207
Figura 130 - Cadeia de medida experimental - Z5 - Pé direito.	208
Figura 131 - Cadeia de medida experimental - Z7 - Pé direito.	208
Figura 132 - Cadeia de medida experimental - Z2 - Pé esquerdo.	209
Figura 133 - Cadeia de medida experimental - Z3 - Pé esquerdo.	209
Figura 134 - Cadeia de medida experimental - Z4 - Pé esquerdo.	210
Figura 135 - Cadeia de medida experimental - Z5 - Pé esquerdo.	210
Figura 136 - Cadeia de medida experimental - Z7 - Pé esquerdo.	211

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Compilação dos trabalhos citados.	52
Tabela 2 - Características principais do alumínio 7075-T6.	64
Tabela 3 - Principais características dos reguladores TLV1117.	68
Tabela 4 - Principais características do modelo de bateria escolhido.	69
Tabela 5 - Principais características da série REF30XX.	70
Tabela 6 - Principais características do OPA4187.	70
Tabela 7 - Deformações via simulação - 6DoF.	73
Tabela 8 - Principais características do INA826.	76
Tabela 9 - Principais características do filtro utilizado.	78
Tabela 10 - Principais características do TLV4333.	79
Tabela 11 - Características do ADS1256.	81
Tabela 12 - Ganhos teóricos - INA826 - 3DoF.	87
Tabela 13 - Funções de transferência teóricas para a célula 3DoF.	87
Tabela 14 - Deformações a partir dos esforços aplicados.	88
Tabela 15 - Saídas das pontes de <i>Wheatstone</i> a partir dos esforços aplicados.	89
Tabela 16 - Ganhos totais e resistores ideais para o INA826.	89
Tabela 17 - Principais características do DMM4050.	95
Tabela 18 - Principais características do acelerômetro DeltaTron 4520.	99
Tabela 19 - Parâmetros utilizados na ANOVA.	114
Tabela 20 - Ganhos corrigidos - INA826 - 3DoF.	129
Tabela 21 - Ganhos corrigidos - INA826 - 6DoF Direito.	129
Tabela 22 - Ganhos corrigidos - INA826 - 6DoF Esquerdo.	130
Tabela 23 - Funções de transferência experimentais - 3DoF.	134
Tabela 24 - Sensibilidades e erros de linearidade - 6DoF Direito.	138
Tabela 25 - Sensibilidades e erros de linearidade - 6DoF Esquerdo.	139
Tabela 26 - Incertezas relacionadas aos braços das topologias de ponte de <i>Wheatstone</i> utilizadas.	155
Tabela 27 - Incertezas combinada e expandida para os canais analisados.	156
Tabela 28 - Resultados da análise estatística para a média das forças resultantes.	180
Tabela 29 - Resultados da análise estatística para a média das forças efetivas.	182
Tabela 30 - Resultados da análise estatística para a média da potência efetiva.	183
Tabela 31 - Resultados da análise estatística para a assimetria bilateral média.	185
Tabela 32 - Principais resultados obtidos a partir das análises estatísticas.	187

LISTA DE ABREVIATURAS

3DoF	<i>3 Degrees of Freedom</i>
6DoF	<i>6 Degrees of Freedom</i>
AB	<i>Assimetria Bilateral</i>
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i>
ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
FE	Força efetiva
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FR	Força resultante
GBW	<i>Gain-Bandwidth</i>
IEE-Bio	Instrumentação Eletro-Eletrônica e Biosinais
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
IR	<i>Infrared</i>
LDO	<i>Low Dropout Regulators</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PSRR	<i>Power Supply Rejection Ratio</i>
RPM	Rotações por minuto
SD Card	<i>Secure Digital Card</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SPS	<i>Samples per second</i>
UART	<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{eixo}	Força exercida no eixo especificado
M_{eixo}	Momento exercido no eixo especificado
r	Índice de efetividade
θ	Ângulo do pedivela
α	Ângulo relativo
β	Ângulo do pedal
T	Torque resultante
L	Comprimento
W	Trabalho
Pot	Potência
t	Tempo
ω	Velocidade angular
Cad	Cadência
F	Força
k	Constante de rigidez da mola
σ	Tensão mecânica
E	Módulo de elasticidade
ε	Deformação aparente
K	Fator <i>gauge</i>
R	Resistência elétrica
V	Tensão elétrica
\vec{E}	Vetor de esforços
C	Matriz de calibração
D	Matriz de desacoplamento
I	Corrente elétrica
u	Incerteza

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivos	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1	Conceitos Básicos de biomecânica Aplicada ao Ciclismo	22
2.1.1	Caracterização dos esforços e do movimento de pedalada	23
2.1.1.1	Forças e momentos aplicados ao pedal	24
2.1.1.2	Fases da pedalada	25
2.1.1.3	Ângulos entre pedal e pedivela	29
2.1.1.4	Torque e potência mecânica	30
2.1.2	Tipos de pedais e sistemas de fixação	32
2.2	Células de carga e extensometria	35
2.2.1	Fundamentos teóricos	35
2.2.2	Extensômetros	37
2.2.3	Ponte de <i>Wheatstone</i>	38
2.2.4	Calibração de células via matriz de desacoplamento	40
2.3	Trabalhos relacionados	41
2.3.1	Pedivelas comerciais instrumentados	42
2.3.2	Pedivela não-comercial instrumentado	44
2.3.3	Pedal comercial instrumentado	45
2.3.4	Pedal não-comercial instrumentado	47
2.3.5	Tacos comerciais instrumentados	49
2.3.6	Taco não-comercial instrumentado	51
2.3.7	Compilação de características dos estudos passados e comparação com o presente trabalho.	52
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	53
3.1	Células de carga	55
3.1.1	Embasamento da estrutura das células de carga	55
3.1.2	Desenvolvimento da estrutura das células de carga	56
3.1.3	Simulações estática e dinâmica	60
3.1.4	Local de cimentação dos extensômetros	61
3.1.5	Fabricação das peças	63
3.1.6	Cimentação dos extensômetros	65
3.2	Circuitos de condicionamento e de aquisição	66
3.2.1	Tensões elétricas de alimentação	67
3.2.2	Tensões elétricas de referência	69
3.2.3	Circuito de condicionamento	71

3.2.3.1	Pontes de <i>Wheatstone</i>	71
3.2.3.2	Estágio de entrada	75
3.2.3.3	Estágio de filtragem e de amplificação	77
3.2.4	Circuito de aquisição	80
3.2.5	Circuitos completos	84
3.3	Funções de transferência teóricas	85
3.3.1	Célula de carga com 3 graus de liberdade	85
3.3.2	Célula de carga com 6 graus de liberdade	87
3.3.3	Cadeias de medidas teóricas	91
3.4	Calibração estática	93
3.5	Calibração dinâmica	98
3.6	Sistema de medição de ângulos	100
3.7	Análise de incertezas	104
3.7.1	Incerteza para a ponte de <i>Wheatstone</i>	105
3.7.2	Incertezas da cadeia de condicionamento	107
3.8	Ensaio de validação com voluntários	109
3.9	Análise estatística	113
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	116
4.1	Resultados das análises estática e dinâmica dos modelos virtuais 116	116
4.2	Funções de Transferência Experimentais de Deformação	128
4.2.1	Célula de carga com 3 graus de liberdade	131
4.2.2	Célula de carga com 6 graus de liberdade	136
4.3	Cadeias de medidas experimentais	144
4.3.1	Célula de carga com 3 graus de liberdade	144
4.3.2	Célula de carga com 6 graus de liberdade	148
4.4	Calibração dinâmica	152
4.4.1	Célula de carga com 3 graus de liberdade	152
4.4.2	Célula de carga com 6 graus de liberdade	153
4.5	Análise das incertezas associadas ao sistema	154
4.5.1	Incerteza para a ponte de <i>Wheatstone</i>	154
4.5.2	Incertezas da cadeia de condicionamento	155
4.6	Análise dos Ensaio de Validação	157
4.6.1	Análise dos Dados Provenientes da Captura de Movimentos	157
4.6.2	Análise Referentes às Células de Carga com 3 graus de liberdade	161
4.6.3	Análise Referentes às Células de Carga com 6 graus de liberdade	169
4.6.4	Análise estatística dos dados	178
4.6.4.1	Análise estatística da força resultante	178
4.6.4.2	Análise estatística da força efetiva	181
4.6.4.3	Análise estatística da potência efetiva	183
4.6.4.4	Análise estatística da assimetria bilateral média	185
4.6.4.5	Aglutinação dos resultados	187
5	CONCLUSÃO	188
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	191
	REFERÊNCIAS	193
	APÊNDICE A PCB DE CONTROLE	200

APÊNDICE B	PCB AQUISIÇÃO (CANALIS 1 A 4)	201
APÊNDICE C	CADEIAS DE MEDIDAS TEÓRICAS - 6DOF	202
APÊNDICE D	CADEIAS DE MEDIDAS EXPERIMENTAIS - 6DOF .	206

1 INTRODUÇÃO

O ciclismo é uma prática que acompanha a humanidade há cerca de 2 séculos. Atualmente, devido a diversas circunstâncias relacionadas ao meio ambiente e a modos de vida alternativos ao uso excessivo de veículos automotores a combustão, a adoção dos pedais encontra-se em franca ascensão. Do ponto de vista ambiental, uma bicicleta emite cerca de 11 vezes menos gases de efeito estufa por quilômetro rodado do que um carro durante seu ciclo de vida, além de diminuir a lotação das ruas e de gerar poluição sonora praticamente nula (GLASKIN, 2012). Já em relação ao bem-estar físico, o ciclismo se apresenta como uma ferramenta de elevação da capacidade cardiorrespiratória enquanto exerce baixo impacto em articulações vitais como os joelhos (BINI; CARPES, 2014), além de reduzir a taxa de mortalidade entre seus praticantes (ANDERSEN *et al.*, 2000).

A ampla adoção do ciclismo, então, leva ao interesse natural de uma parcela dos praticantes em relação ao viés competitivo do esporte. Surge aí a expansão do mercado consumidor para instrumentos capazes de melhorar o desempenho do ciclista via compilação e processamento de dados como força, potência, velocidade, entre outros. Percebendo a demanda, as fabricantes do setor desenvolveram as suas versões de tais instrumentos. Se considerada a tomada de potência durante a pedalada, contudo, foram desenvolvidas plataformas fechadas que não oferecem ao grande público informações como a direção das forças aplicadas, crucial para a análise da técnica de pedalada e para antecipar fatores que podem levar a lesões (BINI; CARPES, 2014).

Visando preencher a lacuna da falta de dados específicos envolvendo a técnica

de pedalada, diversas publicações recentes (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014; YAMASHITA *et al.*, 2013; PIGATTO *et al.*, 2016; HUSKEN, 2018; BIBBO *et al.*, 2019) propuseram novas ferramentas de medição que permitem a análise das forças aplicadas ao movimento com o devido rigor científico, buscando detalhar de maneira vetorial o movimento e o desbalanço dos esforços em 2 ou em 3 eixos (F_x , F_y e F_z).

Dando continuidade à linha de estudos, o objetivo deste trabalho é o projeto, a construção, a caracterização e a validação de células de carga para substituírem os tacos de encaixe de sapatilha padrão SPD-SL (Shimano Inc.). Os novos tacos foram projetados de modo a permitir a sua instrumentação através da inserção de extensômetros, os quais permitiriam realizar a medição dos esforços no limite da interface entre atleta e bicicleta sem inferir mudanças significativas na biomecânica da pedalada. Um deles é capaz de mensurar as 2 forças ligadas à geração de movimento e o momento em torno do eixo frontal (F_x , F_y e M_x) - 3DoF (*3 degrees of freedom* - 3 graus de liberdade); o outro é projetado para mensurar as forças (F_x , F_y e F_z) e os momentos (M_x , M_y e M_z) exercidos no ponto de contato entre taco e pedal - 6DoF (*6 degrees of freedom* - 6 graus de liberdade). De forma síncrona, os ângulos entre pedal e pedivela são adquiridos com o uso de câmeras. Ainda, o sistema é projetado de maneira a ser compacto, portátil e a não exigir mudanças estruturais no conjunto da bicicleta para que sejam realizadas as medições.

1.1 Justificativa

A medição dos esforços exercidos durante o ato de pedalar é imprescindível não só para melhorar a performance de um atleta, mas também para identificar possíveis

deficiências técnicas. Com ferramentas como a proposta neste trabalho, é possível avaliar o comportamento biomecânico do ciclista. Atuando tais equipamentos como auxiliares às avaliações motoras, é promovido o suporte às ações de correção (se necessário), evitando que o uso da bicicleta gere lesões repetitivas a longo prazo. Em um cenário que contempla um número crescente de praticantes do esporte em todas as suas modalidades, torna-se de suma importância que se busque a inovação desses aparelhos de avaliação de desempenho, gerando capilaridade para que se atinja - além dos praticantes de alto rendimento - o usuário comum, o qual pode obter benefícios a partir dos dados obtidos no que diz respeito à correção de problemas relacionados ao alinhamento dos membros e reforço muscular para correção de assimetrias, por exemplo.

Também, o desenvolvimento da ferramenta aqui descrita possibilitará um estudo mais amplo dos momentos gerados na interface entre sapatilha e pedal - que são parâmetros pouco explorados se comparados ao enfoque dado às forças. Assim, novas discussões centradas nas tendências de torção do conjunto sapatilha-pedal podem auxiliar na obtenção de uma técnica de pedalada ainda mais apurada.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é substituir os tacos comerciais por 2 modelos distintos de tacos instrumentados, culminando em um sistema capaz de mensurar as forças e os momentos exercidos pelo ciclista. Com a captação síncrona dos ângulos da estrutura, será possível inferir também a potência exercida, permitindo uma análise mais completa do movimento.

Se dividido em tópicos, os marcos específicos a serem atingidos são:

- Projeto e usinagem de novos tacos de encaixe, substituindo os comerciais;
- Instrumentação, com o uso de extensômetros, dos novos tacos de encaixe, propiciando células de carga com 3 e com 6 graus de liberdade;
- Criação de um sistema síncrono sem fio capaz de registrar os dados em uma unidade de memória local e/ou de enviá-los para um terminal remoto;
- Calibração do sistema e execução de teste de validação com o uso do equipamento em uma bicicleta;
- Demonstrar que é possível desenvolver um sistema compacto e portátil utilizando os tacos como células de carga sem afetar as características de pedalada do ciclista;
- Comparação das métricas obtidas com os dados provenientes de trabalhos desenvolvidos anteriormente dentro da área.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Conceitos Básicos de biomecânica Aplicada ao Ciclismo

A biomecânica é o estudo de sistemas biológicos com foco nas suas estruturas e nas suas funções atrelado a métodos derivados da mecânica, levando em conta o efeito que as forças e os momentos exercem nos organismos. Os primórdios da área datam da Renascença, quando o italiano Giovanni Alfonso Borelli foi pioneiro em descrever a base da dinâmica muscular e esquelética. Desde então, a biomecânica ramificou-se com o intuito de modelar desde o comportamento de estruturas celulares (microscópico) até o movimento humano (macroscópico) (ARUIN; ROGERS, 2013).

De acordo com HOFFMAN; KNUDSON (2018), o estudo da biomecânica do movimento humano (também conhecida como cinesiologia) tem como objetivos principais desenvolver teorias fundamentais que expliquem como os esforços afetam os movimentos e as estruturas/funções corporais e aplicar tais teorias de maneira prática, baseando-se em resultados validados a fim de encontrar a resposta ótima para os problemas dispostos.

Desta forma, os princípios biomecânicos da cinesiologia (como por exemplo a estimativa da menor força necessária para produzir o resultado ótimo) têm sido aplicados com sucesso em uma ampla gama de problemas ergonômicos na indústria, esporte e medicina. Atualmente, por exemplo, atletas trabalham com cinesiologistas para executar, de forma mais eficiente e exitosa, os movimentos requeridos por seus esportes (FROST, 2013).

Quando traçado o paralelo com o ciclismo, as descobertas provindas da ótica

da biomecânica foram responsáveis por tornar a estrutura das bicicletas cada vez mais complexa na busca por um custo energético menor (MINETTI; PINKERTON; ZAMPARO, 2001), gerando divergências principalmente no que tange as geometrias e os pesos de acordo com a modalidade praticada (BINI; CARPES, 2014). Ainda, ao compilar medições de esforços, marcadores fisiológicos e o posicionamento do ciclista (SOVNDAL, 2020; BINI; CARPES, 2014), a biomecânica aplicada ao ciclismo torna possível aos praticantes de todas as categorias a extração do melhor de sua pedalada, seja para fins de competição, seja para deslocamentos ou lazer. Essa prática também é conhecida como *Bike Fit*, e alavanca de maneira crescente o desenvolvimento de sistemas acadêmicos e comerciais capazes de disponibilizar tais informações aos ciclistas, já que encontrar a posição ideal na bicicleta é fundamental para o desempenho, para o conforto e para evitar lesões (BURT, 2014).

2.1.1 Caracterização dos esforços e do movimento de pedalada

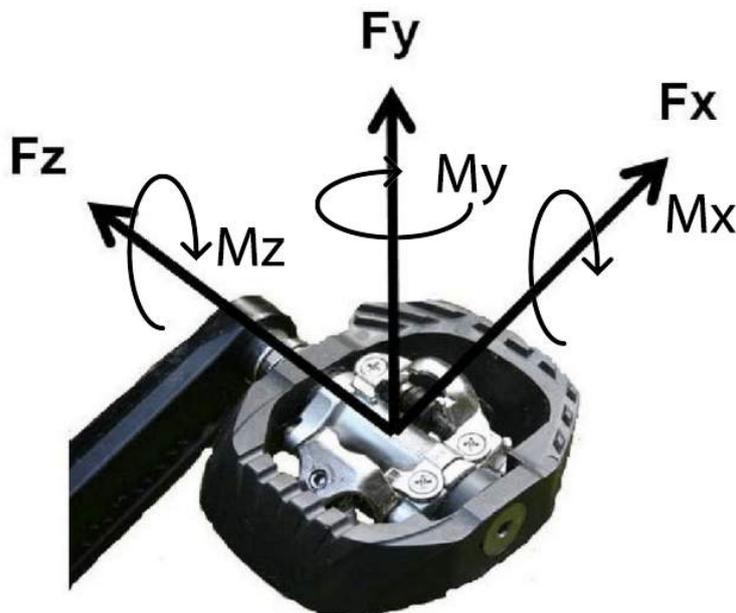
A obtenção de um panorama completo da biomecânica do ciclismo é crucial, já que aperfeiçoar a interação entre ciclistas e suas bicicletas é a chave para aumentar o desempenho, otimizando o uso dos esforços a fim de reduzir o custo energético durante o movimento (MINETTI; PINKERTON; ZAMPARO, 2001). Para tal, torna-se imprescindível que o ciclo de pedalada seja conhecido em todas as suas nuances. Como os esforços são produzidos nos músculos e transferidos via sistema esquelético, as forças nos pedais são de crítica atuação, sendo uma combinação das componentes normal, anterior-posterior e médio-lateral (referenciadas ao plano do pedal paralelo à superfície da bicicleta em situação de inclinação nula). De acordo com BINI; CARPES (2014), caso sejam utilizados pedais de encaixe, a componente médio-lateral é mínima. Mesmo assim, tal componente pode representar alguma

perda em termos marginais ou apontar desbalanços no posicionamento do ciclista.

2.1.1.1 Forças e momentos aplicados ao pedal

A Figura 1 ilustra os esforços que exercem ação sobre o pedal. A combinação vetorial das componentes de força (F_x - força frontal, F_y - força perpendicular e F_z - força lateral) implica na Força Resultante (FR). Contudo, apenas parte da FR é capaz de gerar movimento. Essa parcela é a Força Efetiva (FE), que é a porção da FR perpendicular ao pedivela. Os momentos (M_x - momento frontal, M_y - momento normal e M_z - momento lateral) também estão presentes, sempre referenciados ao centro geométrico do pedal.

Figura 1 – Componentes de força e de momento no pedal.



Fonte: Adaptado de BINI; CARPES (2014).

A partir de tais variáveis, DAVIS; HULL (1981a) definiram que a razão entre as forças efetiva (FE) e resultante (FR) é denominada índice de efetividade (r) (vide

Equação (1)).

$$r = \frac{FE}{FR} \quad (1)$$

O índice de efetividade r varia de -1 a 1, sendo o sinal resultante um indicativo se os esforços contribuem para o movimento (+) ou não (-). Quanto ao módulo da variável, constata-se maior ou menor eficiência de conversão: $r = +1$, por exemplo, significa que FE e FR têm mesmo módulo e sentido e há a conversão da força em movimento na sua plenitude; $r = -1$, por outro lado, significa que FE e FR são de mesmo módulo mas opostas em sentido, contribuindo negativamente para a manutenção do movimento.

Outra variável importante é a assimetria bilateral (Equação (2)), que é um índice que revela as disparidades entre as forças efetivas do membro dominante e do membro não-dominante (CHAVET; LAFORTUNE; GRAY, 1997), oferecendo um panorama mais amplo sobre as deficiências do ciclista em relação ao equilíbrio de esforços.

$$AB = \frac{FEMD - FEMND}{FEMD} 100\%, \quad (2)$$

onde AB é a assimetria bilateral em [%], $FEMD$ é a força efetiva do membro dominante [N] e $FEMND$ é a força efetiva do membro não-dominante em [N].

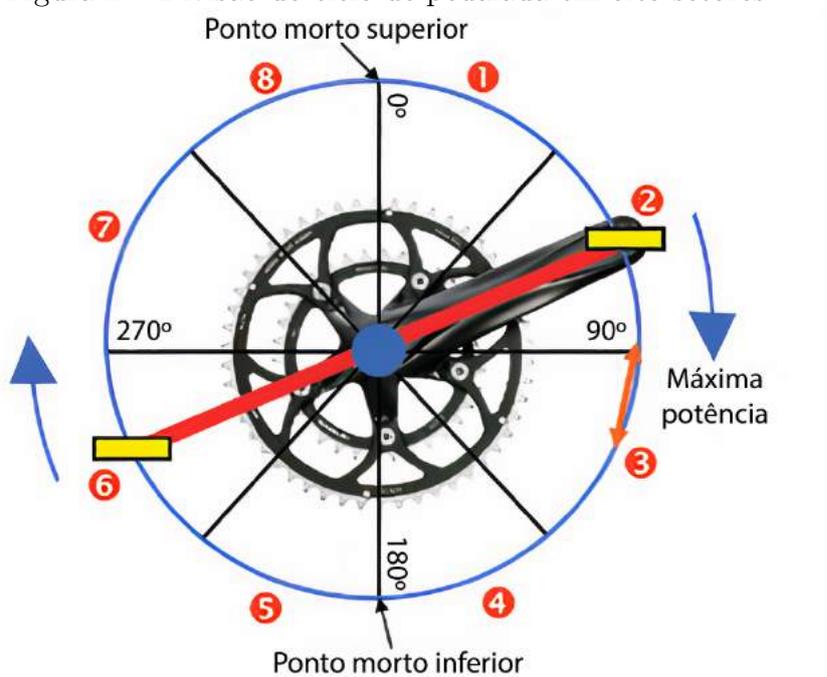
2.1.1.2 Fases da pedalada

O movimento de pedalada é cíclico e pode ser dividido, de maneira simples, em duas grandes fases com relação à efetividade: a primeira, chamada de fase propulsiva, ocorre de 0° a 180° e é caracterizada pelos maiores valores de r , ou seja, é a fase que mais contribui para a geração e para a manutenção de movimento; a segunda,

chamada de fase de recuperação, ocorre de 180° a 360° e é caracterizada por índices de efetividade menores, ou seja, há menor contribuição para a geração e para a manutenção do movimento (BINI; CARPES, 2014).

Segundo SCHMIDT (2014), é possível detalhar ainda mais o ciclo de pedalada, dividindo-o em 8 distintos setores (Figura 2), compreendendo 45° cada. Desta forma, há maior assertividade no apontamento das etapas do movimento.

Figura 2 – Divisão do ciclo de pedalada em oito setores.



Fonte: Adaptado de SCHMIDT (2014).

O primeiro setor tem seu início em 0° (ponto morto superior). Porém, somente por volta dos 10° é que ocorre o surgimento das forças geradoras de movimento sobre o pedal. Os setores 2 e 3 compreendem uma faixa que vai dos 45° aos 135° e contém o ponto de máxima potência incidida (em torno dos 90° - quando FE e FR são equivalentes e geram maior r). O quarto setor representa o final da fase propulsiva e o início da fase de recuperação, ponto de observação crucial para uma técnica de pedalada eficiente, pois em condições normais não há o movimento de puxar o pedal

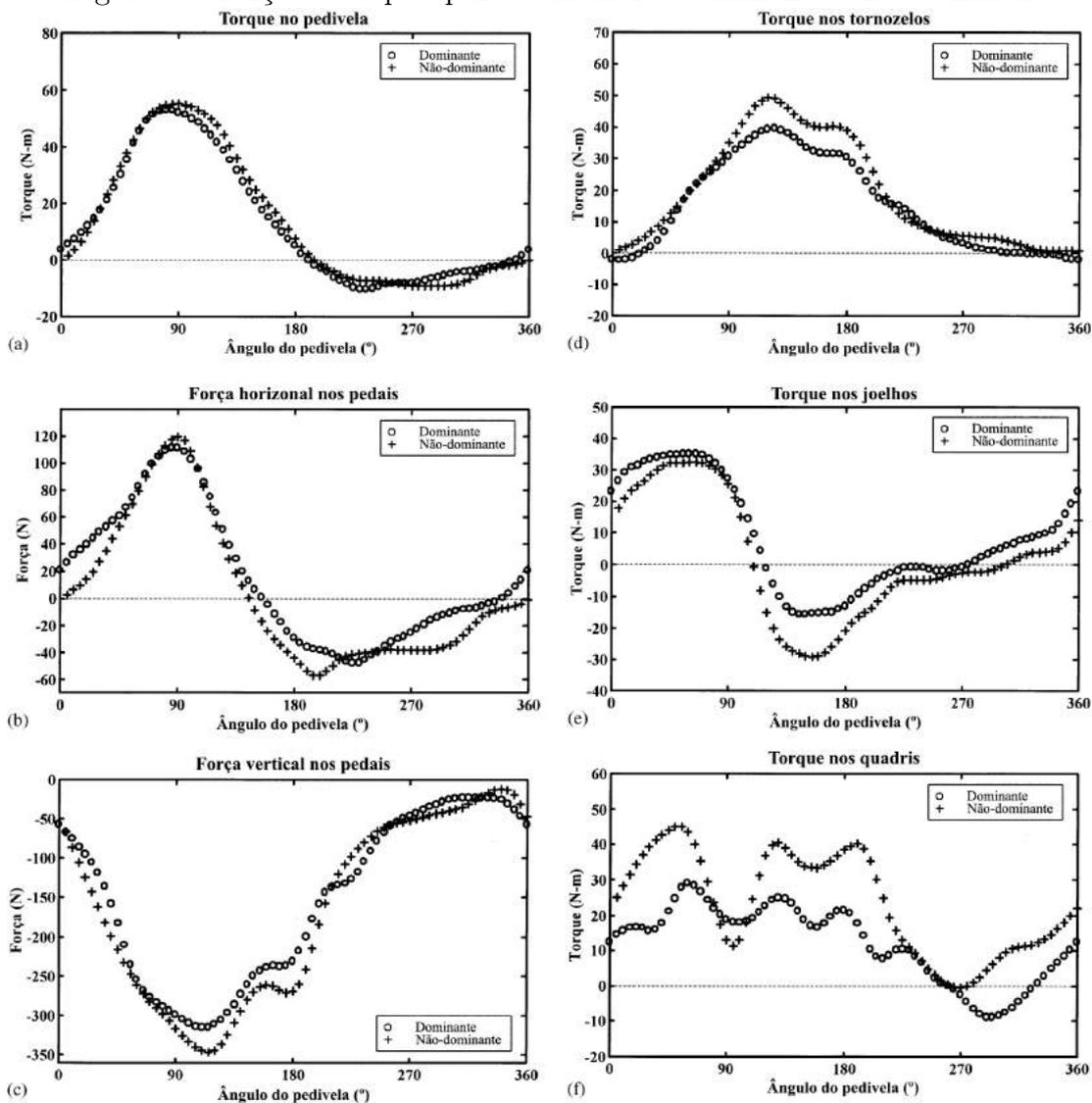
e o peso da perna é erguido pela potência da outra perna, gerando desperdício de energia (SCHMIDT, 2014). Contudo, um indivíduo treinado consegue reverter tal tendência, maximizando a eficiência da aplicação de esforços durante a transição. A partir dos 180° (ponto morto inferior) é iniciado o quinto setor, estando presentes resquícios da fase propulsiva mesmo que a característica preponderante seja da fase de recuperação. Tal ação prolonga-se para os sexto e sétimo setores, passando pela região de 270° , análoga à região de maior potência gerada entre os setores 2 e 3. Assim, é gerada a maior potência mecânica de recuperação, preparando a entrada no oitavo setor, o qual compreende o recomeço da fase propulsiva.

Se considerado o desenho convencional aplicado aos pedais de plataforma, verifica-se que não há a possibilidade de aplicar força de tração durante a fase de recuperação. Desta forma, dos 180° aos 360° o peso da perna é erguido somente pela ação da outra perna caso a técnica não esteja apurada, promovendo perda considerável de energia (SCHMIDT, 2014). O uso de sistemas de encaixe oferece uma alternativa a tal problema, permitindo a geração de FE mesmo na fase de recuperação.

Por outro lado, os sistemas de encaixe não são suficientes para sanar todos os problemas atrelados à pedalada. Devido ao fator biológico conhecido como perna dominante, principalmente em indivíduos não treinados, a assimetria das forças exercidas a partir do membro dominante e do membro não-dominante causa disparidade na potência mecânica gerada e, de forma geral, disparidade no torque aplicado às juntas. SMAK; NEPTUNE; HULL (1999) utilizaram um ergômetro juntamente com um sistema de cinematria para observar os efeitos da assimetria de pedalada em ciclistas de competição. Analisou-se uma aquisição do estudo (Figura

3) relacionada a um indivíduo treinado e destro, sendo a força horizontal referente a F_x e a força vertical referente a F_y (Figura 1).

Figura 3 – Forças e torques para os membros dominante e não-dominante.



Fonte: Adaptado de SMAK; NEPTUNE; HULL (1999).

Observa-se cerca de 10% de diferença na força vertical e no momento dos tornozelos, 50% no momento dos joelhos e superior a 100% no momento dos quadris. Em todos os casos, o membro não-dominante é mais exigido, já que o participante não possui a mesma coordenação motora se comparado com o membro dominante. Este esforço extra aumenta os riscos de lesões nessa região (SMAK; NEPTUNE; HULL, 1999). Assim, o objetivo primordial de um programa de treinamento focado

na técnica de pedalada é a redução de tais variações (SOVNDAL, 2020).

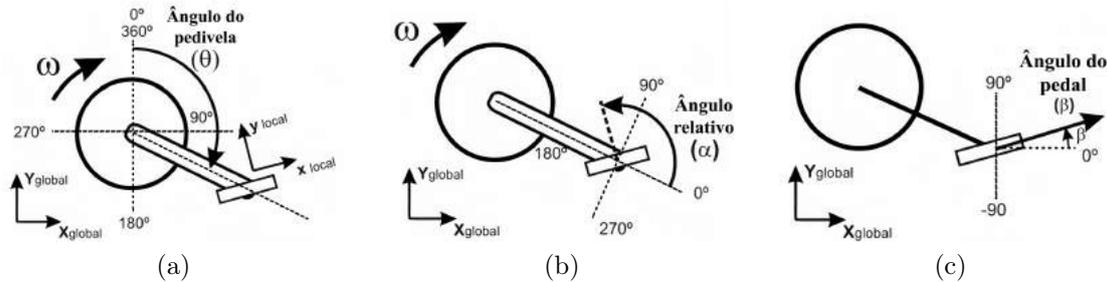
2.1.1.3 Ângulos entre pedal e pedivela

A medição exclusiva dos esforços aplicados ao pedal pode ser incompleta caso a cinemática do movimento não seja considerada devido à natureza vetorial dos esforços. Para desacoplar as FR e FE , são necessárias informações angulares do conjunto pedal-pedivela já que o sistema de coordenadas dos pedais são diferentes em relação ao sistema do pedivela. No que tange a inclinação dos pedais, duas técnicas são comumente utilizadas para a obtenção da variável. A primeira é baseada na cinemetria, ou seja, o uso de uma ou mais câmeras e de marcadores para gerar modelos capazes de replicar a angulação dos diversos componentes do sistema (desde as peças da bicicleta até os membros do ciclista). Este processo permite a aquisição de informações valiosas sobre o posicionamento do conjunto bicicleta-ciclista, mas muitas vezes exige pós-processamento e sincronização. A segunda forma trata da utilização de sensores físicos acoplados às partes de interesse, como *encoders* e potenciômetros fazendo parte do eixo do pedal, permitindo a integração direta com os sensores de força e uma redução significativa no tempo de processamento (BINI; CARPES, 2014).

De acordo com NABINGER (2006), a posição angular do pedivela é descrita pelo ângulo do pedivela (θ - Figura 4(a)) durante o ciclo da pedalada - coincidente com os ângulos descritos na Seção 2.1.1.2. A sua referência está situada no ponto morto superior e é utilizada para a normalização dos dados temporais. O ângulo entre o pedal e o pedivela é chamado de ângulo relativo (α - Figura 4(b)) e relaciona o braço do pedivela com o sistema de coordenadas local do pedal. Tal relação é utilizada na decomposição dos esforços aplicados ao pedal, permitindo a inferência de FR e de

FE. O ângulo do pedal (β - Figura 4(c)) representa a inclinação entre os sistemas de coordenadas local do pedal e o sistema de coordenadas global do pedivela.

Figura 4 – Ângulos do sistema pedal-pedivela. a) Ângulo do pedivela - θ ; b) Ângulo relativo - α ; c) Ângulo do pedal - β .



Fonte: Adaptado de NABINGER (2006).

De forma mais direta, β pode ser obtido por meio da Equação (3) (NABINGER, 2006):

$$\beta = \alpha - \theta \quad (3)$$

Desta forma, os ângulos referentes ao sistema pedal-pedivela são completamente definidos e torna-se possível decompor os esforços exercidos pelo participante.

2.1.1.4 Torque e potência mecânica

De posse das forças decompostas a partir da inferência dos ângulos e da medição dos esforços impostos aos pedais, tem-se definida a força perpendicular ao pedivela (*FE*), que é a parcela de *FR* capaz de gerar movimento. A *FE*, então, transmite o esforço por meio do torque gerado no eixo girante do pedivela, de acordo com a Equação (4).

$$T = FE \times L, \quad (4)$$

onde T é o torque resultante em $[Nm]$, FE é a Força Efetiva em $[N]$ e L é o comprimento do braço do pedivela em $[m]$, aqui atuante como braço de alavanca.

Então, acopladas às rodas por meio da corrente, as coroas do pedivela transmitem o torque gerado pelo ciclista de modo a transformar o trabalho de uma revolução (definido pela Equação (5)) em impulsão.

$$W = \int_{\theta=0}^{2\pi} T(\theta)d\theta, \quad (5)$$

onde W é o trabalho externo gerado em uma rotação do sistema em $[J]$, θ é a posição angular do pedivela em $[rad]$ e T é o torque inferido pelo ciclista ao conjunto em $[Nm]$.

Tendo informação sobre o trabalho W gerado, obtém-se a potência mecânica exercida em relação ao tempo de ciclo de acordo com a Equação (6) (NABINGER, 2006).

$$Pot_n = \frac{W}{t_n}, \quad (6)$$

onde Pot_n é a potência de um dado ciclo n em $[W]$, W é o trabalho externo exercido durante o ciclo n em $[J]$ e t_n é o tempo de duração de um dado ciclo n em $[s]$.

A potência mecânica também pode ser obtida por meio da relação entre torque e velocidade angular (Equação (7)) (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).

$$Pot = T \times \omega, \quad (7)$$

onde Pot é a potência mecânica em $[W]$, T é o torque em $[Nm]$ e ω é a velocidade angular do pedivela em $[rad]$. Entretanto, a velocidade angular de rotação

do pedivela é normalmente mensurada em *RPM*, sendo denominada cadência. Aplicando a conversão à Equação (7), obtém-se a Equação (8) que descreve a potência instantânea em relação ao torque e à cadência (BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO, 2014).

$$Pot = \frac{2\pi}{60} T \times Cad, \quad (8)$$

onde *Pot* é a potência mecânica instantânea em [W], *T* é o torque em [Nm] e *Cad* é a cadência em *RPM*.

2.1.2 Tipos de pedais e sistemas de fixação

Ao grande público, assim que são mencionados os pedais de bicicleta, vêm à mente os pedais de plataforma (Figura 5). A relação direta faz sentido, já que fora do ambiente esportivo são eles os mais utilizados e são o sistema mais antigo, concebido em 1867 (HERLIHY, 2004).

Figura 5 – Pedais do tipo plataforma

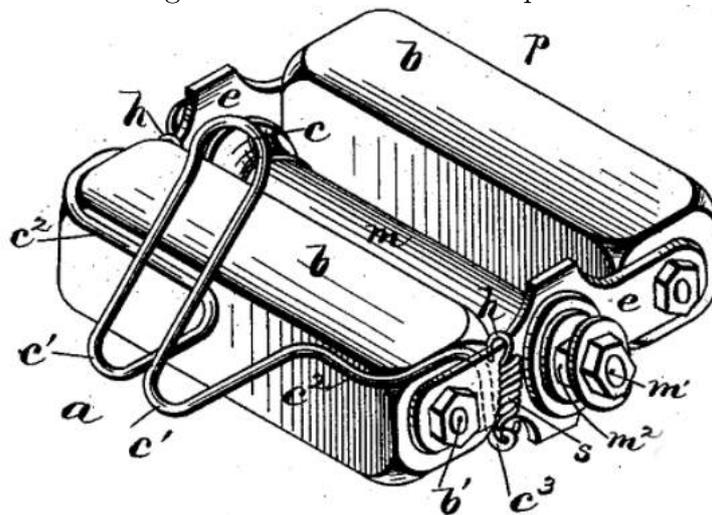


Fonte: LEGACKI (2017)

No final do século XIX, o desenvolvimento do aspecto competitivo do ciclismo e a necessidade de maior firmeza durante o movimento de pedalada para maximizar

a potência transmitida levou à criação dos firma-pés: uma estrutura que envolve a ponta do sapato em uma espécie de gaiola (Figura 6) (RANKIN, 1890).

Figura 6 – Pedal com firma-pés



Fonte: RANKIN (1890).

No entanto, os firma-pés não permitem movimentos como "puxar" o pedal durante a passagem pelos quadrantes inferiores do movimento e durante a fase de recuperação. Para propiciar a execução de força durante tais momentos, já no final do século XIX os primeiros sistemas de encaixe começaram a surgir (STRAW; KRAM, 2016), levando a indústria rumo aos pedais de encaixe. Contudo, a adoção inicial foi mínima. Os primeiros modelos a realmente ganhar tração só ocorreram nos anos 70, sendo o Cinelli M71 (GRUPPO S.r.l. - Div. Cinelli) o precursor da atual forma desse tipo de pedal.

Mesmo sendo uma inovação, os primeiros modelos de pedais de encaixe não encontraram sucesso comercial devido à dificuldade de soltura e ao aumento do estresse nos joelhos devido ao bloqueio do movimento lateral, levando ao desconforto e a prováveis lesões. O primeiro problema foi resolvido com a ideia de BERNARD; MERCIER (1987), sendo empregado um mecanismo com mola semelhante ao

utilizado em esquis que permite a soltura da sapatilha via aplicação de torção perpendicular ao conjunto - o que se tornaria a base dos principais sistemas existentes na atualidade. Já o problema do conforto gerado pela limitação lateral foi sanado com o refino dos tacos (peças presas às sapatilhas que realizam o encaixe com os pedais) e o surgimento do conceito de *float*: tolerância do conjunto que permite algum grau de liberdade para as torções - fator que hoje é essencial na ergonomia da pedalada.

Com o passar dos anos, três sistemas base se firmaram como referências de mercado para pedais de encaixe: os pedais "de estrada", que são derivados da criação de Bernard e de Mercier, oferecem a maior área de contato entre taco e pedal, utilizam o sistema de fixação de taco com 3 parafusos e possibilitam até 9° de *float*; os pedais de "mountain bike" (formalmente SPD (*Shimano Pedaling Dynamic* (Shimano Inc.)), um conjunto de tamanho reduzido - o que facilita o deslocamento fora da bicicleta - no qual o taco é fixado à sapatilha com 2 parafusos e há até 6° de *float*; os pedais Speedplay (Wahoo Fitness), sistema no qual os tacos contêm as molas de retensão e permitem até 15° de *float*.

As Figuras 7(a) e 7(b) demonstram o modo de uso dos já mencionados pedais de estrada, que servem como base para o desenvolvimento do sistema apresentado neste trabalho.

Desde a sua criação, portanto, os sistemas de encaixe se tornaram parte essencial do equipamento utilizado no ciclismo esportivo, permitindo maior aproveitamento da energia do atleta.

Figura 7 – Sistema de encaixe referente aos pedais de estrada. a) Sistema desencaixado; b) Sistema encaixado.



Fonte: Elaboração própria.

2.2 Células de carga e extensometria

Os transdutores de força, ou seja, estruturas que sofrem deformação mensurável, são chamados de células de carga. A extensometria é o método que utiliza o princípio da relação entre tensões e deformações mecânicas em corpos submetidos a solicitações mecânicas. O objetivo é a medição das deformações superficiais dos corpos, a qual está relacionada com a força (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019a).

2.2.1 Fundamentos teóricos

Robert Hooke, em 1678, estabeleceu uma das leis fundamentais da Mecânica dos Sólidos: a Lei de Hooke (Equação (9)). Tal lei define a relação entre tensões e deformações mecânicas decorrentes de esforços mecânicos nos corpos, expressando a deflexão de uma mola a partir de uma força aplicada longitudinalmente.

$$F = kx, \quad (9)$$

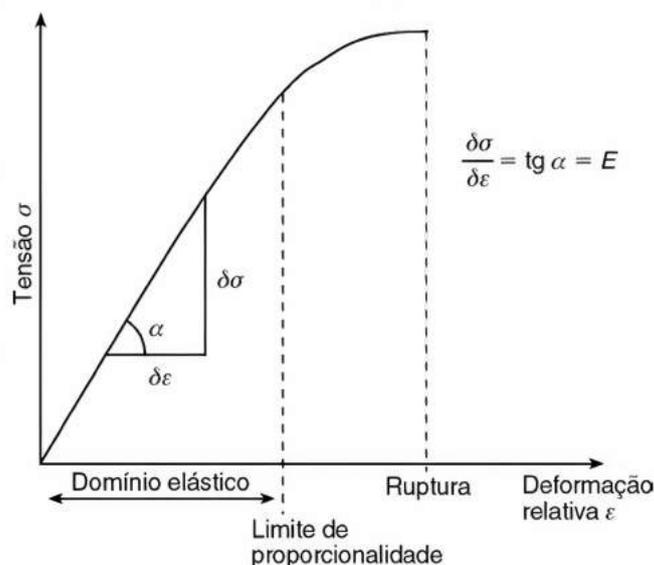
onde F é a força em $[N]$, k é a constante de rigidez da mola em $[\frac{N}{m}]$ e x é a deflexão em $[m]$.

Entretanto, a Lei de Hooke não se aplica somente a molas helicoidais: a relação é mantida para corpos de outras geometrias em regime elástico (até o limite de proporcionalidade, i.e., até o ponto em que a relação entre deflexão e carga é linear - comportamento ilustrado na Figura 8). Portanto, tal lei também pode ser expressa com o uso das versões normalizadas de força e deflexão se considerado o regime elástico, como observado na Equação (10).

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (10)$$

onde σ é a tensão mecânica em $[\frac{N}{m^2}]$, E o módulo de elasticidade em $[\frac{N}{m^2}]$ e ε a deformação aparente (%).

Figura 8 – Gráfico da tensão mecânica *versus* deformação.



Fonte: BALBINOT; BRUSAMARELLO (2019a).

A deformação aparente ou relativa ε representa a quantidade percentual de deformação gerada por um esforço mecânico aplicado ao corpo em relação às suas

dimensões originais - supondo funcionamento na região elástica. Desta forma, segundo BALBINOT; BRUSAMARELLO (2019a), ε é expressa pela Equação (11).

$$\varepsilon = \int_0^l \frac{dl}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0}, \quad (11)$$

onde l_0 é o comprimento inicial do corpo em $[m]$ e l é o comprimento final, também em $[m]$. Observa-se que o resultado é adimensional. Contudo, como são avaliadas micro-deformações, tal unidade é comumente referida como *microstrain* ($\mu\varepsilon$), ou seja, $1 \times 10^{-6} \frac{m}{m}$.

2.2.2 Extensômetros

No final do Século XIX, Kelvin conduziu experimentos em que submetia fios condutores a tensão mecânica. Ele observou que, em regime elástico, ocorria uma leve mudança de resistência elétrica associada a tais fios. Esta é a origem do conceito de extensômetro (*strain gauge*), um elemento cujo comportamento é regido pela Equação (12) e relaciona a variação de resistência elétrica ΔR [Ω] à deformação aparente ε .

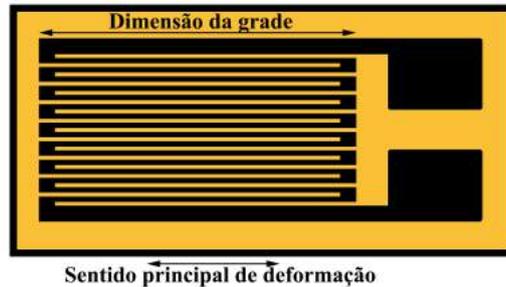
$$K = \frac{\frac{R}{R_0}}{\frac{l}{l_0}} = \frac{\Delta R}{\varepsilon}, \quad (12)$$

sendo K chamado de fator *gauge*, relacionado à sensibilidade do extensômetro (HOFFMANN, 1989).

Posterior aos estudos de Kelvin surgiram diversos protótipos de extensômetros, sendo o extensômetro de folha (Figura 9) o modelo mais utilizado. O princípio de funcionamento é o mesmo: ao sofrer deformação, os segmentos da grade têm suas dimensões modificadas, afetando proporcionalmente a resistência elétrica do

conjunto.

Figura 9 – Modelo genérico de um extensômetro de folha.



Fonte: Elaboração própria.

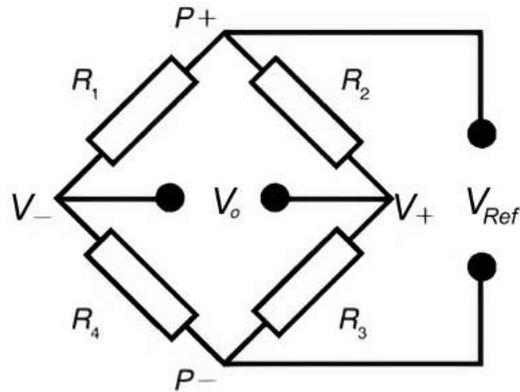
Com relação ao material de fabricação, são diversas as ligas disponíveis. A escolha deve ser pautada, então, nas características físicas da estrutura a ser estudada, sendo levados em conta a rugosidade e a capacidade de dissipação térmica do material de fabricação do elemento, sua deformação devido à temperatura a fim de auto-compensar os extensômetros, a deformação máxima da peça, entre outros fatores.

2.2.3 Ponte de *Wheatstone*

O extensômetro, de acordo com o disposto na Seção 2.2.2, sofre uma variação de resistência elétrica proporcional à deformação ao qual ele é exposto. Contudo, tais variações são da ordem de $m\Omega$. A fim de tornar legíveis tais variações, é necessário a aplicação de um circuito diferenciado: a ponte de *Wheatstone*.

A ponte de *Wheatstone* (Figura 10) é baseada no balanço dos braços que compõem a topologia. Quando a relação das resistências for $\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$, a ponte estará balanceada e V_o (a tensão elétrica de saída) será nula.

Qualquer desbalanço nas resistências gera uma flutuação em V_o expressa pela

Figura 10 – Ponte de *Wheatstone*.

Fonte: BALBINOT; BRUSAMARELLO (2019a).

Equação (13).

$$V_o = V_{Ref} \left(\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right), \quad (13)$$

onde V_o é a tensão elétrica de saída em $[V]$, V_{Ref} é a tensão elétrica de referência em $[V]$ e $R_{1,4}$ são os extensômetros, com resistência elétrica em $[\Omega]$.

Uma outra forma de expressar V_o é exposta na Equação (14), agora em função das deformações $\varepsilon_{1,4}$ sofridas por cada um dos extensômetros da ponte.

$$V_o = V_{Ref} \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4), \quad (14)$$

Então, de acordo com o número de extensômetros ativos, a ponte de *Wheatstone* pode ser classificada em três configurações distintas: $\frac{1}{4}$ de ponte - apenas 1 extensômetro ativo; meia-ponte - dois extensômetros ativos; ponte completa - quatro extensômetros ativos. A escolha de qual configuração será utilizada afeta diretamente a sensibilidade do sistema e é uma premissa de projeto essencial, sendo moldada por restrições geométricas da célula de carga e influenciando as etapas de condicionamento que vêm na sequência (principalmente em relação aos ganhos).

2.2.4 Calibração de células via matriz de desacoplamento

Células de carga em sua forma mais simples estabelecem uma relação direta entre os esforços aplicados e a tensão elétrica de saída das pontes de *Wheatstone*. Exemplificando, uma dada ponte sensível ao eixo x responderá, idealmente, somente a estímulos realizados na direção desse eixo. Os eixos são, portanto, desacoplados.

Entretanto, em sensores com mais do que 3 graus de liberdade (com foco em forças e momentos), as relações entre os esforços aplicados e as saídas das pontes não são diretas, havendo característico acoplamento entre os eixos. De acordo com KEBEDE *et al.* (2019), a fim de obter as variáveis de interesse é necessário definir a matriz de calibração C da estrutura (Equação (15)).

$$\vec{V} = \mathbf{C} \cdot \vec{E}, \quad (15)$$

onde \vec{V} são os sinais de saída das pontes em $[V]$, \mathbf{C} é a matriz de calibrações atrelada às deformações das pontes de *Wheatstone* e \vec{E} é o compilado dos esforços (as forças F aplicadas em $[N]$ e os momentos M aplicados em $[Nm]$).

Caso o sensor conte com 6 pontes de *Wheatstone*, a matriz \mathbf{C} é 6 x 6 e diagonal, bastando invertê-la para obter as forças e os momentos aplicados à célula de carga (Equação (16)).

$$\vec{E} = \mathbf{C}^{-1} \cdot \vec{V}, \quad (16)$$

onde \mathbf{C}^{-1} é a inversa da matriz de calibração.

Contudo, se há mais de 6 pontes de *Wheatstone* no sensor, \mathbf{C} deixa de ser diagonal 6 x 6, sendo impossível invertê-la. Neste caso, é necessário obter a pseudo-inversa

de \mathbf{C} de acordo com SHIMANO; ROTH (1977) (Equação (17)).

$$\vec{E} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \vec{V} = \mathbf{D} \cdot \vec{V}, \quad (17)$$

sendo \mathbf{D} a matriz de desacoplamento do sensor em questão.

Para que o desempenho da célula de carga seja satisfatório, é preciso que a calibração seja bem executada. Por isso, torna-se necessário a utilização de maquinário de calibração customizado na busca de uma aplicação pura de esforços nos diferentes eixos sensíveis das estruturas.

2.3 Trabalhos relacionados

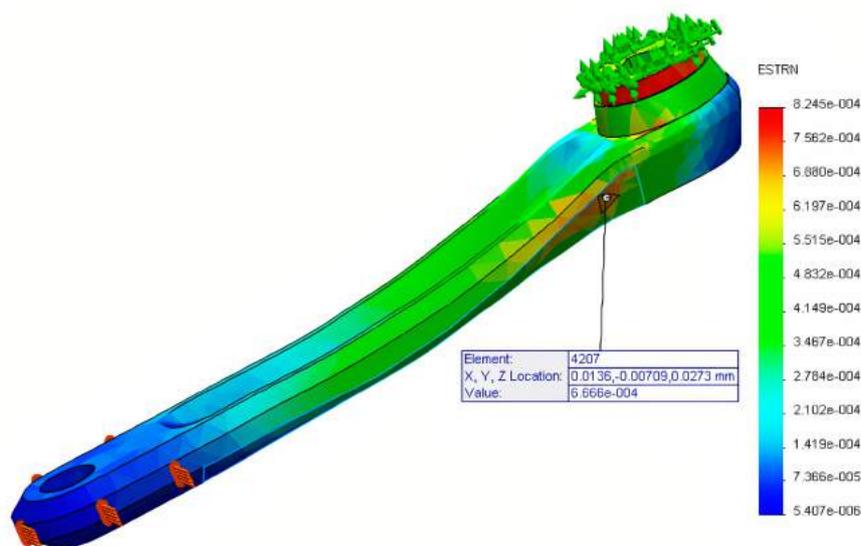
O estudo das forças despendidas pelo ciclista durante o movimento de pedalada é objeto de interesse há décadas. SHARP (1896) foi o primeiro a descrever um mecanismo rudimentar para mensurar as forças ortogonais aplicadas ao pedal. Com o advento da extensometria, a tecnologia de medição de deformações evoluiu, e DAVIS; HULL (1981b) foram os primeiros a propor uma célula de carga extensométrica capaz de mensurar as componentes de força em 3D. Nos últimos anos, o processo de refinamento das ferramentas utilizadas para a análise dos esforços continua, sendo mantido o elemento sensor (extensômetro) aliado a facilidades tecnológicas trazidas pela miniaturização da eletrônica como um todo, permitindo a construção de sistemas leves, portáteis e capazes inclusive de realizar os processamentos de maneira local.

2.3.1 Pedivelas comerciais instrumentados

Alguns estudos abordaram o problema a partir da adaptação de peças comerciais ao propósito de mensuração de esforços, utilizando a estrutura existente para a cimentação de extensômetros.

O sistema desenvolvido por BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO (2014) buscou analisar as forças tridimensionais envolvidas no movimento de pedalada, revelando o perfil dos esforços e o seu equilíbrio entre membros. Um pedivela comercial (Full Speed Ahead (FSA) FSA CK-602 175 mm) (VERO, Cyrus Way, WA, USA) foi modelado com a ferramenta *SolidWorks*TM 2015, sendo analisadas as características estática (até 800N aplicados em todas as direções) e dinâmica dos braços do pedivela via método de elementos finitos (Figura 11). Assim, foi possível determinar o melhor local de cimentação dos extensômetros de acordo com a deformação da peça.

Figura 11 – Análise de deformações realizada por BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO (2014) (força perpendicular).



Fonte: BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO (2014).

A conversão entre esforços e variáveis elétricas foi projetada como direta,

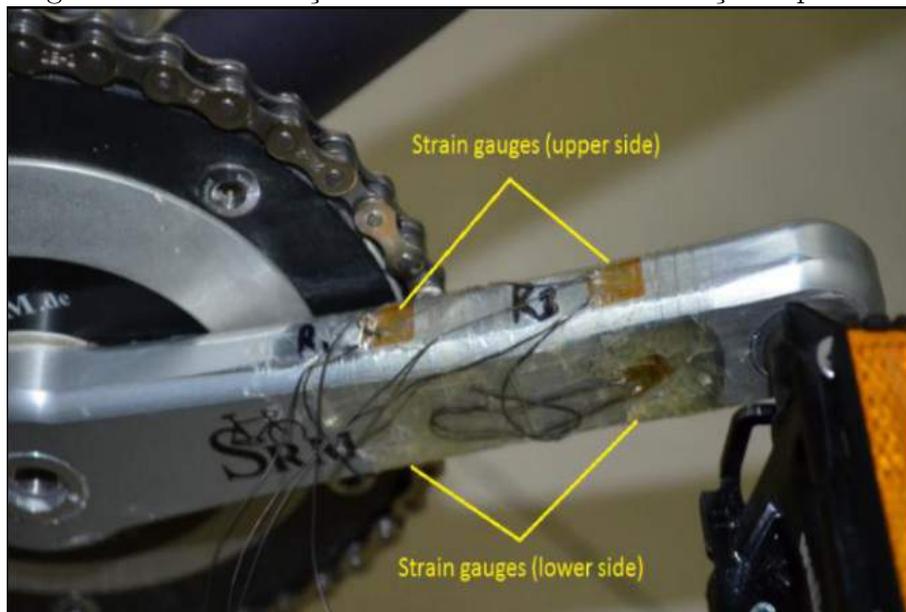
existindo 3 pontes de *Wheatstone* para cada um dos braços do pedivela, cujas saídas são convertidas para valores digitais com 10 bits de resolução. Foram utilizadas as configurações de ponte completa (4 extensômetros ativos) e meia-ponte (2 extensômetros ativos). Após a calibração, foi obtido o erro de linearidade máximo de 0,61%. Os dados gerados durante os ensaios foram salvos em um cartão SD e enviados via *Bluetooth* simultaneamente.

Em testes *indoor* envolvendo um ciclista amador com protocolo de ensaio não especificado (cadência livre), o estudo obteve índices de efetividade de 17,6% para a perna esquerda e 12,7% para a perna direita, com 53,6% de assimetria média da potência aplicada (média de 55,6W de potência para a perna esquerda e de 25,8W para a perna direita).

Já o sistema desenvolvido por GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL (2017) também partiu da modificação de um pedivela comercial (no caso um sistema da SRM - *Schoberer Rad Messtechnik*, que é um medidor de potência) para culminar na mensuração do torque aplicado. O fundo de escala da calibração foi de aproximadamente 15Nm. A análise do estudo traz a comparação entre os dados obtidos pela implementação, que conta com uma ponte de *Wheatstone* completa cimentada no braço do pedivela (Figura 12).

Utilizando a plataforma Arduino (ADC de 10 bits) para realizar o processamento embarcado e um módulo XBee para realizar a transmissão sem fio dos dados, os autores buscaram implementar seu sistema de maneira avaliar a consistência dos resultados obtidos por seu sistema em relação ao análogo comercial. Ao final, foi obtido um erro médio percentual de 8,25% e um erro médio quadrático de 1,86%.

Figura 12 – Distribuição dos extensômetros no braço do pedivela.



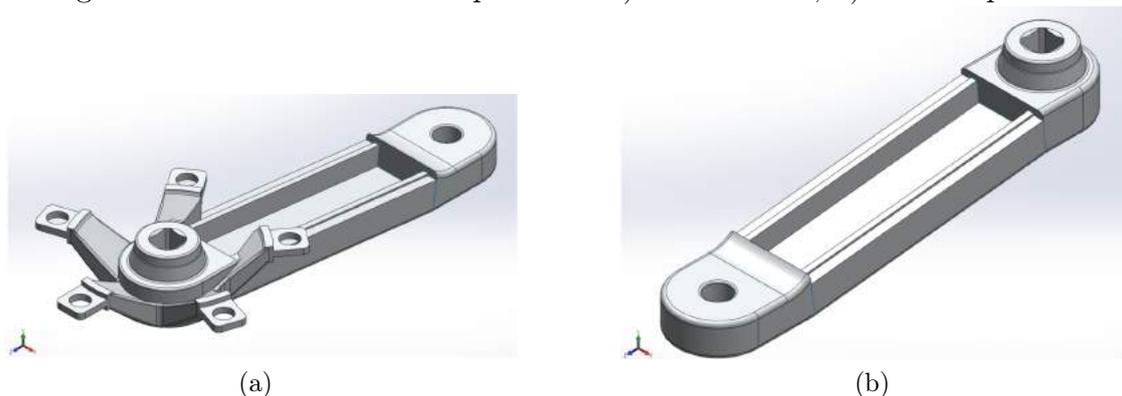
Fonte: GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL (2017).

2.3.2 Pedivela não-comercial instrumentado

PIGATTO *et al.* (2016) desenvolveram uma plataforma de força tridimensional em formato de pedivela. A peça foi modelada (Figura 13) e simulada utilizando o *software SolidWorks™* 2015 a fim de conferir as características estática e dinâmica, além de identificar o melhor local para o posicionamento dos extensômetros. Posteriormente, o pedivela foi usinado em alumínio 6061-T6. Cada braço foi equipado com 3 pontes de *Wheatstone*, sendo o eixo perpendicular ponte completa e os demais eixos meia-ponte. Como inovação, foi proposta a criação de espaços internos para a alocação dos circuitos de condicionamento e de aquisição, possibilitando um conjunto portátil. A conversão e o processamento dos dados foi realizado com o auxílio de um Arduino (ADC de 10 bits).

O erro de linearidade máximo obtido foi de 0,6% durante os ensaios de calibração. Um sistema *datalogger* foi desenvolvido para armazenar as variáveis provenientes dos sensores, sendo os dados processados posteriormente em um computador. O

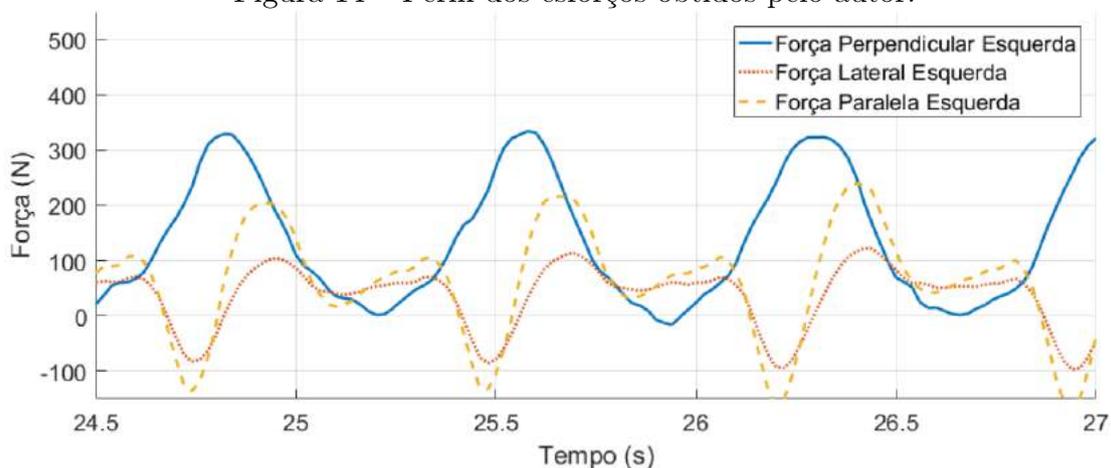
Figura 13 – Modelo virtual do pedivela. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



Fonte: Adaptado de PIGATTO *et al.* (2016).

protocolo de ensaios utilizado foi do tipo "all-out" (esforço máximo). A força resultante média obtida foi de $167,2 \pm 18,97N$ para a perna esquerda e de $163,4 \pm 15,27N$ para a perna direita. A assimetria média relacionada à potência foi calculada em $59,80 \pm 10,51\%$. A Figura 14 ilustra o perfil dos esforços obtidos a partir dos ensaios feitos pelo autor.

Figura 14 – Perfil dos esforços obtidos pelo autor.

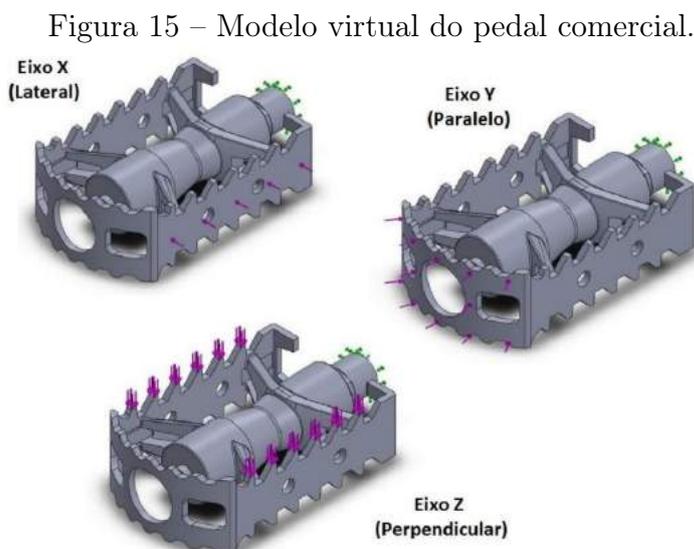


Fonte: PIGATTO *et al.* (2016).

2.3.3 Pedal comercial instrumentado

O sistema desenvolvido por HUSKEN (2018) gira em torno de um pedal comercial de plataforma de alumínio 6061-T6 instrumentado de maneira a refletir,

de um ponto de vista tridimensional, as forças aplicadas na peça. Cada um dos lados conta com 3 pontes de *Wheatstone* em sua configuração completa. Para fins de simulação estática e dinâmica e para identificar os melhores locais para a cimentação dos extensômetros, o pedal foi inteiramente reproduzido no *software SolidWorks™* 2015 (Figura 15). Um sistema *datalogger* foi proposto para salvar os dados provenientes dos ensaios em um cartão SD. Os sinais foram convertidos em valores numéricos pelo microprocessador do tipo Cortex M0+ com resolução de 12 bits. A sincronização dos lados com relação ao início e ao fim das aquisições foi realizado com o auxílio de módulos *ZigBee*, havendo um atraso inferior a $120\mu s$ entre as partes.



Fonte: HUSKEN (2018).

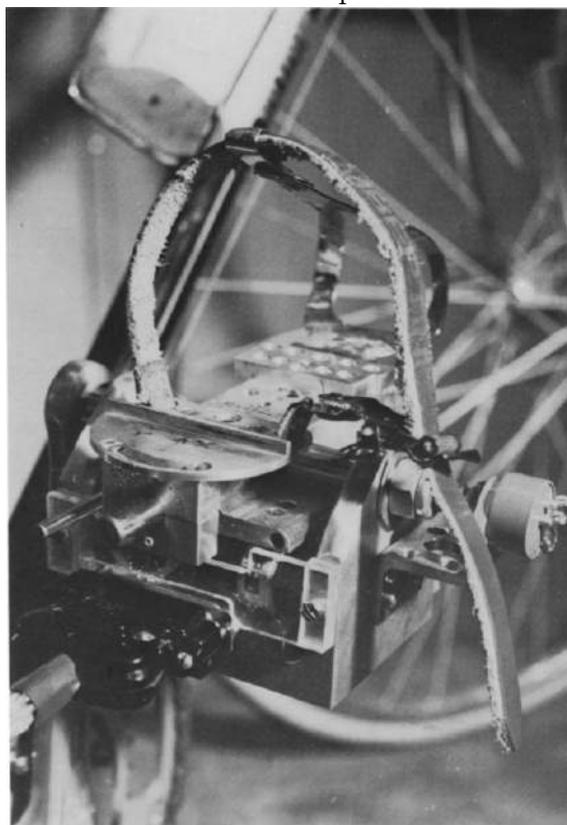
O erro de linearidade máximo obtido foi de 1,56%. O protocolo utilizado foi também do tipo "*all-out*". O índice de efetividade médio ficou em $52,37 \pm 1,61\%$ para o pedal direito e em $52,57 \pm 1,42\%$ para o pedal esquerdo. A assimetria média relatada foi de $44,59 \pm 18,59\%$ para a força efetiva e de $46,05 \pm 18,35\%$ para a força resultante. Os dados obtidos foram comparados com os de PIGATTO *et al.* (2016),

sendo observadas diferenças entre os resultados. Tais diferenças foram atribuídas principalmente à abordagem empírica no ato da calibração dos dois sistemas, o que pode gerar devido a não repetibilidade do posicionamento das cargas, por exemplo.

2.3.4 Pedal não-comercial instrumentado

DAVIS; HULL (1981b) desenvolveram o primeiro aparato experimental capaz de mensurar os esforços aplicados aos pedais (Figura 16). Utilizando um sistema inteiramente cabeado, a célula de carga implementada era capaz de medir os 6 graus de liberdade dos esforços. A conversão de sinais elétricos em valores numéricos foi feita com 12 bits de resolução. A calibração da peça foi feita com o auxílio de uma matriz de calibração.

Figura 16 – Pedal desenvolvido pelos autores em questão.

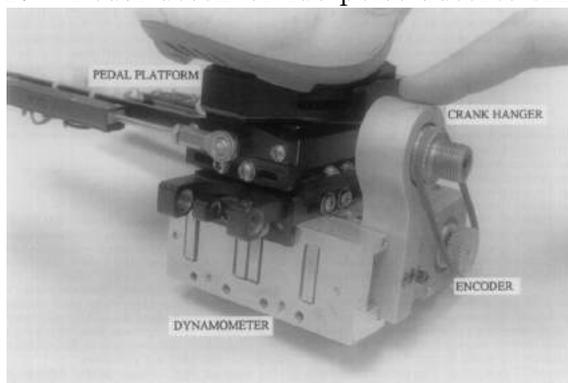


Fonte: DAVIS; HULL (1981b).

Em uma nova iteração de DAVIS; HULL (1981b), BOYD; HULL; WOOTTEN

(1996) o projeto foi aperfeiçoado a fim torná-lo compatível com diferentes tipos de pedais (Figura 17). Os fundos de escalas escolhidos para a calibração foram $F_x = 525N$, $F_y = 1925N$, $F_z = 175N$, $M_x = M_z = 7Nm$ e $M_y = 5Nm$.

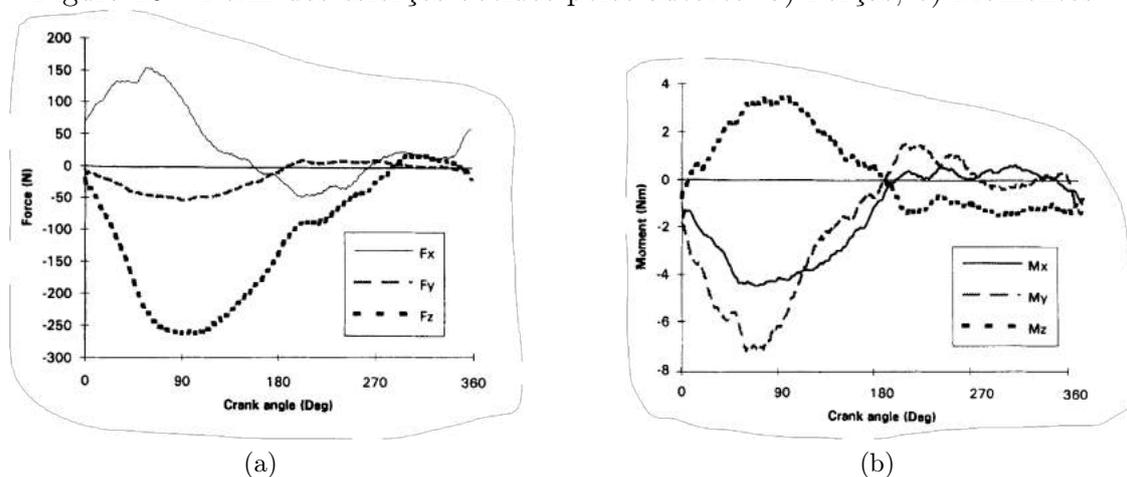
Figura 17 – Pedal desenvolvido pelos autores em questão.



Fonte: BOYD; HULL; WOOTTEN (1996).

Os perfis de esforços obtidos por BOYD; HULL; WOOTTEN (1996) são observados na Figura 18.

Figura 18 – Perfil dos esforços obtidos pelos autores. a) Forças; b) Momentos.

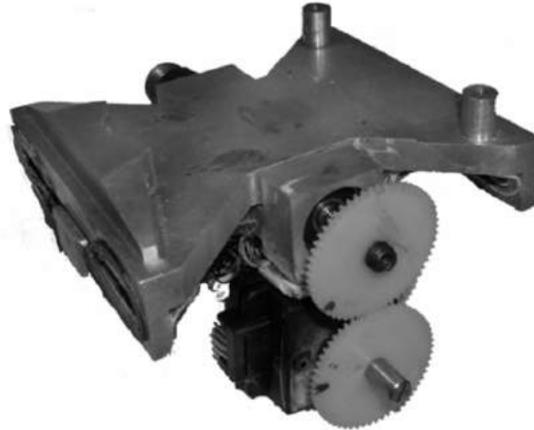


Fonte: Adaptado de BOYD; HULL; WOOTTEN (1996).

Já NABINGER (2006) propôs um pedal instrumentado com uma estrutura mais compacta (formada por duas peças distintas) que contempla o sistema de encaixe e conta com calibração via matriz de desacoplamento (Figura 19). O condicionamento dos sinais foi feito de maneira externa, sendo necessário o uso de cabos para a

transmissão dos sinais até os equipamentos.

Figura 19 – Pedal desenvolvido pelo autor em questão.



Fonte: NABINGER (2006).

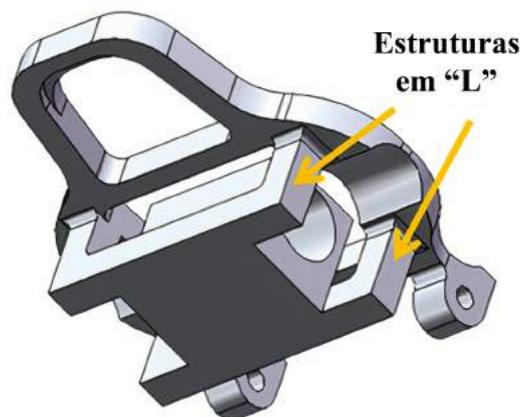
Já no estudo de BIBBO *et al.* (2019) foi desenvolvida uma nova estrutura capaz de mensurar os 3 eixos de força a fim de substituir os pedais de encaixe SPD-SL. O corpo do pedal foi desenhado de maneira monolítica, contendo estruturas específicas em formato de "L" a fim de gerar regiões sensíveis à deformação, ideais para a cimentação dos extensômetros. Para definir o comportamento estático e dinâmico da célula de carga, uma simulação utilizando o método de elementos finitos foi conduzida, obtendo o posicionamento ideal dos sensores. A Figura 20 mostra o modelo virtual do pedal desenvolvido.

A sensibilidade média de $0,98 \frac{mV}{kN}$ foi reportada, havendo uma deformação aparente de $98\mu\varepsilon$ para uma carga $F_z = 500N$.

2.3.5 Tacos comerciais instrumentados

Dentro da indústria, o desejo de produzir tacos de sapatilha (ou sapatilhas) instrumentadas a fim de desacoplar a medição de potência da estrutura da bicicleta já existe há algum tempo. No entanto, até o presente momento, nenhuma solução

Figura 20 – Pedal com estruturas em "L" para cimentação dos extensômetros.



Fonte: Adaptado de BIBBO *et al.* (2019).

foi comercializada de fato ao grande público.

O exemplo mais conhecido é o Zone DPMX (Brim Brothers), um taco compatível com o sistema Speedplay (Wahoo Fitness) e que teve seu desenvolvimento possibilitado a partir de uma campanha de *crowdfunding*. Com uma incerteza de 2% em relação à potência mensurada (de acordo com os dados do fabricante) de maneira unilateral ou bilateral, o projeto foi até a fase de produção. Ao final, problemas atrelados à calibração da plataforma persistiram de maneira a inviabilizar a sua comercialização.

Outro exemplo é o STYX *Power Meter* (MAGNES AG/SPORTS), o qual consistiria em integrar uma série de sensores magnéticos ao taco. Assim, uma matriz destes sensores poderia gerar um mapa de calor, indicando a força perpendicular total aplicada ao taco e as zonas de maior concentração de esforço. O sistema culminaria por permitir, à mesma maneira do Zone DPMX, a medição de potência com 2% de incerteza de forma unilateral ou bilateral. No entanto, o projeto não recebe atualizações desde 2019 e há aparente mudança de objetivos da empresa, remodelando a finalidade do produto como um analisador de marcha voltado para

a reabilitação de pessoas com desordens neurológicas.

2.3.6 Taco não-comercial instrumentado

YAMASHITA *et al.* (2013) desenvolveu um sistema bi-dimensional substituto ao sistema de encaixe comercial SPD-SL, trazendo uma interessante vantagem: torna-se simples a troca de bicicletas desde que os pedais de encaixe sejam similares. As células de carga em formato de taco de sapatilha para bicicleta (Figura 21) foram fabricadas em aço inoxidável AISI 304, havendo 8 extensômetros para cada eixo analisado em uma configuração de ponte completa dupla. As cargas máximas foram definidas em $\pm 1000N$ para o eixo perpendicular Z e $\pm 500N$ para o eixo frontal X . Após a calibração, o erro de linearidade máximo constatado foi de 0,91%.

Figura 21 – Tacos instrumentados propostos no estudo.



Fonte: YAMASHITA *et al.* (2013).

A aquisição dos valores de força ocorreu a uma frequência de $500Hz$, sendo enviadas a uma estação de processamento com o auxílio de cabos. Para a aquisição das variáveis cinemáticas atreladas ao movimento, foi utilizada uma câmera de alta velocidade ($200Hz$) e marcadores esféricos acoplados ao ciclista, sendo as informações processadas via *software*.

2.3.7 Compilação de características dos estudos passados e comparação com o presente trabalho.

Visto o apanhado de trabalhos relacionados, a Tabela 1 serve como aglutinador. Desta forma, são trazidas as principais características dos estudos (e produtos) citados nas Seções anteriores.

Tabela 1 – Compilação dos trabalhos citados.

Autores	Tipo de Peça	Esforços	Transmissão	Ângulos	Estágio
BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO (2014)	Pedivela comercial	$F_{x,y,z}$	Bluetooth	Ausente	Completo
GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL (2017)	Pedivela comercial	$M_{Pedivela}$	Xbee	Ausente	Completo
PIGATTO <i>et al.</i> (2016)	Pedivela não-comercial	$F_{x,y,z}$	Data logger	Ausente	Completo
HUSKEN (2018)	Pedal comercial	$F_{x,y,z}$	Data logger	Ausente	Completo
DAVIS; HULL (1981b)	Pedal não-comercial	$F_{x,y,z},$ $M_{x,y,z}$	Cabos	Encoder	Completo
BOYD; HULL; WOOTTEN (1996)	Pedal não-comercial	$F_{x,y,z},$ $M_{x,y,z}$	Cabos	Encoder	Completo
NABINGER (2006)	Pedal não-comercial	$F_{x,y,z},$ $M_{x,y,z}$	Cabos	Encoder/ cinemetria	Completo
BIBBO <i>et al.</i> (2019)	Pedal não-comercial	$F_{x,y,z}$	Não informado	Não informado	Em desenv.
Zone DPMX (Brim Brothers)	Taco comercial	Pot	ANT+	IMU	Descont.
STYX (Magnes Sports)	Taco comercial	F_y, Pot	Não informado	IMU	Descont.
YAMASHITA <i>et al.</i> (2013)	Taco não-comercial	$F_{x,y}$	Cabos	Cinemetria	Completo

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O presente capítulo abordará as premissas e decisões de projeto tomadas em relação ao desenvolvimento do sistema, assim como as etapas percorridas para a completude de sua construção.

Como ponto de partida, foram decididos os requisitos básicos do sistema, priorizando:

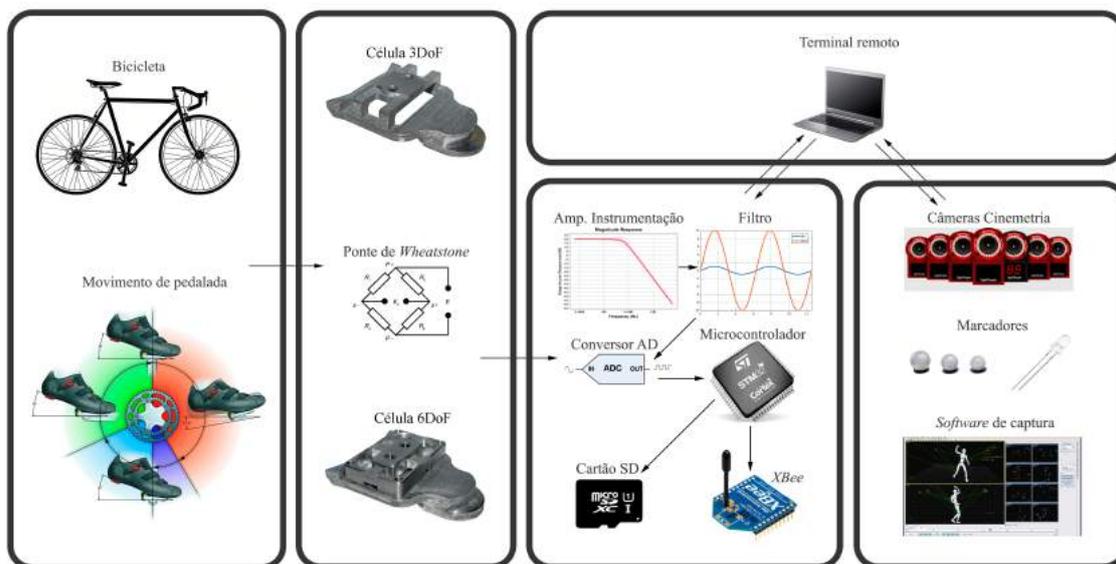
- Substituição completa dos tacos comerciais por versões instrumentadas;
- Manutenção do formato dos tacos comerciais no que tange a altura do conjunto sapatilha-taco;
- Prezar pela portabilidade, sendo desenvolvido um sistema compacto e que permite a rápida troca entre bicicletas.

Em formato de diagrama simplificado, o sistema proposto pode ser representado de acordo com a Figura 22.

O primeiro bloco apresentado consiste na execução do movimento por parte do participante de acordo com o protocolo de ensaios definido. Possuindo parâmetros mecânicos ou físicos como alvo, a pedalada será desenvolvida a fim de que haja a avaliação da técnica por parte de uma equipe ou de algum algoritmo capaz de compilar os dados ingeridos em uma pontuação final atribuída ao indivíduo.

O segundo bloco refere-se à tradução dos esforços exercidos pelo usuário do sistema durante o movimento de pedalada em variáveis elétricas que, por meio de relação com as deformações sofridas pelas células de carga, são interpretados como as forças e momentos aplicados. Tais células de carga são pensadas de modo a substituir

Figura 22 – Diagrama geral do sistema.



Fonte: Elaboração própria.

os tacos Shimano SL-SH11, responsáveis pelo encaixe das sapatilhas compatíveis com o sistema Shimano SPD-SL.

No terceiro bloco, são representados os sinais elétricos provenientes das pontes de *Wheatstone* instaladas nas células de carga. Eles são condicionados e adquiridos de acordo com o disposto na Seção 3.2 para então serem armazenados em cartão SD ou enviados via protocolo 802.15.4 com o auxílio de uma rede composta por *XBees*. Uma estação remota é responsável por fornecer o sinal de início de aquisição e, segundo HUSKEN (2018)¹, há um atraso máximo de recepção entre os módulos inferior a $120\mu s$, o que não afeta o funcionamento do sistema já que ocorre de maneira muito mais rápida do que o fenômeno a ser mensurado.

O quarto bloco corresponde à aquisição dos ângulos formados entre os pedais e o pedivela. Com a utilização de múltiplas câmeras, um volume tridimensional é gerado no qual é possível posicionar e detectar marcadores refletivos. Com relação ao presente trabalho, os marcadores são posicionados a fim de gerar um corpo rígido

¹É sugerida a consulta da referência para a obtenção de maiores detalhes dos testes de latência realizados.

associado a cada um dos pedais. Assim, são processados os ângulos do conjunto pedal-pedivela. Maiores detalhes serão expostos na Seção 3.6.

De forma a sincronizar a aquisição dos dados de esforços e de ângulos, um marcador ativo adicional - composto de LEDs infravermelhos com faixa de emissão compatível registrada pelas câmeras - é utilizado e acionado no início das aquisições.

Assim, todos os sinais são referenciados a um marco temporal comum, facilitando o pós-processamento. Com todos os dados obtidos, são então compiladas as informações com o auxílio de algoritmos desenvolvidos em MATLAB[®] R2016b de forma a melhor visualizá-las.

3.1 Células de carga

As Subseções que seguem tratam dos passos seguidos até a finalização das células de carga desenvolvidas - 3 graus de liberdade e 6 graus de liberdade. A decisão de desenvolver dois modelos distintos é justificada pelas diferenças estruturais e de complexidade dos tipos de célula de carga. Desta forma, buscou-se a finalização dos parâmetros funcionais do modelo menos complexo (3 graus de liberdade) para depois dar continuidade ao desenvolvimento do modelo mais complexo (6 graus de liberdade).

Portanto, serão revisados os fundamentos de escolha do formato das estruturas, o material, as simulações executadas, o posicionamento dos extensômetros, entre outros.

3.1.1 Embasamento da estrutura das células de carga

A célula de carga com 3 graus de liberdade utiliza estruturas sensíveis em "L" baseadas em BIBBO *et al.* (2019) (Seção 2.3.4) como local de máxima

sensibilidade. Com o formato, buscou-se isolar os eixos de aplicação de força de forma que ocorresse o mínimo possível de interferência mecânica entre eles. Contudo, percebeu-se ao longo do desenvolvimento do projeto que a natureza do mecanismo de encaixe precariza a mensuração da força no eixo lateral (Fz)². O mesmo grupo de extensômetros se mostrou sensível ao momento em torno do eixo frontal (Mx), permitindo a mensuração de tal grandeza. Apesar de se mostrar relativamente sem importância em relação a lesões e estar sujeito a alta variação quando não há restrição lateral dos pés (DAVIS; HULL, 1981b), a análise de tal variável pode trazer novas percepções sobre o perfil de pedalada do usuário do sistema.

O segundo modelo de taco desenvolvido nesse projeto é capaz de mensurar, além das forças, os momentos exercidos. Sua estrutura sensível é baseada nas células de carga do tipo cruz-de-malta. Desta forma, existem 4 vigas onde os efeitos da aplicação dos esforços são mais pronunciados. Contudo, as deformações possuem grau de acoplamento, exigindo a aplicação da técnica descrita na Seção 2.2.4 que envolve a definição da matriz de desacoplamento a fim de obter os efeitos individuais de forças e de momentos.

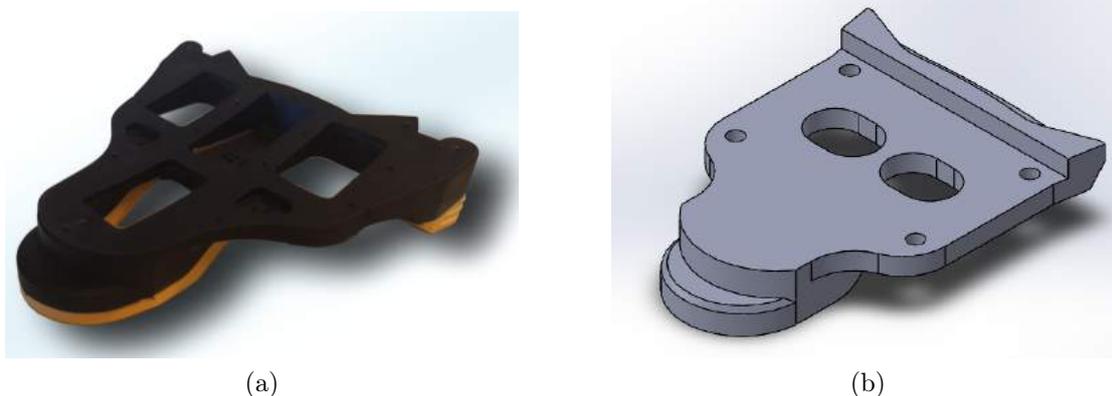
3.1.2 Desenvolvimento da estrutura das células de carga

Uma das premissas básicas do projeto é a substituição dos tacos SL-SH11 (Figura 23(a)) por estruturas instrumentadas de dimensões similares a fim de não prejudicar a biomecânica do movimento de pedalada. Assim, foi produzido um modelo virtual base utilizando o *software* SolidWorksTM 2015 correspondente ao taco comercial (Figura 23(b)) tomando as medidas da peça utilizando um paquímetro Mitutoyo

²Observou-se do ponto de vista experimental que o comportamento da célula de carga em relação à força lateral F_z mostrou sensibilidade drasticamente reduzida da ponte de Wheatstone destinada para tal esforço.

530-104Br com fundo de escala de $150mm$, resolução de $0,05mm$ e exatidão de $\pm 0,05mm$. A partir do esboço do perfil do taco comercial, foi executada uma extrusão seguida de diversos ajustes a fim de reproduzir da maneira mais fidedigna as nuances do formato original da peça.

Figura 23 – Comparação do taco comercial com o modelo virtual base. a) Taco comercial; b) Modelo virtual base.



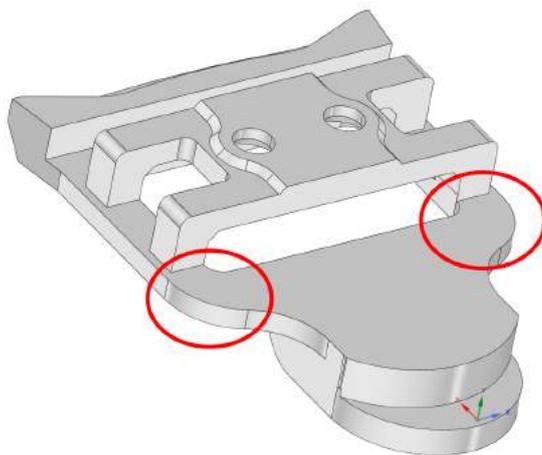
Fonte: Elaboração própria.

Com a base finalizada, os esforços se voltaram para o projeto da célula de 3 graus de liberdade. Inspirada na estrutura apresentada por BIBBO *et al.* (2019), a estrutura sensível aos esforços foi pensada de forma a privilegiar a cimentação dos extensômetros nas partes fragilizadas em formato de "L". Tais partes fragilizadas foram criadas a partir de diversas extrusões, possuindo perfil quadrado de $5mm \times 5mm$. As medidas foram definidas a partir do aumento gradual da espessura desses perfis quadrados até que fossem atingidos graus de deformação e de fator de segurança adequados - como visto na Seção 4.1, iniciando em $3mm$.

Especial cuidado foi tomado para não exceder a altura original dos tacos - novamente, para não interferir na biomecânica do movimento de pedalada. Várias distribuições dos perfis em "L" foram cogitadas, incluindo o aparafusamento de uma peça contendo as estruturas fragilizadas. Entretanto, notou-se que o processo de

fabricação permitiria uma peça monolítica, diminuindo a massa total do conjunto. Chegou-se, por fim, à forma final da célula de carga de 3 graus de liberdade (Figura 24), possibilitando a medição das forças perpendicular e frontal e o momento frontal exercidos no taco. Como mencionado anteriormente, o objetivo inicial era mensurar as forças em x, y e z. Contudo, devido ao ímpeto de realizar uma peça monolítica usinável em CNC, uma região da peça se tornou mais frágil do que o inicialmente fora planejado. Como resultado, boa parte das deformações causadas pela força lateral F_z (de acordo com a orientação descrita na Figura 1) são absorvidas nessa região (a região destacada da Figura 24).

Figura 24 – Modelo final para a célula de carga de 3 graus de liberdade.

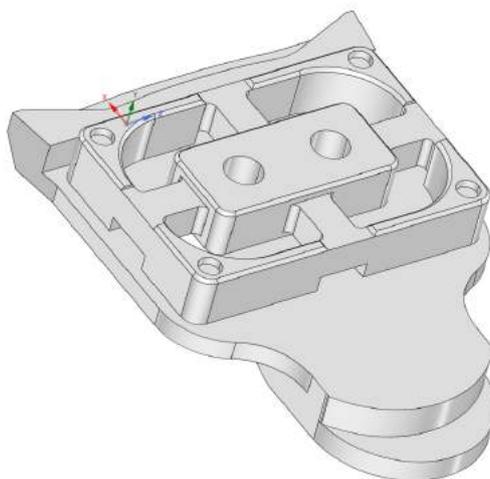


Fonte: Elaboração própria.

Com relação à célula de 6 graus de liberdade, o processo de fabricação não permitiria uma peça monolítica como descrito no último caso. Desta forma, criou-se uma estrutura em 2 elementos: o encaixe (Figura 23(b)) e um elemento sensível, dotado de regiões propícias para o posicionamento dos extensômetros. O elemento sensível tem como base as células de carga conhecidas como *wrist sensor*, muito utilizado para a obtenção do *feedback* de força e de momentos em braços robóticos (KEBEDE *et al.*, 2019; SCHICKL *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2015; HU *et al.*, 2018).

A intenção foi adaptar o desenho desse tipo de estrutura para que houvesse compatibilidade com o modelo de taco comercial. Desta forma, prezou-se pela manutenção das dimensões aliada à maquinabilidade, já que foi utilizada uma fresadora CNC de 5 eixos para a realização da usinagem e é necessário alinhar as curvaturas da peça aos limites das ferramentas da fresadora. Assim, chegou-se ao desenho final como observado na Figura 25, já com o elemento sensível aparafusado à base.

Figura 25 – Modelo final para a célula de carga de 6 graus de liberdade.



Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar buracos entre a base de encaixe e o elemento sensível por onde os fios serão posicionados. As paredes internas são utilizadas como superfície de cimentação dos terminais coláveis que servem como ponto de alívio de tensão nos cabos dos extensômetros (mais frágeis).

Vale ressaltar que houve a opção pelo padrão de furação do tipo SPD (2 furos) e não o padrão de furação do tipo SPD-SL (3 furos), original do taco comercial. A razão pela escolha foi baseada na dificuldade de realizar a inclusão dos 3 furos no desenho da estrutura. O espaço ocupado por tal padrão tornaria extremamente onerosa a fabricação da peça devido à sua complexidade. Foi considerada a opção

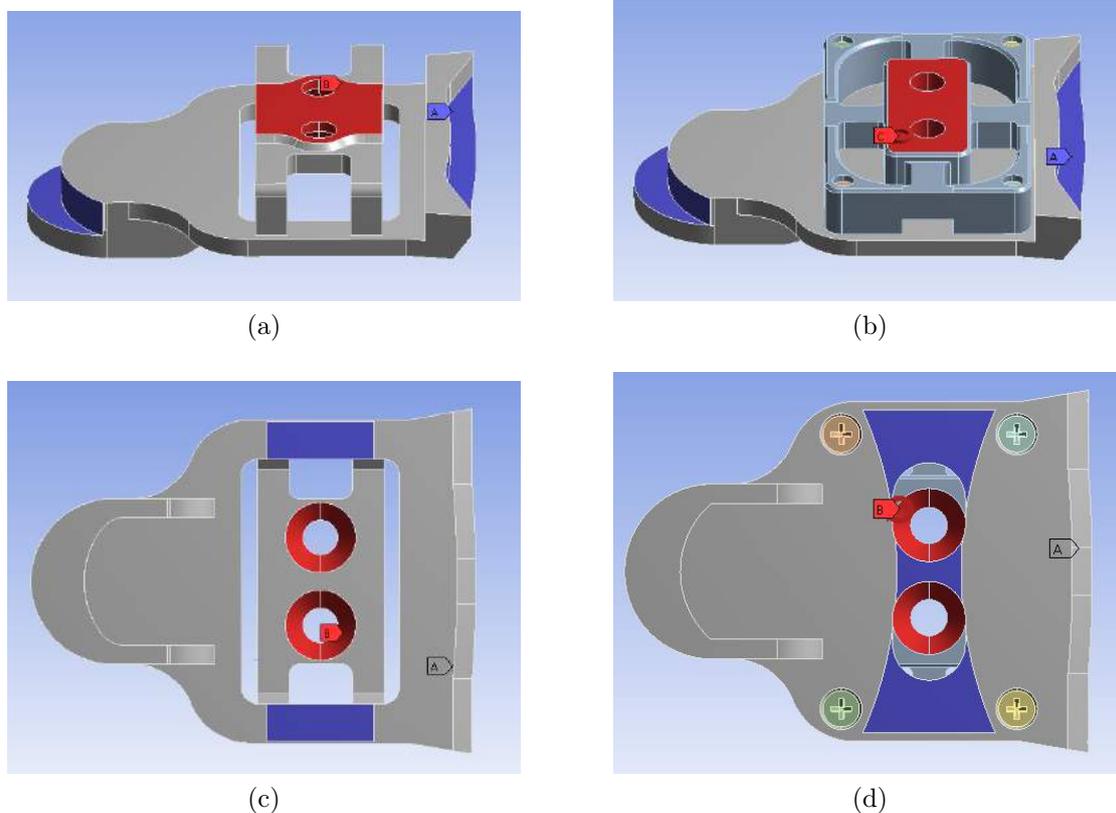
de criar uma terceira peça de conversão do padrão de 2 furos para o de 3 furos. No entanto, o excesso de partes aparafusadas e a altura do conjunto final considerando tal abordagem a tornaram desvantajosa.

3.1.3 Simulações estática e dinâmica

A fim de analisar o comportamento das células de carga em relação aos aspectos estático e dinâmico, realizou-se uma série de simulações com o auxílio do *software* ANSYS 19. Os pontos de engaste foram implementados de acordo com o comportamento dos tacos quando encaixados nos pedais. Para os esforços, é definida a superfície de aplicação nas faces de contato das peças com os parafusos e com a sapatilha (Figura 26). As áreas hachuradas em azul são os pontos de engaste e as áreas hachuradas em vermelho são os pontos de aplicação de esforços. Neste estudo, foram definidas as forças para a célula de 3 graus de liberdade como $1000N$ no eixo perpendicular, $500N$ nos eixos frontal e $15Nm$ de momento em torno do eixo frontal. Na célula de 6 graus de liberdade, além das forças, foram definidos os momentos nos mesmos eixos, com módulo máximo de $15Nm$.

A simulação dinâmica compartilha dos mesmos pontos de engaste apresentados para a simulação estática e busca definir quais são os modos naturais de oscilação das peças. A intenção é garantir que tais modos se encontram longe da faixa de frequências em que os esforços são aplicados - no caso, até $180RPM$ ou $3Hz$. Desta forma, certifica-se que o sistema nunca irá operar dentro desta faixa indesejada, permitindo que as peças desenvolvam sua função sem distorções e sem o risco de sofrerem uma falha catastrófica por ressonância. Os resultados destes estudos serão apresentados na Seção 4.1.

Figura 26 – Pontos de engaste e de aplicação de esforços. a) Taco com 3 graus de liberdade - vista em perspectiva; b) Taco com 6 graus de liberdade - vista em perspectiva; c) Taco com 3 graus de liberdade - vista inferior; d) Taco com 6 graus de liberdade - vista inferior.



Fonte: Elaboração própria.

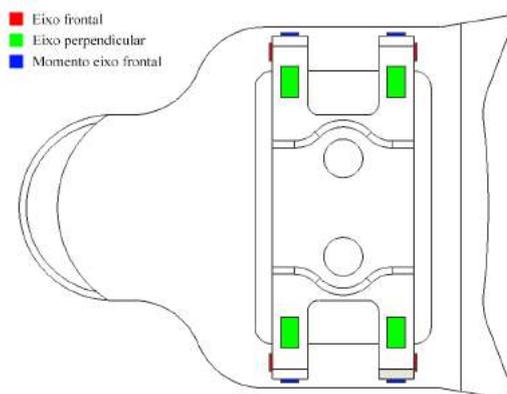
3.1.4 Local de cimentação dos extensômetros

A partir dos resultados obtidos na simulação estática envolvendo os dois modelos de taco desenvolvidos, foi possível definir os locais de cimentação dos extensômetros.

Na célula de 3 graus de liberdade, como esperado, os pontos mais sensíveis à deformação são encontrados nas estruturas em "L" definidas durante o projeto do modelo. Para o esforço perpendicular máximo de $1000N$, obteve-se a deformação média de $1099,3\mu\varepsilon$ na posição de $6,3mm$ a partir dos limites exteriores das estruturas em "L". Para o esforço frontal com $500N$ aplicados, obteve-se a deformação média de $315,31\mu\varepsilon$ na posição de $2mm$ a partir da base do encaixe. Para o momento frontal com $15Nm$ aplicados, obteve-se a deformação média de $400,19\mu\varepsilon$

na posição de $2mm$ a partir da base. As posições dos extensômetros são observadas na Figura 27, sendo os extensômetros vermelhos correspondentes ao eixo frontal, os extensômetros verdes correspondentes ao eixo perpendicular e os extensômetros azuis correspondentes à medição do momento em torno do eixo frontal. Em acordo com os resultados simulados, foi também realizada a escolha das topologias de ponte de *Wheatstone*. Para as células com 3 graus de liberdade, decidiu-se pelo uso das topologias do tipo completa (força frontal (F_x) e momento frontal (M_x)) e do tipo meia-ponte dupla (força perpendicular (F_y)).

Figura 27 – Localização dos extensômetros - 3 graus de liberdade.



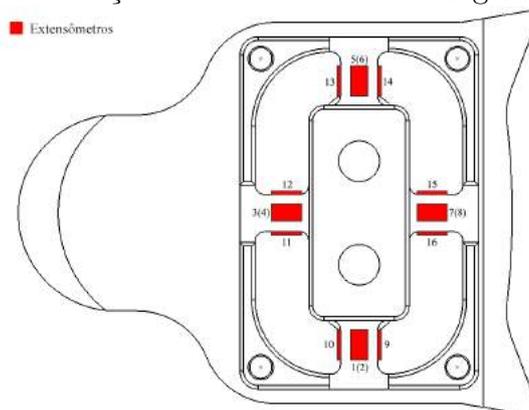
Fonte: Elaboração própria.

Vale ressaltar que foi identificado um efeito significativo da força perpendicular nos extensômetros destinados à deformação lateral e da força lateral nos extensômetros destinados à deformação perpendicular. Entretanto, tais efeitos são cancelados pela topologia escolhida das pontes de *Wheatstone*. Assim, é mantida a premissa de desacoplamento dos eixos.

Com relação à célula de 6 graus de liberdade, como esperado, os pontos de maior sensibilidade aos esforços aplicados se encontram nas 4 vigas que ligam a parte central do elemento sensível ao anel externo. Devido a restrições de espaço e do desenho da estrutura, decidiu-se por posicionar todos os extensômetros a $2,5mm$

dos limites da parte central do elemento. No processo foram constatadas diferenças de deformação para os esforços aplicados de $1000N$ para a força perpendicular, $500N$ para as forças frontal e lateral e $15N.m$ para os momentos nos três eixos entre faces com orientação similar mas eixos diferentes. Entretanto, a matriz de desacoplamento e a combinação dos extensômetros são capazes de mitigar tais disparidades. Todas as pontes de *Wheatstone* do modelo em questão são do tipo meia-ponte com os ramos inferiores ativos. A Figura 28 mostra a localização dos extensômetros, assim como os seus identificadores numéricos.

Figura 28 – Localização dos extensômetros - 6 graus de liberdade.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.5 Fabricação das peças

Os dois modelos de taco desenvolvidos foram usinados em alumínio 7075-T6. Tal material é amplamente utilizado na indústria aeroespacial devido à sua alta resistência mecânica (comparável à de alguns aços) e à sua maquinabilidade, facilitando a criação de estruturas mais complexas para usinagem em fresadoras CNC. As características do material podem ser observadas na Tabela 2.

O projeto foi contemplado no Edital 05/2020 do PPGEE de apoio à pesquisa. Desta forma, foi possível realizar a usinagem das peças via contratação da empresa

Tabela 2 – Características principais do alumínio 7075-T6.

Propriedade Mecânica	Módulo	Unidade (S.I.)
Módulo de elasticidade	71,7	GPa
Coefficiente de Poisson	0,33	Adimensional
Módulo de cisalhamento	26,9	GPa
Massa específica	2,81	$\frac{g}{cc}$
Resistência à tração	560	MPa
Limite de escoamento	500	MPa
Coefficiente de expansão térmica	$23,4 \times 10^{-6}$	$\frac{L}{^{\circ}C}$
Condutividade térmica	0,35	$\frac{cal}{cm.s.^{\circ}C}$
Calor específico	0,22	$\frac{cal}{g.^{\circ}C}$

Profitec Indústria de Matrizes LTDA. O resultado da fabricação é observada na Figura 29.

Figura 29 – Peças usinadas. a) 3 graus de liberdade; b) 6 graus de liberdade.



Fonte: Elaboração própria.

Ambos os modelos compartilham as mesmas dimensões de furação para os parafusos que realizam a sua fixação às sapatilhas (cabeça escareada M5). A peça com 6 graus de liberdade tem seu elemento sensível fixado à base de encaixe com o auxílio de 4 parafusos do tipo cabeça escareada tamanho M4.

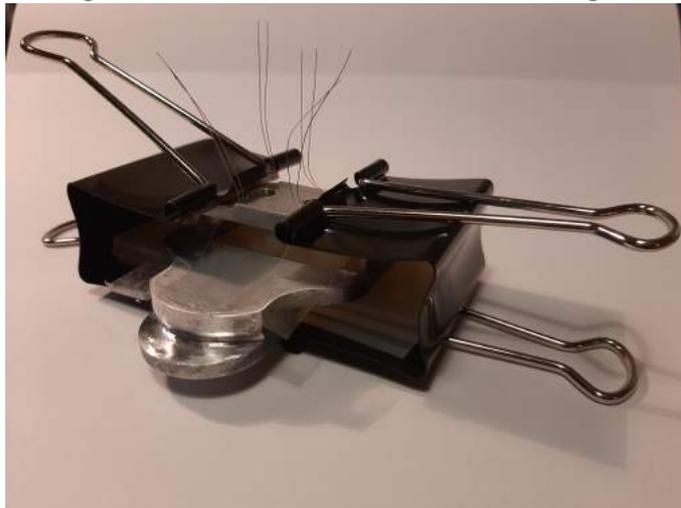
3.1.6 Cimentação dos extensômetros

Para realizar a cimentação dos extensômetros, as marcações dos posicionamentos foram executadas com o auxílio de um estilete do tipo bisturi a fim de garantir a similaridade com as dimensões obtidas nas simulações. Anterior a essa etapa, as superfícies foram lixadas e limpas com o auxílio de álcool isopropílico a fim de eliminar as impurezas residuais.

Os extensômetros escolhidos são de modelo PA-13-040AB- 120-L fabricados pela Excel Sensores (lotes 140610 - $K = 2, 12$ - e 140911 - $K = 2, 14$). Tais extensômetros possuem dimensões totais de 3mm x 4mm com área ativa de $1mm^2$ e são auto compensados para alumínio. Como produto de fixação, optou-se pelo fixador KBR 104/105, comercializado também pela Excel Sensores. Tal fixador possui tempo de cura à temperatura ambiente de 3 horas e um período de espera de 24 horas para a realização de ensaios. Seu tempo de utilização após a preparação é de 1 hora, oferecendo flexibilidade de reposicionamento dos extensômetros caso necessário e a possibilidade de utilizar a mistura para mais de uma cimentação. Almofadas de silicone foram utilizadas para distribuir a pressão exercida por grampos durante o processo de cura (Figura 30).

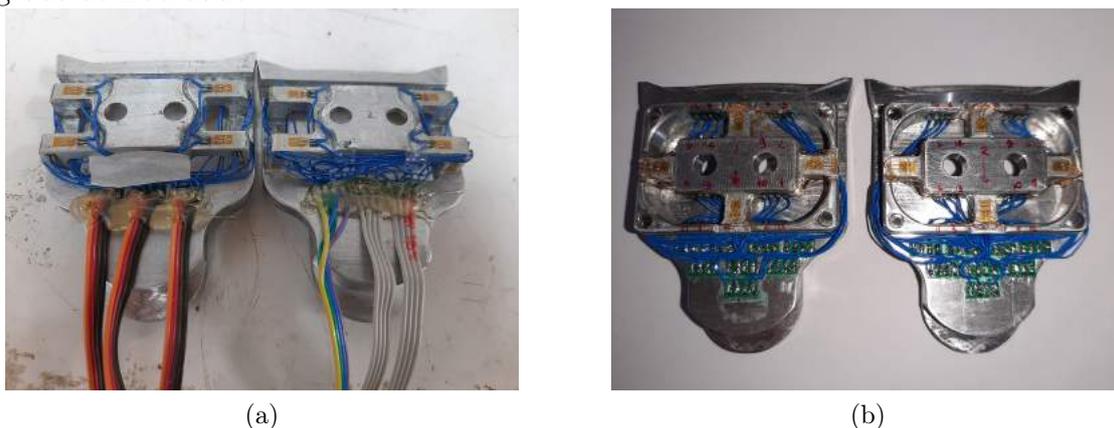
Após a colagem de todos os extensômetros, foi realizado processo parecido para o posicionamento dos fios. Terminais coláveis foram posicionados o mais próximo possível dos fios dos extensômetros a fim de encurtar o caminho até os conectores. Terminais adicionais foram utilizados para organizar os fios de modo a formar as pontes de *Wheatstone* desejadas. A Figura 31 mostra o resultado final da colagem.

Figura 30 – Colagem dos extensômetros - célula de 3 graus de liberdade.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Resultado da colagem dos extensômetros. a) 3 graus de liberdade; b) 6 graus de liberdade.



Fonte: Elaboração própria.

3.2 Circuitos de condicionamento e de aquisição

Com o intuito de adequar o sinal proveniente das pontes de *Wheatstone* instaladas nas células de carga, a cadeia de condicionamento foi projetada com base no disponibilizado em BALBINOT; BRUSAMARELLO (2019b) e em FRANCO (2015). Ainda, em favor da capacidade de realizar a gravação local e a transmissão de dados sem fio, uma etapa de aquisição/comunicação foi projetada a fim de inferir até 24 bits de resolução (ganho considerável se comparado com sistemas portáteis

anteriormente utilizados no Laboratório IEE-Bio que contavam com 10 a 12 bits) e taxa de transmissão suficiente para suprir as demandas do sistema.

Como foram desenvolvidas duas células de carga com características distintas, tornou-se necessária a fabricação de circuitos que permitisse o uso de ambas as peças. Desta forma, duas placas de condicionamento foram projetadas contando com 3 e 8 canais. Cada um desses canais é constituído por uma entrada que suporta a topologia de meia-ponte ou de ponte completa, sendo compatível tanto com o modelo de 3 graus de liberdade quanto com o modelo de 6 graus de liberdade. Os ganhos de tais canais foram primariamente definidos de acordo com o fundo de escala investigado via simulação, considerando os carregamentos mencionados em 3.1.3. De acordo com a necessidade, os ganhos foram modificados para melhor atender às características do sistema. Uma segunda placa, acoplada por meio de um conector à placa de condicionamento, possui a função de receber comandos, de gravar e/ou de enviar dados, contendo um microcontrolador ligado a um cartão SD, a um conversor analógico-digital e a um módulo de transmissão sem fio.

3.2.1 Tensões elétricas de alimentação

A fim de simplificar o funcionamento do circuito e extinguir a necessidade de alimentações simétricas, optou-se por utilizar somente circuitos integrados compatíveis com alimentação simples cujos detalhes serão apresentados nas Seções 3.2.3.2 e 3.2.3.3, criando-se um terra virtual. Desta forma, uma bateria é responsável pela tensão de entrada, que em seguida é rebaixada utilizando reguladores de tensão LDO (*Low Dropout Regulators*) de modelo TLV1117, da *Texas Instruments*. Assim, garante-se que a tensão elétrica disponibilizada aos circuitos seja regulada até que o nível das baterias atinjam $V_{regulada} + 1,4V$.

Para a parte de condicionamento, então, um circuito integrado de modelo TLV1117-50 realiza a conversão da tensão das baterias para o nível de $5V$, responsável por alimentar os amplificadores de instrumentação, os amplificadores operacionais e as referências de tensão envolvidas na cadeia. Para a parte de aquisição, além dos $5V$ é também necessário o fornecimento de $3,3V$ (exigência dos componentes utilizados). Assim, foi utilizado um circuito integrado de modelo TLV1117-33 em cascata com o TLV1117-50. A Tabela 3 apresenta as principais características desses reguladores de tensão.

Tabela 3 – Principais características dos reguladores TLV1117.

Característica	Valor
Tensão de alimentação (V)	$V_o + 1,4$
Corrente elétrica de saída nominal (mA)	800
Regulação de linha (%)	0,5
Rejeição de ruído (dB)	75
Corrente elétrica quiescente (mA)	5

Fonte: Adaptado de TI (2014).

As baterias escolhidas para a alimentação de entrada têm suas características apresentadas na Tabela 4. O modelo escolhido é de polímero de lítio (LiPo) de 3 células, comumente usada em aerodelismo e em automodelismo por oferecerem capacidades elevadas em formatos relativamente enxutos. Vale ressaltar que o sistema foi projetado para funcionar com tensão elétrica nominal de até $15V$. Portanto, quaisquer modelos de bateria que apresentam valores entre $7,4V$ e $15V$ podem ser utilizadas.

Utilizando o *software* Tina-TI para simular o consumo do sistema, estimou-se uma corrente de $180mA$ para 3 canais em uso e de $300mA$ para 8 canais em uso. Levando esses números em conta, estimou-se uma autonomia de 5,5 horas para o

Tabela 4 – Principais características do modelo de bateria escolhido.

Característica	Valor
Fabricante	Zippy
Modelo	Flightmax
Tipo	Polímero de lítio
Capacidade (mAh)	1000
Número de células	3
Tensão nominal (V)	11,1
Taxa de descarga (C)	25
Peso (g)	84
Dimensões (mm)	73 x 34 x 20
Conector	Mini JST 2 pinos

Fonte: Adaptado de ZIPPY (2016).

primeiro caso e de 3,3 horas para o segundo caso.

3.2.2 Tensões elétricas de referência

As referências de tensão elétrica são parte importante das placas desenvolvidas. Na parte que cuida do condicionamento, é necessário apresentar uma tensão de referência de $1,25V$ para as pontes de *Wheatstone* e uma tensão de referência de $2,5V$ para as etapas de condicionamento a fim de gerar um *offset* que mantenha o sinal estável em $2,5V$ (já que o conversor analógico-digital trabalha de $0V$ a $5V$) de modo a maximizar o uso da faixa. Na parte que cuida da aquisição, o mesmo conversor analógico-digital apresenta a necessidade de uma referência de tensão de $2,5V$.

Para produzir as tensões de referência em questão, escolheu-se a família de referências de tensão REF30XX da *Texas Instruments*. Suas características principais são mostradas na Tabela 5, destacando-se a corrente máxima de $25mA$ - que permite a alimentação de duas pontes de *Wheatstone* com apenas um circuito

integrado em o uso de um reforço de corrente - e a incerteza associada à tensão de saída - $\pm 0,2\%$.

Tabela 5 – Principais características da série REF30XX.

Característica	Valor
Tensão elétrica de saída (V)	$V_o \pm 0,5\%$
Tensão elétrica de entrada (V)	$V_o + 1m$
Corrente elétrica de saída nominal (mA)	25
Corrente elétrica quiescente (μA)	42

Fonte: Adaptado de TI (2018).

No que tange a criação da referência de tensão para a cadeia de condicionamento, é necessária a adição de um circuito seguidor de tensão a fim de permitir o fluxo bilateral de correntes - tarefa impossível de ser executada por uma referência de tensão sem tal arranjo. Desta forma, foram utilizados amplificadores operacionais quádruplos de modelo OPA4187 da *Texas Instruments*, sendo possível implementar o esquema necessário para 8 canais. As principais características do OPA4187 se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Principais características do OPA4187.

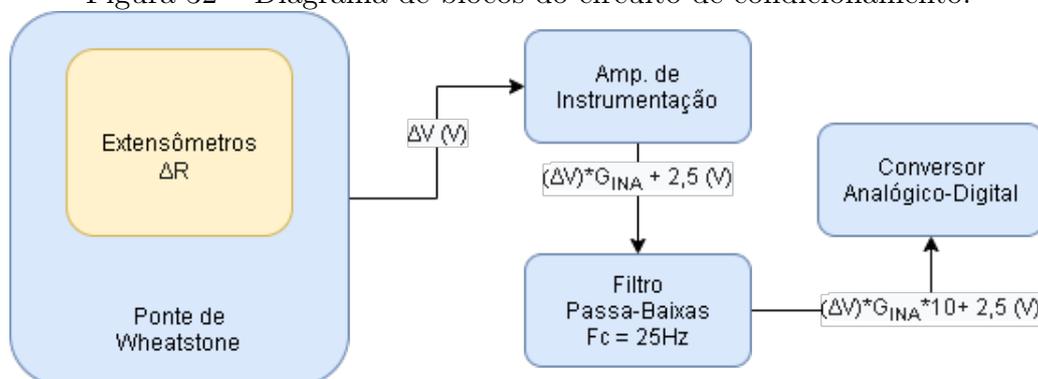
Característica	Valor
Tensão elétrica de alimentação (V)	$\pm 2,25$ a ± 18
Tensão elétrica de <i>offset</i> de entrada (μV)	$10\mu V$
<i>Drift</i> térmico ($\frac{\mu V}{^\circ C}$)	0,001
CMRR típico (dB)	145
Nível de ruído típico ($\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$)	15
Corrente quiescente por canal (μA)	100
Corrente de polarização máxima (pA)	100
GBW (kHz)	550

Fonte: Adaptado de TI (2020a).

3.2.3 Circuito de condicionamento

O panorama geral do circuito de condicionamento pôde ser observado na Seção 3.2. O diagrama contido na Figura 32 ajuda a compreender melhor toda a cadeia percorrida pela variável elétrica de interesse até estabelecer contato com a placa de aquisição e controle. Mais detalhes sobre os blocos pelos quais o sinal passa serão discutidos nas seções subsequentes.

Figura 32 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento.



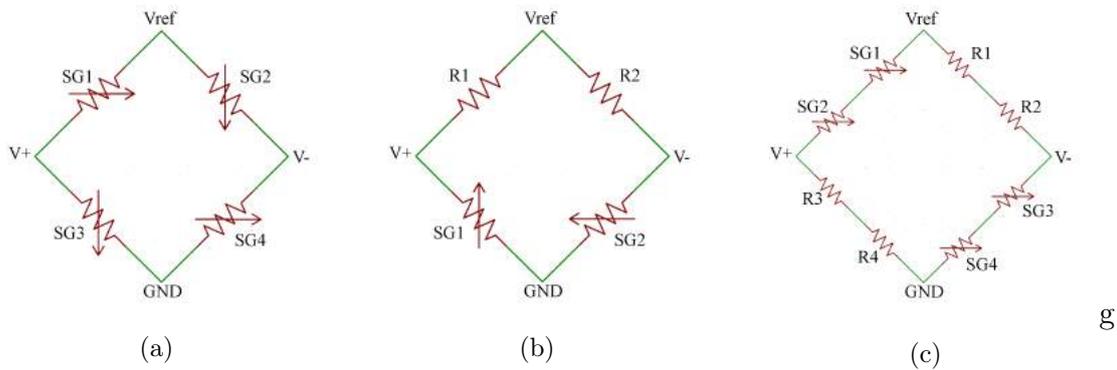
Fonte: Elaboração própria.

3.2.3.1 Pontes de Wheatstone

A fim de corrigir o *offset* causado pela incerteza associada às resistências dos extensômetros quando em repouso, um circuito de compensação foi implementado utilizando um *trimpot* de $10k\Omega$ e um resistor de $10k\Omega$ (presentes na Figura 33). Além disso, de acordo com o comportamento das deformações, decidiu-se por utilizar diferentes topologias de pontes de *Wheatstone* para a conversão de esforços aplicados em sinais elétricos.

A topologia presente na Figura 33(a) foi utilizada nos eixos frontal e lateral da célula de carga com 3 graus de liberdade. A topologia presente na Figura 33(c) foi utilizada no eixo perpendicular da célula com 3 graus de liberdade. A topologia de ponte completa não foi utilizada devido à dificuldade de cimentação

Figura 33 – Topologias escolhidas para as pontes de *Wheatstone*. a) Ponte completa; b) Meia-ponte; c) Meia-ponte dupla.



Fonte: Elaboração própria.

dos extensômetros na parte interior da estrutura em "L". Assim, restou somente a deformação proveniente da parte exterior. A utilização de uma meia-ponte dupla reduz a sensibilidade cruzada em relação aos eixos restantes. Não foi possível a cimentação de extensômetros *dummy* a fim de realizar a total compensação de temperatura devido a restrições de espaço, ocorrendo a sua substituição por resistores de 0,1% de tolerância para compor o restante da ponte.

A topologia presente na Figura 33(b) é exclusiva da célula de carga com 6 graus de liberdade e utiliza os extensômetros em sua parte inferior. A escolha foi baseada em SCHICKL *et al.* (2016) e a Tabela 7 apresenta a análise das deformações para as pontes de *Wheatstone* de acordo com o esforço inferido. Destaca-se a sensibilidade de algumas pontes para mais de um dos esforços, ou seja, o acoplamento dos eixos. Foram considerados os esforços de $F_x = F_z = -500N$, $F_y = -1000N$ e $M_x = M_y = M_z = 15Nm$.

Observe que, como os extensômetros são posicionados na parte inferior da ponte de *Wheatstone*, o balanço só é quebrado quando as deformações ocorrem em sentidos contrários, como por exemplo Z1 para F_z .

Voltando aos limites de alimentação das pontes, a fabricante não oferece

Tabela 7 – Deformações via simulação - 6DoF.

Ponte	SGs	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Z1	11	-	-	↑	-	↑	-
	15	-	-	↓	-	↑	-
Z2	10	↑	-	-	-	↓	-
	14	↓	-	-	-	↓	-
Z3	7	-	↓	-	-	-	↑
	6	-	↑	-	↓	-	-
Z4	4	-	↑	-	-	-	↑
	8	-	↑	-	-	-	↓
Z5	1	-	↓	-	↓	-	-
	5	-	↓	-	↑	-	-
Z6	13	↑	-	-	-	↑	-
	16	-	-	↑	-	↓	-
Z7	2	-	↑	-	↑	-	-
	3	-	↓	-	-	-	-
Z8	12	-	-	↓	-	↓	-
	9	↓	-	-	-	↑	-

informações consistentes sobre tal parâmetro. Contudo, a similaridade dos extensômetros adquiridos para este projeto com os modelos oferecidos pela fabricante HBM (1-LY13-0.6/120) permite que seja feito um paralelo para balizar a decisão de projeto. Em acordo com HBM (2016), é possível então utilizar a tensão máxima de $1,5V$. Desta forma, foi escolhida a tensão de referência de $1,25V$ fornecida pelo REF3012. É importante respeitar os limites de tensão estipulados para evitar erros devido ao aquecimento do sensor. Em situações mais extremas, pode ocorrer o dano permanente do componente. Levando isso em conta, pode-se calcular a corrente para cada uma das topologias de ponte de *Wheatstone* utilizadas (Equações (18) a (19)).

- Ponte completa e meia-ponte:

$$I = \frac{1,25}{120} = 10,42mA, \quad (18)$$

- Meia-ponte dupla:

$$I = \frac{1,25}{240} = 5,21mA. \quad (19)$$

A capacidade de fornecimento de corrente dos REF3012 é de $25mA$. Portanto, garante-se uma margem de cerca de $4mA$ caso duas pontes que consomem $10,42mA$ sejam alimentadas por apenas um circuito integrado.

Sabe-se, a partir da Equação (14), que a saída em tensão elétrica da ponte de *Wheatstone* e, por conseguinte, sua sensibilidade, dependem da deformação de seus extensômetros e da tensão elétrica de referência à qual são expostos. Assim, para as diferentes configurações de ponte de *Wheatstone* utilizadas, tem-se as diferentes tensões elétricas de saída e as sensibilidades, de acordo com as Equações 20 a 25.

- Ponte-completa:

$$V_o = V_{Ref} \cdot K \cdot \varepsilon = 1,25 \cdot 2,13 \cdot \varepsilon = 2,66\varepsilon[V], \quad (20)$$

$$S_o = \frac{dV_o}{d\varepsilon} = 0,00266 \frac{mV}{\mu\varepsilon}, \quad (21)$$

- Meia-ponte:

$$V_o = V_{Ref} \cdot \frac{K}{2} \varepsilon = 1,25 \cdot \frac{2,13}{2} \cdot \varepsilon = 1,33\varepsilon[V], \quad (22)$$

$$S_o = \frac{dV_o}{d\varepsilon} = 0,00133 \frac{mV}{\mu\varepsilon}, \quad (23)$$

- Meia-ponte dupla:

$$V_o = V_{Ref} \cdot \frac{K}{2} \varepsilon = 1,25 \cdot \frac{2,13}{2} \cdot \varepsilon = 1,33\varepsilon[V], \quad (24)$$

$$S_o = \frac{dV_o}{d\varepsilon} = 0,00133 \frac{mV}{\mu\varepsilon}, \quad (25)$$

onde V_o é a tensão elétrica de saída das pontes de *Wheatstone* em $[V]$, V_{Ref} é a tensão elétrica de referência das pontes de *Wheatstone* em $[V]$, K é o fator SG dos extensômetros, ε é a deformação aparente à qual os extensômetros são expostos em $[\mu\varepsilon]$ e S_o é a sensibilidade da tensão elétrica de saída das pontes de *Wheatstone* em $\left[\frac{mV}{\mu\varepsilon} \right]$.

3.2.3.2 Estágio de entrada

Como estágio de entrada para a ponte de *Wheatstone*, optou-se pela utilização de amplificadores de instrumentação de modelo INA826, da *Texas Instruments*. As características principais de tal circuito integrado podem ser observadas na Tabela 8. Esse estágio é importante pois a configuração do amplificador de instrumentação permite a rejeição do ruído de modo comum e a configuração de ganhos (de 1 até 1000, no caso do INA826) com a modificação de apenas um resistor de ganho R_G .

Como foi definida a faixa de excursão do ADC de $0V$ a $5V$, o pino *REF* do INA826 foi exposto à tensão de referência disponibilizada pelo REF3025 a fim de centralizar a faixa em $2,5V$ quando o sistema encontra-se em repouso. Vale

Tabela 8 – Principais características do INA826.

Característica	Valor
Tensão elétrica de alimentação (V)	3 a 36
Tensão elétrica de offset (μV)	150
CMRR (dB)	130 @ $G = 1000$
PSRR (dB)	140 @ $G = 1000$
Nível de ruído típico ($\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$)	18
Corrente consumida (μA)	200
GBW (kHz)	6 @ $G = 1000$
Erro do ganho (%)	$\pm 0,04$ @ $G = 1000$

Fonte: Adaptado de TI (2020b).

ressaltar que, diante da utilização de um terra virtual, é necessário especial atenção às características do *range* de entrada de tensão elétrica permitida - com destaque para a tensão de modo comum aceita. Para o caso aqui apresentado, a tensão de modo comum de aproximadamente $620mV$ se encontra dentro da faixa permitida de acordo com (TI, 2020b).

Assim, diante das prováveis deformações apresentadas via simulação e dos resultados obtidos via calibração e da expressão que descreve o ganho do INA826 (Equação (26)), decidiu-se pela utilização dos resistores descritos na Seção 3.3.

$$G_{INA826} = 1 + \frac{49,4k\Omega}{R_G}, \quad (26)$$

onde G_{INA826} é o ganho final obtido em $[\frac{V}{V}]$ e R_G é o resistor de ganho utilizado em $[\Omega]$.

Portanto, após a passagem pelo estágio de entrada composto pelo amplificador de instrumentação, a saída em tensão elétrica do sistema é expressa pela Equação

(27).

$$V_{o \text{ Estagioentrada}} = (V_+ - V_-)\left(1 + \frac{49,4k\Omega}{R_G}\right) + V_{Ref}[V], \quad (27)$$

onde $V_{o \text{ Estagioentrada}}$ é a tensão elétrica de saída do estágio de entrada em $[V]$, R_G é o resistor de ganho utilizado em $[\Omega]$ e V_{Ref} é a tensão à qual o sinal é referenciado em $[V]$ (no caso, $2,5V$).

3.2.3.3 Estágio de filtragem e de amplificação

Após passar pelo estágio de entrada, o sinal é injetado no segundo estágio que compõe a cadeia de condicionamento para ser executada a sua filtragem e uma nova amplificação. Para tal, foi implementado um filtro passa-baixas com topologia *Sallen-Key* de dois estágios e ganho fixo diferente de 1. A estruturação do estágio em questão foi revalidada com a ferramenta *Filter Design Tool*, da *Texas Instruments*, já que a mesma composição havia sido utilizada por PIGATTO; BALBINOT (2018).

De acordo com o Teorema de Nyquist, a frequência de amostragem deve ser no mínimo duas vezes maior do que a frequência do sinal amostrado. Caso esta premissa não seja respeitada, a ocorrência de *aliasing* afetará a integridade do sinal. Desta maneira, supondo que um ciclista não ultrapassará a cadência de 180RPM durante a execução do movimento, optou-se por uma frequência de corte de $25Hz$ - mais de 8 vezes superior à frequência máxima estimada para o sistema. O ganho foi fixado em 10, complementando a amplificação do estágio de entrada. As demais características do filtro podem ser observadas na Tabela 9.

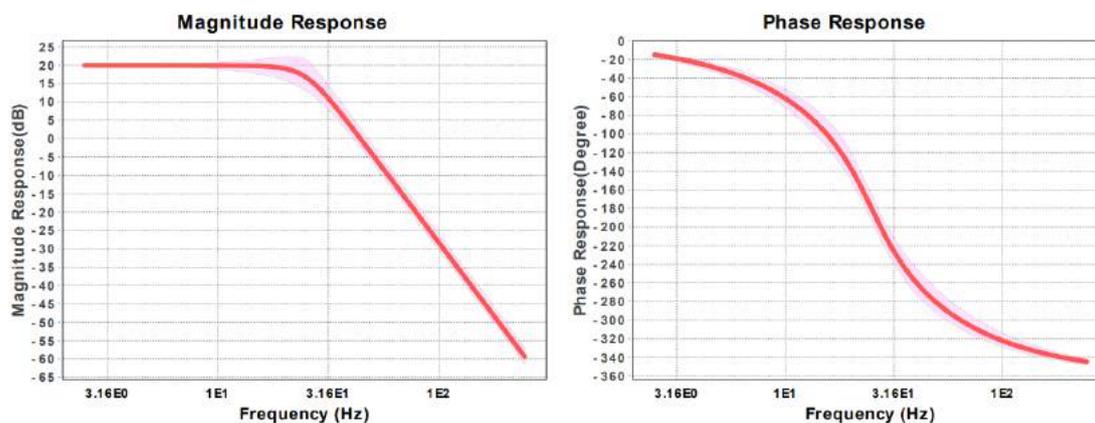
Dentro do *Filter Design Tool*, foram configurados os parâmetros dos componentes disponíveis para a montagem do circuito em questão. Foram adquiridos resistores

Tabela 9 – Principais características do filtro utilizado.

Característica	Valor
Topologia	Sallen-Key
Tipo de resposta	Butterworth
Frequência de Corte (Hz)	25
Ordem	4
Número de estágios	2
Ganho na banda de passagem ($\frac{C}{C}$)	10
Q (Primeiro estágio)	0,541
Q (Segundo estágio)	1,307

da série E96 com 1% de tolerância e capacitores da série E12 com 10% de tolerância. Como resultado, a resposta em frequência simulada disponibilizada no relatório do programa apresenta a margem de erro para a magnitude e para a fase (regiões hachuradas em rosa em torno da resposta ideal - Figura 34).

Figura 34 – Resposta em frequência simulada do filtro projetado.



Fonte: Elaboração própria.

O amplificador operacional utilizado para compor os estágios de filtragem foi o TLV4333, da *Texas Instruments*, cujas características são observadas na Tabela 10. Esse circuito integrado possui 4 amplificadores operacionais em um único encapsulamento, permitindo a implementação de 2 filtros ativos de 2 estágios por

unidade com separação de canal de $0,1 \frac{\mu V}{V}$.

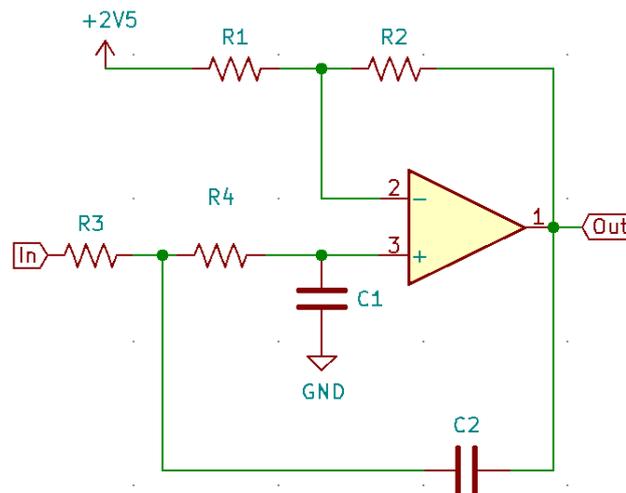
Tabela 10 – Principais características do TLV4333.

Característica	Valor
Tensão elétrica de alimentação (V)	$\pm 1,8$ a $\pm 5,5$
Tensão elétrica de offset de entrada (μV)	$10 \mu V$
Drift térmico ($\frac{\mu V}{^\circ C}$)	0,05
CMRR típico (dB)	130
Nível de ruído típico ($\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$)	1,1
Corrente quiescente por canal (μA)	17
Corrente de polarização máxima (pA)	130
GBW (kHz)	350

Fonte: Adaptado de TI (2015).

Os filtros de topologia *Sallen-Key* são formados por estágios ativos em cascata, chegando-se até a ordem desejada. A Figura 35 apresenta a estrutura de um filtro passa-baixas *Sallen-Key* genérico referenciado a um terra virtual.

Figura 35 – Esquemático - *Sallen-key* genérico.



Fonte: Elaboração própria.

A função de transferência que representa a resposta ideal desse estágio é

encontrada na Equação (28).

$$H(S) = \frac{\frac{G}{C_1 C_2 R_3 R_4}}{S^2 + S\left(\frac{1}{C_2 R_3} + \frac{1}{C_2 R_4} + \frac{1-G}{C_1 R_4}\right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_3 R_4}} \quad (28)$$

Observe que tal função de transferência possui ganho 1 para sinais abaixo da frequência de corte. No caso, o que infere ganho maior do que 1 ao sistema é a combinação dos resistores R_1 e R_2 , de acordo com a Equação (29).

$$G_{Filtro} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 3,163 \left[\frac{V}{V} \right] \quad (29)$$

No entanto, como já fora mencionado, tratam-se de dois estágios idênticos encadeados. Então, de acordo com HAYKIN (2002) e considerando os capacitores (C_n) e resistores (R_n) utilizados, a resposta do filtro será a multiplicação das respostas dos estágios (Equação (30)).

$$\begin{aligned} H_{Filtro}(S) &= H_{1^\circ estagio} \cdot H_{2^\circ estagio} \\ &= \frac{6070388509,64}{S^4 + 406,65S^3 + 83497,06S^2 + 10018214,05S + 606881075,88} \end{aligned} \quad (30)$$

sendo que o ganho total de H_{Filtro} na banda de passagem é também a multiplicação dos ganhos dos estágios, ou seja, $10 \frac{V}{V}$.

3.2.4 Circuito de aquisição

O circuito de aquisição e de envio do sinal foi projeto com o intuito de oferecer flexibilidade de movimento e a implementação de modos diferenciados de aquisição de acordo com o número de canais e da atividade a ser realizada.

Para executar a tradução dos sinais elétricos provenientes das pontes

de *Wheatstone* implementadas, optou-se pela utilização de um conversor analógico-digital externo de modelo ADS1256, da *Texas Instruments*. Tal circuito integrado possui resolução nominal de até 24 bits e capacidade amostral de até $30kSPS$, permitindo obter um detalhamento maior do sinal em comparação com sistemas anteriormente implementados. As principais características do ADS1256 são observadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Características do ADS1256.

Característica	Valor
Topologia	$\Sigma\Delta$
Número de bits	24
Não-linearidade máxima	$\pm 0,0010\%$
Taxa de amostragem (<i>SPS</i>)	$30k$
Número de entradas simples	8
Número de entradas diferenciais	4
Tensão elétrica de alimentação analógica (<i>V</i>)	5
Níveis lógicos compatíveis (<i>V</i>)	-0,3 a 3,6
Corrente elétrica de alimentação contínua (<i>mA</i>)	10
Ganho programável	1 a 64

Fonte: Adaptado de TI (2013).

No caso, a taxa amostral do ADS1256 é compartilhada pela quantidade de canais utilizados. Assim, para a configuração de 3 canais optou-se por uma taxa amostral total de $500SPS$ com ganho programado de 1, totalizando cerca de $167SPS$ para cada canal com resolução efetiva de 22,3 bits. Já para a configuração de 8 canais, optou-se por uma taxa amostral de $1000SPS$ com ganho programado de 1, totalizando cerca de $125SPS$ para cada canal com resolução efetiva de 21,7 bits. Observe que a taxa de amostragem total é sempre dividida pelo número de canais que são utilizados. Tais valores estão de acordo com o disposto por TI (2013) no

datasheet do ADS1256.

A recepção do sinal de início e de parada e o envio dos dados para a estação remota é executado por um módulo *XBee* conectado via UART em modo transparente (agindo como uma porta serial comum) com taxa de transmissão de 115.200 bits/s. Para começar e interromper a aquisição dos sinais, um sinal específico é enviado por um terminal remoto também equipado com um módulo *XBee*. Na placa, um LED indica o status do sistema e o modo de funcionamento atual dele, facilitando a identificação da atual situação e se houve falha na inicialização do sistema.

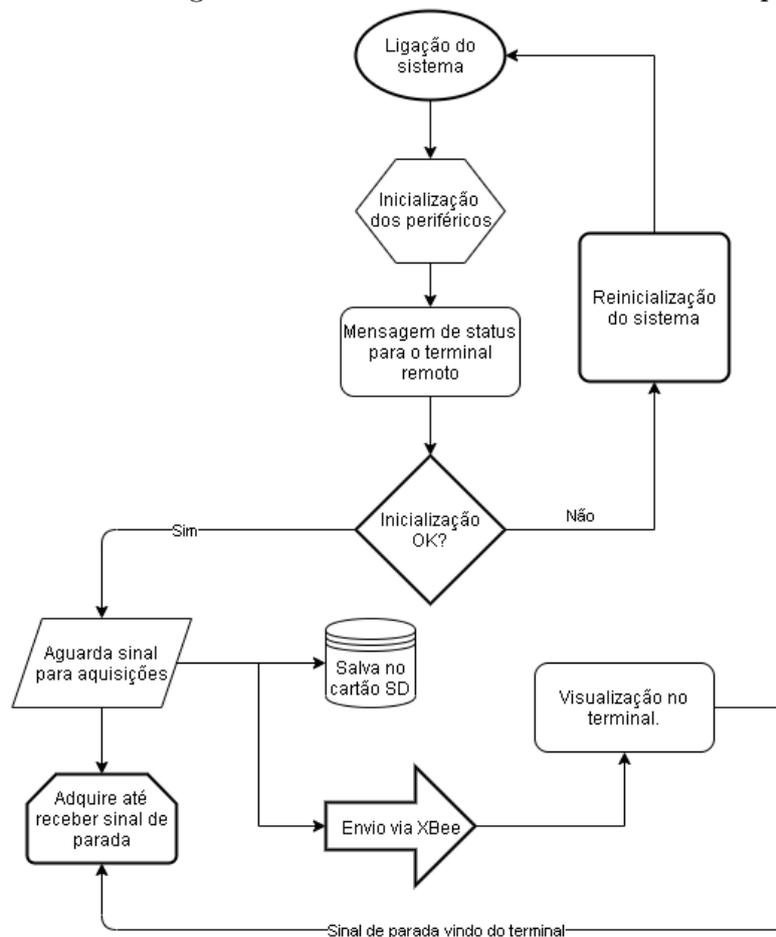
Localmente, as informações são armazenadas em um cartão SD controlado via protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). Para cada início de gravação, um novo arquivo .TXT é criado com formato de nome sequencial. As variáveis são armazenadas em um *buffer* de 512 bytes para que a informação seja adequada à paginação utilizada pelo cartão. Ainda, a maneira com a qual o sistema foi programado permite que o operador veja quais arquivos estão presentes no cartão SD, tendo certeza se a aquisição ocorreu sem problemas.

Para controlar os periféricos já citados, foi utilizado um microcontrolador de modelo STM32F103C8T6, da *ST Microelectronics*. Tal componente foi programado em linguagem C com o auxílio do ambiente de desenvolvimento *STM32CubeIDE*, que é disponibilizado pela própria fabricante do microcontrolador e facilita a integração de sistemas ao permitir a seleção simplificada dos periféricos necessários e a rápida adição das bibliotecas exigidas.

Para explicitar o funcionamento do sistema, o fluxograma ilustrado na Figura 36 é apresentado. Ao ser ligado, o microcontrolador dá início às suas rotinas de

inicialização dos periféricos, o que envolve configuração de canais e de frequência de amostragem do ADS1256 e a montagem do sistema de arquivos do cartão SD. Um sinal de que houve sucesso nessa primeira etapa é enviado ao terminal remoto, indicando que já é possível começar as aquisições. Desta forma, o sistema entra em estado de espera, aguardando o comando de início proveniente do terminal remoto. Quando tal comando chega, a transmissão dos dados recebidos via SPI do ADS1256 começam a ser armazenados no cartão SD (em um novo arquivo) e/ou enviados pelo *XBee*. O comportamento se repete até que um comando de parada seja enviado pelo terminal remoto, fechando o arquivo e finalizando a aquisição.

Figura 36 – Fluxograma do funcionamento do sistema de aquisição.



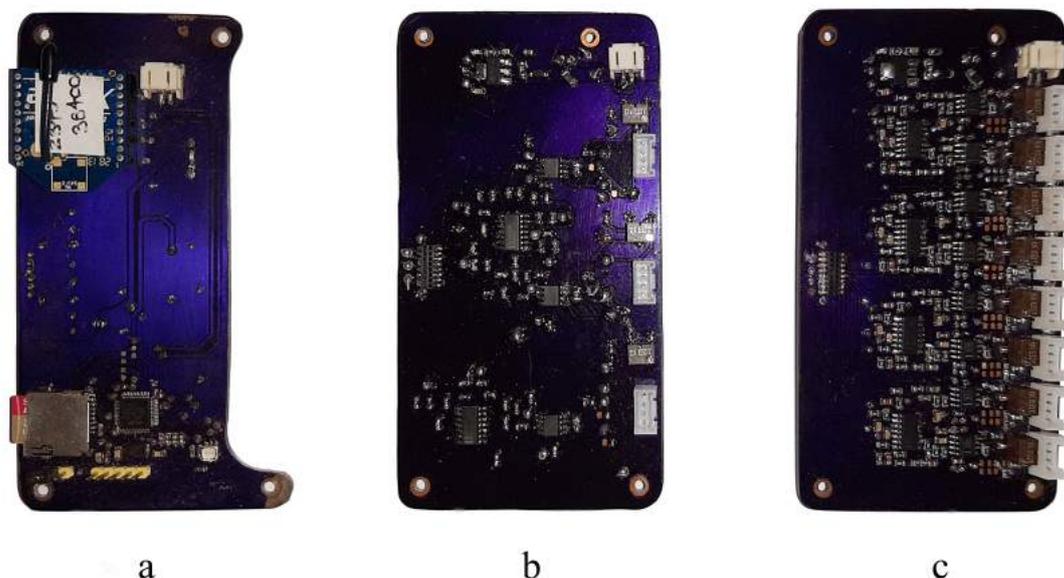
Fonte: Elaboração própria.

3.2.5 Circuitos completos

Após a determinação da estrutura geral do grupo de circuitos a ser empregado, deu-se a construção das placas de circuito impresso que compõe o sistema. Os esquemáticos gerais foram produzidos com o auxílio do *software* KiCad EDA e podem ser observados nos Apêndices A e B.

Com todas as conexões realizadas de acordo com o planejado, o *netlist* (arquivo que relaciona as ligações elétricas dos componentes) foi importado no editor de *layout* do próprio KiCad. Os negativos foram impressos em papel vegetal 90/95 $\frac{g}{m^3}$ de gramatura, o qual foi posicionado em cima das placas já cobertas com filme fotossensível (caracterizando um processo em pequena escala de fotolitografia). Desta forma, foram produzidos dois exemplares para cada uma das placas de circuito impresso em questão (condicionamento de 3 canais, condicionamento de 8 canais e controle). As placas em seu estado final podem ser observadas na Figura 37.

Figura 37 – Placas construídas. a) Placa de controle; b) Placa de condicionamento de 3 canais; c) Placa de condicionamento de 8 canais.



Fonte: Elaboração própria.

3.3 Funções de transferência teóricas

A determinação das funções de transferência teóricas ocorreu a partir das simulações numéricas realizadas de acordo com a Seção 3.1.3. De acordo com os esforços aplicados, as informações de deformação foram compiladas e aplicadas nas Equações (20), (22) e (24) para gerar as curvas condizentes com as estruturas. Para a peça com 6 graus de liberdade o processo é possui maior complexidade, exigindo a definição da matriz de desacoplamento (como descrito na Seção 2.2.4).

3.3.1 Célula de carga com 3 graus de liberdade

Para a célula de carga com 3 graus de liberdade, como as pontes de *Wheatstone* foram dispostas de modo a refletir diretamente as deformações nos eixos x , y e z , têm a determinação das suas funções de transferência teóricas de forma simplificada. Então, aplicando as deformações previstas em simulação nas Equações (20) e (24) e levando em conta os ganhos do INA826 e do filtro, chegamos às Equações (31) (que descreve o valor máximo da saída do eixo frontal), (32) (que descreve o valor máximo da saída do eixo perpendicular) e (33) (que descreve o valor máximo da saída da ponte destinada à mensuração do momento em torno do eixo frontal).

$$\begin{aligned}
 V_o &= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot V_{Ref} \cdot K \cdot \varepsilon + 2,5[V] \\
 &= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 2,69\varepsilon + 2,5[V] \\
 &= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 2,69 \cdot 315,31 \cdot 10^{-6} = G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 0,85 \cdot 10^{-3} + 2,5[V]
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
V_o &= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot V_{Ref} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot 0,5 + 2,5[V] \\
&= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 1,33\varepsilon + 2,5[V] \\
&= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 1,33 \cdot 1099,3 \cdot 10^{-6} = G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 1,46 \cdot 10^{-3} + 2,5[V]
\end{aligned} \tag{32}$$

$$\begin{aligned}
V_o &= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot V_{Ref} \cdot K \cdot \varepsilon + 2,5[V] \\
&= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 2,69\varepsilon + 2,5[V] \\
&= G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 2,69 \cdot 400,19 \cdot 10^{-6} = G_{INA826} \cdot G_{Filtro} \cdot 1,07 \cdot 10^{-3} + 2,5[V],
\end{aligned} \tag{33}$$

em que V_o é a saída em tensão elétrica da referida ponte em $[V]$, G_{INA826} é o ganho imposto pelo amplificador de instrumentação, G_{Filtro} é o ganho imposto pelo filtro, V_{Ref} é a tensão de referência da ponte em $[V]$, K é o fator SG e ε é a deformação aparente em $[\frac{\mu m}{m}]$.

Sabendo que o ganho do filtro é fixo de valor 10 e que o sinal é centrado em $2,5V$, pode-se calcular os valores estimados para G_{INA826} nos 3 casos apresentados para que a excursão ocorra entre $0V$ e $5V$. Os valores dos ganhos assim como os resistores necessários são observados na Tabela 12.

Desta forma, as funções de transferência teóricas já com as deformações em função do esforço aplicado são observados na Tabela 13.

Tabela 12 – Ganhos teóricos - INA826 - 3DoF.

Eixo (canal)	G_{Total}	G_{INA826}	$R_G (\Omega)$
Frontal (x)	2977,92	297,79	166,45
Perpendicular (y)	1708,77	170,88	292,60
Lateral (Mx)	2348,51	234,85	211,67

Tabela 13 – Funções de transferência teóricas para a célula 3DoF.

Eixo (canal)	Função de Transferência [V]
Frontal (x)	$V_o = 2977,92 \cdot 2,66(6,31 \cdot 10^{-7} \cdot F) + 2,5$
Perpendicular (y)	$V_o = 1708,77 \cdot 1,33(1,10 \cdot 10^{-6} \cdot F) + 2,5$
Momento frontal (Mx)	$V_o = 2348,51 \cdot 2,66(2,54 \cdot 10^{-5} \cdot M) + 2,5$

3.3.2 Célula de carga com 6 graus de liberdade

Para a célula de carga com 6 graus de liberdade, de forma similar à feita no caso da célula com 3 graus de liberdade, foram executadas simulações com o intuito de obter as deformações existentes a partir dos esforços realizados. Diferentemente do caso visto na Seção 3.3.1, a célula de carga tratada aqui não pressupõe desacoplamento dos eixos estudados. Assim, não é possível associar diretamente as saídas das pontes às deformações dos eixos. Para resolver o problema, é necessário definir uma matriz de desacoplamento. No caso teórico, tal processo é realizado com a compilação de todas as deformações e das saídas estimadas das pontes a partir da aplicação de esforços, pavimentando a definição das constantes da matriz de calibração \mathbf{C} , como já visto na Seção 2.2.4.

Então, todas as deformações médias condizentes com a cimentação dos extensômetros foram computadas (Tabela 14).

Observa-se que as maiores deformações para cada esforço estão com a fonte destacada. A análise desta informação serve para decidir qual é a melhor combinação possível de extensômetros a fim de minimizar o acoplamento entre os eixos,

Tabela 14 – Deformações a partir dos esforços aplicados.

SG	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
1	-6,19 $\mu\epsilon$	-514,91$\mu\epsilon$	62,51 $\mu\epsilon$	-969,37$\mu\epsilon$	0,97 $\mu\epsilon$	-29,50 $\mu\epsilon$
2	2,45 $\mu\epsilon$	437,77$\mu\epsilon$	80,57 $\mu\epsilon$	908,69$\mu\epsilon$	2,42 $\mu\epsilon$	17,50 $\mu\epsilon$
3	-36,40 $\mu\epsilon$	-823,71$\mu\epsilon$	3,08 $\mu\epsilon$	0,99 $\mu\epsilon$	-3,99 $\mu\epsilon$	-1505,30$\mu\epsilon$
4	-89,62 $\mu\epsilon$	735,22$\mu\epsilon$	-4,48 $\mu\epsilon$	-1,22 $\mu\epsilon$	2,04 $\mu\epsilon$	1465,30$\mu\epsilon$
5	-6,19 $\mu\epsilon$	-514,91$\mu\epsilon$	-60,85 $\mu\epsilon$	964,24$\mu\epsilon$	5,70 $\mu\epsilon$	-33,57 $\mu\epsilon$
6	2,45 $\mu\epsilon$	437,77$\mu\epsilon$	-81,68 $\mu\epsilon$	-937,39$\mu\epsilon$	12,78 $\mu\epsilon$	18,97 $\mu\epsilon$
7	43,52 $\mu\epsilon$	-823,71$\mu\epsilon$	5,36 $\mu\epsilon$	1,25 $\mu\epsilon$	8,68 $\mu\epsilon$	1540,40$\mu\epsilon$
8	90,41 $\mu\epsilon$	735,22$\mu\epsilon$	-1,08 $\mu\epsilon$	-1,29 $\mu\epsilon$	4,48 $\mu\epsilon$	-1507,30$\mu\epsilon$
9	-211,94$\mu\epsilon$	-30,50 $\mu\epsilon$	69,15 $\mu\epsilon$	-5,83 $\mu\epsilon$	601,30$\mu\epsilon$	69,13 $\mu\epsilon$
10	210,43$\mu\epsilon$	-43,46 $\mu\epsilon$	71,74 $\mu\epsilon$	-16,27 $\mu\epsilon$	-606,39$\mu\epsilon$	-82,77 $\mu\epsilon$
11	-63,90 $\mu\epsilon$	-26,29 $\mu\epsilon$	-219,62$\mu\epsilon$	-45,63 $\mu\epsilon$	470,49$\mu\epsilon$	-21,65 $\mu\epsilon$
12	-72,30 $\mu\epsilon$	-38,82 $\mu\epsilon$	217,60$\mu\epsilon$	45,52 $\mu\epsilon$	-470,72$\mu\epsilon$	22,26 $\mu\epsilon$
13	217,42$\mu\epsilon$	-27,90 $\mu\epsilon$	-72,32 $\mu\epsilon$	16,80 $\mu\epsilon$	599,31$\mu\epsilon$	-79,60 $\mu\epsilon$
14	-213,63$\mu\epsilon$	-42,68 $\mu\epsilon$	-69,37 $\mu\epsilon$	-8,34 $\mu\epsilon$	-589,47$\mu\epsilon$	63,32 $\mu\epsilon$
15	77,70 $\mu\epsilon$	-51,57 $\mu\epsilon$	223,27$\mu\epsilon$	49,54 $\mu\epsilon$	467,41$\mu\epsilon$	24,50 $\mu\epsilon$
16	67,90 $\mu\epsilon$	-57,08 $\mu\epsilon$	-227,23$\mu\epsilon$	-49,37 $\mu\epsilon$	-469,74$\mu\epsilon$	17,09 $\mu\epsilon$

agrupando aos pares e dentro do possível extensômetros que possuem deformação análoga em módulo mas com sinais opostos a partir da aplicação de um dado esforço. Desta forma, as pontes de *Wheatstone* definidas e as suas saídas em tensão (sem ganho) são exibidas na Tabela 15 a partir das deformações obtidas via simulação. A coluna "Ponte" descreve os agrupamentos de extensômetros, ou seja, Z1 (11 - 15) indica que a ponte 1 é formada pelos extensômetros de número 11 e 15 de acordo com a Figura 28. Tal processo também permite avaliar qual é o ganho necessário na cadeia de condicionamento para que haja a compatibilidade com a excursão desejada de 0V a 5V.

Antes de partir para a definição da matriz de calibração teórica, faz-se então o ajuste de ganhos para que a excursão ocorra de maneira a aproveitar o máximo da faixa estipulada. Para tal, foram considerados os valores máximos de saída em

Tabela 15 – Saídas das pontes de *Wheatstone* a partir dos esforços aplicados.

Ponte	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Z1 (11-15)	94,7 μV	-16,91 μV	296,18 μV	63,64 μV	-2,06 μV	30,86 μV
Z2 (10-14)	-283,59 μV	0,52 μV	-94,37 μV	5,30 μV	11,32 μV	97,70 μV
Z3 (7-6)	-27,47 μV	615,25 μV	-58,21 μV	-627,72 μV	2,74 μV	-1,02 mV
Z4 (4-8)	120,4 μV	1,26 μV	2,27 μV	-46,81 nV	1,63 μV	-1,99 mV
Z5 (1-5)	0,81 μV	0,73 μV	-82,50 μV	1,16 mV	3,16 μV	-2,72 μV
Z6 (13-16)	-99,99 μV	-19,51 μV	-103,60 μV	-44,25 μV	-714,93 μV	64,66 μV
Z7 (2-3)	-25,98 μV	-843,61 μV	-51,82 μV	-607,02 μV	-4,29 μV	-1,02 mV
Z8 (12-9)	-93,38 μV	5,56 μV	-99,28 μV	-34,34 μV	716,91 μV	-31,34 μV

tensão elétrica para as pontes de *Wheatstone* implementadas, multiplicando-as pelos ganhos do INA826 e do filtro (estágios de condicionamento). Os valores totais dos ganhos, assim como os resistores ideais para o amplificador de instrumentação, são observados na Tabela 16.

Tabela 16 – Ganhos totais e resistores ideais para o INA826.

Ponte	G_{Total}	G_{INA826}	$R_G(\Omega)$
Z1 (11-15)	4004,55	400,45	124
Z2 (10-14)	3140,74	314,07	158
Z3 (7-6)	1515,15	151,51	328
Z4 (4-8)	1256,28	125,63	396
Z5 (1-5)	1953,12	195,31	254
Z6 (13-16)	3496,84	349,69	142
Z7 (2-3)	1552,79	155,28	320
Z8 (12-9)	3487,17	348,72	142

Já existindo a definição dos ganhos para o condicionamento, pode-se então definir a matriz de calibração \mathbf{C} (Equação (34)) que traduzirá as tensões elétricas em esforços por meio de sua inversa. Suas constantes são obtidas pela simples divisão da saída em tensão obtida pelo esforço aplicado. No caso abordado, como são 8 pontes de *Wheatstone*, a matriz \mathbf{C} é 8×6 não-inversível, exigindo o cálculo de sua

pseudo-inversa para a definição da matriz **D** de desacoplamento.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix}
 -0,00160 & 0,00014 & -0,00500 & 0,03581 & -0,00116 & 0,01737 \\
 0,00500 & 0,00000 & 0,00166 & 0,00312 & 0,00665 & 0,05742 \\
 0,00013 & -0,00207 & 0,00029 & -0,10282 & 0,00045 & -0,16667 \\
 -0,00030 & 0,00000 & -0,00001 & 0,00000 & 0,00014 & -0,16667 \\
 0,00000 & 0,00000 & 0,00032 & 0,16667 & 0,00041 & -0,00035 \\
 0,00070 & 0,00007 & 0,00072 & -0,01032 & -0,16667 & 0,01507 \\
 0,00013 & 0,00207 & 0,00025 & -0,09935 & -0,00070 & -0,16667 \\
 0,00065 & -0,00002 & 0,00069 & -0,00798 & 0,16667 & -0,00729
 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Agora, a fim de obter os esforços aplicados nas peças, é preciso definir a matriz de desacoplamento **D** para poder aplicá-la na Equação (17). Desta forma, utilizando o *software* MATLAB[®] R2016b, foi calculada a pseudo-inversa de Moore-Penrose de

\mathbf{C} , de acordo com a Equação (35).

$$\mathbf{D} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T =$$

$$\begin{bmatrix} 81,84 & 222,93 & 31,72 & 28,60 & 14,83 & 16,80 & 26,13 & 8,44 \\ -0,74 & -1,33 & -240,45 & -2,13 & -3,31 & 3,91 & 242,16 & 5,63 \\ -220,42 & -74,59 & -25,39 & -11,93 & 28,46 & 15,46 & -10,74 & 16,87 \\ 0,26 & 0,29 & -0,90 & 1,92 & 4,82 & -0,15 & -0,91 & -0,17 \\ -0,04 & 0,01 & -0,17 & -0,19 & -0,16 & -3,00 & -0,04 & 3,00 \\ -0,35 & -0,21 & -1,67 & -2,77 & -1,93 & 0,08 & -1,65 & 0,09 \end{bmatrix} \quad (35)$$

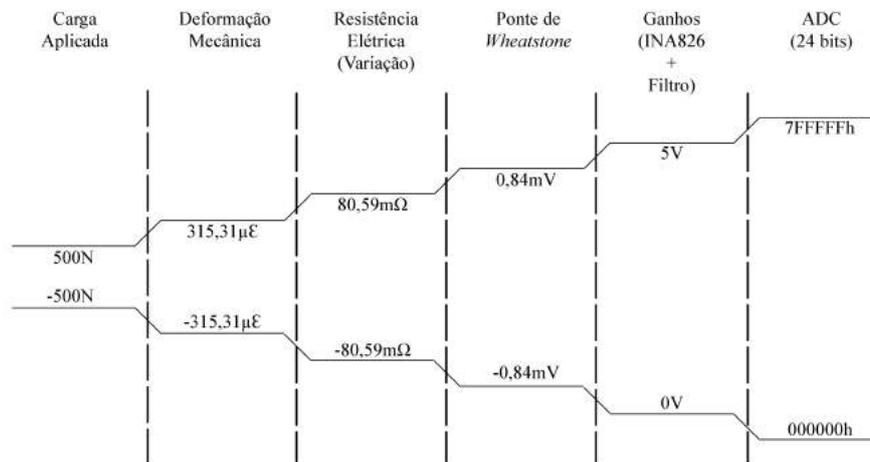
Desta forma, é preciso multiplicar a matriz \mathbf{D} pelo desequilíbrio em tensão elétrica das pontes de *Wheatstone* para recuperar os esforços aplicados.

3.3.3 Cadeias de medidas teóricas

A partir das simulações realizadas (descritas na Seção 3.1.3), foi possível obter as máximas deformações decorrentes da aplicação de esforços a ambos os modelos de célula de carga desenvolvidos.

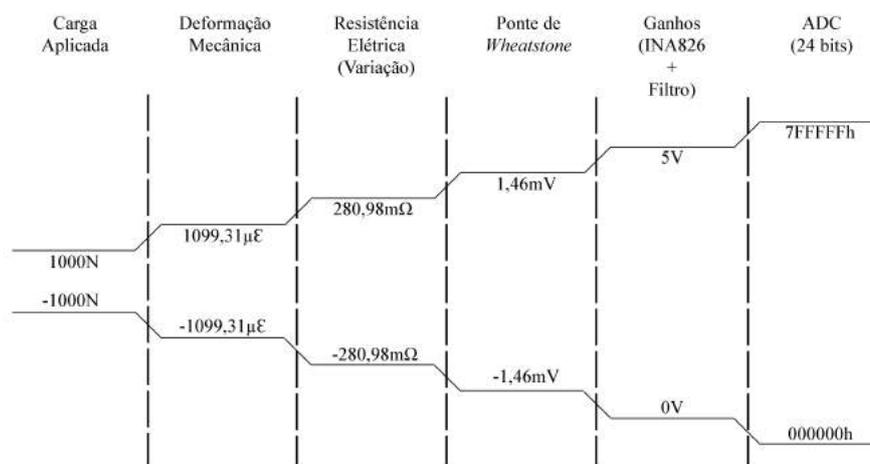
A abordagem para as células de carga com 3 graus de liberdade é direta: foi estipulada uma carga ideal de $\pm 500N$ para o eixo frontal, de $\pm 1000N$ para o eixo perpendicular e de $15Nm$ para o momento em torno do eixo frontal. Assim, as deformações simuladas foram computadas e aplicadas ao modelo que descreve a saída em tensão elétrica para o sistema. Então, foram definidas as cadeias de medidas teóricas para a célula com 3 graus de liberdade (Figuras 38 a 40).

Figura 38 – Cadeia de medidas teórica - F_x - 3DoF.



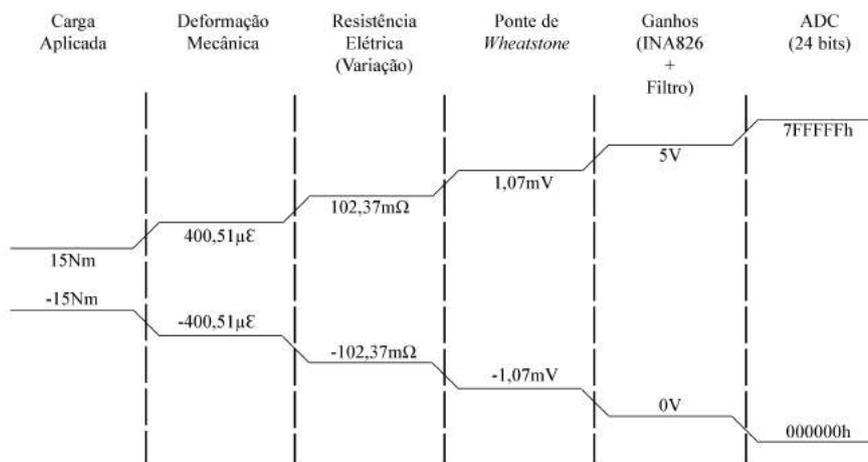
Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Cadeia de medidas teórica - F_y - 3DoF.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 – Cadeia de medidas teórica - M_x - 3DoF.



Fonte: Elaboração própria.

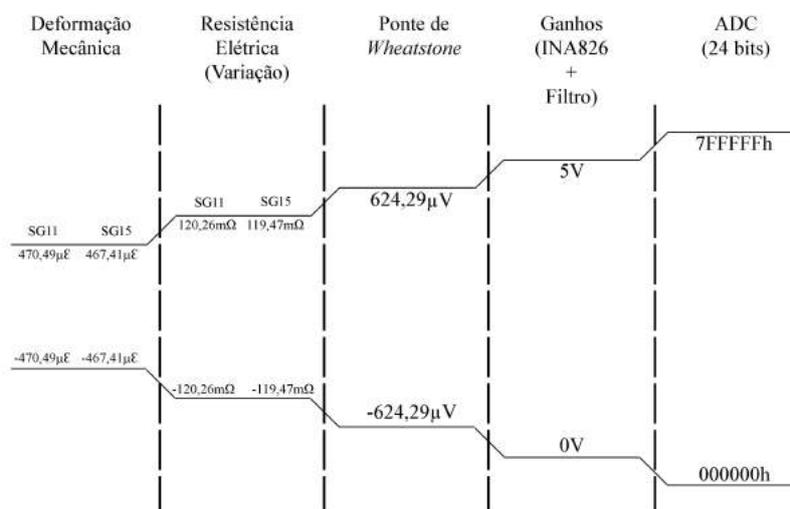
A abordagem para a construção da cadeia de medidas referente às pontes de *Wheatstone* da célula com 6 graus é ligeiramente diferente: como a máxima deformação dos extensômetros que compõem as pontes não necessariamente ocorre com o esforço ao qual elas são mais sensíveis, optou-se por descrever os esforços máximos (em módulo) dos extensômetros em separado - assim como suas variações máximas de resistência. As cadeias de medidas teóricas são observadas na Figura 41 e nas Figuras contidas no Apêndice C divididas nas 8 pontes de *Wheatstone* implementadas.

3.4 Calibração estática

Para realizar a calibração estática das células de carga a fim de determinar as suas funções de transferência experimentais, projetou-se uma máquina de calibração (Figura 42) capaz da aplicação de esforços (forças e momentos) de maneira virtualmente pura nos 3 eixos alvo (x , y e z).

A máquina é composta por vários perfis tubulares soldados de maneira a formar

Figura 41 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z1 - 6DoF.



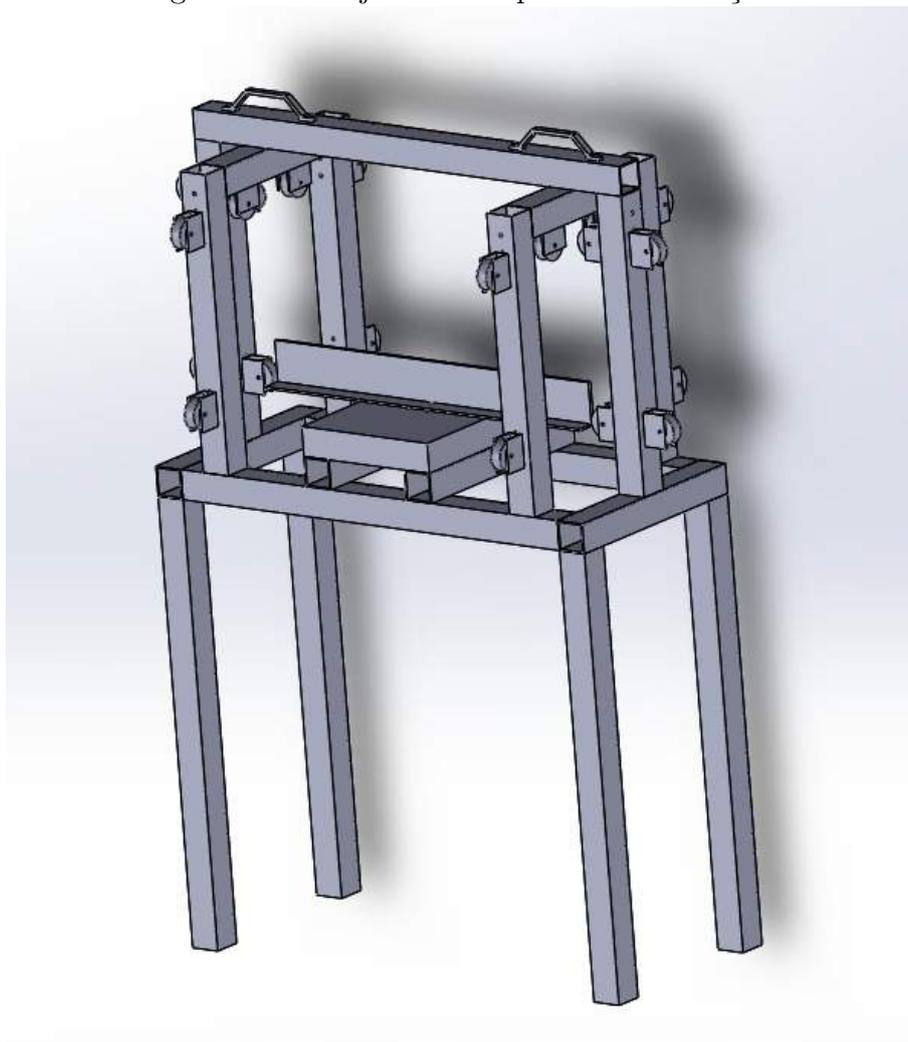
Fonte: Elaboração própria.

uma estrutura rígida capaz de suportar grandes cargas. Sua forma finalizada é observada na Figura 43. Em seu centro geométrico, uma plataforma de aço carbono com grampos de fixação é responsável por manter a célula de carga a ser calibrada imóvel para minimizar erros devido ao seu deslocamento. Com a utilização de roldanas para o direcionamento de esforços e de uma viga de aço carbono para realizar a transferência de tais esforços para as peças, foram aplicadas cargas de até $744,8N$ (limite imposto pela quantidade de pesos padrão disponíveis). Portanto, foram aplicados $744,8N$ máximos no eixo perpendicular, $490N$ no eixo frontal na célula 3DoF e $490N$ nos eixos frontal e lateral da célula 6DoF.

Para a produção dos momentos, exigidos para a calibração do eixo que representa M_x na célula de carga com 3 graus de liberdade e de M_x , M_y e M_z na célula de carga com 6 graus de liberdade, como o braço de alavanca possui $0,107m$, foi aplicada uma carga progressiva para a geração de $15Nm$ de momento em cada um dos eixos.

Anterior à aplicação das cargas, os sistemas foram posicionados e as suas pontes

Figura 42 – Projeto da máquina de calibração.



Fonte: Elaboração própria.

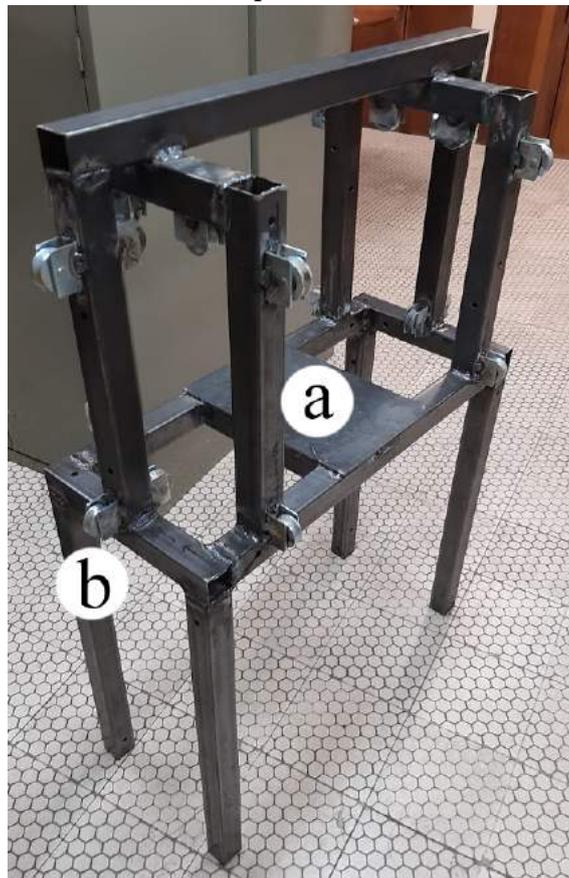
de *Wheatstone* foram equilibradas por meio do potenciômetro de compensação do *offset*, sendo a tensão de saída do sistema medida com o um multímetro de modelo DMM4050 (Tabela 17), da *Tektronix*. A alimentação é responsabilidade das baterias citadas na Seção 3.2.1.

Tabela 17 – Principais características do DMM4050.

Escala de tensão elétrica (DC)	Resolução	Incerteza
100mV	100nV	$\pm(0,0037\% + 3,5\mu V)$
1V	1 μV	$\pm(0,0025\% + 7\mu V)$
10V	10 μV	$\pm(0,0025\% + 50\mu V)$

Fonte: Adaptado de TEKTRONIX (2012).

Figura 43 – Máquina de calibração finalizada. a) Chapa de engaste das células de carga; b) Uma das roldanas utilizadas para direcionar os esforços.

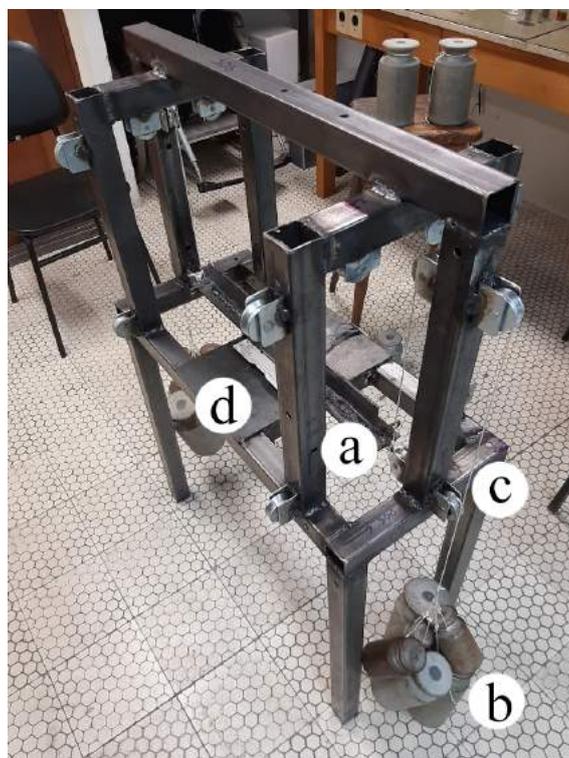


Fonte: Elaboração própria.

Já durante a aplicação dos esforços, o sistema de aquisição foi acionado e programado para realizar $2,5SPS$ no caso da célula com 3 graus de liberdade e $10SPS$ no caso da célula com 6 graus de liberdade, resultando na resolução de 25,1 bits e de 24,8 bits, respectivamente. Neste caso, o ADS1256 faz um *oversampling* das entradas, disponibilizando um valor a cada 6 mil amostras no primeiro caso e um valor a cada 3 mil amostras no segundo caso.

Desta forma, cada configuração de carga é adquirida durante 60 segundos após ser atingido o regime permanente da estrutura. A Figura 44 mostra o aparato durante a calibração.

Figura 44 – Calibração estática em andamento. a) Viga de transferência de esforços; b) Pesos padrão; c) Cabos de direcionamento de esforços; d) Dispositivo de engaste da célula de carga.



Fonte: Elaboração própria.

O dispositivo de engaste é visto em detalhe na Figura 45.

Figura 45 – Dispositivo de engaste.



Fonte: Elaboração própria.

Então, após a aplicação sequencial de cargas, os dados obtidos foram processados

no *software* MATLAB[®] R2016b e as suas funções de transferência experimentais puderam ser definidas, além de fornecer informações sobre possíveis ajustes finos nos ganhos caso necessário.

3.5 Calibração dinâmica

Para realizar a calibração dinâmica das células de carga desenvolvidas a fim de comparar os resultados com a simulação descrita na Seção 3.1.3, foi montado um aparato (Figura 46) contendo um acelerômetro piezoelétrico comercial tri-axial de modelo DeltaTron 4520 (Figura 47), da *Brüel & Kjaer* (Tabela 18). O ensaio foi conduzido pelo método do impacto, ou seja, foi utilizado um martelo de impacto para inferir a excitação mecânica nas peças.

Figura 46 – Aparato da calibração dinâmica. a) Célula de carga com o acelerômetro acoplado; b) Cabo BNC triaxial; c) Chassi SCXI-1000 com módulo SCXI-1531; d) Estação de trabalho com *LabVIEW*[™]; e) Martelo de impacto.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 – Acelerômetro DeltaTron 4520.



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjaer (2008).

Tabela 18 – Principais características do acelerômetro DeltaTron 4520.

Eixo	X	Y	Z
Sensibilidade no eixo de medição ($\frac{mV}{g}$)	10,25	10,43	9,817
Faixa de frequência (Hz)	2 7k	2 7k	2 7k
Frequência de ressonância (kHz)	30	30	40
Sensibilidade transversal ao eixo	< 5%	< 5%	< 5%

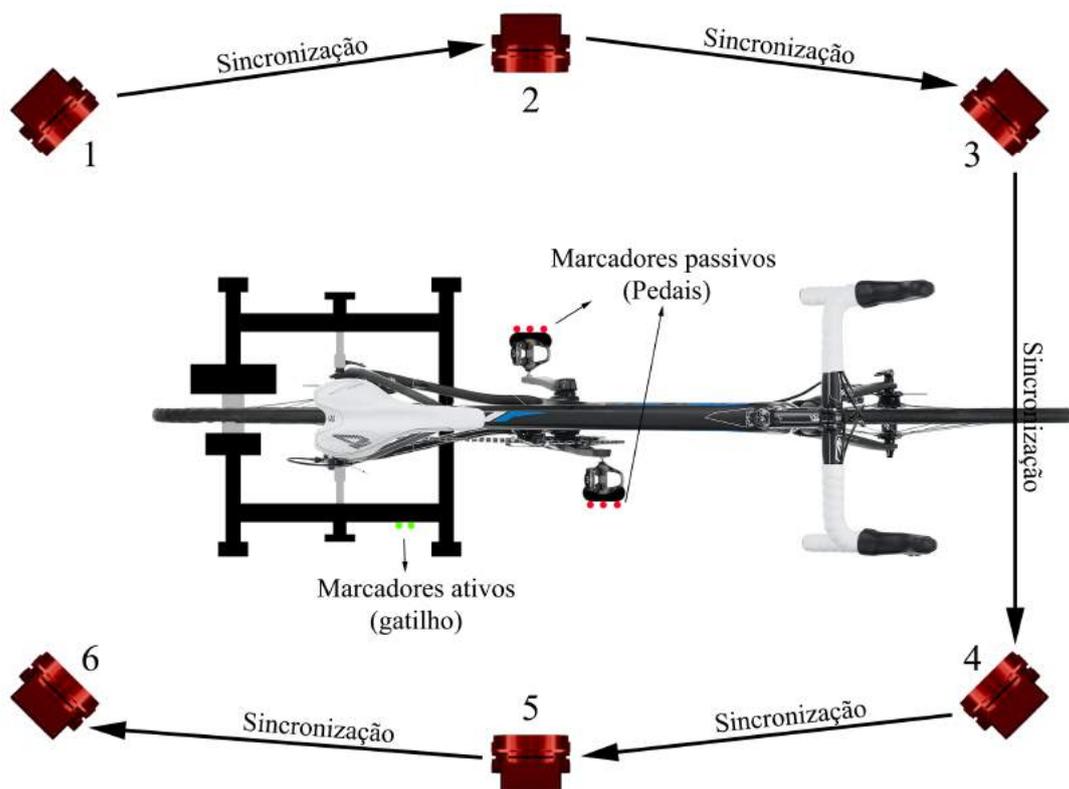
Fonte: Adaptado de Brüel & Kjaer (2008).

A fixação do acelerômetro foi feita com fita dupla face de modo que o conjunto ficasse imóvel. O chassi de modelo SCXI-1000 foi utilizado juntamente com o módulo de acelerometria SCXI-1531 (ambos da *National Instruments*) para realizar a aquisição dos sinais provenientes do acelerômetro em questão. Com o auxílio da plataforma *LabVIEW™*, foram adquiridos 10 segundos de amostras com frequência de $10kHz$ - resultando em 100 mil amostras. A tais dados foi aplicada a transformada rápida de Fourier (FFT) a fim de analisar, no domínio da frequência, quais são as harmônicas mais evidentes.

3.6 Sistema de medição de ângulos

A fim de adquirir as posições do conjunto pedal-pedivela durante os ensaios com participantes e, por conseguinte, determinar os ângulos entre os componentes, um sistema de cinemetria foi montado. Seis câmeras de modelo Flex 3 da *OptiTrack* foram posicionadas ao redor do rolo de treinamento em que a bicicleta é fixada. As informações captadas pelas câmeras são então processadas pelo *software* ARENA, também da *OptiTrack*. O diagrama observado na Figura 48 ilustra a disposição dos componentes do sistema em questão.

Figura 48 – Diagrama da disposição do sistema de cinemetria.



Fonte: Elaboração própria.

O sistema de cinemetria funciona da seguinte forma: em sincronia, as câmeras detectam a presença de marcadores dentro do volume formado pela superposição de suas imagens. Desta forma, o grupo de câmeras à esquerda da bicicleta (1 a 3) é

majoritariamente responsável por captar o movimento dos marcadores à esquerda e o grupo de câmeras à direita (4 a 6) é majoritariamente responsável por captar o movimento dos marcadores à direita. Entretanto, o volume de captação é o mesmo para todas as câmeras.

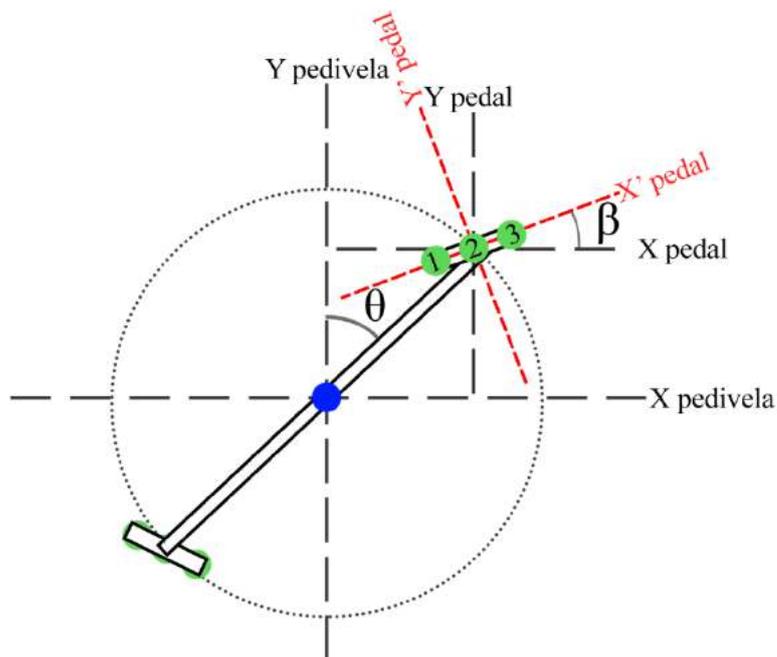
A partir da determinação de um corpo rígido correspondente para cada pedal, os ângulos do sistema podem ser calculados utilizando relações trigonométricas. O diagrama detalhado presente na Figura 49 apresenta o posicionamento dos marcadores junto aos pedais e os ângulos (como apresentado na Seção 2.1.1.3). É possível observar a definição do sistema de coordenadas do pedivela ($X_{Pedivela}, Y_{Pedivela}$) e do pedal (X_{Pedal}, Y_{Pedal}). Para o pedal, o marcador central de número 2 (verde) é considerado a origem. Já para o pedivela, não é utilizado um marcador físico: a definição de sua origem (marcador azul) se dá pelo cálculo da distância entre as origens de cada um dos pedais. Isto é possível devido à natureza fixa da distância entre os marcadores centrais dos pedais. Uma nova origem é calculada a cada quadro com o intuito de levar em conta possíveis deslocamentos do conjunto como um todo.

Segundo PIGATTO (2018), o ângulo do pedivela é determinado a partir da Equação (36).

$$\theta(x, y)[^\circ] = \begin{cases} \arccos\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{caso } x \geq 1, \\ 360 - \arccos\left(\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) & \text{caso } x < 1, \end{cases} \quad (36)$$

onde θ é o ângulo da normal em relação ao pedivela em $[\circ]$, x é a distância entre a origem do pedivela e o marcador 2 no eixo x [mm] e y é distância entre a origem do

Figura 49 – Diagrama detalhado dos marcadores e dos ângulos.



Fonte: PIGATTO (2018).

pedivela e o marcador 2 no eixo y em $[mm]$.

O ângulo do pedal em relação ao seu próprio sistema de coordenadas é determinado a partir da Equação (37).

$$\beta(x', y')[^{\circ}] = \arcsen\left(\frac{x'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}\right), \quad (37)$$

onde β é o ângulo em $[\circ]$ formado entre o eixo das abscissas do sistema de coordenadas do pedal e o eixo que acompanha o corpo do pedal, x' é a distância horizontal entre os marcadores 2 e 3 em $[mm]$ e y' é a distância vertical entre os marcadores 2 e 3 em $[mm]$.

É necessária a calibração do sistema de cinemetria, executada com o auxílio de um kit contendo um monopé com um marcador passivo em sua extremidade e um esquadro especial aliado à rotina de calibração integrada ao ARENA. Ao fim do processo, é emitido um relatório no qual consta o erro estimado da calibração.

Vários modos de calibração são disponibilizados e separados por tempo de aquisição. Optou-se pelo método mais demorado visando um erro inferior a $0,2\text{pixels}$.

Com o sistema já calibrado, é possível definir os corpos rígidos que representam os pedais durante o movimento. Assim, marcadores passivos foram posicionados em ambos os pedais referenciados ao sistema de coordenadas local do componente. Após serem reconhecidos dentro do ARENA, os grupos de marcadores correspondentes a cada um dos pedais foram agrupados em dois corpos rígidos (esquerdo e direito).

A sincronização do sistema foi definida de acordo com PIGATTO; BALBINOT (2018), sendo utilizado marcadores ativos (LEDs IR com comprimento de onda compatível com a sensibilidade das câmeras) que servem como gatilhos. A partir de uma rotina *LabVIEW*TM, os marcadores foram configurados da seguinte maneira: eles ficam ativos até o momento em que o terminal remoto dá o sinal de início das aquisições. Dessa forma, cria-se um ponto de referência para todo o sistema no qual a presença (ou não) dos pontos relativos aos LEDs dita início e final de aquisições para a cinematria, permitindo o recorte das informações de posição desse momento em diante.

Com os arquivos de posições provenientes dos ensaios salvos em formato C3D, ocorre então o tratamento das informações utilizando o *software* Mokka. Dentro do programa, é possível recortar os dados de posição no exato momento em que as aquisições têm início. Os trechos resultantes são então exportados em formato legível para o *software* MATLAB[®] R2016b, no qual é aplicado processamento aos dados a fim de definir os ângulos formados pelo conjunto pedal-pedivela.

3.7 Análise de incertezas

Devido à variabilidade inerente aos diversos componentes do sistema no que tange a tolerância de valores e os erros associados aos ganhos, faz-se necessário analisar qual é o efeito final dessas intercorrências nas variáveis de interesse. Assim, a presente Seção determina as incertezas propagadas a partir dos tacos instrumentados desenvolvidos. A metodologia utilizada está de acordo com o que é apresentado no GUM (2008).

Sabe-se que a incerteza padrão tipo B associada a uma grandeza a é calculada de acordo com a Equação (38).

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (38)$$

onde σ é a incerteza padrão do componente associada à tolerância e a é a grandeza analisada. O denominador $\sqrt{3}$ indica que a distribuição de probabilidade é retangular. No caso abordado aqui, a grandeza a nada mais é do que o valor nominal da variável em análise multiplicada pela tolerância apresentada.

Para considerar a incerteza propagada de todo o sistema, é utilizada a Equação (39) (considerando variáveis descorrelacionadas).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}, \quad (39)$$

onde $u_c(y)$ é a incerteza combinada e há o somatório do quadrado de todas as derivadas da função de transferência em relação às variáveis consideradas multiplicadas pelo quadrado das incertezas associadas a tais variáveis.

Assim, os dois grandes blocos do condicionamento, a saber a ponte de *Wheatstone*

e os estágios subsequentes de ganho, foram analisados em separado para determinar a incerteza total do sistema, estando os resultados na Seção 4.5.

3.7.1 Incerteza para a ponte de *Wheatstone*

Para desenvolver o sistema em questão, foram utilizadas três topologias de ponte de *Wheatstone* a fim de atender as necessidades do projeto. A definição da saída em tensão elétrica da ponte é dada de acordo com a Equação (13), vista na Seção 3.2.3.1. Portanto, fica evidenciado que as variações do valor dessa grandeza são provenientes das incertezas das resistências que compõem a ponte e da tensão elétrica de referência que a alimenta.

Antes de prosseguir para as diferentes topologias, faz-se uma análise sobre a incerteza individual dos componentes. A tolerância dos extensômetros não é especificada pela fabricante. Assim, optou-se por fixá-la em 1%. A partir desse valor e considerando a resistência nominal de 120Ω chega-se à incerteza padrão tipo B de $0,69\Omega$ para os extensômetros. Já a incerteza padrão tipo B considerada para a tensão elétrica de referência (REF3012, cujo valor nominal é $1,25V$) é $0,0025V$ de acordo com TI (2018). Ainda, foram utilizados resistores de 120Ω com 0,1% de tolerância para completar as pontes de *Wheatstone* quando necessário. Desta forma, sua incerteza padrão tipo B é definida em $0,069\Omega$.

Agora, é preciso considerar as 3 topologias utilizadas para estruturar as pontes de *Wheatstone*. A primeira delas é a clássica ponte completa, contando com 4 extensômetros ativos. Para facilitar a análise, serão analisadas as tensões dos braços em separado para destacar o efeito da incerteza. Portanto, a expressão que descreve

a saída dos lados da ponte em tensão elétrica é dada pela Equação (40).

$$V_a = V_b = V_{Ref} \frac{SG_4}{SG_1 + SG_4}, \quad (40)$$

sendo SG_i (com i de 1 a 4) a resistência dos extensômetros utilizados na construção da ponte em $[\Omega]$, V_{Ref} a tensão elétrica de referência em $[V]$ e $V_{a,b}$ a tensão elétrica nos braços.

Aplicando o descrito na Equação (39) à Equação (40), chega-se à Equação (41).

$$u_{V_a} = u_{V_b} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_a}{\partial V_{Ref}}\right)^2 u_{V_{Ref}}^2 + \sum_i^{1,4} \left(\frac{\partial V_a}{\partial SG_i}\right)^2 u_{SG_i}^2}, \quad (41)$$

onde $u_{V_{a,b}}$ é a incerteza combinada para a tensão dos braços da ponte completa em $[V]$, V_o é a saída da ponte completa em $[V]$, V_{Ref} a tensão elétrica de referência em $[V]$, SG_i a resistência dos extensômetros utilizados na construção da ponte em $[\Omega]$ e u_{SG_i} são as incertezas padrão associadas a cada um dos extensômetros em $[\Omega]$.

Considerando agora a meia-ponte com extensômetros na parte inferior, tem-se que na Equação (40) a expressão que descreve a tensão de saída de cada braço da ponte de *Wheatstone*.

$$V_a = V_b = V_{Ref} \frac{SG_1}{R_1 + SG_1}, \quad (42)$$

sendo SG_1 a resistência do extensômetro em $[\Omega]$, V_{Ref} a tensão elétrica de referência em $[V]$ e $V_{a,b}$ a tensão elétrica nos braços.

Aplicando-se a Equação (39) à Equação (42), chega-se à Equação (43) que descreve a incerteza combinada para a tensão elétrica dos braços da ponte de

Wheatstone.

$$u_{V_a} = u_{V_b} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_a}{\partial V_{Ref}}\right)^2 u_{V_{Ref}}^2 + \left(\frac{\partial V_a}{\partial SG_1}\right)^2 u_{SG_1}^2 + \left(\frac{\partial V_a}{\partial R_1}\right)^2 u_{R_1}^2}, \quad (43)$$

onde $u_{V_{a,b}}$ é a incerteza combinada para a saída dos braços da meia-ponte em [V], V_o é a saída da ponte completa em [V], V_{Ref} a tensão elétrica de referência em [V], SG_1 a resistência do extensômetro em [Ω] e u_{SG_1} é a incerteza padrão associada ao extensômetro em [Ω].

Avaliando-se a meia-ponte dupla, existem duas expressões distintas para descrever a tensão de saída dos braços da ponte. A Equação (44) descreve V_a .

$$V_a = V_{Ref} \frac{(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) + (SG_1 + SG_2)}, \quad (44)$$

sendo SG_i a resistência dos extensômetros em [Ω], R_i a resistência dos resistores em [Ω], V_{Ref} a tensão elétrica de referência em [V] e V_a a tensão elétrica no braço 'a'.

A Equação (45) descreve V_b .

$$V_b = V_{Ref} \frac{(R_3 + R_4)}{(R_3 + R_4) + (SG_3 + SG_4)}, \quad (45)$$

sendo SG_i a resistência dos extensômetros em [Ω], R_i a resistência dos resistores em [Ω], V_{Ref} a tensão elétrica de referência em [V] e V_b a tensão elétrica no braço 'b'.

3.7.2 Incertezas da cadeia de condicionamento

Similar à saída da ponte de *Wheatstone* - que possui uma incerteza associada à tolerância dos componentes envolvidos - a cadeia de condicionamento apresentará variabilidade relacionada aos ganhos envolvidos no processo. Assim, é preciso definir

a incerteza propagada gerada pelo ganho do INA826 e pelo ganho do filtro utilizados em cada um dos canais.

Para realizar a análise é necessário considerar a função de transferência para a saída em tensão da cadeia de condicionamento, de acordo com a Equação (27) vista na Seção 3.2.3.1. Desta forma, chegamos à Equação (46) que descreve a saída em tensão da cadeia de condicionamento em função da deformação e dos ganhos.

$$V_{o\ Condicionamento} = G_{INA826} G_{Filtro} V_{Ref} \frac{K}{C} \varepsilon + 2,5[V], \quad (46)$$

onde $V_{o\ Condicionamento}$ é a saída da cadeia de condicionamento em [V], G_{INA826} é o ganho atribuído pelo INA826, G_{Filtro} é o ganho atribuído pelo filtro, V_{Ref} é a tensão elétrica de referência em [V], K é o fator *gauge*, ε é a deformação aparente em $[\frac{m}{m}]$ e C é a constante que toma o valor de 2 caso haja meia-ponte simples ou meia-ponte dupla e de 1 caso haja ponte completa.

A combinação de ganhos afeta a sensibilidade da função de transferência que descreve a saída em tensão do sistema. Portanto, a análise de incerteza combinada será realizada considerando a Equação (47).

$$S_{V_{o\ Condicionamento}} = \frac{\partial V_{o\ Condicionamento}}{\partial \varepsilon} = G_{INA826} G_{Filtro} V_{Ref} \frac{K}{C} \left[\frac{V}{\varepsilon} \right], \quad (47)$$

onde se repetem as variáveis da Equação (46) e $S_{V_{o\ Condicionamento}}$ é a sensibilidade de saída do sistema em $[\frac{V}{\varepsilon}]$. Substituindo-se as expressões que descrevem o ganho para

os ganhos, chega-se à expressão final para a sensibilidade (Equação (48)).

$$S_{V_o \text{ Condicionamento}} = \left(1 + \frac{49,4k}{R_G}\right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) V_{Ref} \frac{K}{C} \left[\frac{V}{\varepsilon}\right], \quad (48)$$

onde as variáveis G_{INA826} e G_{Filtro} foram substituídas pelas expressões que as descrevem, R_G é a resistência em $[\Omega]$ utilizada para definir o ganho do INA826, R_1 e R_2 são as resistências em $[\Omega]$ que definem o ganho do filtro e C é uma constante que define o tipo de topologia considerado para a ponte de *Wheatstone*.

Aplicando o processo descrito pela Equação (39) à Equação (48), chega-se à expressão descrita na Equação (49).

$$\begin{aligned} u_{S_{V_o \text{ Condicionamento}}}^2 &= \frac{K^2 u_{V_{Ref}}^2 (R_1 + R_2)^2 (R_G + 49,4k)^2}{C^2 R_1^2 R_G^2} + \frac{V_{Ref}^2 K^2 u_{R_2}^2 (R_G + 49,4k)^2}{C^2 R_1^2 R_G^2} \\ &+ \frac{2,44 \cdot 10^9 V_{Ref}^2 K^2 u_{R_G}^2 (R_1 + R_2)^2}{C^2 R_1^4 R_G^4} + \frac{V_{Ref}^2 K^2 R_2^2 u_{R_2}^2 (R_G + 49,4k)^2}{C^2 R_1^4 R_G^2} + \frac{V_{Ref}^2 u_K^2 (R_1 + R_2)^2 (R_G + 49,4k)^2}{C^2 R_1^2 R_G^2}, \end{aligned} \quad (49)$$

onde $u_{S_{V_o \text{ Condicionamento}}}$ refere-se à incerteza associada à sensibilidade do condicionamento em $\left[\frac{V}{\varepsilon}\right]$, $u_{V_{Ref}}$ é a incerteza associada à tensão elétrica de referência utilizada, u_{R_i} refere-se à incerteza associada às resistências utilizadas em $[\Omega]$ e u_K refere-se à incerteza associada ao fator *gauge* dos extensômetros.

3.8 Ensaios de validação com voluntários

A fim de validar o sistema com a presença do movimento de pedalada, elaborou-se um protocolo de ensaios a ser realizado dentro do laboratório IEE-Bio com o auxílio de um rolo de treinamento fixo com sistema de frenagem magnética (Btwin IN'Ride

300), com registro no CEP de número 1253312.8.0000.5347. O protocolo proposto considera 20 ensaios distintos para cada voluntário de 60 segundos com a cadência alvo de 60RPM. Foi estipulado um período inicial de 15 segundos até que o voluntário pudesse atingir a cadência alvo, ocorrendo a extração de características de um excerto de 30 segundos centrado na metade do período de cada uma das rodadas. Tal decisão foi tomada a fim de evitar a captação de artefatos relacionados à ascensão de ritmo do participante até a cadência alvo de 60RPM e de perda de eficiência devido à fadiga ao final do tempo estipulado.

Um computador de bordo é encarregado de dispor a cadência atual ao participante. O nível de frenagem magnética foi mantido no mínimo. Foram utilizadas duas relações de marcha distintas: 34x12 (mais leve) e 50x12 (mais pesada). Desta forma, são considerados 3 fatores controláveis: modelo de célula de carga, relação de marcha e voluntário.

O grupo de voluntários consiste de 3 sujeitos com idades de 25, 26 e 27 anos, massa corporal de 60kg, 97kg e 65kg e estatura de 1,69m, 1,83m e 1,81m, respectivamente. Dois deles são ciclistas esporádicos e um pedala ao menos 100km por semana. Todos os três participantes são destros.

A preparação dos voluntários para os ensaios passa pelo seguinte processo:

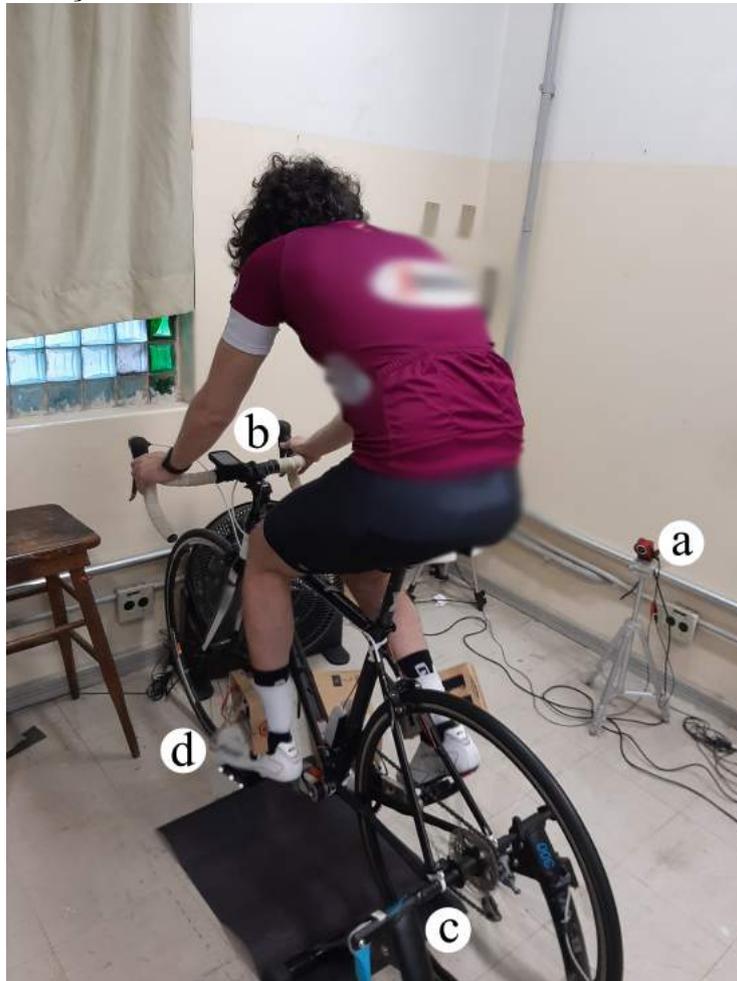
- Ajuste da altura do banco para oferecer mais conforto ao participante do ensaio;
- Fixação das placas de condicionamento e de aquisição na região do tornozelo em ambas as pernas;
- As sapatilhas, já contendo os tacos instrumentados e previamente presas aos pedais, são calçadas pelo ciclista com o auxílio do operador do ensaio;

- Os cabos de conexão das células de carga são conectados às placas.

Estando o participante preparado para a realização do ensaio, uma rotina preparada em *LabVIEW*TM emite um sinal sonoro que indica o início da realização dos ensaios. Tal sinal é encadeado a partir do recebimento de um pacote via *XBee* que indica o começo de uma aquisição. Ao término do tempo do ensaio, outro sinal sonoro é emitido correspondendo ao final da rodada. Novamente, o evento ocorre a partir do recebimento de um pacote via *XBee* que indica o fim de uma aquisição.

A Figura 50 apresenta um dos voluntários preparado para a realização de uma rodada de ensaios. É possível observar a disposição de parte das câmeras que compõem o sistema de cinematria. Com os dados provenientes desse equipamento, é possível determinar a posição angular do conjunto pedal-pedivela ao longo do movimento.

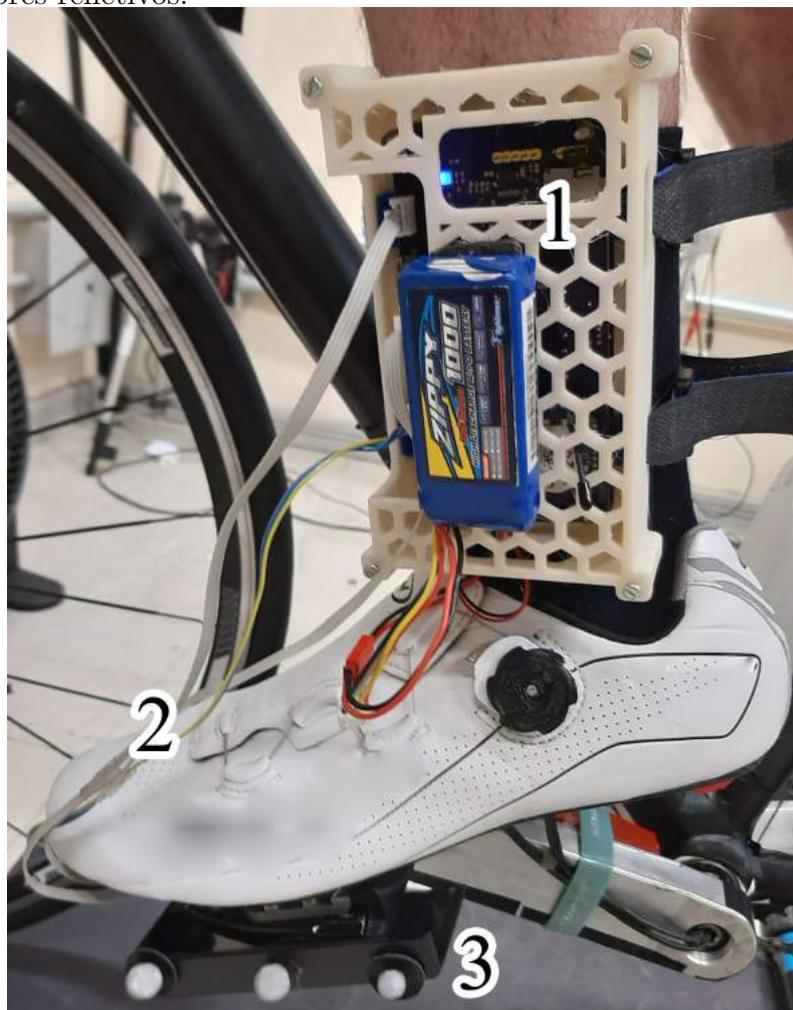
Figura 50 – Momento da realização de um dos ensaios. a) Câmera (número 5) do sistema de cinemetria; b) Ciclocomputador; c) Rolo de treinamento; d) Conjunto do sistema de medição desenvolvido.



Fonte: Elaboração própria.

Já a Figura 51 mostra o pedal esquerdo com todos os componentes em detalhe.

Figura 51 – Detalhe do sistema já preparado para o ensaio. 1) Placas e bateria; 2) Cabos de conexão da célula de carga; 3) Conjunto da célula de carga, do pedal e dos marcadores refletivos.



Fonte: Elaboração própria.

3.9 Análise estatística

Para que os ensaios fossem analisados do ponto de vista estatístico, foi elaborado um projeto de experimentos do tipo bloco aleatorizado. A partir das variáveis de resposta escolhidas, pôde-se realizar um teste de hipóteses considerando a Análise de Variância (ANOVA). A relação de fatores controláveis, de variáveis de resposta e de hipóteses é vista na Tabela 19.

Para conduzir as análises, foi utilizado o *software* Minitab 19, sendo verificada

Tabela 19 – Parâmetros utilizados na ANOVA.

Fatores Controláveis	Voluntários (3 níveis)
	Tipo de Peça (2 níveis)
	Relação de Marchas (2 níveis)
Variáveis de Resposta	Força Resultante Média
	Força Efetiva Média
	Potência Efetiva Média
	Assimetria Bilateral Média
Hipóteses	H_0 - A variável de resposta não é significativa
	H_1 - A variável de resposta é significativa

a normalidade dos dados por meio da observação dos resíduos. Como hipóteses específicas, devido às características do sistema, esperava-se que os fatores controláveis "voluntários" e "relação de marchas" fossem significativos e que o fator "tipo de peça" fosse não-significativo, atestando a existência de intercambialidade entre os modelos de célula de carga desenvolvidos.

Os fatores controláveis foram selecionados a partir da situação do aparato experimental, do conhecimento prévio sobre o comportamento teórico das variáveis de resposta e da condição dos voluntários selecionados para a realização dos ensaios.

O aparato experimental contava apenas com duas relações de marchas funcionais: 50x12 (pesada) e 34x12 (leve). Mesmo havendo a possibilidade de utilizar a frenagem magnética do rolo de treinamento como fator controlável, optou-se por manter fixo tal fator controlável já que não há documentação sobre a gradação da frenagem imposta.

O fator controlável "voluntários" surge a partir do conhecimento prévio de que os voluntários são diferentes entre si principalmente no que tange a estatura e a técnica de pedalada. Assim, era esperado que os níveis influenciassem as nuances

dos esforços aplicados.

Já o fator "tipo de peça" surge da hipótese de que as peças devem mensurar as mesmas variáveis, estando definidas de maneira similar os esforços e as variáveis derivadas de tais resultados (potência, assimetria bilateral etc).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

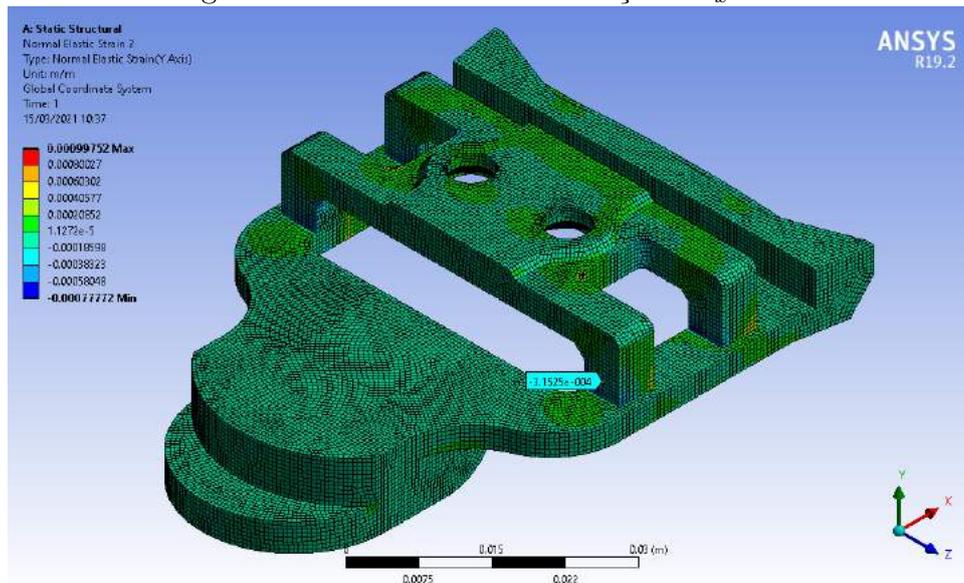
Nesta seção, serão analisados os resultados de simulação, de calibração e de validação do sistema proposto. Vale ressaltar que a comparação com trabalhos anteriores se dá em termos mais gerais, já que há diferenças consideráveis no que tange os protocolos de ensaios diferentes, enfoque dos estudos de caso, entre outros.

4.1 Resultados das análises estática e dinâmica dos modelos virtuais

Como já discutido na Seção 3.1.3, foram conduzidas simulações a fim de estimar as deformações aparentes sofridas pelas células de cargas desenvolvidas a partir da aplicação de esforços. Assim, foram programados os esforços puros a serem aplicados, sendo eles $500N$ nos eixos frontal e lateral e $1000N$ no eixo perpendicular. Ainda, foram também aplicados momentos com valor de $15Nm$ em cada um dos eixos.

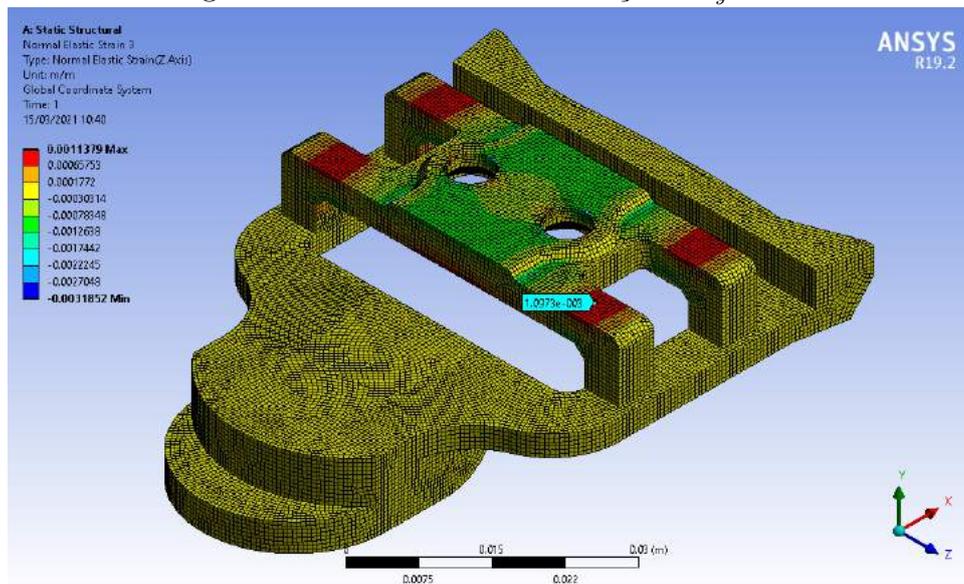
Considerando a célula de carga com 3 graus de liberdade, o foco de análise das deformações aparentes são as estruturas em "L". Ao observar as Figuras 52, 53 e 54 pode-se estimar as deformações médias para a região de cimentação dos extensômetros. Desta forma, a deformação estimada para o eixo frontal (x) é $315,31\mu\varepsilon$, para o eixo perpendicular (y) é $1099,30\mu\varepsilon$ e para o momento no eixo frontal (Mx) é $400,19\mu\varepsilon$. Vale notar que os extensômetros do eixo lateral sofrem ação quando há aplicação de força perpendicular. Contudo, a topologia escolhida para a ponte de *Wheatstone* cancela deformações de mesmo sinal. Assim, mantém-se sua sensibilidade apenas para o eixo lateral.

Figura 52 – Resultado de simulação - F_x 3DoF.

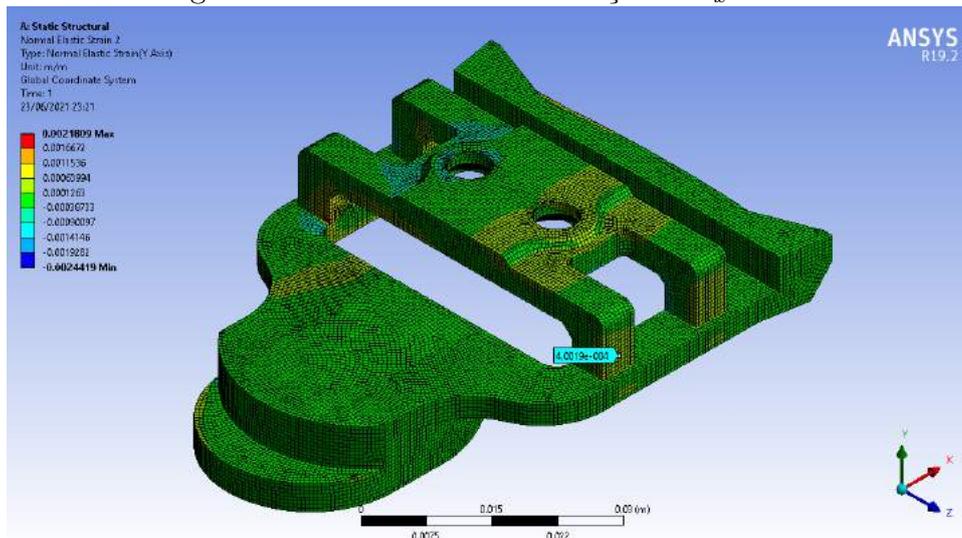


Fonte: Elaboração própria.

Figura 53 – Resultado de simulação - F_y 3DoF.



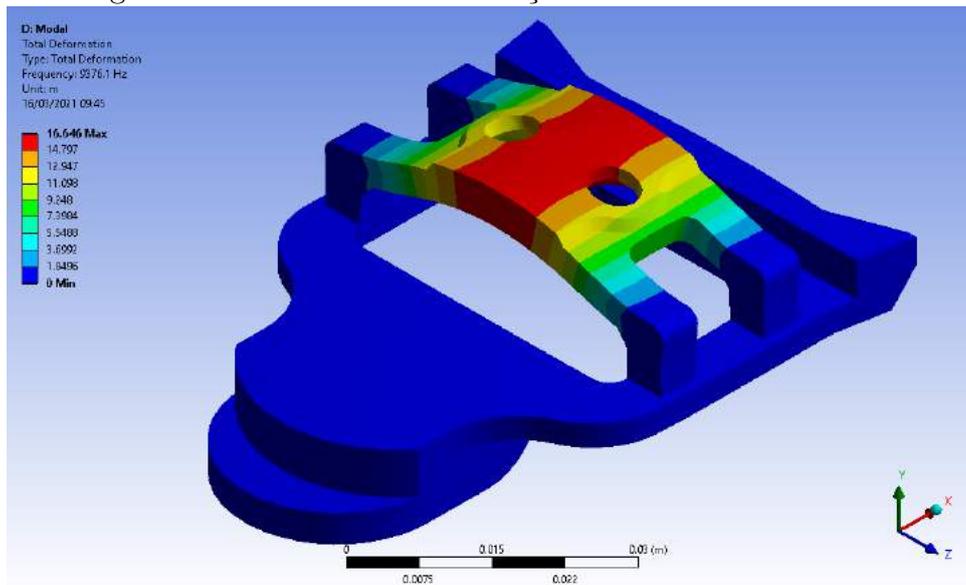
Fonte: Elaboração própria.

Figura 54 – Resultado de simulação - M_x 3DoF.

Fonte: Elaboração própria.

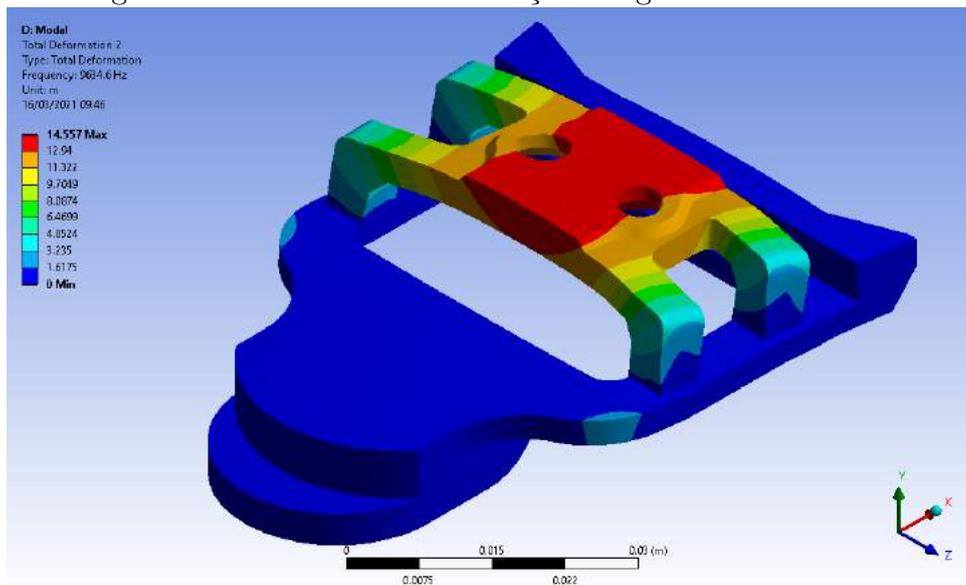
A simulação dinâmica da célula com 3 graus de liberdade revelou que o primeiro modo de vibração, ou seja, o mais pronunciado, se encontra em $9376,1 Hz$ - valor muito maior do que a faixa de frequência dos esforços que serão aplicados ($3 Hz$). Assim, infere-se que interferências mecânicas causadas pelos modos de vibração não serão um empecilho para o bom funcionamento do sistema. As Figuras 55 a 57 ilustram quais são os 3 primeiros modos naturais de oscilação e qual seria o comportamento da peça caso as condições de frequência de vibração fossem atingidas.

Figura 55 – Resultado de simulação - Primeiro modo 3DoF.



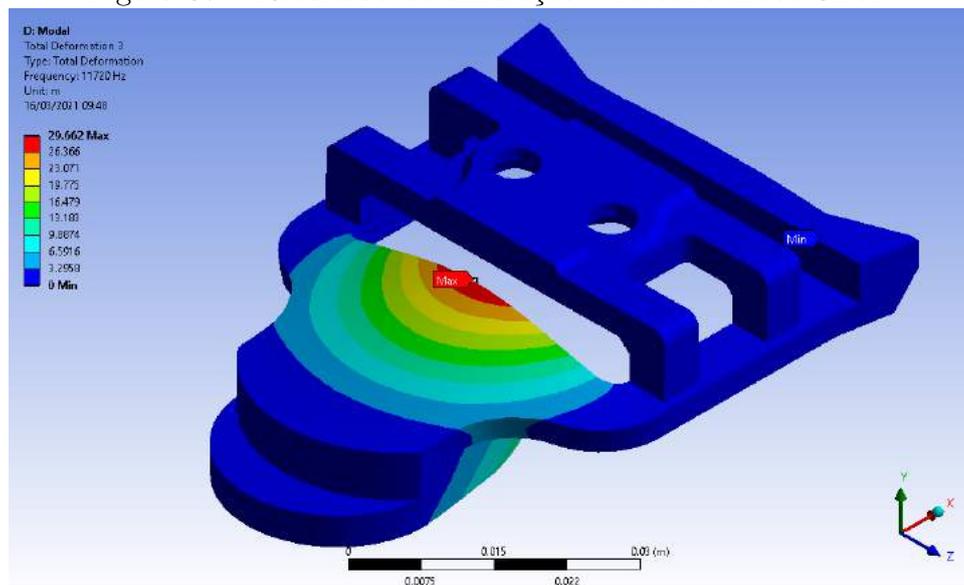
Fonte: Elaboração própria.

Figura 56 – Resultado de simulação - Segundo modo 3DoF.



Fonte: Elaboração própria.

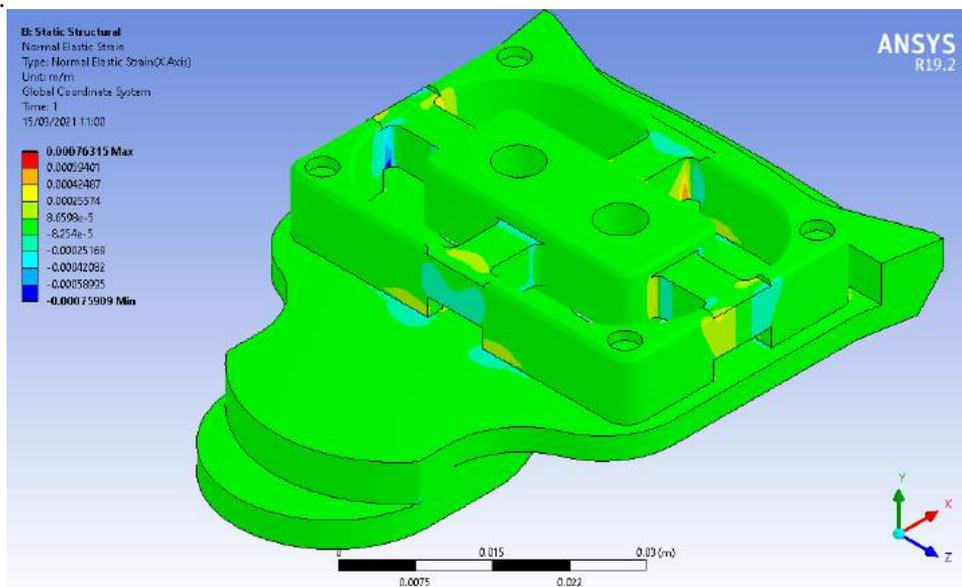
Figura 57 – Resultado de simulação - Terceiro modo 3DoF.



Fonte: Elaboração própria.

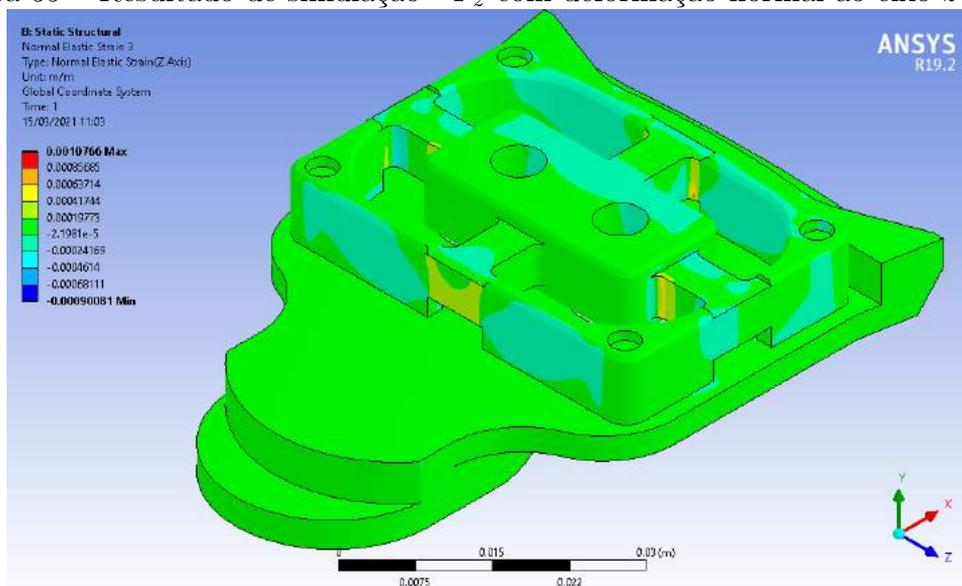
Considerando a célula de carga com 6 graus de liberdade, o foco de análise foram as vigas que ligam o anel exterior do elemento sensível ao centro da estrutura. Nas Figuras 58 e 59 é possível observar as deformações aparentes normais aos eixos selecionados causadas pela aplicação de força em x . Nota-se que os resultados mais importantes são observados nas vigas paralelas ao eixo z , com valores que chegam na casa dos $220\mu\varepsilon$. Isto ocorre porque a tendência gerada pela força aplicada em x é de movimento ao longo desse mesmo eixo, levando à sollicitação das estruturas perpendiculares ao esforço.

Figura 58 – Resultado de simulação - F_x eixo com deformação normal ao eixo x 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 59 – Resultado de simulação - F_z com deformação normal ao eixo z 6DoF.

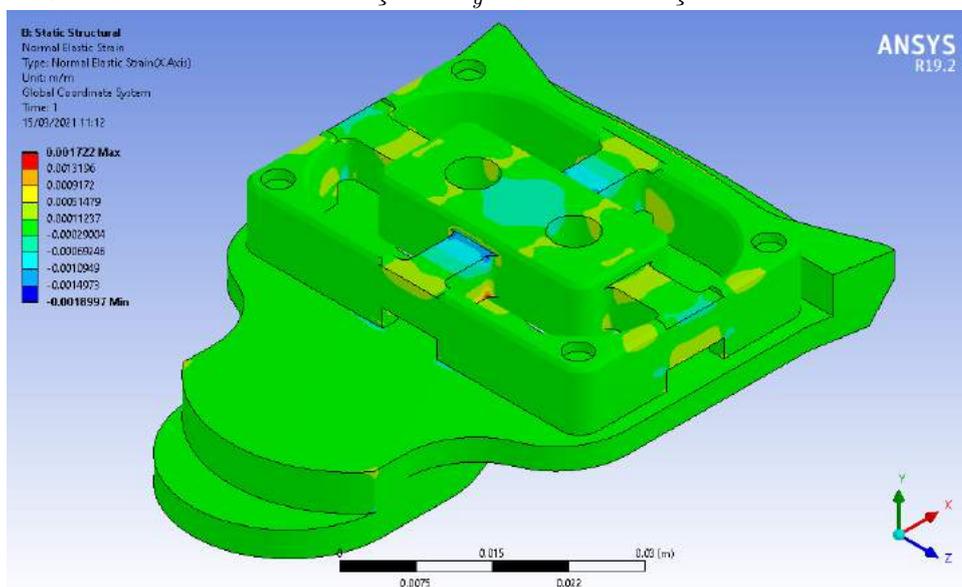


Fonte: Elaboração própria.

Com relação à força aplicada em y , os resultados são observados nas Figuras 60 e 61. Nota-se que, diferentemente do caso relatado para F_x , há a solicitação de todas as vigas - já que a aplicação de força é perpendicular a todas elas. Os valores de deformação registrados atingem cerca de $825\mu\epsilon$, proporcionando alta sensibilidade

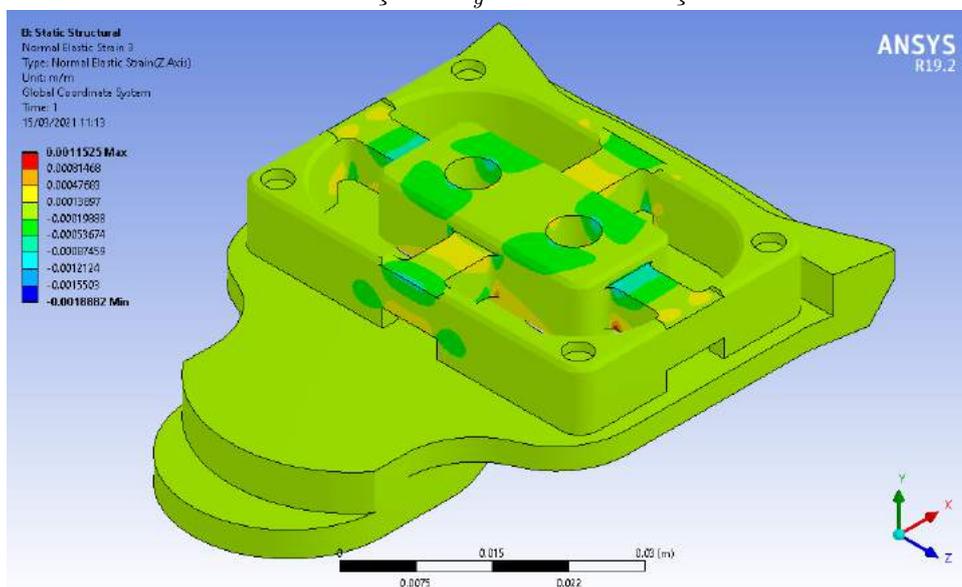
para essa direção de aplicação de esforços.

Figura 60 – Resultado de simulação - F_y com deformação normal ao eixo x 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 61 – Resultado de simulação - F_y com deformação normal ao eixo z 6DoF.

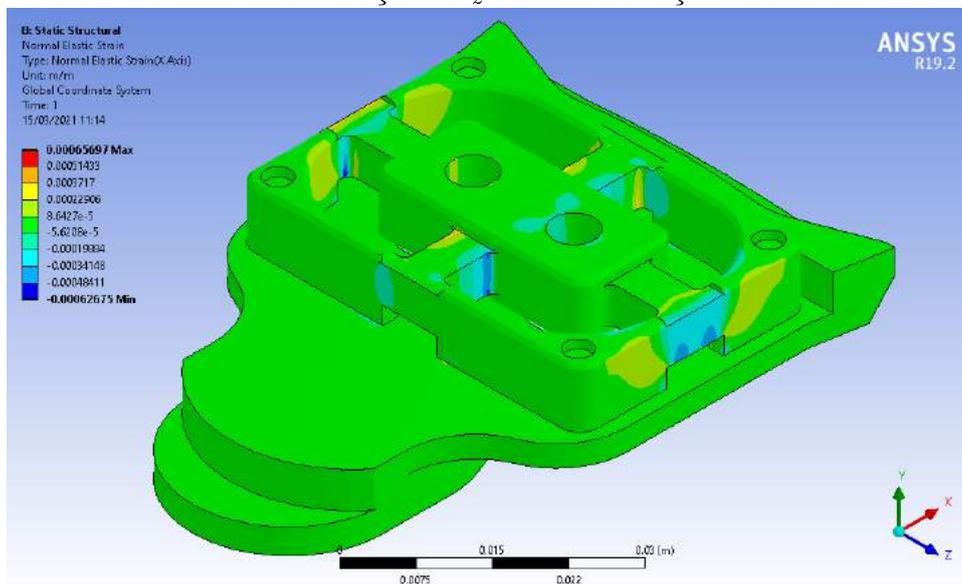


Fonte: Elaboração própria.

Considerando a força aplicada em z , é possível observar que as vigas mais solicitadas agora são as paralelas ao eixo x (Figuras 62 e 63), com valores de deformação atingindo a casa dos $220\mu\epsilon$. Tal fato ocorre devido a efeito semelhante

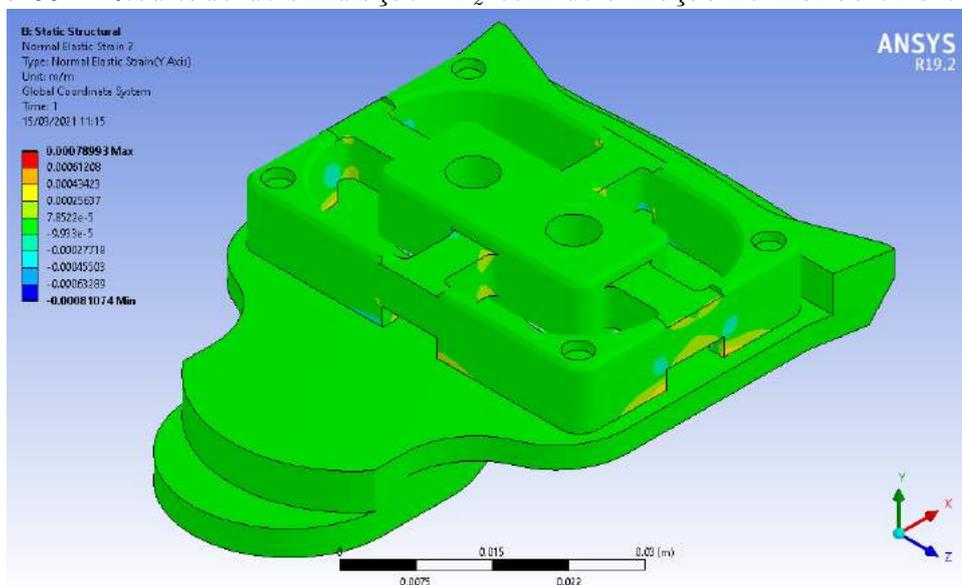
ao observado na aplicação de F_x : as vigas solicitadas são sempre as perpendiculares ao eixo de aplicação de força.

Figura 62 – Resultado de simulação - F_z com deformação normal ao eixo x 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 63 – Resultado de simulação - F_z com deformação normal ao eixo z 6DoF.

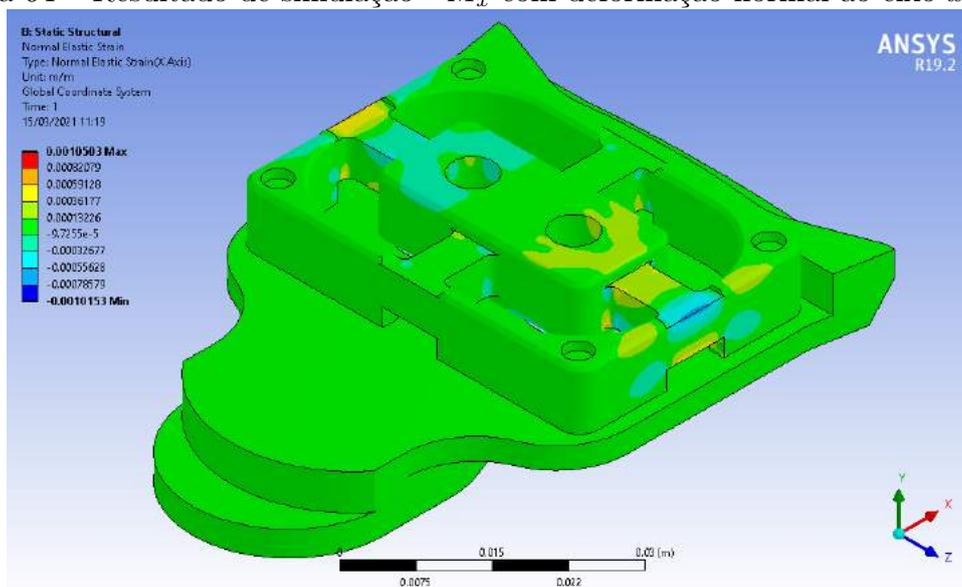


Fonte: Elaboração própria.

O diferencial da célula de 6 graus de liberdade é a possibilidade de mensurar os momentos aos quais a peça é exposta. Assim, foram simulados os casos para os momentos nos 3 eixos de interesse.

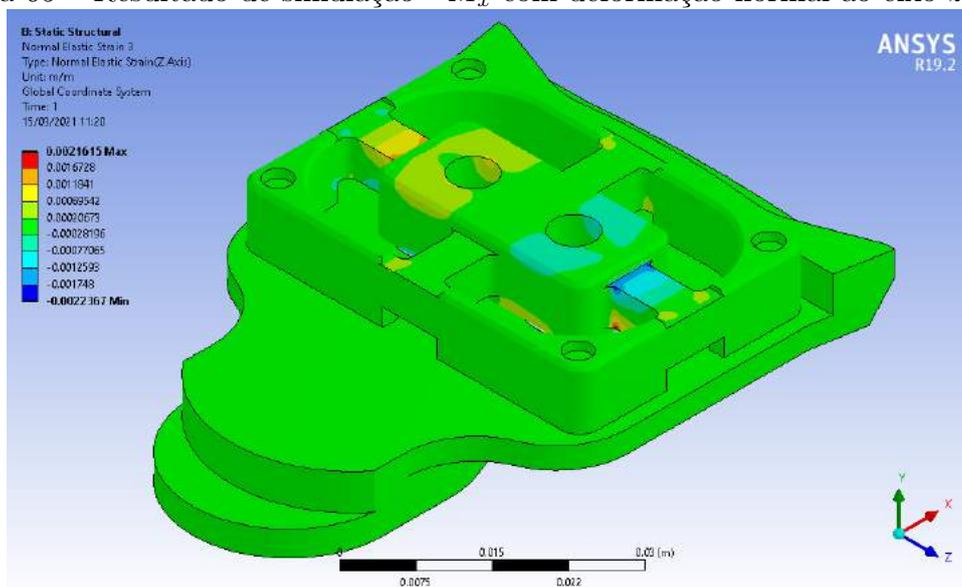
Considerando a aplicação de momento ao eixo x , é possível observar os resultados nas Figuras 64 e 65. Observe como as vigas solicitadas são, novamente, perpendiculares ao eixo de aplicação do momento. Contudo, os valores de deformação são quase 5 vezes maiores do que os registrados para a aplicação de força: agora, ficam na casa dos $960\mu\varepsilon$.

Figura 64 – Resultado de simulação - M_x com deformação normal ao eixo x 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

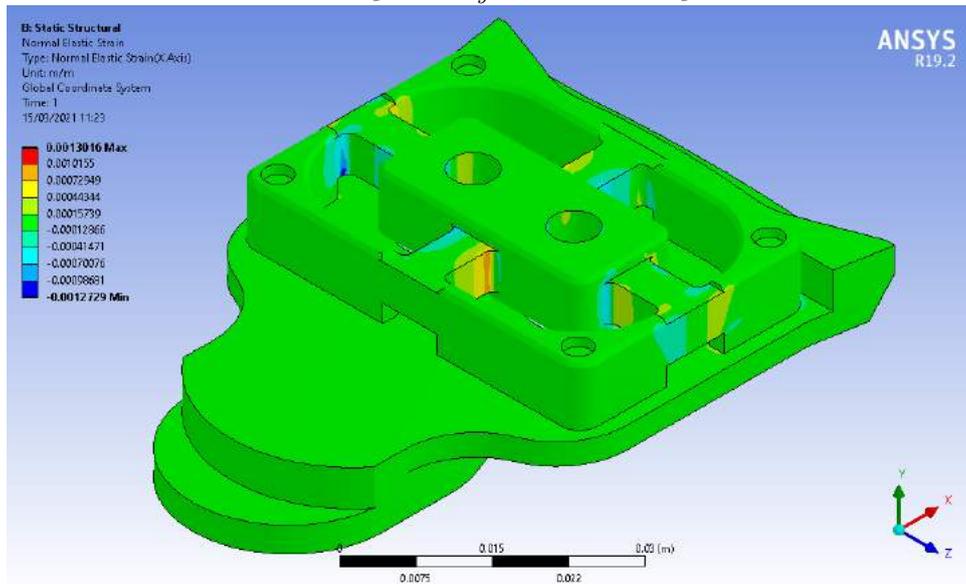
Figura 65 – Resultado de simulação - M_x com deformação normal ao eixo z 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

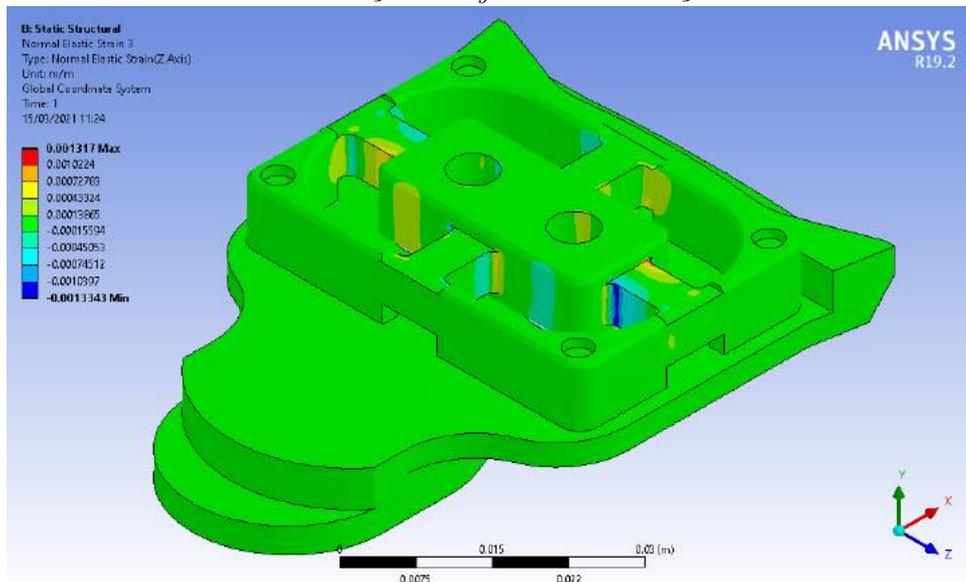
Quando da aplicação de momento ao eixo y (Figuras 66 e 67), observa-se que as vigas solicitadas são perpendiculares à direção de aplicação. Contudo, como há o envolvimento das 4 vigas no processo, as deformações observadas não apresentam diferenças substanciais em relação ao que fora observado na aplicada de F_y . Agora, os valores para a deformação aparente máxima ficam na casa dos $600\mu\varepsilon$.

Figura 66 – Resultado de simulação - M_y com deformação normal ao eixo x 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

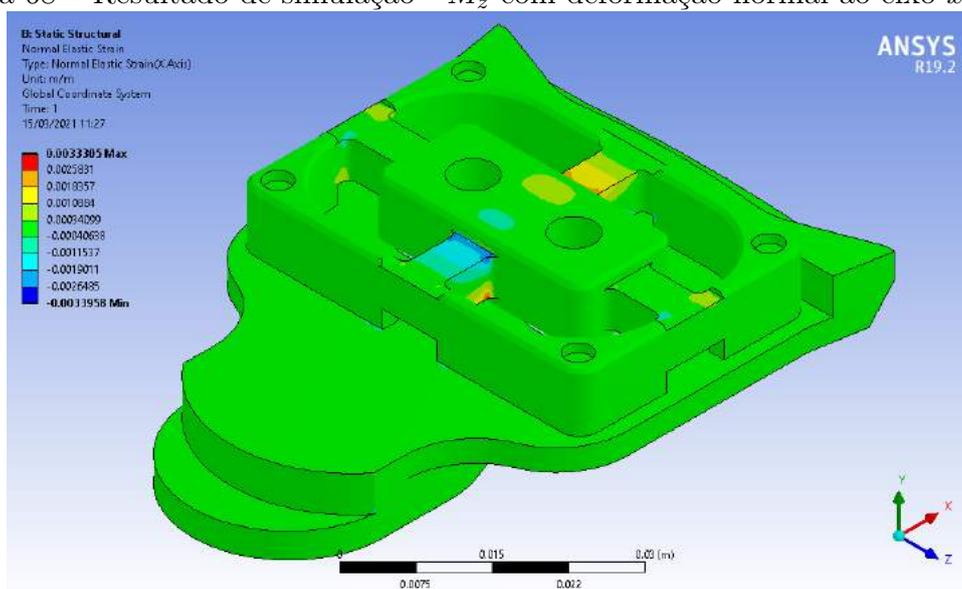
Figura 67 – Resultado de simulação - M_y com deformação normal ao eixo z 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

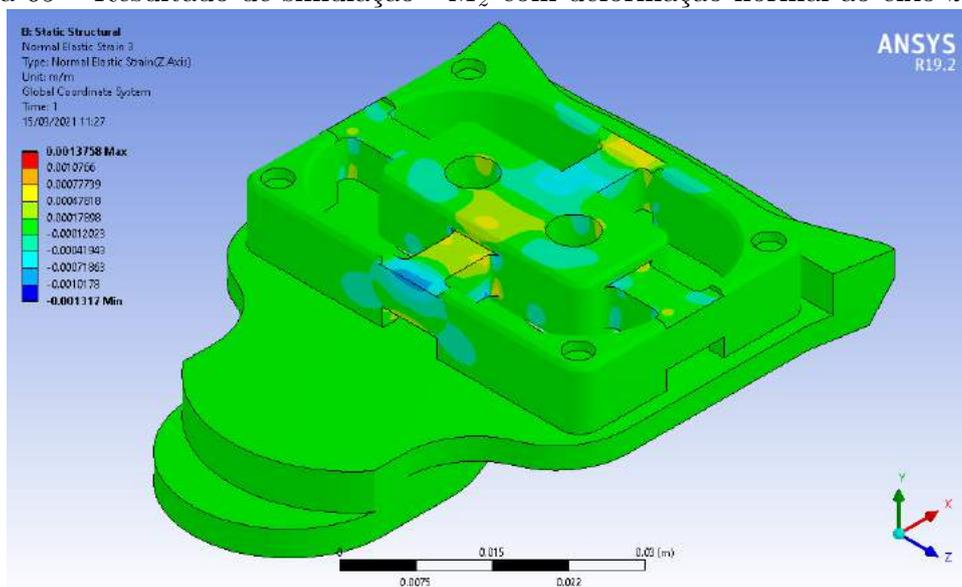
A aplicação de momento em z (Figuras 69 e 69) segue a mesma tendência vista na aplicação de momento em x , ocorrendo deformação consideravelmente maior do que no caso de aplicação de força no mesmo eixo para as mesmas vigas analisadas. Neste caso, a deformação aparente máxima detectada gira em torno dos $1500\mu\epsilon$, demonstrando que há sensibilidade acentuada para a aplicação de tal esforço.

Figura 68 – Resultado de simulação - M_z com deformação normal ao eixo x 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 69 – Resultado de simulação - M_z com deformação normal ao eixo z 6DoF.

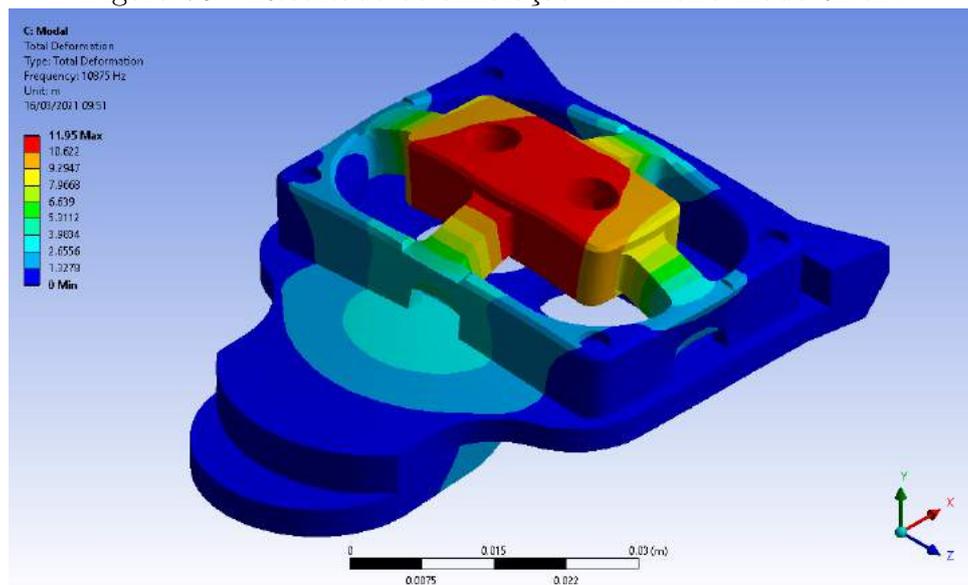


Fonte: Elaboração própria.

Vale ressaltar que o eixo y não é a direção principal de deformação de nenhum dos extensômetros e por isso não consta nas figuras.

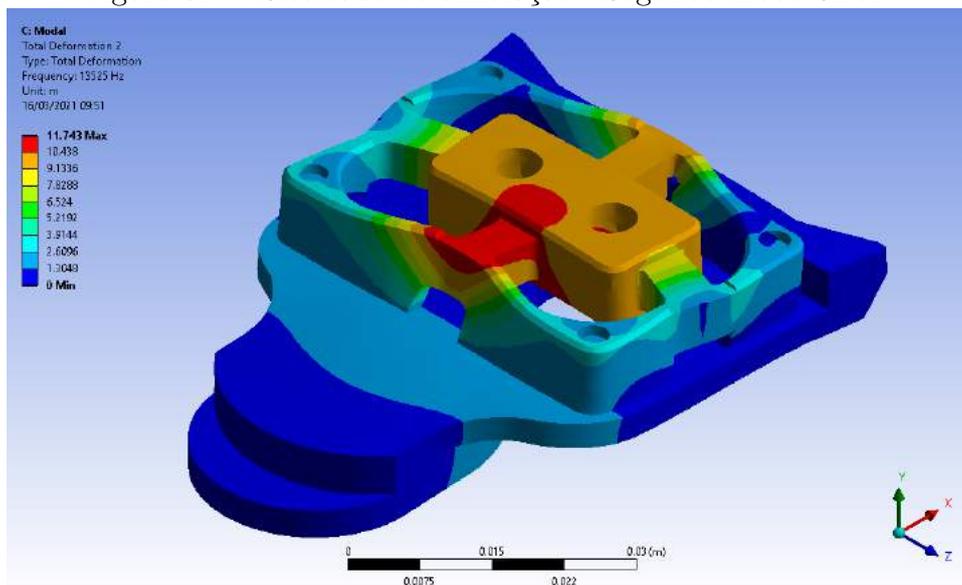
Já os resultados da simulação dinâmica mostraram que o primeiro modo de oscilação para a peça com 6 graus de liberdade é a frequência de $10.875Hz$. Desta forma, como já observado na peça com 3 graus de liberdade, o primeiro modo é localizado em uma frequência muito superior à exercida pela aplicação de esforços, não apresentando risco para o bom funcionamento do sistema. As Figuras 70 a 72 mostram os valores de frequência e o comportamento das estruturas caso as premissas de vibração se confirmassem.

Figura 70 – Resultado de simulação - Primeiro modo 6DoF.



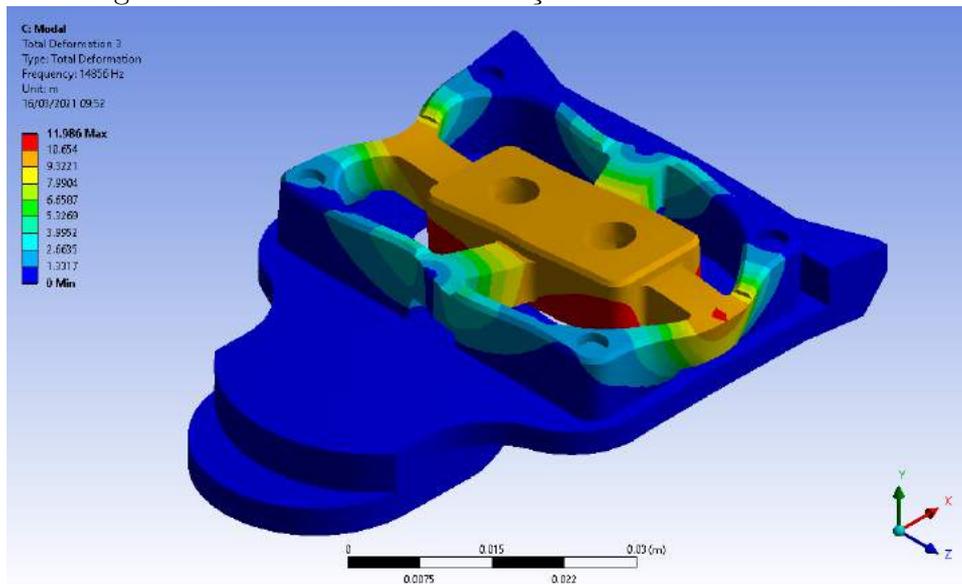
Fonte: Elaboração própria.

Figura 71 – Resultado de simulação - Segundo modo 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 72 – Resultado de simulação - Terceiro modo 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Funções de Transferência Experimentais de Deformação

A calibração estática das peças seguiu o protocolo descrito na Seção 3.4. Os dados obtidos foram compilados utilizando o MATLAB[®] R2016b a fim de serem realizadas as regressões lineares para determinação das funções de transferência experimentais.

Vale ressaltar que novos ganhos foram atribuídos ao INA826 após verificação de não cumprimento da premissa de fundo de escala do sistema ser observada - alguns canais foram e outros ficaram abaixo do limite estipulado. Portanto, a fim de melhor adequar os valores, novos resistores R_G foram escolhidos e estão dispostos nas Tabelas 20, 21 e 22.

Tabela 20 – Ganhos corrigidos - INA826 - 3DoF.

Eixo	G_{Total}	G_{INA}	$R_G (\Omega)$
Frontal (x) - Pé Direito	2594,18	259,42	191,18
Perpendicular (y) - Pé Direito	1616,54	161,65	307,49
Momento frontal (Mx) - Pé Direito	2629,14	262,91	188,61
Frontal (x) - Pé Esquerdo	2534,12	253,41	210,75
Perpendicular (y) - Pé Esquerdo	1797,5	179,75	276,36
Momento frontal (Mx) - Pé Esquerdo	2256,55	225,66	219,89

Tabela 21 – Ganhos corrigidos - INA826 - 6DoF Direito.

Pontes	G_{Total}	G_{INA826}	$R_G(\Omega)$
Z1	4835,19	483,52	102,38
Z2	3985,3	398,53	124,27
Z3	1875,85	187,58	264,76
Z4	1196,25	119,62	416,44
Z5	2132,15	213,21	232,78
Z6	2495,35	249,53	198,76
Z7	2258,31	225,83	219,72
Z8	2348,82	234,88	211,22

Devido aos problemas de acesso ao laboratório, não houve a possibilidade de realizar a calibração estática considerando a deformação aparente dos extensômetros utilizando placas de aquisição voltadas à extensometria - no caso, seria utilizada a DAQ NI-9237 da *National Instruments*. Portanto, foi considerada a simulação de

Tabela 22 – Ganhos corrigidos - INA826 - 6DoF Esquerdo.

Pontes	G_{Total}	G_{INA826}	$R_G(\Omega)$
Z1	4925,44	492,54	100,50
Z2	4646,33	464,63	106,55
Z3	2007,38	200,74	247,32
Z4	1215,83	121,58	409,68
Z5	1956,41	195,64	253,80
Z6	2500,41	250,04	198,36
Z7	2101,41	210,14	236,20
Z8	2949,27	294,93	168,07

elementos finitos realizada no ANSYS 19 para fim de determinação dos ganhos. A aquisição foi feita pelo conversor analógico-digital ADS1256 existente na placa desenvolvida para o trabalho.

A diferença entre ganhos estimados e ganhos reais é atribuída a diversos fatores. Quando da simulação estática, foi realizada uma estimativa do comportamento dos engastes diante da aplicação de cargas que não necessariamente se reflete na prática já que o engaste da máquina de calibração não é perfeito. Também, existem diferenças entre o modelo virtual e a peça fabricada, os quais levam a discrepâncias de deformação não previstas pelo método de elementos finitos utilizado no ANSYS 19. Ainda, fatores ambientais (temperatura, pressão e umidade), mecânicos (posicionamento dos extensômetros e comportamento do material não-ideais, além da complexidade dos modelos virtuais) e elétricos (variação relacionada aos componentes utilizados) desempenham papel importante nessas disparidades (HOFFMANN, 1989).

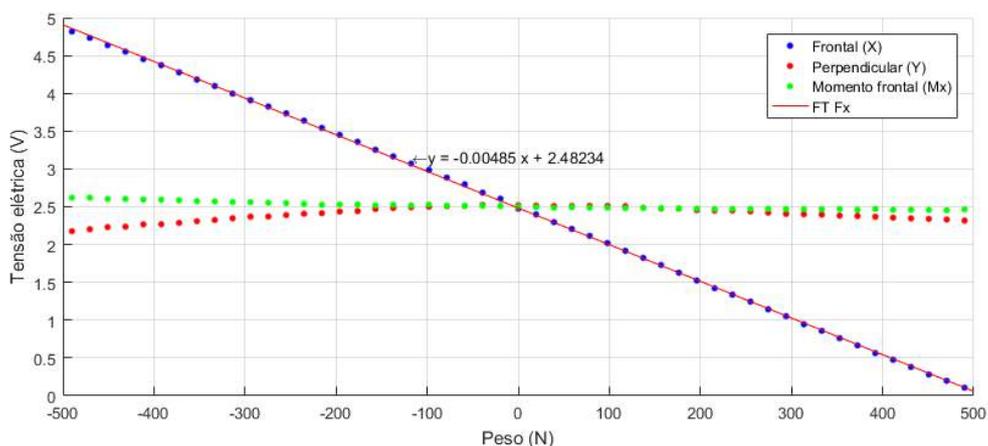
Uma das premissas para a modelagem (principalmente da célula de carga com 3 graus de liberdade) foi o desacoplamento dos eixos. Como já discutido, diferenças

existentes em relação aos aspectos mecânicos da simulação e do modelo real podem comprometer os resultados obtidos. Contudo, como será discutido, houve resultado satisfatório quanto a esse quesito.

4.2.1 Célula de carga com 3 graus de liberdade

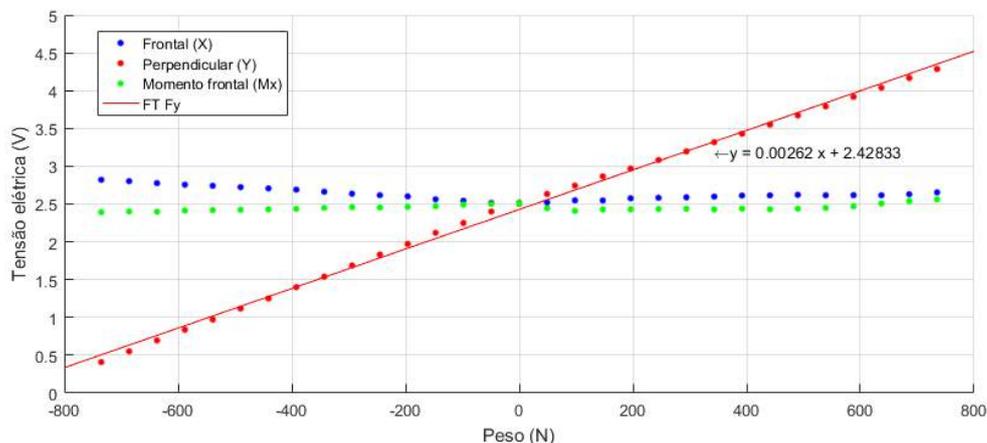
Os resultados da calibração estática relativa à peça destinada ao pé direito estão dispostos nas Figuras 73 a 75. Para o pé esquerdo, os dados são mostrados nas Figuras 76 a 78. Nos gráficos, é possível observar a saída das três pontes existentes e a regressão feita a partir da variável de calibração.

Figura 73 – Função de transferência experimental - Fx - Pé direito.



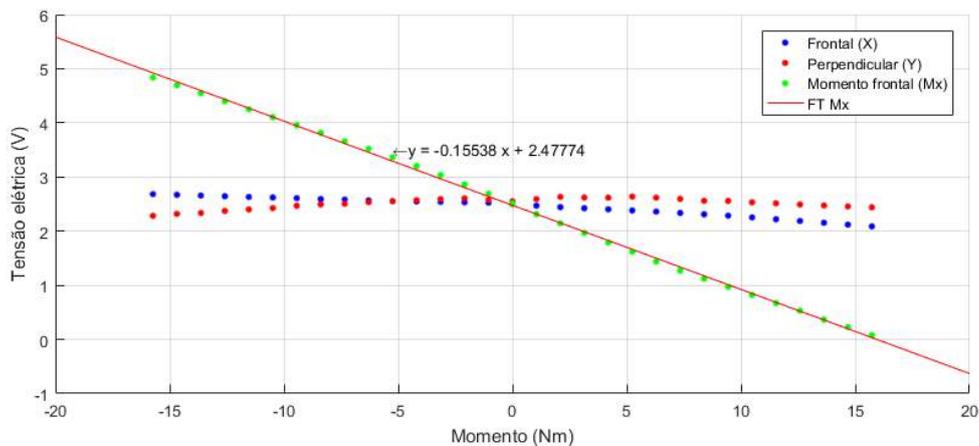
Fonte: Elaboração própria.

Figura 74 – Função de transferência experimental - Fy - Pé direito.



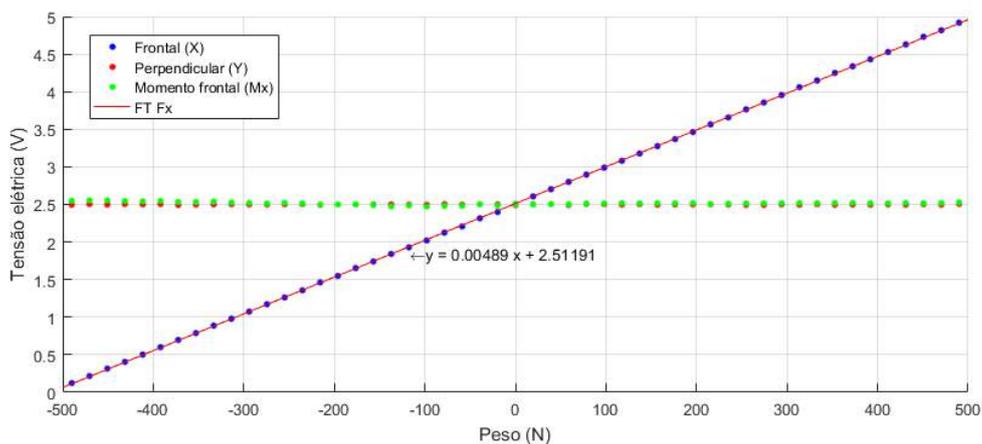
Fonte: Elaboração própria.

Figura 75 – Função de transferência experimental - Mx - Pé direito.



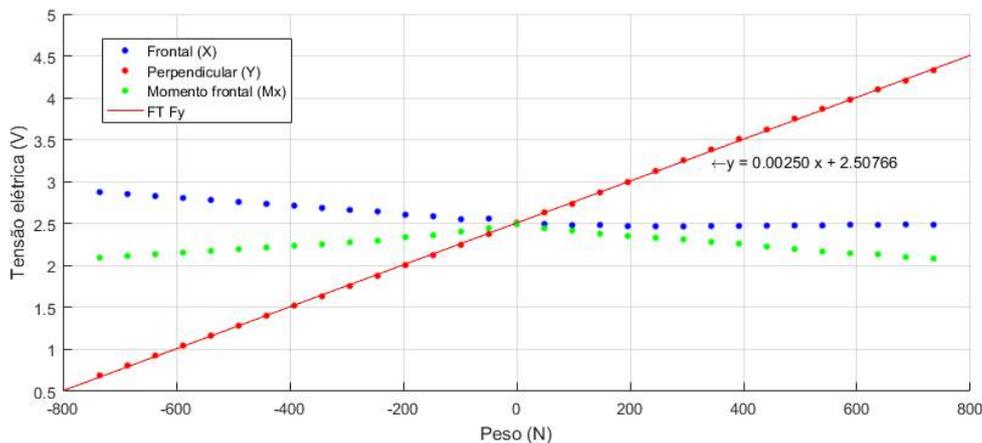
Fonte: Elaboração própria.

Figura 76 – Função de transferência experimental - Fx - Pé esquerdo.



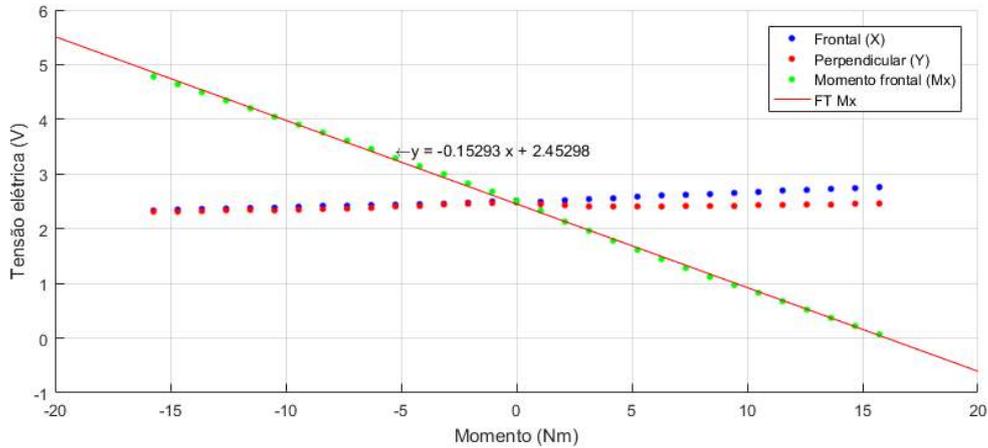
Fonte: Elaboração própria.

Figura 77 – Função de transferência experimental - Fy - Pé esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 78 – Função de transferência experimental - Mx - Pé esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

Destaca-se, da análise dos gráficos, que não foi respeitada a premissa de desacoplamento perfeito entre os eixos. Deve-se este comportamento a uma série de fatores dos quais dependem as respostas das pontes de *Wheatstone* implementadas. O principal deles é o posicionamento dos extensômetros: como as topologias de ponte dependem da simetria de deformações para manter seu equilíbrio diante de esforços em outros eixos, qualquer desvio na cimentação dos sensores gera um acoplamento indesejado. Também é importante lembrar que o engaste utilizado não é ideal, ao contrário do engaste simulado. Este fato incorre a movimentos indesejados que se manifestam, posteriormente, em desequilíbrio da ponte utilizada. Mesmo assim, o nível de interação entre os eixos foi considerado aceitável.

De posse das regressões, pode-se então calcular o erro de linearidade para cada uma das funções de transferências encontradas. Tal erro é calculado de acordo com a Equação (50) e expressa quantitativamente o desvio da curva de calibração.

$$Linearidade(\%) = \frac{\pm Dif_{Max}}{FSS}, \quad (50)$$

em que Dif_{Max} é a maior diferença entre os pontos e a curva obtidos e FSS é o fundo de escala superior do sistema.

Também é determinada a sensibilidade para cada uma das funções de transferência por meio da Equação (51). A sensibilidade nos indica a inclinação da curva de calibração.

$$Sensibilidade = \frac{\partial FT}{\partial x}, \quad (51)$$

em que FT é a função de transferência encontrada e x é a força F em $[N]$ ou o momento M em $[Nm]$.

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos para ambas as peças.

Tabela 23 – Funções de transferência experimentais - 3DoF.

Eixo	FT (V)	Sens.	$\varepsilon_{Lin.}$ (%)
Frontal (x) - Dir.	$-0,00485 \cdot F + 2,48234$	$-4,85 \frac{mV}{N}$	0,86
Perpendicular (y) - Dir.	$0,00262 \cdot F + 2,42833$	$2,62 \frac{mV}{N}$	2,35
Momento frontal (Mx) - Dir.	$-0,15538 \cdot M + 2,47774$	$-0,15 \frac{mV}{Nm}$	1,64
Frontal (x) - Esq.	$0,00489 \cdot F + 2,51191$	$4,89 \frac{mV}{N}$	0,34
Perpendicular (y) - Esq.	$0,00250 \cdot F + 2,50766$	$2,50 \frac{mV}{N}$	0,50
Momento frontal (Mx) - Esq.	$-0,15293 \cdot M + 2,45298$	$-0,15 \frac{mV}{Nm}$	1,61

É observado que o maior erro de linearidade é encontrado no eixo perpendicular da peça destinada ao pé direito. Analisando-se a Figura 74 novamente, fica evidenciado que os pontos possuem duas inclinações distintas: uma para a aplicação de esforços positivos (para baixo) e outra para a aplicação de esforços negativos (para cima), seguindo lineares. Deve-se o comportamento, novamente, às incertezas relacionadas à colagem dos extensômetros e, principalmente, às imperfeições do engaste utilizado, já que a ação dele sobre a peça é diferente para os dois sentidos

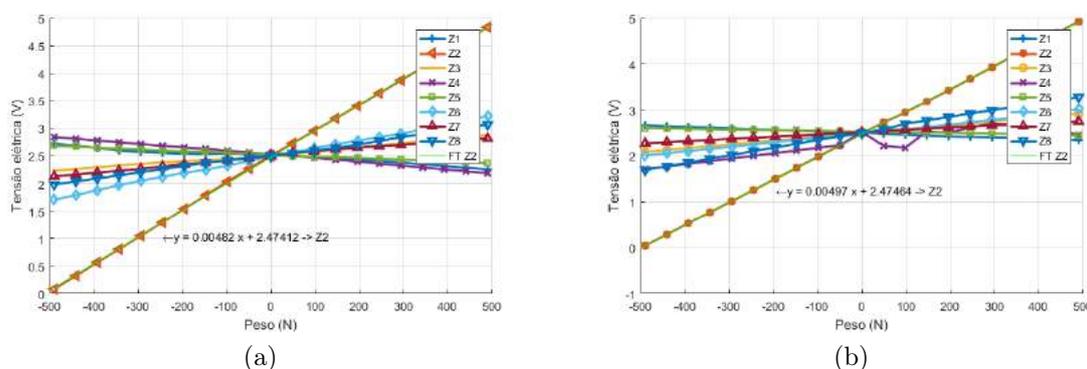
de aplicação de carga. Caso o erro de linearidade seja recalculado considerando as partes positiva e negativa, os erros de linearidade seriam de 0,51% (positiva) e de 0,40% (negativa). Nota-se, ainda, que os eixos relacionados ao momento frontal apresentaram erro de linearidade por volta de 1,6%, valor relativamente alto. Aqui, o movimento de torção exercido pelo momento em conjunto com a fragilidade da peça monolítica em alguns pontos e a tendência do engaste a ceder, à medida em que a carga aumenta, contribuem para que as tensões mecânicas não sejam totalmente absorvidas pela célula de carga. Esta série de fatores acaba por gerar os desvios encontrados. Se comparados a trabalhos de calibração semelhantes (PIGATTO *et al.* (2016); HUSKEN (2018)), afirma-se que os valores encontrados para o erro de linearidade estão dentro dos padrões esperados e indicam resposta linear para as variáveis consideradas no sistema.

Quanto às sensibilidades, é importante notar que o eixo frontal em ambas as células foi o que apresentou a maior sensibilidade em módulo. Isso ocorre devido ao ganho necessário do circuito de condicionamento para que houvesse a máxima excursão da tensão elétrica de saída do sistema. Nota-se também que a maior diferença entre as sensibilidades ocorreu para o eixo perpendicular ($0,12 \frac{mV}{N}$). Tal discrepância é atribuída ao comportamento anômalo apresentado pela função de transferência experimental do eixo perpendicular para o pé direito, citado no parágrafo acima. Caso fosse considerada apenas a parte positiva da curva, a diferença cairia para $0,09 \frac{mV}{N}$, valor semelhante ao relatado por HUSKEN (2018) para a maior diferença entre sensibilidades durante a calibração.

4.2.2 Célula de carga com 6 graus de liberdade

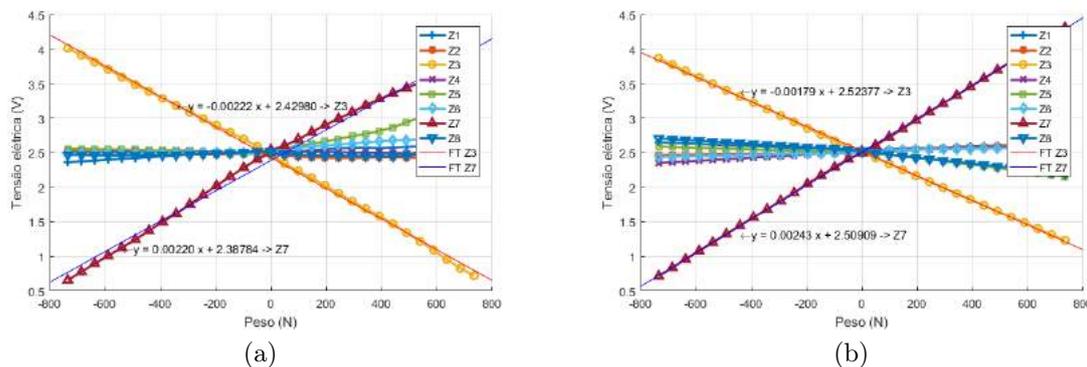
Esta seção versa sobre a determinação das funções de transferência experimentais relacionadas às pontes de *Wheatstone* implementadas para as peças com 6 graus de liberdade. As Figuras 79 a 84 apresentam as curvas obtidas para as peças a partir do carregamento da cada um dos eixos.

Figura 79 – Funções de transferência experimentais - Fx. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



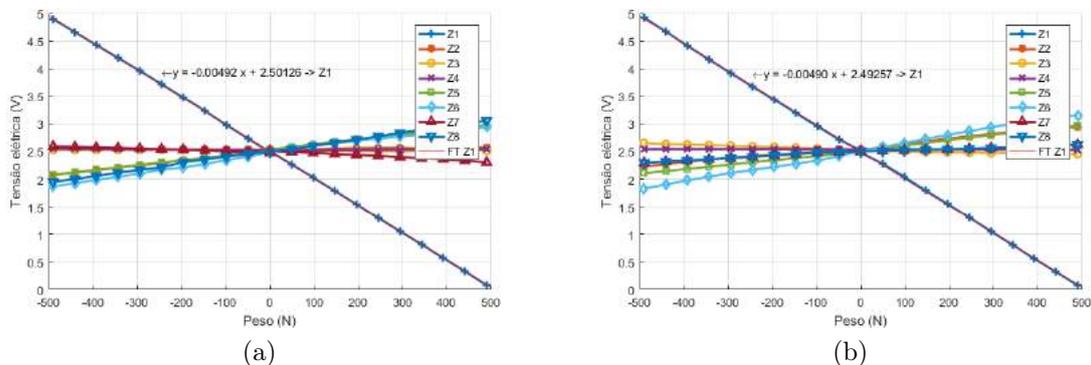
Fonte: Elaboração própria.

Figura 80 – Funções de transferência experimentais - Fy. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



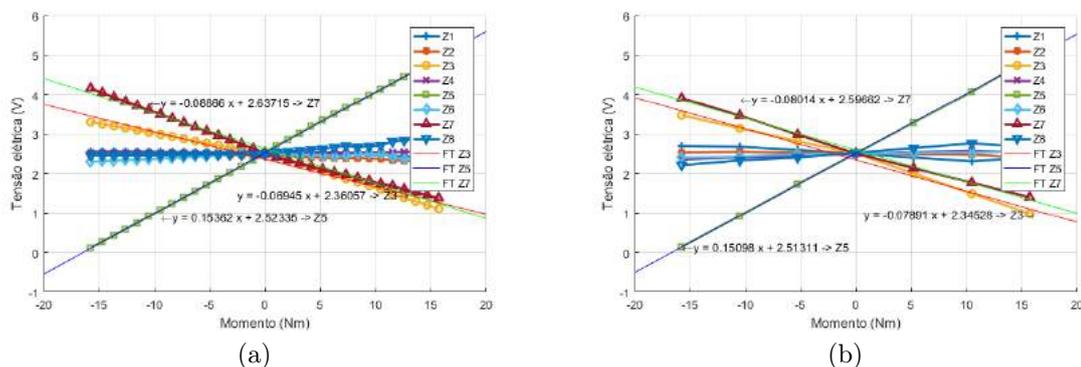
Fonte: Elaboração própria.

Figura 81 – Funções de transferência experimentais - Fz. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



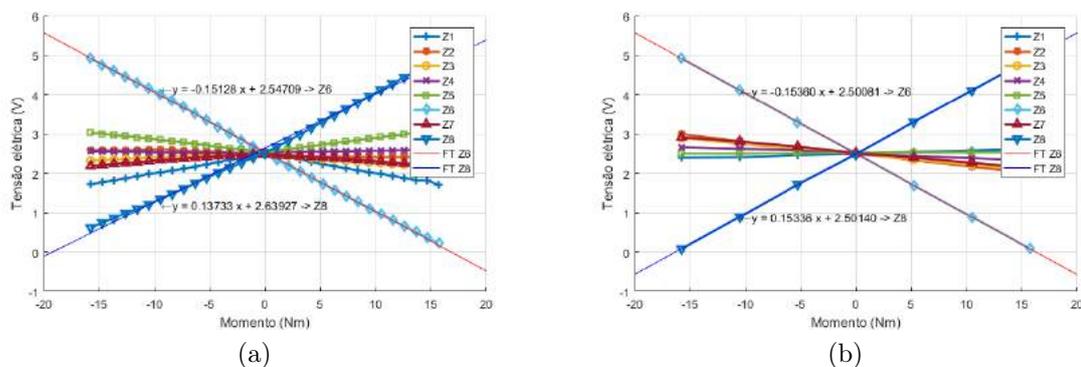
Fonte: Elaboração própria.

Figura 82 – Funções de transferência experimentais - Mx. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



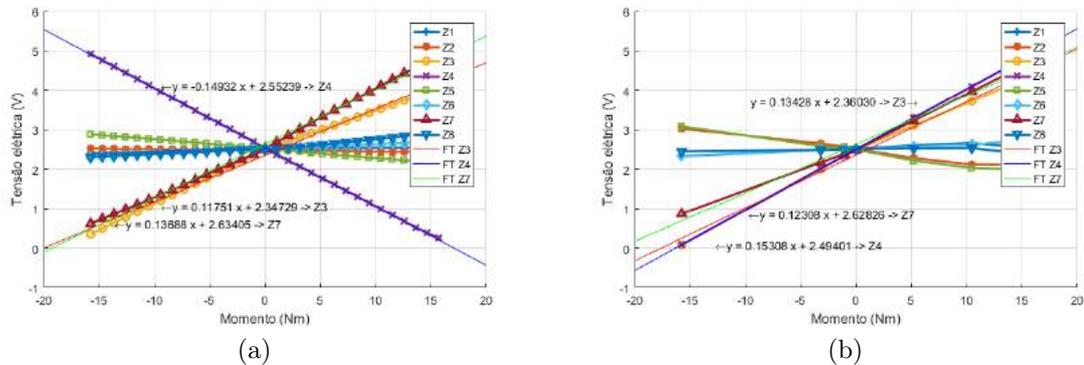
Fonte: Elaboração própria.

Figura 83 – Funções de transferência experimentais - My. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 84 – Funções de transferência experimentais - Mz. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

A fim de analisar com maiores detalhes as características das curvas, foram determinados os erros de linearidade e a sensibilidade dos casos em que as pontes foram mais exigidas. Tais dados são observados nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 – Sensibilidades e erros de linearidade - 6DoF Direito.

Ponte	Sens.	$\varepsilon_{Lin.}$ (%)
Z1	$-4,92 \frac{mV}{N}$	1,73
Z2	$4,82 \frac{mV}{N}$	2,00
Z3	$-2,22 \frac{mV}{N} \mid -69,45 \frac{mV}{Nm} \mid 117,51 \frac{mV}{Nm}$	2,01 \mid 4,73 \mid 4,34
Z4	$-149,32 \frac{mV}{Nm}$	1,09
Z5	$153,62 \frac{mV}{Nm}$	0,66
Z6	$-151,28 \frac{mV}{Nm}$	1,11
Z7	$2,20 \frac{mV}{N} \mid -88,66 \frac{mV}{Nm} \mid 136,88 \frac{mV}{Nm}$	4,41 \mid 3,43 \mid 2,77
Z8	$137,33 \frac{mV}{Nm}$	2,78

Salvo a troca de inclinação devido à organização das conexões dos extensômetros observada na ponte Z4, as curvas apresentam tendências similares em relação a seus pares para ambas as peças. O maior erro de linearidade foi de 4,73% para o lado direito (Z3) e de 4,69% para o lado esquerdo (Z3).

É interessante notar como se apresenta o acoplamento entre os eixos, com

Tabela 25 – Sensibilidades e erros de linearidade - 6DoF Esquerdo.

Ponte	Sens.	$\varepsilon_{Lin.}$ (%)
Z1	$-4,90 \frac{mV}{N}$	0,58
Z2	$4,97 \frac{mV}{N}$	0,42
Z3	$-1,79 \frac{mV}{N} \mid -78,91 \frac{mV}{Nm} \mid 134,28 \frac{mV}{Nm}$	0,94 4,69 3,87
Z4	$153,08 \frac{mV}{Nm}$	0,16
Z5	$150,98 \frac{mV}{Nm}$	0,65
Z6	$-153,60 \frac{mV}{Nm}$	0,19
Z7	$2,43 \frac{mV}{N} \mid -80,14 \frac{mV}{Nm} \mid 123,08 \frac{mV}{Nm}$	0,50 2,31 3,77
Z8	$153,36 \frac{mV}{Nm}$	0,49

algumas pontes respondendo a estímulos vindos de outras direções. F_x e F_z ilustram bem como os agrupamentos de extensômetros se comportam nestes casos. Os resultados dessa ação são levados em conta para o cálculo da matriz de desacoplamento.

Devido às diversas fontes de incerteza que atuam sobre o comportamento do sistema, a destacar o posicionamento dos extensômetros, a atuação não-ideal do engaste e as assimetrias impostas pela máquina de calibração, nota-se alguns desvios importantes tanto em comparação aos resultados de simulação, quanto à assimetria das curvas experimentais. Um dos impactos diretos foi na diferença em relação aos ganhos previstos: a deformação real foi, em alguns casos, razoavelmente diferente do esperado, resultando na necessidade de recalcular os resistores utilizados nos INA826.

Voltando à questão do engaste e do carregamento, bons exemplos de problemas causados por não-idealidades são encontrados nas respostas de Z3 e de Z7, em especial quando considerados M_x e M_y . A atuação não simétrica do engaste e do carregamento causou, em ambos os casos, a troca da inclinação para carregamentos

positivos e negativos. Tais anomalias, como já visto, afetam diretamente a resposta das pontes de *Wheatstone*, terminando por degradar o desempenho do sistema.

Contudo, mesmo com os desvios relatados, as pontes de *Wheatstone* responderam aos esforços esperados. Então, de posse das respostas obtidas a partir da calibração, é possível determinar as matrizes de desacoplamento para as células de carga com 6 graus de liberdade.

Para determinar os coeficientes da matriz de calibração \mathbf{C} foram elencados os fundos de escala de forças e momentos exercidos durante a calibração. Os coeficientes dessa matriz 8×6 são calculados a partir da resposta de cada uma das pontes de *Wheatstone* aos 6 tipos diferentes de estímulos realizados em forma de carregamento. Cada coeficiente é o resultado da razão entre a resposta da ponte de *Wheatstone* e a magnitude do esforço. Desta forma, serão 6 colunas (representando os 6 tipos de carregamento distintos) e 8 linhas (representando as respostas para as 8 pontes).

Após a determinação dos coeficientes, as matrizes de calibração para o lado

direito e para o lado esquerdo foram determinadas (Equação (52) e Equação (53)).

$$\mathbf{C}_{Direito} = \begin{bmatrix}
 -0,00055 & 0,00016 & -0,00494 & -0,00427 & -0,05044 & 0,00323 \\
 0,00530 & -0,00008 & 0,00014 & -0,01299 & -0,00421 & -0,00267 \\
 0,00085 & -0,00242 & 0,00003 & -0,08826 & -0,02268 & 0,13692 \\
 -0,00071 & -0,00005 & 0,00009 & 0,00349 & 0,00662 & -0,14258 \\
 -0,00030 & 0,00105 & 0,00096 & 0,15386 & 0,03772 & -0,02220 \\
 0,00163 & 0,00033 & 0,00090 & -0,00972 & -0,14481 & 0,01037 \\
 0,00072 & 0,00182 & -0,00040 & -0,07086 & -0,01906 & 0,14977 \\
 0,00128 & 0,00000 & 0,00113 & 0,02541 & 0,15386 & 0,02961
 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\mathbf{C}_{Esquerdo} = \begin{bmatrix}
 -0,00032 & 0,00025 & -0,00494 & -0,00587 & 0,00643 & 0,00238 \\
 0,00494 & 0,00021 & 0,00090 & -0,00679 & -0,03149 & -0,02482 \\
 0,00084 & -0,00171 & -0,00010 & -0,09637 & -0,02527 & 0,11704 \\
 -0,00010 & 0,00016 & 0,00005 & 0,00200 & -0,01008 & 0,15251 \\
 -0,00012 & -0,00042 & 0,00094 & 0,15385 & -0,00050 & -0,03273 \\
 0,00105 & 0,00015 & 0,00133 & 0,00391 & -0,15386 & 0,01684 \\
 0,00051 & 0,00243 & 0,00025 & -0,06977 & -0,02618 & 0,14010 \\
 0,00159 & -0,00039 & 0,00025 & 0,01027 & 0,15385 & -0,00827
 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Agora, para que seja possível resolver a Equação (17), é necessário calcular a pseudo-inversa para as matrizes de calibração. Portanto, são determinadas as

matrizes \mathbf{D} para ambos os lados (Equação (54) e Equação (55)).

$$\mathbf{D}_{Direito} = \begin{bmatrix} 21,96 & 172,19 & -2,38 & -2,48 & 5,96 & 33,40 & -7,08 & 40,76 \\ -21,27 & -0,41 & -238,80 & 35,65 & -25,11 & 15,07 & 246,52 & 7,16 \\ -193,68 & -37,76 & 3,32 & 10,89 & 1,61 & 61,76 & 7,95 & -5,79 \\ 1,51 & 0,04 & 0,94 & -2,69 & 6,02 & 1,04 & -2,62 & -0,07 \\ -0,09 & 0,34 & -0,52 & 0,54 & -0,84 & -3,58 & 0,47 & 3,28 \\ 0,32 & -1,05 & 2,27 & -3,26 & 2,00 & 0,20 & 1,66 & 0,46 \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\mathbf{D}_{Esquerdo} = \begin{bmatrix} 45,95 & 175,91 & 21,91 & 9,77 & 21,56 & 24,27 & 7,33 & 63,91 \\ 7,84 & 23,00 & -240,14 & -34,68 & -41,41 & -15,40 & 233,71 & -13,10 \\ -202,62 & -22,13 & -7,93 & -13,52 & -6,34 & 11,94 & 18,95 & 16,89 \\ 1,27 & 0,33 & -1,50 & 2,69 & 5,36 & 0,51 & -0,43 & 0,40 \\ -0,75 & -0,46 & -0,42 & 0,28 & -0,24 & -3,08 & 0,50 & 3,39 \\ 0,35 & -0,56 & 1,98 & 3,93 & 1,85 & -0,04 & 1,58 & 0,68 \end{bmatrix} \quad (55)$$

São notáveis as diferenças entre as matrizes de desacoplamento. Este é o resultado direto das características de cada uma das peças estudadas e das variáveis impostas pelo esquema de calibração.

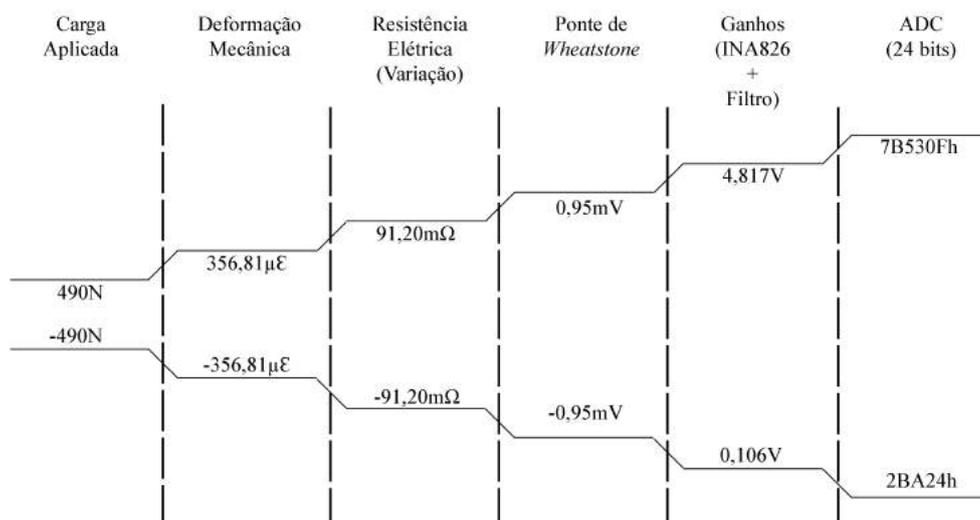
4.3 Cadeias de medidas experimentais

De posse dos dados provenientes da calibração estática e, por conseguinte, das funções de transferências experimentais para cada um dos conjuntos de extensômetros cimentados nas células de carga, é possível esquematizar as cadeias de medidas experimentais para o sistema. Desta forma, uma visão ampla dos fundos de escala para cada uma das etapas do condicionamento é disposta, permitindo um melhor entendimento de seu funcionamento.

4.3.1 Célula de carga com 3 graus de liberdade

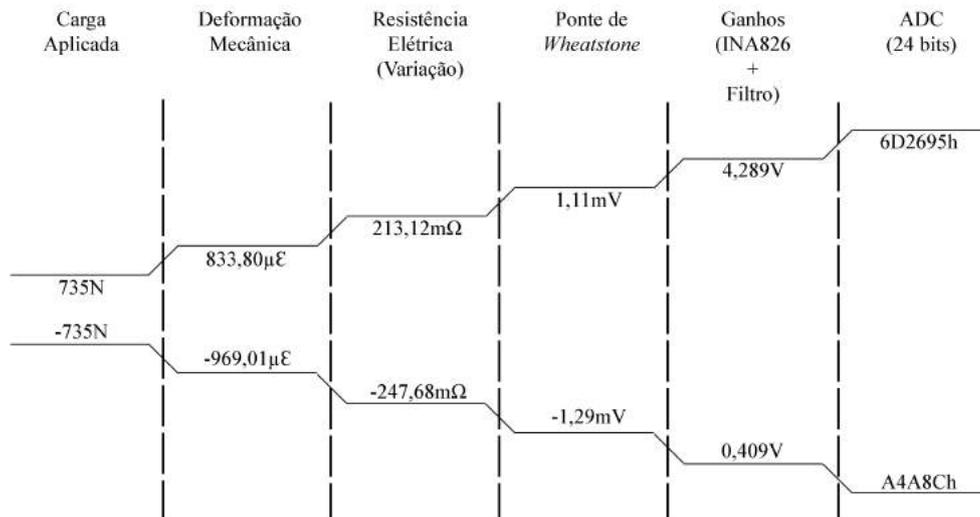
A partir das funções de transferência definidas para as células de carga com 3 graus de liberdade, pôde-se estruturar as cadeias de medidas experimentais relativas a tais peças. As Figuras 85 a 87 apresentam as cadeias de medidas experimentais para a célula de carga referente ao pé direito; as Figuras 88 a 90 apresentam as cadeias de medidas experimentais para a célula de carga referente ao pé esquerdo.

Figura 85 – Cadeia de medida experimental - Fx - Pé direito.



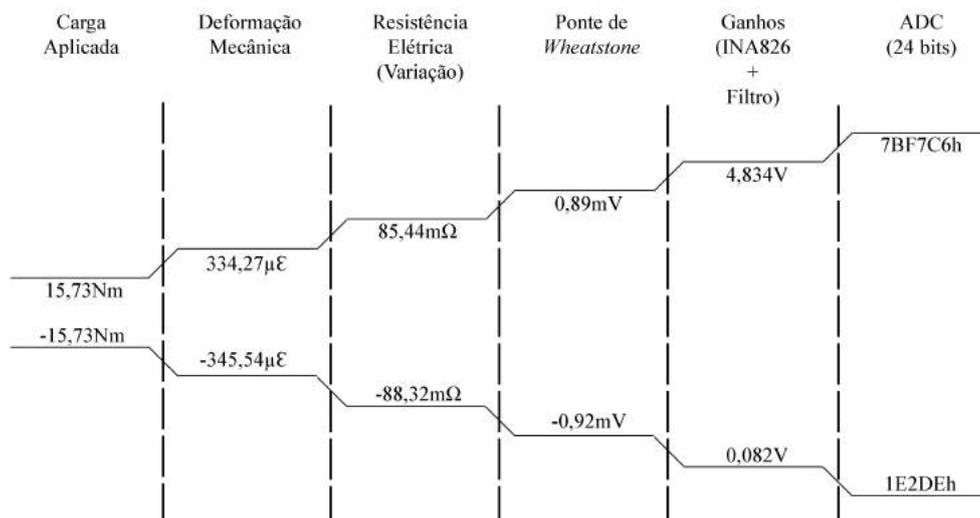
Fonte: Elaboração própria.

Figura 86 – Cadeia de medida experimental - F_y - Pé direito.



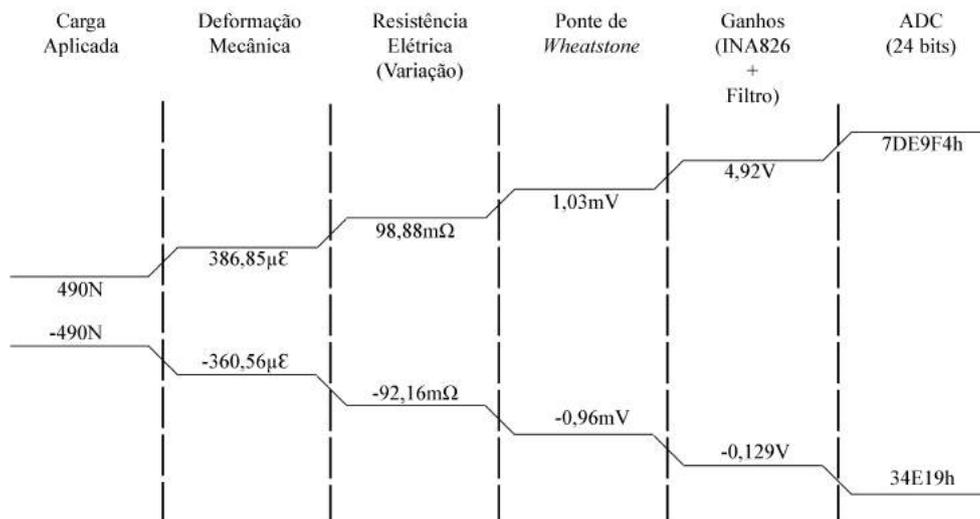
Fonte: Elaboração própria.

Figura 87 – Cadeia de medida experimental - M_x - Pé direito.



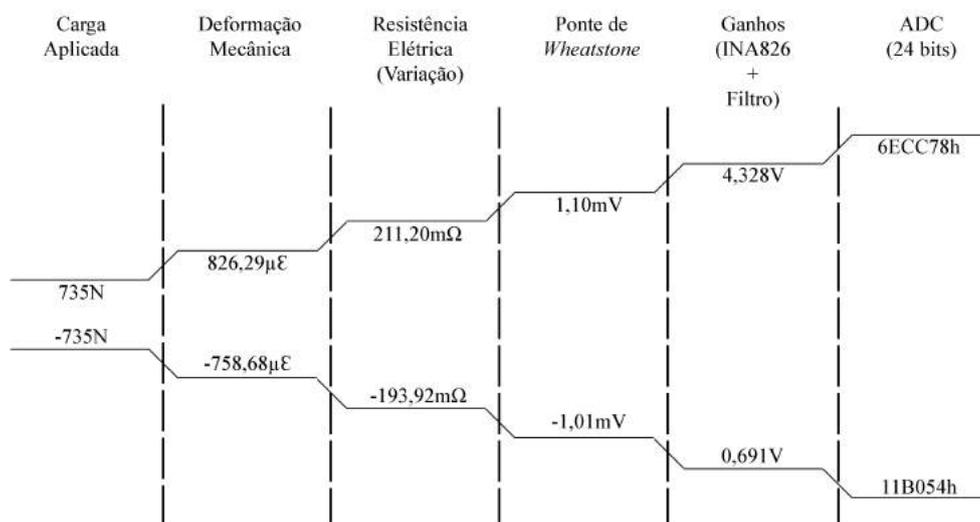
Fonte: Elaboração própria.

Figura 88 – Cadeia de medida experimental - Fx - Pé esquerdo.



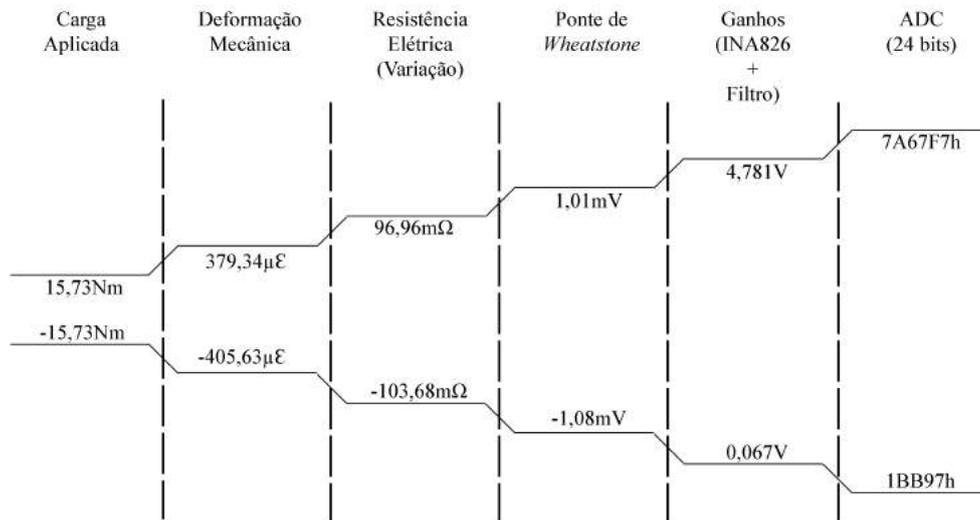
Fonte: Elaboração própria.

Figura 89 – Cadeia de medida experimental - Fy - Pé esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 90 – Cadeia de medida experimental - Mx - Pé esquerdo.



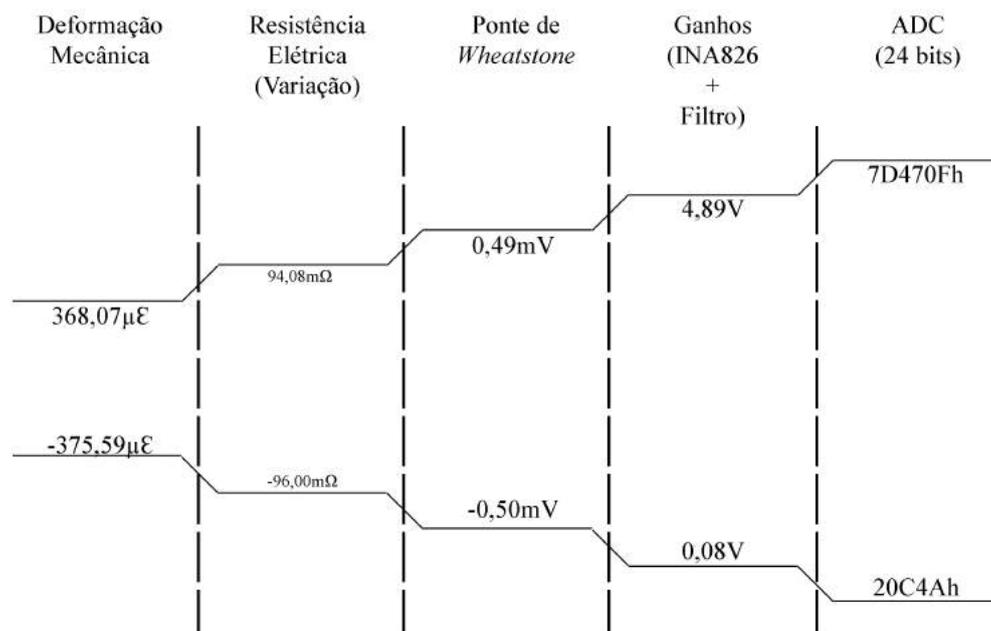
Fonte: Elaboração própria.

Apesar da ausência de equipamento para mensurar diretamente a deformação aparente das pontes de *Wheatstone* implementadas, nota-se que as deformações estimadas a partir dos valores de tensão elétrica são condizentes com os dados obtidos a partir da análise por método de elementos finitos realizada no ANSYS 19. A maior discrepância encontrada está no fundo de escala inferior do eixo perpendicular do pé direito: para a carga estimada de $-735N$, a deformação aparente simulada foi de $-828\mu\epsilon$. Entretanto, o valor estimado para a deformação aparente real foi de $-969,91\mu\epsilon$, totalizando cerca de $-141\mu\epsilon$ de diferença. Como já discutido, os principais fatores que levam a tal desconformidade são os desvios no posicionamento dos extensômetros durante a cimentação e a não idealidade do engaste, que gera tensões mecânicas não previstas na região de interesse e afetam a resposta dos sensores.

4.3.2 Célula de carga com 6 graus de liberdade

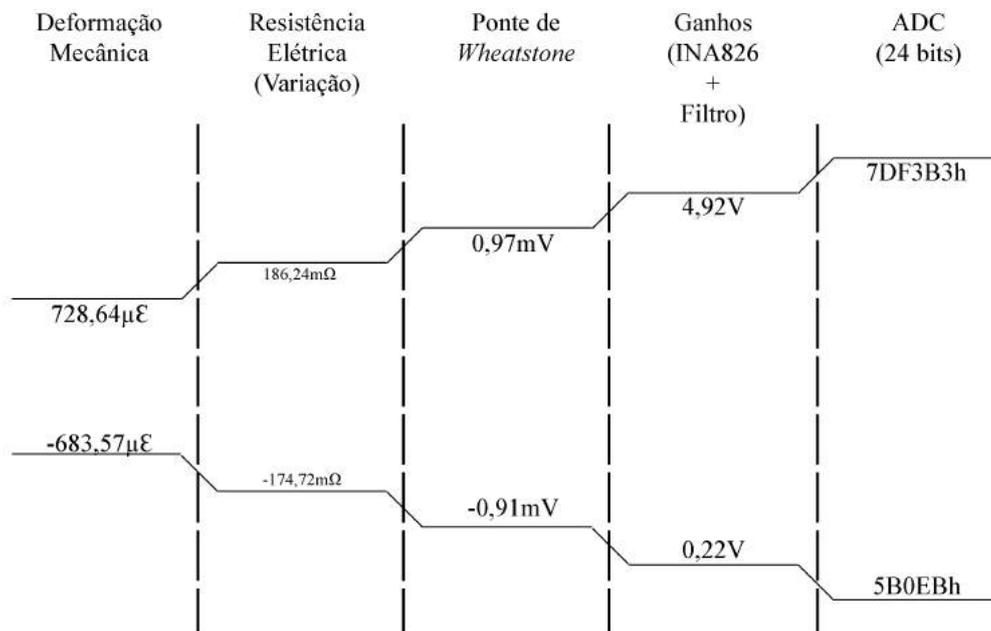
Com os dados de calibração consolidados, foi possível realizar a estruturação das cadeias de medidas experimentais considerando os extremos das escalas para as deformações médias máximas, não importando a situação do carregamento. As Figuras 91 a 93 apresentam parte das cadeias de medidas experimentais para a peça destinada ao lado direito. Já as Figuras 94 a 96 apresentam parte das cadeias de medidas experimentais para a peça destinada ao lado esquerdo. O restante dos canais é disposto no Apêndice D.

Figura 91 – Cadeia de medida experimental - Z1 - Pé direito.



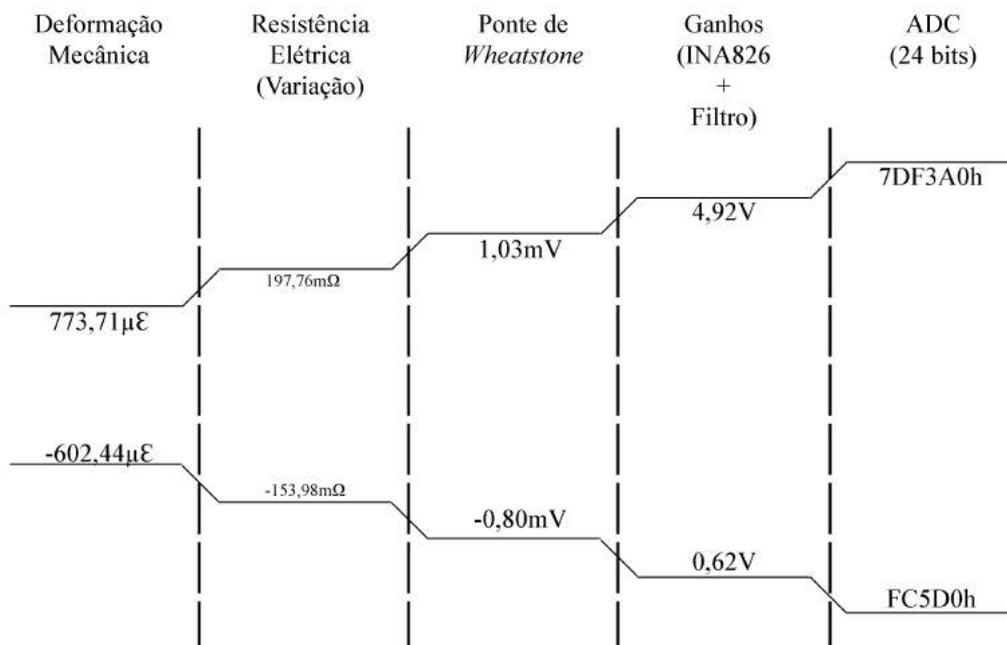
Fonte: Elaboração própria.

Figura 92 – Cadeia de medida experimental - Z6 - Pé direito.



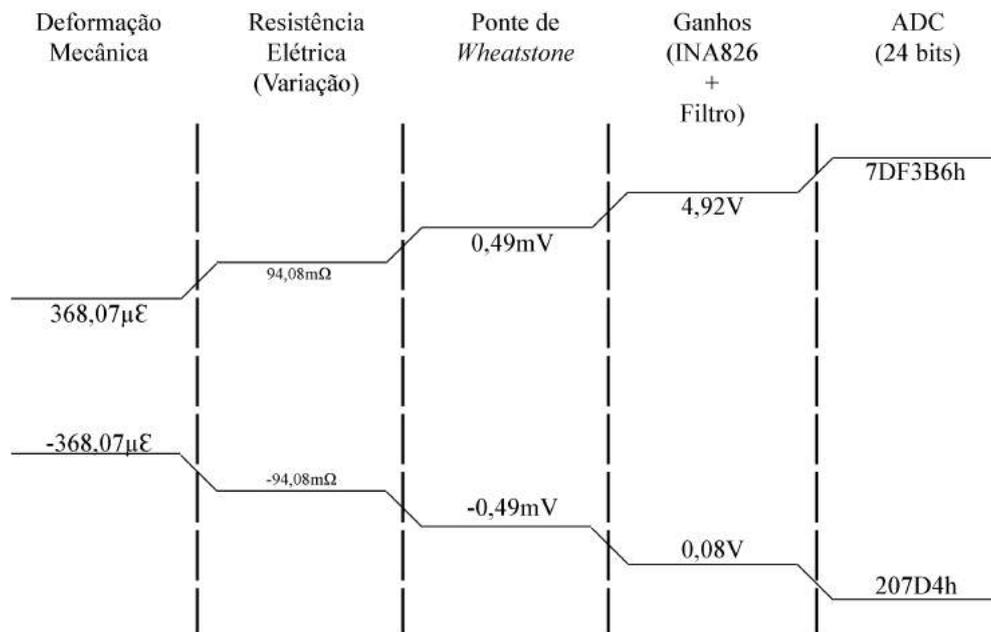
Fonte: Elaboração própria.

Figura 93 – Cadeia de medida experimental - Z8 - Pé direito.



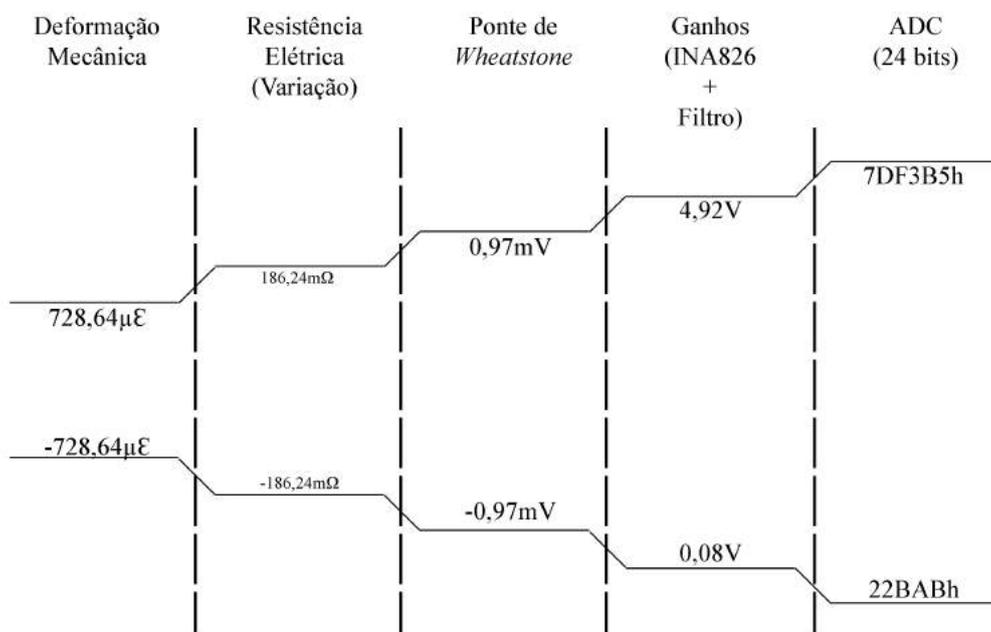
Fonte: Elaboração própria.

Figura 94 – Cadeia de medida experimental - Z1 - Pé esquerdo.



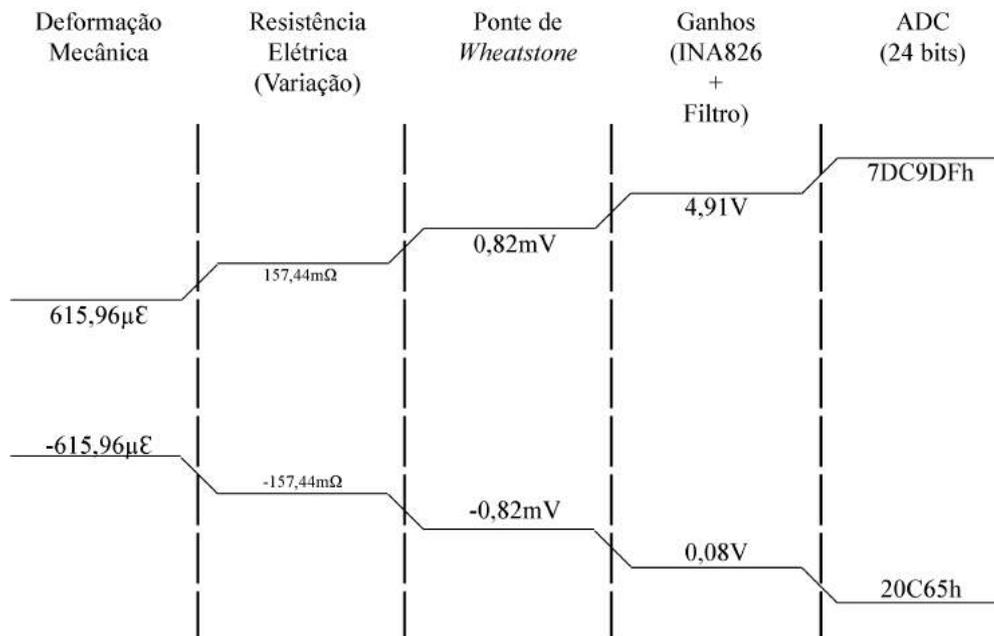
Fonte: Elaboração própria.

Figura 95 – Cadeia de medida experimental - Z6 - Pé esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 96 – Cadeia de medida experimental - Z8 - Pé esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

A análise das cadeias de medidas experimentais transparecem as observações relatadas durante a exposição dos resultados de calibração. Nota-se que algumas cadeias de medidas são assimétricas em relação a deformações mecânicas estimadas, variação de resistência elétrica estimada e da tensão elétrica de saída. Deve-se isso às incertezas e às não-idealidades atreladas principalmente ao *setup* de calibração e à discrepância entre modelos simulados e reais.

Destaca-se a resposta maior do que a prevista em simulação para as pontes Z6 e Z8, o que exigiu redução do ganho total para seus canais. A grande maioria dos canais, porém, apresentou resposta similar ou abaixo da prevista. Isto se dá pois as combinações utilizadas para as cadeias de medidas teóricas levaram em conta os extremos para o grupo de extensômetros, o que naturalmente elevou o módulo das respostas em tensão elétrica já que não necessariamente os grupos de extensômetros atingem seu pico de deformação a partir do mesmo carregamento.

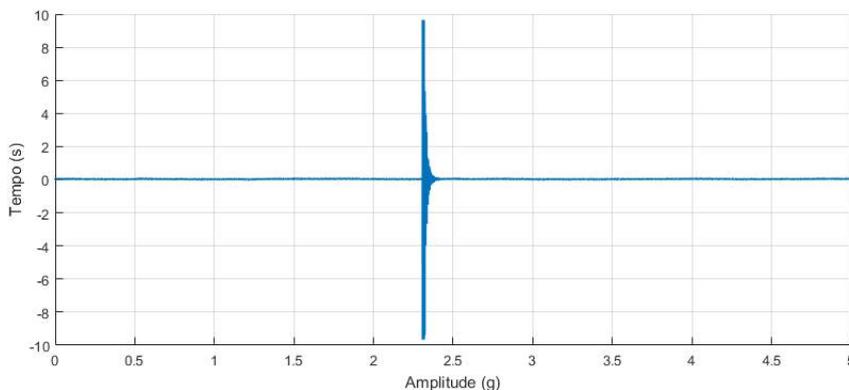
4.4 Calibração dinâmica

Para determinar o comportamento dinâmico associado às células de carga, foi montado um experimento em acordo com o protocolo descrito na Seção 3.5. A premissa é que os modos ressonantes fiquem o mais afastados o possível da frequência do fenômeno do movimento de pedalada (cuja frequência máxima é considerada $3Hz$).

4.4.1 Célula de carga com 3 graus de liberdade

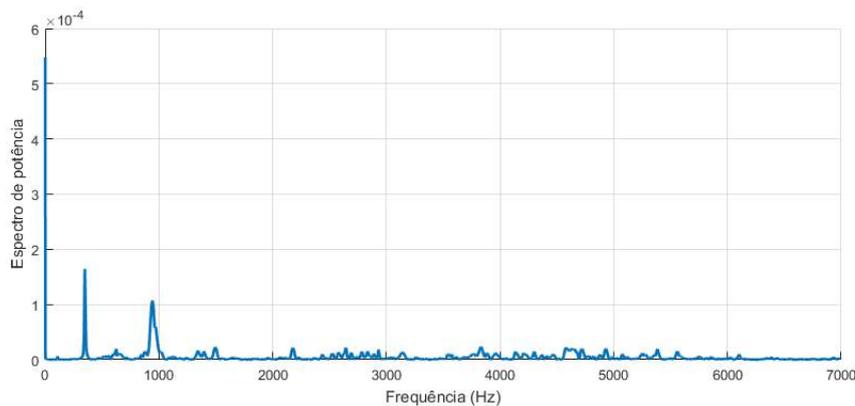
Os resultados provenientes do teste de calibração dinâmica para a célula de carga com 3 graus de liberdade podem ser observados nas Figuras 97 e 98.

Figura 97 – Teste de impacto - 3DoF - Tempo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 98 – Teste de impacto - 3DoF - Frequência.



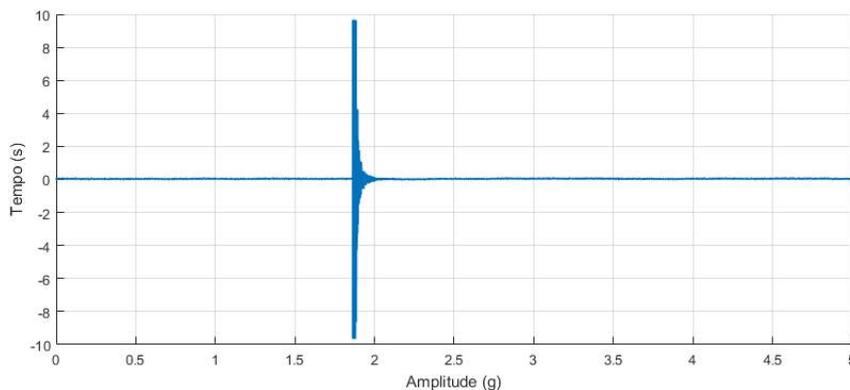
Fonte: Elaboração própria.

De acordo com as simulações dinâmicas, o primeiro modo da célula de carga com 3 graus de liberdade se dá em $9376,1Hz$. Tal frequência está além da faixa dinâmica do acelerômetro utilizado - que vai até $7kHz$. Assim, foi truncado o eixo referente à frequência no fim da faixa e foram realizados os testes. A partir dos resultados, é possível observar que são apresentados dois picos mais acentuados na faixa dos $300kHz$ a $1kHz$ (muito superiores às frequências do fenômeno mensurado). De acordo com a premissa de frequência máxima do movimento de pedalada, entende-se que as células de carga com 3 graus de liberdade não sofrerão efeitos devido à frequência natural de ressonância.

4.4.2 Célula de carga com 6 graus de liberdade

Da mesma forma, o teste de calibração dinâmica foi executado para a célula de carga com 6 graus de liberdade, estando os resultados dispostos nas Figuras 99 e 100.

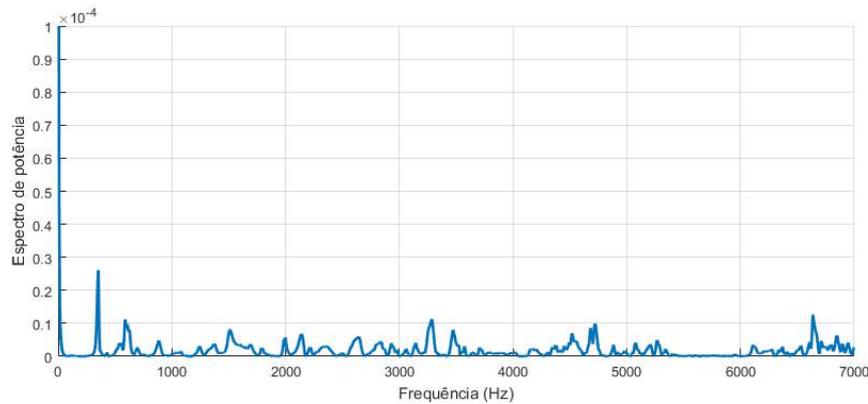
Figura 99 – Teste de impacto - 6DoF - Tempo.



Fonte: Elaboração própria.

O resultado da simulação mecânica para a célula de carga com 6 graus de liberdade aponta que o primeiro modo de ressonância é encontrado em $10,875kHz$. Novamente, tal frequência está acima da faixa estipulada para o acelerômetro

Figura 100 – Teste de impacto - 6DoF - Frequência.



Fonte: Elaboração própria.

utilizado durante os ensaios. Desta forma, foram analisadas somente as informações contidas abaixo dos 7kHz . Sendo assim, pode-se destacar um pico na faixa dos 350Hz , bastante afastado dos 3Hz referentes à frequência máxima esperada para o movimento de pedalada. Assim, infere-se que a peça em questão não sofrerá os efeitos associados à ressonância durante os ensaios a serem realizados.

4.5 Análise das incertezas associadas ao sistema

Seguindo o que foi descrito na Seção 3.7, foi realizada a análise das incertezas associadas ao sistema. Portanto, foram considerados como resultados a incerteza em tensão na saída de cada uma das pontes de *Wheatstone* e as incertezas na saída de cada um dos canais implementados.

4.5.1 Incerteza para a ponte de *Wheatstone*

Aplicando-se as Equações (41), (43), (44) e (45) na Equação (39), são obtidas as incertezas para as saídas em tensão elétrica das pontes de *Wheatstone*. Os resultados são observados na Tabela 26 e correspondem à incerteza para cada um dos braços.

Observe que a incerteza calculada é considerável se comparada às sensibilidades

Tabela 26 – Incertezas relacionadas aos braços das topologias de ponte de *Wheatstone* utilizadas.

Tipo de ponte	u (mV)	u_{EXP} (mV), $k = 2$
Completa	2,8	5,6
Meia-ponte	2,2	4,4
Meia-ponte dupla	1,8	3,6

para cada uma das topologias. O maior valor obtido ocorre para a ponte completa, refletindo o valor de tolerância superior atribuído aos extensômetros quando comparado aos resistores que completam as pontes nos outros casos. Em um cenário ideal, já que as incertezas são iguais para os braços, tal discrepância seria anulada. Contudo, em casos reais, a saída da ponte acaba ficando desequilibrada pois cada componente dentro da topologia possui características distintas de incerteza padrão. Por isso é importantíssima a presença do potenciômetro de ajuste de *offset*, o qual faz pequenas modificações da tensão elétrica em um dos braços da ponte até a saída seja zerada.

4.5.2 Incertezas da cadeia de condicionamento

A partir do apresentado na Seção 3.7.2 e desenvolvendo a Equação (49) para cada um dos canais utilizados, tem-se os valores das incertezas combinadas e expandidas ($k = 2$), de acordo com a Tabela 27. Ao observá-la, nota-se que a incerteza é proporcional à sensibilidade e dependente da topologia da ponte de *Wheatstone* utilizada. O valor máximo observado é da ponte frontal da peça com 3 graus de liberdade esquerda (ponte completa) e o valor mínimo observado é da ponte para o momento frontal da peça com 3 graus de liberdade esquerda (ponte completa). Na média, a incerteza expandida encontrada foi de 2,04% para 3DoF e de 2,09% para 6DoF. Isso indica que as incertezas são semelhantes no que tange a sensibilidade do

sistema.

Tabela 27 – Incertezas combinada e expandida para os canais analisados.

Ponte	S ($\frac{V}{\epsilon}$)	u ($\frac{V}{\epsilon}$)	u (%)	u_{EXP} ($\frac{V}{\epsilon}$)	u_{EXP} (%)
Frontal - Dir	2169,63	23,70	1,09	47,39	2,18
Perpendicular - Dir	679,32	6,39	0,94	12,79	1,88
Momento Frontal - Dir	2238,73	24,13	1,08	48,26	2,16
Frontal - Esq	1981,41	22,53	1,14	45,07	2,27
Perpendicular - Esq	750,21	7,19	0,96	14,38	1,92
Momento Frontal - Esq	1893,19	17,49	0,92	34,98	1,84
Z1 - Dir	2036,82	22,02	1,08	44,04	2,16
Z2 - Dir	1687,62	16,87	0,99	33,74	1,99
Z3 - Dir	788,64	7,85	0,99	15,71	1,99
Z4 - Dir	498,48	5,49	1,10	10,97	2,20
Z5 - Dir	887,26	9,67	1,09	19,35	2,18
Z6 - Dir	1040,83	11,57	1,11	23,15	2,22
Z7 - Dir	946,59	8,74	0,92	17,49	1,85
Z8 - Dir	983,62	11,22	1,14	22,45	2,28
Z1 - Esq	2077,47	19,20	0,92	38,40	1,85
Z2 - Esq	1939,25	21,41	1,10	42,82	2,21
Z3 - Esq	840,70	8,22	0,98	16,43	1,95
Z4 - Esq	509,87	4,71	0,92	9,41	1,85
Z5 - Esq	834,90	9,35	1,20	18,70	2,24
Z6 - Esq	1040,83	11,57	1,11	23,15	2,22
Z7 - Esq	885,30	8,96	1,01	17,92	2,02
Z8 - Esq	1232,80	13,90	1,13	27,81	2,25

Observa-se, a partir dos resultados, que a incerteza aumenta em função da sensibilidade. Logo, quanto mais ganho é necessário inferir ao sistema, maior será a incerteza ao final da cadeia. Também infere-se que quanto menor a sensibilidade, maior é a deformação sofrida pelo grupo de extensômetros a partir do carregamento.

4.6 Análise dos Ensaios de Validação

Após os ensaios com voluntários, foi possível realizar uma análise mais detalhada de questões como o posicionamento dos pedais e dos esforços aplicados durante o movimento de pedalada. Durante as rodadas realizadas, os sujeitos não reportaram nada anômalo quanto à ergonomia relação ao conjunto formado por tacos, sapatilhas e placas de circuito impresso. No entanto, dois dos voluntários - não estando estes acostumados com a posição mais agressiva que a geometria de uma bicicleta de estrada oferece - reportaram desconforto em relação ao selim.

A análise considera, primeiramente, os dados de posicionamento dos pedais e pedivela com o intuito de confirmar a perseguição da cadência alvo pelo usuário do sistema. Ainda, os resultados relacionados aos ângulos do conjunto servem como base para a determinação da força efetiva e da potência.

Em segundo momento, é realizada a apresentação dos dados relacionados aos esforços aplicados pelos voluntários durante os ensaios. São analisadas questões como picos de força e assimetria entre membros, além de discussões sobre resultados envolvendo os momentos. Ao trazer os ângulos descritos anteriormente, é feita comparação com estudos anteriores a fim de validar as respostas obtidas em relação a efetividade da pedalada, potência média, entre outros.

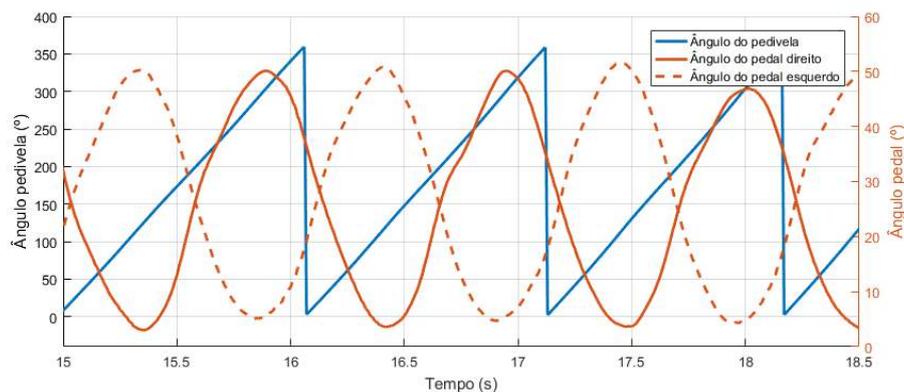
4.6.1 Análise dos Dados Provenientes da Captura de Movimentos

De acordo com o disposto na Seção 3.6, os dados de posicionamento dos pedais foram obtidos durante os ensaios realizados. Os ângulos do sistema pedal-pedivela são de suma importância na determinação da potência, já que é a partir do processamento dessas informações que o vetor unitário que representa a força efetiva

é obtido.

A Figura 101 apresenta um excerto retirado de um dos ensaios onde é possível observar os ângulos dos pedais e do pedivela. Nela, existem 3 ciclos completos do movimento, nos quais foram atingidos os ângulos máximos de $50,11^\circ$ para o pedal direito e de $51,65^\circ$ para o pedal esquerdo, resultando em uma diferença de $1,53^\circ$. Já os ângulos mínimos atingidos foram de $2,95^\circ$ para o pedal direito e de $4,25^\circ$ para o pedal esquerdo, resultando em uma diferença de $1,30^\circ$. Portanto, o *span* para os ângulos dos pedais foi de $47,16^\circ$ para o lado direito e de $47,40^\circ$ para o lado esquerdo.

Figura 101 – Excerto contendo as informações angulares do sistema - 3DoF - Voluntário 1.



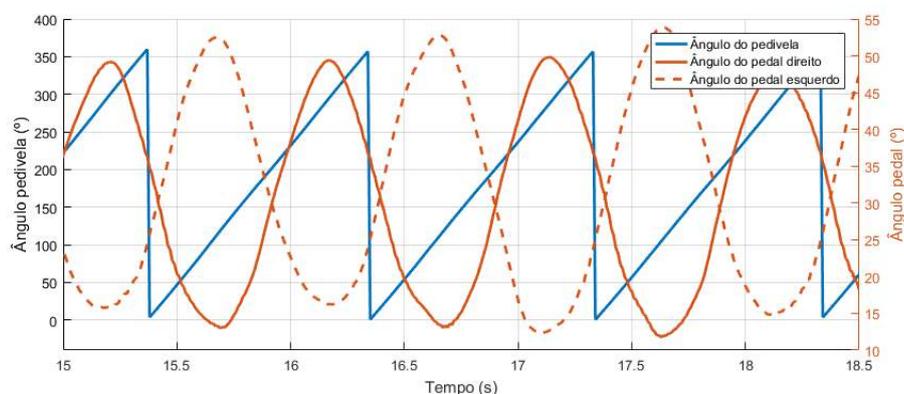
Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o estudo desenvolvido por KAUTZ *et al.* (1991), o *span* do ângulo relacionado ao pedal varia de cerca de 45° a 55° com posições variando de -12° a 42° . As variações de posicionamento do pedal se dão a partir de diversos fatores, incluindo a ergonomia da bicicleta e a potência exigida durante o movimento (PRICE; DONNE, 1997). Os resultados de *span* estão em linha com o que foi obtido durante o curso do presente trabalho. Contudo, nota-se que os ângulos mínimos e máximos diferem, com evidente deslocamento no caso dos dados adquiridos a partir do sistema aqui descrito. A discrepância se dá a partir do posicionamento natural da sapatilha em relação à base do pedal taco: em sistemas comerciais, há 20° de

inclinação entre o solado e o pedal. Aqui, entretanto, essa característica é extinta, estando paralelos o solado e o pedal. Desta forma, infere-se que os dados obtidos possuem um deslocamento angular positivo de 20° . Caso seja subtraído o valor, chega-se a limites similares aos relatados na literatura.

Considerando a aquisição dos ângulos durante o movimento de pedalada para a célula de carga com 6 graus de liberdade, pode-se observar na Figura 102 as informações angulares do sistema para um excerto de 3,5 segundos. Nota-se, então, que a característica de angulação dos pedais é similar à obtida nos ensaios com as células de carga com 3 graus de liberdade. Os ângulos máximos obtidos foram de $49,87^\circ$ para o lado direito e de $53,88^\circ$ para o lado esquerdo. Já os ângulos mínimos foram ligeiramente superiores, com $11,72^\circ$ para o lado direito e $12,31^\circ$ para o lado esquerdo. Desta maneira, o *span* angular dos pedais foi determinado em $38,15^\circ$ para o lado direito e em $41,57^\circ$ para o lado esquerdo. É importante ressaltar que a comparação foi feita em relação a valores base, sujeitos a fortes variações de acordo com a adaptação do ciclista em relação à ergonomia do conjunto.

Figura 102 – Excerto contendo as informações angulares do sistema - 6DoF - Voluntário 3.



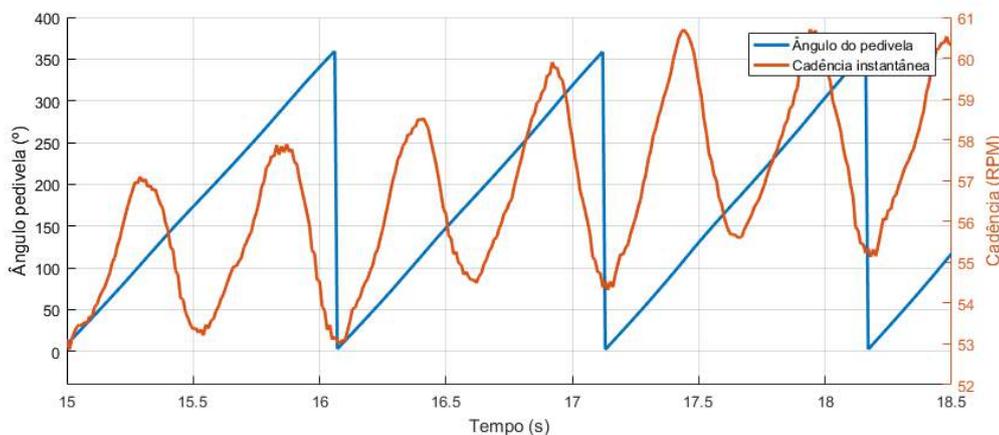
Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se que o *span* foi menor do que o registrado na peça com 3 graus de liberdade e ligeiramente abaixo da faixa relatada por KAUTZ *et al.* (1991). Contudo,

novamente de acordo com PRICE; DONNE (1997), diversos fatores são responsáveis por modificar as relações de posição entre os componentes e o ciclista. Uma das diferenças possíveis entre um ensaio e outro é o posicionamento da altura do selim: como esse parâmetro muda de um sujeito para outro, é provável que tenha ocorrido discrepância na altura do selim para o usuário do qual provêm os dados. Mesmo assim, se considerado o *offset* já detectado nos ensaios das células de carga relatados na Seção 4.6.2, a faixa obtida para os ângulos dos pedais manteve-se dentro do esperado.

Ainda a partir dos dados de cinematria é possível obter a cadência instantânea desenvolvida pelo usuário do sistema. A Figura 103 apresenta a cadência instantânea para o mesmo trecho apresentado na Figura 101.

Figura 103 – Excerto contendo a cadência instantânea - Voluntário 1.

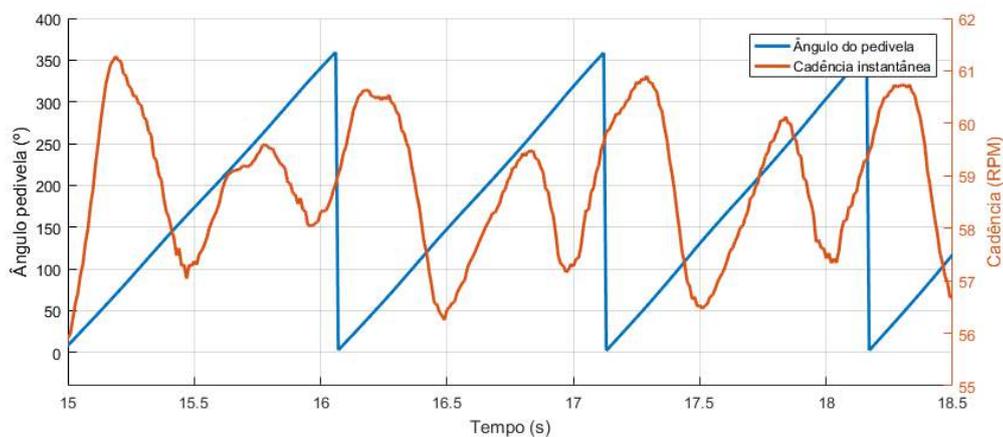


Fonte: Elaboração própria.

Nota-se, no gráfico, que a cadência mínima no trecho extraído foi de 51,40RPM e que a cadência máxima foi de 62,94RPM, configurando uma variação de 11,53RPM em um período de 3,5 segundos. É interessante observar que houve paridade entre os picos e os pontos de maior aplicação de força (90° e 270°), apontando para um padrão descontínuo de ativação muscular já que não há suavidade nas transições.

A título de comparação, a Figura 104 apresenta a cadência instantânea de outro voluntário. Analisando-se a variação, é perceptível a tendência de apresentação de picos de cadência maiores quando o lado direito encontra-se na fase ativa (diferença entre picos e vales na casa de $4RPM$ a $5RPM$). Na fase ativa do lado esquerdo, a diferença entre picos e vales cai para $1RPM$ a $3RPM$, indicando maior ativação no lado direito.

Figura 104 – Excerto contendo a cadência instantânea - Voluntário 3.



Fonte: Elaboração própria.

Em geral, essa métrica é obtida a partir do cômputo do tempo entre dois picos consecutivos de força. Porém, tal método atualiza os dados a cada ciclo e pode apresentar inconsistências já que os picos utilizados podem sofrer variação em seu intervalo (SCHMIDT, 2014). Sendo assim, optou-se pelo método relatado por FIGATTO (2018) no qual determina-se a cadência via cálculo da diferença angular entre dois pontos consecutivos. Desta forma, é aberta a possibilidade para mais uma métrica, inferindo assimetria de cadência entre os membros do ciclista.

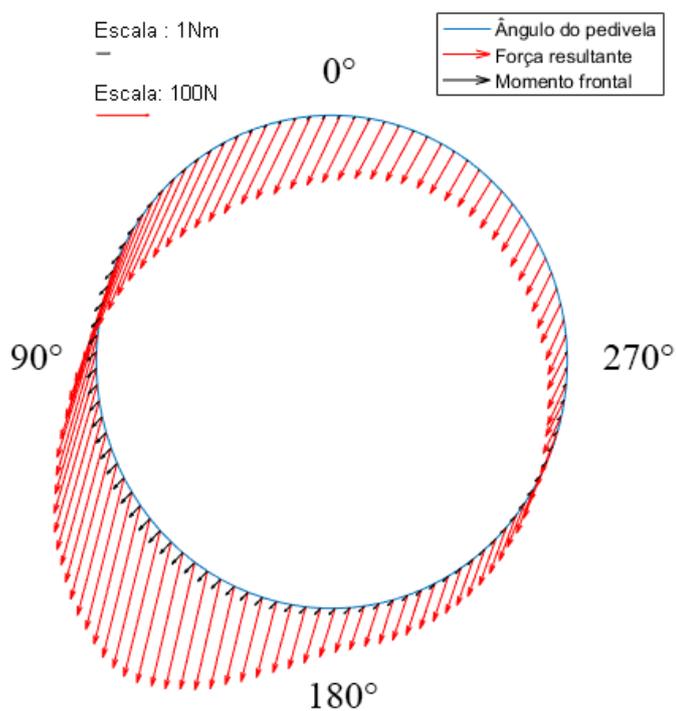
4.6.2 Análise Referentes às Células de Carga com 3 graus de liberdade

Além das informações de posição descritas na Seção anterior, foram também obtidas as informações relacionadas aos esforços (força perpendicular, força frontal

e momento frontal) despendidos pelos voluntários no decorrer dos testes. Tais dados são a base para a determinação de variáveis importantes para o desenvolvimento do movimento de pedalada, a destacar os valores atribuídos aos esforços via funções de transferência experimentais, a potência média exercida, a assimetria bilateral e o índice de efetividade (BINI; CARPES, 2014).

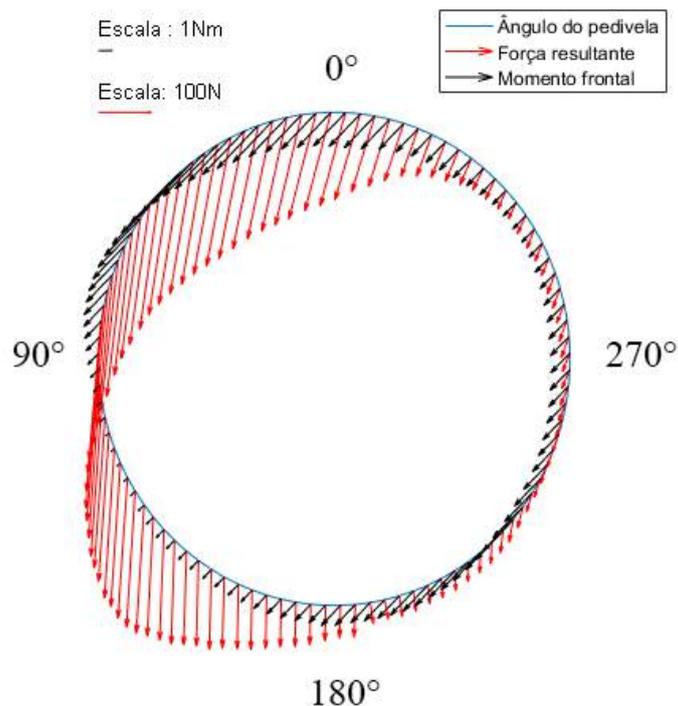
A fim de comparar as ações de cada um dos lados do voluntário, foram geradas as Figuras 105 e 106. O primeiro grupo de figuras dispõe, em um plano X-Y, um ciclo de pedalada no qual consta o ângulo atual, a força resultante e o momento frontal aplicados aos pedais.

Figura 105 – Visualização dos esforços em um ciclo de pedalada - Voluntário 3 - 3DoF.



(a) Lado direito.

Os formatos observados são semelhantes ao disposto na literatura, estando os



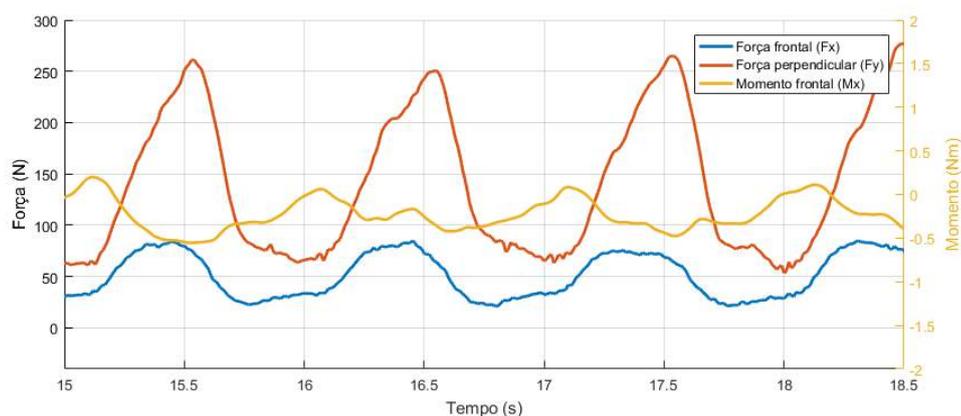
(b) Lado esquerdo.
 Fonte: Elaboração própria.

vetores de maior módulo aglomerados próximo ao ângulo de 90° (KAUTZ *et al.*, 1991; YAMASHITA *et al.*, 2013; BINI; CARPES, 2014). Analisando em detalhe a Figura 105(a), nota-se que há força resultante em todo o perímetro referente ao ciclo, indicando que o voluntário não é capaz de retirar toda a ação de esforço mesmo que esteja na fase de recuperação. Ainda, nota-se que o momento frontal desenvolvido é diminuto, permanecendo próximo a zero em toda a extensão. Passando à Figura 105(b), pode-se observar que há um melhor trabalho de alívio dos esforços durante a fase de recuperação. A componente horizontal de força aparece apenas no primeiro quadrante (0° a 90°), um contraponto ao lado direito no qual está presente em praticamente todo o perímetro. Quanto ao momento, o lado esquerdo mostra um comportamento peculiar: o *offset* da função de transferência em repouso é deslocado,

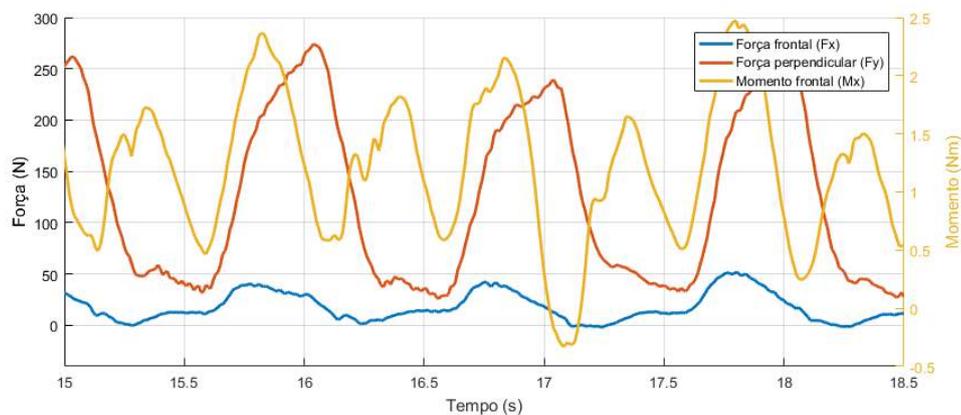
refletindo constante aplicação de momento para dentro (sentido horário do eixo frontal esquerdo), demonstrando variações em torno deste valor. Este resultado é interessante pois indica pronação do pé, característica passível de correção via uso de palmilhas de elevação do arco plantar. Desta forma, é aqui atestado o potencial do sistema para a correção de desvios causados pelo tipo de estrutura do pé, promovendo um movimento de pedalada mais harmônico.

O segundo grupo de figuras apresenta um excerto de uma das rodadas de ensaio, constando os esforços exercidos pelo voluntário no período.

Figura 106 – Visualização dos esforços ao longo do tempo - Voluntário 3 - 3DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria.

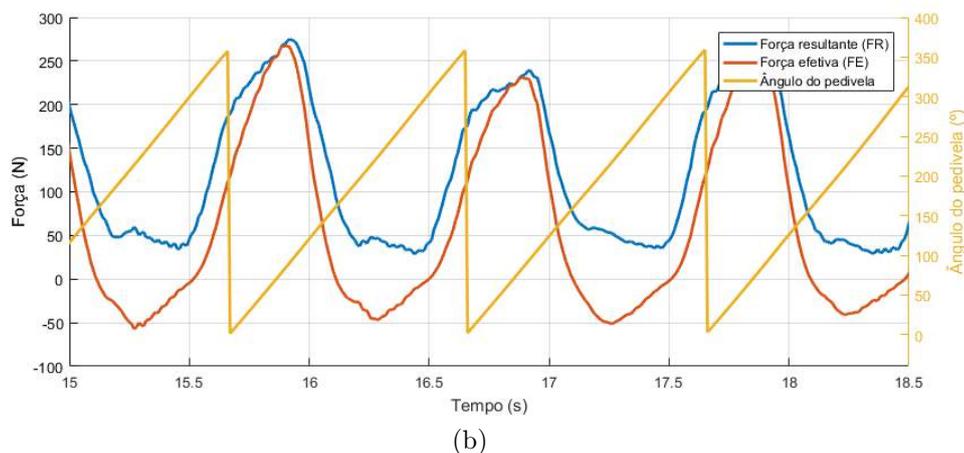
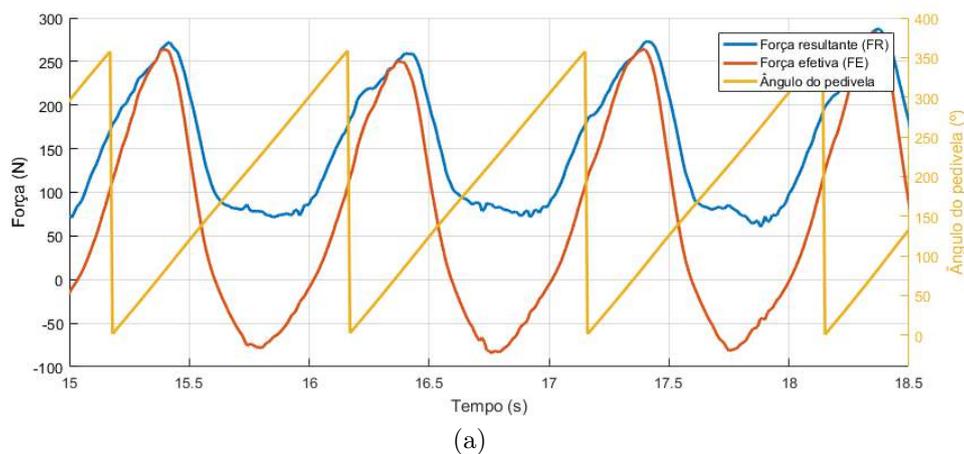
Analisando-se os gráficos, nota-se a antissimetria clássica apresentada na comparação das forças do lado direito e do lado esquerdo (DAVIS; HULL, 1981b; BROKER; GREGOR, 1990; ERICSON; NISELL, 1988; LAZZARI; BALBINOT, 2011; PIGATTO, 2018). No excerto, o voluntário apresentou força perpendicular com picos de $277.1N$ para o lado direito e de $274N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $3,1N$ - e vales de $53,43N$ para o lado direito e de $25,67N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $28,76N$. Portanto, mesmo que os picos sejam de valores similares, os dados demonstram que o esforço do pedal esquerdo é cerca de 50% menor do que no mesmo ponto do movimento para o pedal direito, mais um indicativo de que o ciclista não é capaz de retirar completamente o esforço durante a fase de recuperação (principalmente na perna direita).

Já para a força frontal, são encontrados picos de $84,88N$ para o lado direito e de $51,44N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $33,44N$ - e vales de $20,9N$ para o lado direito e de $-1,20N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $22,1N$. Reflete-se aqui, novamente, a tendência maior do membro direito de manter o esforço aplicado mesmo durante a fase de recuperação.

Considerando a curva para os momentos frontais, são observados picos de $0,2Nm$ para o lado direito e de $2,47Nm$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $2,27Nm$ - e vales de $-0,55Nm$ para o lado direito e de $-0,33Nm$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $0,22Nm$. A magnitude encontrada para a variável é condizente com os resultados relatados anteriormente na literatura (BOYD; HULL; WOOTTEN, 1996) (Figura 18). Aqui, a informação mais relevante é encontrada no claro desvio da linha central do momento para o lado esquerdo, corroborando com a hipótese de ocorrência de pronação.

A fim de aprofundar a análise das forças, foram computadas as forças resultante e efetiva para cada um dos lados. A Figura 107 apresenta tais variáveis para ambos os lados considerados. Desta forma, torna-se possível calcular a assimetria bilateral e a potência associadas ao movimento.

Figura 107 – Visualização das forças relativa e efetiva - Voluntário 3 - 3DoF. a) Lado direito; Lado esquerdo.



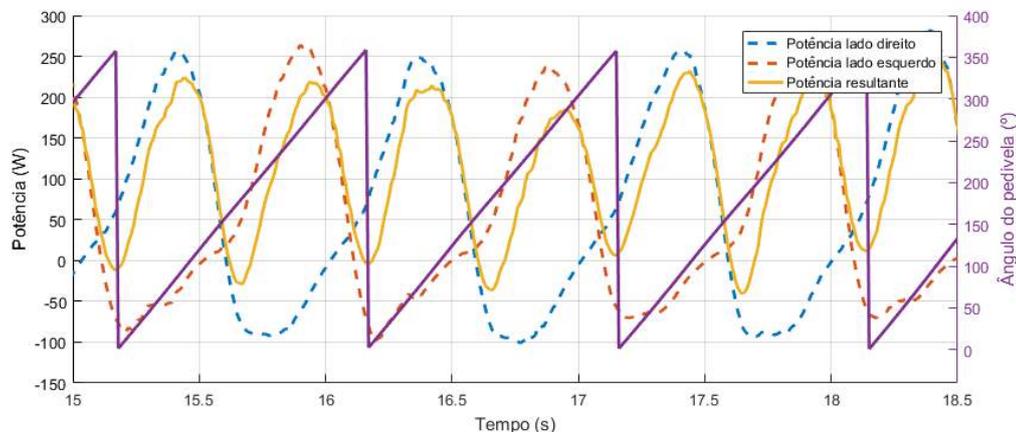
Fonte: Elaboração própria.

A princípio, nota-se a similaridade da forma das curvas - considerada a antissimetria característica do movimento. Também, observa-se a similaridade dos valores de pico (em torno de $250N$ tanto para FR quanto para FE). No entanto, os vales apresentam variação maior, novamente indicando que é exercido maior esforço pela perna direita durante a fase de recuperação.

Para o excerto em questão, as máximas encontradas para as forças efetivas foram de 283,56N para o lado direito e de 269,70N para o lado esquerdo, resultando em uma assimetria bilateral máxima de 4,89%. Com relação às médias considerando 3 ciclos fechados dentro do excerto, a força efetiva foi de 60,90N para o lado direito e de 71,73 para o lado esquerdo, culminando em uma assimetria bilateral média de 15,10%. A métrica está dentro dos resultados avaliados por estudos anteriores. BINI; HUME (2014) relata uma assimetria bilateral entre 9% e 66% quando utilizado um sistema de pedais instrumentados, apresentando valores crescentes à medida em que a potência exigida aumenta (a cadência foi fixada em 90RPM). Já CARPES *et al.* (2008) relata que a assimetria bilateral foi reduzida à medida em que a potência foi incrementada. A inconsistência em relação a tais conclusões deve à extensa gama de fatores que podem afetar a métrica aqui discutida. Parâmetros ergonômicos, por exemplo, são os principais causadores de variabilidade instantânea na assimetria já que a mínima mudança na regulagem dos componentes da bicicleta podem levar a desvios importantes da linha biomecânica do sujeito. Também, o costume do corpo em relação a cargas mais ou menos pesadas gera, a longo prazo, o conforto de atletas com um nível maior a solicitações mais intensas em cadências mais altas, enquanto um ciclista esporádico encontrará conforto em cadências e esforços consideravelmente menores.

Outro ponto importante inerente à aquisição dos esforços está relacionado com a potência desenvolvida pelo ciclista durante o ciclo de pedalada. Assim, a partir da associação da força efetiva com o braço de alavanca oferecido pelo pedivela e a cadência desenvolvida mostrada na Equação (8), calcula-se a potência mecânica instantânea. Desta forma, os resultados são expostos na Figura 108.

Figura 108 – Excerto contendo a potência instantânea - Voluntário 3 - 3DoF.



Fonte: Elaboração própria.

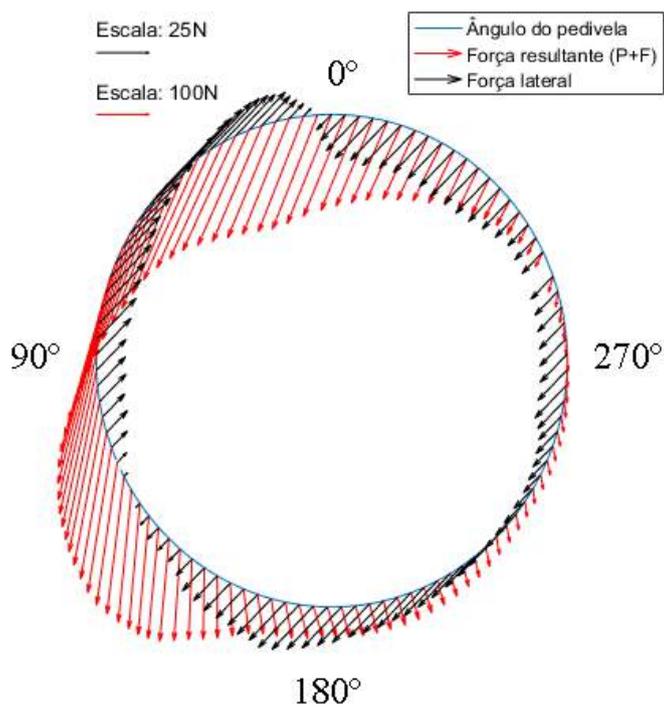
A análise dos dados contidos na Figura 108 revela que a potência máxima desenvolvida em cada lado apresenta relação similar à força efetiva em valores numéricos - $331,63W$ para o direito e $318,07W$ para o esquerdo, resultando em uma discrepância de $13,56W$ - assimetria bilateral máxima de $4,10\%$. O mesmo é observado para os valores mínimos: $-89,52W$ para o lado direito e $-56,04W$ para o lado esquerdo, uma discrepância de $33,48W$. Nota-se que a parte negativa da potência desenvolvida pelo lado direito é consistentemente maior em módulo do que sua contraparte esquerda, o que reduz sua potência média em $5,99W$, já que as potências médias são de $71,25W$ para o lado direito e de $79,50W$ para o lado esquerdo, culminando em uma assimetria bilateral média de $10,37\%$. Ao somar as componentes para a obtenção do valor total desenvolvido, chega-se à potência máxima efetiva de $288,10W$ e à potência média efetiva de $150,77W$, evidenciando as perdas decorrentes das imperfeições da técnica com relação à fase de recuperação do movimento.

4.6.3 Análise Referentes às Células de Carga com 6 graus de liberdade

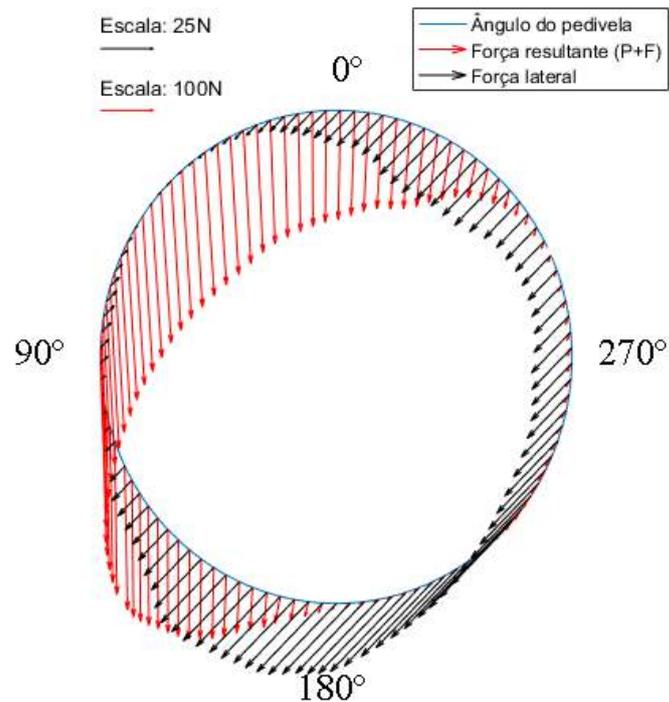
De forma semelhante à realizada com os sinais provenientes dos ensaios realizados para as células com 3 graus de liberdade, foram analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios com voluntários para as células com 6 graus de liberdade.

As Figuras 109(a) e 109(b) apresentam a força resultante (considerada aqui como a combinação das forças frontal e perpendicular) e a força lateral mensuradas pela célula de carga.

Figura 109 – Visualização dos esforços em um ciclo de pedalada - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



(a)



(b)

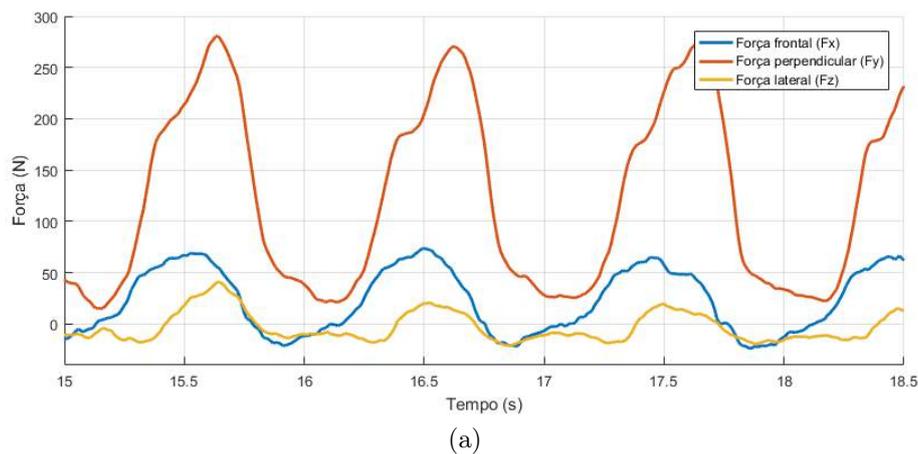
Fonte: Elaboração própria.

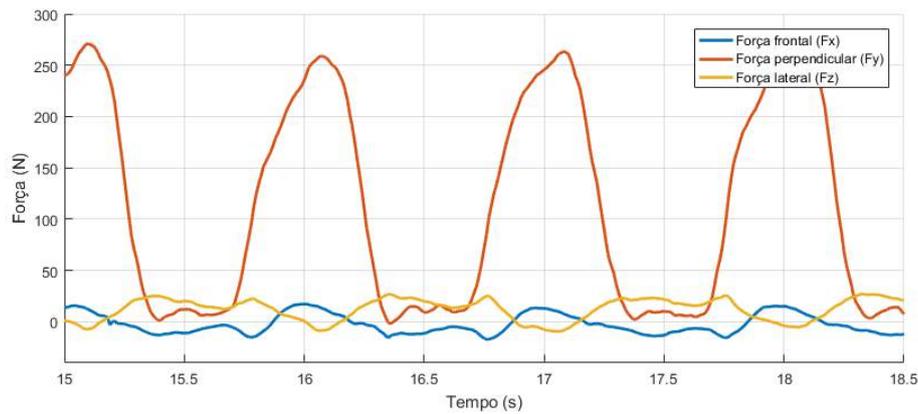
Nota-se que a forma é bastante similar à encontrada para as células de carga com 3 graus de liberdade, sugerindo que as respostas dos dois sistemas são comparáveis em perfil e em valores medidos. Entretanto, relata-se que a força perpendicular contrária ao movimento durante a fase de recuperação para o lado direito revelou-se inferior ao observado na Seção 4.6.2. O comportamento é atribuído a dois possíveis fatores: ou houve diferença de posicionamento do voluntário em relação aos ensaios anteriores, sendo modificada ligeiramente a ação do membro dominante, ou a atuação da força perpendicular foi afetada devido à tradução dos esforços em variáveis elétricas - vale lembrar que foram relatadas dificuldades durante a calibração e isso pode afetar a resposta do sistema. Ainda, destaca-se a alternância da força lateral entre valores positivos e negativos para o lado direito e a permanência

quase integral da grandeza nos valores negativos para o lado esquerdo, que representa a força realizada para dentro. A constatação é interessante pois, quando da análise da célula com 3 graus de liberdade, foi observada a constância do momento frontal para dentro em uma espécie de *offset* e a presença da força lateral para dentro pode ser uma consequência direta disso. Este comportamento culmina em perda marginal de eficiência e provavelmente é gerado a partir da pronação do pé esquerdo, demonstrando que a utilização de palmilhas de correção poderiam trazer algum benefício energético ao ciclista.

A Figura 110 revela, novamente, compatibilidade com as respostas observadas durante os ensaios com as células de carga com 3 graus de liberdade. Contudo, nota-se novamente que os vales da força perpendicular são menos pronunciados em relação às análises anteriores.

Figura 110 – Visualização dos esforços ao longo do tempo - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.





(b)

Fonte: Elaboração própria.

Para o excerto em destaque, considerando a força perpendicular, o voluntário apresentou picos de $280,80N$ para o lado esquerdo e de $271,16N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $9,64N$ - e vales de $15,00N$ para o lado direito e de $-1,84N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $16,85N$. Observa-se que o perfil obtido é bastante similar ao encontrado por PIGATTO *et al.* (2016) - Figura 14. Os resultados corroboram com a afirmação de que o membro dominante falha de maneira sistemática na retirada do esforço durante a fase de recuperação, contribuindo negativamente para o somatório energético.

Considerando a força frontal, os picos encontrados foram de $73,98N$ para o lado direito e de $17,33N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $56,65N$. Em relação aos vales, o lado direito registrou um valor mínimo de $-24,02N$ e o lado direito registrou $-17,07N$ - uma discrepância de $6,95N$. Portanto, novamente, foi detectada a tendência já relatada de aplicação de maior força frontal com o membro dominante para o voluntário em questão. Entretanto, os valores registrados foram consideravelmente inferiores aos encontrados para as células de carga com 3 graus de liberdade, o que mais uma vez pode ser atribuído tanto ao posicionamento do participante quanto às dificuldades de calibração do sistema com 6 graus de

liberdade.

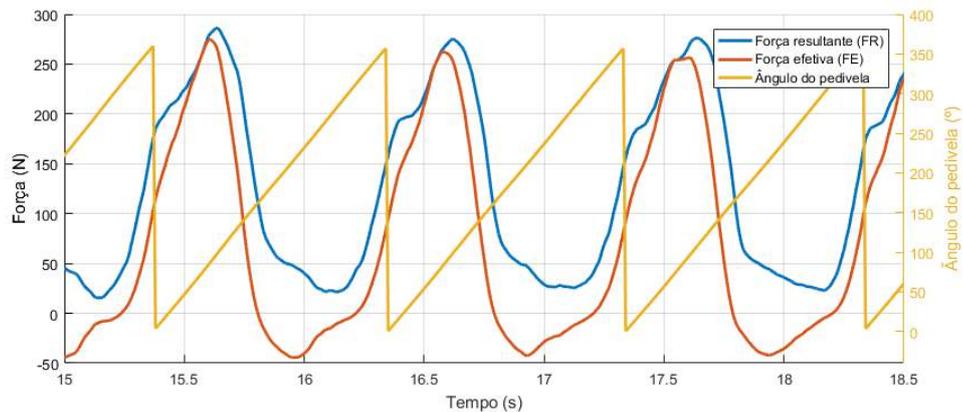
Analisando-se a força lateral, os picos encontrados foram de $41,31N$ para o lado direito e de $27,22N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $14,09N$. Por sua vez, os vales apresentaram valores de $-21,09N$ para o lado direito e de $-9,41N$ para o lado esquerdo - uma discrepância de $11,68N$. Tais resultados revelam que o membro dominante apresentou uma excursão bastante equilibrada entre os sentidos positivo e negativo da força lateral, enquanto o membro não-dominante exerceu força consideravelmente maior no sentido positivo (para dentro). Aprofundando-se a análise, as médias ficaram em $-3,02N$ para o lado direito e em $12,19N$ para o lado esquerdo, revelando que, em um ciclo completo, é desperdiçada mais energia no lado direito com relação à força lateral, apesar de ocorrer uma média mais próxima a zero se comparado ao lado esquerdo. Vale ressaltar que a força lateral não contribui para a manutenção do movimento de pedalada.

A Figura 111 apresenta a FR e a FE para os lados direito e esquerdo durante o excerto já analisado, referenciados aos ângulos do braço esquerdo e direito do pedivela, respectivamente. Primeiramente, no lado direito, nota-se que os picos de força são similares aos obtidos anteriormente com o uso da célula de carga com 3 graus de liberdade. Traçando ainda o paralelo entre os dois modelos de célula de carga, nota-se que fica evidente a ação contra o movimento realizada pelo membro dominante (direito), embora menor do que a manifestada nos ensaios anteriores, durante a fase de recuperação, gerando FE negativa.

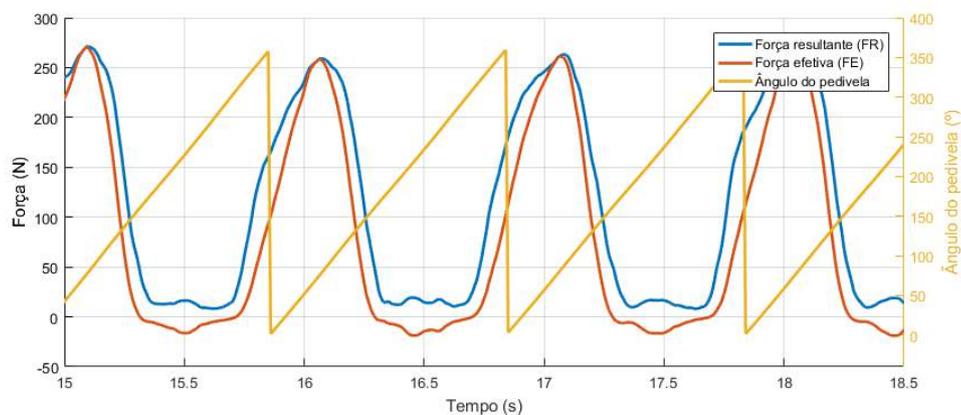
O lado esquerdo apresenta, assim como o lado direito, semelhanças com a forma e os picos obtidos por meio dos ensaios com as células de 3 graus de liberdade. Contudo, fica evidenciada uma presença mais leve de FR positiva durante a fase

de recuperação, refletindo em uma FE negativa menor em módulo em relação ao movimento durante tal fase. Portanto, assim como observado no lado direito, houve diminuição do resíduo de força durante a fase de recuperação. A ocorrência é atribuída aos percalços de calibração que provavelmente terminaram por gerar distorções na captação de esforços (principalmente os relacionados com as pontes Z3 e Z7, diretamente relacionadas à força perpendicular, momento frontal e momento lateral).

Figura 111 – Visualização das forças relativa e efetiva - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



(a)



(b)

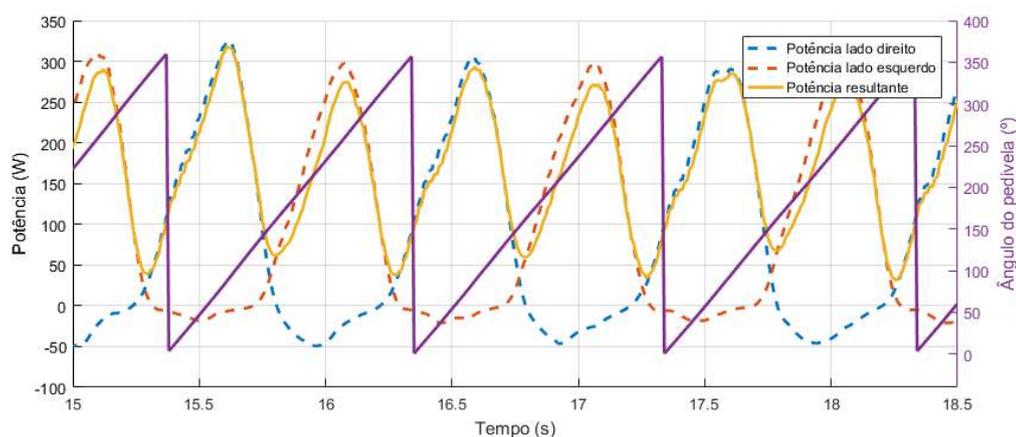
Fonte: Elaboração própria.

Os picos encontrados para FE foram de 274,59 N para o lado direito e de 270,33 N para o lado esquerdo - resultando em uma assimetria bilateral máxima de 1,55%. As

médias apresentaram valores de $70,00N$ para o lado direito e de $80,61N$ para o lado esquerdo - resultando em uma assimetria bilateral média de $13,16\%$. Já para as mínimas, o lado direito apresentou $-44,52N$ e o lado esquerdo apresentou $-18,89N$ - resultando em uma assimetria de $57,57\%$. Os resultados estão em linha com a literatura e com os resultados obtidos nos ensaios anteriores, demonstrando novamente a similaridade entre as respostas dos modelos diferentes de células de carga.

A Figura 112 apresenta as potências instantâneas desenvolvidas por cada lado e a potência resultante dos esforços.

Figura 112 – Excerto contendo a potência instantânea - Voluntário 3 - 6DoF.



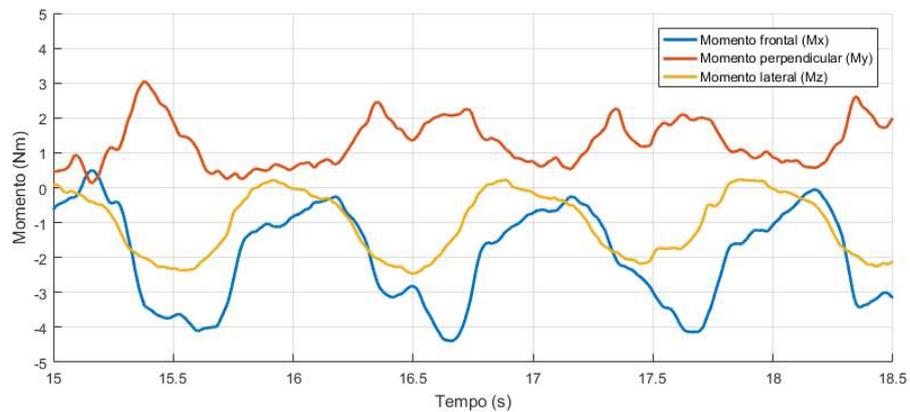
Fonte: Elaboração própria.

É observado que a máxima potência desenvolvida no lado direito foi de $325,49W$ e de $309,49W$ no lado esquerdo - resultando em uma assimetria bilateral máxima de $4,91\%$. As potências mínimas foram de $-50,06W$ no lado direito e de $-21,13W$ no lado esquerdo - resultando em uma assimetria bilateral mínima de $57,79\%$. Com relação às potências médias, foram obtidos os valores de $78,49W$ para o lado direito e de $90,75W$ - resultando em uma assimetria bilateral média de $13,51W$. Em comparação com os valores dos ensaios anteriores, nota-se

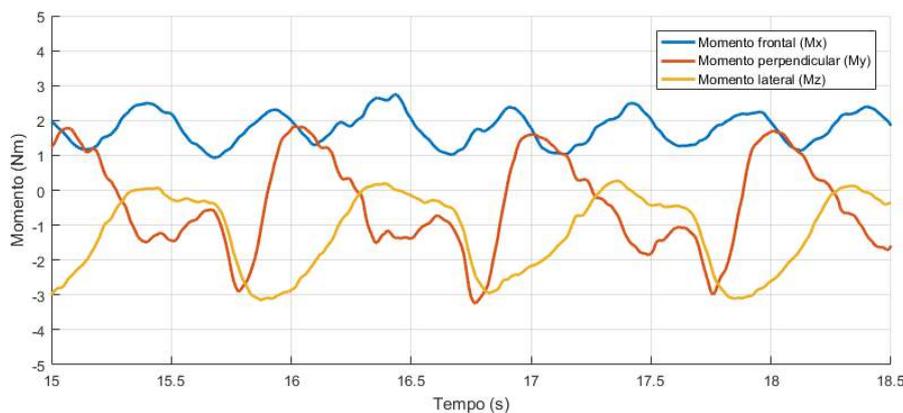
uma redução em módulo das potências mínimas, o que tem relação direta com a minimização do resíduo das forças resultantes durante a fase de recuperação. Desta forma, a força efetiva recebe um ganho considerável. Sobre a potência efetiva total, a máxima no excerto foi de $318,88W$, a mínima foi de $30,90W$ e a média foi de $169,25W$, ou seja, houve um ganho de cerca de $20W$ a $30W$ em relação às potências máxima e média calculadas para as células com 3 graus de liberdade.

A Figura 113 apresenta os momentos obtidos a partir do excerto analisado.

Figura 113 – Visualização dos momentos - Voluntário 3 - 6DoF. a) Lado direito; b) Lado esquerdo.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria.

De maneira geral, os valores obtidos para os momentos estão em linha com os relatados por DAVIS; HULL (1981b)1, (BOYD; HULL; WOOTTEN, 1996) e

por (SMAK; NEPTUNE; HULL, 1999) (como visto nas Figuras 3 e 18). O ponto de comparação mais importante é o comportamento de *offset* similar do momento frontal esquerdo em relação ao que foi observado nos ensaios com a célula de carga com 3 graus de liberdade. No entanto, o comportamento do momento frontal direito mostrou-se com um perfil nada similar ao observado anteriormente: agora, a média fica em torno de $-2Nm$, com valores atingindo $-4Nm$ na fase de propulsão e retornando a valores próximos a $0Nm$ na fase de recuperação, sugerindo uma ação de torção para dentro durante a aplicação de esforços máxima pelo membro dominante.

Analisando-se os demais momentos, nota-se que o momento perpendicular direito é próximo a $0Nm$ durante a fase de propulsão e atinge picos de aproximadamente $3Nm$ durante a fase de recuperação, sugerindo que há perda de alinhamento com o eixo frontal durante a recuperação. O comportamento de tal variável no membro não-dominante é mais variado: são atingidos picos de aproximadamente $2Nm$ durante a fase de propulsão e vales de aproximadamente $-3Nm$ durante a fase de recuperação, sugerindo que há constante rotação em torno do eixo perpendicular quando o ideal seria não haver.

O momento lateral é o que revela maior similaridade entre os lados: durante a fase de propulsão há ocorrência das maiores variações - cerca de $-2Nm$ para o lado direito e cerca de $-3Nm$ para o lado esquerdo. Tal comportamento reflete o surgimento de momento a partir da aplicação dos picos de esforço perpendicular no sistema. Provavelmente, caso fossem exercidos esforços capazes de gerar movimento durante a fase de recuperação ("puxar" os pedais), seria observada uma reversão na tendência, surgindo momentos positivos em ambos os casos.

4.6.4 Análise estatística dos dados

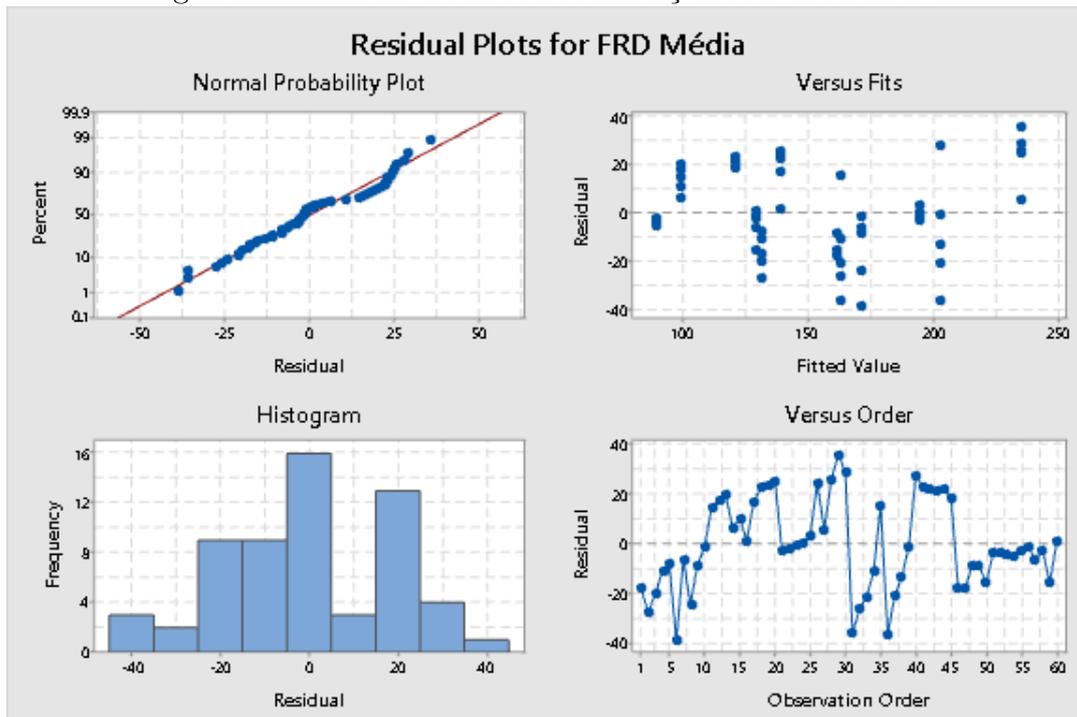
A análise estatística aqui realizada busca validar o projeto de experimentos desenvolvido e a capacidade do sistema de mensurar os esforços realizados pelos participantes independente do tipo de célula de carga utilizada. Decidiu-se, então, por analisar as seguintes variáveis de resposta: forças resultantes, forças efetivas, potência efetiva e assimetria bilateral. Para tal, foi aplicado o método de Análise de Variância (ANOVA) utilizando o *software* Minitab 19 relacionados às médias. Tal teste é exato e realiza uma comparação, inferindo se os fatores controláveis são estatisticamente significantes em relação à variável de resposta.

4.6.4.1 Análise estatística da força resultante

A primeira análise disposta faz referência às forças resultantes para cada lado do sistema considerando as médias dos valores como variáveis de resposta. O fator de significância utilizado foi de 95% ($\alpha = 0,05$).

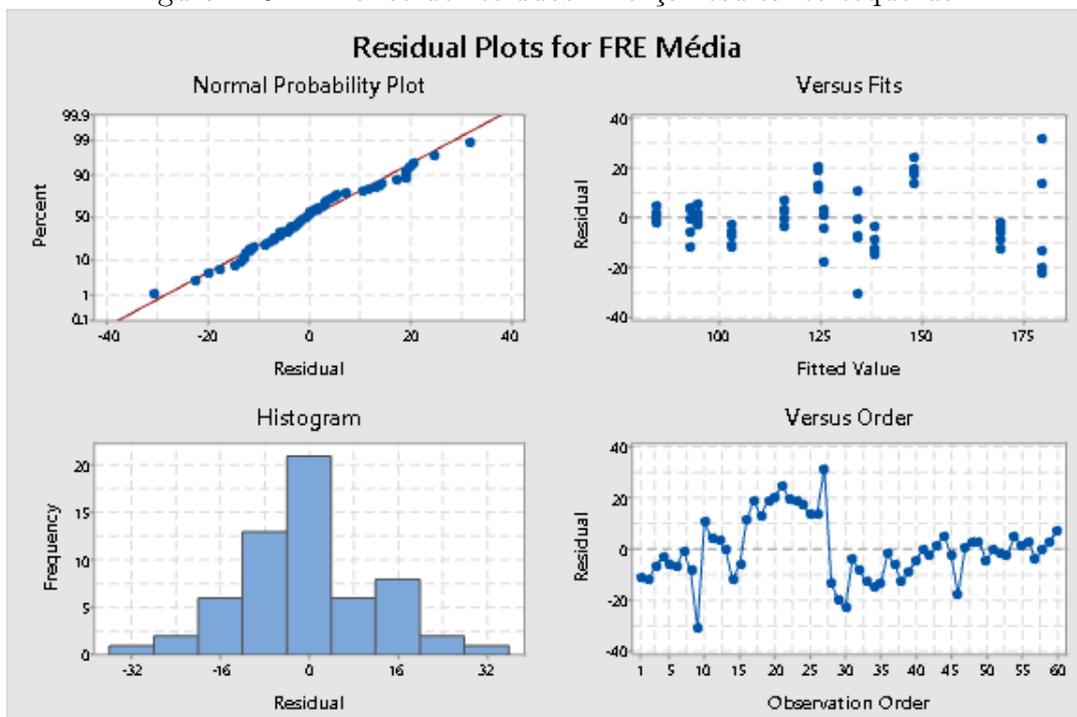
Inicialmente, são analisados os resíduos para inferir se os dados respeitam a premissa de normalidade. As Figuras 114 e 115 apresentam os gráficos referentes a tal análise.

Figura 114 – Análise de resíduos - Força resultante direita.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 115 – Análise de resíduos - Força resultante esquerda.



Fonte: Elaboração própria.

Apesar da quantidade escassa de pares, os resíduos demonstram que os dados

seguem uma tendência normal, já que os pontos não se afastam muito da normal, não apresentam padrões óbvios e formam um histograma aproximadamente normal. Os resultados obtidos para o teste ANOVA estão dispostos na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados da análise estatística para a média das forças resultantes.

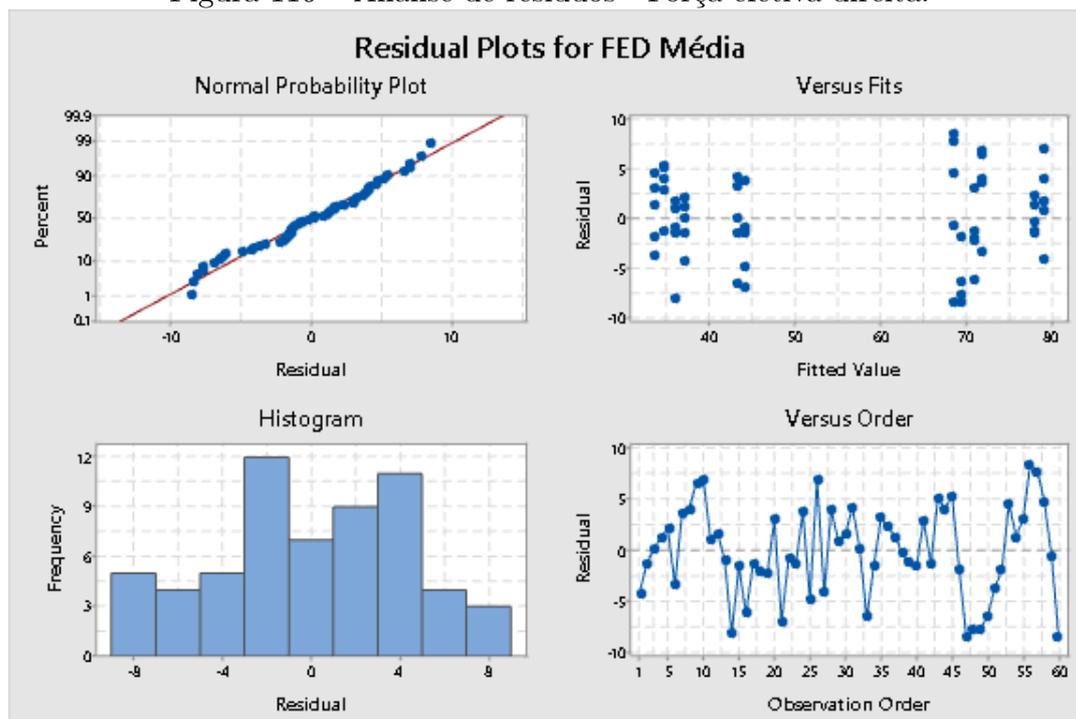
Variável	Voluntário		Peça		Relação		Média	Desvio Padrão
	F	P	F	P	F	P		
FR Dir (N)	89,75	0,000	43,34	0,000	67,70	0,000	153,00	45,55
FR Esq (N)	104,31	0,000	9,35	0,003	91,86	0,000	125,76	31,34

O resultado da ANOVA implica que os 3 fatores controláveis são significativos em relação à variável de resposta. O comportamento era esperado para o fator "voluntário", já que cada sujeito possui características físicas e de técnica bastante desiguais, culminando em médias de força aplicadas diferentes. O mesmo era esperado para o fator "relação", já que a troca de relação de marchas da bicicleta implica em forças diferenciadas para manter a mesma rotação do sistema. Entretanto, esperava-se que o fator "peça" não fosse significativo já que a premissa é que ambos os modelos de células de carga sejam capazes de mensurar o mesmo fenômeno sem que haja diferenças entre eles. O resultado adverso demonstra que as diferenças entre as curvas de força (relatadas na Seção 4.6) geram discrepâncias suficientemente grandes para que as forças resultantes não sejam consideradas iguais se comparados os dois modelos aqui estudados. Atribui-se a ocorrência às diferenças de calibração - principalmente das células com 6 graus de liberdade - , onde os desvios causados pelas incertezas associadas ao posicionamento dos extensômetros e pelo aparato de calibração terminaram por afastar as respostas do sistema.

4.6.4.2 Análise estatística da força efetiva

Seguindo os mesmos passos, realizou-se a análise estatística referente às forças efetivas. As Figuras 116 e 117 apresentam os gráficos para a análise de resíduos das variáveis em questão.

Figura 116 – Análise de resíduos - Força efetiva direita.

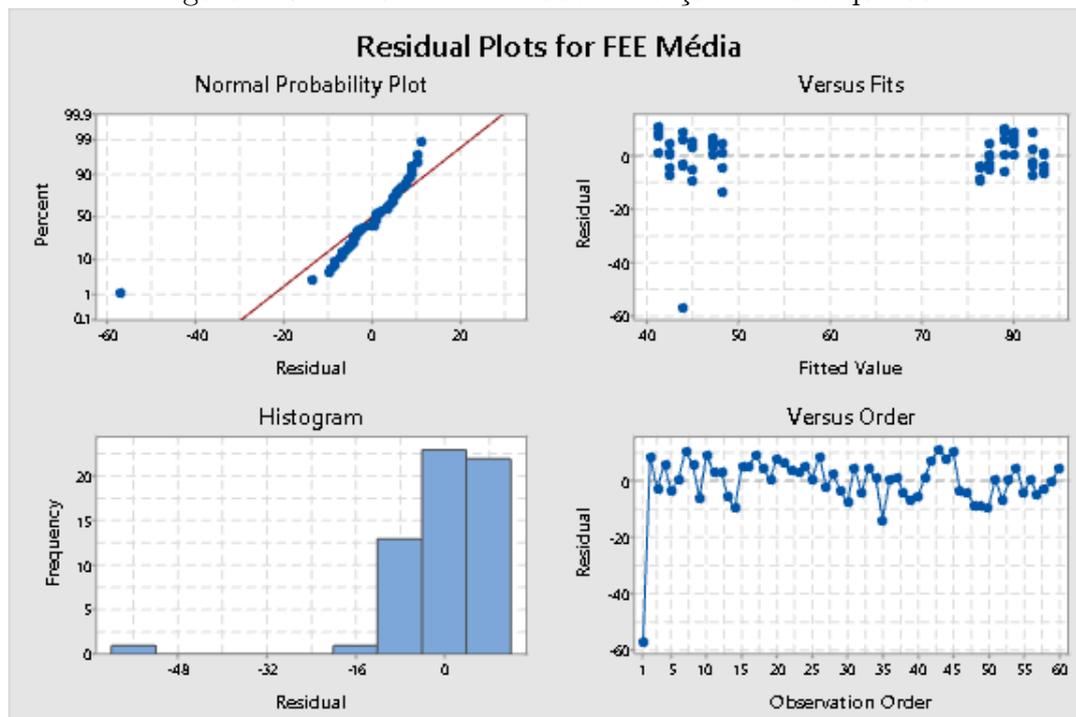


Fonte: Elaboração própria.

A análise dos resíduos revela que as premissas de normalidade são respeitadas - à exceção de um *outlier* ocorrido devido à falta de familiaridade do voluntário com a relação de marchas. É interessante ressaltar a ocorrência de dois agrupamentos maiores no gráfico *Versus Fits* para a FED. Esses *clusters*, por sua vez, são subdivididos em outros dois menores, indício da diferença entre as médias obtidas com os modelos diferentes de célula de carga. O mesmo não ocorre com FED, sendo possível apenas distinguir entre dois *clusters* que indicam a diferença entre as relações utilizadas.

Os resultados obtidos para o teste ANOVA estão dispostos na Tabela 29.

Figura 117 – Análise de resíduos - Força efetiva esquerda.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 29 – Resultados da análise estatística para a média das forças efetivas.

Variável	Voluntário		Peça		Relação		Média	Desvio Padrão
	F	P	F	P	F	P		
FE Dir (N)	23,90	0,000	0,61	0,436	883,67	0,000	55,57	18,52
FE Esq (N)	1,74	0,186	0,18	0,671	189,29	0,000	62,19	20,21

Algumas conclusões importantes são inferidas a partir do teste ANOVA realizado.

Segundo ele, o fator "voluntário" é significativo para o lado direito mas não para o lado esquerdo. O resultado pode indicar que a técnica de pedalada para o membro dominante (no caso todos são destros) com relação à FE é diferenciável, o que não é o caso para a o membro não-dominante. Em um teste adicional, o *outlier* relatado foi excluído da análise, culminando em um valor p de 0,035, o qual descarta a hipótese nula - tornando a FE Esquerda influenciada pelo fator "voluntário". Para que houvesse um melhor entendimento sobre tal nuance, seria de interesse a seleção de voluntários cuja perna esquerda fosse dominante. Desta maneira, seria possível

expandir o panorama acerca da dinâmica entre os dois lados do movimento.

O fator "peça" mostrou-se não significativo em ambos os lados, indicando que não há diferença entre o que as células de carga com 3 graus de liberdade e o que as células de carga com 6 graus de liberdade estão medindo. Desta forma, mesmo que tenham ocorrido problemas durante a calibração, é atestado que ambas as peças são substituíveis em relação às forças efetivas mensuradas.

O fator "relação", como esperado, mostrou-se significativo, já que diferentes marchas exigem diferentes níveis de força efetiva para que o movimento seja mantido.

4.6.4.3 Análise estatística da potência efetiva

Partindo para a análise estatística dos dados relativos à potência efetiva, nota-se que os resíduos (à exceção, novamente, do *outlier*), observados na Figura 118, se comportam de acordo com as premissas de normalidade. No entanto, percebe-se a formação dos *clusters* no gráfico *Versus Fits*, assim como já fora observado na análise de FED. Inclusive, a aparição clara dos agrupamentos deve-se à força efetiva do membro dominante e das diferenças entre os modelos de células de carga.

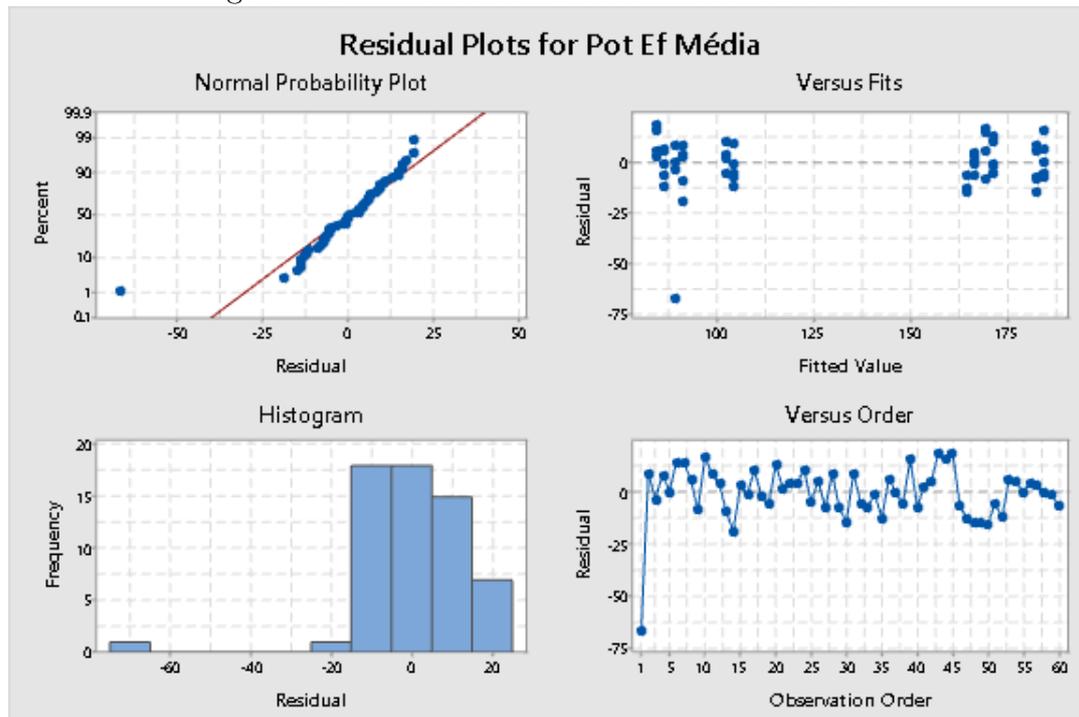
Quanto ao teste ANOVA para o caso, os resultados estão dispostos na Tabela 30.

Tabela 30 – Resultados da análise estatística para a média da potência efetiva.

Variável	Voluntário		Peça		Relação		Média	Desvio Padrão
	F	P	F	P	F	P		
Pot. Efetiva (W)	9,53	0,000	0,26	0,609	543,08	0,000	132,97	43,05

Os resultados do teste ANOVA realizado revelam a significância esperada para todos os fatores controláveis envolvidos. O fator "voluntário" revelou-se significativo, sugerindo que cada um dos sujeitos possui um perfil médio de potência

Figura 118 – Análise de resíduos - Potência efetiva.



Fonte: Elaboração própria.

diferenciado durante o movimento de pedalada. O comportamento é lógico, já que o porte físico, o condicionamento e o costume em relação à ergonomia da bicicleta e ao sistema de encaixe das sapatilhas difere entre os níveis.

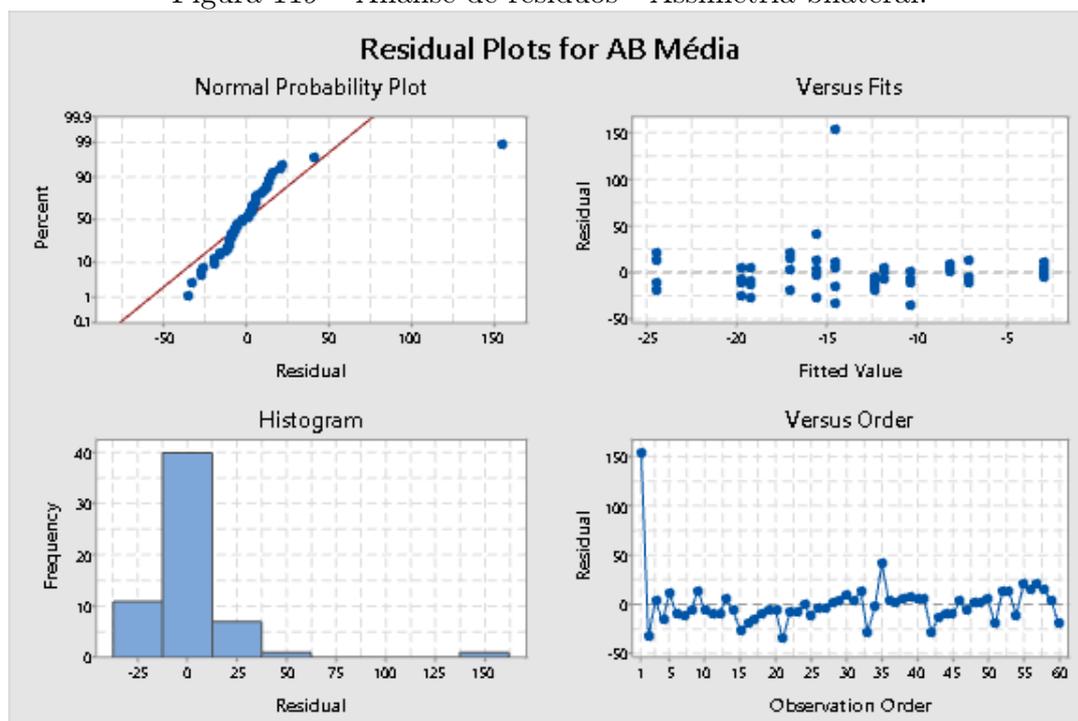
O fator "peça" revelou-se não-significativo, sugerindo que o perfil médio de potência não foi influenciado de maneira significativa pelo modelo de célula de carga empregado. Partindo dessa prerrogativa, infere-se que é possível realizar análises relacionadas à potência efetiva média do indivíduo não importando o modelo de taco instrumentado. No entanto, dada a formação de *clusters* associadas às diferenças entre as variáveis obtidas a partir do membro dominante, é necessário levar isso em conta no ato das comparações.

O fator "relação", novamente, revelou-se significativo. O resultado é o esperado, já que são necessários diferentes níveis de potência para a manutenção do movimento de pedalada a partir da utilização de marchas distintas.

4.6.4.4 Análise estatística da assimetria bilateral média

A análise dos resíduos para a assimetria bilateral média foi feita a partir dos dados presentes na Figura 119.

Figura 119 – Análise de resíduos - Assimetria bilateral.



Fonte: Elaboração própria.

É notável a presença do *outlier* já apontado nas demais análises. Salvo a exceção, é possível afirmar que os dados seguem a premissa da normalidade, destacando a ausência de padrão óbvio dos dados e de correlação entre os pontos.

Os resultados para o teste de ANOVA são observados na Tabela 31.

Tabela 31 – Resultados da análise estatística para a assimetria bilateral média.

Variável	Voluntário		Peça		Relação		Média	Desvio Padrão
	F	P	F	P	F	P		
AB (%)	0,59	0,555	0,62	0,433	1,26	0,266	-13,26	43,05

Os resultados do teste indicam que todos os fatores não possuem significância em relação à variável resposta. O resultado era esperado para o fator "peça" já

que a assimetria bilateral não deve depender do modelo de peça utilizado para a aquisição dos esforços. Entretanto, o comportamento não é o esperado para o fator "voluntário" já que o caso trata de sujeitos com diferentes estaturas e níveis de técnica - inclusive, um resultado assim seria considerado raro mesmo com sujeitos com estaturas e níveis de técnica semelhantes. A partir de uma análise os valores para cada célula, percebeu-se que o *outlier* já citado anteriormente foi suficientemente diferente dos demais valores a ponto de modificar o resultado da ANOVA. O fator "relação" foi apontado, também, como não-significante em relação à assimetria bilateral, sugerindo que ele não influencia significativamente a variável de resposta. É interessante observar que a média para a assimetria bilateral de todos os ensaios foi de $-13,26\%$, evidencia que aponta para uma força efetiva média aplicada pelo membro não-dominante predominantemente maior durante os ensaios, sugerindo que o maior controle do membro dominante reduz a necessidade de aplicação de força para a manutenção do movimento.

Um novo teste de ANOVA foi realizado levando em conta a remoção do *outlier* e das primeiras rodadas para cada uma das combinações - reduzindo o total de amostras para 48. Neste cenário, os fatores "sujeito" ($p - value = 0,019$) e "relação" ($p - value = 0,004$) se mostraram significativos em relação à variável de resposta, sugerindo que (contrário ao que o teste anterior com *outlier* apontou) há diferença entre os sujeitos e que os diferentes níveis de potência exigidos geram assimetrias bilaterais distintas. A não-significância do fator "peça" foi mantida ($p - value = 0,851$), reforçando a intercambialidade entre os modelos de célula de carga.

4.6.4.5 Aglutinação dos resultados

A Tabela 32 aglutina os resultados obtidos a partir das análises estatísticas realizadas.

Tabela 32 – Principais resultados obtidos a partir das análises estatísticas.

FC	VR			
	FR_{Media}	FE_{Media}	PE_{Media}	AB_{Media}
Voluntário	H_1	H_1	H_1	H_1
Tipo de Peça	H_1	H_0	H_0	H_0
Relação de Marchas	H_1	H_1	H_1	H_1

5 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho apresentado ao longo deste documento foi o de construir um sistema capaz de mensurar as forças e os momentos exercidos pelo participante durante o movimento de pedalada utilizando como célula de carga os tacos de encaixe presentes na sapatilha. Assim, foram construídos dois modelos de tacos instrumentados: o primeiro deles, com 3 graus de liberdade, foi pensado para mensurar as forças perpendicular e frontal e o momento frontal; o segundo, com 6 graus de liberdade, foi pensado para mensurar as forças e os momentos. Por meio de pontes de *Wheatstone* com topologias adequadas às diferentes situações, os esforços foram traduzidos em tensões elétricas com o auxílio das funções de transferência experimentais, obtidas por meio da calibração estática. Os extensômetros que compõem as pontes foram posicionados a partir de simulações realizadas em *software*, buscando maximizar a ação das deformações aparentes na variável de saída. Para as células de carga com 3 graus de liberdade, o maior erro de linearidade encontrado foi de 2,35%. Para as células de carga com 6 graus de liberdade, o maior erro de linearidade encontrado foi de 4,73%. Atribui-se a magnitude do erro às incertezas associadas ao engaste utilizado e ao posicionamento dos sensores durante a cimentação, que acabaram por prejudicar o processo de calibração do sistema. Portanto, é recomendável que haja, em oportunidades futuras, uma revisão da calibração para ambos os sistemas, mitigando os percalços encontrados neste estudo.

A utilização de um sistema de cinematria capaz de captar o movimento de pedalada em sua integralidade permitiu a determinação de variáveis importantes

como as posições angulares do conjunto pedal-pedivela. Desta forma, abriu-se a possibilidade de cálculo da cadência instantânea, das forças efetivas e da potência efetiva para cada um dos voluntários. A análise dos dados obtidos a partir dos ensaios revelou que o perfil obtido para os esforços a partir de ambos os modelos de célula de carga foi semelhante em um panorama macro. Algumas nuances dos sinais apresentaram diferenças, com destaque para diferenças de magnitude e principalmente dos vales da força perpendicular obtidos a partir do membro dominante - o que influenciou os valores da força efetiva final. Atribui-se o ocorrido ao processo de calibração, sendo reforçada a necessidade da obtenção de maquinário mais adequado para a tarefa a fim de mitigar os desequilíbrios que levam a distorções dos sinais do sistema.

Para validar o sistema, três participantes realizaram 20 rodadas cada com dois fatores controláveis: "peça" - levando em conta o modelo de célula de carga utilizado - e "marcha" - levando em conta a relação de marchas utilizada. A análise estatística buscou investigar a similaridade entre os modelos de células de carga implementados e sua eventual intercambialidade. Os resultados apontaram que, considerando um cenário de potências e de forças efetivas médias, é possível a consideração de ambas as peças sem prejuízo. Entretanto, em um cenário de análise de nuances, as peças se mostraram um fator significativo para as forças resultantes, reforçando a diferença obtida em relação às magnitudes e aos vales. Ainda, a análise estatística indicou que os fatores "voluntário" e "relação" são significativos em quase todos os casos, sugerindo que cada um dos voluntários possui características de aplicação de esforços distintas e que a relação de marchas influencia diretamente a magnitude destes esforços. As exceções ocorreram para a FE esquerda, em um indício de que os

participantes utilizam seus membros não-dominantes de maneira similar, e para a assimetria bilateral, sugerindo que ambos os fatores "voluntários" e "relação" não seriam significativos. A suspeita para tal comportamento recaiu sobre o *outlier*. Um novo teste ANOVA foi realizado com a retirada do ponto fora da curva, revelando agora a significância para os mesmos fatores. Recomenda-se a execução, juntamente com o aperfeiçoamento da calibração, do aumento da base de dados para melhor distinção dos efeitos dos fatores para o cenário estudado.

Se retomada a Tabela 1, nota-se que o presente trabalho apresenta uma clara vantagem em relação ao seu par (YAMASHITA *et al.*, 2013) que também trata de tacos instrumentados tanto no quesito graus de liberdade quanto nas formas de transmissão de dados. Quanto ao restante, pode-se afirmar que o presente trabalho é mais vantajoso quanto ao tipo de peça, permitindo maior agilidade e praticidade devido à facilidade de troca entre bicicletas. Em termos de graus de liberdade, DAVIS; HULL (1981b), BOYD; HULL; WOOTTEN (1996) e NABINGER (2006) se equiparam, mas todos possuem comunicação dependente de cabos - o que restringe o conforto e a praticidade. No quesito transmissão de dados, pode-se afirmar que BALBINOT; MILANI; NASCIMENTO (2014) e os sistema Zone DPMX, por contarem com protocolos mais abertos, levam vantagem nesse quesito. Quanto à medição de ângulos, os sistemas contando com unidades inerciais e *encoders* obtêm maior vantagem já que não dependem de um aparato fixo de câmeras para realizar as medições.

O protótipo construído mostrou-se capaz de mensurar os parâmetros relacionados ao movimento de pedalada, oferecendo ferramentas importantes para a melhora de desempenho e de ergonomia dos usuários do sistema.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS

FUTUROS

Ao longo do projeto, vários pontos passíveis de melhoria foram identificados. Eles serão dispostos na sequência. Vale ressaltar que a grande maioria das recomendações seriam factíveis em um cenário sem acesso controlado às dependências do laboratório.

- Melhoria da calibração e da validação do sistema: durante o desenvolvimento do estudo, enfrentou-se dificuldades relacionadas à calibração de ambas as peças. A fim de melhorar a performance do sistema e afinar a intercambialidade dos sensores, a construção de uma nova máquina de calibração, levando em conta engastes que repliquem a dinâmica do pedal, é fortemente recomendada;
- Aumento da base de dados para validação do sistema: a fim de aumentar o espaço amostral, recomenda-se a convocação de um número superior de voluntários - principalmente de voluntários canhotos. Tal medida permitiria a obtenção de um panorama mais completo sobre a assertividade do sistema desenvolvido. Entra aqui, também, a possibilidade de incluir mais fatores controláveis envolvendo cadência alvo, níveis de frenagem e relação de coroas da bicicleta;
- Comparação entre os sistemas desenvolvidos anteriormente: com o intuito de aprofundar a validação do sistema e de suas duas variantes, seria interessante a realização de ensaios utilizando sistemas comerciais e não-comerciais disponíveis;

- Adição de marcadores fisiológicos: buscando ampliar o escopo do projeto, seria interessante a inclusão de marcadores fisiológicos como frequência cardíaca e frequência de respiração, por exemplo. Tal medida seria um passo na direção da construção de um sistema de dados orientado à aferição de capacidade física e de técnica de pedalada, permitindo a avaliação de ciclistas com diferentes objetivos e de diferentes níveis;
- Propor um protocolo unificado de ensaios com o intuito de avaliar ferramentas voltadas à biomecânica do ciclismo, padronizando os resultados e facilitando a comparação entre diferentes sistemas.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, L. B. *et al.* All-Cause Mortality Associated With Physical Activity During Leisure Time, Work, Sports, and Cycling to Work. **Archives of Internal Medicine**, v. 160, n. 11, p. 1621, June 2000.

ARUIN, A. S.; ROGERS, K. **Biomechanics**. Encyclopædia Britannica, 2013.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação E Fundamentos de Medidas. Volume 2**. 3rd. ed. Grupo Gen-LTC, 2019.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação E Fundamentos de Medidas. Volume 1**. 3rd. ed. Grupo Gen-LTC, 2019.

BALBINOT, A.; MILANI, C.; NASCIMENTO, J. A New Crank Arm-Based Load Cell for the 3D Analysis of the Force Applied by a Cyclist. **Sensors**, v. 14, n. 12, p. 22921–22939, Dec. 2014.

BERNARD, J.; MERCIER, M. **Bicycle pedal and shoe fastening combination**. 1987. n. U.S. Patent US4686867A.

BIBBO, D. *et al.* A Novel Technique to Design and Optimize Performances of Custom Load Cells for Sport Gesture Analysis. **Irbm**, v. 40, n. 4, p. 201–210, 2019.

BINI, R.; CARPES, F. **Biomechanics of Cycling**. Springer International Publishing, 2014.

BINI, R. R.; HUME, P. A. Assessment of Bilateral Asymmetry in Cycling Using a Commercial Instrumented Crank System and Instrumented Pedals. **International Journal of Sports Physiology and Performance**, v. 9, n. 5, p. 876–881, Sept. 2014.

BOYD, T.; HULL, M.; WOOTTEN, D. An improved accuracy six-load component pedal dynamometer for cycling. **Journal of Biomechanics**, v. 29, n. 8, p. 1105–1110, Aug. 1996.

BROKER, J. P.; GREGOR, R. J. A Dual Piezoelectric Element Force Pedal for Kinetic Analysis of Cycling. **International Journal of Sport Biomechanics**, v. 6, n. 4, p. 394–403, Nov. 1990.

Brüel & Kjaer. **Piezoelectric Accelerometers Miniature Triaxial DeltaTron Accelerometers Types 4520, 4520-001 and 4520-004**. Brüel & Kjaer, 2008.

BURT, P. **Bike fit**: the ultimate guide to cycling performance and injury avoidance. Bloomsbury, 2014.

CARPES, F. P. *et al.* During an incremental exercise cyclists improve bilateral pedaling symmetry. **Brazilian journal of biomotricity**, v. 2, n. 3, p. 155–159, 2008.

CHAVET, P.; LAFORTUNE, M.; GRAY, J. Asymmetry of lower extremity responses to external impact loading. **Human Movement Science**, v. 16, n. 4, p. 391–406, June 1997.

DAVIS, R.; HULL, M. Measurement of pedal loading in bicycling: II. analysis and results. **Journal of Biomechanics**, v. 14, n. 12, p. 857–872, Jan. 1981.

- DAVIS, R.; HULL, M. Measurement of pedal loading in bicycling: i. instrumentation. **Journal of Biomechanics**, v. 14, n. 12, p. 843–855, Jan. 1981.
- ERICSON, M. O.; NISELL, R. Efficiency of pedal forces during ergometer cycling. **International journal of sports medicine**, v. 9, n. 02, p. 118–122, 1988.
- FRANCO, S. **Design with operational amplifiers and analog integrated circuits**. McGraw-Hill Education, 2015.
- FROST, R. **Applied kinesiology**: a training manual and reference book of basic principles and practices. North Atlantic Books, 2013.
- GHARGHAN, S. K.; NORDIN, R.; ISMAIL, M. Development and validation of a track bicycle instrument for torque measurement using the ZigBee wireless sensor network. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, 2017.
- GLASKIN, M. **Cycling science** : how rider and machine work together. Chicago LondonThe University of Chicago Press, 2012.
- GUM. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. Saint-Cloud, FRBIPM, 2008. (Standard 1).
- HAYKIN, S. **Signals and systems**. New YorkWiley, 2002.
- HBM. **Strain Gauges Catalog**. 2016.
- HERLIHY, D. **Bicycle** : the history. New HavenYale University Press, 2004.
- HOFFMAN, S. J.; KNUDSON, D. V. **Introduction to kinesiology**: studying physical activity. Fifth edition. ed. Human Kinetics, 2018.

HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurement Using Strain Gages.**

Hottinger Baldwin, 1989.

HU, S. *et al.* Design of a Novel Six-Axis Wrist Force Sensor. **Sensors**, v. 18, n. 9, p. 3120, Sept. 2018.

HUSKEN, M. **Instrumentação dos Pedais de uma Bicicleta de Estrada como Proposta para Análise da Força Aplicada.** 2018. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) - UFRGS, 2018.

KAUTZ, S. A. *et al.* The Pedaling Technique of Elite Endurance Cyclists: changes with increasing workload at constant cadence. **International Journal of Sport Biomechanics**, v. 7, n. 1, p. 29–53, Feb. 1991.

KEBEDE, G. A. *et al.* Decoupled six-axis force–moment sensor with a novel strain gauge arrangement and error reduction techniques. **Sensors (Switzerland)**, v. 19, n. 13, p. 5–9, 2019.

LAZZARI, C. D.; BALBINOT, A. Wireless Crankarm Dynamometer for Cycling. **Sensores & Transducers**, v. 128, n. 5, p. 39–54, 2011.

LEGACKI, S. G. **Types of bike pedals:** a user's guide for all levels. Active.com, 2017.

MINETTI, A. E.; PINKERTON, J.; ZAMPARO, P. From bipedalism to bicyclism: evolution in energetics and biomechanics of historic bicycles. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 268, n. 1474, p. 1351–1360, July 2001.

NABINGER, E. **Análise Dinamométrica Tridimensional da Pedalada de Ciclistas**. 2006. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) - UFRGS, 2006.

PIGATTO, A.; BALBINOT, A. **Studies in Computational Intelligence - Computational Intelligence for Pattern Recognition**. Springer International Publishing, 2018. 227–252 p.

PIGATTO, A. V. **Proposta de desenvolvimento de um protótipo para análise da técnica de pedalada apresentada por ciclistas**. 2018. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) - UFRGS, 2018.

PIGATTO, A. V. *et al.* A new crank arm based load cell, with built-in conditioning circuit and strain gages, to measure the components of the force applied by a cyclist. *In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY, EMBS, 2016. Proceedings [. . .]* 2016. v. 2016-Octob, p. 1983–1986.

PRICE, D.; DONNE, B. Effect of variation in seat tube angle at different seat heights on submaximal cycling performance in man. **Journal of Sports Sciences**, v. 15, n. 4, p. 395–402, Jan. 1997.

RANKIN, W. G. **Toe clip for bicycle pedals**. 1890. n. U.S. Patent US425697A.

SCHICKL, L. *et al.* Development of a Six-Axis Force and Torque Sensor for the Humanoid Robot Sweaty 2.0 Development of a Six-Axis Force and Torque Sensor for the Humanoid. *In: IEEE-RAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS CANCUN, 16., 2016. Proceedings [. . .]* 2016.

SCHMIDT, A. **Competitive cycling**. Meyer & Meyer Sport, 2014.

SHARP, A. **Bicycles & tricycles: an elementary treatise on their design and construction, with examples and tables**. Longmans, Green, 1896.

SHIMANO, B.; ROTH, B. On Force Sensing Information and Its Use in Controlling Manipulators. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 10, n. 11, p. 119–126, 1977.

SMAK, W.; NEPTUNE, R.; HULL, M. The influence of pedaling rate on bilateral asymmetry in cycling. **Journal of biomechanics**, v. 32, n. 9, p. 899–906, 1999.

SOVNDAL, S. **Cycling anatomy**. Second edition. ed. Champaign, IL Human Kinetics, 2020.

STRAW, A. H.; KRAM, R. Effects of shoe type and shoe–pedal interface on the metabolic cost of bicycling. **Footwear Science**, v. 8, n. 1, p. 19–22, Jan. 2016.

SUN, Y. *et al.* Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot. **Measurement**, v. 65, p. 135–148, Apr. 2015.

TEKTRONIX. **Manual do osciloscópio DMM 4050**. Tektronix, 2012. n. 1. Rev. 3.

TI. **Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter**. Texas Instruments, 2013. n. ADS1256.

TI. **TLV1117 Adjustable and Fixed Low-Dropout Voltage Regulator**. Texas Instruments, 2014. n. TLV1117.

TI. **TLVx333 CMOS Operational Amplifiers Zero-Drift Series**. Texas Instruments, 2015. n. TLV4333.

TI. **REF30xx 50-ppm/oC Max, 50-uA, CMOS Voltage Reference in SOT-23-3**. Texas Instruments, 2018. n. REF30XX.

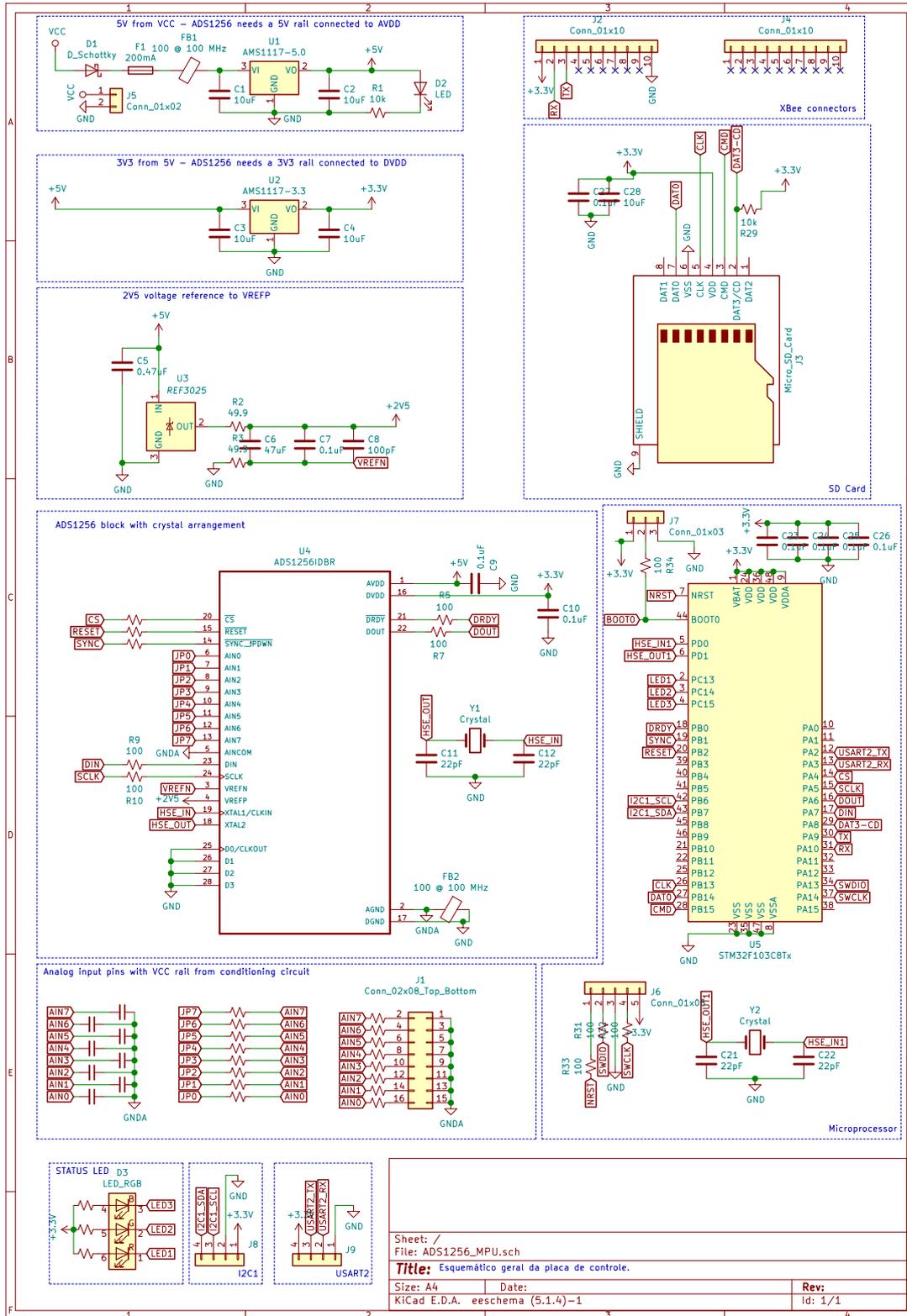
TI. **OPAx187 0.001-uV/oC Drift, Low Power, Rail-to-Rail Output 36-V Operational Amplifiers Zero-Drift Series**. Texas Instruments, 2020. n. OPA4187.

TI. **INA826 Precision, 200- μ A Supply Current, 3-V to 36-V Supply Instrumentation Amplifier With Rail-to-Rail Output**. Texas Instruments, 2020. n. INA826.

YAMASHITA, K. *et al.* Visualization of Pedaling Technique Using Cleat-size Biaxial Load Cells. **Procedia Engineering**, v. 60, p. 415–421, 2013.

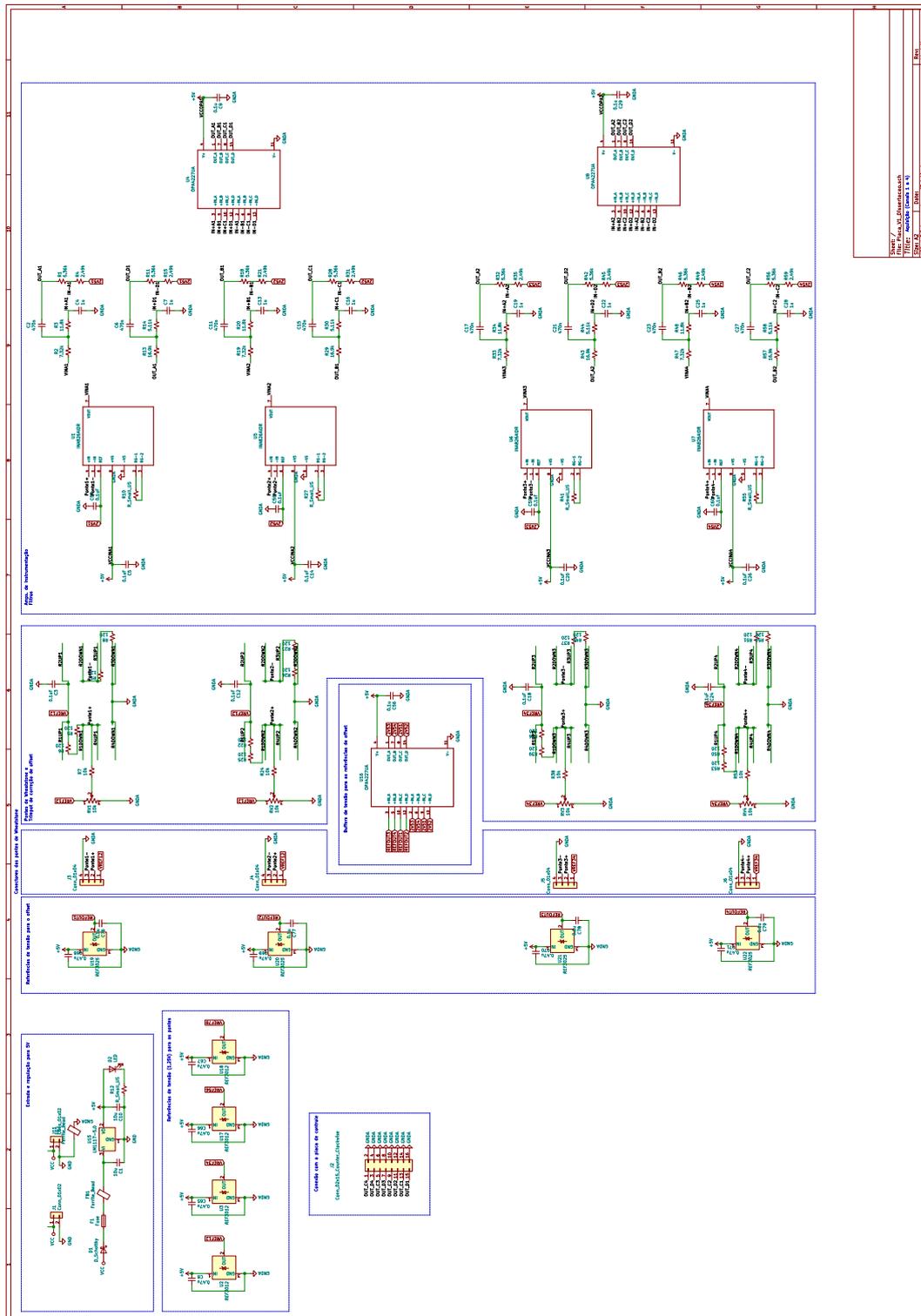
ZIPPY. **Specifications for Zippy Flightmax 1000mAh 11.1V 25c LiPo Pack**. Zippy, 2016.

APÊNDICE A PCB DE CONTROLE



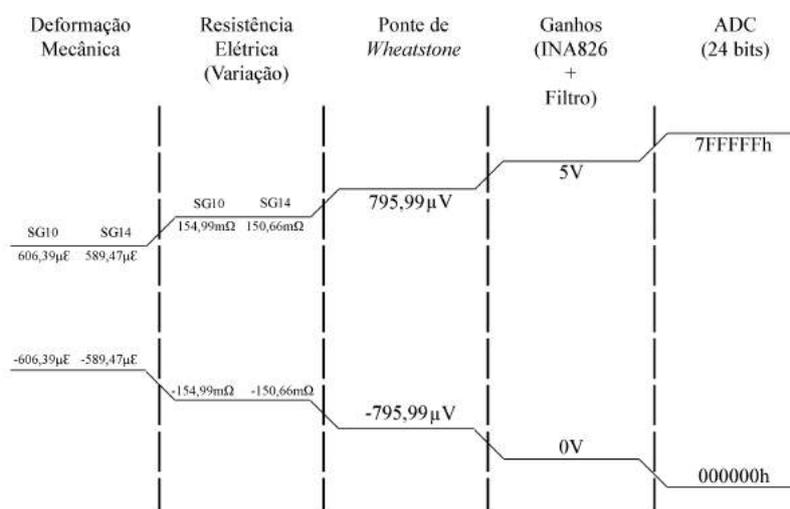
Sheet: /
 File: ADS1256_MPU.sch
Title: Esquemático geral da placa de controle.
 Size: A4 Date:
 KICad E.D.A. eeschema (5.1.4)-1 **Rev:**
 Id: 1/1

APÊNDICE B PCB AQUISIÇÃO (CANAIS 1 A 4)



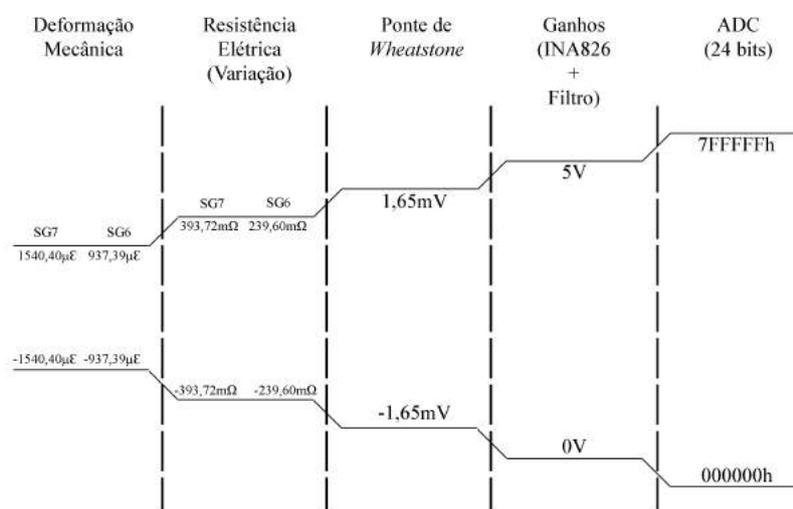
APÊNDICE C CADEIAS DE MEDIDAS TEÓRICAS - 6DOF

Figura 120 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z2 - 6DoF.



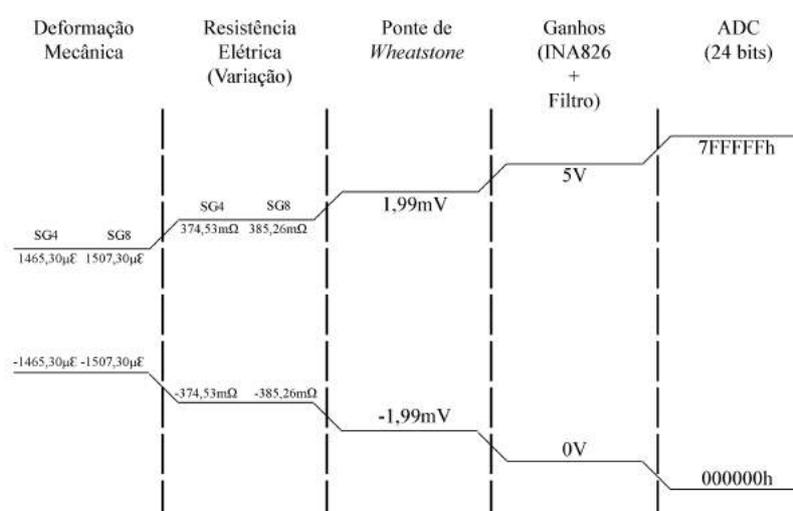
Fonte: Elaboração própria.

Figura 121 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z3 - 6DoF.



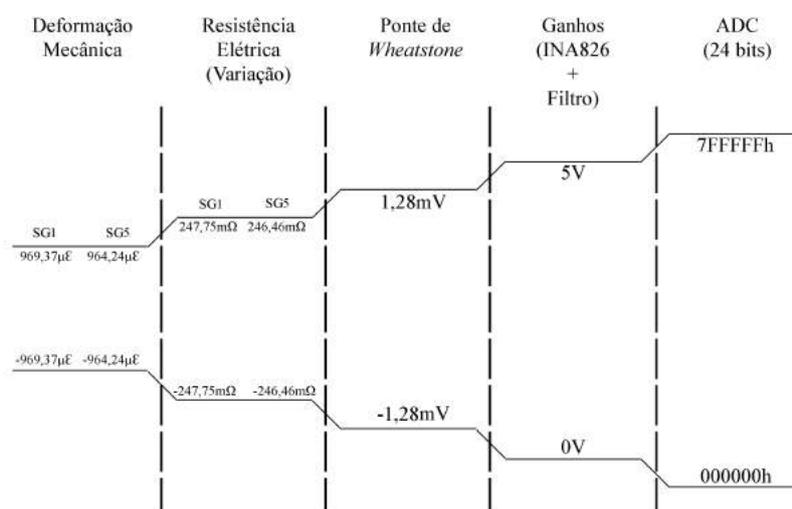
Fonte: Elaboração própria.

Figura 122 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z4 - 6DoF.



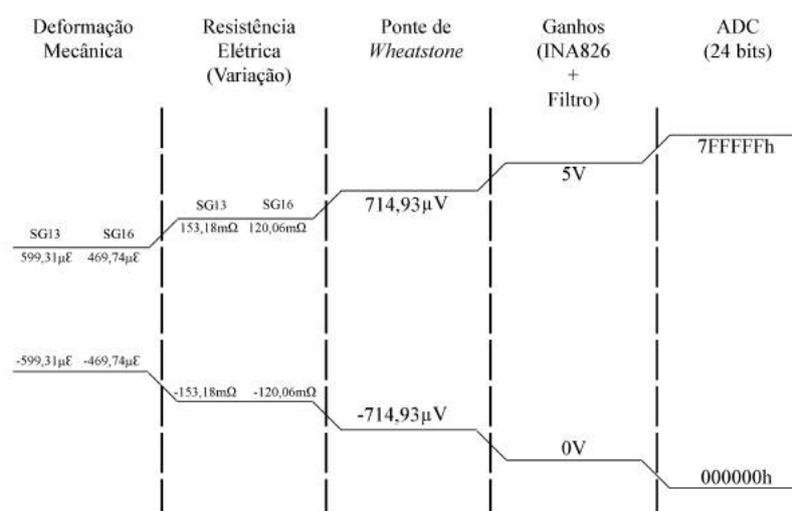
Fonte: Elaboração própria.

Figura 123 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z5 - 6DoF.



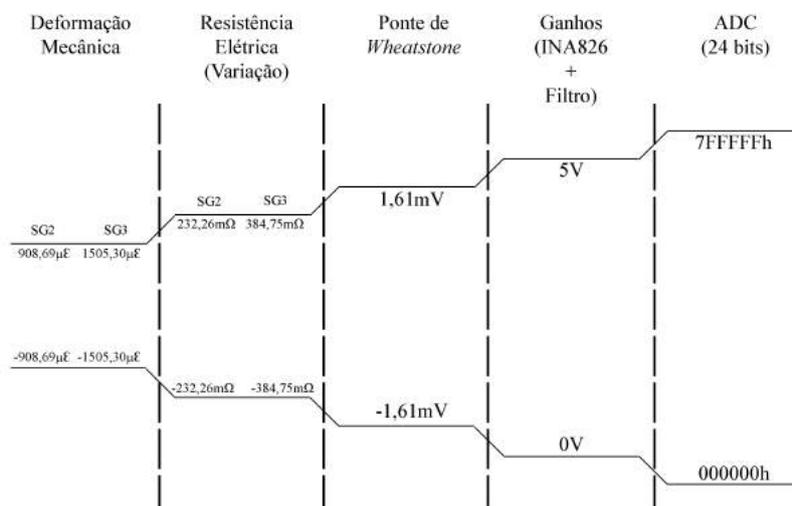
Fonte: Elaboração própria.

Figura 124 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z6 - 6DoF.



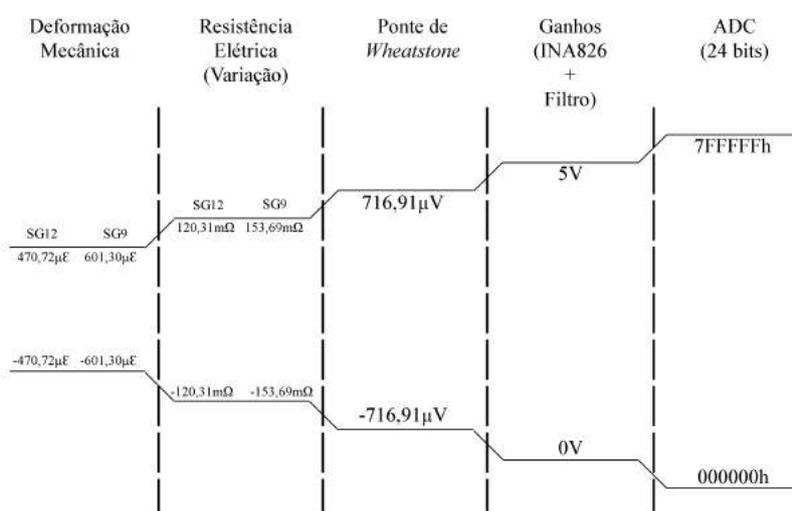
Fonte: Elaboração própria.

Figura 125 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z7 - 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

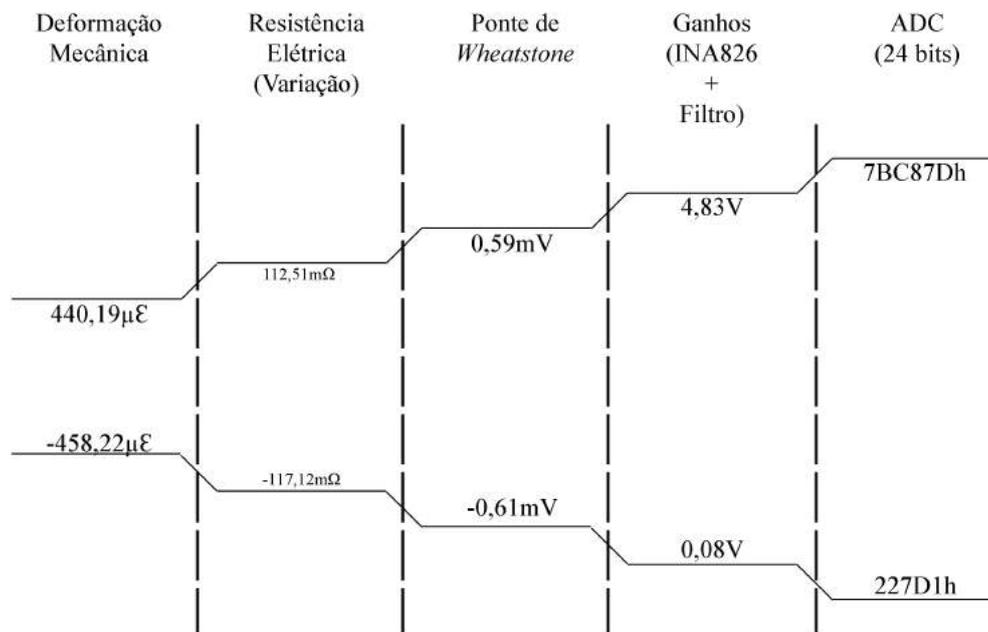
Figura 126 – Cadeia de medidas teórica para a ponte Z8 - 6DoF.



Fonte: Elaboração própria.

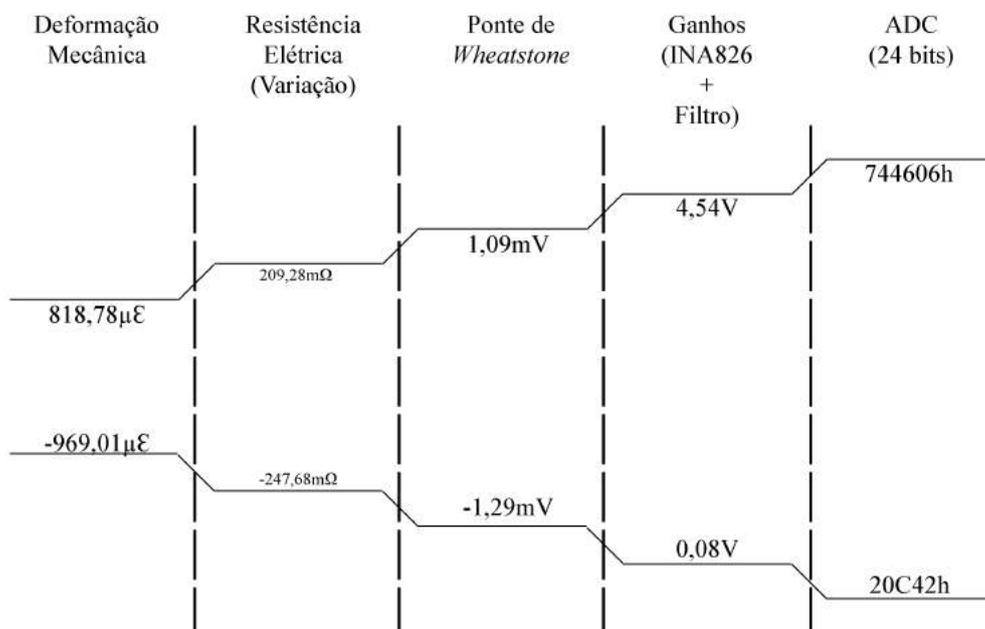
APÊNDICE D CADEIAS DE MEDIDAS EXPERIMENTAIS - 6DOF

Figura 127 – Cadeia de medida experimental - Z2 - Pé direito.



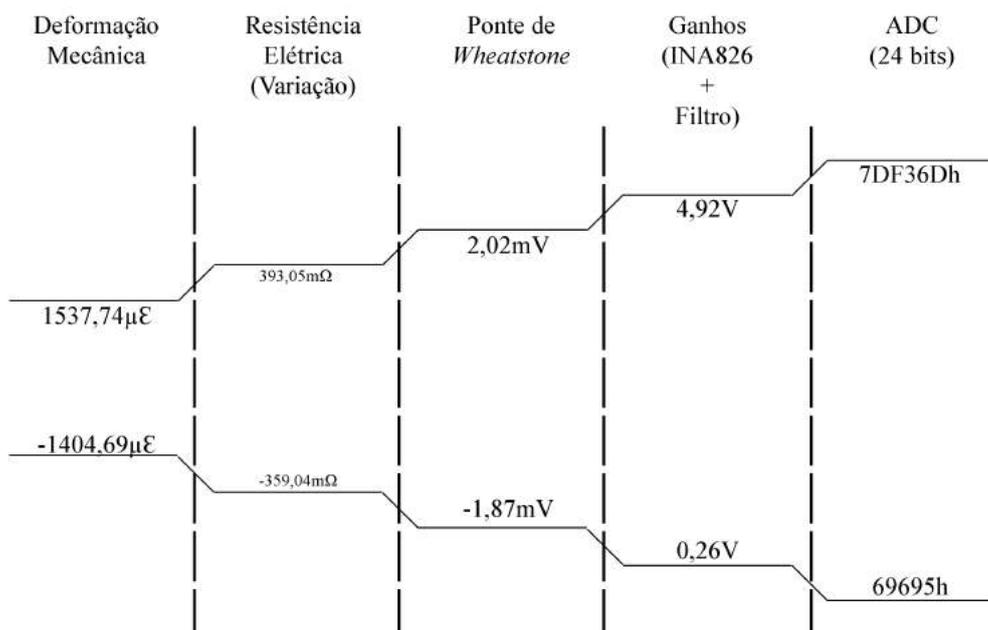
Fonte: Elaboração própria.

Figura 128 – Cadeia de medida experimental - Z3 - Pé direito.



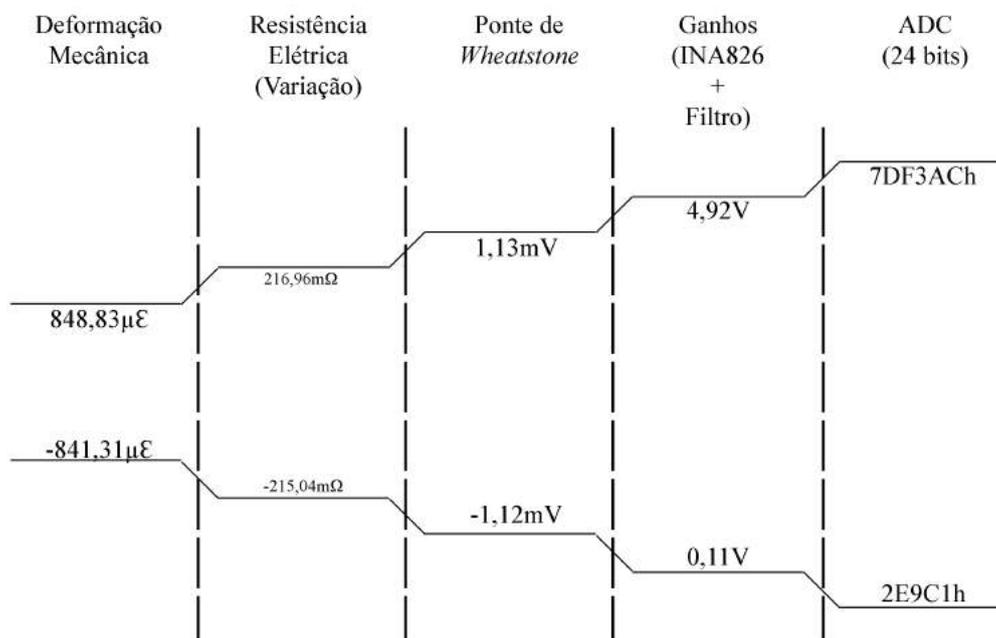
Fonte: Elaboração própria.

Figura 129 – Cadeia de medida experimental - Z4 - Pé direito.



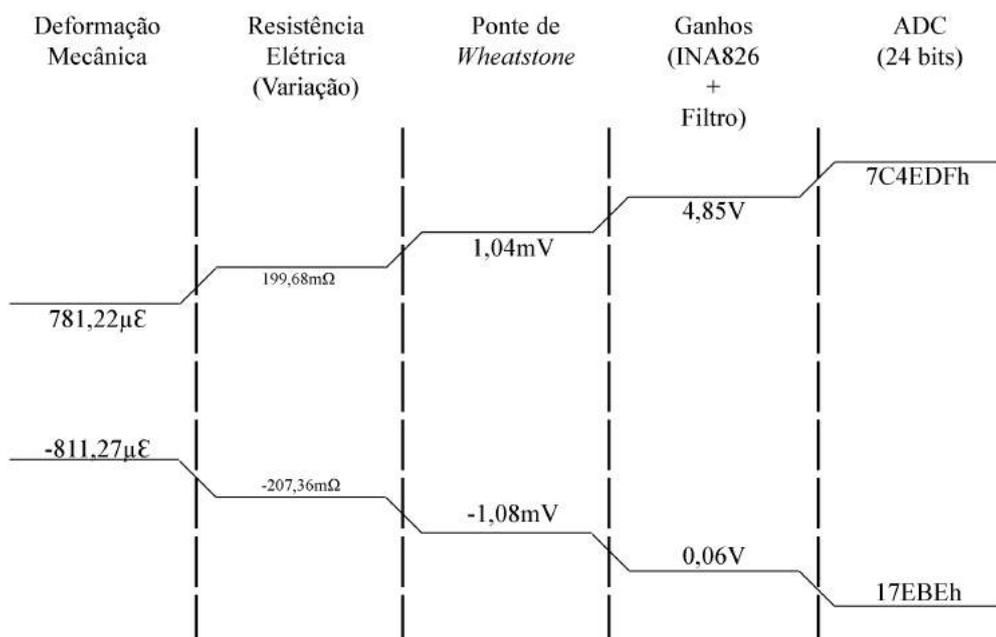
Fonte: Elaboração própria.

Figura 130 – Cadeia de medida experimental - Z5 - Pé direito.



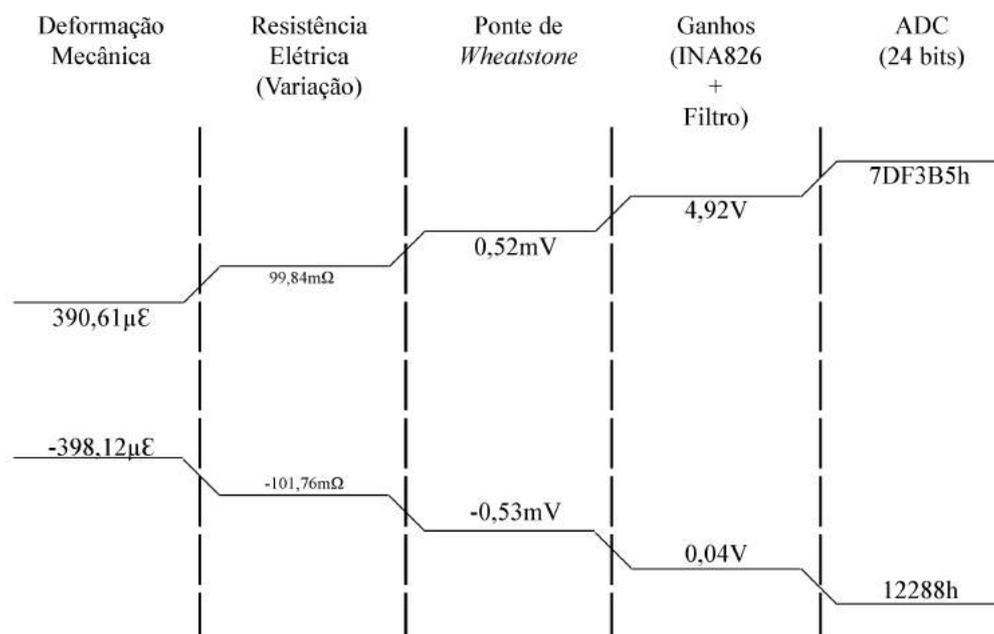
Fonte: Elaboração própria.

Figura 131 – Cadeia de medida experimental - Z7 - Pé direito.



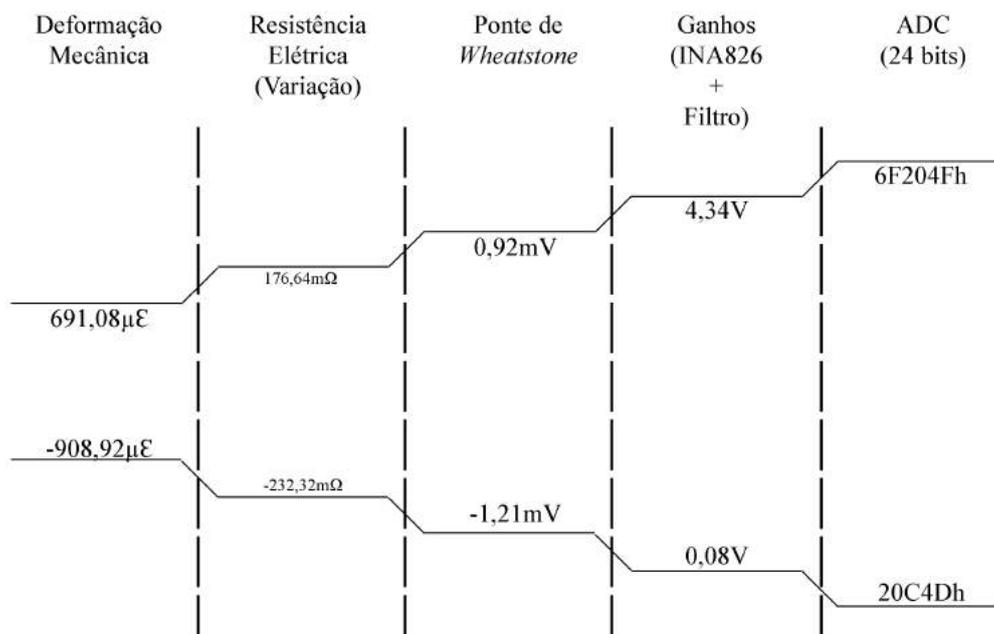
Fonte: Elaboração própria.

Figura 132 – Cadeia de medida experimental - Z2 - Pé esquerdo.



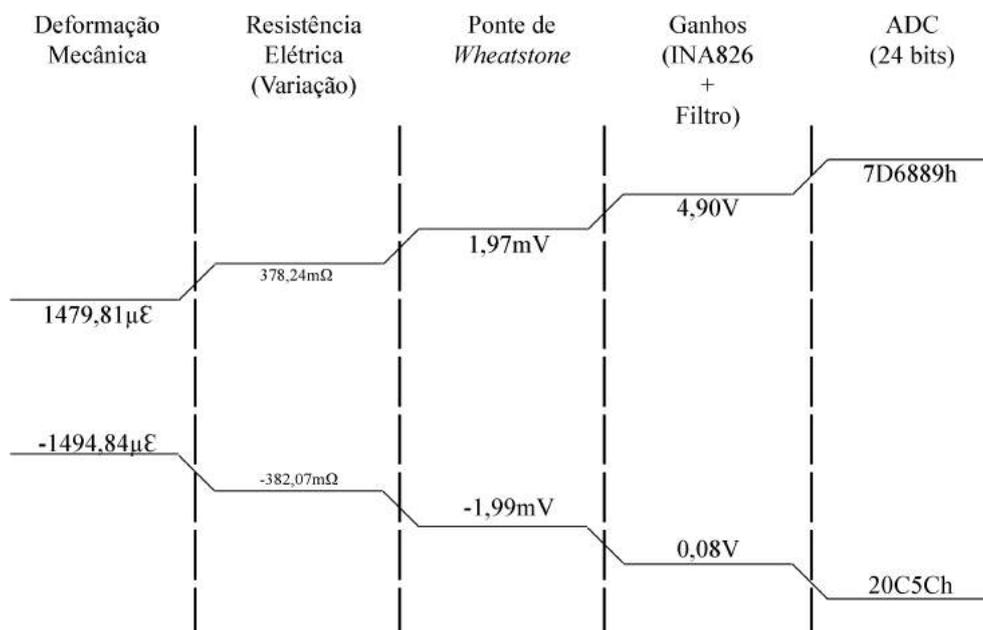
Fonte: Elaboração própria.

Figura 133 – Cadeia de medida experimental - Z3 - Pé esquerdo.



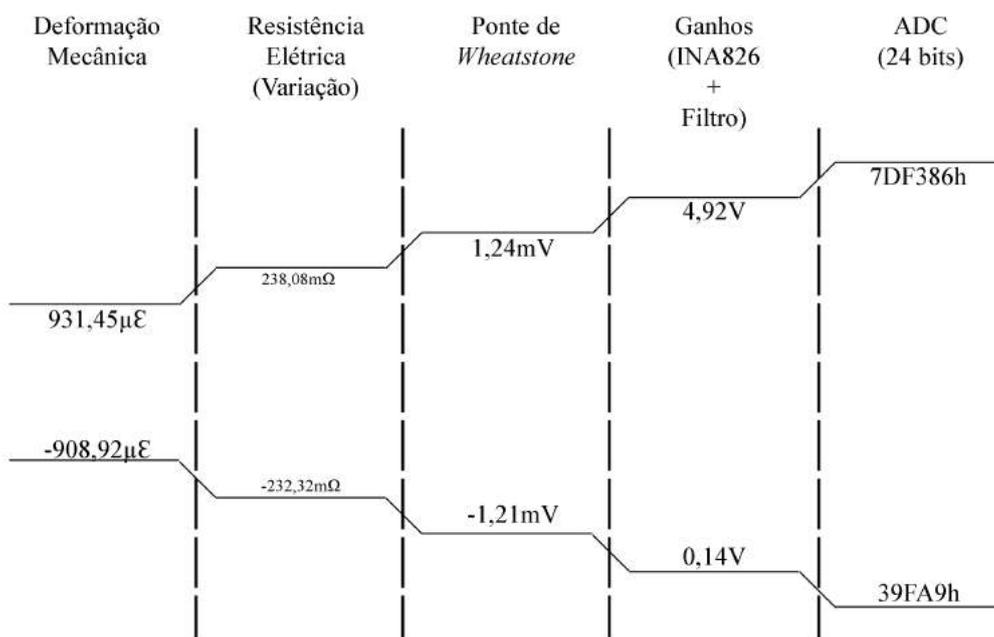
Fonte: Elaboração própria.

Figura 134 – Cadeia de medida experimental - Z4 - Pé esquerdo.



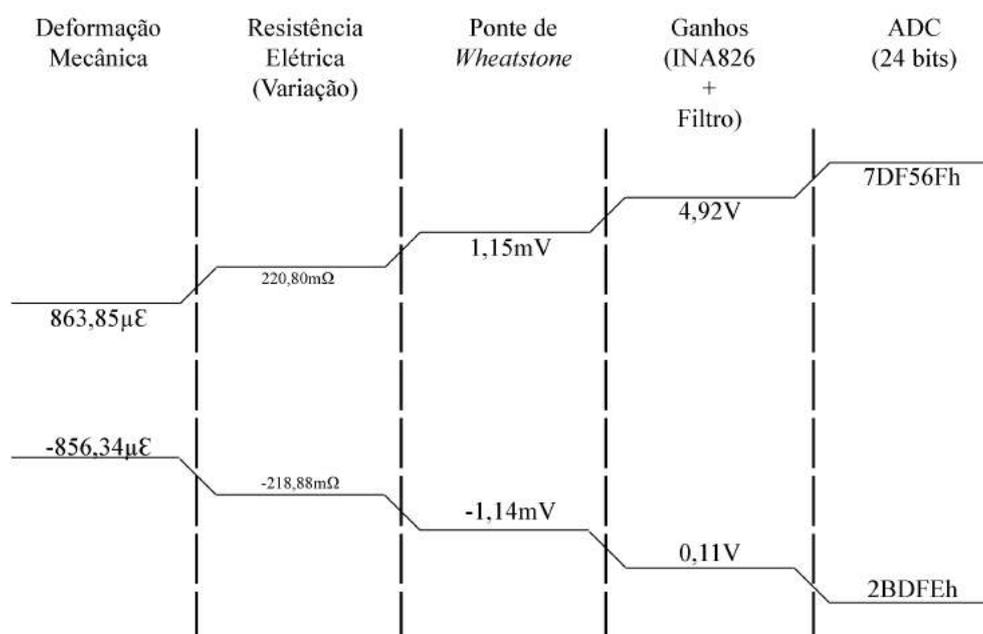
Fonte: Elaboração própria.

Figura 135 – Cadeia de medida experimental - Z5 - Pé esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 136 – Cadeia de medida experimental - Z7 - Pé esquerdo.



Fonte: Elaboração própria.