

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

JUSSAN DA SILVA BAHIA NASCIMENTO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇA PARA ANÁLISE
TRIDIMENSIONAL DA FORÇA APLICADA PELO CICLISTA**

Porto Alegre

2014

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

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇA PARA ANÁLISE
TRIDIMENSIONAL DA FORÇA APLICADA PELO CICLISTA**

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Porto Alegre

2014

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, por todo apoio e conselhos dados que foram fundamentais durante todo o curso de graduação.

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço ao CNPq pela bolsa de iniciação científica e pelos recursos do projeto “Desenvolvimento de Células de Carga para Ciclismo” nº 487210/2013-1.

Ao colega Cleiton Milani pelo apoio concedido ao longo deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus pais Marília e Cláudio Roberto pelo imenso apoio durante o curso de graduação.

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma plataforma de força, utilizando células de carga, para medir as componentes tridimensionais da força atuante na pedivela durante a pedalada. O projeto da célula de carga é baseado em uma pedivela de alumínio comercial na qual foram cimentados 24 extensômetros (12 em cada braço da pedivela) de $350,6 \pm 0,6 \Omega$ e de $120,2 \pm 0,2 \Omega$. Primeiramente, foram realizadas simulações estáticas e dinâmicas via elementos finitos no SolidWorks™ 2011 para analisar o comportamento da pedivela. Em seguida, cada braço da pedivela foi instrumentado com três pontes de Wheatstone. A partir dos dados obtidos com o módulo de aquisição NI-9237 da *National Instruments*, durante o ensaio de deformação, projetou-se o circuito condicionador de sinais, dividido em seis canais. Cada canal é composto por dois estágios de amplificação, um filtro *Butteworth* de segunda ordem, cuja frequência de corte é de 37 Hz, e um estágio de *offset*. Na saída destes canais é conectado um sistema de transmissão de dados via *Bluetooth* e de armazenamento dos mesmos via cartão do tipo SD. Os ensaios de calibração estática apresentaram um erro de linearidade máximo de 0,355 % e 0,605 % para as células de carga esquerda e direita, respectivamente. A incerteza máxima calculada referente à sensibilidade dos canais é de 2,29 % e à sensibilidade das células de carga é de 1,17 %. Por fim, com o sistema instalado na bicicleta e alimentado por baterias, foi possível observar o comportamento das componentes de força em ensaios realizados tanto em laboratório como diretamente em pista.

Palavras-chave: Instrumentação, Célula de Carga Extensiométrica, Ciclismo, Biomecânica.

ABSTRACT

This work consists of the development of a force platform, using load cells, to measure the three-dimensional components of the force acting on the crankset during cycling. The design of the load cell is based on a commercial aluminum crankset in which were cemented 24 strain gages (12 in each crankset arm) of $350.6 \pm 0.6 \Omega$ and $120.2 \pm 0.2 \Omega$. First, were performed static and dynamic simulations through the finite element method in the SolidWorks™ 2011 to analyze the crankset behavior. Then, each crankset arm was instrumented with three Wheatstone bridges. From the data obtained with the acquisition module NI-9237, during the deformation tests, the signal conditioning circuit was designed and divided into six channels. Each channel consists of two amplification stages, a second order Butterworth filter, whose cutoff frequency is 37 Hz, and an offset stage. In these channels output is connected a system that transmit the data via Bluetooth and store them via SD card type. The static calibration tests showed a maximum linearity error of 0.355 % and 0.605 % for the left and right load cells, respectively. The maximum uncertainty calculated referring to sensitivity of channels is 2.29 % and to sensitivity of load cells is 1.17 %. Finally, with the system installed on the bike and powered by batteries, was possible to observe the behavior of the force components on assays performed in the laboratory and on-track.

Keywords: Instrumentation, Strain Gage Load Cells, Bicycling, Biomechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases da pedalada.....	18
Figura 2. Componentes da força aplicada a pedivela.....	19
Figura 3. Orientação das forças na fase de recuperação: caso (a) mais efetivo e (b) menos efetivo.....	20
Figura 4. Definição de tensão normal.....	22
Figura 5. Deformação de uma barra em uma direção.....	23
Figura 6. Curva tensão versus deformação.....	24
Figura 7. Representação do efeito de Poisson em três dimensões.....	25
Figura 8. Diagrama de transdução de um extensômetro.....	26
Figura 9. Extensômetro de resistência elétrica do tipo folha da Kyowa.....	26
Figura 10. Extensômetro de resistência elétrica do tipo folha.....	27
Figura 11. Ponte de Wheatstone.....	28
Figura 12. Erro relativo de linearidade da ponte de Wheatstone.....	29
Figura 13. Sensibilidade normalizada da ponte linearizada em função da razão característica.....	30
Figura 14. Configuração de ponte completa.....	31
Figura 15. Sistema de coordenadas adotado para o pedal.....	33
Figura 16. Comportamento das componentes de força através do pedal instrumentado.....	33
Figura 17. Decomposição de forças para diferentes estruturas de célula de carga: (a) pedal instrumentado, (b) braços de coroa instrumentados e (c) pedivela instrumentada.....	34
Figura 18. Análise da assimetria de forças através da pedivela instrumentada.....	35
Figura 19. Pedivela instrumentada comercial Stages Power.....	36
Figura 20. Pedivela instrumentada comercial SRM.....	36
Figura 21. Diagrama de blocos do sistema experimental.....	38
Figura 22. Foto da pedivela comercial VERO FSA-6020 175 mm em liga de alumínio 6071-T6.....	39
Figura 23. Exemplo de dois perfis criados.....	40
Figura 24. Modelagem por Loft: interconexão dos perfis longitudinais.....	40
Figura 25. Modelagem por Loft: interconexão de superfícies tridimensionais.....	41
Figura 26. Modelagem da pedivela finalizada.....	41
Figura 27. Direção da componente de força aplicada na pedivela: (a) perpendicular, (b) paralela e (c) lateral.....	42

Figura 28. Dimensões do extensômetro.	43
Figura 29. Conexões dos extensômetros de 350,6 Ω em configuração de ponte completa: direção perpendicular.	44
Figura 30. Conexões dos extensômetros de 350,6 Ω em configuração de meia ponte: direção paralela.....	45
Figura 31. Conexões dos extensômetros de 120,2 Ω em configuração de ponte completa: direção lateral.	45
Figura 32. Estrutura utilizada para a realização do ensaio de deformação: (1) sistema de condicionamento e aquisição da National Instruments, (2) célula de carga, (3) computador portátil equipado com LabVIEW 2011 e (4) carga aplicada com pesos padrão.	46
Figura 33. Circuito de alimentação.....	48
Figura 34. Circuito de tensão elétrica de referência dos canais 1 e 2.....	49
Figura 35. Circuito de tensão elétrica de referência do canal 3.....	50
Figura 36. Ponte de Wheatstone e circuito de ajuste de zero do canal 1.....	51
Figura 37. Circuito do primeiro estágio de amplificação (canal 1).	52
Figura 38. Circuito do segundo estágio de amplificação (canal 1).	54
Figura 39. Circuito do filtro projetado.	55
Figura 40. Diagrama de Bode do filtro projetado.....	56
Figura 41. Circuito somador.....	56
Figura 42. Cadeia de medidas proposta do canal 1.	59
Figura 43. Cadeia de medidas proposta do canal 2.	59
Figura 44. Cadeia de medidas proposta do canal 3.	59
Figura 45. Cadeia de medidas proposta do canal 4.	60
Figura 46. Cadeia de medidas proposta do canal 5.	60
Figura 47. Cadeia de medidas proposta do canal 6.	60
Figura 48. Ensaio de calibração da plataforma de força: (1) fonte simétrica, (2) multímetros da Tektronix, (3) célula de carga, (4) circuito de condicionamento e (5) carga aplicada com pesos padrão.	61
Figura 49. Estrutura utilizada para a realização do ensaio dinâmico: (1) pedivela engastada com acelerômetro, (2) sistema de acelerometria da National Instruments e (3) computador portátil equipado com LabVIEW 2011.	62
Figura 50. Características do acelerômetro triaxial Delta Tron 4520.....	63
Figura 51. Montagem da plataforma de força.	64
Figura 52. Estrutura para a realização dos testes em laboratório.	64

Figura 53. Carga aplicada na direção perpendicular ao eixo longitudinal: deformação e tensão mecânica.	67
Figura 54. Carga aplicada na direção paralela ao eixo longitudinal: deformação e tensão mecânica.	68
Figura 55. Carga aplicada na direção lateral ao eixo longitudinal: deformação e tensão mecânica.	69
Figura 56. Simulação dinâmica: modo ressonante fundamental	70
Figura 57. Ensaio dinâmico com acelerômetro: resposta temporal.	71
Figura 58. Ensaio dinâmico com acelerômetro: resposta em frequência.	71
Figura 59. Célula de carga esquerda: aplicação de carga na direção perpendicular.	72
Figura 60. Célula de carga esquerda: aplicação de carga na direção paralela.	72
Figura 61. Célula de carga esquerda: aplicação de carga na direção lateral.	73
Figura 62. Célula de carga direita: aplicação de carga na direção perpendicular.	73
Figura 63. Célula de carga direita: aplicação de carga na direção paralela.	73
Figura 64. Célula de carga direita: aplicação de carga na direção lateral.	74
Figura 65. Resposta do filtro para uma frequência de entrada menor que a frequência de corte.	77
Figura 66. Resposta do filtro para uma frequência de entrada próxima a frequência de corte.	77
Figura 67. Resposta do filtro para uma frequência de entrada maior que a frequência de corte.	77
Figura 68. Célula de carga esquerda: carregamento na direção perpendicular.	78
Figura 69. Célula de carga esquerda: carregamento na direção paralela.	78
Figura 70. Célula de carga esquerda: carregamento na direção lateral.	79
Figura 71. Célula de carga direita: carregamento na direção perpendicular.	79
Figura 72. Célula de carga direita: carregamento na direção paralela.	79
Figura 73. Célula de carga direita: carregamento na direção lateral.	80
Figura 74. Comportamento das componentes de força durante os ensaios no rolo de treinamento.	85
Figura 75. Comportamento das componentes de força durante os ensaios em ambiente externo.	86
Figura 76. Perfil à 0 mm.	92
Figura 77. Perfil à 5 mm.	93
Figura 78. Perfil à 10 mm.	93
Figura 79. Perfil à 20 mm.	94

Figura 80. Perfil à 30 mm.....	94
Figura 81. Perfil à 40 mm.....	95
Figura 82. Perfil à 50 mm.....	95
Figura 83. Perfil à 60 mm.....	96
Figura 84. Perfil à 70 mm.....	96
Figura 85. Perfil à 80 mm.....	97
Figura 86. Perfil à 90 mm.....	97
Figura 87. Perfil à 100 mm.....	98
Figura 88. Perfil à 110 mm.....	98
Figura 89. Segundo modo ressonante.....	99
Figura 90. Terceiro modo ressonante.....	99
Figura 91. Quarto modo ressonante.....	100
Figura 92. Quinto modo ressonante.....	100
Figura 93. Circuito de condicionamento do canal 1.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Extensômetro de 350,6 Ω e Fator Gage 2,11.....	44
Tabela 2. Extensômetro de 120,2 Ω e Fator Gage 2,10.....	44
Tabela 3. Principais características do circuito integrado REF02.....	49
Tabela 4. Principais características do circuito integrado REF03.....	49
Tabela 5. Principais características do circuito integrado OP07C.....	50
Tabela 6. Principais características do circuito integrado INA126P.....	53
Tabela 7. Ganhos referentes a cada canal.....	54
Tabela 8. Principais características do filtro projetado.....	55
Tabela 9. Incerteza e resolução referente ao multímetro Tektronix DMM4050.....	57
Tabela 10. Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6.....	66
Tabela 11. Modos ressonantes.....	70
Tabela 12. Características para projeto dos canais de condicionamento.....	75
Tabela 13. Célula de carga esquerda: erro de linearidade referente aos demais deslocamentos.	75
Tabela 14. Célula de carga direita: erro de linearidade referente aos demais deslocamentos..	75
Tabela 15. Estágios de saída, ganho e <i>offset</i> referentes ao canal 4.....	76
Tabela 16. Características dos canais de condicionamento.....	80
Tabela 17. Célula de carga esquerda: erro de linearidade referente às demais curvas experimentais.....	81
Tabela 18. Célula de carga direita: erro de linearidade referente às demais curvas experimentais.....	81
Tabela 19. Incertezas combinada.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
SG	<i>Strain Gage</i>
VO ₂	Taxa de Consumo de Oxigênio
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
Cartão SD	<i>Secure Digital Card</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	CONTEXTO TEÓRICO.....	17
2.1	Conceitos fundamentais da biomecânica aplicada ao ciclismo	17
2.1.1	<i>Estudo da força aplicada ao conjunto pedal/pedivela</i>	<i>17</i>
2.1.2	<i>Torque e Potência Mecânica</i>	<i>21</i>
2.2	Células de carga e extensimetria.....	22
2.2.1	<i>Conceitos teóricos</i>	<i>22</i>
2.2.2	<i>Extensômetros de resistência elétrica</i>	<i>25</i>
2.3	Ponte de Wheatstone e outras etapas do condicionamento de sinais.....	27
2.4	Plataformas de força para análise da força aplicada pelo ciclista.....	32
2.4.1	<i>Análise da força através do pedal instrumentado</i>	<i>32</i>
2.4.2	<i>Análise da força através da pedivela instrumentada</i>	<i>34</i>
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	37
3.1	Projeto da célula de carga	38
3.1.1	<i>Procedimentos de modelagem</i>	<i>39</i>
3.1.2	<i>Procedimentos para a análise estrutural</i>	<i>41</i>
3.1.3	<i>Cimentação dos extensômetros.....</i>	<i>43</i>
3.2	Procedimentos para ensaio de deformação	45
3.3	Projeto do circuito de condicionamento do sinal.....	47
3.3.1	<i>Circuito de alimentação</i>	<i>48</i>
3.3.2	<i>Tensão elétrica de referência</i>	<i>48</i>
3.3.3	<i>Ponte de Wheatstone e circuito de ajuste de zero</i>	<i>50</i>
3.3.4	<i>Estágios de amplificação.....</i>	<i>52</i>
3.3.5	<i>Circuito de filtragem.....</i>	<i>54</i>
3.3.6	<i>Circuito somador e função transferência do circuito de condicionamento</i>	<i>56</i>
3.3.7	<i>Sistema de aquisição, armazenamento e transmissão sem fio de dados</i>	<i>58</i>
3.3.8	<i>Projeto da cadeia de medidas.....</i>	<i>58</i>
3.4	Procedimentos para calibração estática do sistema	60
3.5	Procedimentos para ensaio dinâmico.....	62
3.6	Montagem do sistema e procedimentos de testes com a bicicleta.....	63

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1	Resultados da análise estrutural.....	66
4.1.1	<i>Simulações estáticas</i>	66
4.1.2	<i>Comportamento dinâmico: simulações e ensaio</i>	70
4.2	Ensaio de deformação.....	72
4.3	Validação do circuito de condicionamento.....	75
4.4	Calibração estática e função de transferência experimental.....	78
4.5	Análise de incertezas.....	81
4.5.1	<i>Análise de incertezas referente aos canais de condicionamento</i>	81
4.5.2	<i>Análise de incertezas referente à tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone</i>	83
4.6	Testes e funcionamento da plataforma de força.....	84
4.6.1	<i>Ensaaios biomecânicos</i>	84
4.6.2	<i>Autonomia do sistema</i>	87
5	CONCLUSÕES.....	88
6	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
	ANEXO A. PERFIS DO MODELO DA PEDIVELA.....	92
	ANEXO B. SIMULAÇÕES DINÂMICAS DE VIBRAÇÃO.....	99
	ANEXO C. CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DO CANAL 1.....	101

1 INTRODUÇÃO

O ciclismo é praticado tanto por atletas, no treinamento e em competições, como por pessoas em geral, para locomoção, lazer e reabilitação. A procura por um melhor desempenho nesta modalidade tem sido investigada por pesquisadores tanto em aspectos biomecânicos como fisiológicos (CANDOTTI, 2003). Parâmetros fisiológicos, como a respiração e o regime cardiovascular, permitem determinar a condição física do atleta. Já parâmetros biomecânicos, permitem descrever e avaliar a técnica da pedalada do ciclista.

A técnica da pedalada é uma característica individual de cada ciclista e define a forma com que a força é aplicada no pedal, que depende da coordenação muscular, comprimento dos segmentos do corpo humano, alinhamento articular do ciclista, regulagens da bicicleta, cadência e carga utilizada (NABINGER, 2006). Esta aplicação de força, proveniente da atividade muscular, gera uma força resultante que é transferida para a pedivela gerando uma força efetiva responsável pelo movimento da bicicleta e uma força não efetiva que não contribui para o movimento.

A caracterização da força fornece também parâmetros que são utilizados em ensaios biomecânicos, como por exemplo, a análise da potência gerada, a relação de simetria de forças e a relação entre fatores fisiológicos (BERTUCCI *et al.*; CARPES *et al.*, 2010; 2012; KONINCKX *et al.*, 2008; NABINGER, 2006; LAZZARI, 2010; SMAK *et al.*, 1999). Estes ensaios são normalmente realizados utilizando bicicletas ergométricas ou rolos de treinamento procurando reproduzir de forma mais semelhante possível as condições reais de pedalada.

Apesar de já existirem equipamentos no mercado capazes de medir a potência gerada pelo ciclista, como por exemplo, o sistema desenvolvido pela *Stages Power* e pela *Schoberer Rad Messtechnik*, capazes de mensurar a força atuante na pedivela, não existem modelos capazes de fornecer as componentes da força aplicada, cabendo aos laboratórios de pesquisa seu desenvolvimento (ALVAREZ *et al.*, 1996; BOYD *et al.*, 1996; LAZZARI, 2010). Os estudos em laboratórios normalmente são realizados medindo-se as componentes bidimensionais ou tridimensionais da força no pedal ou as componentes bidimensionais da força na pedivela.

Neste contexto de carência de equipamentos dinamométricos e em contribuição ao estudo da instrumentação biomédica, o presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma plataforma de força para a análise das componentes tridimensionais da força aplicada na pedivela pelo ciclista durante a pedalada. A análise detalhada das forças na pedivela é de grande importância visto que são estas forças que influenciam diretamente no

movimento da bicicleta e, portanto, possíveis de serem medidas e monitoradas para permitir que o atleta possa competir com alto desempenho.

Os objetivos secundários são: utilizar sistemas comerciais a fim de auxiliar no desenvolvimento da célula de carga bem como comparar e validar os estudos e testes realizados com a plataforma de força; determinar experimentalmente a componente de força mais significativa durante a pedalada além das componentes de forças desenvolvidas por ambos os membros inferiores.

2 CONTEXTO TEÓRICO

2.1 Conceitos fundamentais da biomecânica aplicada ao ciclismo

A biomecânica é a ciência que estuda a descrição do movimento e suas causas nas criaturas vivas (KNUDSON, 2007). No ciclismo, os estudos da biomecânica têm por objetivo descrever, compreender e analisar o movimento do ciclista com a finalidade de aumentar o seu desempenho além de evitar lesões de sobrecarga dos membros inferiores, durante a pedalada (NABINGER, 2006).

O desempenho de ciclistas depende principalmente de sua técnica de pedalada e de sua condição física. Segundo LAZZARI (2010), os principais equipamentos presentes em laboratórios para avaliação do desempenho são compostos por aparatos dinamométricos, capazes de fornecer as componentes de força aplicada e equipamentos videográficos, capazes de descrever a trajetória dos segmentos dos membros inferiores. De acordo com LAZZARI (2010), variáveis fisiológicas também fornecem parâmetros em auxílio aos estudos biomecânicos. Por exemplo, sinais mioelétricos, capturados no ensaio de eletromiografia, que caracterizam a atividade muscular durante o uso da bicicleta, podem ser úteis no estudo da coordenação motora e também na caracterização do movimento realizado. Outros exemplos são o índice VO_2 do indivíduo, determinado pelo espirógrafo, que fornece a energia total aeróbica produzida pelo atleta e a atividade muscular elétrica do coração, capturado nos ensaios de eletrocardiografia, que fornece o regime cardiovascular em que se encontra o atleta.

Considerando os aparatos de medição citados anteriormente, não há a existência de um equipamento comercial capaz de fornecer as componentes tridimensionais da força aplicada pelo ciclista com tecnologia nacional, sendo de responsabilidade dos laboratórios seu desenvolvimento. Desta forma, na Seção 2.1.1 será abordado a distribuição da força aplicada sobre o pedal, bem como, as forças transmitidas para a pedivela. Posteriormente será caracterizada a potência mecânica e o torque desenvolvido pelo ciclista (Seção 2.1.2).

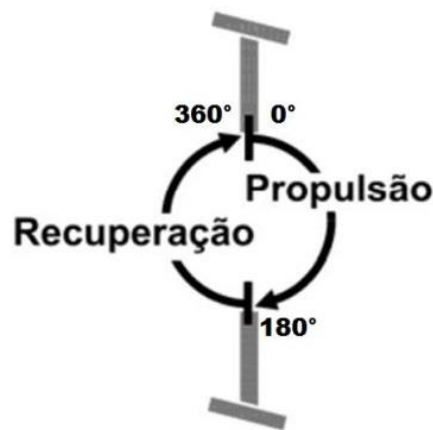
2.1.1 *Estudo da força aplicada ao conjunto pedal/pedivela*

Quantificar a distribuição de forças aplicada sobre o pedal é uma ferramenta muito importante para compreender a técnica de pedalada desenvolvida pelos ciclistas. Uma melhor compreensão desta relação ciclista-bicicleta é essencial para a investigação de lesões ocorri-

das durante a pedalada, para que projetistas possam desenvolver bicicletas mais eficientes e para que os ciclistas possam ter seu desempenho maximizado (CANDOTTI, 2003; HULL *et al.*, 1998; NABINGER, 2006).

De acordo com NABINGER (2006), as análises do movimento do ciclista durante a pedalada são realizadas em regiões definidas como fases como ilustra a Figura 1. A fase de propulsão corresponde à primeira metade do ciclo (intervalo entre 0° a 180°) e a fase de recuperação corresponde à segunda metade do ciclo (intervalo de 180° a 360°).

Figura 1. Fases da pedalada.



Fonte: Adaptado de (NABINGER, 2006).

A aplicação de força sobre o pedal gera uma força resultante. Esta força, proveniente da atividade muscular, é transferida para o braço da pedivela gerando:

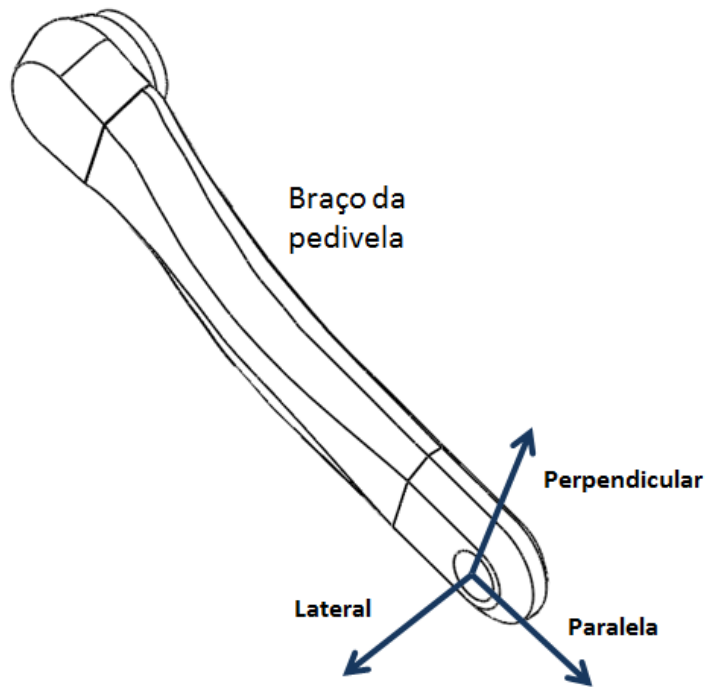
- uma componente (perpendicular) que atua perpendicularmente à pedivela no plano de rotação da mesma, que é a componente efetiva da força, capaz de movimentar a pedivela;
 - uma componente (paralela) que atua paralelamente à pedivela, sendo esta não efetiva, pois não contribui para o movimento;
 - uma componente (lateral) que atua perpendicularmente à pedivela e perpendicularmente ao plano de rotação da mesma, sendo também não efetiva (ERICSON *et al.*, 1988).
- Estas três componentes são detalhadas na Figura 2.

Desta maneira pode-se determinar a razão entre a força efetiva e a força resultante na pedivela descrita pela Equação (1) chamada de índice de efetividade r :

$$r = \frac{F_{efetiva} [N]}{F_{resultante} [N]} \quad (1)$$

Este índice traduz a eficiência que é transmitida do corpo do ciclista para a bicicleta (CANDOTTI, 2003; SANDERSON, 1991). Além disso, a eficiência da pedalada não depende apenas da magnitude da força aplicada sobre o pedal, mas também da sua posição, orientação e sentido (NABINGER, 2006).

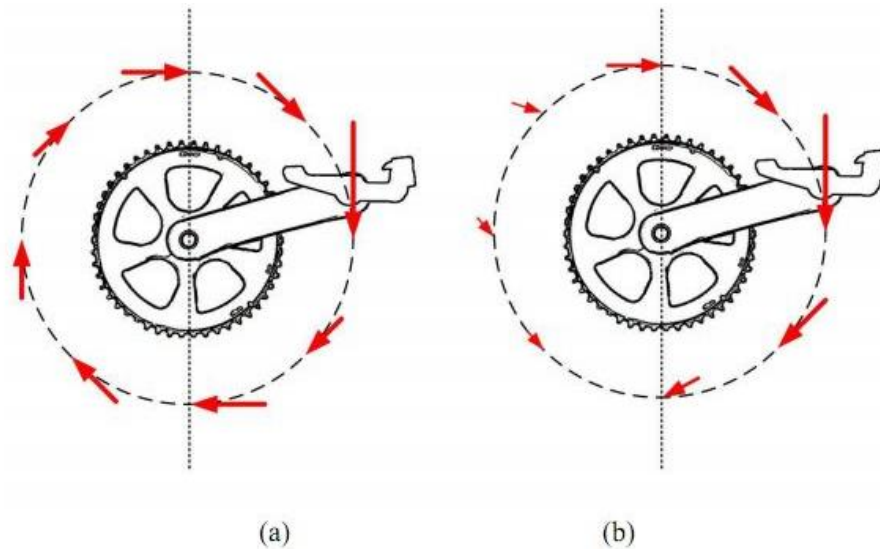
Figura 2. Componentes da força aplicada a pedivela.



O índice de efetividade, avaliado ao longo do movimento de revolução da pedivela, pode assumir valores entre -1 e 1. O valor 1, correspondente ao caso mais eficaz, é a situação em que a força resultante é aplicada perpendicularmente a pedivela no sentido do movimento. O valor -1, correspondente ao caso menos eficaz, é a situação em que a força resultante é aplicada perpendicularmente a pedivela no sentido contrário ao movimento (CANDOTTI, 2003; ERICSON & NISELL, 1988; LAZZARI, 2010).

A literatura indica que as forças não efetivas tem maior importância na fase de recuperação diminuindo a eficiência da pedalada (GREGOR, 2000; NABINGER 2006). Os estudos de CANDOTTI (2003) demonstraram que o índice de efetividade está diretamente relacionado com o desempenho da pedalada dos atletas. Segundo a autora, os ciclistas apresentam maior eficiência na pedalada do que triatletas, devido principalmente ao fato de apresentarem uma maior efetividade na fase de recuperação. A Figura 3 ilustra, por exemplo, o caso mais efetivo e menos efetivo da orientação das forças na fase de recuperação.

Figura 3. Orientação das forças na fase de recuperação: caso (a) mais efetivo e (b) menos efetivo.



Fonte: (LAZZARI, 2010).

Além da análise das componentes da força devido ao movimento circular da pedivela em torno do eixo central, esta análise é essencial para o estudo da diferença entre as forças produzidas pelo membro inferior direito e esquerdo. De acordo com *CARPES et al. (2010)*, que realiza uma revisão da literatura sobre assimetria bilateral, resultados consistentes indicam uma assimetria de força na faixa de 5% a 20% e estão relacionados à dominância de um dos membros durante a pedalada. Os estudos realizados por *BERTUCCI et al. (2012)* verificaram que os resultados significativos da assimetria de força apresentados por ciclistas de elite encontram-se na faixa de 10% a 38%.

Os estudos de assimetria bilateral de forças permitem identificar a perna dominante podendo auxiliar na redução dos riscos de lesões nos músculos ou nos joelhos evitando o sobreuso de um dado membro podendo afetar tanto ciclistas amadores como profissionais (*SMAK et al., 1999*).

Neste contexto torna-se interessante mensurar e analisar detalhadamente todas componentes da força aplicada pelo ciclista durante a pedalada. Os sistemas comumente utilizados para este fim são plataformas de forças tipicamente constituídas por pedais instrumentados ou pedivelas instrumentadas que serão abordados na Seção 2.4.

2.1.2 Torque e Potência Mecânica

Durante a pedalada, o objetivo do ciclista é transmitir um torque ao sistema de engrenagens (formado pelas coroas e corrente da bicicleta) produzindo o movimento. O torque transmitido é descrito pela Equação (2):

$$T = F_{efetiva} \times L \quad (2)$$

onde T é o torque transmitido em [N.m], $F_{efetiva}$ é a componente efetiva em [N] da força resultante aplicada à pedivela e L é o comprimento da pedivela em [m].

Segundo NABINGER (2006), o trabalho realizado pelo ciclista durante uma revolução completa da pedalada é função do torque ao longo da revolução como descrito na Equação (3):

$$W = \int_{\theta=0}^{2\pi} T(\theta) \cdot d\theta \quad (3)$$

onde W representa o trabalho realizado pelo ciclista em [J]; T é o torque desenvolvido pelo ciclista em [N.m] e θ é a posição angular da pedivela em [rad].

A potência mecânica desenvolvida por um ciclista pode ser obtida de uma maneira instantânea ou por um valor médio de n ciclos completos como descrito pela Equação (4):

$$P_n = \frac{W}{t_n} \quad (4)$$

onde P_n representa a potência do ciclo n em [W]; W é o trabalho externo realizado pelo ciclista [J] e t_n é o intervalo de tempo do ciclo n em [s].

Os estudos realizados por SMITH *et al.* (2001), comprovaram a importância da potência mecânica na análise do desempenho do ciclista, além de possibilitar a investigação de efeitos de diversos tratamentos sobre o desempenho.

2.2 Células de carga e extensimetria

O fenômeno de deformação elástica (devido a solicitações, por exemplo, de tração, compressão, flexão ou torção) é largamente explorado no desenvolvimento de dispositivos para medição de diversas grandezas, como força e pressão, por exemplo. Os dispositivos utilizados para a medição de forças integram um elemento elástico (também chamado de elemento massa mola) ao qual está associado um sensor e são chamados de célula de carga (BALBINOT, 2013). Este sensor que compõe a célula de carga pode ser resistivo e tem como objetivo medir a deformação do material devido às solicitações mecânicas.

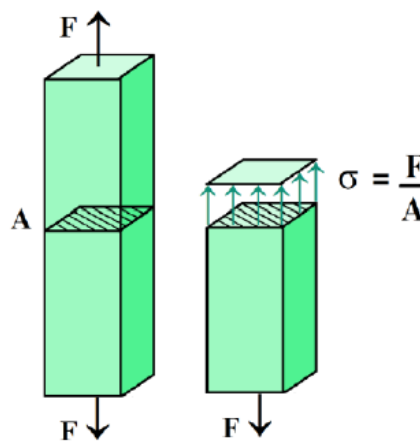
2.2.1 Conceitos teóricos

De acordo com BALBINOT (2013), sabe-se que quando um determinado corpo é solitado apenas por esforços de tração ou compressão, conforme mostra a Figura 4, a relação entre tensão mecânica e a força exercida é expressa pela Equação (5). Para esta situação considera-se que a tensão mecânica é constante em toda a secção transversal.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

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

Figura 4. Definição de tensão normal.



Fonte: Adaptado de (BEER *et al.*, 2009).

Segundo BALBINOT & BRUSAMARELLO (2011) a relação existente entre tensões e deformações de corpos submetidos a esforços mecânicos foi estabelecida em 1678 por Robert Hooke. Quando uma força é aplicada longitudinalmente em uma mola, ocorre uma deflexão descrita pela Lei de Hooke, representada pela Equação (6):

$$F = kx \quad (6)$$

onde F representa a Força em $[N]$, k é a constante elástica dada em $[N/m]$ e x a distância em $[m]$. Esta proporcionalidade é válida enquanto o material não ultrapassar o seu limite elástico (GOMES, 1980). A lei de Hooke também pode ser expressa, para metais, pela Equação (7):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (7)$$

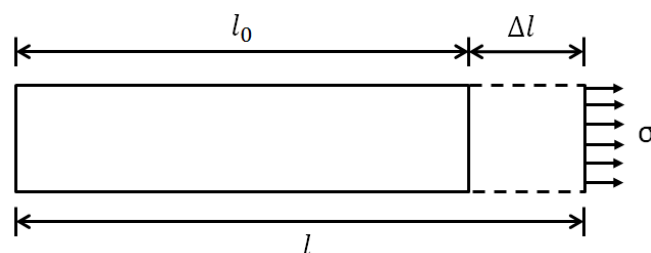
sendo σ a tensão mecânica $[N/m^2]$; E o módulo de elasticidade do material e ε a deformação percentual do material [%].

De acordo com GOMES (1980), considera-se um elemento linear, como uma barra metálica, por exemplo, cujo comprimento inicial é l_0 o qual é submetido a tensões normais nas faces perpendiculares à direção de l_0 . O elemento sofrerá uma deformação e seu comprimento passará a l como mostra a Figura 5. Esta deformação pode ser indicada pela Equação (8):

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (8)$$

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

Figura 5. Deformação de uma barra em uma direção.



Fonte: Adaptado de (GOMES, 1980).

É importante ressaltar que a lei de Hooke é válida para pequenos deslocamentos que é o caso da grande maioria dos materiais utilizados em células de carga (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011).

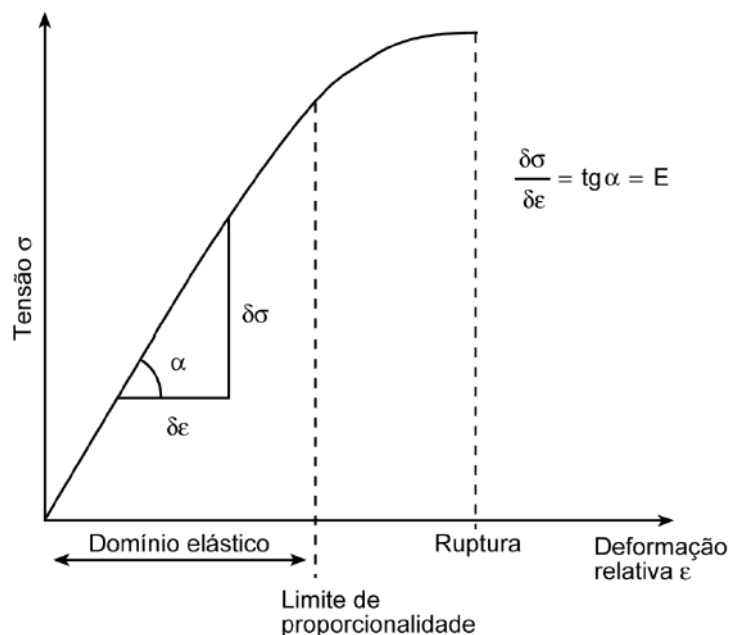
A Figura 6 apresenta o diagrama de tensão mecânica em função da deformação percentual em um sólido genérico. Este diagrama difere de material para material e pode fornecer dados referentes à resistência à tração ou compressão sem considerar o tamanho ou formato físico do material.

A deformação não ocorre apenas na direção em que a força é aplicada, mas ocorre também nos eixos transversais (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011) conforme o esboço da Figura 7. A relação entre deformação transversal e longitudinal, para materiais isotrópicos (aqueles que apresentam as mesmas propriedades mecânicas para todas as direções), é expressa pela Equação (9) através do coeficiente de Poisson:

$$\gamma = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (9)$$

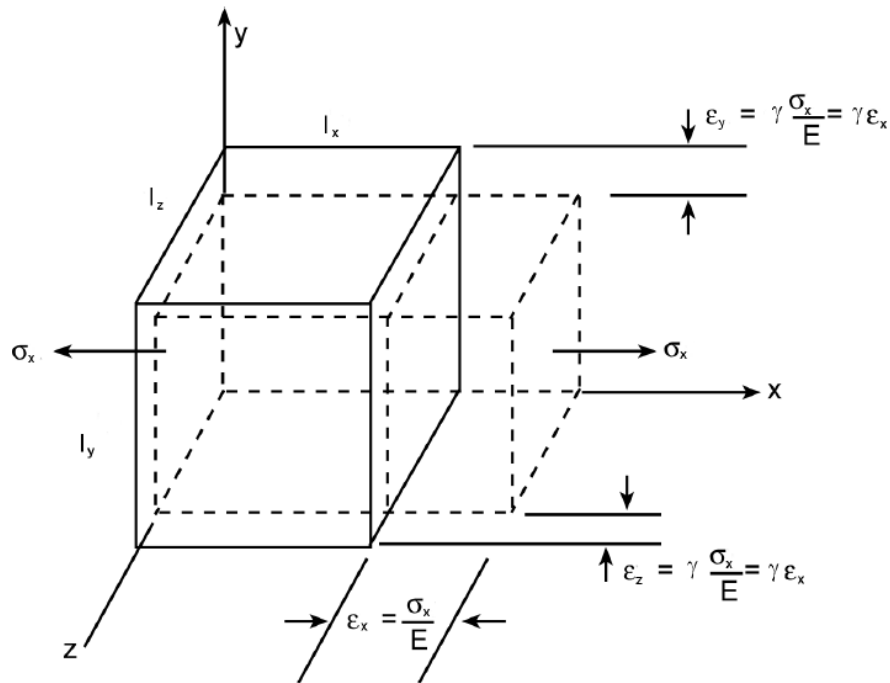
O sinal negativo corresponde ao fato que para um alongamento longitudinal, há um encurtamento transversal e vice-versa (GOMES, 1980), sendo apenas uma questão de referência.

Figura 6. Curva tensão versus deformação.



Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011).

Figura 7. Representação do efeito de Poisson em três dimensões.



Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011).

2.2.2 Extensômetros de resistência elétrica

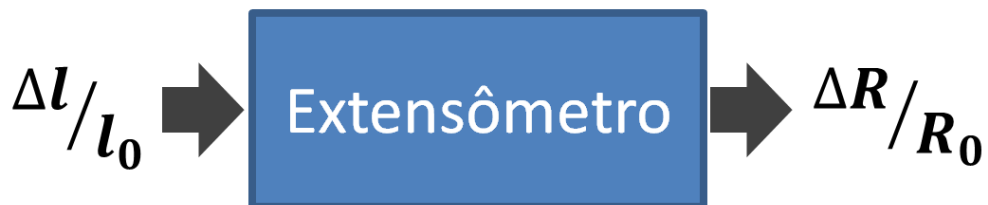
A extensometria utiliza a relação entre tensões mecânicas e deformações descrita para medição de carregamentos mecânicos. Seu princípio baseia-se nos experimentos realizados por Kelvin que, utilizando fios de cobre e ferro, observou que a resistência elétrica de ambos mudava quando os materiais sofriam deformação (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011). Esta relação, expressa pela Equação (10), se dá por meio de uma constante chamada de “Fator Gage”.

$$K = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon} \quad (10)$$

onde K é o Fator Gage; ΔR é a variação de resistência elétrica em $[\Omega]$; R_0 é a resistência elétrica inicial em $[\Omega]$; Δl é a variação de comprimento do fio em $[m]$; l_0 é o comprimento inicial do fio em $[m]$ e ϵ é a deformação relativa $[\mu m/m]$.

O Fator Gage caracteriza a sensibilidade do extensômetro, que tem como sinal de entrada a variação da deformação e o sinal de saída a variação da resistência elétrica (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011) como mostra o diagrama da Figura 8.

Figura 8. Diagrama de transdução de um extensômetro.



Um extensômetro, também chamado em inglês de *Strain Gage*, está representado, como exemplo, na Figura 9 e consiste em fios metálicos dispostos em um padrão de grade. Quando essas tiras são deformadas, sua resistência elétrica varia de acordo com a Equação (11):

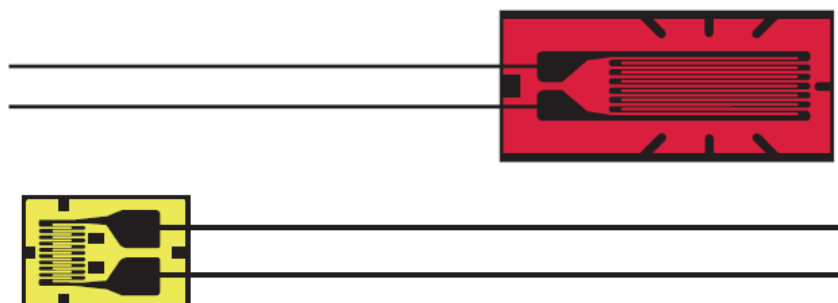
$$R = R_0 + \Delta R = R_0 \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0} \right) = R_0(1 + K\varepsilon) = R_0(1 + x) \quad (11)$$

sendo

$$x = K\varepsilon = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (12)$$

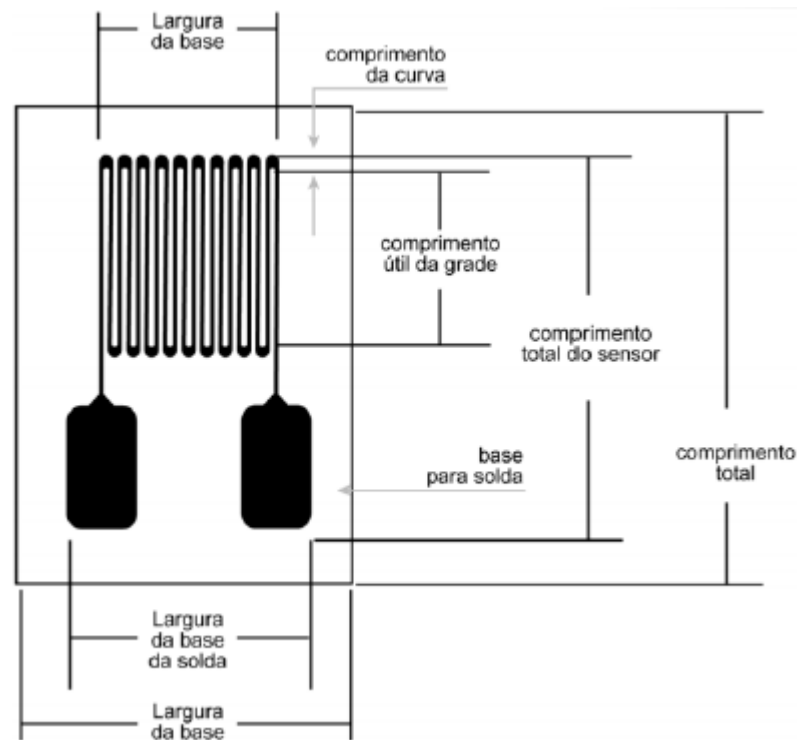
onde R é a resistência elétrica do fio metálico [Ω], R_0 é a resistência elétrica inicial (quando não há deformação), ΔR é a variação de resistência elétrica em [Ω], K é o Fator Gage; ε é a deformação relativa [$\mu\text{m}/\text{m}$]. A Figura 10 apresenta detalhes da grade e da base de um extensômetro genérico do tipo folha.

Figura 9. Extensômetro de resistência elétrica do tipo folha da Kyowa.



Fonte: (KYOWA, Catálogo de *Strain gages* de uso geral, 2014).

Figura 10. Extensômetro de resistência elétrica do tipo folha.



Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011).

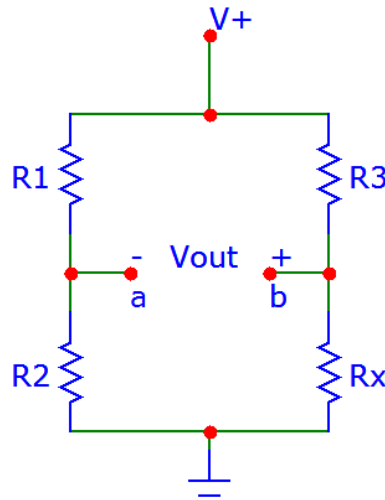
No uso dos extensômetros, existem diversas limitações que devem ser consideradas a respeito da sua utilização. A aplicação do carregamento mecânico, por exemplo, não deve exceder o limite elástico do sensor. Além disso, a temperatura, propriedades do material e a cola usada para aderir o extensômetro podem causar variações indesejáveis na sua resistência (PALLÁS-ARENY *et al.*, 1991).

Como as deformações dos extensômetros são pequenas, na ordem de *microstrains* ($\mu\varepsilon = \mu m/m$), a variação de resistência elétrica será também pequena, de modo que se torna necessário o devido condicionamento do sinal.

2.3 Ponte de Wheatstone e outras etapas do condicionamento de sinais

O circuito conhecido como Ponte de Wheatstone é composto por dois braços resistivos e alimentado por uma fonte de tensão elétrica (ou corrente elétrica) como ilustra a Figura 11.

Figura 11. Ponte de Wheatstone.



Quando os resistores que compõem a ponte possuem valores iguais de resistência elétrica, a tensão elétrica de saída V_{out} será nula e a ponte encontra-se balanceada (ou em equilíbrio). Se R_X é um extensômetro ativo, as variações de resistência elétrica do sensor produzem um desbalanço nos terminais de saída de tensão elétrica da ponte que pode ser expressa pela Equação (13):

$$V_{out} = V_b - V_a = V \left(\frac{R_X}{R_3 + R_X} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = V \left(\frac{R_0(1+x)}{R_3 + R_0(1+x)} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (13)$$

onde V_{out} é a tensão elétrica em [V] de saída da ponte; V_a e V_b são as tensões elétricas em [V] dos pontos “a” e “b” respectivamente; V é a tensão elétrica de alimentação da ponte em [V]; R_X , R_1 , R_2 e R_3 são dadas em [Ω] e R_0 é a resistência elétrica inicial em [Ω] do extensômetro.

Normalmente define-se $R_2 = R_0$ e $R_1 = R_3 = rR_0$, onde r representa uma constante de proporcionalidade, chamada de razão característica das resistências da ponte, sendo geralmente maior ou igual à unidade (GARCÍA *et al.*, 2008). Deste modo tem-se que a tensão elétrica de saída da ponte é função dos parâmetros do extensômetro e da razão característica. Este resultado é expresso pela Equação (14):

$$V_{out} = V \cdot r \cdot x \frac{1}{(r+1)(r+1+x)} \quad (14)$$

onde V_{out} é a tensão elétrica de saída da ponte em [V]; V é tensão elétrica de alimentação da ponte em [V]; r é a razão característica da ponte em $[\Omega/\Omega]$.

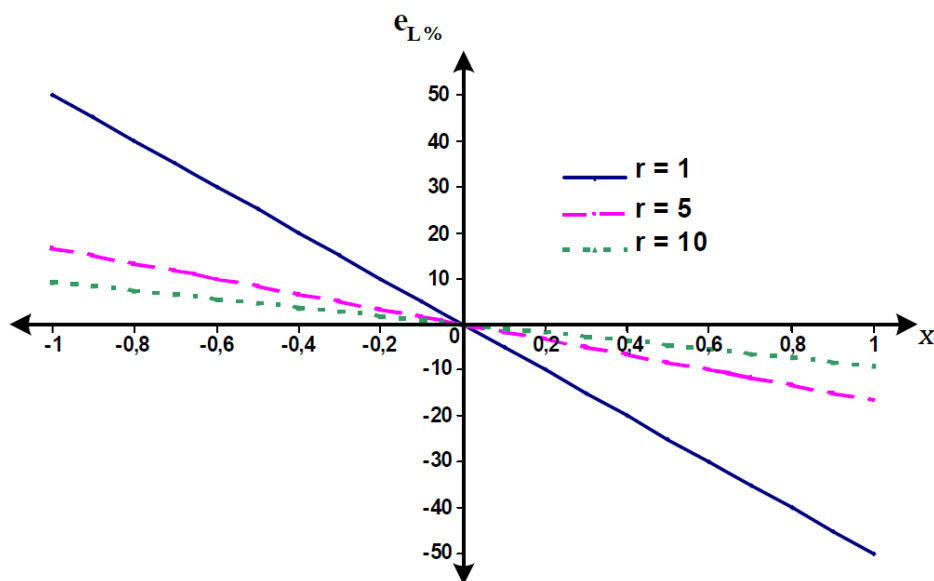
Como se pode observar, a Equação (14) representa uma relação não linear da tensão elétrica da saída da ponte com a resistência elétrica R_0 normalizada e com a variação de resistência elétrica desconhecida. Porém, considera-se que $(r + 1) \gg x$ (GARCÍA *et al.*, 2008), de modo que a Equação (14) pode ser aproximada pela relação linear expressa pela Equação (15):

$$V_{outL} = V \cdot r \cdot x \frac{1}{(r + 1)^2} \quad (15)$$

onde V_{outL} é a tensão elétrica de saída da ponte linearizada em [V]; V é tensão elétrica de alimentação da ponte em [V]; r é a razão característica da ponte em $[\Omega/\Omega]$. O Erro de Linearidade da ponte $\varepsilon_{L\%}$ é expresso pela Equação (16). A Figura 12 apresenta graficamente a relação entre $\varepsilon_{L\%}$, x e r .

$$\varepsilon_{L\%} = \frac{V_{out} - V_{outL}}{V_{out}} \cdot 100 \quad (16)$$

Figura 12. Erro relativo de linearidade da ponte de Wheatstone.



Fonte: Adaptado de (GARCÍA *et al.*, 2008).

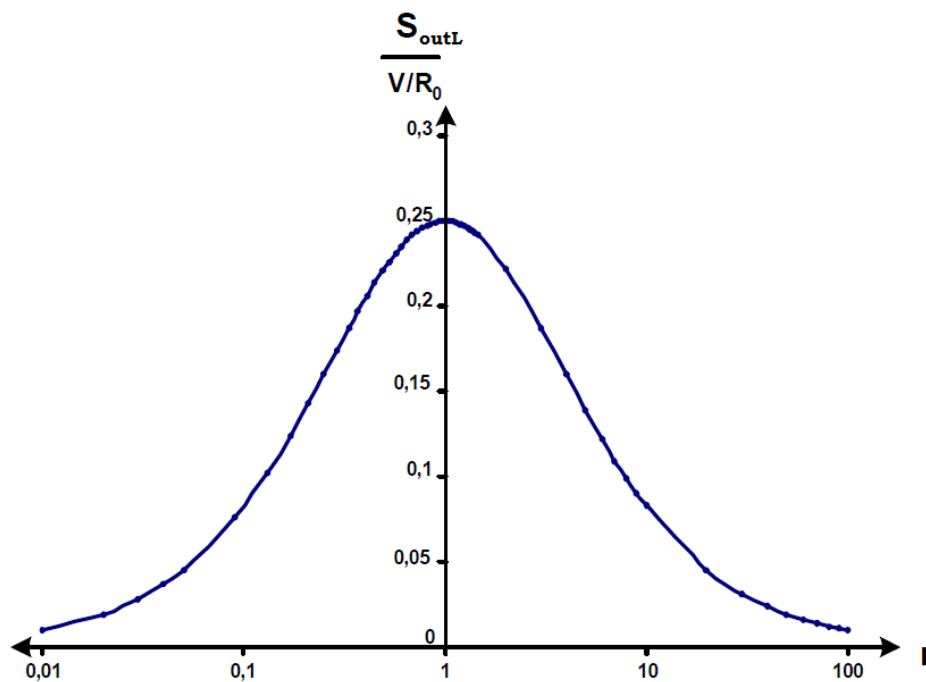
Outro parâmetro importante da ponte de Wheatstone que deve ser levado em conta é a sua sensibilidade que é definida como a razão entre a variação da saída de tensão elétrica da ponte e a variação da resistência R_X . Desta maneira, derivando a tensão elétrica de saída da ponte em relação à R_X , tem-se a Equação (17), que representa a sensibilidade da ponte linearizada S_{outL} .

$$S_{outL} = \frac{dV_{outL}}{dR_X} = \frac{V}{R_0} \cdot \frac{r}{(r+1)^2} \quad (17)$$

onde S_{outL} é a sensibilidade da ponte linearizada em $[V/\Omega]$; V_{outL} é a tensão elétrica de saída da ponte linearizada em $[V]$; V é tensão elétrica de alimentação da ponte em $[V]$; R_0 é a resistência elétrica inicial em $[\Omega]$ do extensômetro e r é a razão característica da ponte em $[\Omega/\Omega]$.

Observa-se, de acordo com a Equação (17), que a sensibilidade depende da tensão elétrica de saída da ponte V , da resistência inicial do extensômetro R_0 e, essencialmente, da razão característica da ponte. A Figura 13 ilustra a sensibilidade normalizada da ponte linearizada ($S_{outL}/V/R_0$) em função da razão característica considerando-se a ponte alimentada por tensão constante V .

Figura 13. Sensibilidade normalizada da ponte linearizada em função da razão característica.

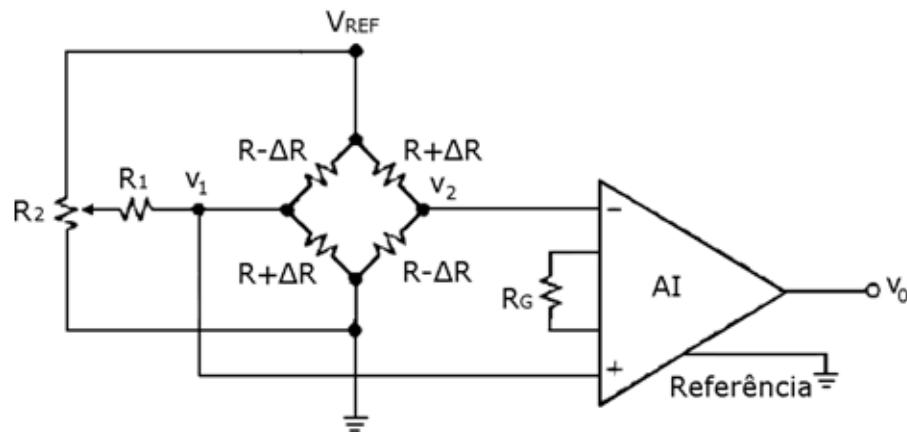


Fonte: Adaptado de (GARCÍA *et al.*, 2008).

Nota-se, de acordo com a Figura 13, que a sensibilidade normalizada tem seu valor máximo (0,25) para r igual a 1. No entanto, quando a razão característica tem seu valor igual ao da unidade, se produz um erro de linearidade significativo, visto que este erro é maior quanto menor for o valor de r (vide Figura 12). Desta maneira, deve-se buscar um compromisso entre linearidade e sensibilidade quando se utiliza a Ponte de Wheatstone para condicionamento de sinais de sensores (GARCÍA *et al.*, 2008).

O número de extensômetros ativos que substituem resistores na Ponte de Wheatstone depende da aplicação. Pode ser interessante, por exemplo, conectar extensômetros em lados opostos de uma barra, um em compressão e outro em tração. Este arranjo proporciona o dobro de sensibilidade do sistema para a mesma deformação quando comparado a uma configuração de um quarto de ponte. Em uma ponte completa com quatro extensômetros ativos, dois em compressão e dois em tração, tem-se uma sensibilidade quatro vezes maior que a situação com apenas um elemento ativo, além de compensar o efeito da temperatura na variação de resistência elétrica dos sensores. A Figura 14 ilustra, por exemplo, a configuração de ponte completa, onde cada saída é ligada a entrada de um amplificador de instrumentação (AI). A Equação (18) expressa a tensão elétrica de saída desta ponte.

Figura 14. Configuração de ponte completa.



Fonte: (Franco, 2002).

$$V_{out} = V_1 - V_2 = V_{ref} \cdot \frac{R + \Delta R - R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} = V_{ref} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (18)$$

Como a tensão elétrica de saída e a sensibilidade da ponte dependem diretamente do valor e da estabilidade da fonte de alimentação de tensão elétrica, as variações no tempo da fonte influenciam diretamente nos resultados. Desta maneira, para aplicações em que é neces-

sária precisão, utiliza-se circuitos integrados, denominados referências de tensão. Estes circuitos são capazes de fornecer uma tensão elétrica muito estável a partir de uma fonte de tensão não estável (GARCÍA *et al.*, 2008). Além disso, deseja-se que a resistência elétrica do sensor seja igual a R_0 quando a ponte está em equilíbrio, ou seja, quando não há deformação. Deste modo, uma das possíveis configurações, como ilustra a Figura 14, é utilizar o resistor R_1 e o trimpot R_2 , para obter-se o balanceamento da ponte.

Além da Ponte de Wheatstone, um estágio de amplificação torna-se necessário (vide Figura 14) visto que o sinal tensão elétrica de saída da ponte é tipicamente da ordem de milivolts (mV). Além disso, na maioria das aplicações com sensores é de interesse a visualização do valor de entrada do sistema, como força ou pressão, por exemplo, em dispositivos digitais. Desta maneira torna-se necessário converter o sinal analógico de tensão elétrica em um sinal digital. Para este propósito, utilizam-se conversores analógicos digitais, além do filtro *anti-aliasing* para delimitar a frequência do sinal e eliminar possíveis ruídos.

2.4 Plataformas de força para análise da força aplicada pelo ciclista

A literatura reporta diversas plataformas de força, desenvolvidas em laboratório, para mensurar as componentes da força aplicada através de pedais instrumentados ou pedivelas instrumentadas. A seguir são apresentados alguns destes modelos bem como exemplos de sistemas comerciais.

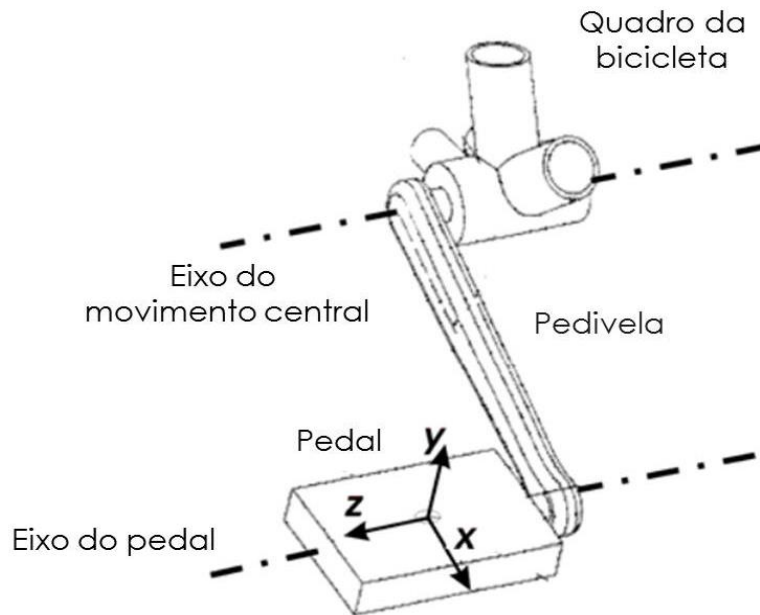
2.4.1 Análise da força através do pedal instrumentado

Como visto anteriormente, o ciclista aplica uma força sobre o pedal gerando uma força resultante. Esta força pode ser decomposta nas componentes perpendicular F_Y , paralela F_x e lateral F_Z como ilustrado pelo sistema de coordenadas do pedal da Figura 15. Estas componentes podem ser analisadas a partir de pedais instrumentados que utilizam, normalmente, tecnologia extensiométrica e o sistema de coordenadas semelhante ao sistema ilustrado pela Figura 15 (BOYD *et al.*, 1996; HULL & DAVIS, 1981; NABINGER *et al.*, 2002; NABINGER, 2006).

Na Figura 16 pode ser visualizado o comportamento de cada componente de força aplicada, durante uma revolução do pedal, em função do ângulo (em relação ao eixo do movimento central) da pedivela. Observa-se que F_Y é a componente mais significativa e que sua

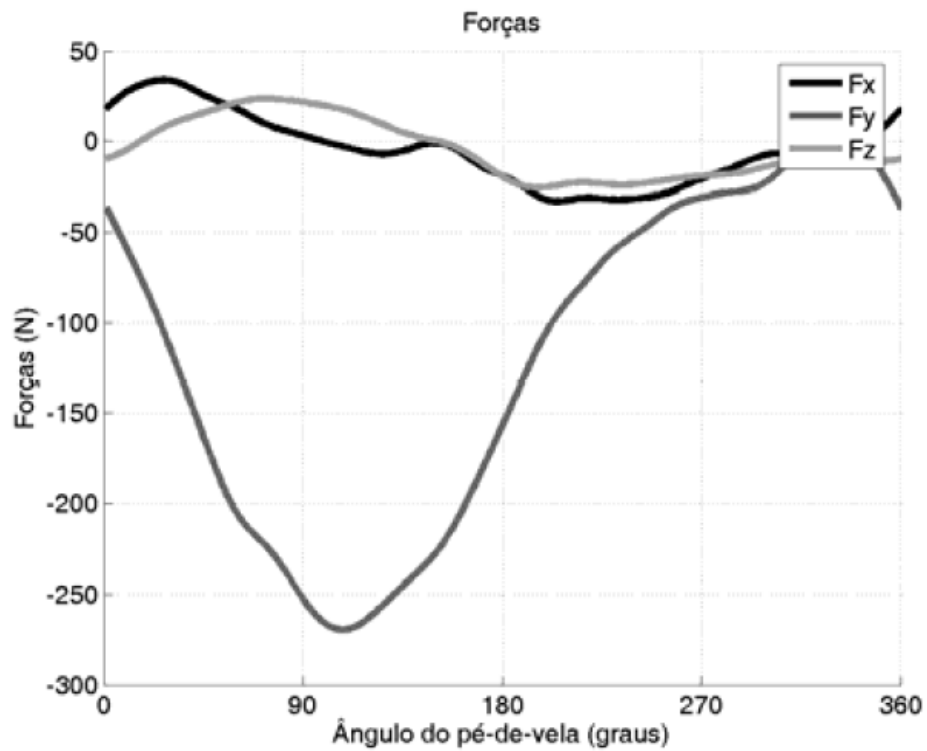
intensidade pode ser até aproximadamente cinco vezes maior que a intensidade das componentes F_x e F_z .

Figura 15. Sistema de coordenadas adotado para o pedal.



Fonte: Adaptado de (STONE, 1993).

Figura 16. Comportamento das componentes de força através do pedal instrumentado.

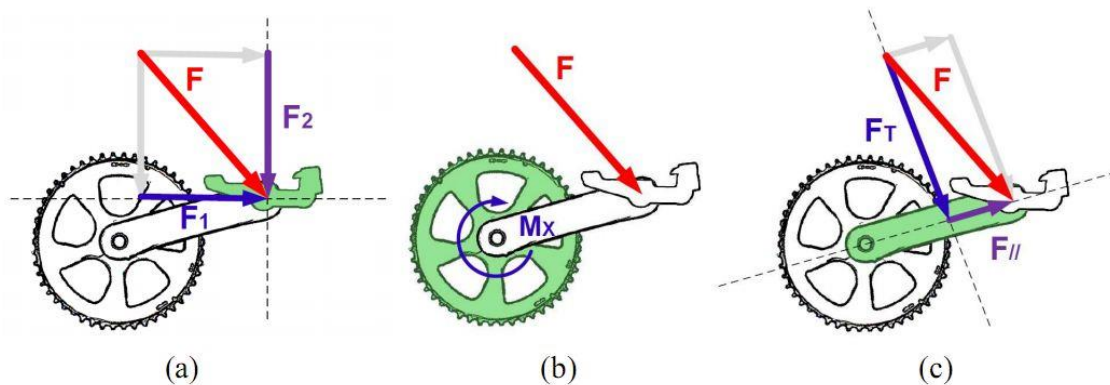


Fonte: (NABINGER, 2006).

2.4.2 Análise da força através da pedivela instrumentada

Além da construção da plataforma de força no pedal, é possível implementar a célula de carga na pedivela ou nos braços de sua coroa. De acordo com LAZZARI (2010), que realiza uma análise de três diferentes métodos para a medição das componentes de força, como ilustra a Figura 17, a adoção da pedivela como elemento ativo, em comparação a de um pedal, permite que as componentes perpendicular F_T e paralela $F_{//}$ sejam medidas diretamente. Desta forma não é necessária a decomposição de força para tal, reduzindo também a propagação de erros provocados pela incerteza na medida do ângulo (do pedal em relação a pedivela). Além disso, segundo LAZZARI (2010), a crescente diversificação da geometria dos pedais bem como a impossibilidade de mensurar as componentes individuais de força através do braço de coroa, leva a escolha de um sistema utilizando a pedivela.

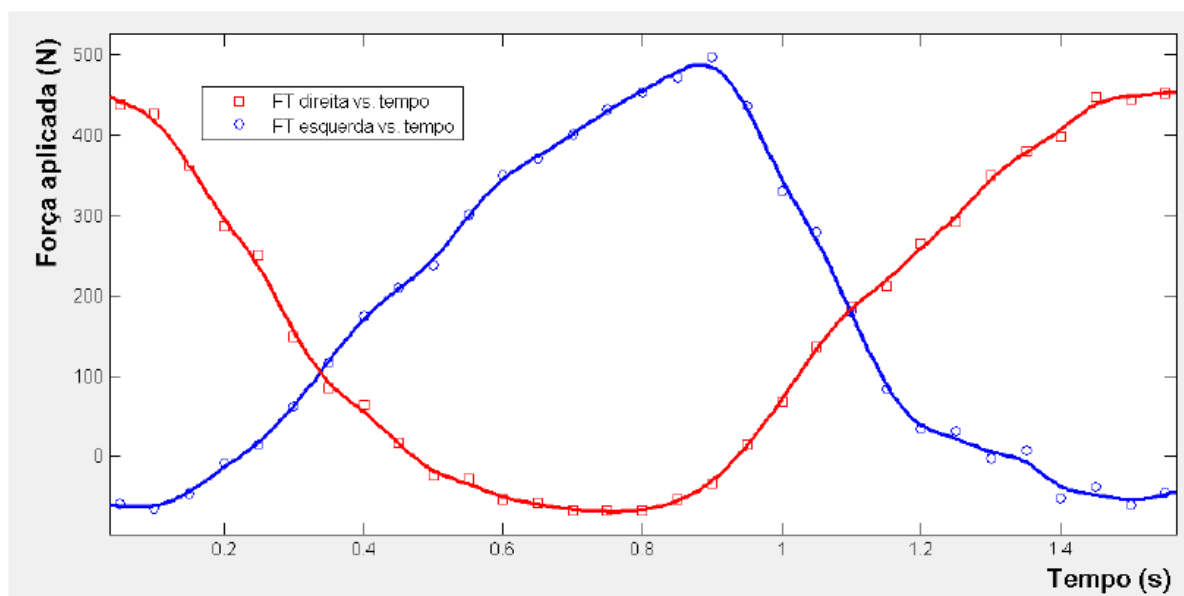
Figura 17. Decomposição de forças para diferentes estruturas de célula de carga: (a) pedal instrumentado, (b) braços de coroa instrumentados e (c) pedivela instrumentada.



Fonte: (LAZZARI, 2010).

Desta forma, LAZZARI (2010) desenvolveu uma plataforma de força através de uma pedivela instrumentada, utilizando extensômetros e tecnologia *bluetooth* para transmissão e aquisição de dados, com o objetivo de medir apenas a componente perpendicular (força efetiva). Os resultados obtidos pelo autor demonstraram um comportamento de assimetria das forças (vide Figura 18) onde os picos de força da perna esquerda e direita são de 497 N e 453 N, respectivamente.

Figura 18. Análise da assimetria de forças através da pedivela instrumentada.



Fonte: (LAZZARI, 2010).

Além do estudo de LAZZARI (2010), existem sistemas comerciais capazes de mensurar a força atuante na pedivela utilizando tecnologia extensiométrica e protocolo *Bluetooth* para a transmissão e aquisição de dados. O *Stages Power*, por exemplo, desenvolvido pela *Stages Cycling* (vide Figura 19) consiste em uma pedivela instrumentada que é capaz de fornecer, segundo o fabricante, a potência desenvolvida pelo ciclista através da medição da força efetiva. Porém, este sistema adquire apenas a força efetiva, negligenciando as outras forças atuantes na pedivela.

Outro exemplo que pode ser citado é a pedivela instrumentada da *Schoberer Rad Messtechnik* (SRM) que utiliza o braço da coroa como elemento ativo. Este sistema (vide Figura 20) permite, segundo o fabricante, mensurar o momento instantâneo aplicado que consiste na combinação de todas as forças atuantes no pedal. Este sistema tem sido muito utilizado por equipes profissionais, como é o caso da equipe nacional da França, para análise do desempenho dos atletas (BERTUCCI *et al.*, 2005).

Figura 19. Pedivela instrumentada comercial Stages Power.



Fonte: (STAGES CYCLING, 2014).

Figura 20. Pedivela instrumentada comercial SRM.



Fonte: (SCHOBENER RAD MESSTECHNIK, 2014).

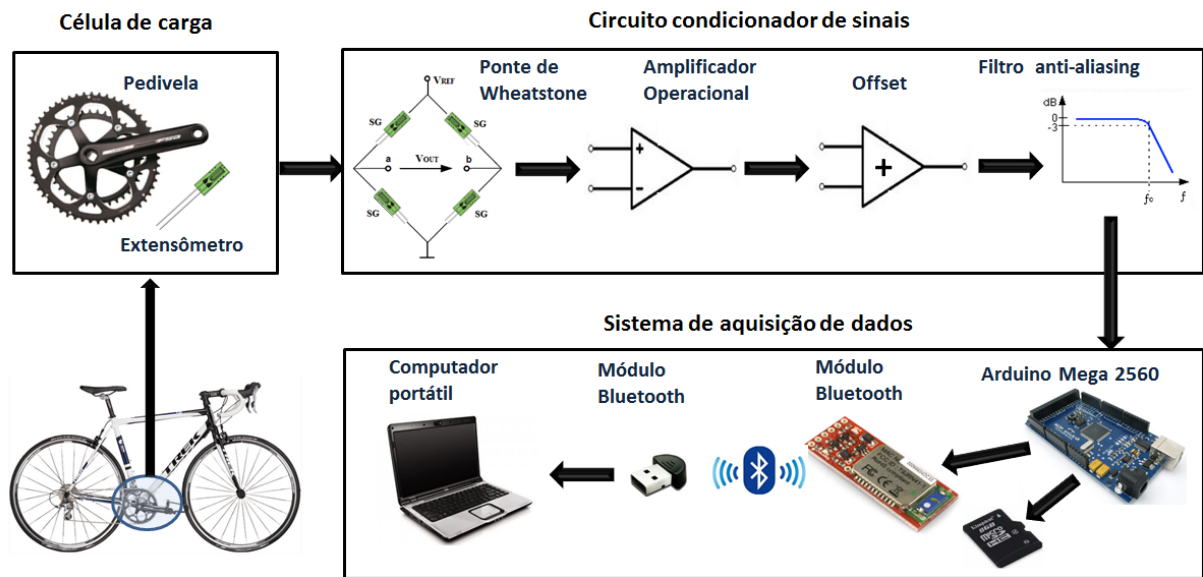
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada uma descrição detalhada das etapas para o desenvolvimento desta plataforma de força para medição tridimensional da força aplicada pelo ciclista na pedivela. O presente projeto foi desenvolvido com recursos do projeto de pesquisa “Desenvolvimento de células de carga para ciclismo”, nº 487210/2013-1 (Chamada ME/CNPq Nº 091/2013) sob coordenação do Prof. Dr. Alexandre Balbinot.

Primeiramente, desenvolveu-se a estrutura mecânica da célula de carga no *software* SolidWorks™ 2011 para análise do seu comportamento estático e dinâmico (Seção 3.1). Ainda nesta seção são apresentados os extensômetros utilizados, bem como, sua cimentação na pedivela. Em seguida, na Seção 3.2, são apresentados os procedimentos para a realização do ensaio de deformação. Na Seção 3.3 são detalhados os estágios que compõem o circuito de condicionamento. Nesta seção é tratado também o sistema de aquisição, armazenamento e transmissão de dados sem fio e a cadeia de medidas do projeto que apresenta todas as etapas do processo de tratamento da informação, desde a aplicação de força até a sua exibição via *software*. Na Seção 3.4 são apresentados os procedimentos para a calibração da plataforma de força. Os procedimentos para a realização do ensaio dinâmico, realizado com acelerômetro piezoelétrico, são apresentados na Seção 3.5. Por fim, na Seção 3.6, são apresentados os procedimentos para a realização de testes com a plataforma de força instalada na bicicleta de estrada.

A Figura 21 ilustra os elementos constituintes deste projeto, através de um diagrama de blocos. A aplicação de força na pedivela deforma a célula de carga causando um desbalanço na ponte de Wheatstone, percebida pelo circuito condicionador de sinais. Na saída deste circuito é conectado um sistema que grava os dados em um cartão de memória além de enviá-los, via comunicação sem fio, a um computador, onde os dados são coletados e analisados.

Figura 21. Diagrama de blocos do sistema experimental.



3.1 Projeto da célula de carga

Para a implementação da estrutura mecânica da célula de carga optou-se por uma pedivela comercial da *Full Speed Ahead (FSA)* modelo VERO FSA CK-602 175 mm forjado em liga de alumínio 6061-T6 (vide Figura 22). A escolha é justificada pela utilização desta pedivela por diversos ciclistas de competição, tanto profissionais como amadores, pela sua adaptação em diversas bicicletas de estrada e em diversos pedais comerciais. Além disso, sua estrutura e sua resistência mecânica são garantidas pelo fabricante.

Para que esta pedivela comercial seja adequada ao desenvolvimento da célula de carga é necessário conhecer o material empregado na peça, fornecida pelo fabricante, e sua estrutura precisa ter geometria simétrica, preferencialmente com faces opostas paralelas ao longo do eixo longitudinal, permitindo um comportamento linear (LAZZARI, 2010). Deste modo, para este projeto, optou-se pela pedivela com simetria.

Embora se conheça as características citadas anteriormente, é de grande importância analisar os pontos principais de deformação e os níveis de tensão mecânica da peça quando aplicada uma força. Os pontos de deformação definem onde preferencialmente serão colados os extensômetros e se a peça se comporta no regime elástico. A análise da tensão mecânica permite verificar se o resultado está dentro do limite do material e determinar os limites mecânicos da estrutura. Além disso, deve-se avaliar o comportamento dinâmico ressonante da estrutura para determinar se este pode ter influência significativa nas variáveis de saída da célula de carga.

Figura 22. Foto da pedivela comercial VERO FSA-6020 175 mm em liga de alumínio 6071-T6.



Deste modo, utilizou-se o *software* SolidWorks™ 2011 para desenhar a peça afim de possibilitar a sua simulação estática e dinâmica. Optou-se pela pedivela sem coroa, visto que esta apresenta geometria menos complexa que a pedivela que contém a coroa reduzindo os esforços de modelagem. Com este intuito, primeiramente será descrito o processo utilizado para a modelagem da estrutura e logo após serão apresentados os procedimentos para análise estrutural da peça, bem como, a cimentação dos extensômetros.

3.1.1 Procedimentos de modelagem

Para a construção do modelo virtual da pedivela comercial, utilizou-se a ferramenta *Loft* disponibilizado pelo *software* SolidWorks™ 2011. Esta ferramenta permite a geração de sólidos através da interconexão de perfis chaves do modelo. Desta forma, criou-se 14 perfis ao longo do eixo longitudinal da peça (de 0 a 110 mm) e que foram interconectados por curvas guias através da ferramenta numérica *Spline*. Todos os perfis criados encontram-se ao longo do Anexo A. As Figuras 23 e 24 ilustram, como exemplo, dois dos perfis criados e os perfis interconectados, respectivamente.

Além da interconexão longitudinal de perfis, a ferramenta *Loft* permite a união tridimensional de superfícies. A Figura 25 ilustra este processo, que foi utilizado para modelar as extremidades da peça. A Figura 26 apresenta o modelo da pedivela finalizada.

Figura 23. Exemplo de dois perfis criados.

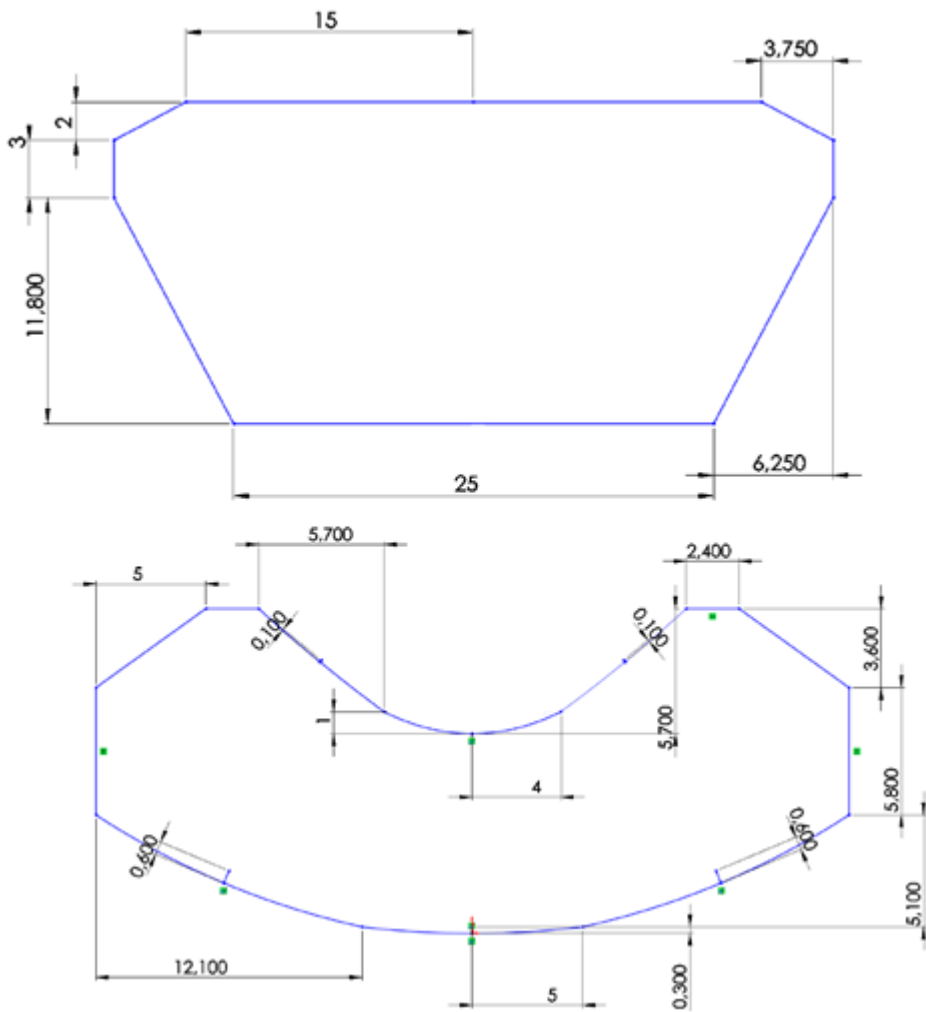


Figura 24. Modelagem por Loft: interconexão dos perfis longitudinais.

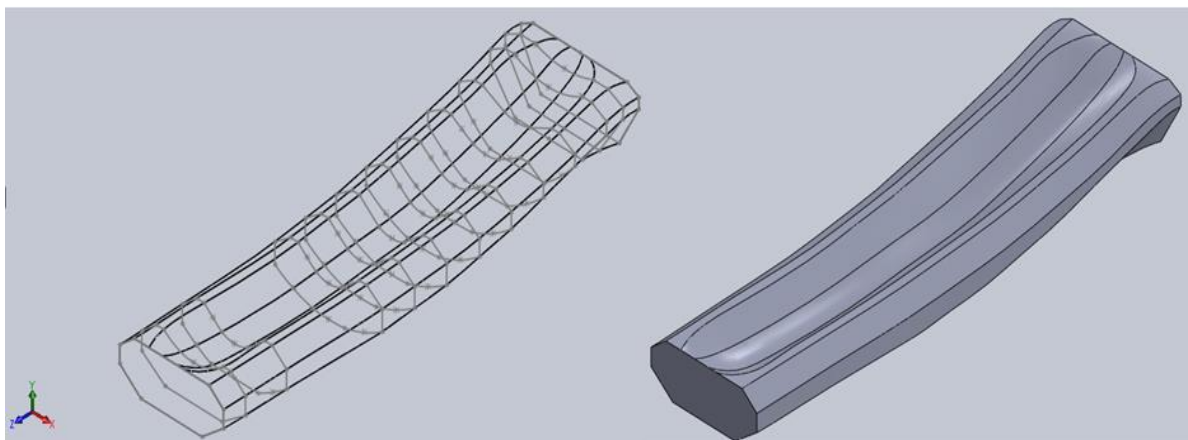


Figura 25. Modelagem por Loft: interconexão de superfícies tridimensionais.

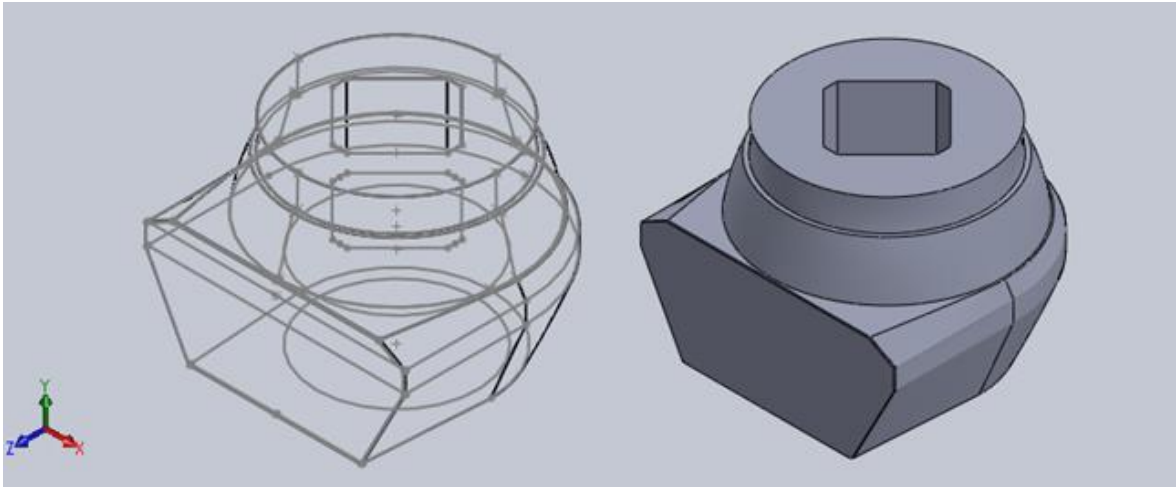


Figura 26. Modelagem da pedivela finalizada.

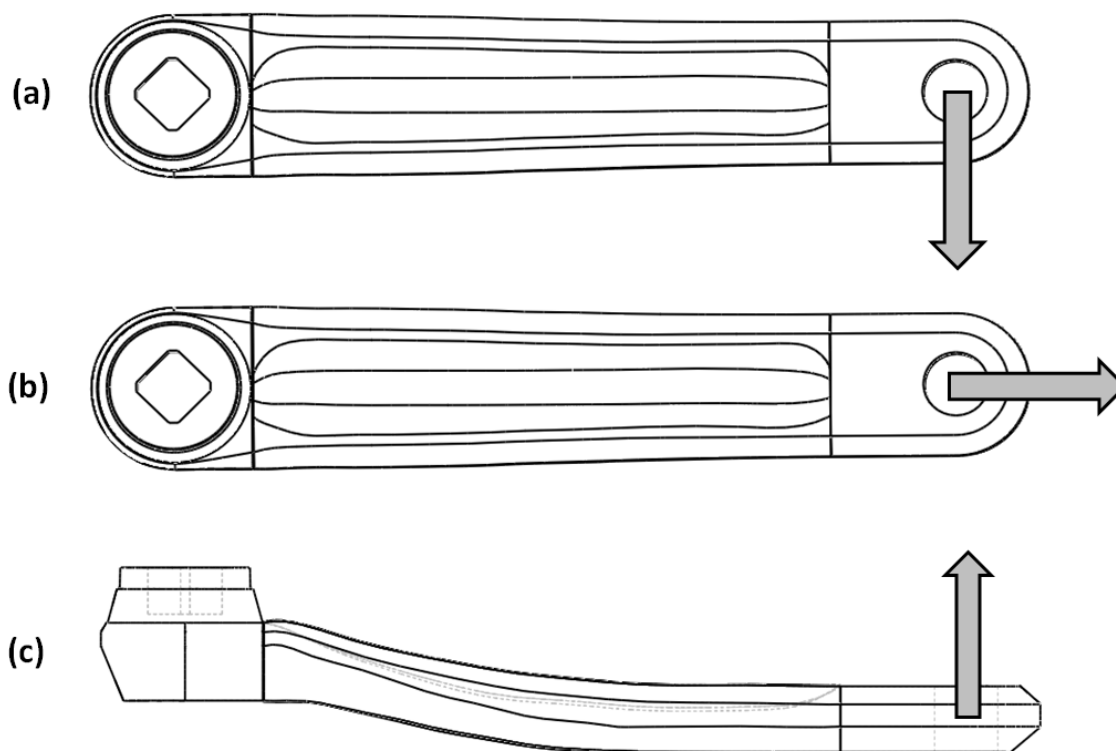


3.1.2 Procedimentos para a análise estrutural

A análise estrutural permite verificar o comportamento da célula de carga para a aplicação em questão. Esta análise consiste em observar os níveis de deformação e tensão mecânica para as diversas cargas mecânicas que a célula pode receber e também verificar o comportamento dinâmico da peça, afim de que este não influencie no resultado do sistema durante seu uso. Deste modo, realizaram-se simulações estáticas e dinâmicas, baseadas no modelo matemático de elementos finitos, através da ferramenta *Simulation* do SolidWorks™ 2011.

Primeiramente realizaram-se simulações estáticas do modelo anteriormente gerado a fim de analisar os níveis de deformação e tensão mecânica da estrutura para uma determinada carga representando a aplicação de força do ciclista. Como esta força dificilmente supera o peso total do ciclista (SMAK *et al.*, 1999), considerou-se um carregamento máximo de 800 N, que corresponde um atleta cuja massa é de aproximadamente 80 kg. Desta forma, engastou-se a peça, simulando o eixo central onde a pedivela é fixado, e aplicaram-se carregamentos nas direções paralela, perpendicular e lateral ao seu eixo longitudinal. Na Figura 27 estão representadas estas direções no sentido positivo. Esta convenção será adotada ao longo deste projeto. Os resultados obtidos referentes às deformações e às tensões mecânicas encontram-se detalhados na Seção 4.1.1.

Figura 27. Direção da componente de força aplicada na pedivela: (a) perpendicular, (b) paralela e (c) lateral.



Em seguida, realizaram-se simulações dinâmicas a fim de observar os modos ressonantes da peça. Estes modos ressonantes determinam as frequências de oscilação das cargas que podem danificar ou influenciar nos resultados da célula de carga. Desta forma a faixa de operação da célula deve estar abaixo do primeiro modo. Na Seção 4.1.2 são detalhados os resultados obtidos bem como os cinco primeiros modos.

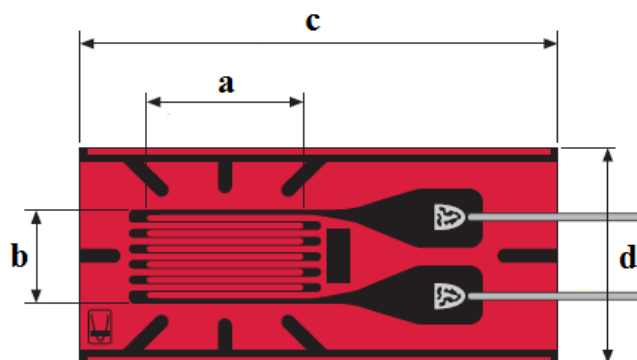
3.1.3 Cimentação dos extensômetros

A partir dos resultados da simulação estática realizada, foi possível identificar os principais pontos de deformação da peça onde foram cimentados os extensômetros. Foram utilizados dois tipos de extensômetros, ambos da marca Kyowa (modelos KFG-2-350-C1-23 e KFG-2-120-C1-23), cujas características e dimensões (vide Figura 28), fornecidas pelo fabricante, encontram-se nas Tabelas 1 e 2. A escolha destes extensômetros é justificada pela sua baixa incerteza de resistência elétrica e Fator gage que são garantidos pelo fabricante, além das suas dimensões em relação à região de colagem (vide Tabelas 1 e 2).

Estes sensores possuem fios de cobre revestido de prata soldados nos terminais e auto-compensação de temperatura para alumínio. Para colagem dos extensômetros, a superfície foi levemente lixada e limpa com álcool isopropílico para remoção de impurezas e possíveis gorduras depositadas na superfície. Utilizou-se a cola para metais Loctite 496 com base de cianoacrilato.

As Figuras 29, 30 e 31 apresentam com detalhes os extensômetros colados na pedivela e suas respectivas conexões na ponte de Wheatstone. Para medir as deformações devido à aplicação do carregamento na direção perpendicular e lateral, utilizaram-se os extensômetros de $350,6 \Omega$ e $120,2 \Omega$, respectivamente, em configuração de ponte completa visando uma maior sensibilidade. Já para medir a deformação devido à aplicação do carregamento na direção paralela, utilizaram-se dois extensômetros ativos de $350,6 \Omega$ e dois *dummies* de $350,6 \Omega$ (para fins de compensação de temperatura), pois ambos os lados da peça sofrem tração (ou compressão). Desta forma, totalizam-se 12 extensômetros para cada pedivela.

Figura 28. Dimensões do extensômetro.



Fonte: adaptado de (KYOWA, Catálogo de *Strain gages* de uso geral, 2014).

Tabela 1. Extensômetro de 350,6 Ω e Fator Gage 2,11.

Modelo	KFG-2-350-C1-23
Fator Gage	$2,11 \pm 1,0 \%$
Resistência	$350,6 \pm 0,6 \Omega$
Compensação de temperatura	Alumínio
a - comprimento da grelha	1 mm
b - largura da grelha	2 mm
c - comprimento da base	4,8 mm
d - largura da base	3,4 mm

Fonte: (KYOWA, 2014).

Tabela 2. Extensômetro de 120,2 Ω e Fator Gage 2,10.

Modelo	KFG-2-120-C1-23
Fator Gage	$2,10 \pm 1,0 \%$
Resistência	$120,2 \pm 0,2 \Omega$
Compensação de temperatura	Alumínio
a - comprimento da grelha	0,2 mm
b - largura da grelha	1,4 mm
c - comprimento da base	3,3 mm
d - largura da base	2,4 mm

Fonte: (KYOWA, 2014).

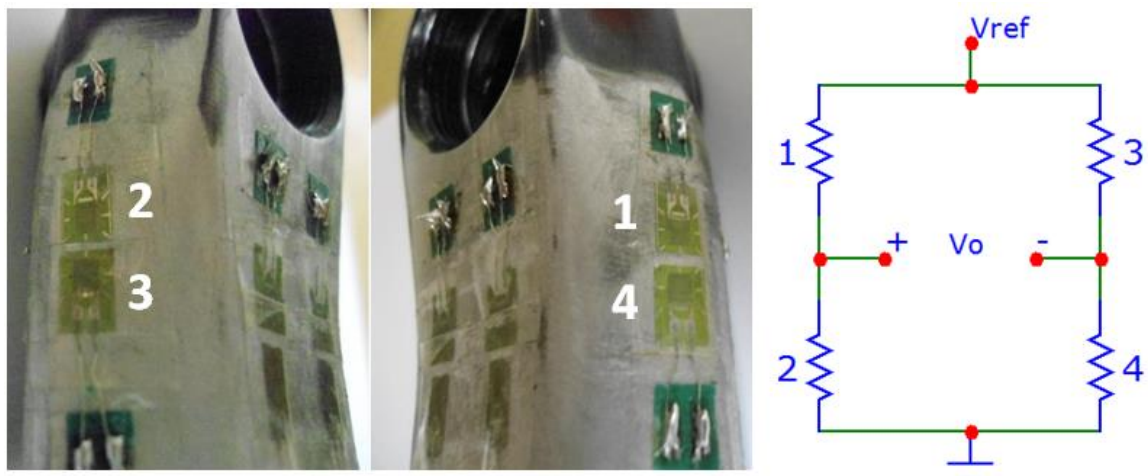
Figura 29. Conexões dos extensômetros de 350,6 Ω em configuração de ponte completa: direção perpendicular.

Figura 30. Conexões dos extensômetros de $350,6 \Omega$ em configuração de meia ponte: direção paralela.

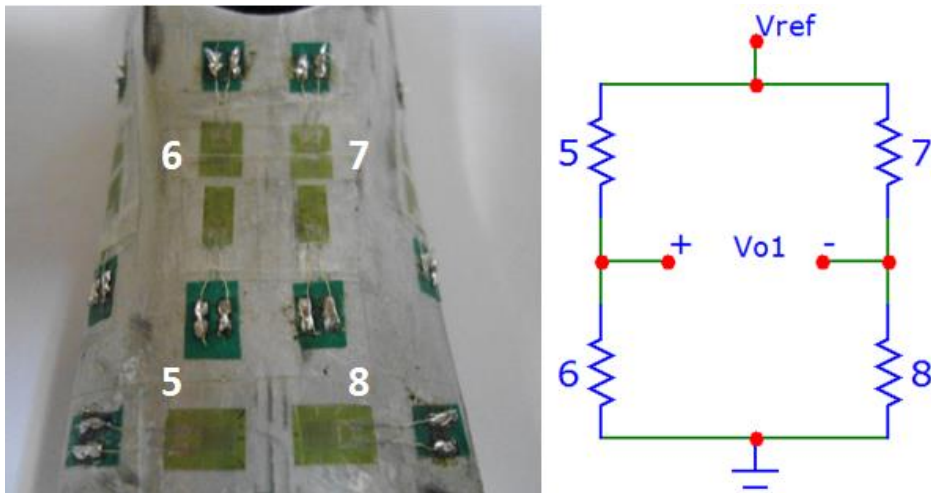
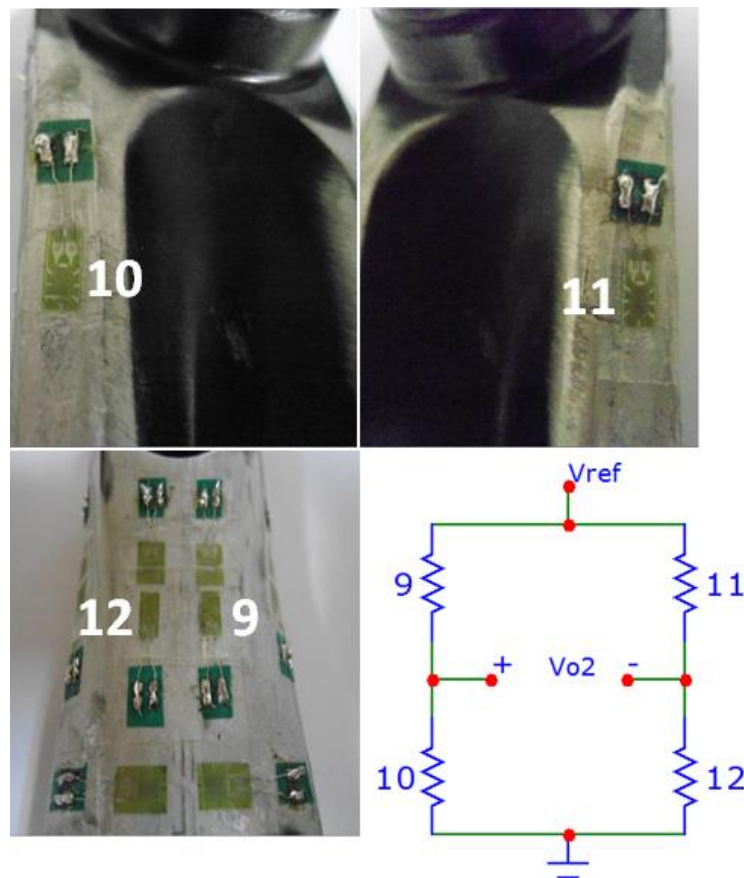


Figura 31. Conexões dos extensômetros de $120,2 \Omega$ em configuração de ponte completa: direção lateral.



3.2 Procedimentos para ensaio de deformação

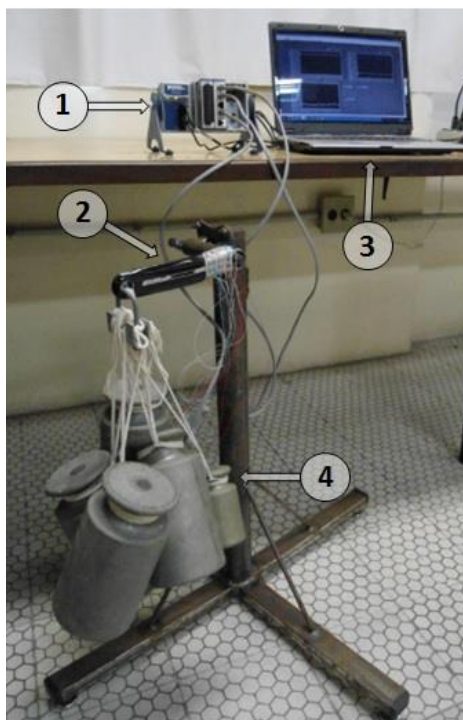
Através do ensaio de deformação da célula de carga, é possível determinar experimentalmente os valores de deformação na região onde foram cimentados os extensômetros. Desta

forma, estes valores experimentais permitem, de forma mais precisa, o desenvolvimento do circuito de condicionamento.

Para este ensaio engastou-se a pedivela comercial de forma similar à sua fixação na bicicleta, conforme a Figura 32, e aplicaram-se cargas até 62 kg nas direções perpendicular e paralela. Da mesma forma que os demais ensaios, este valor limite é justificado por limitações experimentais em função da falta de uma máquina de ensaio. Na direção lateral foram aplicadas cargas até 37 kg a fim de evitar o rompimento da peça.

Para condicionamento e aquisição de dados deste ensaio, utilizou-se o módulo NI-9237 da *National Instruments* que contém quatro canais de aquisição a uma taxa máxima de 50 kS/s a uma resolução de 24 bits e possui uma incerteza de 0,20 % na leitura obtida fornecendo o resultado em *Strains*. Este módulo contém internamente seu próprio sistema de alimentação de referência para ponte de Wheatstone e de condicionamento. Desta forma, a ponte foi montada conectando os extensômetros a este sistema através de um cabo RJ50 e adquiriu-se os dados via *software* LabVIEW™ 2011, a uma amostragem de 5000 amostras e a uma frequência de 1000 Hz. A estrutura montada para este ensaio é detalhada na Figura 32.

Figura 32. Estrutura utilizada para a realização do ensaio de deformação: (1) sistema de condicionamento e aquisição da National Instruments, (2) célula de carga, (3) computador portátil equipado com LabVIEW 2011 e (4) carga aplicada com pesos padrão.



Em seguida, realizou-se uma regressão linear através do método dos mínimos quadrados no *software* Matlab R2013a, obtendo-se assim a função de transferência experimental para cada direção de carregamento. Obteve-se, também, o erro de linearidade, de cada função de transferência, obtida através da Equação (19):

$$\text{Erro de linearidade \%} = 100 \cdot \frac{Dif_{m\acute{a}x}}{FE_s} \quad (19)$$

onde *Erro de linearidade* [%] expressa a relação entre a máxima diferença entre os pontos medidos e a reta calculada pela regressão linear, sendo $Dif_{m\acute{a}x}$ a maior distância entre a reta calculada e os pontos obtidos experimentalmente e FE_s é o fundo de escala de saída, da grandeza medida, do sistema. Os resultados estão presentes na Seção 4.2.

3.3 Projeto do circuito de condicionamento do sinal

A partir das funções de transferência obtidas no ensaio de deformação, foi possível determinar a deformação para uma determinada carga e assim, projetou-se o circuito de condicionamento. Visto que o ciclista aplica a maior parte do esforço, durante a pedalada, na direção perpendicular à pedivela, o sistema, para esta direção, foi projetado para uma faixa de esforços de -785 N a 785 N (correspondente a uma carga de 80 kg). Para as demais direções (paralela e lateral), de acordo os dados da revisão bibliográfica realizada, o sistema foi projetado para uma faixa de esforços de -196 N a 196 N (correspondente a uma carga de 20 kg).

Como se deseja medir as três componentes de força aplicadas em cada pedivela e utilizou-se uma Ponte de Wheatstone para cada componente, totalizam-se seis canais de condicionamento de sinal. Para facilitar a compreensão dos estudos realizados, optou-se por numerar os canais da seguinte forma:

- canais 1, 2 e 3 representam, respectivamente, as componentes perpendicular, paralela e lateral da pedivela esquerda (pedivela sem coroa);
- canais 4, 5 e 6 representam, respectivamente, as componentes perpendicular, paralela e lateral da pedivela direita (pedivela com coroa).

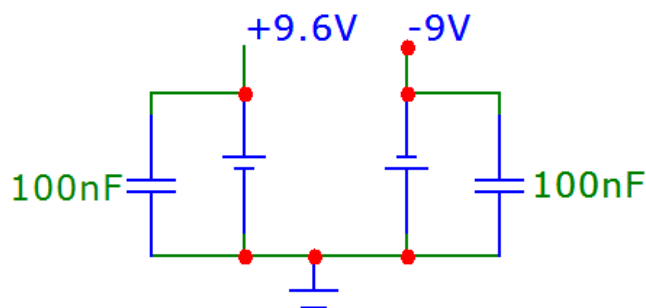
Deste modo, neste capítulo será detalhado o projeto de circuito de condicionamento apenas dos canais 1, 2 e 3. O circuito completo do canal 1 pode ser visualizado no Anexo C. O procedimento para os demais canais foi realizado de forma similar. É importante ressaltar

que se procurou desenvolver um circuito que ocupasse o menor espaço possível. Para melhor visualização, este circuito foi dividido em seis blocos como serão detalhados a seguir.

3.3.1 Circuito de alimentação

Optou-se por utilizar duas baterias, cada uma de 9 V e 400 mAh, ligadas em paralelo para fornecer a tensão elétrica negativa, e um conjunto de 8 baterias AA, cada uma de 1,2 V e 2300 mAh, ligadas em série, totalizando 9,6 V, para a alimentação de tensão elétrica positiva do circuito de condicionamento como ilustra a Figura 33. Desta forma, é possível alimentar os circuitos integrados e o sistema de aquisição e transmissão de dados utilizados neste projeto. Além disso, o emprego destas baterias torna mais prático o uso do sistema projetado, ou seja, independente de qualquer tipo de fonte de alimentação que seja ligada à rede elétrica, além de fornecer autonomia para o sistema. Para a redução de possíveis ruídos provenientes da alimentação, utilizaram-se dois capacitores de 100 nF em paralelo com cada bateria.

Figura 33. Circuito de alimentação.



3.3.2 Tensão elétrica de referência

Como a tensão elétrica de saída da Ponte de Wheatstone é proporcional à tensão elétrica de alimentação da mesma, esta alimentação deve ser constante e estável. Desta forma, utilizou-se o circuito integrado de referência de tensão elétrica *REF02* da *Analog devices* com precisão de $5,0 \text{ V} \pm 0,3 \%$ para alimentar os canais 1 e 2. Para alimentação do canal 3, optou-se pelo circuito integrado *REF03*, também da *Analog devices*, com precisão de $2,5 \text{ V} \pm 0,6 \%$. As Tabelas 3 e 4 ilustram as principais características destes componentes.

De acordo com as Tabelas 3 e 4, observa-se que estes circuitos integrados fornecem uma corrente elétrica máxima de 10 mA. Como se deseja utilizar o *REF02* para fornecer a

tensão elétrica de referência para os canais 1 e 2, utilizou-se uma topologia com um amplificador operacional de precisão (modelo *OP07C* da *Texas Instruments*) funcionando como comparador e com um transistor (de junção bipolar do tipo NPN modelo *BC546*) que fornece um ganho de corrente, como ilustra a Figura 34. Para a tensão elétrica de referência do canal 3 utilizou-se apenas um circuito *buffer* com o *OP07C* como ilustra a Figura 35. A Tabela 5 apresenta as principais características do circuito integrado *OP07C*.

Tabela 3. Principais características do circuito integrado REF02.

Tensão elétrica de saída	+ 5,0 V ± 0,2%
Baixa corrente de saída	10 mA máx
Ampla faixa de alimentação	7,0 V a 36 V
Baixa corrente de alimentação	1,4 mA máx
Excelente estabilidade de temperatura	8,5 ppm/°C máx
Baixo ruído	15 μ Vpp (0,1 Hz até 10 Hz)

Fonte: (Datasheet REF 02, Analog Devices, 2014).

Tabela 4. Principais características do circuito integrado REF03.

Tensão elétrica de saída	+ 2,5 V ± 0,6%
Baixa corrente de saída	10 mA máx
Ampla faixa de alimentação	4,5 V a 36 V
Baixa corrente de alimentação	1,4 mA máx
Excelente estabilidade de temperatura	50 ppm/°C máx
Baixo ruído	6 μ Vpp (0,1 Hz até 10 Hz)

Fonte: (Datasheet REF 03, Analog Devices, 2014).

Figura 34. Circuito de tensão elétrica de referência dos canais 1 e 2.

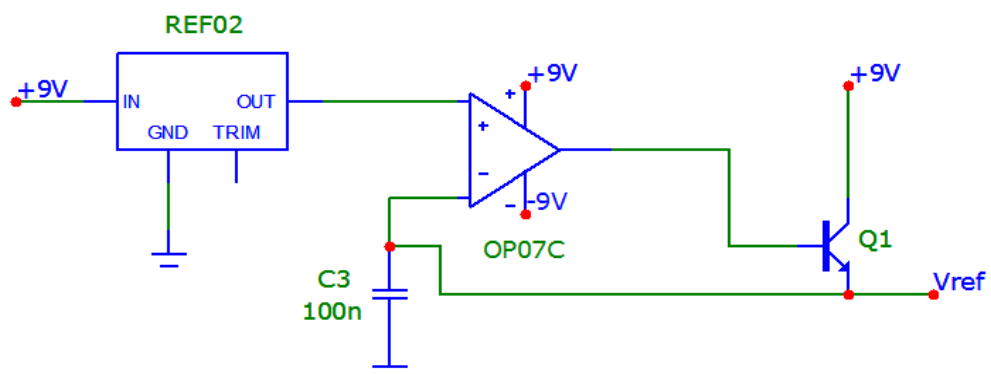


Figura 35. Circuito de tensão elétrica de referência do canal 3.

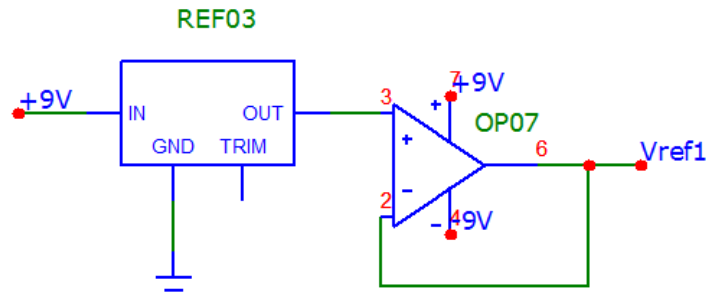


Tabela 5. Principais características do circuito integrado OP07C.

Ampla faixa de alimentação	$\pm 3 \text{ V a } \pm 18 \text{ V}$
Faixa de tensão elétrica de entrada	$\pm 14 \text{ V}$
Baixo <i>offset</i> de entrada	$150 \mu\text{V máx}$
Baixo drift	$1,8 \mu\text{V}/^\circ\text{C máx}$
Baixo ruído	$9,8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Rejeição de modo comum CMRR	100 dB mín

Fonte: (Datasheet OP07C, Texas Instruments, 2014).

3.3.3 Ponte de Wheatstone e circuito de ajuste de zero

Devido à incerteza da resistência elétrica e às imperfeições dos extensômetros, conectados na Ponte de Wheatstone, os valores de resistência elétrica variam de um sensor para o outro. Deste modo, torna-se necessário um ajuste de *offset* (ou ajuste de zero) da tensão elétrica de saída da ponte para que quando não haja carga na célula de carga, esta tensão seja nula. A Figura 36 ilustra, por exemplo, o circuito de ajuste de zero, representado pelo *trimpot* P1 e pelo resistor R1, e os quatro extensômetros de $350,6 \pm 0,6 \Omega$ conectados na ponte referente ao canal 1. Cada Ponte de Wheatstone conta um com um circuito de ajuste de zero.

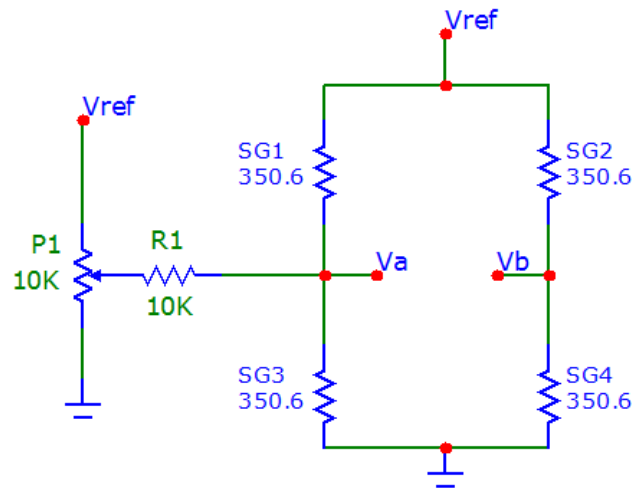
A corrente elétrica que passa por cada braço da ponte, do canal 1 e 2 e do canal 3, quando não há carga é expressa pelas Equações (20) e (21), respectivamente:

$$I = \frac{5,0}{2 \times 350,6} = 7,13 \text{ mA} \quad (20)$$

$$I = \frac{2,5}{2 \times 120,2} = 10,4 \text{ mA} \quad (21)$$

Estes valores encontram-se dentro da faixa aceitável, pois de acordo com o fabricante, os extensômetros de 350 Ω e de 120 Ω podem suportar até 20 mA e 15 mA, respectivamente, quando colados em superfícies de metal.

Figura 36. Ponte de Wheatstone e circuito de ajuste de zero do canal 1.



A tensão elétrica de saída da ponte dos canais 1, 2 e 3 é dada pelas Equações (22), (23) e (24), respectivamente.

$$V_{o_ponte1} = V_a - V_b = V_{ref} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = V_{ref} \cdot K \cdot \varepsilon = (5,0) \cdot (2,11) \cdot \varepsilon = 10,55 \cdot \varepsilon \quad (22)$$

$$V_{o_ponte2} = V_c - V_d = \frac{V_{ref}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{V_{ref}}{2} \cdot K \cdot \varepsilon = \frac{(5,0)}{2} \cdot (2,11) \cdot \varepsilon = 5,275 \cdot \varepsilon \quad (23)$$

$$V_{o_ponte3} = V_e - V_f = V_{ref1} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = V_{ref1} \cdot K \cdot \varepsilon = (2,5) \cdot (2,10) \cdot \varepsilon = 5,25 \cdot \varepsilon \quad (24)$$

A sensibilidade da célula de carga referente aos canais é dada pelas Equações (25), (26) e (27):

$$S_{célula1} = \frac{dV_{o_ponte1}}{d\varepsilon} = 10,55 \text{ V}/\varepsilon = 0,01055 \text{ mV}/\mu\varepsilon \quad (25)$$

$$S_{célula2} = \frac{dV_{o_ponte2}}{d\varepsilon} = 5,275 \text{ V}/\varepsilon = 0,05275 \text{ mV}/\mu\varepsilon \quad (26)$$

$$S_{célula3} = \frac{dV_{o_ponte3}}{d\varepsilon} = 5,25 \text{ V}/\varepsilon = 0,0525 \text{ mV}/\mu\varepsilon \quad (27)$$

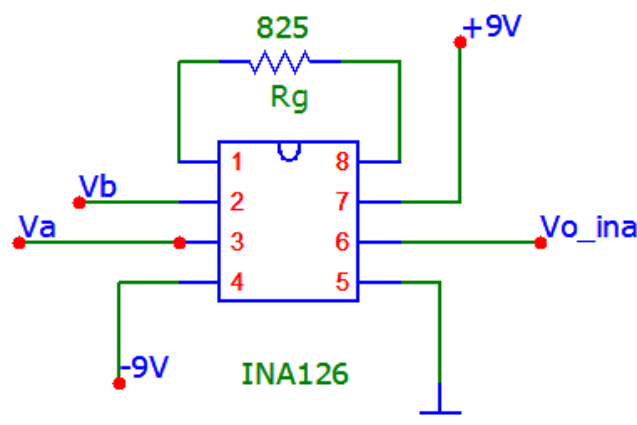
3.3.4 Estágios de amplificação

Com o propósito de amplificar o baixo sinal de saída da ponte e utilizar a máxima excursão de entrada do conversor analógico-digital (de 0 a 5 V como será detalhado na Seção 3.3.7), torna-se necessário um estágio de amplificação.

Como a resposta em frequência do circuito amplificador está relacionada a seu ganho, é possível notar a limitação quanto ao seu uso frente a ganhos elevados. Por esse motivo, foram escolhidos dois estágios de amplificação, como será visto a seguir, que possuem como resultado a multiplicação de seus ganhos, tornando o sistema mais robusto.

Para o circuito do primeiro estágio de amplificação, como ilustra a Figura 37, utilizou-se o amplificador de instrumentação *INA126P* da *Texas Instruments*, cujas principais características encontram-se na Tabela 6. O uso deste amplificador de instrumentação é interessante visto que ele opera de modo diferencial.

Figura 37. Circuito do primeiro estágio de amplificação (canal 1).



A tensão elétrica de saída do amplificador *INA126P* é dada pela Equação (28):

$$V_{o_ina} = G_1 \cdot (V_{in}^+ - V_{in}^-) \quad (28)$$

onde V_{o_ina} é a tensão elétrica de saída do amplificador em [V]; V_{in}^+ é a tensão elétrica em [V] da entrada diferencial positiva (pino 3); V_{in}^- é a tensão elétrica em [V] da entrada diferencial negativa (pino 2) e G_1 é o ganho do amplificador em [V/V]. A Equação de ganho do amplificador é dada pela Equação (29):

$$G_1 = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (29)$$

onde R_G é a resistência elétrica em [Ω] de ajuste de ganho que deve ser conectada entre os pinos 1 e 6 do amplificador.

Tabela 6. Principais características do circuito integrado INA126P.

Faixa de alimentação	$\pm 1,35 \text{ V}$ à $\pm 18 \text{ V}$
Tensão de entrada de sinal	(V-)-0,7 à (V+)+0,7V
Corrente de entrada de sinal	10 mA
Offset de entrada	250 μV máx
Ruído	35 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ganho	5 à 10k V/V
Erro máximo de ganho	0,5 %

Fonte: (Datasheet INA126P, Texas instruments, 2014).

Desta maneira, conectou-se a saída da ponte V_a e V_b nos pinos 3 e 2, respectivamente, do amplificador *INA126P* e escolheu-se o resistor $R_G = 825 \Omega \pm 1\%$. Assim, o ganho deste primeiro estágio, definido para todos os canais, é dado pela Equação (30):

$$G_1 = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{825 \Omega} = 102 \text{ V/V} \quad (30)$$

O circuito do segundo estágio de amplificação é composto pelo amplificador de precisão *OP07C* da *Texas Instruments*, como ilustra a Figura 38. A tensão elétrica de saída V_{o_op07} e o ganho G_2 deste segundo estágio são dados pelas Equações (31) e (32), respectivamente.

$$V_{o_op07} = G_2 \cdot V_{o_ina} \quad (31)$$

$$G_2 = \frac{R_3}{R_2} \quad (32)$$

Para cada canal, escolheram-se os resistores disponíveis com $\pm 1\%$ de incerteza a fim de obter a tensão elétrica de saída do estágio de amplificação $V_{o_op07} = 2,5 V$. Na Tabela 7 encontram-se os ganhos de todos os canais deste projeto.

Figura 38. Circuito do segundo estágio de amplificação (canal 1).

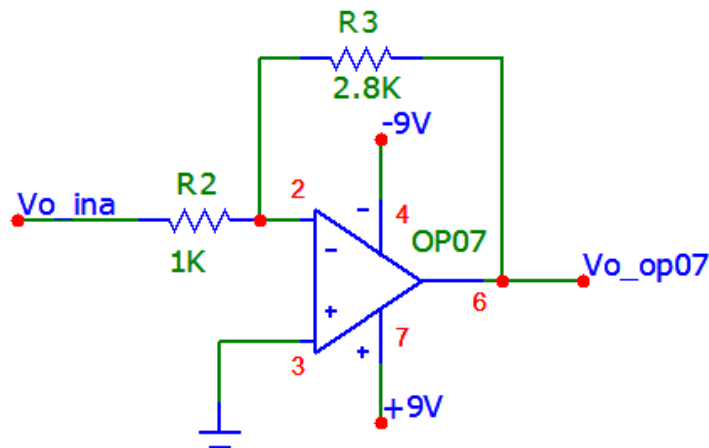


Tabela 7. Ganhos referentes a cada canal.

Canais de condicionamento	Primeiro estágio de ganho	Segundo estágio de ganho	Ganho total
Canal 1	102	2,80	286
Canal 2	102	6,49	662
Canal 3	102	8,66	883
Canal 4	102	3,32	339
Canal 5	102	8,45	862
Canal 6	102	8,66	883

3.3.5 Circuito de filtragem

Com o objetivo de manter a célula de carga operando abaixo do primeiro modo de ressonância e de eliminar ruídos provenientes das altas frequências, projetou-se um filtro anti-aliasing com a ajuda do software FilterPro Desktop versão 3.1 da *Texas Instruments*.

Devido aos componentes disponíveis, projetou-se um filtro passa-baixas de 2ª ordem de topologia *Sallen-Key* com ganho unitário (0 dB), cuja frequência de corte é de 24 Hz. A Tabela 8 apresenta as principais características do filtro. A Figura 39 ilustra o esquemático do circuito do filtro projetado composto por um circuito integrado *OP07C*, dois resistores $R_4 = R_5 = 43 k\Omega \pm 1\%$ e dois capacitores $C_4 = C_5 = 100 nF$.

Tabela 8. Principais características do filtro projetado.

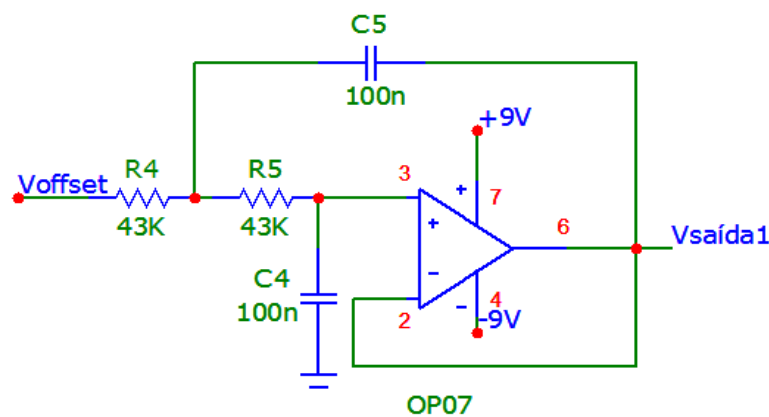
Tipo	Passa-baixas
Topologia	Sallen-key
Frequência de corte	24 Hz
Ordem	2ª
Ganho	1 V/V (0 dB)
Número de estágios	1
Fator de qualidade	0,5

A função transferência no domínio da frequência do filtro é dada pelas Equações (33) e (34):

$$H_{filtro}(s) = \frac{V_{o_filtro}(s)}{V_{offset}(s)} = \frac{1}{s^2 + \left(\frac{1}{R_5 C_5} + \frac{1}{R_4 C_5}\right)s + \frac{1}{R_4 R_5 C_4 C_5}} \quad (33)$$

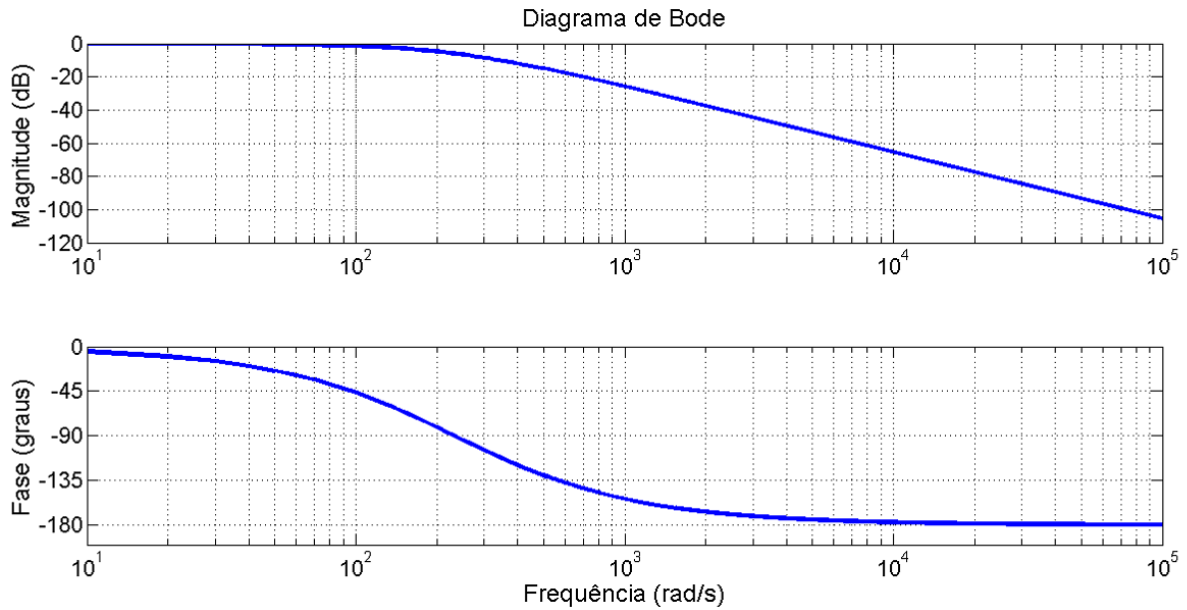
$$H_{filtro}(s) = \frac{54083,288}{s^2 + (465,116)s + 54083,288} \quad (34)$$

Figura 39. Circuito do filtro projetado.



O diagrama de Bode do filtro projetado pode ser visualizado na Figura 40. Observa-se que, por se tratar de um filtro real de segunda ordem, a magnitude tem declividade de -40 dB/dec . Além disso, a presença de dois polos reais e negativos faz com que a fase decaia -180° , sendo que cada polo contribui com -90° . Deste modo, a frequência de corte do filtro pode ser visualizada no ponto em que a magnitude decai 3 dB. Neste caso, esta frequência é de 150 rad/s ou de 24 Hz como esperado.

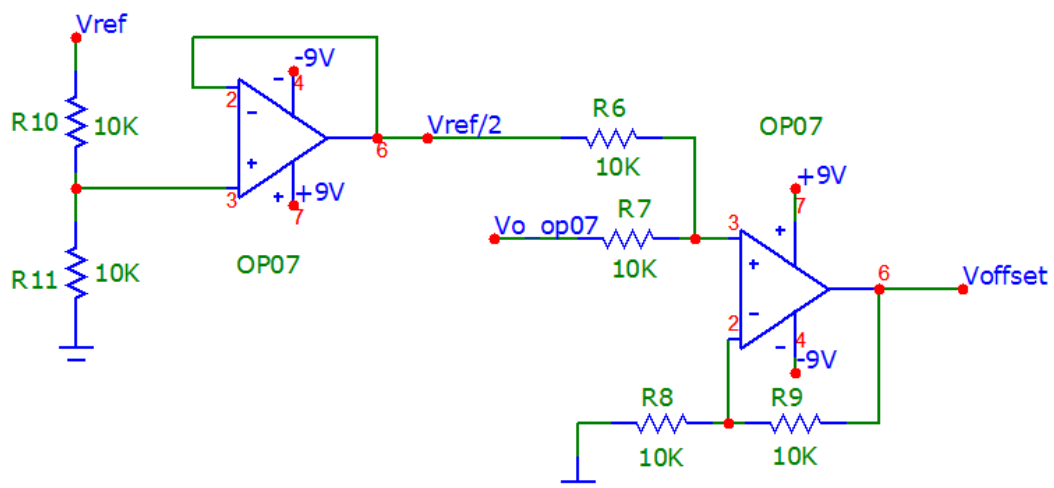
Figura 40. Diagrama de Bode do filtro projetado.



3.3.6 Circuito somador e função transferência do circuito de condicionamento

Visto que o sinal possui uma excursão máxima de $-2,5$ V e $2,5$ V, somou-se a este sinal um *offset* de $2,5$ V através de um circuito somador. Deste modo, com uma carga nula aplicada à pedivela, a saída do circuito indicará $2,5$ V e o sinal é normalizado para a entrada do conversor analógico-digital que requer uma entrada entre 0 e 5V. O circuito somador, representado pela Figura 41, é composto por seis resistores de $10\text{ k}\Omega \pm 1\%$ e pelo circuito integrado *OP07C*.

Figura 41. Circuito somador.



Desta forma, a expressão da tensão elétrica de saída do canal 1 em função da deformação sofrida pela peça é descrita pelas Equações (35) e (36):

$$V_{saida1} = G_1 \cdot G_2 \cdot \left(\frac{R_6}{R_6 + R_7} \right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8} + 1 \right) \cdot V_{o_ponte1} + \left(\frac{R_7}{R_6 + R_7} \right) \cdot \left(\frac{R_{11}}{R_{10} + R_{11}} \right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8} + 1 \right) \cdot V_{ref} \quad (35)$$

$$V_{saida1} = G_1 \cdot G_2 \cdot V_{o_ponte1} + \frac{V_{ref}}{2} = (102) \cdot (2,8) \cdot (10,55 \cdot \varepsilon) + 2,5 = 3012 \cdot \varepsilon + 2,5 \quad (36)$$

Da mesma análise realizada para o canal 1, tem-se a tensão elétrica de saída dos canais 2 e 3, descritas pelas Equações (37) e (38), respectivamente:

$$V_{saida2} = G_1 \cdot G_2 \cdot V_{o_ponte2} + \frac{V_{ref}}{2} = (102) \cdot (6,49) \cdot (5,275 \cdot \varepsilon) + 2,5 = 3491 \cdot \varepsilon + 2,5 \quad (37)$$

$$V_{saida3} = G_1 \cdot G_2 \cdot V_{o_ponte3} + V_{ref1} = (102) \cdot (8,66) \cdot (5,250 \cdot \varepsilon) + 2,5 = 4636 \cdot \varepsilon + 2,5 \quad (38)$$

A fim de verificar o correto funcionamento do circuito de condicionamento, primeiramente, alimentou-se o circuito com uma fonte simétrica modelo *POL-16E* da empresa *Poli-term*. Logo após, mediu-se a tensão elétrica de saída de cada etapa do circuito, para uma aplicação de carga até 60 kg, utilizando o multímetro digital com resolução de 6 1/2 dígitos modelo *DMM4050* da empresa *Tektronix*, cuja incerteza e resolução, para cada escala utilizada, podem ser visualizadas na Tabela 9. A partir dos valores de tensão elétrica medidos, calcularam-se os ganhos de cada estágio de amplificação e o *offset* de tensão elétrica do circuito somador.

Tabela 9. Incerteza e resolução referente ao multímetro Tektronix DMM4050.

Escala de tensão elétrica DC	Resolução	Incerteza
100 mV	100nV	± (0,003% da leitura + 0,003% da escala)
1 V	1µV	± (0,002% da leitura + 0,0006% da escala)
10 V	10 µV	± (0,0015% da leitura + 0,0004% da escala)

Em seguida, analisou-se a resposta do filtro, com o osciloscópio, para uma frequência de entrada menor, igual e maior que a frequência de corte, gerada por um gerador de sinais. Os resultados são detalhados na Seção 4.3 deste trabalho.

3.3.7 Sistema de aquisição, armazenamento e transmissão sem fio de dados

A fim de monitorar as componentes de força aplicada pelo ciclista em tempo real e diretamente no ambiente de competição, optou-se pela utilização do sistema de aquisição, armazenamento e transmissão sem fio de dados desenvolvido por MILANI (2014). Este sistema é composto pela plataforma de desenvolvimento *Arduino MEGA 2560* da empresa *Gravitech* que possui um microcontrolador *ATmega2560* da empresa *Atmel*.

Os seis canais analógicos do sistema de condicionamento são conectados ao conversor analógico-digital do *Arduino*. Este conversor possui uma resolução de 10 bits e requer uma tensão elétrica de entrada entre 0 e 5 V gerando, portanto, um valor de 0 a 1023 conforme a Equação (38):

$$\text{Valor digital} = \frac{\text{Valor analógico}}{5} \times 1023 \quad (39)$$

onde *Valor analógico* é a tensão elétrica em [V] da saída de canal de condicionamento aplicada ao pino de entrada analógica em questão e *Valor digital* é um valor do tipo *integer* a ser processado.

Os dados, então, são enviados a um computador via *Bluetooth* para análise através de gráficos gerados via Matlab R2013a, além de serem armazenados através de um sistema *Datalogger* em um cartão do tipo *microSD*, para análise posterior.

3.3.8 Projeto da cadeia de medidas

Nas Figuras 42, 43, 44, 45, 46 e 47 encontram-se as cadeias de medida propostas para este trabalho. São apresentados os valores máximos e mínimos de cada etapa que compõe cada canal do projeto. Inicialmente a aplicação de uma carga mecânica sobre a plataforma de força faz com que a célula de carga sofra deformação. Esta por sua vez é percebida pelo extensômetro que tem sua resistência elétrica alterada causando um desbalanço na Ponte de Wheatstone. A tensão elétrica de saída da ponte é amplificada, normalizada e filtrada para máxima excursão do conversor analógico-digital, o qual transforma esta tensão em um número de 0 a 1023 (10 bits).

Figura 42. Cadeia de medidas proposta do canal 1.

Carga aplicada	Deformação	ΔR	Ponte de Wheatstone	Estágios de ganho	Circuito de offset	ADC (10 bits)	Carga medida
785N	824 $\mu\epsilon$	1,74m Ω	8,70mV	2,5V	5V	1111111111	785N
-785N	-824 $\mu\epsilon$	-1,74m Ω	-8,70mV	-2,5V	0V	0000000000	-785N

Figura 43. Cadeia de medidas proposta do canal 2.

Carga aplicada	Deformação	ΔR	Ponte de Wheatstone	Estágios de ganho	Circuito de offset	ADC (10 bits)	Carga medida
196N	705 $\mu\epsilon$	1,49m Ω	3,72mV	2,5V	5V	1111111111	196N
-196N	-705 $\mu\epsilon$	-1,49m Ω	-3,72mV	-2,5V	0V	0000000000	-196N

Figura 44. Cadeia de medidas proposta do canal 3.

Carga aplicada	Deformação	ΔR	Ponte de Wheatstone	Estágios de ganho	Circuito de offset	ADC (10 bits)	Carga medida
196N	537 $\mu\epsilon$	1,13m Ω	2,82mV	2,5V	5V	1111111111	196N
-196N	-537 $\mu\epsilon$	-1,13m Ω	-2,82mV	-2,5V	0V	0000000000	-196N

Figura 45. Cadeia de medidas proposta do canal 4.

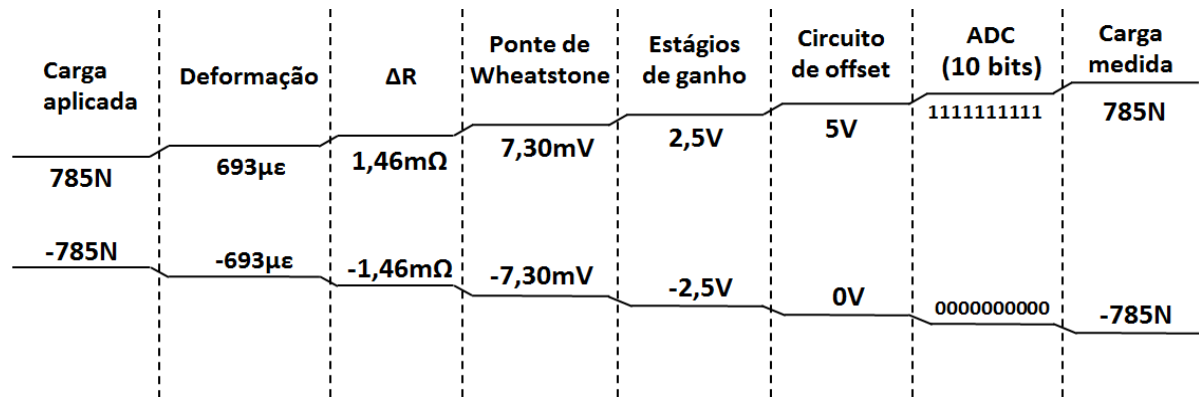


Figura 46. Cadeia de medidas proposta do canal 5.

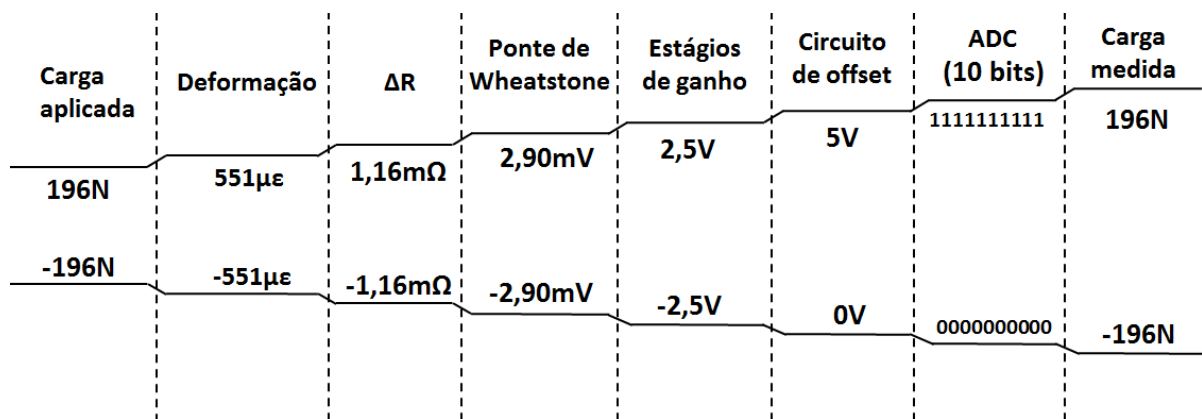
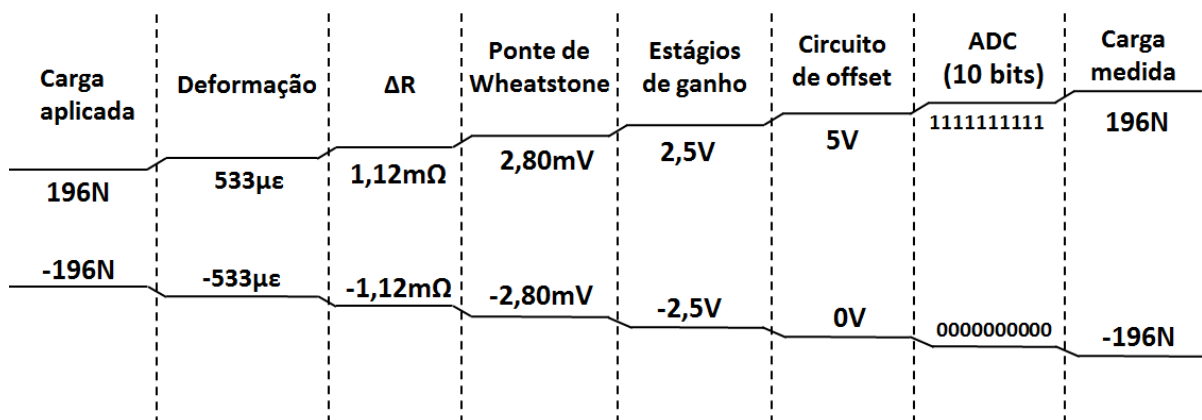


Figura 47. Cadeia de medidas proposta do canal 6.



3.4 Procedimentos para calibração estática do sistema

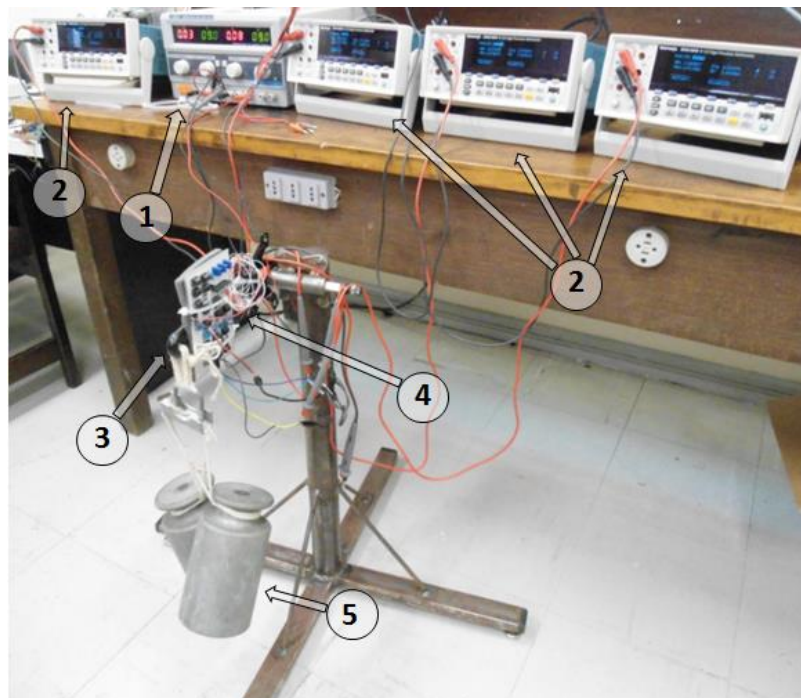
Através da calibração estática é possível obter a função de transferência experimental para cada canal de condicionamento da célula de carga. Obtém-se, portanto, a sensibilidade da

célula de carga, ou seja, a relação entre a variação da tensão elétrica de saída do circuito de condicionamento e a carga aplicada em tal direção.

A estrutura utilizada neste ensaio pode ser vista na Figura 48. Da mesma forma que o método empregado no ensaio de deformação, engastou-se a pedivela comercial de forma similar a sua fixação na bicicleta e aplicaram-se sucessivas cargas até 60 kg nas direções perpendicular e paralela e até 20 kg na direção lateral.

O circuito de condicionamento, neste ensaio, foi alimentado por uma fonte simétrica modelo *POL-16E* da empresa *Politerm*. Para medir a tensão elétrica de saída do condicionamento utilizou-se o multímetro digital com resolução de 6 1/2 dígitos modelo *DMM 4050* da empresa *Tektronix*. Configurou-se o multímetro para adquirir a média aritmética de 30 medições sucessivas da tensão elétrica para ter-se uma maior confiabilidade na medida.

Figura 48. Ensaio de calibração da plataforma de força: (1) fonte simétrica, (2) multímetros da Tektronix, (3) célula de carga, (4) circuito de condicionamento e (5) carga aplicada com pesos padrão.



Em seguida, obteve-se a função de transferência experimental correspondente a cada canal de condicionamento em função da carga aplicada por regressão linear através do método dos mínimos quadrados, através do *software* Matlab R2013a. Obteve-se também o erro de linearidade e a sensibilidade de cada canal. Os resultados estão presentes na Seção 4.4.

3.5 Procedimentos para ensaio dinâmico

Com o propósito de validar as simulações dinâmicas e verificar experimentalmente os modos ressonantes da peça, realizou-se um ensaio dinâmico. Engastou-se a pedivela comercial da mesma forma que os demais ensaios, como pode ser visualizado na Figura 49, e utilizou-se o método de impacto.

Para aquisição de dados deste ensaio, utilizou-se o acelerômetro piezoelétrico comercial triaxial DeltaTron 4520 da *Bruel & Kjaer* cujas características são apresentadas na Figura 50. Em conjunto com este sensor, utilizou-se o sistema de acelerometria da *National Instruments* composto pelo sistema de condicionamento NI SCXI 1530 e de aquisição NI SCXI 1600, conforme ilustrado pela Figura 49. Adquiriu-se os dados via *software* LabVIEW™ 2011, a uma amostragem de 30000 amostras e a uma frequência de 10000 Hz, afim de analisar a resposta temporal e em frequência deste ensaio. Os resultados estão presentes na Seção 4.1.2.

Figura 49. Estrutura utilizada para a realização do ensaio dinâmico: (1) pedivela engastada com acelerômetro, (2) sistema de acelerometria da National Instruments e (3) computador portátil equipado com LabVIEW 2011.

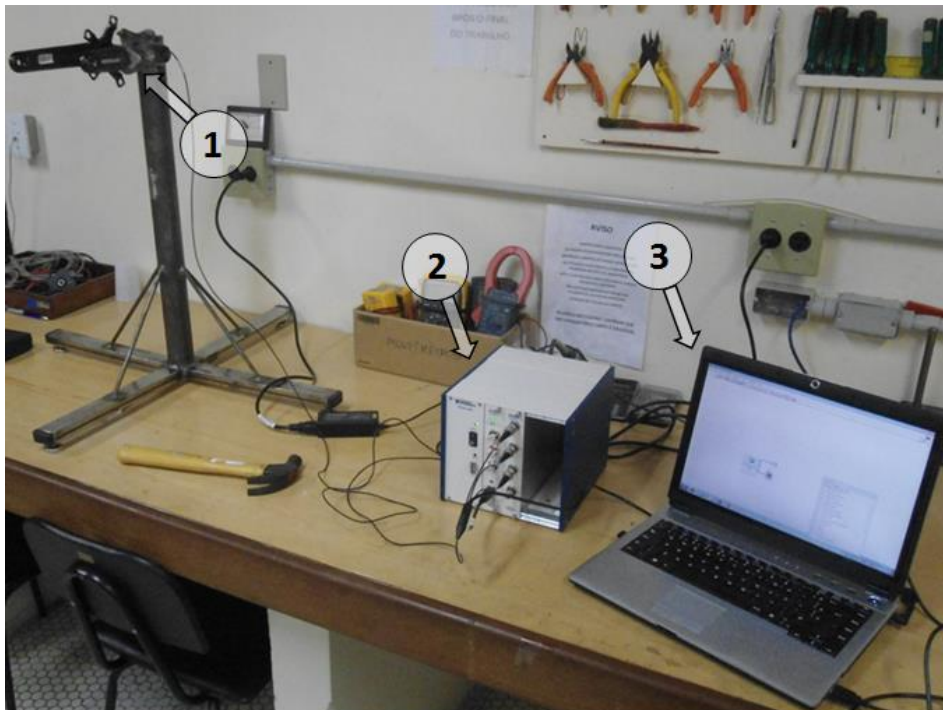
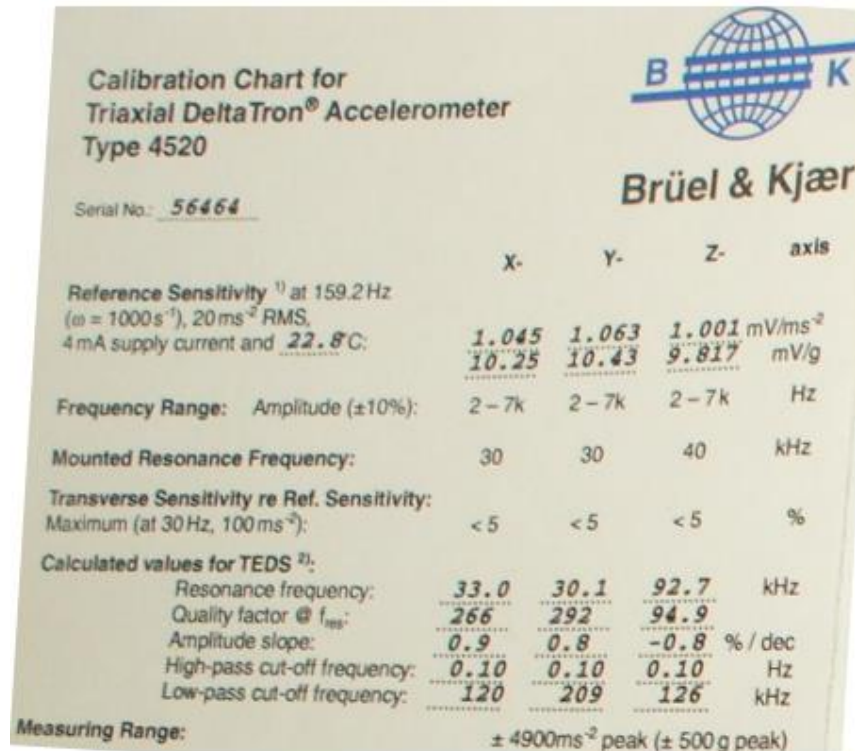


Figura 50. Características do acelerômetro triaxial Delta Tron 4520.

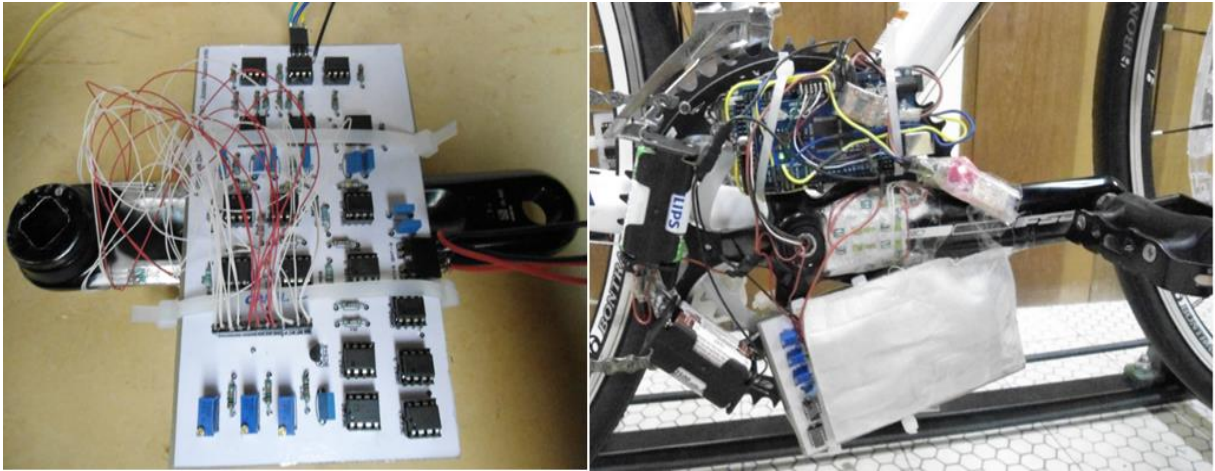


3.6 Montagem do sistema e procedimentos de testes com a bicicleta

Primeiramente, foi realizada a montagem da plataforma de força na bicicleta de estrada, como ilustra a Figura 51. Na pedivela da esquerda foi acoplado o circuito de condicionamento, confeccionado em placa de circuito impresso, dos canais 1, 2 e 3 e as baterias para o fornecimento da tensão elétrica negativa. A saída de cada canal foi passada pelo eixo central da bicicleta e conectada no arduino, que foi instalado na pedivela da direita. Nesta mesma pedivela, foi acoplado o circuito de condicionamento dos canais 3, 4 e 5 e as baterias para o fornecimento de tensão elétrica positiva.

Em seguida, para a realização dos testes com a bicicleta de estrada em ambiente de laboratório, foi utilizado o rolo de treinamento, na qual é acoplado um sistema para medição da velocidade da bicicleta, desenvolvido por MILANI (2014). O uso do rolo de treinamento possibilita a realização de estudo em laboratório de forma que o ciclista seja submetido a condições semelhantes às condições de competição. A estrutura para a realização dos testes pode ser visualizada na Figura 52.

Figura 51. Montagem da plataforma de força.



Deste modo, adquiriram-se os esforços medidos por cada canal a fim de observar o comportamento das componentes de força desenvolvida por um ciclista amador, cuja massa é de aproximadamente 75 kg. A fim de simular as condições reais de competição, realizaram-se, também, ensaios com a bicicleta de estrada em ambiente externo.

Figura 52. Estrutura para a realização dos testes em laboratório.



Finalmente, estimou-se a autonomia das baterias utilizadas (de +9,6 V e -9 V), medindo-se o consumo de corrente elétrica do sistema desenvolvido utilizando o multímetro digital *DMM 4050* da empresa *Tektronix*. Primeiramente, mediu-se individualmente o consumo do circuito de condicionamento de cada pedivela e, em seguida, o consumo total com o sistema de aquisição e transmissão de dados integrado. É importante ressaltar que esta estimativa é dada com base em medições da tensão elétrica das baterias durante os ensaios realizados. Os resultados obtidos em todos os testes são detalhados na Seção 4.6.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da análise estrutural

Para a realização das simulações é fundamental utilizar o correto material da estrutura em estudo. Desta forma, na Tabela 10 encontram-se as propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6 fornecidas pelo SolidWorks™ 2011.

Tabela 10. Propriedades mecânicas da liga de alumínio 6061-T6.

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+010	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/A
Módulo de cisalhamento	2.6e+010	N/m ²
Massa específica	2700	Kg/m ³
Resistência à tração	3.1e+008	N/m ²
Limite de escoamento	2.75e+008	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	2.4e-005	/K
Condutividade térmica	166.9	W/(m.K)
Calor específico	896	J/(Kg.K)

Fonte: (SolidWorks™ 2011).

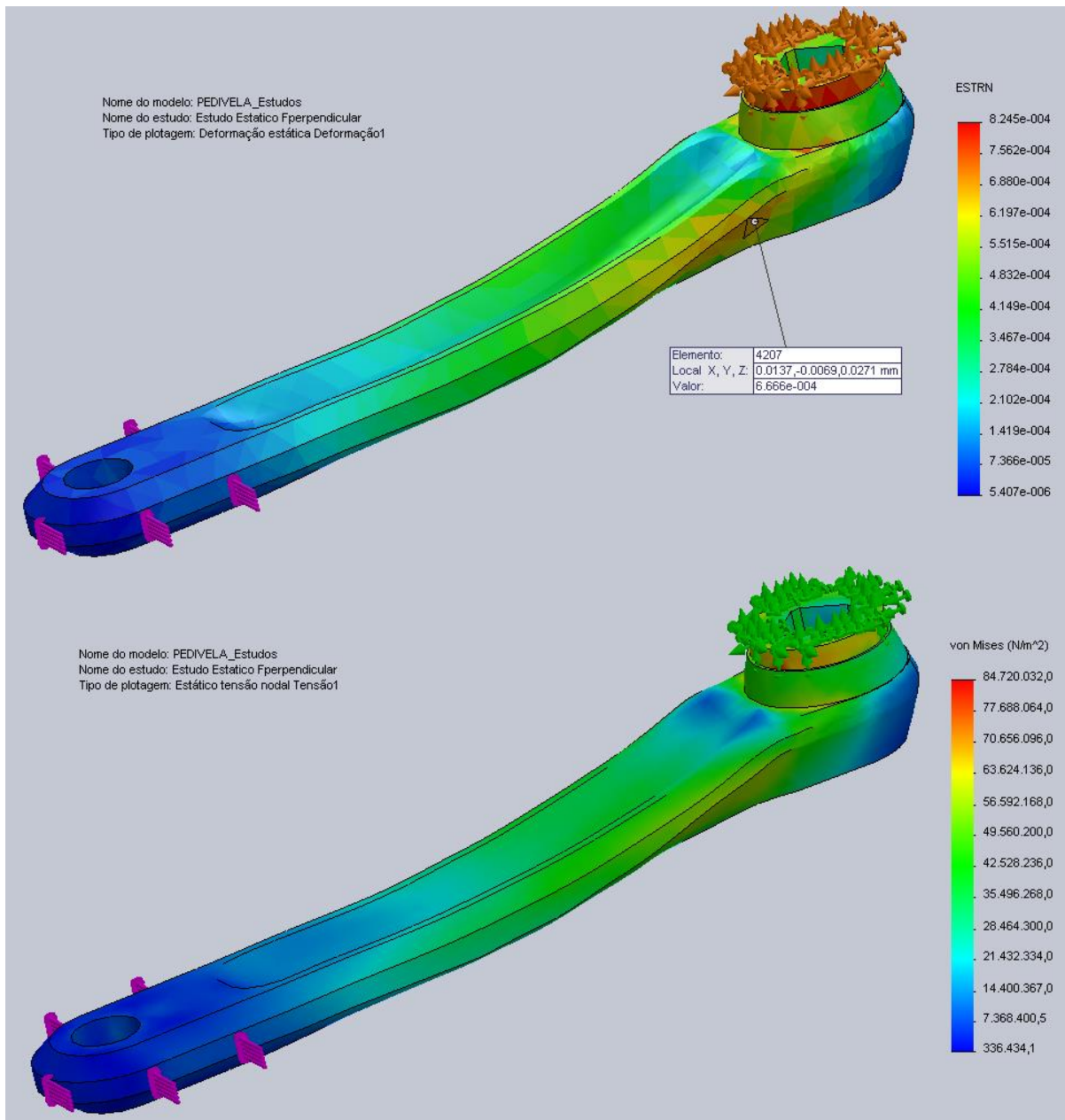
4.1.1 Simulações estáticas

Nas Figuras 53, 54 e 55 encontram-se os resultados de deformação e tensão mecânica para a aplicação da carga de 800 N na direção perpendicular, paralela e lateral ao eixo longitudinal da peça, respectivamente.

Observa-se, da Figura 53, que os pontos principais de deformação possuem um valor na ordem de 666 $\mu\epsilon$ indicando a região como ideal para a colagem dos extensômetros. A análise da tensão mecânica indica que para a condição mais crítica, do valor de tensão mecânica, seria na ordem de 84,7 Mpa que está abaixo do valor limite de escoamento do material, que é de 275 MPa. Porém tem-se que o fator de segurança (que é a razão da tensão admissível pela atenção aplicada) desta estrutura é de apenas 3,2 %.

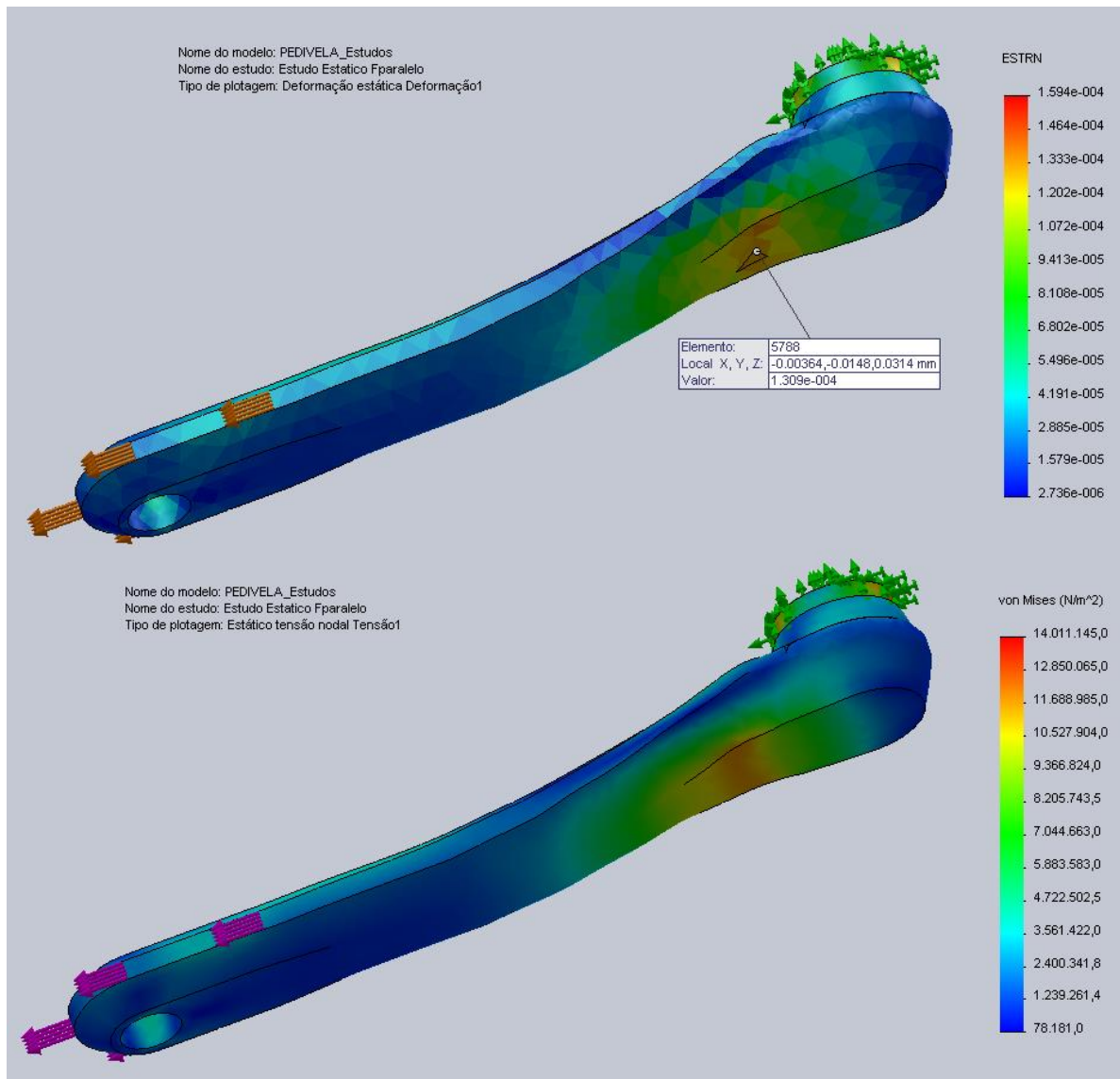
Na Figura 54, nota-se que a região principal de deformação possui um valor na ordem de 131 $\mu\epsilon$ identificando esta região como ideal para a colagem dos extensômetros. Da análise da tensão mecânica tem-se que o valor máximo de tensão é de 14 MPa que está abaixo do valor limite de 275 MPa. Além disso, nota-se que o fato de segurança é de 20 %.

Figura 53. Carga aplicada na direção perpendicular ao eixo longitudinal: deformação e tensão mecânica.



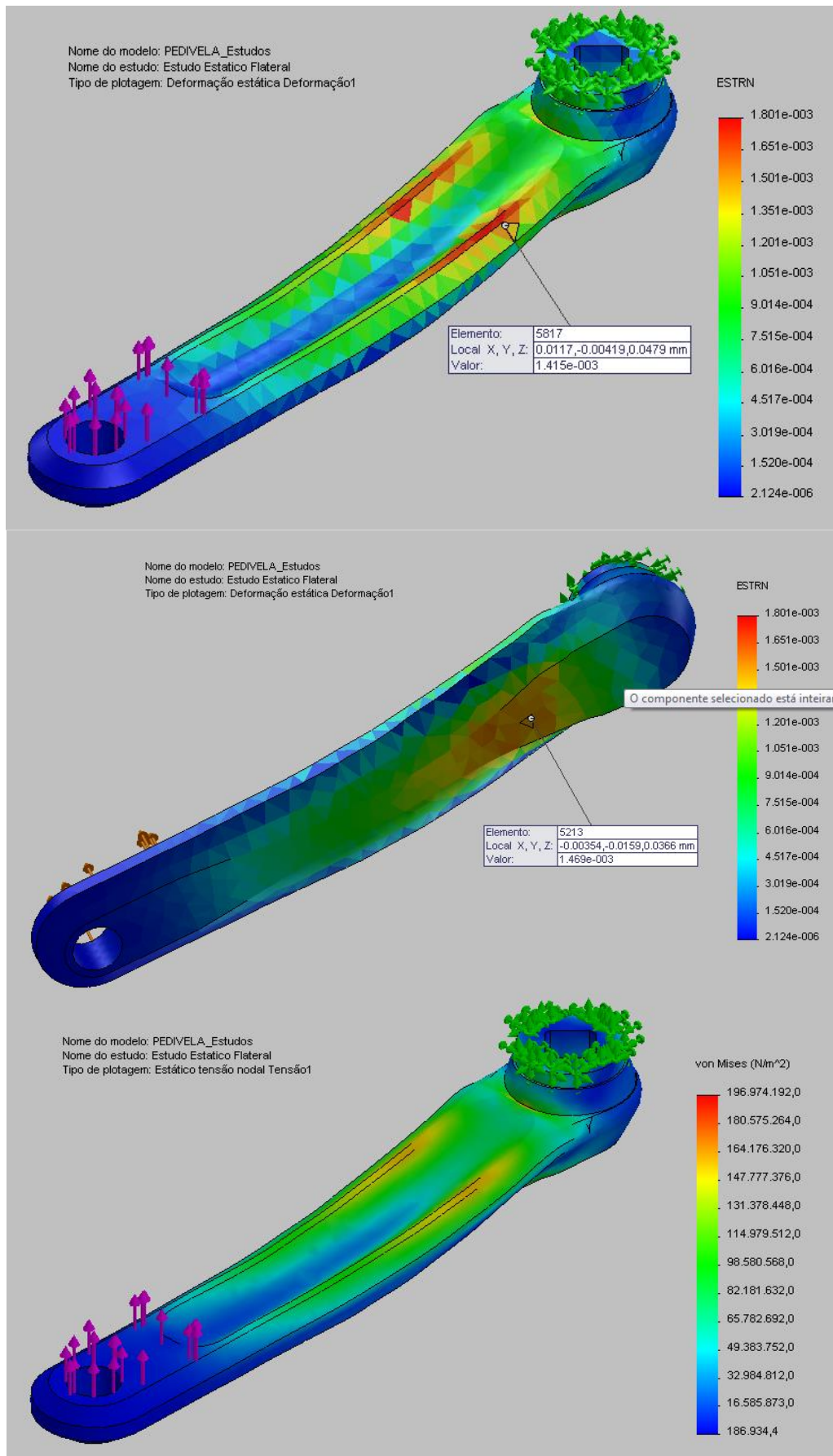
De acordo com a Figura 55, as regiões principais de deformação indicam um valor na ordem de $1415 \mu\epsilon$ e $1469 \mu\epsilon$ identificando estas regiões como ideal para o posicionamento dos extensômetros. Nota-se que o valor crítico de tensão mecânica está na ordem de 197 MPa, que está abaixo do valor limite da estrutura. No entanto tem-se que o fator de segurança é de apenas 1,4 %. Este baixo valor pode ser justificado pelo fato de que a pedivela não foi projetada para receber esforços desta magnitude na direção lateral ao seu eixo longitudinal.

Figura 54. Carga aplicada na direção paralela ao eixo longitudinal: deformação e tensão mecânica.



Nota-se, das Figuras 54 e 55, que há uma mesma região principal de deformação quando aplicado um carregamento tanto na direção paralela como lateral. Este resultado indica que a aplicação de esforço na direção paralela provoca um deslocamento da peça tanto nesta direção como na direção lateral e vice-versa. Deste modo, não será possível isolar estas componentes de força e a plataforma de força medirá a combinação de ambas as componentes. Além disso, nota-se que a deformação devido ao carregamento na direção lateral é de aproximadamente 12 vezes maior que aquela devido ao carregamento na direção paralela.

Figura 55. Carga aplicada na direção lateral ao eixo longitudinal: deformação e tensão mecânica.



4.1.2 Comportamento dinâmico: simulações e ensaio

A Figura 56 ilustra o resultado da simulação dinâmica para o modo de frequência de ressonância fundamental (primeiro modo ressonante) da estrutura e que possui valor de 349,9 Hz. Os perfis de deformação dos outros modos de frequência de ressonância são detalhados ao longo do Anexo B e seus valores são apresentados na Tabela 11.

Figura 56. Simulação dinâmica: modo ressonante fundamental

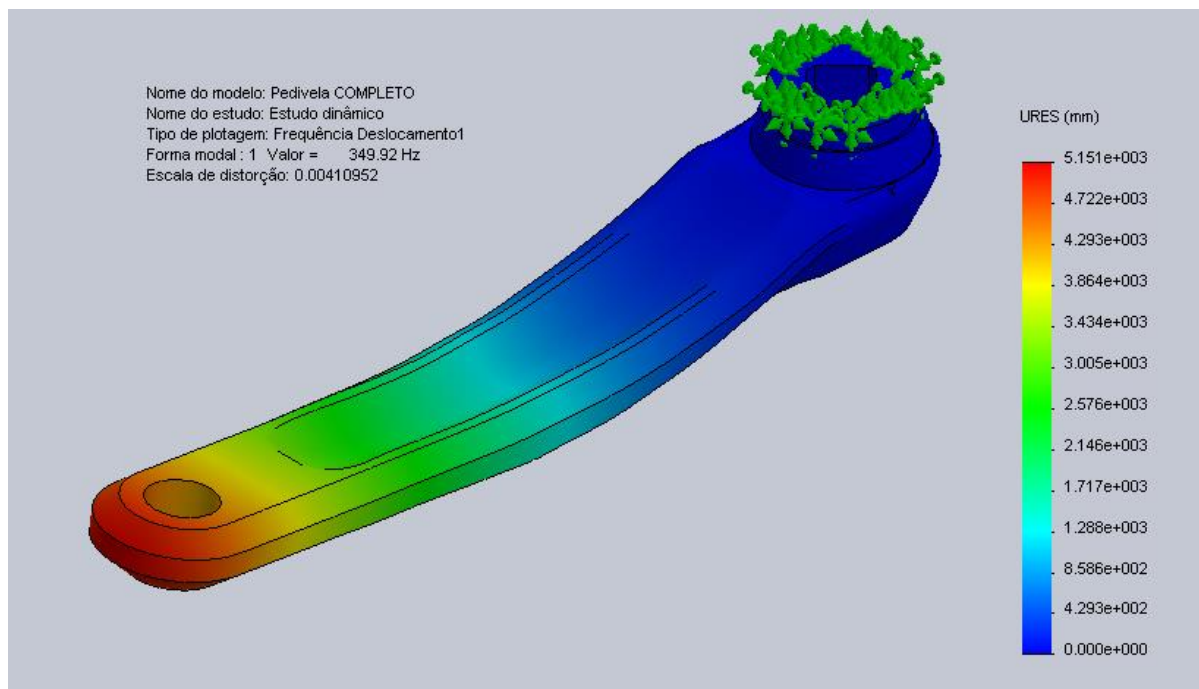


Tabela 11. Modos ressonantes.

Modo	Frequência [Hz]
1	349,92
2	699,56
3	1948,6
4	2579,3
5	3995,1

As Figuras 57 e 58 apresentam o resultado do ensaio dinâmico com acelerômetro no domínio temporal e no espectro de frequência, respectivamente. De acordo com a Figura 57, observa-se que a resposta temporal é um sinal oscilante amortecido ao longo do tempo, cujas principais componentes espectrais são ilustradas na Figura 58 obtidas através da FFT. A com-

ponente de frequência de ressonância fundamental obtida através deste ensaio possui um valor de 340,4 Hz.

Figura 57. Ensaio dinâmico com acelerômetro: resposta temporal.

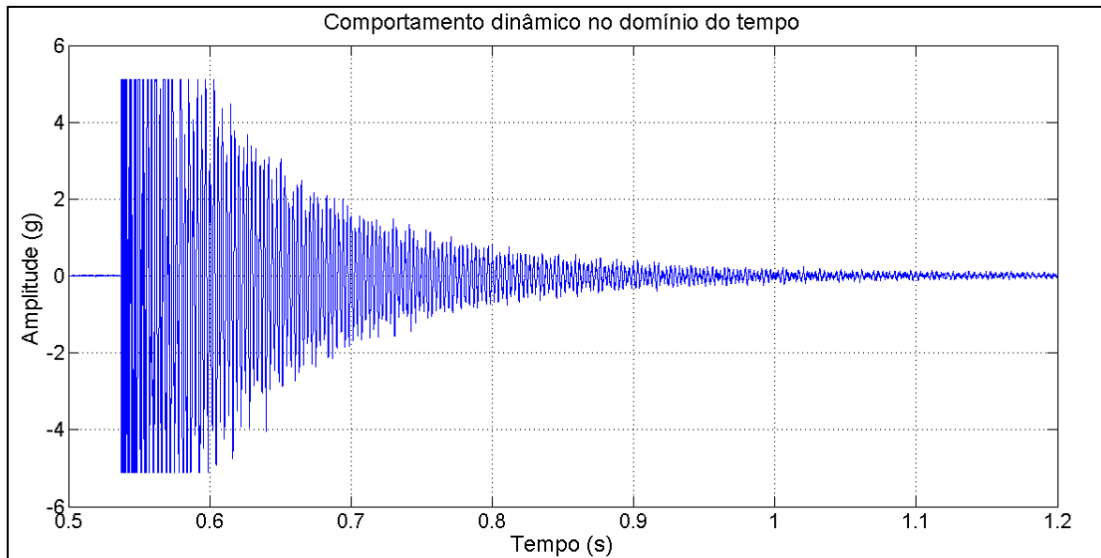
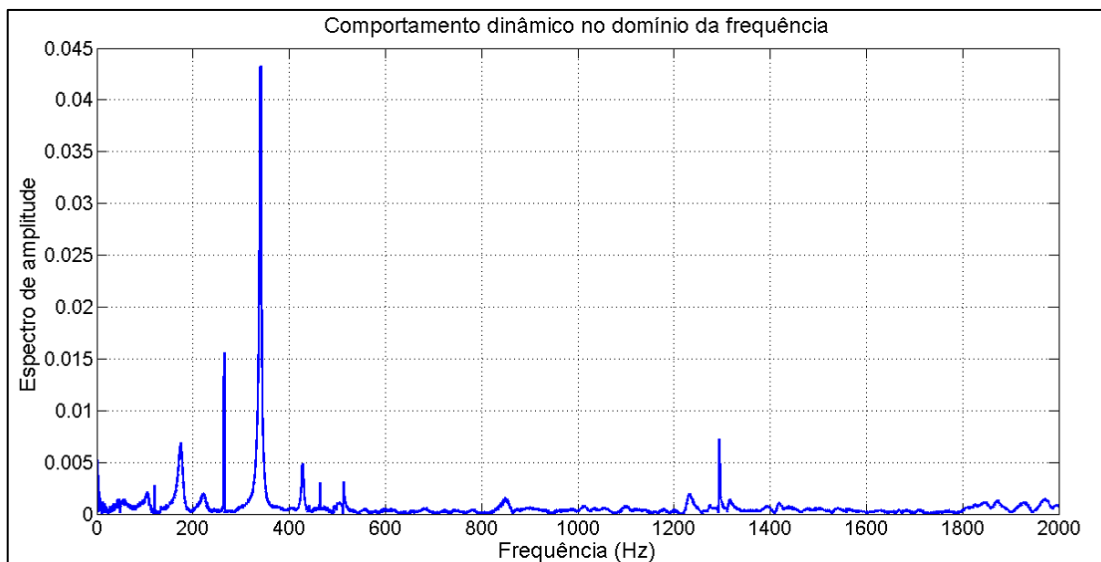


Figura 58. Ensaio dinâmico com acelerômetro: resposta em frequência.



Desta forma observa-se a coerência dos resultados para o modo de frequência de ressonância (modo mais importante) obtida na simulação e no ensaio dinâmico sendo a diferença de apenas 9 Hz. No entanto os outros modos não correspondem. Esta divergência de valores pode ser justificada pelo fato de que no ensaio não foi possível isolar a vibração da estrutura, na qual a pedivela foi fixada, de forma que o sensor a captou. Deve ser considerado também que a estrutura criada no SolidWorks é um modelo aproximado da pedivela real e que muito

provavelmente há diferenças de geometria que influenciem no resultado dinâmico, além de erros numéricos da ferramenta.

4.2 Ensaio de deformação

Nas Figuras 59, 60 e 61 estão representados os pontos de deformação da célula de carga esquerda (pedivela esquerda) em função da carga aplicada nas direções perpendicular, paralela e lateral respectivamente. Pode ser visualizada, também, nestas figuras a função de transferência experimental para cada direção de deslocamento da peça. As Figuras 62, 63 e 64 apresentam as mesmas informações citadas anteriormente, porém para a célula de carga direita (pedivela direita).

Figura 59. Célula de carga esquerda: aplicação de carga na direção perpendicular.

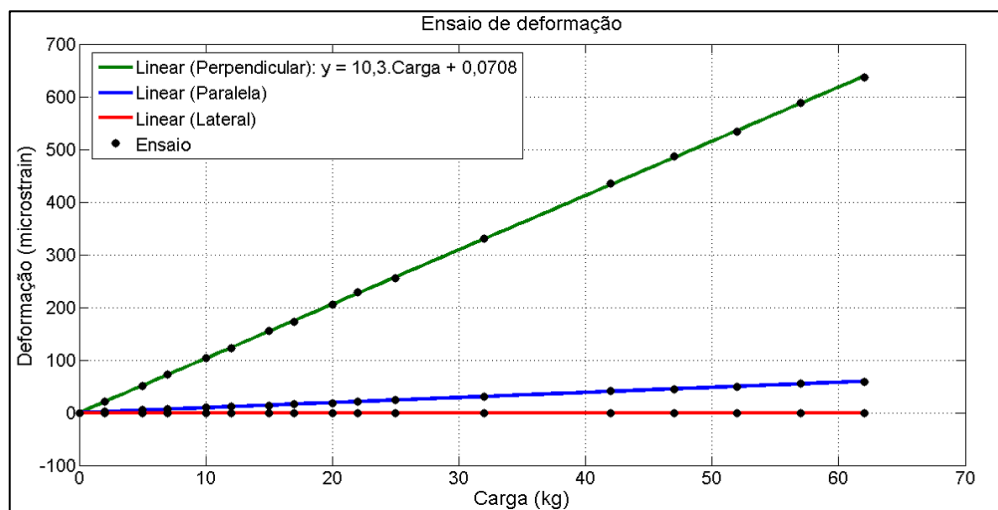


Figura 60. Célula de carga esquerda: aplicação de carga na direção paralela.

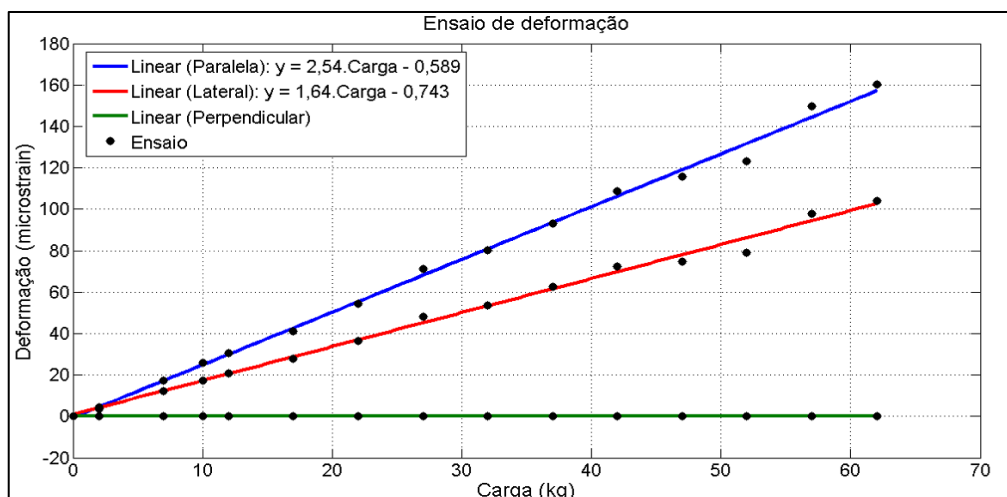


Figura 61. Célula de carga esquerda: aplicação de carga na direção lateral.

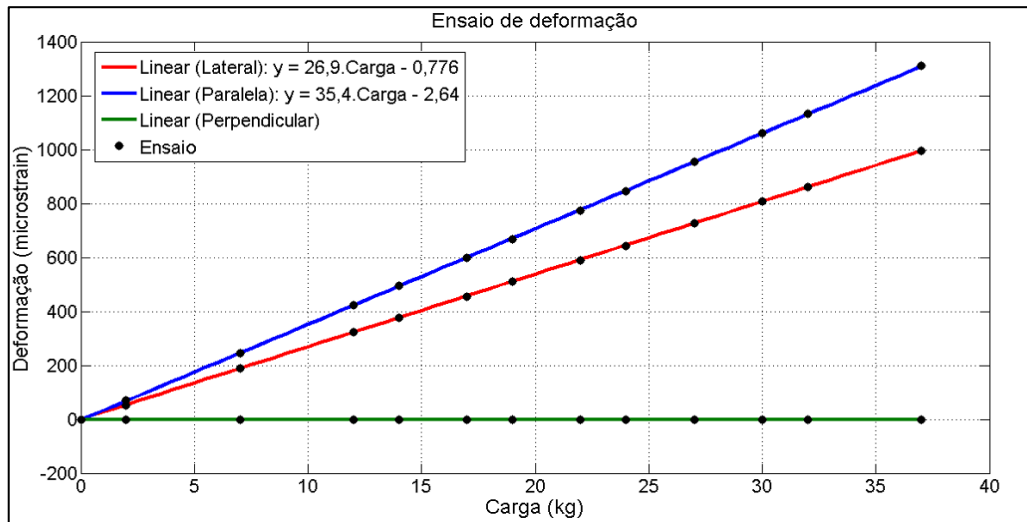


Figura 62. Célula de carga direita: aplicação de carga na direção perpendicular.

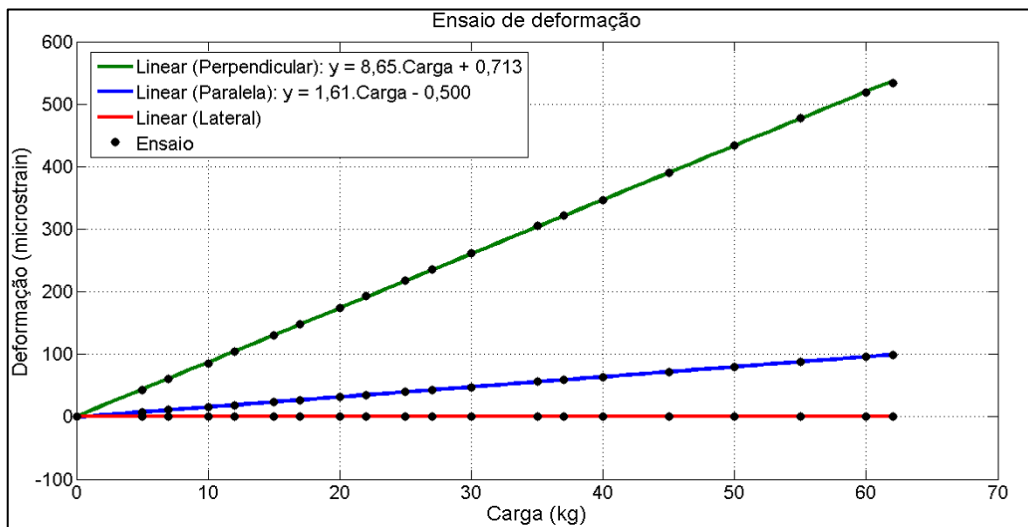


Figura 63. Célula de carga direita: aplicação de carga na direção paralela.

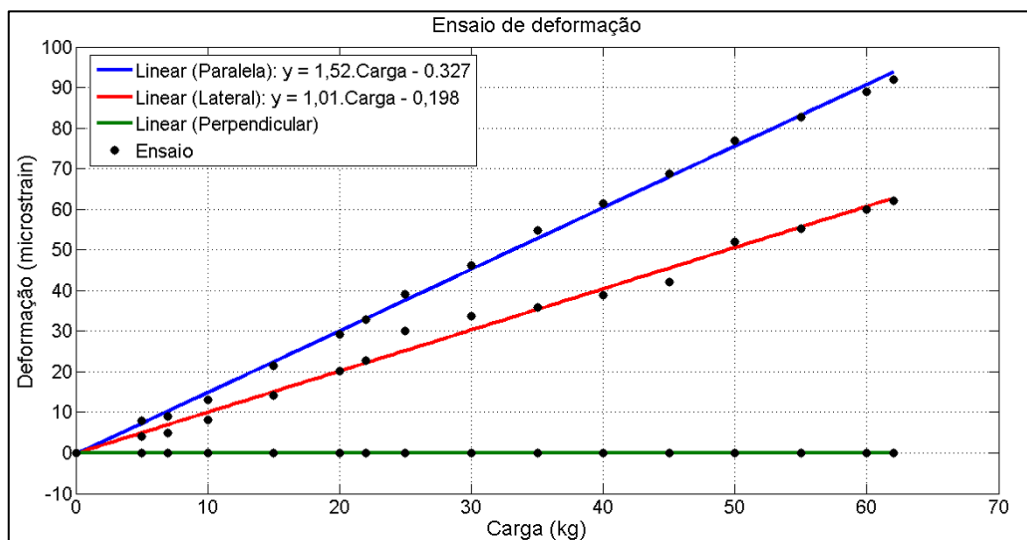
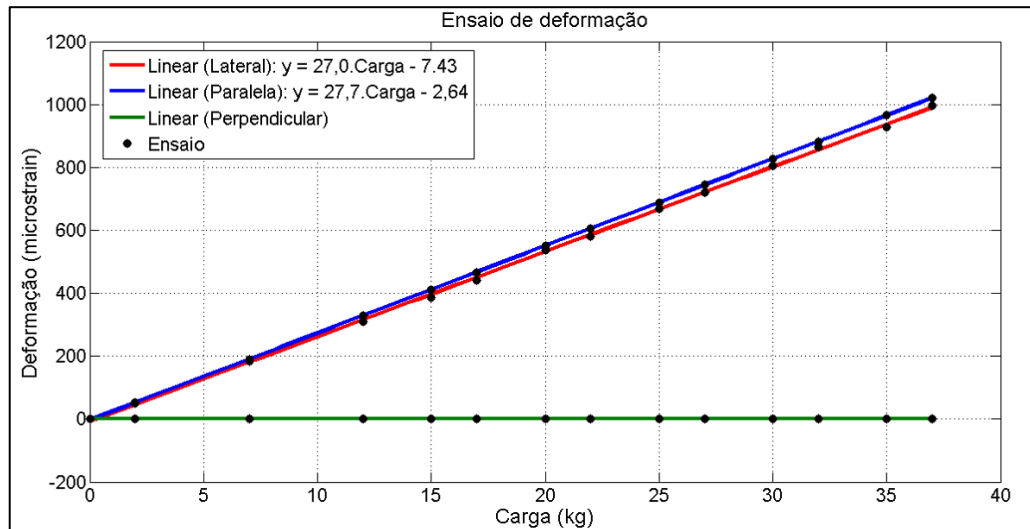


Figura 64. Célula de carga direita: aplicação de carga na direção lateral.



Das Figuras 59 e 62 observa-se que a maior deformação da pedivela ocorre na própria direção de aplicação de carga, neste caso, perpendicular. Das demais figuras, observa-se, conforme verificou-se na simulação estática, que a deformação devido à aplicação de carga na direção lateral é de aproximadamente 16 vezes maior do que aquela devido à aplicação de carga na direção paralela. Desta forma, optou-se por utilizar as funções de transferência para um carregamento na direção lateral tanto para o projeto dos canais 3 e 6 (força lateral) quanto para os canais 2 e 5 (força paralela), para evitar a saturação do sistema.

Deste modo, foi possível definir as cargas máximas e a deformação máxima correspondente, para o projeto de cada canal de condicionamento, como pode ser visualizado na Tabela 12. Nesta tabela encontram-se, também, o erro de linearidade e a sensibilidade referente a cada função experimental.

Os erros de linearidade para as demais deformações da célula de carga esquerda e direita encontram-se nas Tabelas 13 e 14, respectivamente. Como o ensaio foi realizado fixando as cargas na pedivela através de barbante, este balançava devido a distribuição assimétrica destas cargas. Além disso, quando se posicionava a pedivela na estrutura para aplicação de carga na direção paralela e à medida que se fixava mais carga, esta tocava levemente a base da estrutura. Estes fatores interferiam na medida e possivelmente na linearidade, como pode ser observado nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 12. Características para projeto dos canais de condicionamento.

Canal	Função de transferência	Erro de linearidade (%)	Carga (kg)	Carga (N)	Deformação ($\mu\epsilon$)
Canal 1	$y = 10,3 \times Carga + 0,0708$	0,355	± 80	± 785	± 824
Canal 2	$y = 35,4 \times Carga - 2,64$	0,284	± 20	± 196	± 705
Canal 3	$y = 26,9 \times Carga - 0,776$	0,288	± 20	± 196	± 537
Canal 4	$y = 8,65 \times Carga + 0,713$	0,605	± 80	± 785	± 693
Canal 5	$y = 27,7 \times Carga - 2,64$	0,258	± 20	± 196	± 551
Canal 6	$y = 27,0 \times Carga - 7,43$	1,07	± 20	± 196	± 533

Tabela 13. Célula de carga esquerda: erro de linearidade referente aos demais deslocamentos.

Direção de aplicação da carga	Direção de deslocamento	Erro de linearidade (%)
Perpendicular	Paralela	1,96
Paralela	Paralela	5,44
	Lateral	6,88

Tabela 14. Célula de carga direita: erro de linearidade referente aos demais deslocamentos.

Direção de aplicação da carga	Direção de deslocamento	Erro de linearidade (%)
Perpendicular	Paralela	0,503
Paralela	Paralela	2,20
	Lateral	8,00

4.3 Validação do circuito de condicionamento

Na Tabela 15 encontram-se os valores de tensão elétrica de saída da ponte, dos estágios de amplificação e de saída do canal 4, por exemplo, para as diversas cargas aplicadas na direção perpendicular. A partir destes valores calcularam-se os ganhos e o *offset* que também podem ser visualizados nesta mesma tabela.

Como se pode observar, da Tabela 15, o ganho do primeiro estágio (Ganho 1) e do segundo estágio de amplificação (Ganho 2) encontram-se próximos aos valores de ganho calculados teoricamente que são de 102 e 3,3, respectivamente. Além disso, os valores de tensão elétrica de *offset* realizado pelo circuito somador também estão próximos do valor calculado teoricamente de 2,5 V.

Tabela 15. Estágios de saída, ganho e *offset* referentes ao canal 4.

Carga (kg)	Saída da ponte (mV)	Saída do 1º estágio de amplificação (mV)	Ganho 1	Saída do 2º estágio de amplificação (V)	Ganho 2	Saída do canal 4 (V)	Offset (V)
0	0,2938286	32,10340	109	-0,12492808	-3,9	2,504865	2,38
5	-0,1486515	-16,22350	109	0,0640219	-3,9	2,659751	2,60
10	-0,5813694	-61,94165	107	0,2208435	-3,6	2,810658	2,59
15	-1,035534	-110,06660	106	0,3921814	-3,6	2,962846	2,57
20	-1,480558	-157,1487	106	0,5717830	-3,6	3,108665	2,54
25	-1,924811	-201,18040	105	0,7171303	-3,6	3,261315	2,54
30	-2,352531	-244,9338	104	0,8613056	-3,5	3,400777	2,54
35	-2,786231	-289,64700	104	1,010621	-3,5	3,550583	2,54
40	-3,220313	-333,5273	104	1,155493	-3,5	3,696789	2,54
45	-3,658171	-377,34920	103	1,302440	-3,5	3,848954	2,55
50	-4,089620	-422,0689	103	1,450094	-3,4	3,991676	2,54
55	-4,515453	-464,32120	103	1,589802	-3,4	4,141909	2,55
60	-4,931393	-506,8826	103	1,731292	-3,4	4,279325	2,55

Nas Figuras 65, 66 e 67 podem ser visualizadas as respostas do circuito de filtragem para os sinais de diferentes frequências aplicados na sua entrada. Da Figura 66, observa-se que para uma frequência de entrada de 10 Hz, o valor de tensão elétrica de saída do filtro encontra-se próximo ao valor de tensão elétrica de sua entrada. Já para a frequência de 37,5 Hz (próximo a frequência de corte) na entrada, como ilustra a Figura 67, a tensão elétrica de saída do filtro é 2,48 V, ou seja, há uma atenuação de 6,15 dB. Da Figura 68, nota-se que para uma frequência de entrada de 92,6 Hz, o sinal de saída é atenuado de 16 dB. Do diagrama de Bode obtido, a atenuação para as frequências de 37,5 Hz e 92,6 Hz são de 6,14 dB e 17 dB, respectivamente

Figura 65. Resposta do filtro para uma frequência de entrada menor que a frequência de corte.

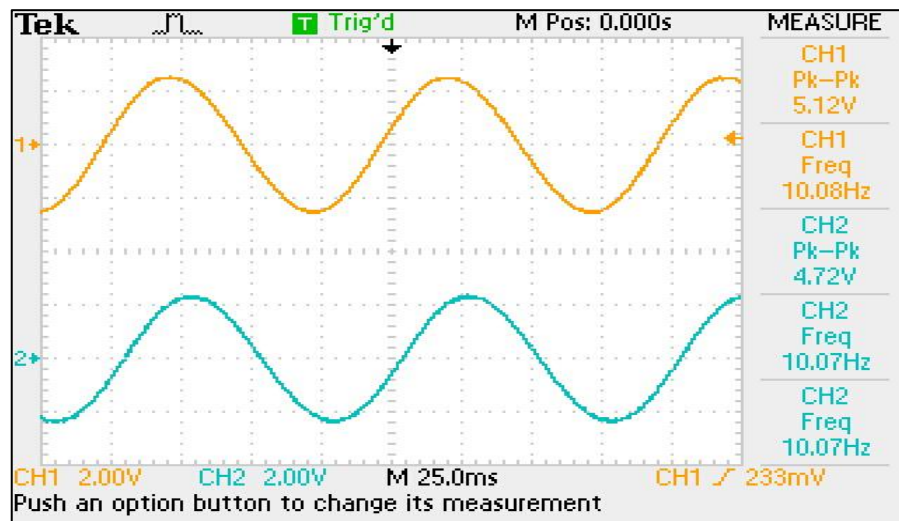


Figura 66. Resposta do filtro para uma frequência de entrada próxima a frequência de corte.

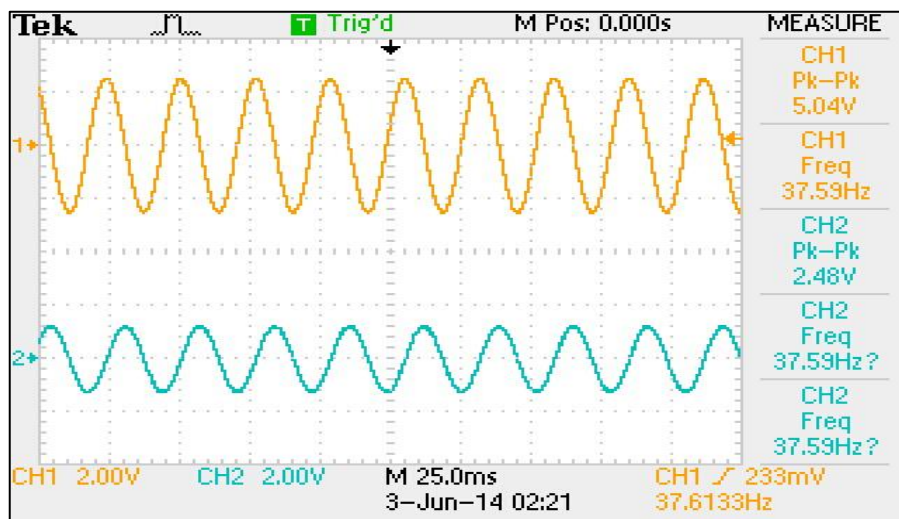
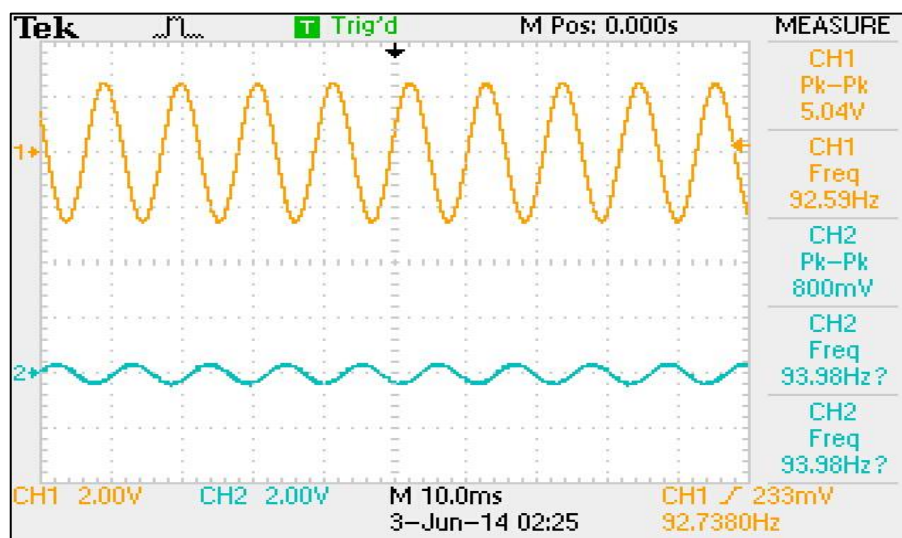


Figura 67. Resposta do filtro para uma frequência de entrada maior que a frequência de corte.



4.4 Calibração estática e função de transferência experimental

Nas Figuras 68, 69, 70 estão representados os pontos de tensão elétrica de saída em função da aplicação de carga nas direções perpendicular, paralela e lateral, respectivamente, dos canais 1, 2 e 3. Nas Figuras 71, 72, 73 podem ser visualizados os pontos de tensão elétrica de saída em função da aplicação de carga nas direções perpendicular, paralela e lateral, respectivamente, dos canais 4, 5 e 6. Pode ser visualizada, também, nestas figuras, a função de transferência experimental obtida para canal de condicionamento.

Figura 68. Célula de carga esquerda: carregamento na direção perpendicular.

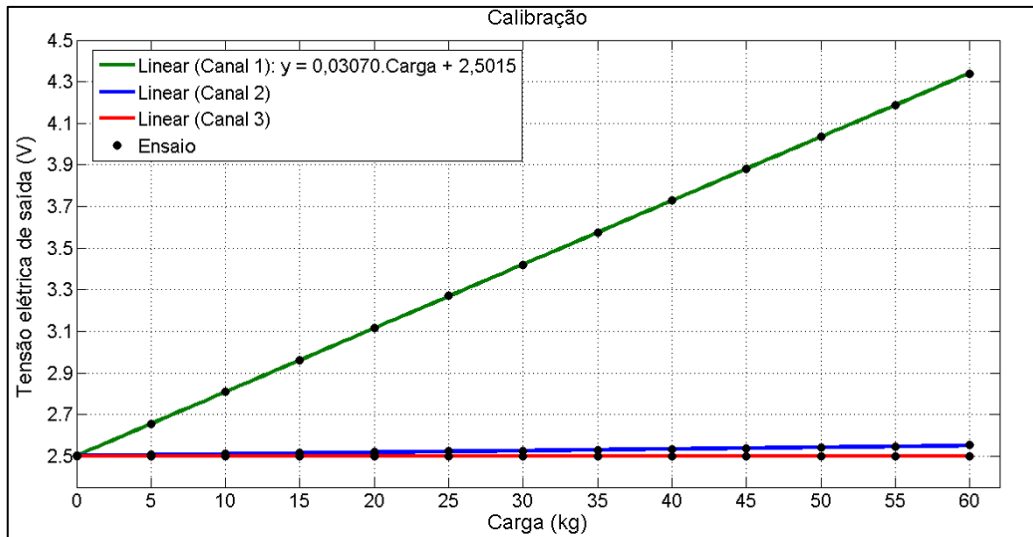


Figura 69. Célula de carga esquerda: carregamento na direção paralela.

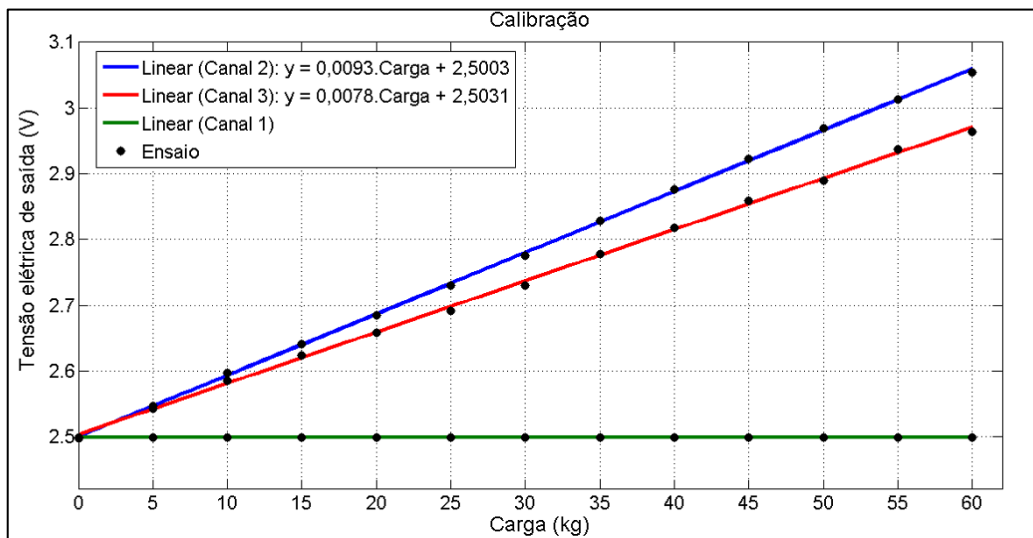


Figura 70. Célula de carga esquerda: carregamento na direção lateral.

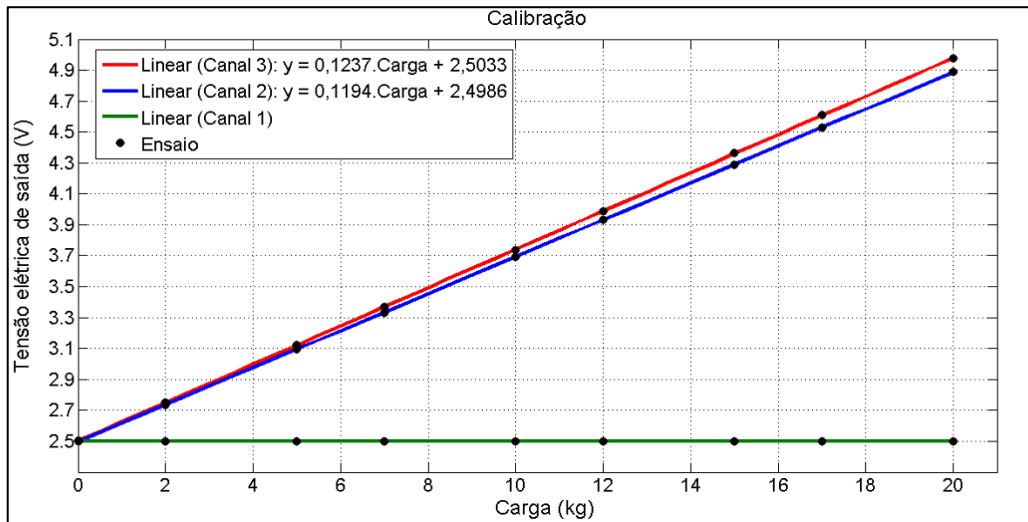


Figura 71. Célula de carga direita: carregamento na direção perpendicular.

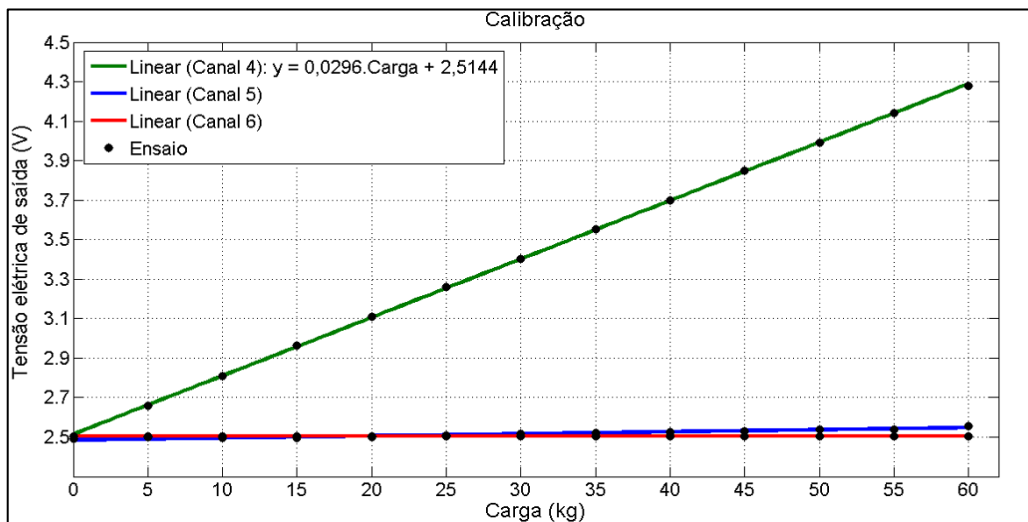


Figura 72. Célula de carga direita: carregamento na direção paralela.

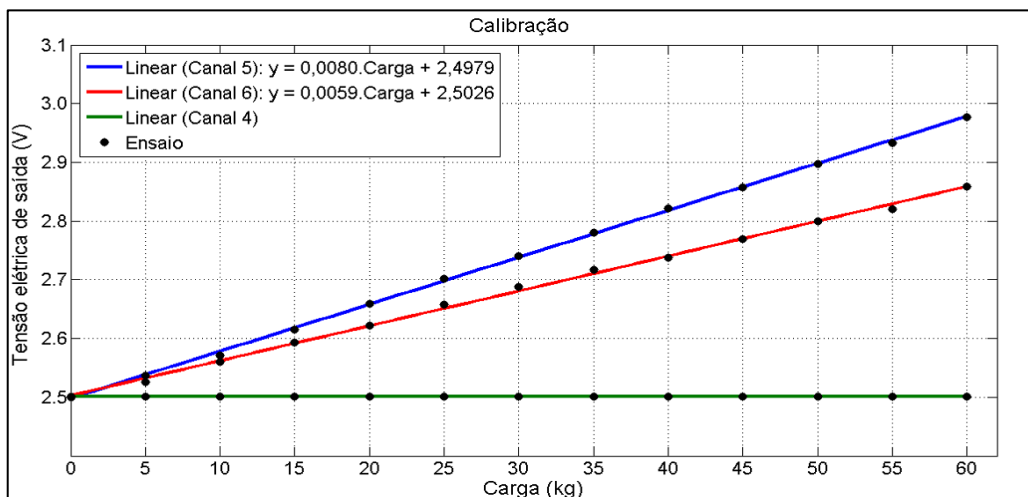
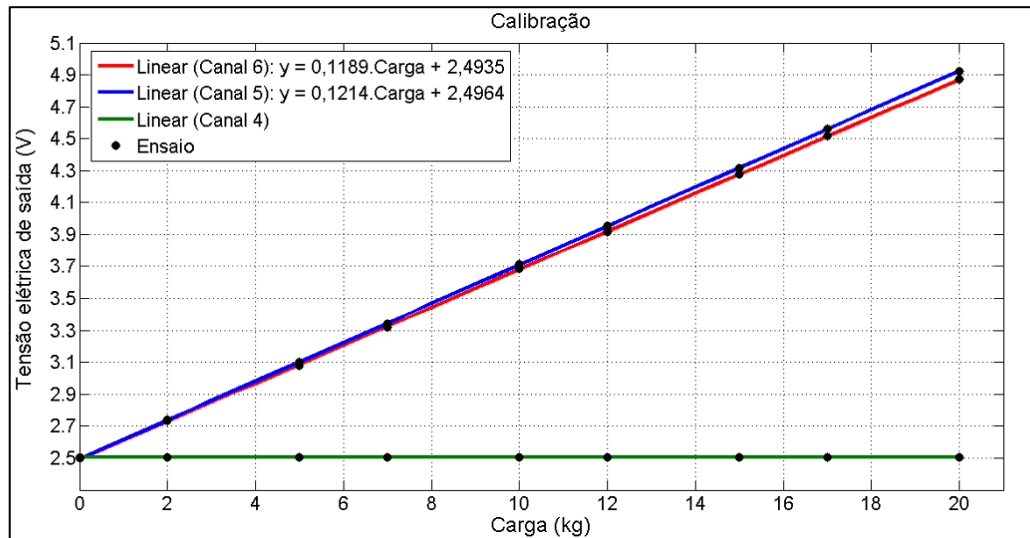


Figura 73. Célula de carga direita: carregamento na direção lateral.



Como o ensaio de calibração foi realizado a partir dos pesos padrões presentes em laboratório, a função de transferência experimental do canal 1 e 4 foi obtida para uma carga de até 60 kg, como pode ser observado nas Figuras 68 e 71. Deste modo, de acordo com estas funções de transferências obtidas, para uma carga máxima definida de 80 kg, tem-se que a tensão elétrica de saída dos canais 1 e 4 é de 4,96 V e 4,90 V, respectivamente.

Das Figuras 70 e 73, observa-se, como esperado, que para o carregamento na direção lateral, ambos os canais 2 e 3 e ambos os canais 5 e 6 apresentam um comportamento semelhante, e que para máxima carga definida (20 kg), a tensão elétrica de saída destes canais é de aproximadamente 5 V. A função de transferência experimental definida para cada canal bem como a sensibilidade e o erro de linearidade destes canais encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16. Características dos canais de condicionamento.

Canal	Função de transferência experimental	Erro de linearidade (%)	Sensibilidade (V/kg)	Sensibilidade (mV/N)
Canal 1	$S_1 = 0,0307 \times \text{Carga} + 2,5015$	0,0942	0,0307	3,131
Canal 2	$S_2 = 0,1194 \times \text{Carga} + 2,4986$	0,1164	0,1194	12,17
Canal 3	$S_3 = 0,1237 \times \text{Carga} + 2,5033$	0,125	0,1237	12,61
Canal 4	$S_4 = 0,0296 \times \text{Carga} + 2,5144$	0,2236	0,0296	3,018
Canal 5	$S_5 = 0,1214 \times \text{Carga} + 2,4964$	0,1267	0,1214	12,38
Canal 6	$S_6 = 0,1189 \times \text{Carga} + 2,4935$	0,1398	0,1189	12,12

Nas Tabelas 17 e 18 pode ser visualizado o erro de linearidade para as demais funções experimentais obtidas.

Tabela 17. Célula de carga esquerda: erro de linearidade referente às demais curvas experimentais.

Direção de aplicação da carga	Canal	Erro de linearidade (%)
Perpendicular	Canal 2	0,1429
Paralela	Canal 2	0,1573
	Canal 3	0,2417

Tabela 18. Célula de carga direita: erro de linearidade referente às demais curvas experimentais.

Direção de aplicação da carga	Canal	Erro de linearidade (%)
Perpendicular	Canal 5	0,3826
Paralela	Canal 5	0,2116
	Canal 6	0,3128

4.5 Análise de incertezas

Devido a não idealidade dos componentes utilizados no desenvolvimento da plataforma de força, torna-se necessário uma análise da incerteza propagada ao longo do sistema e que se reflete na saída do mesmo.

4.5.1 Análise de incertezas referente aos canais de condicionamento

Tem-se que a tensão elétrica de saída e a sensibilidade do canal 1, como demonstrado anteriormente, são descritos pelas Equações (40) e (41), respectivamente:

$$V_{saída1} = \left(5 + \frac{80k}{R_g}\right) \cdot \left(\frac{R_3}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{R_6}{R_6+R_7}\right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8} + 1\right) \cdot (V_{ref} \cdot K \cdot \varepsilon) + \left(\frac{R_7}{R_6+R_7}\right) \cdot \left(\frac{R_{11}}{R_{10}+R_{11}}\right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8} + 1\right) \cdot V_{ref} \quad (40)$$

$$S_{saída1} = \frac{dV_{saída1}}{d\varepsilon} = \left(5 + \frac{80k}{R_g}\right) \cdot \left(\frac{R_3}{R_2}\right) \cdot \left(\frac{R_6}{R_6 + R_7}\right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8} + 1\right) \cdot (V_{ref} \cdot K) \quad (41)$$

Portanto, a incerteza combinada referente à sensibilidade do canal 1 é dada pelas Equações (42), (43), (44) e (45):

$$\sigma_{Ssaída1} = \sqrt{\frac{\partial S_{saída1}}{\partial R_G}^2 \sigma_{R_G}^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial R_2}^2 \sigma_2^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial R_3}^2 \sigma_{R_3}^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial R_6}^2 \sigma_6^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial R_7}^2 \sigma_{R_7}^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial R_8}^2 \sigma_{R_8}^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial R_9}^2 \sigma_{R_9}^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial V_{ref}}^2 \sigma_{V_{ref}}^2 + \frac{\partial S_{saída1}}{\partial K}^2 \sigma_K^2} \quad (42)$$

$$\sigma_{Ssaída1} = \sqrt{(3,47)^2(8,25)^2 + (3,01)^2(10)^2 + (1,076)^2(28)^2 + (0,1506)^2(100)^2 + (0,1506)^2(100)^2 + (0,1506)^2(100)^2 + (0,1506)^2(100)^2 + (602,44)^2(0,01)^2 + (1427,58)^2(0,0211)^2} \quad (43)$$

$$\sigma_{Ssaída1} = 67 \text{ V}/\varepsilon \quad (44)$$

$$S_{saída1} = 3012 \text{ V}/\varepsilon \pm 2,2 \% \quad (45)$$

Este valor de incerteza obtida deve-se, principalmente, ao uso de resistores com incerteza de 1 % nos estágios de ganho e *offset*. Para uma incerteza menor, seria recomendado o emprego de resistores com incerteza menor que 1 %.

Como visto anteriormente, a sensibilidade da célula de carga referente à tensão elétrica de saída da ponte do canal 1 é descrita pela Equação (46):

$$S_{célula1} = \frac{dV_{o_ponte1}}{d\varepsilon} = V_{ref} \cdot K \quad (46)$$

A incerteza combinada referente a esta sensibilidade é descrita pelas Equações (47), (48), (49) e (50).

$$\sigma_{Scélula1} = \sqrt{\frac{\partial S_{célula1}}{\partial V_{ref}}^2 \sigma_{V_{ref}}^2 + \frac{\partial S_{célula1}}{\partial K}^2 \sigma_K^2} \quad (47)$$

$$\sigma_{Scélula1} = \sqrt{(2,11)^2(0,01)^2 + (5,0)^2(0,0211)^2} \quad (48)$$

$$\sigma_{Scélula1} = 0,1076 \text{ V}/\epsilon \quad (49)$$

$$S_{célula1} = 10,55 \text{ V}/\epsilon \pm 1,02 \% \quad (50)$$

O procedimento para os demais canais foi realizado de forma similar. Na Tabela 19 encontram-se os valores de incerteza combinada obtido para cada canal.

Tabela 19. Incertezas combinada

Canal	Sensibilidade do canal (V/ ϵ)	Incerteza (%)	Sensibilidade da ponte (V/ ϵ)	Incerteza (%)
Canal 1	3012	2,22	10,55	1,02
Canal 2	3491	2,22	5,275	1,02
Canal 3	4636	2,29	5,25	1,17
Canal 4	3572	2,22	10,55	1,02
Canal 5	4545	2,22	5,275	1,02
Canal 6	4636	2,29	5,25	1,17

4.5.2 Análise de incertezas referente à tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone

Realizou-se uma análise de incertezas das tensões elétrica de saída da ponte de Wheatstone, de cada canal, quando não há carga mecânica aplicada sobre a célula de carga. Para esta situação, estas tensões são igualadas, visto que são usados componentes de mesmo valor e com a mesma incerteza. Para o canal 1, tem-se que a tensão elétrica de saída V_a é dada pela Equação (51):

$$V_a = V_{ref} \cdot \frac{SG_3}{SG_1 + SG_3} \quad (51)$$

onde SG_1 e SG_3 representam as resistências elétrica dos extensômetros (de $350,6 \pm 0,6 \Omega$) em $[\Omega]$ e V_{ref} é a tensão elétrica de referência da ponte em [V]. A incerteza referente a esta tensão é dada pelas Equações (52), (53), (54) e (55).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\partial V_a}{\partial V_{ref}}^2 \sigma_{V_{ref}}^2 + \frac{\partial V_a}{\partial SG_1}^2 \sigma_{SG_1}^2 + \frac{\partial V_a}{\partial SG_3}^2 \sigma_{SG_3}^2} \quad (52)$$

$$\sigma = \sqrt{(0,5)^2(0,01)^2 + (0,003565)^2(0,6)^2 + (0,003565)^2(0,6)^2} \quad (53)$$

$$\sigma = 0,0058 \quad (54)$$

$$V_a = 2,5 \pm 0,0058 \text{ V} \quad (55)$$

Esta mesma análise foi realizada para os demais canais. Para os canais 2, 4 e 5 obteve-se o mesmo valor que aquele representado pela Equação (52). Para os canais 3 e 6, que utilizam extensômetros de $120,2 \pm 0,2 \Omega$, obteve-se $V_e = 1,25 \pm 0,0076 \text{ V}$. A partir destes resultados, percebe-se que o ajuste de zero da ponte se faz necessário para que a ponte se encontre em equilíbrio quando não há aplicação de carga.

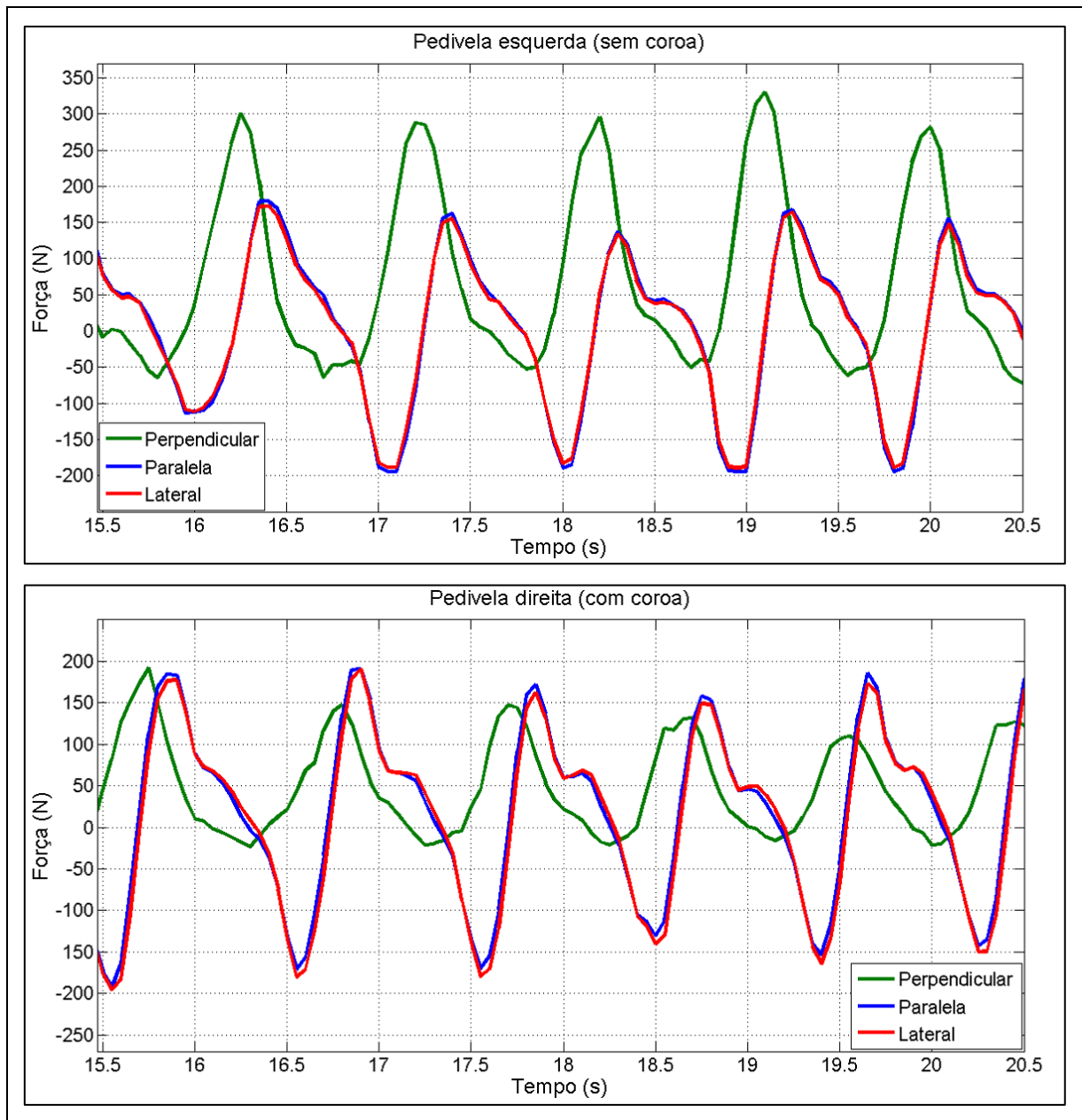
4.6 Testes e funcionamento da plataforma de força

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados dos testes preliminares realizados com a plataforma de força no rolo de treinamento e em ambiente externo. Finalmente, são apresentados os resultados obtidos de avaliação da autonomia de uso do sistema desenvolvido.

4.6.1 Ensaios biomecânicos

No ensaio realizado utilizando o rolo de treinamento instrumentado, o ciclista buscou manter uma velocidade constante de pedalada com o auxílio de um velocímetro instalado na bicicleta. Os dados de cada canal de condicionamento da plataforma de força foram, então, adquiridos via *bluetooth* durante 40 segundos. Na Figura 75 pode ser visualizado o resultado do comportamento das componentes de força deste ensaio para um intervalo de 5 segundos.

Figura 74. Comportamento das componentes de força durante os ensaios no rolo de treinamento.

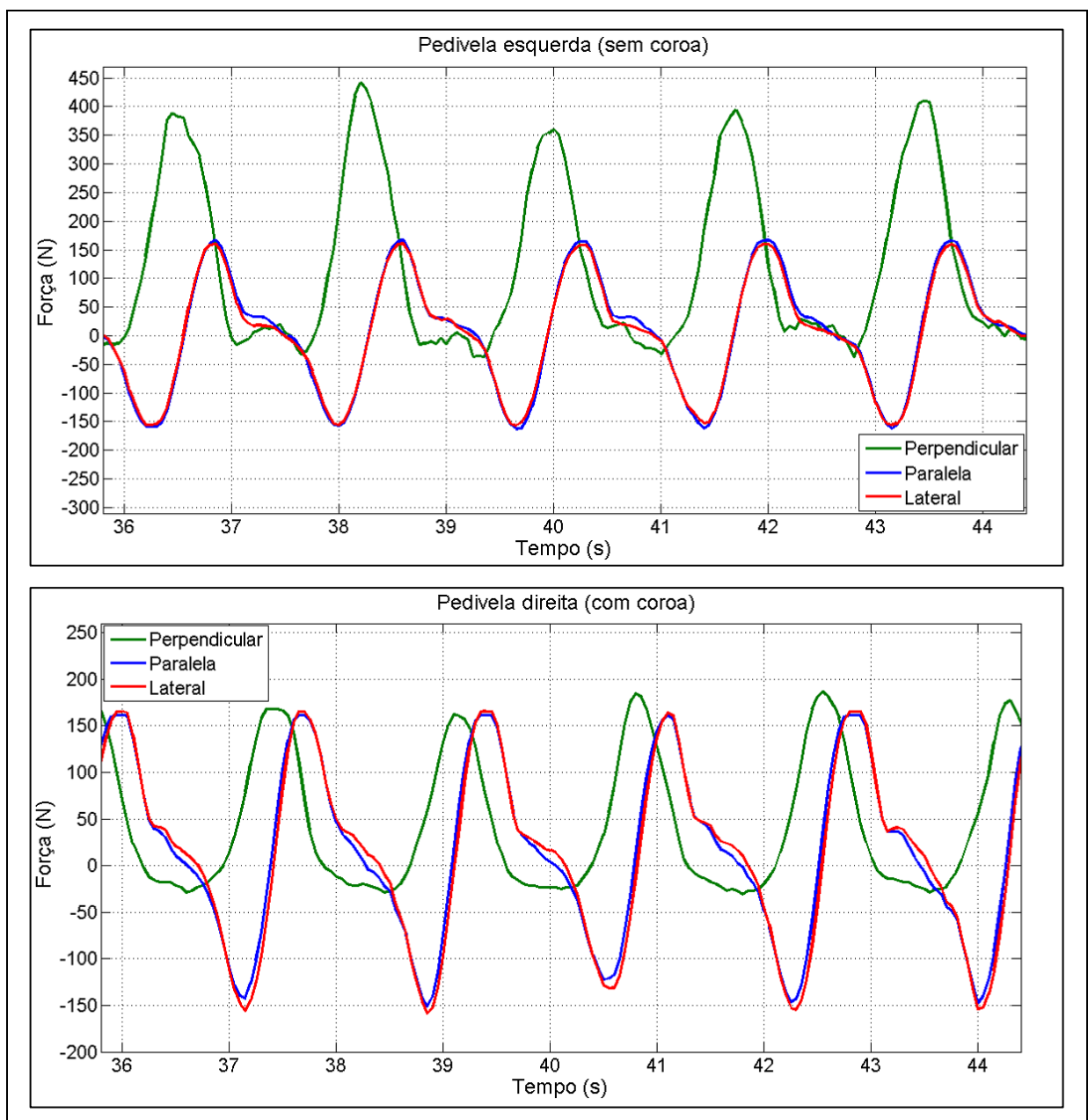


A partir da Figura 74 é possível observar, como esperado, um comportamento cíclico das componentes de forças ao longo da pedalada. A força perpendicular (efetiva) possui um valor máximo de 330 N na pedivela esquerda e de 150 N na pedivela direita. Já a força lateral (não efetiva) tem um valor máximo de 185 N na pedivela esquerda e de 190 N na pedivela direita. Percebe-se que, mesmo as forças laterais tendo um valor semelhante em ambas as pedivelas, a força perpendicular é aplicada com maior intensidade pelo ciclista na pedivela esquerda, identificando-se, desta forma, a dominância desta perna bem como uma assimetria bilateral. Além disso, pode-se constatar que tanto as componentes efetiva como não efetivas são significativas durante a pedalada. Nota-se, também, que os picos das forças perpendicular-

res se intercalam no tempo devido ao acoplamento físico das pedivelas ao eixo do movimento central em direções opostas.

No ensaio realizado em ambiente externo, em uma pista fechada, o mesmo ciclista pedalou por cerca de 3 minutos. Os dados foram armazenados pelo sistema *datalogger* no cartão *mircoSD*, acoplado à bicicleta, e analisados posteriormente com o auxílio do *software* Matlab R2013a. Na Figura 75 podem ser visualizados os resultados obtidos para um intervalo de 8 segundos.

Figura 75. Comportamento das componentes de força durante os ensaios em ambiente externo.



Nota-se, da Figura 75, que em ambiente externo, o comportamento das componentes de força medidas é semelhante ao comportamento obtido durante o teste realizado no rolo de treinamento. No entanto, de acordo com a Figura 75, observa-se que o ciclista consegue aplicar uma força efetiva de maior intensidade quando a bicicleta está em contato com o solo. Tem-se que o valor máximo da força perpendicular é de 440 N para pedivela esquerda e de 186 N para pedivela direita. Para este mesmo caso, há uma diminuição da intensidade das forças não efetivas sendo o seu valor máximo de 160 N para a pedivela esquerda e de 165 N para pedivela direita.

4.6.2 *Autonomia do sistema*

Através de medições da corrente elétrica durante o sistema em uso, obteve-se um consumo de 77 mA drenada da fonte de tensão elétrica positiva, e 25 mA drenada da fonte de tensão elétrica negativa.

Em seguida, com os módulos *bluetooth* e *datalogger* conectados no Arduino MEGA, obteve-se um consumo de cerca de 150 mA durante o envio de dados via *bluetooth*, e cerca de 100 mA em modo de espera (sem enviar ou gravar dados). Somando-se os consumos, têm-se que o sistema drena até 300 mA da fonte de tensão elétrica positiva e 50 mA da fonte de tensão elétrica negativa (MILANI 2014).

Finalmente, sabendo que o circuito integrado *REF02* é capaz de fornecer a tensão elétrica de referência com a precisão nominal para uma alimentação mínima de 7 V, estima-se que a autonomia do sistema seja de aproximadamente 4 horas.

5 CONCLUSÕES

Com este trabalho pôde-se entender o comportamento das componentes tridimensionais da força aplicada na pedivela durante a pedalada. Para isso, foi realizada, inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre os estudos de biomecânica aplicada ao ciclismo que forneceu uma perspectiva global e atual sobre o assunto, demonstrando novos desafios.

Em seguida, a realização das simulações via elementos finitos foi importante para conhecer o comportamento da pedivela. A partir da simulação estática, por exemplo, foi possível obter os pontos principais de deformação da peça para colagem dos extensômetros e verificar que a peça suportava a carga máxima, que poderia ser aplicada pelo ciclista, de 800 N continuando na região elástica de deformação. Já os resultados da simulação dinâmica serviram como base de comparação para os resultados obtidos experimentalmente.

Através do ensaio de deformação realizado, foi possível determinar experimentalmente os valores de deformação percebidos pelos extensômetros e assim desenvolver o circuito de condicionamento. A resposta dinâmica da estrutura, realizada através do ensaio dinâmico, resultou em dados compatíveis com a simulação para a frequência fundamental. Obteve-se experimentalmente 340,4 Hz e via simulação 349,9 Hz ficando significativamente acima da operação da plataforma de força cuja frequência de corte é de 37 Hz.

Verificou-se, através da calibração estática, que o erro de linearidade máximo tanto para células de carga esquerda como para direita encontra-se abaixo de 1%, e que para as cargas máximas definidas, tem-se a máxima excursão de sinal do conversor analógico digital. Além disso, a integração da célula de carga instrumentada com o sistema de armazenamento e transmissão de dados sem fio na bicicleta demonstrou a funcionalidade e a portabilidade da plataforma de força para ensaios tanto em ambiente de laboratório como em ambiente externo.

Foi possível medir e analisar as componentes de forças bem como identificar as componentes significativas e a assimetria bilateral durante os testes realizados. Adicionalmente, este trabalho serve como base para a continuação do desenvolvimento do Projeto de Pesquisa ME/CNPq nº 091/2013 – “Desenvolvimento de Células de Carga para Ciclismo” de número 487210/2013-1 além de auxiliar nos estudos futuros na área de biomecânica aplicada ao ciclismo.

6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas propostas de melhorias para o desenvolvimento desta plataforma com base na experiência adquirida ao longo deste trabalho:

- Definir outros pontos de deformação, para cimentação do extensômetros, a fim de medir isoladamente as componentes de força paralela e lateral;
- Confeccionar o circuito de condicionamento em uma placa de circuito impresso utilizando tecnologia SMD a fim de minimizar o espaço ocupado deste na bicicleta;
- Desenvolver uma estrutura para a fixação da célula de carga de forma que seja possível realizar o ensaio de calibração do mesmo em diversos ângulos de operação;
- Realizar o ensaio de calibração em uma máquina de ensaios mecânicos devidamente calibrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, G.; VINYOLAS, J. **A New Bicycle Pedal Design for On-Road Measurements of Cycling Forces.** Journal of Applied Biomechanics, [S.l.], v.12, p.130–142, 1996.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas.** Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, v.2, 2011.

BALBINOT, A. **Notas de aula. Disciplina de Instrumentação,** UFRGS, 2013.

BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R.; DEWOLF, J.T.; MAZUREK, D.F. **Mechanics of Materials.** Fifth Edition. Publicado por McGraw-Hill, 2009.

BERTUCCI, W. M.; ARFAOUI, A.; POLIDORI, G. **Analysis of the Pedaling Biomechanics of Master's Cyclists.** J Sci Cycling, v.1, p. 42-46, 2012.

BERTUCCI, W.; GRAPPE, F.; GIRARD, A.; BETIK, A.; ROUILLON, J. D. **Effects on the Crank Torque Profile When Changing Pedalling Cadence in Level Ground and Uphill Road Cycling.** Journal of Biomechanics, [S.l.], v.38, p.1003–1010, 2005.

BOYD, T.; HULL, M. L.; WOOTTEN, D. **An Improved Accuracy Six-Load Component Pedal Dynamometer for Cycling.** Journal of Biomechanics, [S.l.], v.29, p.1105–1110, 1996.

CANDOTTI, C. T. **Características Biomecânicas e Fisiológicas da Técnica de Pedalada de Ciclistas e Triatletas. Tese (Doutorado em Ciências do Movimento Humano).** Porto Alegre: UFRGS, 2003.

CARPES, F.P.; MOTA, C. B.; FARIA, I.E. **On the bilateral asymmetry during running and cycling - A review considering leg preference.** Physical Therapy in Sport, [S.l.], v.11, p. 136-142, 2010.

ERICSON, M. O.; NISELL, R. **Efficiency of Pedal Forces During Ergometer Cycling.** International Journal of Sports Medicine, [S.l.], v.9, n.1, p.118–122, 1988.

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

GARCÍA, M. A. P.; ANTÓN, J. C. A.; RODRÍGUEZ, J. C. C.; MARTÍN, F. J. F.; ORTEGA G. J. G. **Instrumentación electrónica.** Ed. Paraninfo-Thomson, 2008

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

HULL, M. L.; DAVIS, R. R. **Measurement of Pedal Loading in Bicycling: 1. instrumentation.** Journal of Biomechanics, [S.l.], v.14, p.843–855, 1981.

KNUDSON, D. **Fundamentals of Biomechanics.** 2.ed. California, USA: Springer, 2007. v.1.

LAZZARI, C. D. **Desenvolvimento e Estudo de uma Plataforma Biomecânica Aplicada ao Ciclismo,** Projeto de diplomação, UFRGS, 2010.

MILANI, C. **Plataforma de Treinamento Instrumentada e Sistema de Aquisição, Armazenamento e Transmissão de Dados sem Fio para Plataforma de Força Aplicada ao Ciclismo.** Projeto de diplomação, UFRGS, 2014.

NABINGER, E. **Análise Dinamométrica Tridimensional da Pedalada de Ciclistas.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Porto Alegre: UFRGS, 2006.

NABINGER, E.; ITURRIOZ, I.; ZARO, M.A. **Development of a triaxial force platform for the measurement of force at a bicycle pedal.** International Symposium of Biomechanics in Sports, Caceres - Extremadura - Spain, p. 290-293, 2002.

PALLÁS-ARENY, R.; WEBSTER, J.G. **Sensors and Signal Conditioning.** New York: John Wiley, 1991.

SANDERSON, D.J. **The Influence of Cadence and Power Output on the Biomechanics of Force Application during Steady-rate Cycling in Competitive and Recreational Cyclists.** J. Sports Sci., v.9, p. 191-203, 1991.

SMAK, W.; NEPTUNE, R.; HULL, M. **The Influence of Pedaling Rate on Bilateral Asymmetry in Cycling.** Journal of Biomechanics, [S.l.], v.32, n.899-906, p.1–17, 1999.

SMITH, M. F.; DAVIDSON, R. C. R.; BALMER, J.; BIRD, S. R. **Reliability of Mean Power Recorded During Indoor and Outdoor Self-Paced 40 km Cycling Time Trials.** International Journal of Sports Medicine, [S.l.], v.22, n.1, p.270–274, 2001.

STONE, C.; HULL, M. L. **Rider/Bicycle Interaction Loads During Standing Treadmill Cycling.** Journal of Applied Biomechanics. [S.l.], v.9, p.202–218, 1993.

ANEXO A. PERFIS DO MODELO DA PEDIVELA

Figura 76. Perfil à 0 mm.

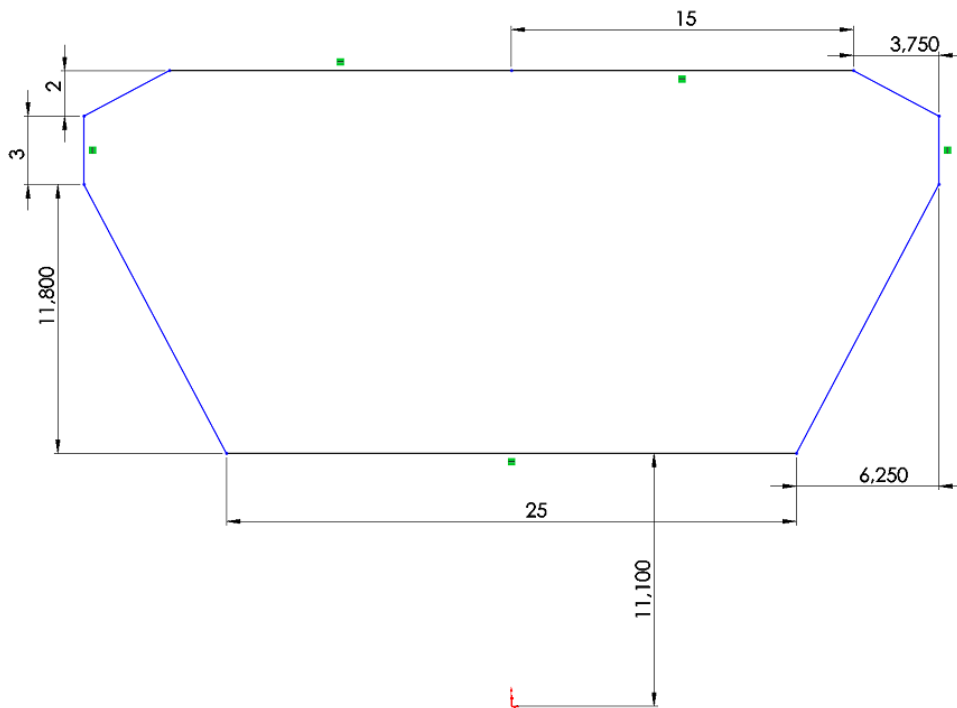


Figura 77. Perfil à 5 mm.

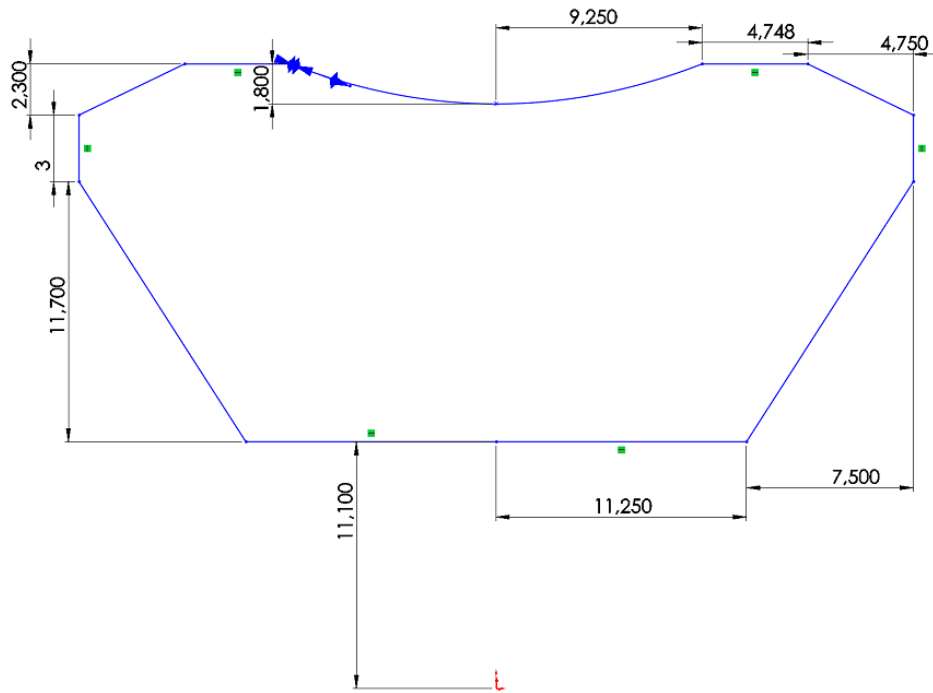


Figura 78. Perfil à 10 mm.

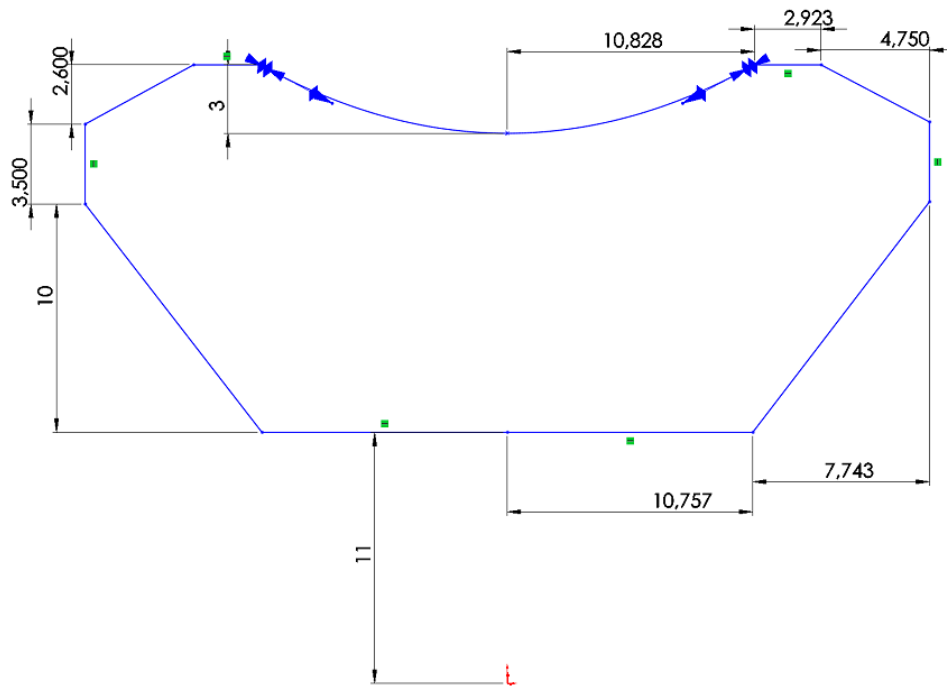


Figura 79. Perfil à 20 mm.

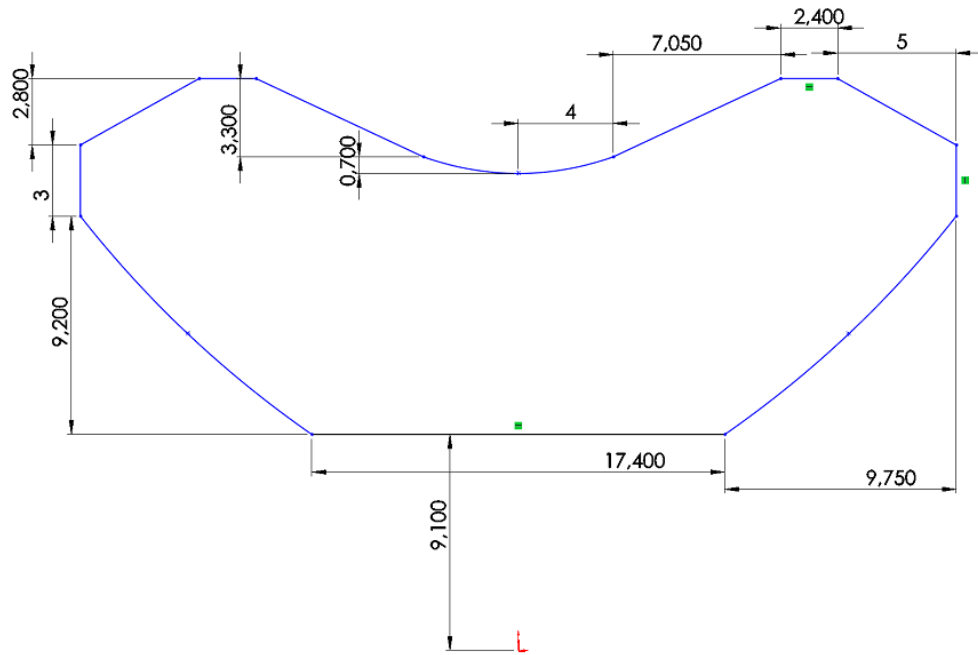


Figura 80. Perfil à 30 mm.

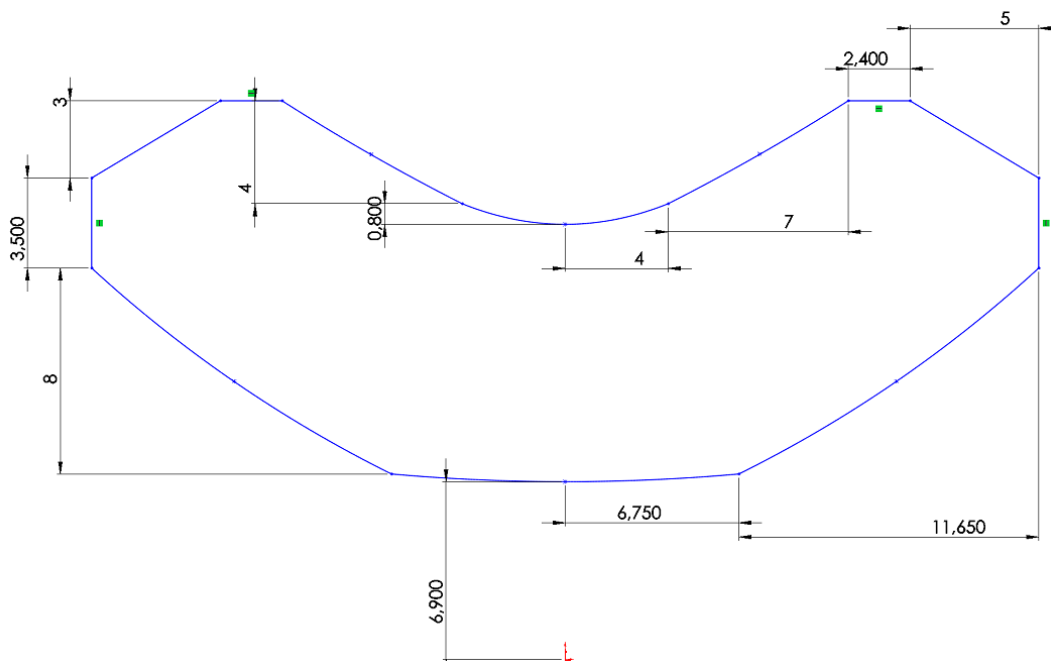


Figura 81. Perfil à 40 mm.

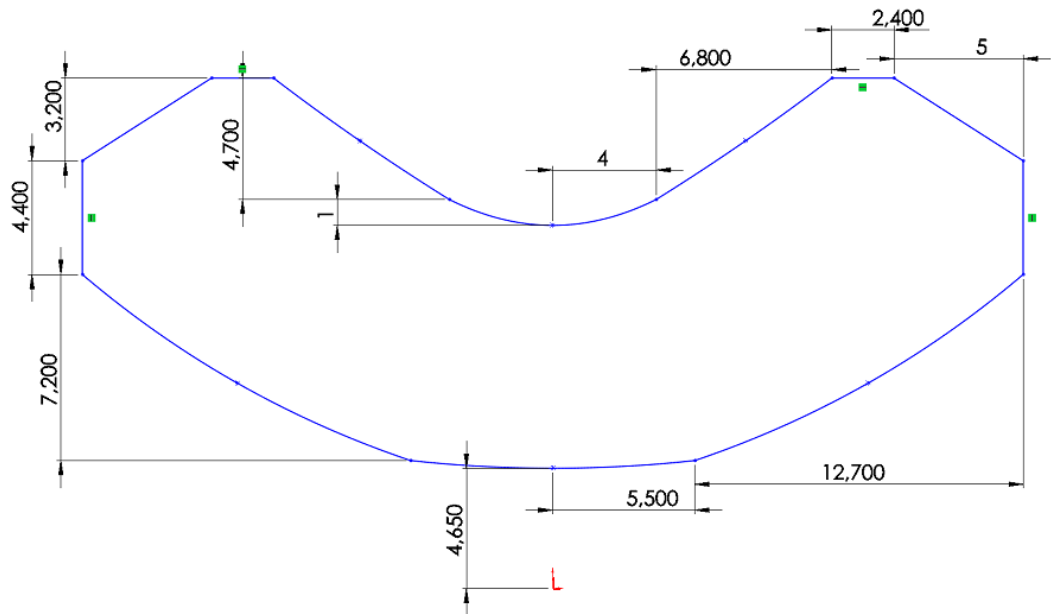


Figura 82. Perfil à 50 mm.

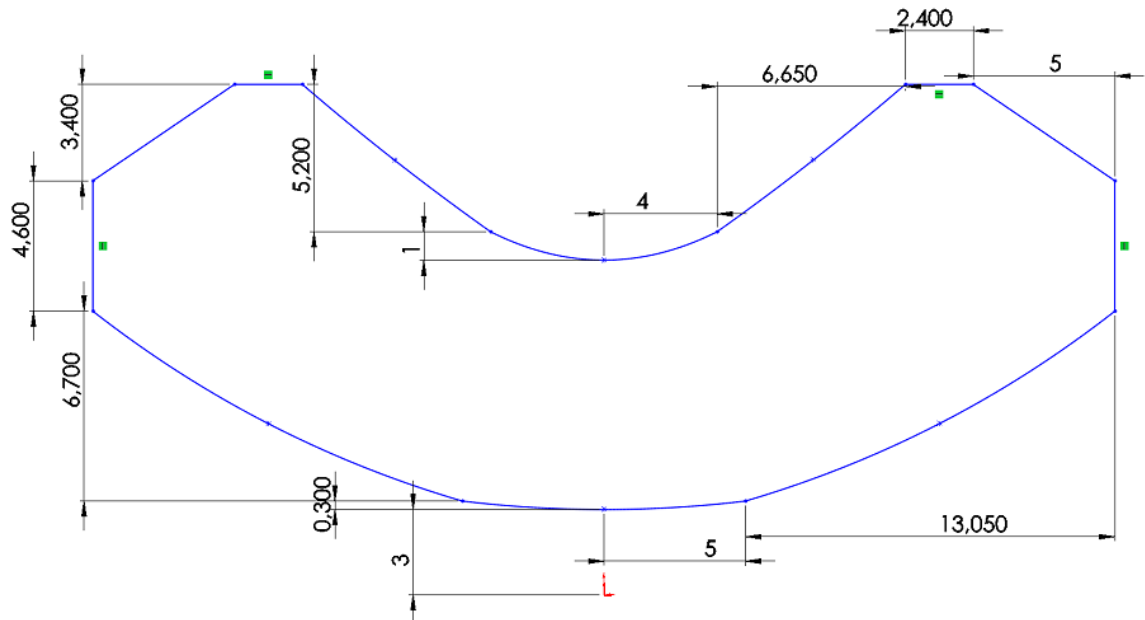


Figura 83. Perfil à 60 mm.

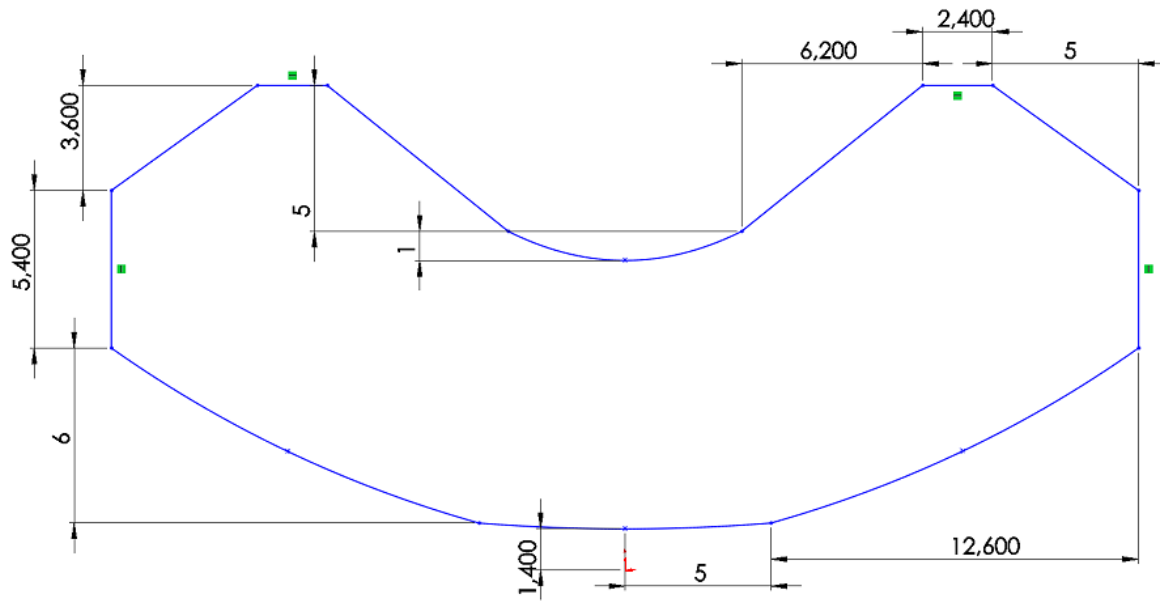


Figura 84. Perfil à 70 mm.

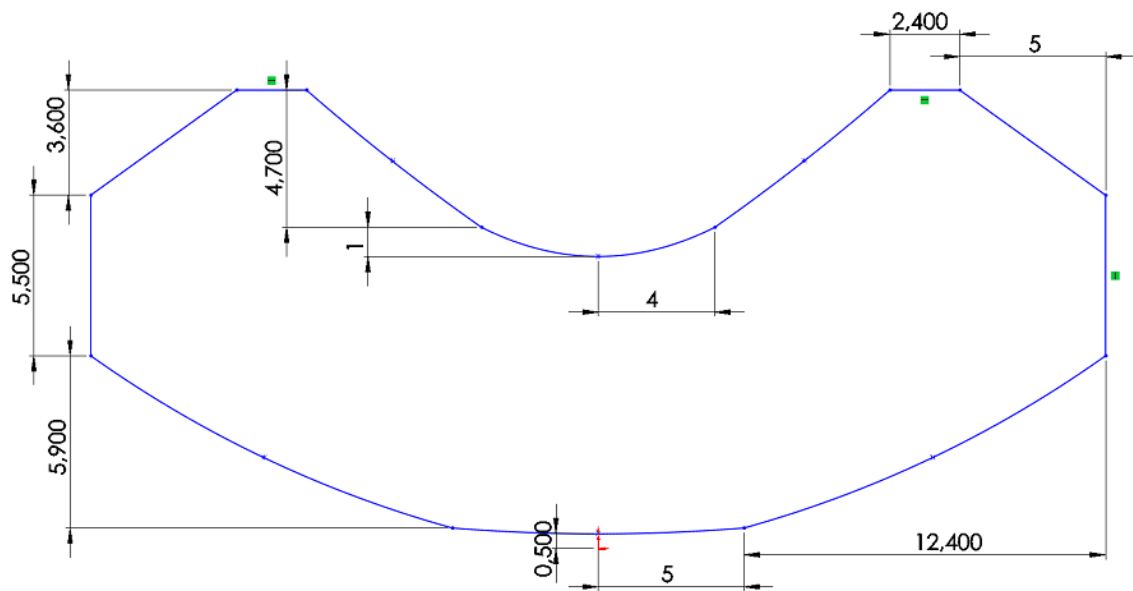


Figura 85. Perfil à 80 mm.

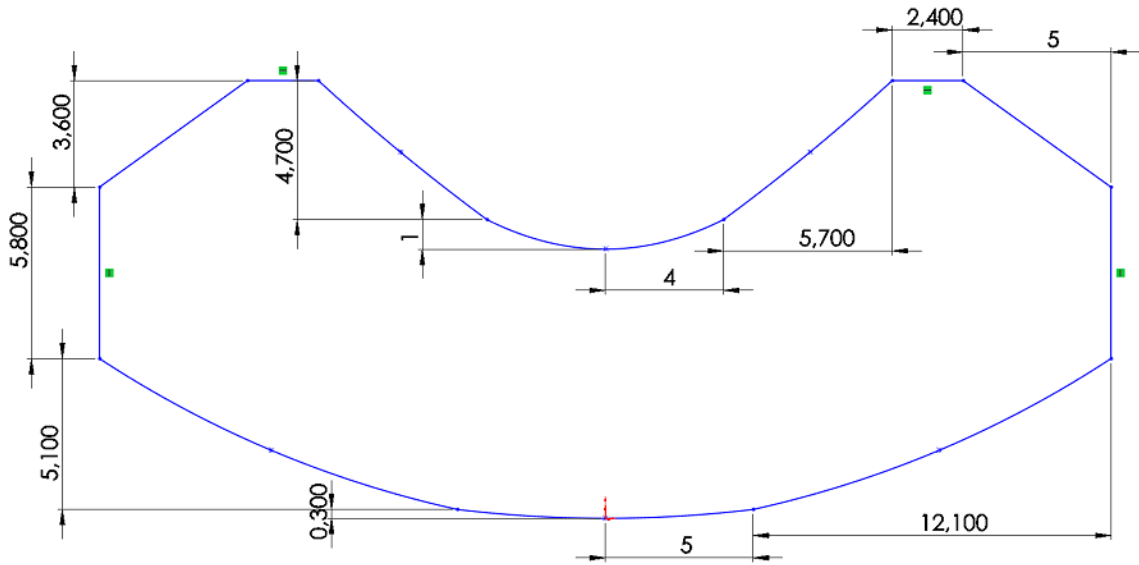


Figura 86. Perfil à 90 mm.

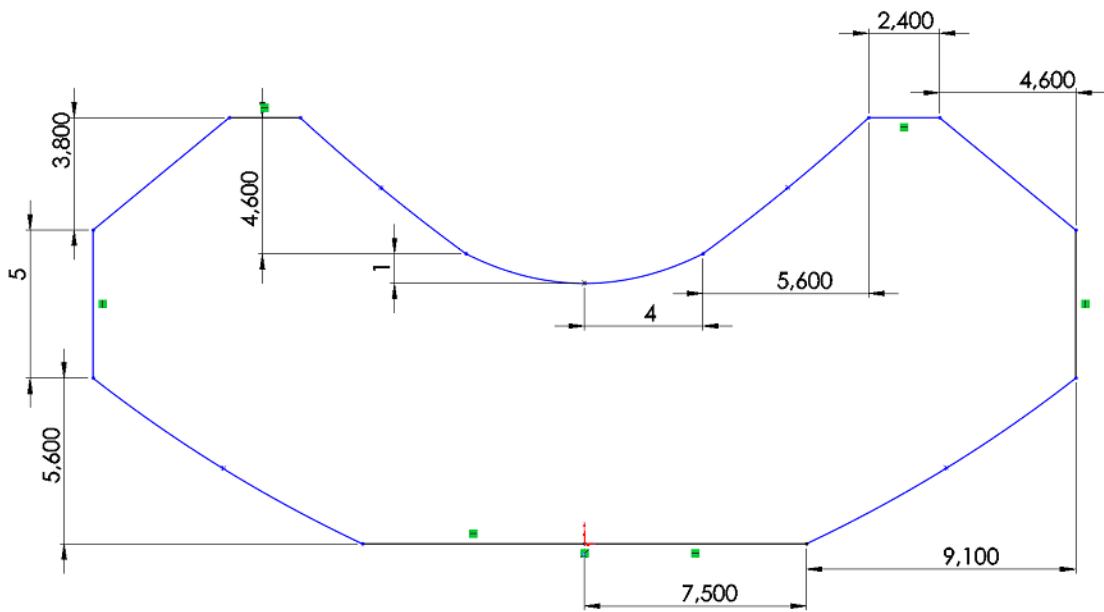


Figura 87. Perfil à 100 mm.

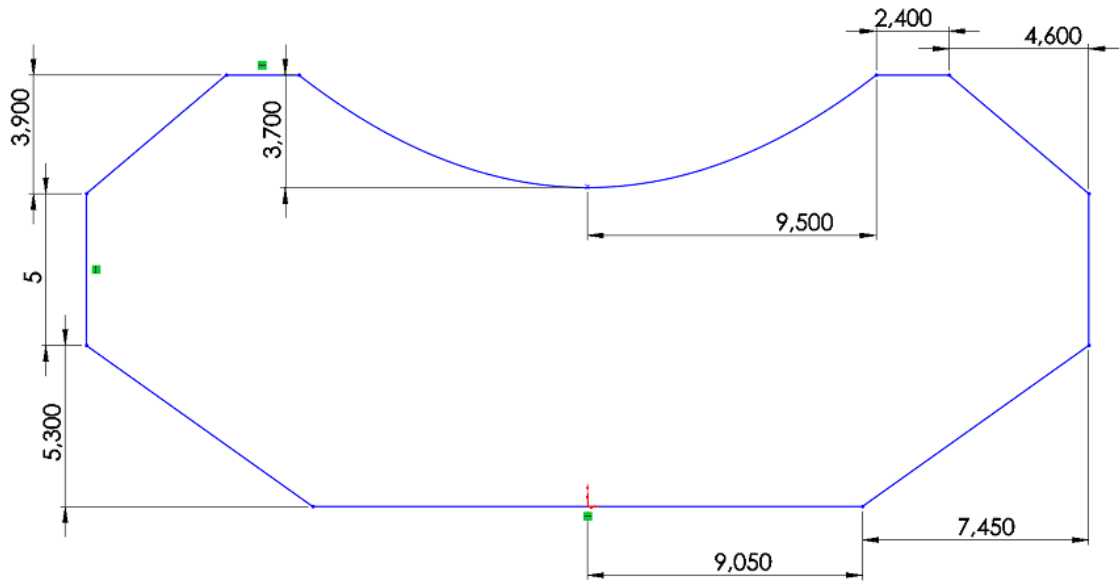
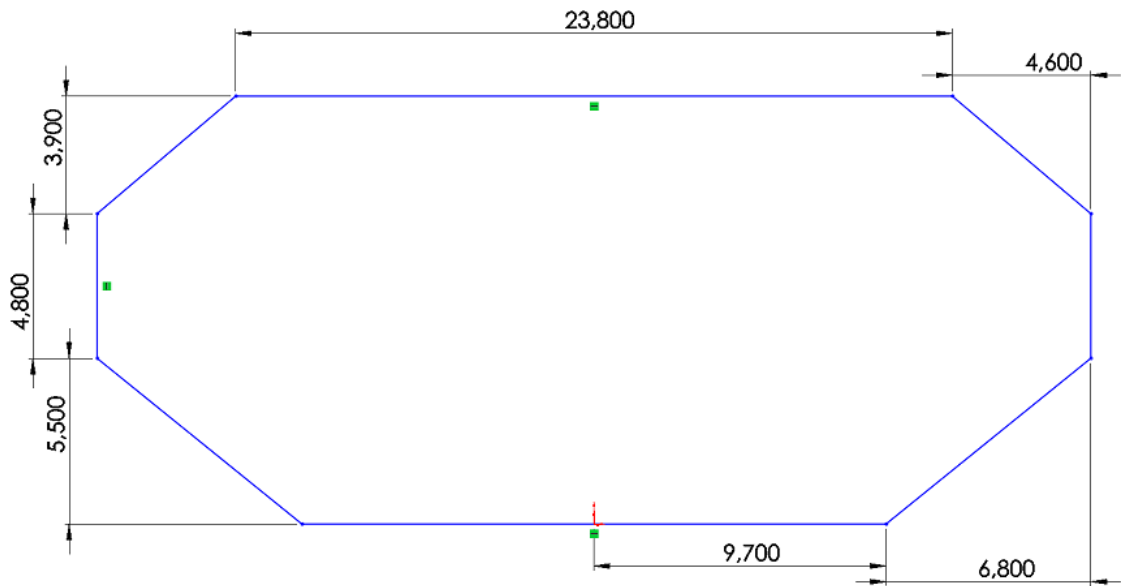


Figura 88. Perfil à 110 mm.



ANEXO B. SIMULAÇÕES DINÂMICAS DE VIBRAÇÃO

Figura 89. Segundo modo ressonante.

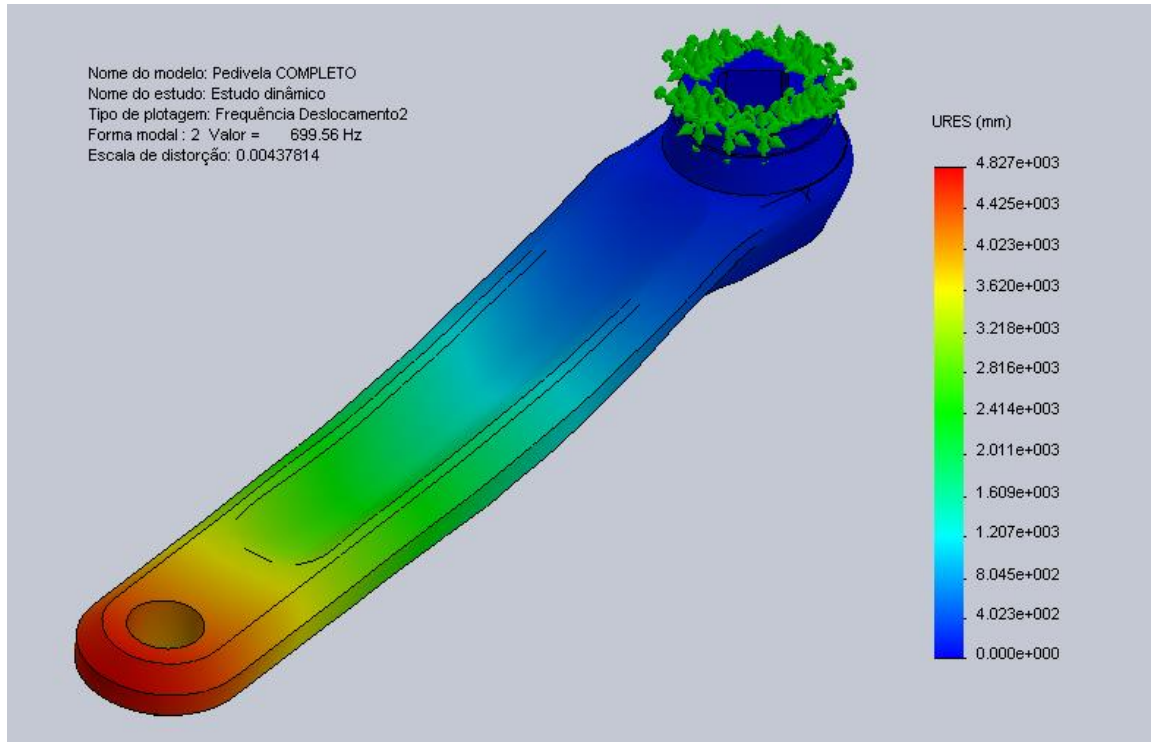


Figura 90. Terceiro modo ressonante.

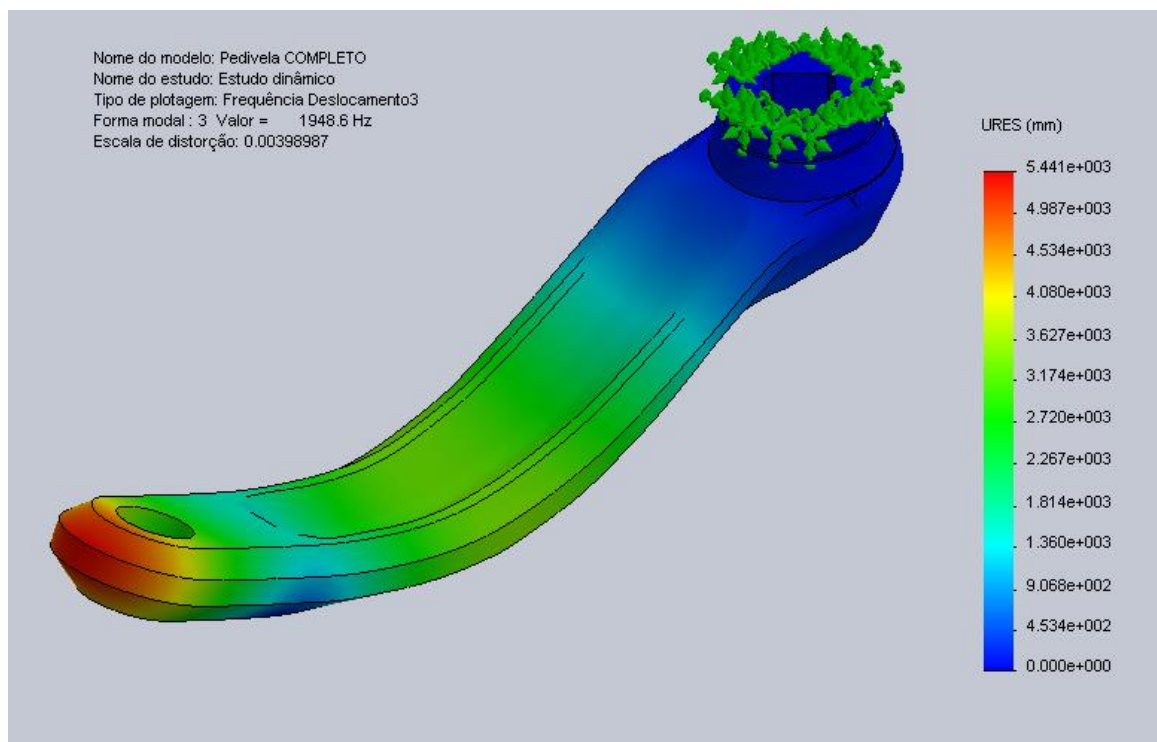


Figura 91. Quarto modo ressonante.

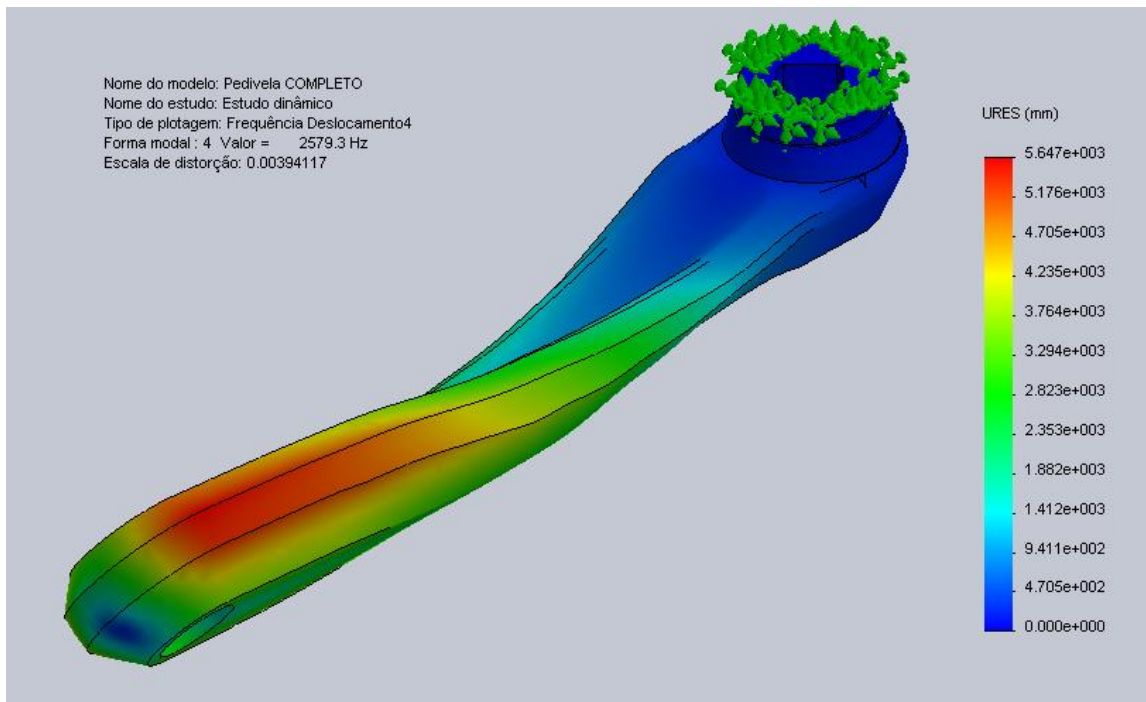
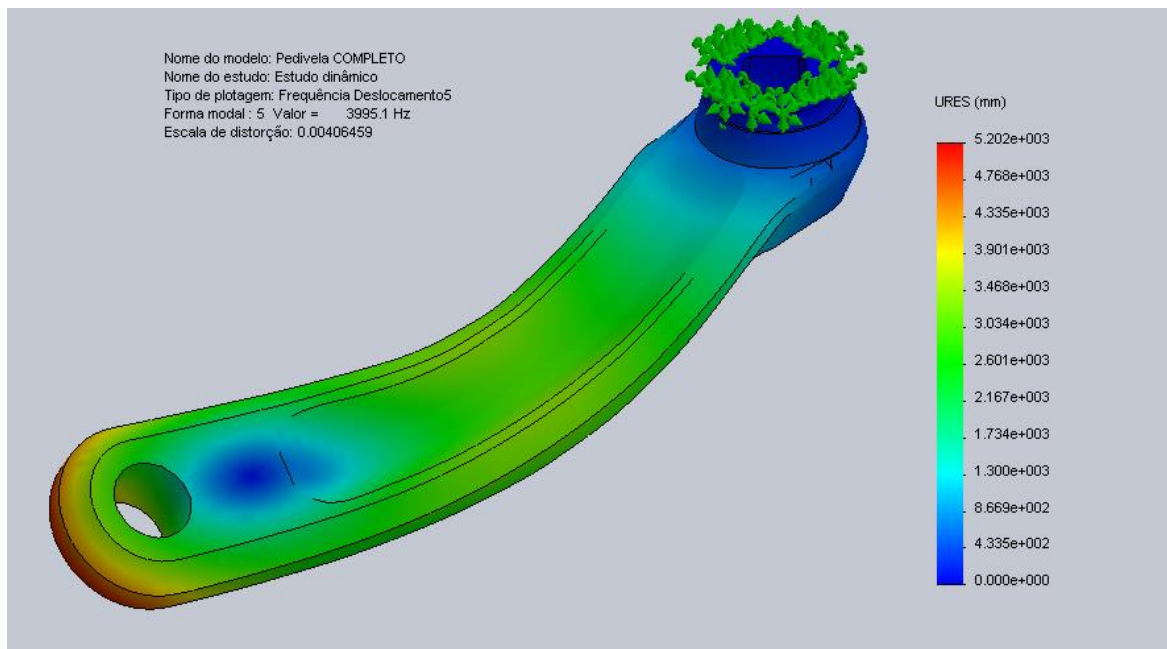


Figura 92. Quinto modo ressonante.



ANEXO C. CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DO CANAL 1

Figura 93. Circuito de condicionamento do canal 1.

