

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

ANDRÉ VIEIRA PIGATTO

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA DE CARGA INSTRUMENTADA, COM
CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO INTERNO, PARA ANÁLISE DE FORÇA
APLICADA POR CICLISTA**

Porto Alegre

2015

ANDRÉ VIEIRA PIGATTO

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA DE CARGA INSTRUMENTADA, COM
CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO INTERNO, PARA ANÁLISE DE FORÇA
APLICADA POR CICLISTA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Porto Alegre

2015

CIP - Catalogação na Publicação

Pigatto, André Vieira

DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA DE CARGA INSTRUMENTADA,
COM CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO INTERNO, PARA
ANÁLISE DE FORÇA APLICADA POR CICLISTA. / André
Vieira Pigatto. -- 2015.

142 f.

Orientador: Alexandre Balbinot.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2015.

1. Célula de Carga. 2. Biomecânica. 3. Ciclismo.
4 . Extensômetro. 5. Pedivela. I. Balbinot, Alexandre,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

ANDRÉ VIEIRA PIGATTO

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULA DE CARGA INSTRUMENTADA, COM
CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO INTERNO, PARA ANÁLISE DE FORÇA
APLICADA POR CICLISTA**

Este trabalho de conclusão de curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Hamilton Duarte Klimach (Prof. Dr) – UFRGS _____

Leia Bernardi Bagesteiro (Prof^a. Dra) – UFRGS _____

Omar Valle Casas (Eng. MSc) – UFRGS _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, namorada e amigos, pelo apoio incondicional prestado ao longo do curso de graduação, e pela compreensão nos momentos de ausência.

Agradeço aos meus colegas, Sandro Buzacchi e Vinícius Stock, pelo apoio concedido ao longo do presente trabalho e pela dedicação aos ensaios biomecânicos realizados.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Instrumentação Eletroeletrônica (IEE), pela companhia e contribuições positivas no decorrer deste projeto.

Agradeço ao Laboratório de Instrumentação Eletroeletrônica, pelo espaço e ferramental disponibilizado para o projeto, e, especialmente, ao Prof. Dr. Alexandre Balbinot, pelo empenho e dedicação despendidos na orientação deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma plataforma de força, utilizando células de carga instrumentadas, com circuito de condicionamento interno, para a medida das componentes de força atuantes no pedivela, durante a pedalada. Para isso, desenvolveu-se uma célula de carga, fabricada em Alumínio 6082 T6, em formato de pedivela. As dimensões do pedivela instrumentado desenvolvido foram determinadas com base nas dimensões de um pedivela comercial da marca FSA e do espaço do compartimento interno necessário para abrigar os extensômetros e circuito de condicionamento. A partir do modelo virtual desenvolvido, executaram-se simulações estáticas e dinâmicas no SolidWorks™, onde definiu-se os pontos de cimentação de 24 extensômetros (12 para cada pedivela) de $350\Omega \pm 0,35\%$. Em seguida, fabricou-se as células de carga e instrumentou-se cada um dos pedivelas com 3 Pontes de *Wheatstone*. Posteriormente, aplicou-se carga mecânica em cada um dos eixos de medida, adquirindo-se os valores de deformação através da plataforma de aquisição NI-9237 da *National Instruments*. Assim determinou-se as funções de transferência de deformação em função da aplicação de carga em cada um dos eixos. O erro de linearidade ficou abaixo de 1,8% para a célula de carga direita e 0,8% para a esquerda. A partir dos valores de deformação máxima, projetou-se o circuito de condicionamento. O circuito de condicionamento é composto por 6 canais, um para cada Ponte de *Wheatstone*, onde cada canal é composto por quatro estágios de ganho, um filtro passa baixa *Butterworth* de quarta ordem, com frequência de corte de 37Hz, e um estágio somador de 2,5V. Na saída destes canais é conectado um sistema de aquisição e transmissão sem fio, utilizando um módulo de desenvolvimento *ArduImu*, com conversor AD de 10 bits, e um módulo de transmissão e recepção *XBee*. A partir de ensaios de deformação estática determinou-se a função de transferência de tensão elétrica de saída em função do carregamento de cada um dos canais. O erro de linearidade ficou abaixo de 0,6% para todos os canais e a incerteza combinada máxima referente à sensibilidade dos canais foi de 3,22%, para ambos os pedivelas. Por fim, montou-se o sistema na bicicleta e realizou-se ensaios em laboratório, com auxílio de um rolo de treinamento. A partir dos dados coletados, analisou-se as forças aplicadas pelo ciclista durante o ensaio de pedalada realizado em um rolo de treinamento. Através da análise, pôde-se perceber uma assimetria bilateral média de 44,4% para aplicação de força na direção perpendicular. A autonomia aproximada do sistema foi de 4 horas.

Palavras-chave: Célula de carga, Ciclismo, Biomecânica, Extensômetro, Pedivela.

ABSTRACT

This Work consists on a development of a force platform based on instrumented load cells with built-in conditioning circuit and strain gages to measure the components of the forces that are applied to the bike crank arm during pedaling. To accomplish that, a 6082 T6 Aluminum Crank load cell was developed. To determine the dimensions of the experimental crankset, it was used as a parameter the ergonomic dimensions of a *Full Speed Ahead* crankset and the internal compartment size required to fit the strain gages and the conditioning circuit board. From the virtual model developed, static and dynamic analysis were made using SolidWorks software to determine the best spots to cement 24 strain gages (12 per cell) with a nominal resistance of $350\Omega \pm 0,35\%$ each. Then each load cell was manufactured and instrumented with 3 Wheatstone Bridges each. To determine the transfer function of the load cells, mechanic load was applied to it in the direction of each axis while the deformation measure was being acquired with a National Instruments NI-9237 acquisition platform. The static deformation tests showed a linearity error below 1,8% for the right crank arm and below 0,8% for the left. Each channel of the conditioning circuit is composed of four voltage gain stages, a low-pass Butterworth filter, with a cut frequency of 37Hz and an offset stage. The voltage gains of the conditioning circuit were calculated based on the maximum strain values obtained from the static analysis. An ArduImu module, with six 10-bits analog to digital converters, is used to acquire the output signal of the conditioning circuit while an XBee wireless module is used to transmit it. The transfer function of the whole system was determined by performing a static analysis test which showed a linearity error below 0,6% for all six channels. The maximum combined uncertainty regarding sensibility of all channels is 3,22%. Finally, the whole system was assembled on the bicycle and cycling tests were performed while using a roller-training platform. The collected data showed a mean bilateral asymmetry of 44,4% for the perpendicular component force. The system battery life was about 4 hours.

Key words: Load Cell, Cycling, Biomechanics, Strain Gage, Crankset, Crank arm.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Típicas fases do ciclo de pedalada.....	21
Figura 2 - Ilustração da técnica de pedalada teórica ideal.	23
Figura 3 - Comparação entre a simetria de aplicação das forças durante uma volta completa no pedivela: (a) movimento de pedalada com aplicação de forças assimétricas, (b) aplicação de forças com maior simetria.	23
Figura 4 - Direção das componentes de força aplicadas no pedivela: (a) perpendicular, (b) paralela, (c) lateral.	24
Figura 5 – Curva de tensão mecânica em função da deformação de um material genérico. ...	27
Figura 6 - Ilustração de um extensômetro genérico do tipo folha.	28
Figura 7 - Esquemático do circuito de uma Ponte de <i>Wheatstone</i> em configuração de $\frac{1}{4}$ de Ponte.....	29
Figura 8 – Curva da tensão elétrica de saída da Ponte, em função da variação da resistência elétrica do sensor, para uma razão característica unitária.	31
Figura 9 - Erro de linearidade relativo da Ponte de <i>Wheatstone</i>	32
Figura 10 - Sensibilidade normalizada da Ponte em função da razão característica.	33
Figura 11 - Esquemático de uma Ponte completa com circuito de ajuste de zero.	34
Figura 12 - Componentes de força aplicadas pelo ciclista durante ensaio em ambiente externo.	35
Figura 13 - Diagrama de blocos do Sistema proposto.	36
Figura 14 - Direção das componentes de força aplicadas no pedivela: (a) perpendicular, (b) paralela e (c) lateral.....	37
Figura 15 - Foto do pedivela FSA VERO CK-602 6061 T6.....	38
Figura 16 - Modelo virtual do pedivela comercial FSA VERO CK-602 6061 T6.....	38
Figura 17 - Modelagem do perfil central da peça: vista isométrica, medida em milímetros (mm).....	40
Figura 18 - Corte transversal do perfil central do pedivela: medidas em milímetros (mm). ...	41
Figura 19 - Parte inferior do pedivela esquerdo: vista isométrica.	41
Figura 20 - Parte inferior do pedivela esquerdo: vista lateral.	42
Figura 21 - Parte inferior do pedivela esquerdo: vista superior.	42
Figura 22 - Parte inferior do pedivela direito: vista isométrica.	43
Figura 23 - Parte inferior do pedivela direito: vista superior.	43

Figura 24 - Parte inferior do pedivela direito: vista frontal.....	44
Figura 25 - Parte inferior do pedivela direito: vista lateral.	44
Figura 26 - Parte superior dos pedivelas direito e esquerdo: vista isométrica.	45
Figura 27 - Parte superior dos pedivelas direito e esquerdo: vista lateral.....	45
Figura 28 - Parte superior dos pedivelas direito e esquerdo: vista superior.....	46
Figura 29 - Pedivela esquerdo: vista isométrica inferior.	47
Figura 30 - Pedivela esquerdo: vista isométrica superior.	47
Figura 31 - Pedivela direito: vista isométrica superior.	48
Figura 32 - Pedivela direito: vista isométrica inferior.	48
Figura 33 - Modelo virtual do pedivela experimental fabricado: (a) vista inferior e (b) vista superior.....	49
Figura 34 - Fotos do pedivela esquerdo em processo de usinagem: (a) realização da furação superior e (b) processo de usinagem da cavidade interna.	52
Figura 35 - Foto do pedivela direito em processo de usinagem: (a) etapa inicial da usinagem, bloco de Alumínio praticamente inteiro e (b) etapa intermediária de usinagem.....	52
Figura 36 - Foto do macho de corte artesanal fabricado em aço inox.	53
Figura 37 - Foto da ferramenta para rosqueamento interno.	53
Figura 38 - Posicionamento dos extensômetros do pedivela esquerdo.....	54
Figura 39- Posicionamento dos extensômetros do pedivela direito.	54
Figura 40 - Foto dos extensômetros cimentados e parte da estrutura do pedivela esquerdo. ..	56
Figura 41 - Deformação aparente em função da temperatura.	57
Figura 42 - Extensômetros em configuração de Ponte com <i>dummy</i> , pedivela direito: direção lateral.....	58
Figura 43 - Extensômetros em configuração de Ponte completa, (a) pedivela esquerdo: direção perpendicular, (b) pedivela direito: direção perpendicular.	58
Figura 44 - Extensômetros em configuração de Ponte com <i>dummy</i> , pedivela esquerdo, lado 1: direção paralela e lateral.....	59
Figura 45 - Extensômetros em configuração de Ponte com <i>dummy</i> , pedivela esquerdo, lado 2: direção paralela e lateral.....	59
Figura 46 - Extensômetros em configuração de Ponte com <i>dummy</i> , pedivela direito: direção paralela e lateral.	60
Figura 47- Extensômetros mecanicamente desacoplados - <i>dummies</i> , presentes nas Pontes de <i>Wheatstone</i> referentes as medidas das componentes de força na direção lateral e paralela: (a) pedivela esquerdo, (b) pedivela direito.	60

Figura 48 - Esquema de ligação elétrica das Pontes de <i>Wheatstone</i> de ambos os pedivelas: (a) direção perpendicular, (b) direção lateral e (c) direção paralela.	61
Figura 49 - Diagrama de blocos do sistema de condicionamento proposto.....	62
Figura 50 - Esquemático do circuito de alimentação utilizado em ambos os condicionadores.	64
Figura 51 - Esquemático do circuito de referência de tensão elétrica dos Canais 1 a 6.	65
Figura 52 - Esquemático das Pontes de <i>Wheatstone</i> com ajuste de <i>offset</i> : (a) configuração de Ponte completa referente aos Canais 1 e 4 , (b) Configuração de Ponte com <i>dummies</i> referente aos Canais 2, 3, 5 e 6.....	66
Figura 53 - Segundo estágio de Amplificação, Canais 1 a 6.....	69
Figura 54 - Esquemático do circuito de filtragem desenvolvido para os Canais 1 a 6. Os valores nominais dos componentes apresentados neste esquemático são referentes aos Canais 1 e 4, apenas.	72
Figura 55 - Diagrama de bode do filtro projetado para o Canal 1.....	72
Figura 56 - Circuito somador: Canais 1 a 6.	73
Figura 57 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 1.	76
Figura 58 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 2.	77
Figura 59 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 3.	77
Figura 60 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 4.	77
Figura 61- Cadeia de Medidas proposta para o Canal 5.	77
Figura 62 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 6.	78
Figura 63 - Fixação do pedivela para realização do ensaio dinâmico: (a) pedivela esquerdo, (b) detalhe da fixação do acelerômetro e (1) acelerômetro.....	79
Figura 64 - Plataforma de força montada, pedivela direito: (1) sistema de alimentação.....	80
Figura 65 - Plataforma de força montada, pedivela direito: (1) Sistema de alimentação e (2) Sistema de aquisição e transmissão.	81
Figura 66 - Ensaio de desempenho de ciclista amador em ambiente fechado.	81
Figura 67 – Padrão de tensões mecânicas e deformação, célula de carga comercial: direção perpendicular.	83
Figura 68- Padrão de tensões mecânicas e deformação, célula de carga comercial: direção lateral.....	84
Figura 69- Padrão de tensões mecânicas e deformação, célula de carga comercial: direção paralela.	85

Figura 70 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela direito: carregamento na direção perpendicular.	86
Figura 71 - Deformação relativa do pedivela direito: carregamento na direção perpendicular.	86
Figura 72 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela direito: carregamento na direção lateral.	87
Figura 73 - Deformação relativa do pedivela direito: carregamento na direção lateral.	87
Figura 74 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela direito: carregamento na direção paralela.	88
Figura 75 - Deformação relativa do pedivela direito: carregamento na direção paralela.	88
Figura 76 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela esquerdo: carregamento na direção perpendicular.	89
Figura 77 - Deformação relativa do pedivela esquerdo: carregamento na direção perpendicular.	89
Figura 78 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela esquerdo: carregamento na direção lateral.	90
Figura 79 - Deformação relativa do pedivela esquerdo: carregamento na direção lateral.	90
Figura 80 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela esquerdo: carregamento na direção paralela.	91
Figura 81 - Deformação relativa do pedivela esquerdo: carregamento na direção paralela. ...	91
Figura 82 – Resultado da simulação dinâmica, primeiro modo ressonante: pedivela direito. .	92
Figura 83 - Resultado da simulação dinâmica, primeiro modo ressonante: pedivela esquerdo.	93
Figura 84 – Curva de deformação do pedivela esquerdo em função da aplicação de força na direção perpendicular.	94
Figura 85 - Curva de deformação do pedivela esquerdo em função da aplicação de força na direção lateral.	94
Figura 86 - Curva de deformação do pedivela esquerdo em função da aplicação de força na direção paralela.	94
Figura 87 - Curva de deformação do pedivela direito em função da aplicação de força na direção perpendicular.	95
Figura 88 - Curva de deformação do pedivela direito em função da aplicação de força na direção lateral.	95

Figura 89 - Curva de deformação do pedivela direito em função da aplicação de força na direção paralela.....	95
Figura 90 - Curvas da resposta dinâmica no domínio do tempo e frequência: Pedivela Esquerdo.....	98
Figura 91- Curvas da resposta dinâmica no domínio do tempo e frequência: Pedivela Direito.	98
Figura 92 - Teste de banda de passagem do Canal 3: Frequência de entrada abaixo da frequência de corte do filtro.	100
Figura 93 - Teste de banda de passagem do Canal 3: Frequência de entrada na frequência de corte do filtro.	101
Figura 94 - Teste de banda de passagem do Canal 3: Frequência de entrada acima da frequência de corte do filtro.	101
Figura 95 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela esquerdo, aplicação de força na direção perpendicular.....	102
Figura 96 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela esquerdo, aplicação de força na direção lateral.	102
Figura 97 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela esquerdo, aplicação de força na direção paralela.....	102
Figura 98 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela direito, aplicação de força na direção perpendicular.	103
Figura 99 - Tensão elétrica de saída do circuito condicionador de sinais: pedivela direito, aplicação de força na direção lateral.....	103
Figura 100 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela direito, aplicação de força na direção paralela.....	103
Figura 101 - Diagrama de blocos da parte analógica do Sistema.....	105
Figura 102 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 1.....	110
Figura 103 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 2.....	110
Figura 104 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 3.....	111
Figura 105 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 4.....	111
Figura 106 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 5.....	111
Figura 107 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 6.....	111
Figura 108 - Componentes de força aplicadas ao pedivela esquerdo durante o ensaio no rolo de treinamento.	116

Figura 109– Componentes de força aplicadas ao pedivela direito durante o ensaio no rolo de treinamento.....	116
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do Alumínio 6082 T6.	50
Tabela 2 - Dimensões externas dos blocos de Alumínio pré-usinagem.	51
Tabela 3 - Extensômetro HBM modelo 1-LY13-1.5/350.	55
Tabela 4 - Propriedades bateria LP 502030.	64
Tabela 5 - Principais características do circuito integrado INA125UA.	65
Tabela 6 - Ganho referente ao primeiro estágio de cada canal.....	68
Tabela 7 - Características elétricas do circuito integrado <i>OPA4227</i>	69
Tabela 8 - Ganho do segundo estágio de amplificação para cada canal.	70
Tabela 9 - Principais características do filtro passa baixa dos Canais de 1 a 6.	70
Tabela 10 - Valores teóricos calculados dos ganhos por estágio e canal.....	73
Tabela 11 - Valores de incerteza e resolução do multímetro <i>Tektronix DMM4050</i> para as escalas utilizadas.....	75
Tabela 12 - Tabela de calibração do acelerômetro tri-axial DeltaTron 4520 fabricado pela <i>Brüel & Kjaer</i>	79
Tabela 13 - Propriedades mecânicas do 6061 T6.	82
Tabela 14 - Modos ressonantes referentes ao pedivela direito e esquerdo.	93
Tabela 15 - Características principais das células de carga.	96
Tabela 16 - Tensão elétrica medida na saída de cada estágio de amplificação, para cada canal.	99
Tabela 17 - Valores de ganho por estágio, por canal, calculados através dos valores de tensão elétrica medidos.	99
Tabela 18 - Características principais da células de carga.	104
Tabela 19 - Incerteza combinada por canal.....	109
Tabela 20 - Características complementares à cadeia de medidas, estágio 1: deformação. ..	112
Tabela 21 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 2: variação de resistência elétrica.....	112
Tabela 22 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 3: saída de tensão elétrica da Ponte de <i>Wheatstone</i>	112
Tabela 23 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 4: bloco de amplificação.	113
Tabela 24 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 5: bloco somador de <i>offset</i>	113

Tabela 25 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 6: conversor analógico-digital.	114
Tabela 26 - Consumo e autonomia do sistema desenvolvido.	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	CONTEXTO TEÓRICO	20
2.1	Conceitos fundamentais da biomecânica aplicada ao ciclismo	20
2.1.1	Estudo e caracterização da força aplicada no pedal	20
2.1.2	Torque e Potência Mecânica	25
2.2	Células de Carga - Extensiometria	26
2.2.1	Fundamentos Teóricos	26
2.2.2	Extensômetro de Resistência Elétrica	27
2.3	Ponto de <i>Wheatstone</i> e circuito de condicionamento do sinal	29
2.4	Análise da força aplicada no pedal através do pedivela instrumentado	34
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	36
3.1	Desenvolvimento da Célula de Carga	37
3.1.1	Procedimento de análise estrutural da célula de carga comercial	37
3.1.2	Definição das dimensões da célula de carga experimental	39
3.1.3	Procedimento de modelagem virtual da célula de carga	40
3.1.4	Procedimento de análise estrutural da célula de carga projetada	49
3.1.5	Usinagem e procedimento de cimentação dos extensômetros	50
3.2	Procedimento para determinação das funções de transferência experimentais	61
3.3	Projeto do Circuito de Condicionamento de Sinal	62
3.3.1	Circuito de Alimentação	63
3.3.2	Tensão Elétrica de Referência	64
3.3.3	Ponte de <i>Wheatstone</i> e Circuito de Ajuste de Zero	66
3.3.4	Estágios de Amplificação	67
3.3.5	Circuito de Filtragem e Terceiro Bloco de Ganho	70
3.3.6	Circuito Somador e Função de Transferência do Circuito Condicionador	73
3.3.7	Sistema de Aquisição de Dados com ArduImu	75
3.3.8	Projeto das Cadeias de Medidas Propostas	76
3.4	Procedimento de Calibração Estática do Sistema	78
3.5	Procedimento de Ensaio Dinâmico do Sistema	78
3.6	Montagem do Sistema e Procedimentos de Ensaios com a Bicicleta	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82

4.1 Desenvolvimento da célula de carga experimental.....	82
4.1.1 Resultados da análise estrutural da célula comercial	82
4.1.2 Resultados da análise estrutural virtual da célula de carga experimental.....	86
4.2 Determinação das Funções de Transferência Experimentais de Deformação	93
4.3 Ensaio Dinâmico.....	97
4.4 Validação do Circuito de Condicionamento.....	99
4.5 Determinação das Funções de Transferência Experimentais de Tensão de Saída	101
4.6 Análise de Incertezas	105
4.6.1 Análise de incertezas referente a sensibilidade da Ponte de <i>Wheatstone</i>	105
4.6.2 Análise de incertezas referente ao circuito de condicionamento	107
4.7 Cadeias de Medida Experimentais	109
4.8 Autonomia do Sistema	114
4.9 Ensaio Biomecânico.....	115
5 CONCLUSÕES	118
6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	120
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	121
ANEXO A – DIMENSÕES DO PEDIVELA ESQUERDO.....	123
ANEXO B – DIMENSÕES DO PEDIVELA DIREITO TEÓRICO.....	124
ANEXO C – DIMENSÕES DO PEDIVELA DIREITO EXPERIMENTAL.	125
ANEXO D – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DOS CANAIS 1 A 3 – PRIMEIRA PARTE.	126
ANEXO E – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DOS CANAIS 4 A 6 – PRIMEIRA PARTE.	128
ANEXO F – ROTINA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO IMPLEMENTADA NO ARDUIMU.	130
ANEXO G – ROTINA DE AQUISIÇÃO IMPLEMENTADA NO MATLAB.....	135
ANEXO H – ROTINA DE GERAÇÃO DOS GRÁFICOS DO ENSAIO BIOMECÂNICO, IMPLEMENTADA NO MATLAB.	137
ANEXO I – SIMULAÇÕES DINÂMICAS DO PEDIVELA DIREITO.	140

ANEXO J – SIMULAÇÕES DINÂMICAS DO PEDIVELA ESQUERDO..... 141

1 INTRODUÇÃO

O ciclismo é um esporte praticado por grande parte dos atletas, seja profissionalmente ou para treinamento físico. Nas últimas décadas, a compreensão do ato de pedalar vêm sendo constantemente aprimorada através de estudos e experimentos aplicados a área da instrumentação biomecânica. A partir de publicações científicas e técnicas, treinadores e profissionais do esporte passaram a analisar dados coletados e gerados a partir de diferentes técnicas de pedalada com o objetivo de melhorar não apenas a potência útil, mas também a eficiência da conversão de energia muscular em mecânica, fornecida durante o movimento (BINI & CARPES, 2014).

As características referentes ao desempenho do atleta podem ser explicadas por fatores fisiológicos, como respiração, frequência cardíaca, nível de preparo físico muscular, dentre outros (SOVNDAL, 2009). Existem diversas formas de mensurar o desempenho do ciclista, dentre elas, destacam-se a potência gerada pelo atleta, que depende, além dos fatores já citados, dos ângulos entre o atleta e a bicicleta (como por exemplo, o ângulo formado entre o tronco do ciclista e o quadro da bicicleta), do uso correto das relações de câmbio, dos ajustes da altura do selim, da posição do guidão, mas principalmente, da forma como a força é aplicada no pedal, ou seja, a técnica da pedalada (BINI & CARPES, 2014; MILANI, 2014; NASCIMENTO, 2014).

A forma como as forças são aplicadas ao pedal, sua simetria, módulo, direção de aplicação, instante de aplicação em referência ao ângulo do pedivela em relação a linha vertical e cadência influencia diretamente na forma e eficiência com a qual a energia gerada pela musculatura do atleta é convertida em energia mecânica, que é transferida para o solo e gera o movimento (SOVNDAL, 2009; BINI & CARPES, 2014).

Uma das formas de obter-se as características das forças aplicadas pelo ciclista no pedal, e, por consequência, analisar a técnica de pedalada, é através da instrumentação do pedivela, parte da bicicleta responsável por fazer o acoplamento mecânico entre o eixo do pedal, a caixa de movimento central da bicicleta e a transmissão. Atualmente existem equipamentos comerciais capazes de medir a força resultante aplicada ao pedivela ou ao pedal, e a partir dela, calcular e exibir a potência gerada; por exemplo, o *InfoCrank Cycling Power Meter*, fabricado pela empresa *Verve Cycling*, e o sistema desenvolvido *Stages Power*, desenvolvido pela *Stages Cycling*, contudo, não existe nenhum dispositivo comercial capaz de medir e apresentar as componentes da força em três eixos (NASCIMENTO, 2014).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento, construção e validação de uma célula de carga capaz de medir as três componentes de força aplicada pelo ciclista no pedal, durante o movimento de pedalada. Como objetivo específico, deseja-se projetar e fabricar uma célula de carga, com função de pedivela, em Alumínio, mantendo-se a ergonomia de um pedivela comercial, porém, com espaço interno suficiente para abrigar os extensômetros, cabeamento e circuito de condicionamento.

Para isso, utilizou-se o modelo virtual do pedivela comercial modelo Vero FSA CK-602 175mm da *Full Speed Ahead*, anteriormente desenvolvido por Nascimento (2014), como modelo dimensional para célula de carga experimental. Dessa forma, determinou-se as deformações máximas da célula de carga experimental, com base nas deformações máximas obtidas na célula de carga comercial, para a aplicação de um carregamento equivalente às forças aplicadas por um ciclista de massa 75kg.

Em sequência, foi o modelo virtual da célula de carga experimental e, a partir do mesmo, foram realizadas as simulações estáticas e dinâmicas, com objetivo de determinar as características de máxima deformação e as posições ideais para cimentação dos extensômetros.

A partir do modelo virtual, os pedivelas foram usinados, utilizando-se um centro de usinagem CNC de 3 eixos e, instrumentados com 3 pontes de *Wheatstone* cada. Após instrumentado, as funções de transferência de deformação em função do carregamento foram determinadas, e, a partir delas, foram projetados os circuitos de condicionamento.

Posteriormente à implementação do circuito de condicionamento, foram levantadas as funções de transferência da tensão de saída de cada canal do circuito de condicionamento em função da força aplicada em cada eixo (perpendicular, paralelo e lateral). Por fim, utilizou-se os conversores analógico-digitais de 10 bits, presentes em uma plataforma de desenvolvimento *ArduImu* para realizar a aquisição do sinal de tensão elétrica de cada canal.

Para envio do sinal digitalizado, foi utilizado um módulo de transmissão e recepção sem fio XBee. A partir dos dados recebidos e armazenados no computador, foi desenvolvida uma rotina no *software* MATLAB[®] para conversão dos valores de tensão elétrica de saída dos canais do condicionador nos valores da força aplicada ao pedivela durante a pedalada, em função do tempo. E, assim, foi possível gerar as curvas de F_x , F_y e F_z , que apresenta a força aplicada pelo ciclista durante o movimento de pedalada.

2 CONTEXTO TEÓRICO

2.1 Conceitos fundamentais da biomecânica aplicada ao ciclismo

Uma das linhas de pesquisa da biomecânica é a caracterização das forças geradas pelo corpo humano, assim como, sua causa, a nível de estruturas musculares, ósseas e todo os membros envolvidos no movimento. Dentre as caracterizações das forças geradas, pode-se dividir o estudo em duas áreas, a primeira é o trabalho externo, possível de medir, e realizado pela movimentação dos membros, e a segunda, o trabalho interno, que é a compressão e expansão dos músculos para movimentação do membro. O segundo não pode ser diretamente medido, apenas caracterizado, como, por exemplo, através de equipamentos de eletromiografia (EMG) e da correlação com as medidas externas. O primeiro, pode ser medido, caracterizado e estudado (KAUTZ & NEPTUNE, 2002).

O ciclismo é um esporte que tem apresentado um grande crescimento no número de praticantes nos últimos anos; dentre estes, estão os amadores e os profissionais. Para os atletas profissionais, o aumento da competitividade e a busca por melhores desempenhos tem alavancado as pesquisas científicas nesse ramo. Algumas dessas pesquisas tem foco fisiológico e exploram características como a frequência cardíaca, o nível de oxigenação sanguínea, preparo muscular, dentre outros (SCHMIDT, 2014). Contudo, o desempenho não depende apenas do preparo físico do atleta, mas da técnica utilizada durante o movimento, nível de cadência e outros fatores que influenciam na fração de energia proveniente do esforço físico que é transformada em movimento (SOVNDAL, 2009). Por esse motivo, outro ramo de pesquisa crescente é a da caracterização do movimento e das forças aplicadas durante este. Neste ramo, a área de instrumentação é extremamente presente e fonte de inovação.

2.1.1 Estudo e caracterização da força aplicada no pedal

A técnica utilizada durante a pedalada influencia diretamente a relação entre a parcela de força resultante, aplicada no conjunto pedal-pedivela, que é convertida em forças efetivas (que geram o movimento), e forças não efetivas (NABINGER, 2006). Segundo LAZZARI (2010) e NABINGUER (2006), a razão entre as forças, efetiva e resultante, é chamada de índice de efetividade e é representada pela Equação (1):

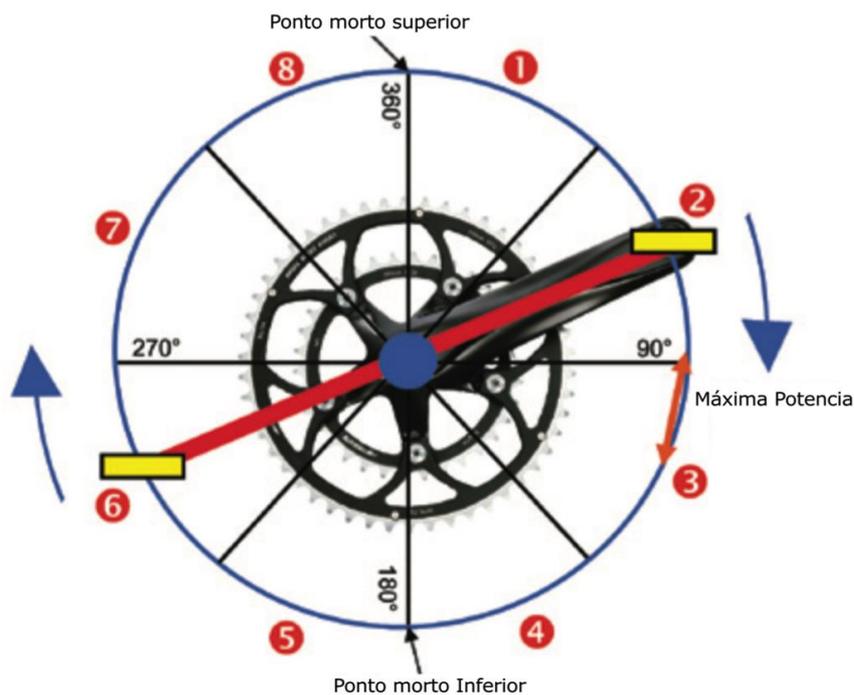
$$r = \frac{F_{efetiva}}{F_{resultante}} \quad (1)$$

onde r é a razão entre a força efetiva e a força resultante, $F_{efetiva}$ é a força efetiva em [N] e $F_{resultante}$ é a soma vetorial das componentes de força aplicadas no pedal durante a pedalada em [N].

Segundo LAZZARI, (2010), a faixa do índice de efetividade é compreendida de -1 a 1, onde o sinal indica se o sentido da força resultante e da força efetiva é o mesmo. Para o valor positivo e igual a 1, têm-se o caso de maior eficiência, onde toda a força aplicada é convertida em movimento. Se o valor é negativo e de módulo igual a 1, o módulo das forças é o mesmo, e a direção contrária, configurando o caso de menor efetividade.

O movimento da pedalada pode ser dividido em oito setores de 45°, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Típicas fases do ciclo de pedalada.



Fonte: Adaptado de (SCHMIDT, 2014).

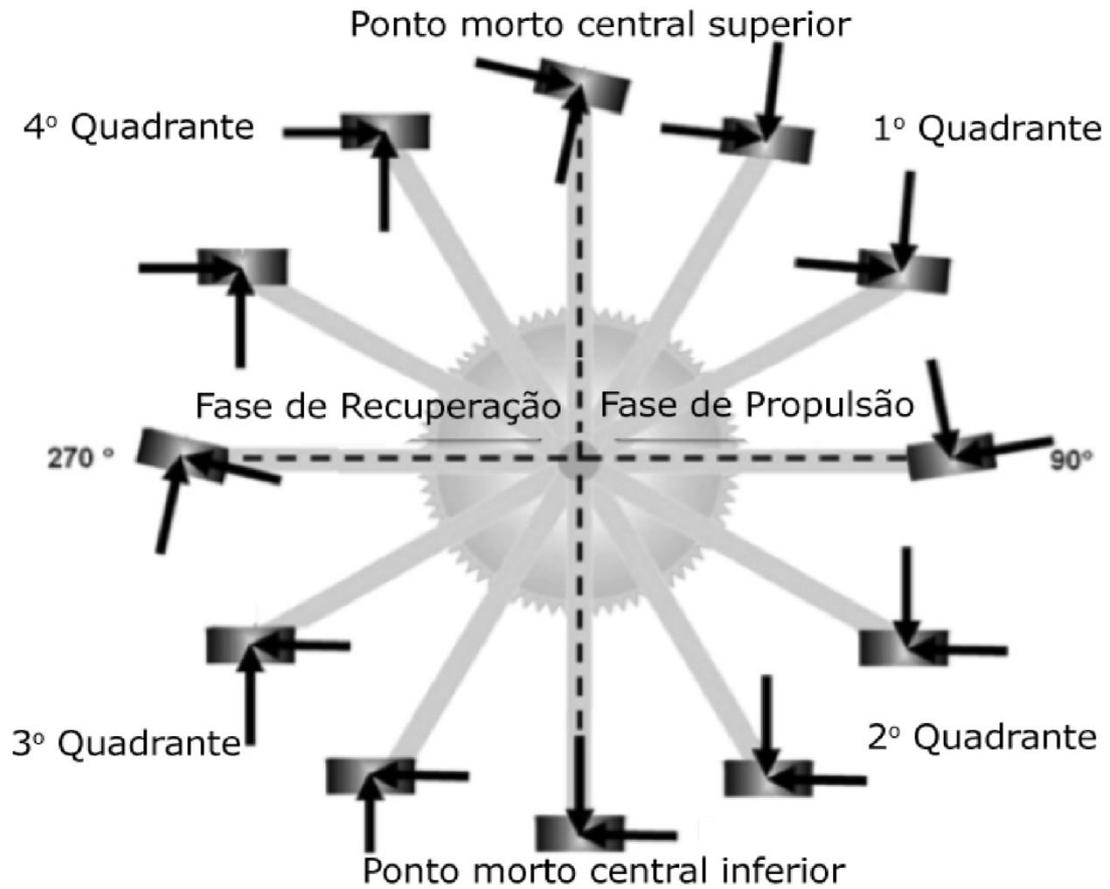
Considera-se como referencial de início do movimento o ponto morto superior, este, indica o início do primeiro setor, para um movimento circular no sentido horário. Dessa forma, o primeiro setor é caracterizado pelo início do movimento, onde, aproximadamente, a partir de 10°, em relação ao eixo vertical, começam a surgir componentes de força efetivos com sentido vertical e direção para baixo. O segundo e terceiro setor são considerados os mais

importantes para o geração do movimento, já que é onde a maior parte da potência transferida para o pedal é convertida em potência mecânica, gerando, assim, movimento. O pico de potência mecânica é normalmente atingido quando o pedivela encontra-se entre 90° e 110° em relação à linha vertical. Quando o pedal chega no quarto setor, ainda há bastante energia proveniente do pico de potência gerado na fase anterior, esta, ajuda o ciclista a passar pelo ponto morto inferior, onde não há força efetiva no sentido do movimento; é iniciada a fase cinco. Esta, por sua vez é caracterizada pela aplicação de força na direção vertical e sentido para cima, enquanto a outra perna exerce força no sentido oposto. Nota-se que os movimentos são complementares e a força efetiva é um somatório das forças aplicadas em cada um dos pedais (direito e esquerdo). Em sequência, têm-se a sexta e sétima fases, onde um dos pedivelas está na região de máxima geração de potência mecânica e por consequência ajuda na recuperação da posição vertical do pedivela oposto. A oitava fase é antecedente à primeira, e é compreendida pelo ponto morto superior, onde, novamente, a força aplicada no pedivela não é efetiva ao movimento (SCHMIDT, 2014).

Nota-se que a simetria entre as forças aplicadas nos pedais direito e esquerdo é importante para um bom desempenho do atleta, visto que os pedais são conectados aos pedivelas, e estes, por sua vez, estão dispostos com uma defasagem de 180° . Enquanto o atleta pressiona um dos pedais para baixo com uma perna, ele puxa o outro para cima com a outra, o que torna o movimento complementar. Para o caso de ciclistas profissionais, usualmente utiliza-se pedais de clipe, que encaixam na sapatilha (calçado desenvolvido para a prática do ciclismo), permitindo a aplicação de forças na direção vertical, sentido para cima, durante as fases cinco a oito, apresentadas na Figura 1. Dessa forma, consegue-se manter a continuidade da aplicação das forças durante a pedalada, e, conseqüentemente, manter um nível maior de geração de potência mecânica efetiva (SOVNDAL, 2009).

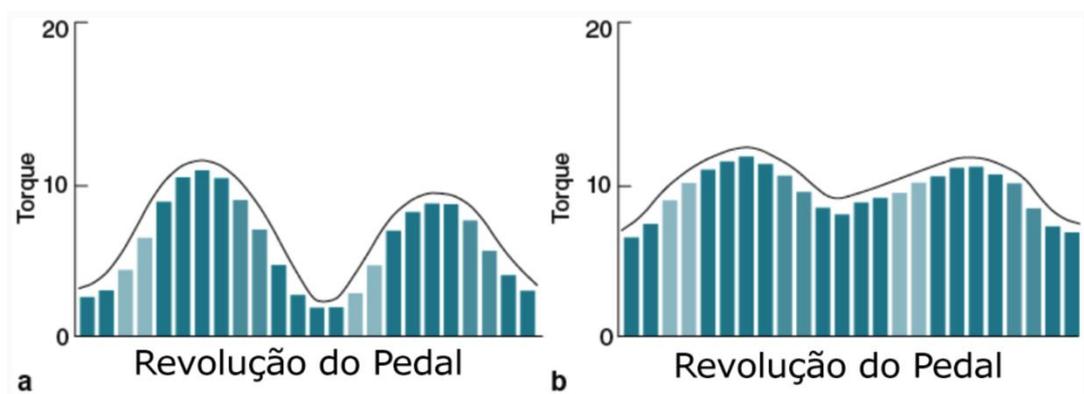
A Figura 2 ilustra uma situação teórica ideal (índice de efetividade 1) de aplicação de forças no pedal em função do ângulo do pedivela em relação ao eixo vertical. A Figura 3 apresenta duas curvas de torque obtidas experimentalmente, sendo que, para a Figura 3 (a), têm-se as curvas de torque gerado por um ciclista cuja técnica de pedalada apresenta uma assimetria maior entre as forças aplicadas nos setores 2 a 3 e 6 a 7, do que a do atleta que gerou as curvas de torque apresentadas na Figura 3 (b).

Figura 2 - Ilustração da técnica de pedalada teórica ideal.



Fonte: Adaptado de (BINI & CARPES, 2014).

Figura 3 - Comparação entre a simetria de aplicação das forças durante uma volta completa no pedivela: (a) movimento de pedalada com aplicação de forças assimétricas, (b) aplicação de forças com maior simetria.



Fonte: Adaptado de (SOVNDAL, 2009).

É importante observar que até este momento foi apresentado apenas as componentes vertical e horizontal das forças aplicadas ao pedal, durante o movimento da pedala. Porém,

segundo (ERICSON *et al.*, 1988) para uma melhor análise do movimento é pertinente considerar as forças que são transmitidas do pedal para o pedivela. Estas podem ser separadas em três componentes;

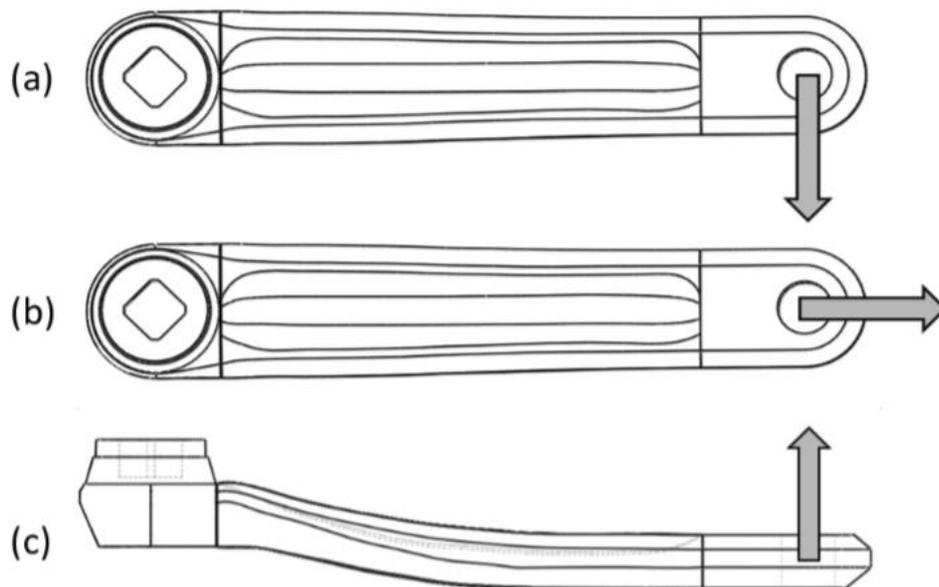
- componente perpendicular: considerada a única componente de força efetiva (capaz de gerar movimento), atua no plano de rotação do pedivela e é perpendicular ao seu eixo do mesmo.

- componente lateral: classificada como componente não efetiva (não gera movimento), atua perpendicularmente ao plano de rotação do pedivela e ao seu eixo.

- componente paralela: assim como a lateral, é considerada não efetiva, atua no plano de rotação do pedivela, paralelamente ao eixo do mesmo.

A Figura 4 ilustra a decomposição das componentes de força que atuam no pedivela.

Figura 4 - Direção das componentes de força aplicadas no pedivela: (a) perpendicular, (b) paralela, (c) lateral.



Fonte: Adaptado de (NASCIMENTO, 2014).

Dessa forma, considerando-se o ambiente de competição, onde o preparo físico dos atletas é tal que as capacidades biomecânicas são levadas ao limite, torna-se interessante a análise e estudo dos fatores relacionados à técnica individual de pedalada, para aumentar a efetividade de aplicação das forças, e obter-se um melhor desempenho. Assim, quantificando-se a assimetria na técnica de pedalada utilizada por um atleta de acordo com as faixas de carga e cadência, é possível elaborar melhores estratégias de treinamento personalizadas, que

visam a redução desta assimetria, o que resulta em um melhor aproveitamento da energia gerada pela musculatura e reduz as chances de lesões musculares (LAZZARI, 2010).

2.1.2 Torque e Potência Mecânica

No Seção 2.1.1, abordou-se a forma como as forças são aplicadas no pedal. Estas forças, por sua vez, são transmitidas para o pedivela que é acoplado à roda pela corrente e o sistema de coroas. Dessa forma, converte-se a força efetiva aplicada no pedal, em torque. O torque transmitido para a roda é função da força efetiva e do braço de alavanca criado pela distância entre o pedal e o eixo da caixa central. A Equação (2) expressa o torque transmitido.

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

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

O trabalho gerado pelo ciclista durante uma volta completa do conjunto pedal/pedivela pode ser expresso pela Equação (3).

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

onde W representa o trabalho, em [J], T é o torque produzido pelo ciclista, em [N.m], e θ é a posição angular do pedivela em [rad].

A partir do trabalho gerado, pode-se calcular a potência mecânica desenvolvida pelo atleta ao longo de um certo número de ciclos. Dessa forma, segundo NABINGER (2006), a potência mecânica é representada pela Equação (4):

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

onde P_n é a potência do ciclo n , em [W], W é o trabalho desenvolvido pelo ciclista, em [J] e t_n é o intervalo de tempo de duração do ciclo n .

2.2 Células de Carga - Extensiometria

Uma das formas mais utilizadas para medida de carregamentos (força) mecânicos, causada por esforços mecânicos de tração, compressão, dentre outros, é baseada na deformação elástica. Dessa forma, utiliza-se um elemento elástico ao qual é associado um sensor, tipicamente um extensômetro de resistência elétrica (para os casos onde o elemento elástico sofre deformações da ordem de *microstrains*). O conjunto formado pelo elemento elástico (ou elemento mola) e o sensor é chamado de célula de carga. (BALBINOT, 2014).

2.2.1 Fundamentos Teóricos

Segundo BALBINOT & BRUSAMARELLO (2011), quando um elemento elástico é submetido à um esforço mecânico, ele se deforma. Se respeitados os limites de tração máxima definidos pelo material e pela geometria do elemento, ao cessar o esforço o elemento volta para suas dimensões originais. Esse conceito foi estabelecido por *Hooke*, em 1678, para uma mola na qual é aplicada uma força longitudinal, e pode ser expresso pela Equação (5):

$$F = k \cdot x \quad (5)$$

onde F representa a força aplicada na mola, em [N], k é a constante elástica da mola, em [N/m], e x a deflexão mecânica, em [m].

Para elementos de geometria diferente de uma mola convencional (geometria helicoidal), considera-se que a relação entre a força aplicada e a deformação é linear para pequenos valores de deformação, abaixo do limite de deformação elástica do material. Para esse caso, a lei de Hooke pode ser expressa pela Equação (6):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

onde σ representa a tensão mecânica, em [N/m²], E é o módulo de elasticidade do material, em [N/m²], e ε é a deformação percentual relativa.

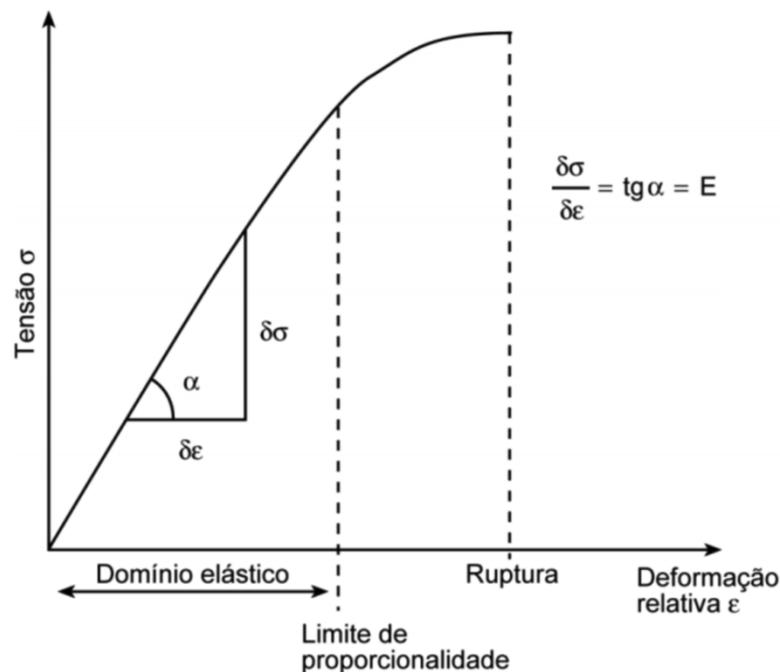
Dessa forma segundo BALBINOT (2014), define-se a deformação relativa de um elemento, para o qual a aplicação de uma força na direção normal ao seu comprimento gera uma deformação na região elástica, através da Equação (7).

$$\varepsilon = \int_0^l \frac{dl}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (7)$$

onde ε representa a deformação relativa percentual do elemento, l é o comprimento longitudinal final do elemento deformado, em [m], e l_0 é a medida de comprimento original do material, em [m].

A Figura 5 ilustra a curva de tensão mecânica em função da deformação de um material genérico, onde nota-se que a tensão é linear contanto que o módulo da deformação relativa tenha valor inferior ao limite de proporcionalidade. É importante ressaltar que cada material apresenta uma curva de tensão em função da deformação diferente, e esta depende exclusivamente do material e não da geometria da peça.

Figura 5 – Curva de tensão mecânica em função da deformação de um material genérico.



Fonte: BALBINOT & BRUSAMARELLO (2011).

2.2.2 Extensômetro de Resistência Elétrica

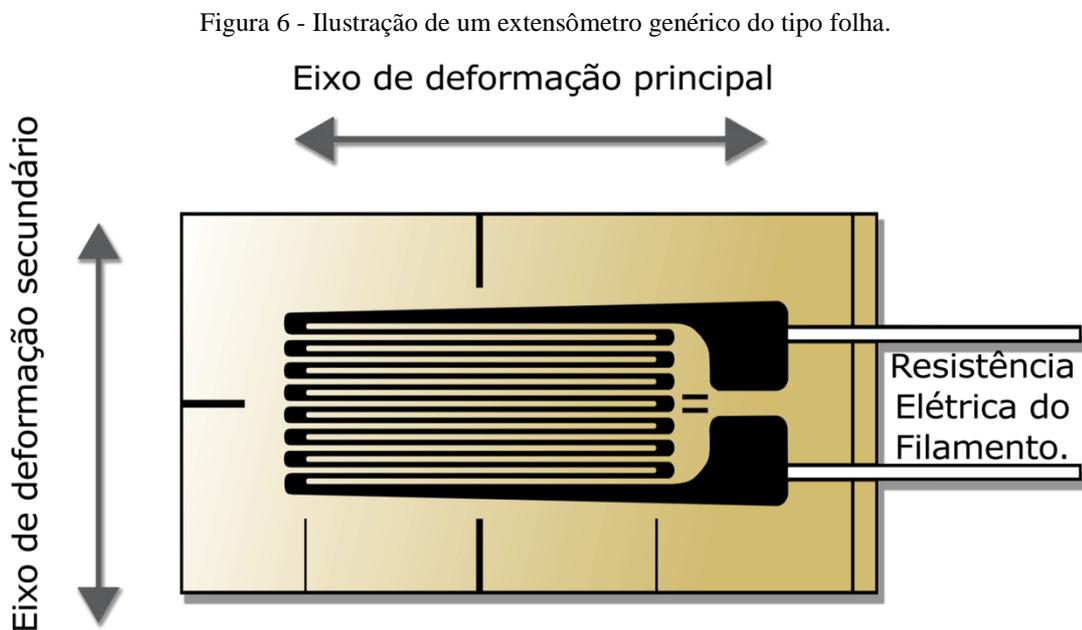
Segundo (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011), o extensômetro de resistência elétrica é um transdutor que varia sua resistência elétrica nominal em função da variação nas suas dimensões físicas. Essa característica tem como objetivo possibilitar a medida da deformação mecânica de elementos elásticos através do monitoramento da resistência elétrica. A relação entre a deformação e a variação da resistência elétrica é dado pela constante de

deformação do extensômetro (Fator *Gage*), e caracteriza a sensibilidade estática (relação entre a entrada – variação de comprimento, e saída, variação de resistência) do mesmo. Esta, por sua vez, é expressa pela Equação (8):

$$K = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (8)$$

onde K representa o Fator *Gage*, ΔR é a variação da resistência elétrica, em $[\Omega]$, R_0 é a resistência elétrica nominal do extensômetro, em $[\Omega]$, Δl é a variação do comprimento longitudinal do extensômetro, em $[m]$, l_0 é o comprimento nominal do extensômetro, em $[m]$, e ε é a deformação relativa, em $[\mu m/m]$ (*microstrain*).

A Figura 6 ilustra um extensômetro genérico do tipo folha, onde é apresentado o filamento metálico disposto em forma de grade, os terminais de soldagem, o eixo de deformação principal, para o qual é determinado o Fator *Gage*, e o eixo de deformação secundário, cuja sensibilidade é, normalmente, duas ordens de grandeza menor do que o Fator *Gage*.



Fonte: Adaptado de adaptado de (HBM, *datasheet strain gages de uso geral*, 2015).

Ao variar o comprimento do extensômetro de resistência elétrica, cada uma das tiras metálicas que compõe a grade varia seu comprimento, o que faz com que a resistência elétrica do filamento varia. Essa variação pode ser representada pela Equação (9).

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

onde R é a resistência elétrica do fio metálico, em $[\Omega]$, R_0 é a resistência elétrica nominal (quando o extensômetro encontra-se sem deformação), em $[\Omega]$, k é o Fator *Gage*, e ε é a deformação relativa, em $[\mu\text{m}/\text{m}]$.

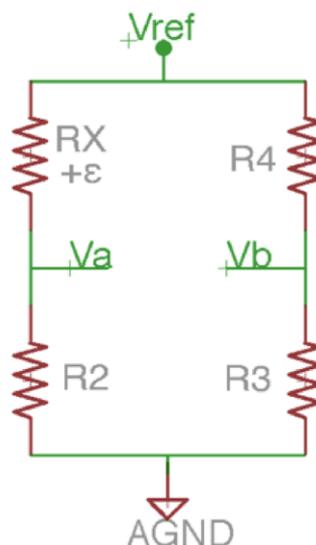
O tipo de extensômetro utilizado deve ser adequado à aplicação. A escolha do extensômetro deve levar em conta o material do qual a célula de carga será fabricada, a faixa de deformação exigida pela aplicação, o tamanho do extensômetro, a máxima corrente de alimentação, dentre outros fatores (HOFFMAN, 1982).

Como o Fator *Gage* dos extensômetros uniaxiais de folha é, tipicamente, em torno de 2, e a deformação da célula de carga é na faixa dos *microstrains*, tem-se, pela Equação (9), que a variação na resistência elétrica para o fundo de escala estará tipicamente compreendida na casa do miliohm ($\text{m}\Omega$), dessa forma, torna-se necessário o uso de um circuito de condicionamento adequado; este, por sua vez, será explorado ao longo da Seção 2.3.

2.3 Ponto de *Wheatstone* e circuito de condicionamento do sinal

Tipicamente, a primeira etapa de condicionamento de um projeto, cuja cadeia de medidas usa transdutores extensiométricos como sensores de deformação mecânica, é composta por uma Ponte de *Wheatstone*, que apresenta a configuração ilustrada no esquemático da Figura 7.

Figura 7 - Esquemático do circuito de uma Ponte de *Wheatstone* em configuração de $\frac{1}{4}$ de Ponte.



Nota-se através do esquemático da Figura 7, que a Ponte de *Wheatstone* é composta por dois braços resistivos, alimentados por uma tensão elétrica de referência (em alguns casos pode ser alimentada, também, com corrente elétrica de referência). A saída da Ponte é a medida da tensão elétrica entre os pontos V_a e V_b , que pode é expressa pela Equação (10).

$$V_{out} = V_a - V_b = V_{ref} \cdot \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) = V_{ref} \cdot \left(\frac{R_0 (1 + x)}{R_2 + R_0 (1 + x)} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) \quad (10)$$

onde V_{out} é a tensão elétrica de saída de Ponte, em [V], V_a e V_b são as tensões elétricas, em [V], nos nós a e b , V_{ref} é a tensão elétrica de referência, em [V], R_1 , R_2 e R_3 são as resistências elétricas dos resistores que completam a Ponte, em [Ω], R_x é a resistência elétrica do extensômetro, R_0 é a resistência elétrica nominal do extensômetro, em [Ω], e x é a variação da resistência elétrica do extensômetro.

A saída da Ponte será nula (a Ponte encontra-se em equilíbrio) quando a razão entre R_x e R_2 é igual a razão entre R_4 e R_3 (desconsiderando-se a incerteza de cada resistor). Segundo (GARCÍA *et al.*, 2008), para que a saída da Ponte seja nula quando a resistência elétrica do extensômetro é igual a R_0 , normalmente define-se $R_2=R_0$ e $R_1=R_3=r.R_0$, onde r representa a razão característica da Ponte. Dessa forma, têm se que a saída da Ponte pode ser expressa em função da razão característica da Ponte e dos parâmetros do extensômetro utilizados, conforme apresentado na Equação (11):

$$V_{out} = V_{ref} \cdot r \cdot x \frac{1}{(r + 1) \cdot (r + 1 + x)} \quad (11)$$

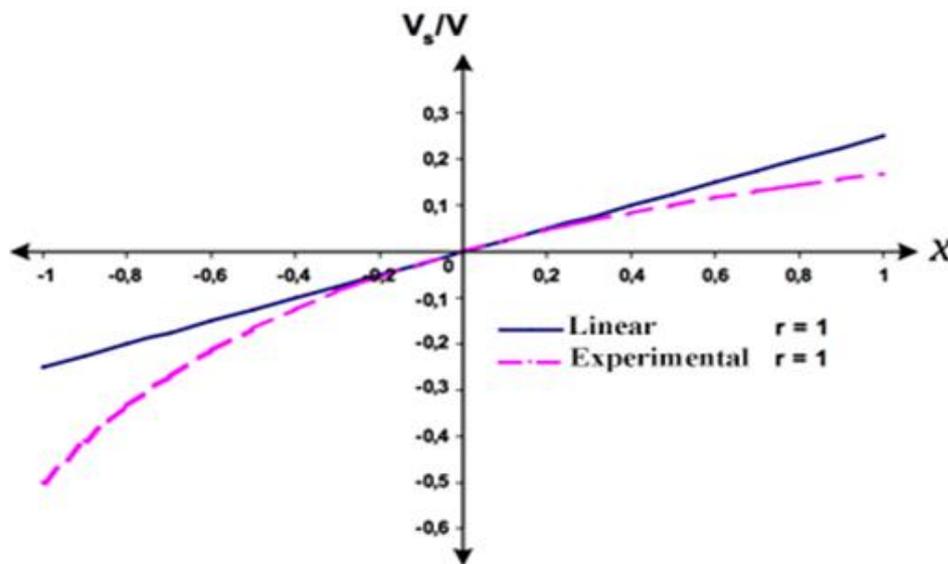
onde V_{out} é a tensão elétrica de saída da Ponte, em [V], V_{ref} é a tensão elétrica de referência, em [V], r é a razão característica da Ponte, em [Ω/Ω] e x é a variação da resistência elétrica do extensômetro.

Nota-se que a tensão elétrica de saída da Ponte não apresenta uma relação linear, contudo, considerando-se que a variação da resistência elétrica do sensor, para toda a faixa da aplicação, é pequena, ou seja, $R_x \approx R_0$, tem-se que $(r + 1) \gg x$, logo, a saída linearizada pode ser expressada pela Equação (12) (GARCÍA *et al.*, 2008):

$$V_{out_linearizado} = V_{ref} \cdot r \cdot x \frac{1}{(r + 1)^2} \quad (12)$$

onde $V_{out_linearizado}$ é a tensão elétrica de saída linearizada da Ponte, em [V], V_{ref} é a tensão elétrica de referência, em [V], r é a razão característica da Ponte, em $[\Omega/\Omega]$ e x é a variação da resistência elétrica do extensômetro. A Figura 8 apresenta a curva da tensão elétrica de saída normalizada em relação a tensão elétrica de alimentação da Ponte, em função da variação da resistência elétrica do sensor, para uma Ponte com razão característica unitária.

Figura 8 – Curva da tensão elétrica de saída da Ponte, em função da variação da resistência elétrica do sensor, para uma razão característica unitária.

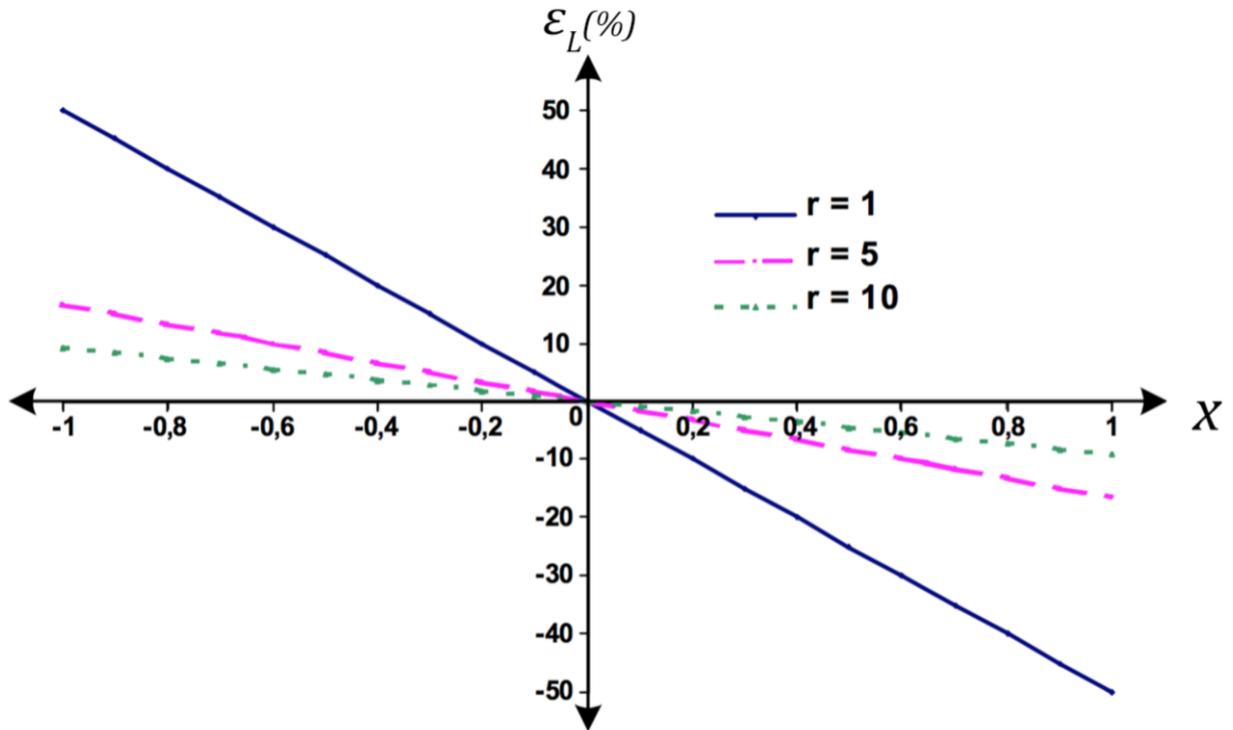


Fonte: Adaptado de (GARCÍA *et al.*, 2008).

Nota-se, que apesar da curva experimental apresentada na Figura 8 não apresentar comportamento linear em toda a região de variação de x , para a faixa de onde x tem valor aproximado entre -0,1 e 0,1, o comportamento da curva real é linear. Sendo assim, o erro de linearidade da Ponte pode ser expressado pela Equação (13):

$$\varepsilon_L(\%) = \frac{V_{out} - V_{out_linearizado}}{V_{out}} \cdot 100 \quad (13)$$

onde $\varepsilon_L(\%)$ representa o erro de linearidade percentual entre a curva de tensão de saída experimental e a linear, V_{out} é a tensão elétrica de saída real, em [V], em função da variação de x e $V_{out_linearizado}$ é a tensão elétrica de saída linearizada, em [V], em função da variação de x . A Figura 9 ilustra o valor do erro de linearidade relativo em função da variação de x para três valores distintos de razão característica da Ponte.

Figura 9 - Erro de linearidade relativo da Ponte de *Wheatstone*.

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

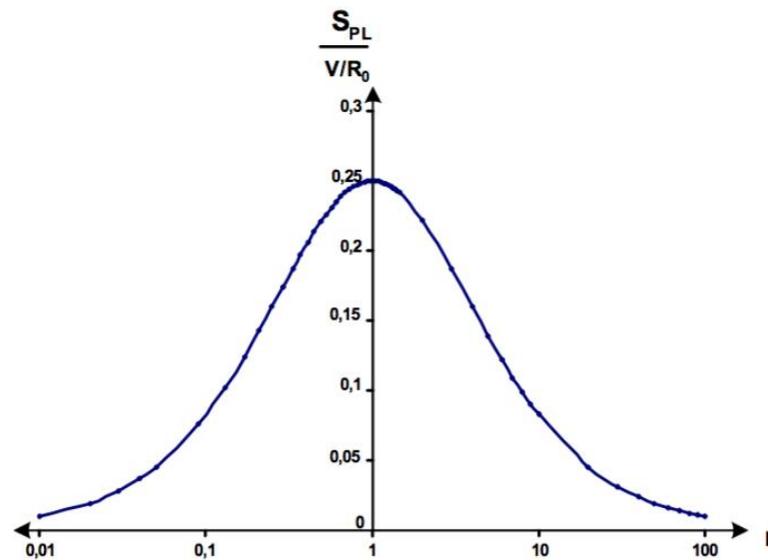
Além do erro de linearidade da saída de tensão elétrica da Ponte, outro fator que depende da sua razão característica é a sensibilidade de saída. Por definição, a sensibilidade de saída é a razão entre a variação da saída de tensão elétrica em função da variação da resistência elétrica do sensor conectado à Ponte, (BALBINOT, 2014). Dessa forma, a sensibilidade da Ponte pode ser calculada através da Equação (14):

$$S_{out_linearizado} = \frac{dV_{out_linearizado}}{dR_x} = \frac{V_{ref}}{R_0} \cdot \frac{r}{(r+1)^2} \quad (14)$$

onde $S_{out_linearizado}$ é a sensibilidade de saída de tensão elétrica da Ponte linearizada, em $[V/\Omega]$, $V_{out_linearizado}$ é a saída de tensão elétrica da Ponte linearizada, em $[V]$, R_x é a resistência elétrica do extensômetro, em $[\Omega]$, R_0 é a resistência elétrica nominal do extensômetro, em $[\Omega]$, V_{ref} é a tensão elétrica de referência, em $[V]$ e r é a razão característica da Ponte, em $[\Omega/\Omega]$.

Percebe-se, através da Equação (14) que a sensibilidade da Ponte é dependente apenas da tensão elétrica de referência que alimenta o circuito, da resistência elétrica do extensômetro quando não há deformação e da razão característica da Ponte. A Figura 10 apresenta a curva da sensibilidade normalizada da Ponte em função da razão característica.

Figura 10 - Sensibilidade normalizada da Ponte em função da razão característica.



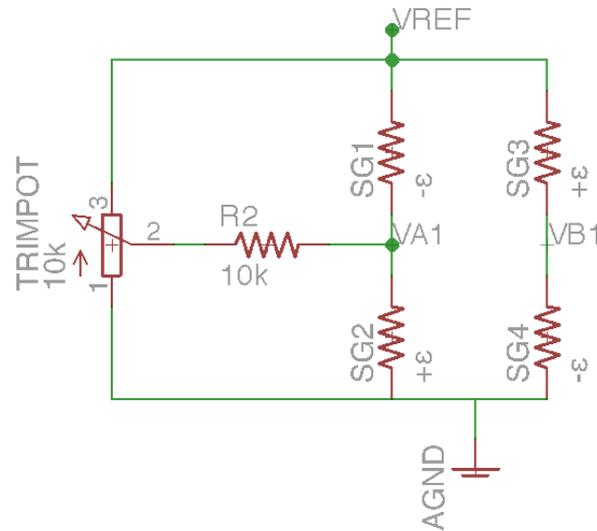
Fonte: Adaptado de (GARCÍA *et al.*, 2008).

Pela Figura 10, pode-se perceber que a sensibilidade da Ponte apresenta seu valor máximo para uma razão característica unitária, contudo, como é apresentado na Figura 9, nota-se que quanto mais próximo de um é a razão característica, maior é o erro de linearidade. Sendo assim, de acordo com o projeto, e o limite de deformação máximo da célula de carga, deve-se adequar o valor de r (GARCÍA *et al.*, 2008).

Para alimentação da Ponte de *Wheatstone*, deve-se utilizar um circuito de referência de tensão elétrica, já que pela Equação (12), nota-se que a tensão de saída da Ponte é diretamente proporcional à tensão elétrica de alimentação. Dessa forma, variações na fonte de tensão elétrica geram variações proporcionais na saída, o que é indesejável.

Sugere-se que a Ponte seja composta apenas por extensômetros, se possível, ativos. Ao utilizar-se quatro extensômetros ativos (configuração de Ponte completa), ligados na configuração apresentada na Figura 11, aumenta-se a sensibilidade em quatro vezes, em relação à configuração apresentada na Figura 7. A Equação (15) apresenta a saída de tensão elétrica de uma Ponte completa. Além disso, se todos os extensômetros forem de um mesmo lote (a caracterização de extensômetros de qualidade é feita por lote, onde são definidas todas as características, como Fator *Gage*, deformação aparente, entre outras) e estiverem cimentados no mesmo material, todos serão expostos à mesma temperatura ambiente, e, por consequência variações na temperatura ambiente causarão variações equivalentes de resistência elétrica de todos os extensômetros, e a tensão elétrica de saída da Ponte permanecerá constante, ou seja, não será função da temperatura (BALBINOT, 2011).

Figura 11 - Esquemático de uma Ponte completa com circuito de ajuste de zero.



$$V_{out} = V_{a1} - V_{b1} = V_{ref} \cdot \frac{(R + \Delta R) - (R + \Delta R)}{(R + \Delta R) + (R - \Delta R)} = V_{ref} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (15)$$

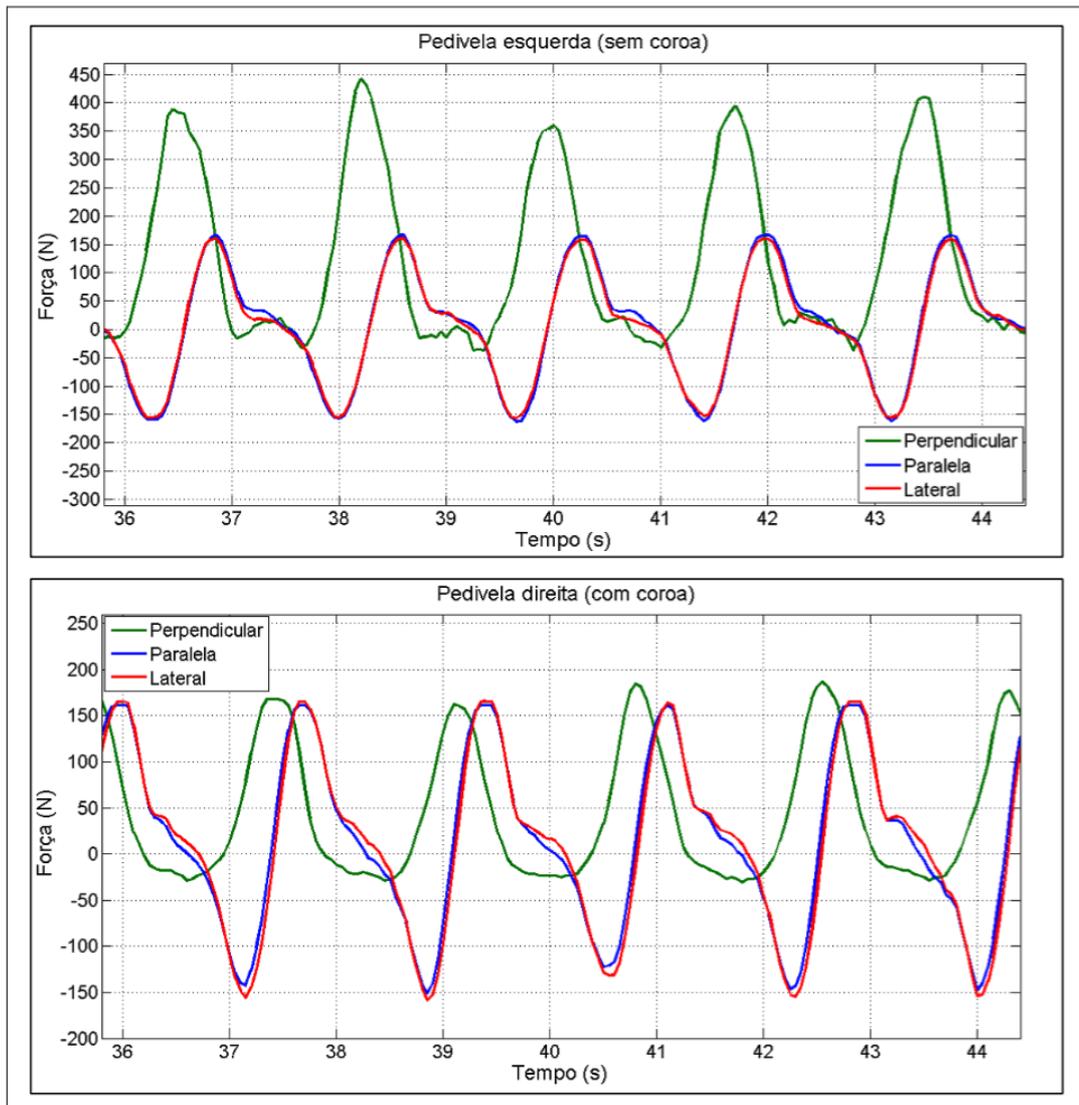
Por fim, a saída da Ponte pode ser ligada à amplificadores operacionais de instrumentação, cujas entradas tem impedância suficientemente alta para não influenciar na saída de tensão elétrica da Ponte. Uma vez que a saída de tensão elétrica da Ponte é amplificada pelo amplificador de instrumentação, pode-se utilizar outros blocos de ganho, um filtro passas baixas (conhecido como filtro *anti-aliasing*) e um conversor analógico digital para adquirir o sinal e levantar as curvas de transferência, para, finalmente, possibilitar a aplicação do sinal na função de transferência, e obter, como saída, do sistema completo, a carga aplicada na célula de carga (BALBINOT, 2014).

2.4 Análise da força aplicada no pedal através do pedivela instrumentado

Uma das formas de medir a força aplicada ao pedal, pelo ciclista, é através da análise das forças atuantes no pedivela. Dessa forma, implementa-se a célula de carga no pedivela, e, através das deformações geradas pelos esforços transmitidos através do pedal, mede-se as forças atuantes nos braços do pedivela. De acordo com NASCIMENTO (2014), é possível analisar a eficiência da técnica do ciclista durante o movimento de pedalada através da aquisição de dados da célula das células de carga (pedivelas). Por esse motivo, NASCIMENTO (2014) desenvolveu uma plataforma de força através de um pedivela instrumentado, e utilizou o sistema de transmissão sem fio via *bluetooth*, desenvolvido por

MILANI (2014), para transmissão de dados, com o objetivo de medir as três componentes de força (perpendicular, paralela e lateral) aplicadas pelo ciclista durante a pedalada. A Figura 12 apresenta os resultados de um ensaio em ambiente externo conduzido pelo autor e um ciclista amador.

Figura 12 - Componentes de força aplicadas pelo ciclista durante ensaio em ambiente externo.



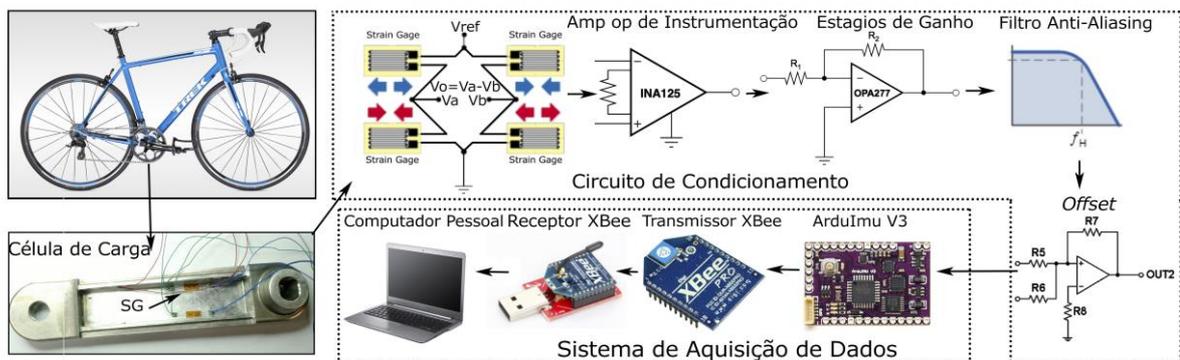
Fonte: Adaptado de (NASCIMENTO, 2014).

Pela análise das curvas apresentadas na Figura 12, nota-se uma assimetria média de aproximadamente 220% entre a força aplicada pela perna direita, na direção perpendicular, e a aplicada pela esquerda, na mesma direção.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados detalhadamente todos os aspectos de desenvolvimento da célula de carga (denominada de pedivela), assim como, simulações, testes, procedimentos experimentais de validação e todas as informações necessárias para a compreensão dos resultados apresentados no Capítulo 4. Para facilitar a compreensão deste trabalho, a Figura 13 apresenta o diagrama de blocos do sistema proposto.

Figura 13 - Diagrama de blocos do Sistema proposto.



O sistema proposto na Figura 13 é composto por uma célula de carga fabricada em Alumínio, cujos extensômetros e o circuito de condicionamento são armazenados internamente, um conjunto de baterias, um microcontrolador com conversor A/D integrado, para digitalizar os sinais, e, por fim, um transmissor e receptor *XBee*, conectados via porta USB a um computador pessoal, responsável por armazenar os dados coletados.

Dessa forma, a força aplicada no pedal é diretamente transmitida ao pedivela, que, por sua vez, se deforma linearmente, causando uma variação na dimensão dos extensômetros, os quais variam sua resistência elétrica, causando um desbalanceamento na Ponte de *Wheatstone*. A tensão elétrica de saída da Ponte é medida pelo sistema de condicionamento.

Posteriormente, utiliza-se os conversores A/D internos da plataforma de desenvolvimento ArduÍmu para digitalizar o sinal, que é enviado ao computador via comunicação sem fio de 2,4GHz, através do sistema de comunicação *XBee*.

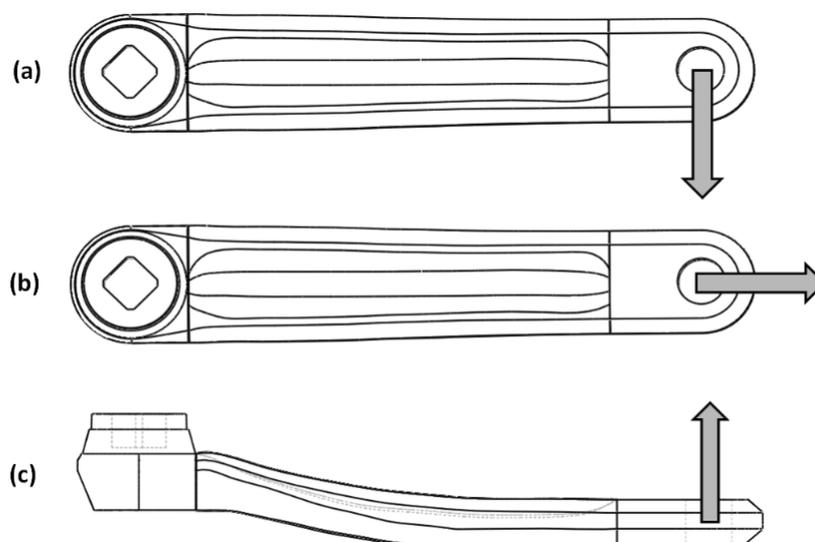
3.1 Desenvolvimento da Célula de Carga

Esse capítulo versa sobre o procedimento experimental realizado para o projeto mecânico da célula de carga, assim como, a usinagem, instrumentação, e validação da mesma.

3.1.1 Procedimento de análise estrutural da célula de carga comercial

A partir do modelo 3D virtual do pedivela comercial da *Full Speed Ahead*, modelo Vero FSA CK-602 175mm, anteriormente desenvolvido por NASCIMENTO (2014), no *software* SolidWorks 2012, realizaram-se simulações estáticas e dinâmicas com aplicação de cargas na direção perpendicular, paralela e lateral, referenciadas ao eixo do pedivela, conforme apresentado na Figura 14. Essas simulações possibilitam analisar as deformações mecânicas no pedivela para valores de cargas compreendidos no regime de operação da mesma – movimento de pedalada de um ciclista com massa de até 75kg (limite imposto pela disponibilidade de pesos padrão para realização do ensaio estático de levantamento das funções de transferência de deformação experimentais). O pedivela comercial utilizado como modelo é apresentado na Figura 15 e seu modelo virtual encontra-se na Figura 16. As referências apresentadas na Figura 14 ilustram a direção e sentido das forças convencionadas e adotadas nesse projeto; o sentido da seta representa o lado positivo do eixo de aplicação da força.

Figura 14 - Direção das componentes de força aplicadas no pedivela: (a) perpendicular, (b) paralela e (c) lateral.

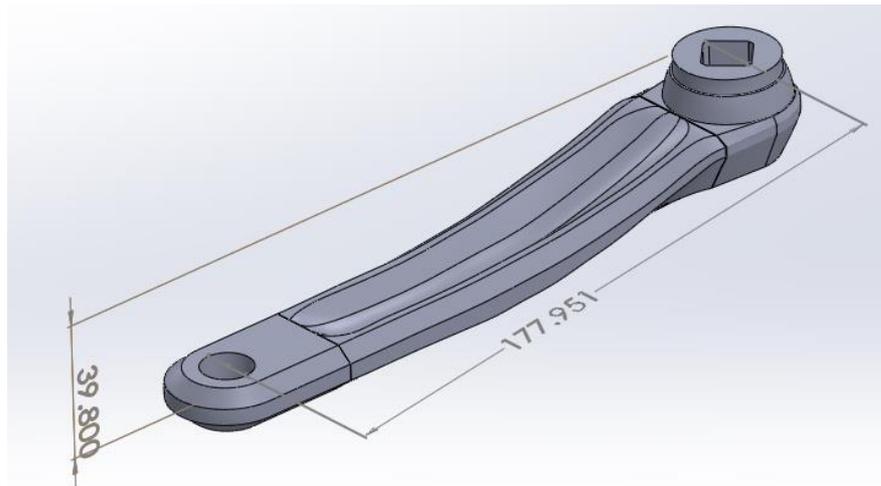


Fonte: Adaptado de (NASCIMENTO, 2014).

Figura 15 - Foto do pedivela FSA VERO CK-602 6061 T6.



Figura 16 - Modelo virtual do pedivela comercial FSA VERO CK-602 6061 T6.



Dessa forma, utilizando-se a ferramenta de simulação SolidWorks™ 2015 e o modelo computacional da célula de carga, engastou-se o pedivela na parte inferior (conforme apresentado na Seção 4), de forma semelhante à forma utilizada na aplicação, e aplicou-se os valores de carga máximos de 75kg para o eixo perpendicular, já que as forças aplicadas durante o movimento dificilmente ultrapassam o peso do ciclista (SMAK *et al.*, 1999; SANDERSON *et al.*, 2000), e de 30kg para os eixos lateral e paralelo, considerando que, para experimentos anteriores, fora observado que a força lateral não ultrapassa o valor de 1/3 do peso total do ciclista (NASCIMENTO, 2014). A partir dos resultados obtidos na simulação, estipulou-se os limites máximos de deformação desejados na célula de carga à ser projetada.

É importante ressaltar que a limitação de peso do atleta em 75kg foi definida apenas para a determinação das funções de transferência e cálculo dos ganhos de tensão elétrica do condicionador de sinais, já que esse é o máximo valor de carregamento possível para os pesos padrão disponíveis no laboratório. No entanto, projetou-se a estrutura mecânica para suportar um atleta com peso de 100kg, de forma que o fator de segurança, em qualquer região de deformação, tenha valor igual ou a 2.

3.1.2 Definição das dimensões da célula de carga experimental

Com objetivo de possibilitar mesma ergonomia e acoplamento mecânico, considerando a coroa, caixa de movimento central e pedal, de um pedivela padrão, na célula de carga em desenvolvimento, utilizou-se ambos os pedivelas comerciais apresentados na Figura 15 e o modelo computacional da Figura 16 como referência dimensional. Dessa forma, utilizando-se a ferramenta *measure* do SolidWorks™ 2015, e um paquímetro com resolução de 0,02mm, efetuou-se todas as medidas das dimensões principais do pedivela comercial, de forma a aplicá-las no novo projeto. Em sequência, mediu-se os diâmetros e profundidades dos furos de acoplamento mecânico; com auxílio de um pente de rosca e de um micrômetro. Com esse procedimento, determinou-se o passo e o tipo das roscas presentes nos pontos de fixação.

Posteriormente, definiu-se as dimensões desejadas do compartimento interno da célula de carga, para abrigar os extensômetros e o circuito de condicionamento, com base nas placas de circuito impresso desenvolvidas em um projeto financiado pelo CNPq (BALBINOT, *et al.*, 2015).

A partir do modelo virtual da célula de carga comercial, analisou-se a área de seção transversal nos pontos de maior esforço, e definiu-se o resultado como valor mínimo a ser utilizado no projeto, com o objetivo de manter as deformações e tensões mecânicas da nova peça equivalentes ou inferiores aos obtidos no pedivela comercial, de forma que, para um mesmo material de construção, Alumínio 6061 T6, a célula de carga projetada apresente uma resistência mecânica equivalente à comercial, e conseqüentemente, adequada para a aplicação.

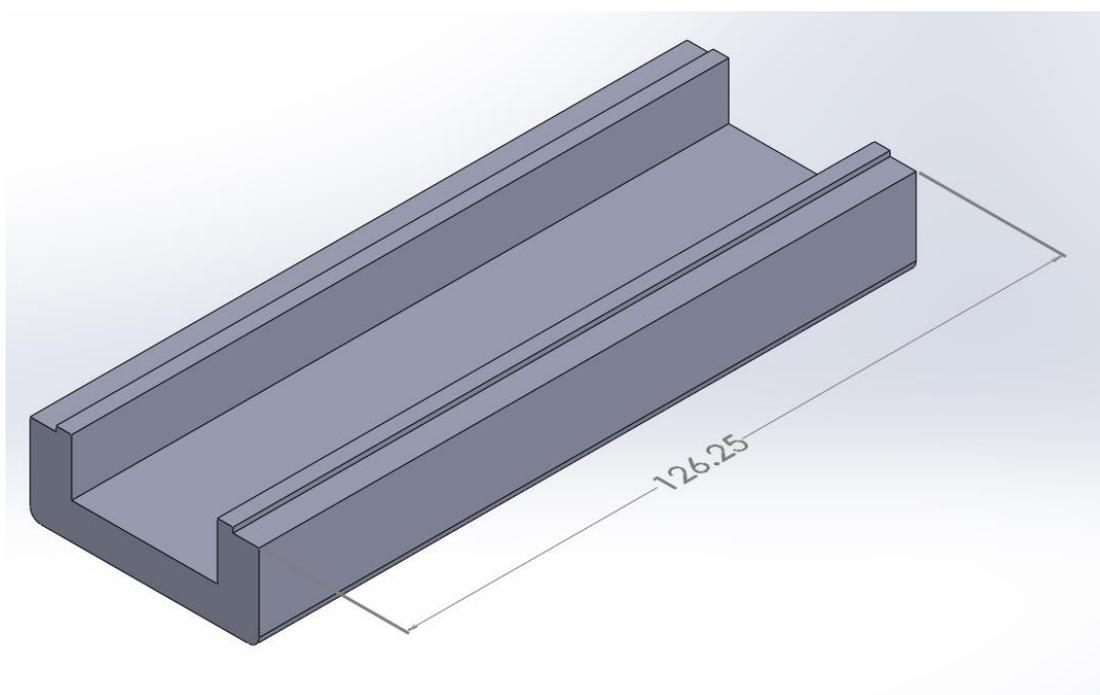
Para que a célula de carga apresente uma deformação linear com a aplicação de carga, e com objetivo principal de facilitar o processo de usinagem, eliminou-se as curvas e assimetrias apresentadas nos pedivelas comerciais, sobretudo, as apresentadas no pedivela utilizado como referência (LAZZARI, 2010). Dessa forma, o perfil ao qual são aplicados os

extensômetros, parte que apresenta as deformações à serem medidas, foi projetado com perfil simétrico.

3.1.3 Procedimento de modelagem virtual da célula de carga

A partir das definições e medições realizadas na Seção 3.1.2, realizou-se a modelagem computacional das células de carga através do *software* SolidWorks™ 2015. Primeiramente desenhou-se a parte central da peça que comportará os extensômetros, devidamente posicionados e cimentados, e o circuito condicionador. Como proposto, esse segmento foi projetado com perfil simétrico e sem curvaturas. Para ambos os pedivelas, a parte central é a mesma e a vista isométrica pode ser visualizada na Figura 17. As medidas referentes ao perfil são apresentadas na Figura 18.

Figura 17 - Modelagem do perfil central da peça: vista isométrica, medida em milímetros (mm).



Posteriormente, realizou-se a modelagem da parte inferior da célula de carga esquerda, responsável pelo acoplamento mecânico entre o eixo da caixa central da bicicleta e o pedivela. Para essa parte, utilizou-se as dimensões de furação e acoplamento com eixo central obtidas através das medidas do pedivela comercial e as dimensões da parte central, apresentada anteriormente na Figura 18. As vistas do modelo computacional da parte inferior do pedivela esquerdo são apresentadas na Figura 19 à Figura 21.

Figura 18 - Corte transversal do perfil central do pedivela: medidas em milímetros (mm).

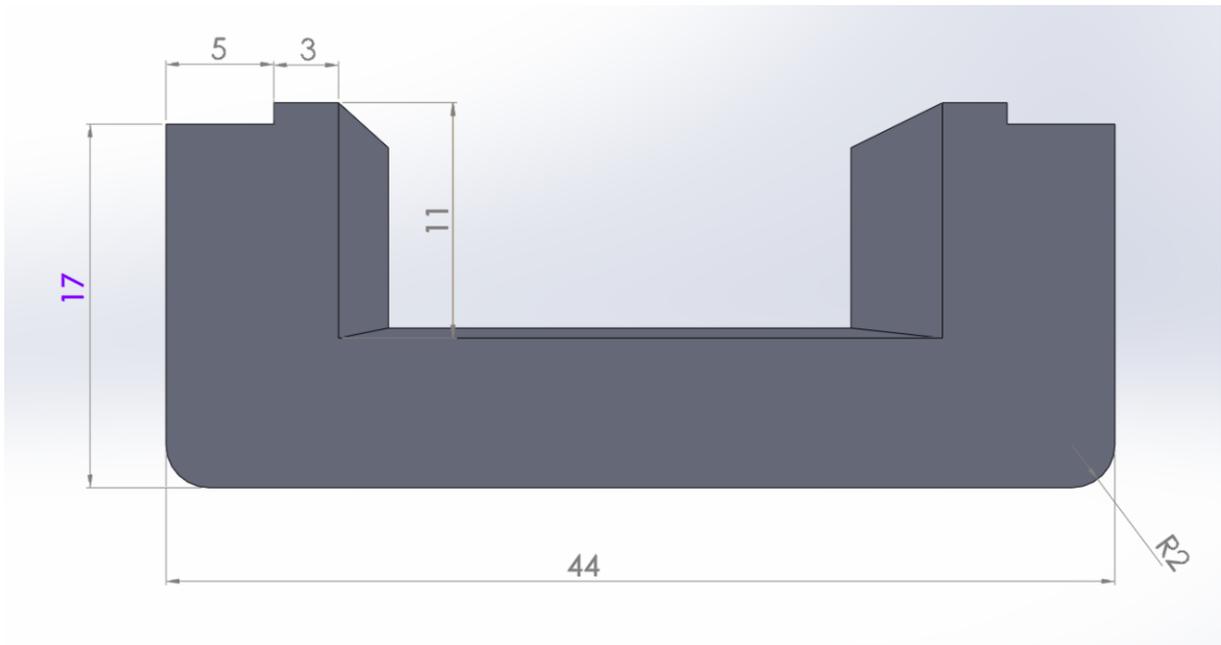


Figura 19 - Parte inferior do pedivela esquerdo: vista isométrica.

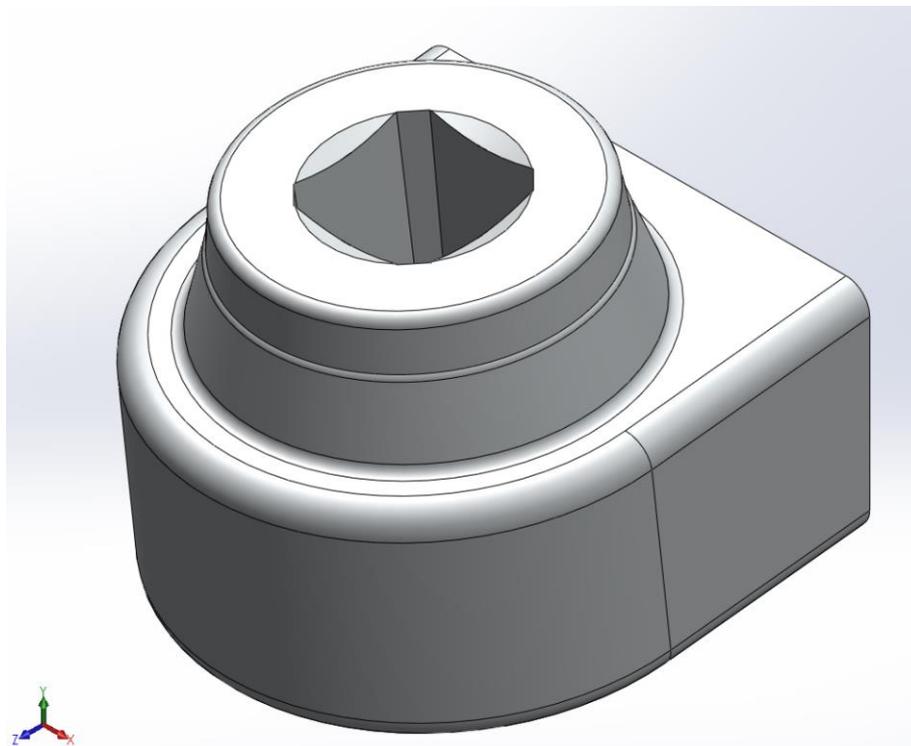


Figura 20 - Parte inferior do pedivela esquerdo: vista lateral.

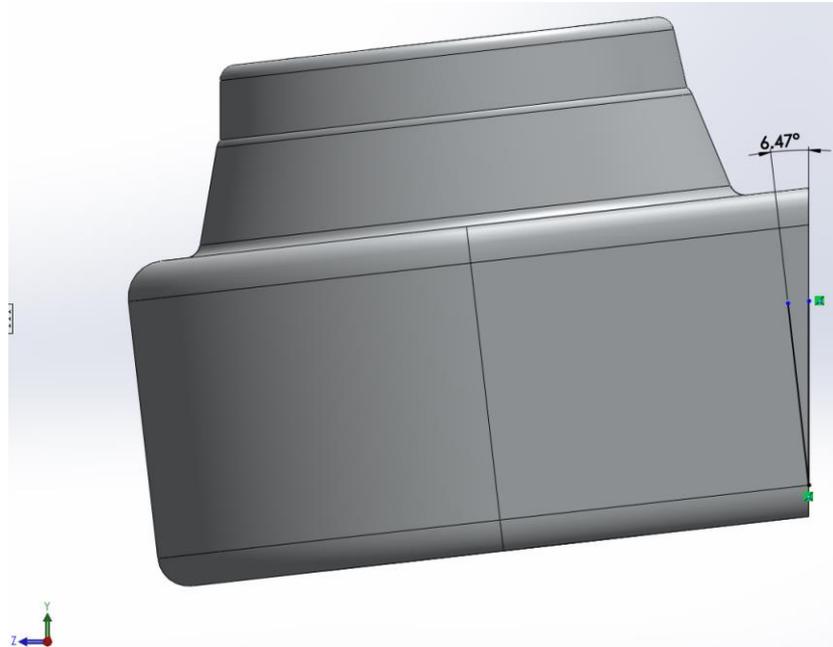
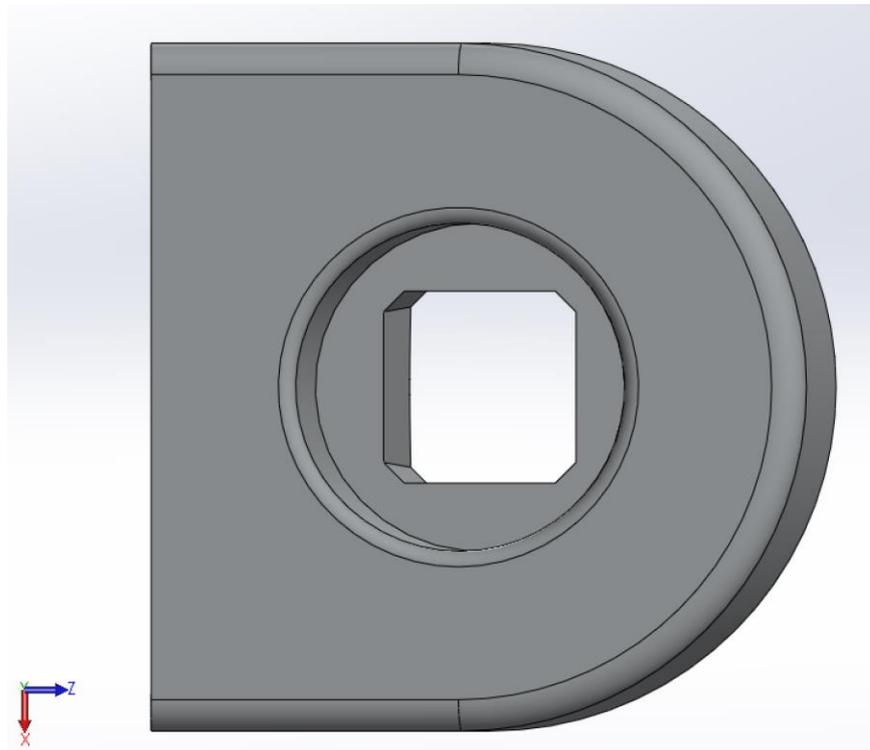


Figura 21 - Parte inferior do pedivela esquerdo: vista superior.



Em sequência, realizou-se a modelagem da parte inferior da célula de carga direita, responsável pelo acoplamento mecânico entre o eixo da caixa central da bicicleta, o pedivela e a coroa. Para essa parte, utilizou-se as dimensões de furação, acoplamento com eixo central

e coroa obtidas através das medidas do pedivela comercial e as dimensões da parte central, apresentada anteriormente na Figura 18. As vistas do modelo computacional da parte inferior do pedivela direito são apresentas na Figura 22 à Figura 25.

Figura 22 - Parte inferior do pedivela direito: vista isométrica.

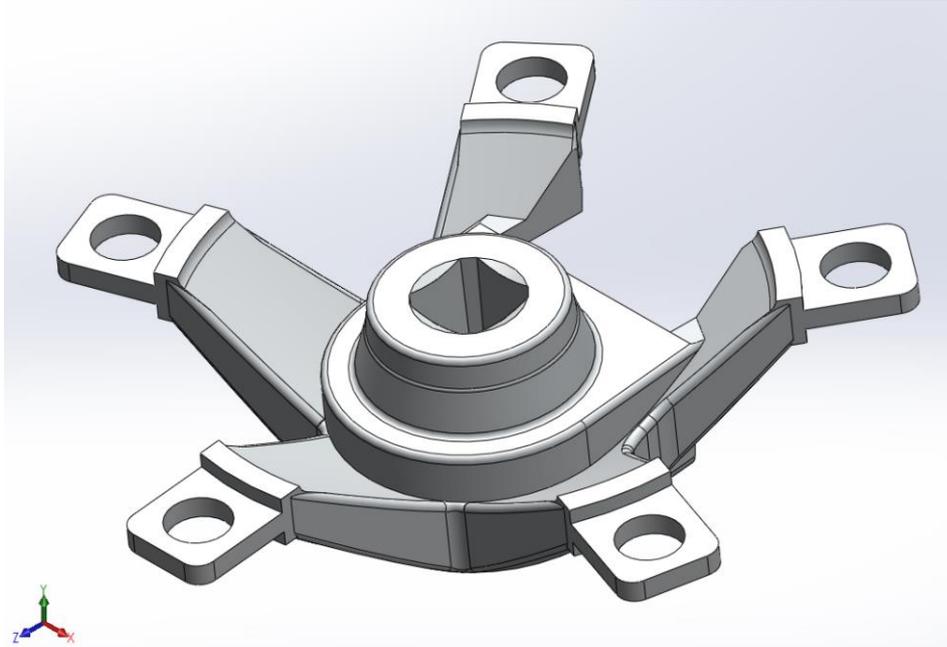


Figura 23 - Parte inferior do pedivela direito: vista superior.

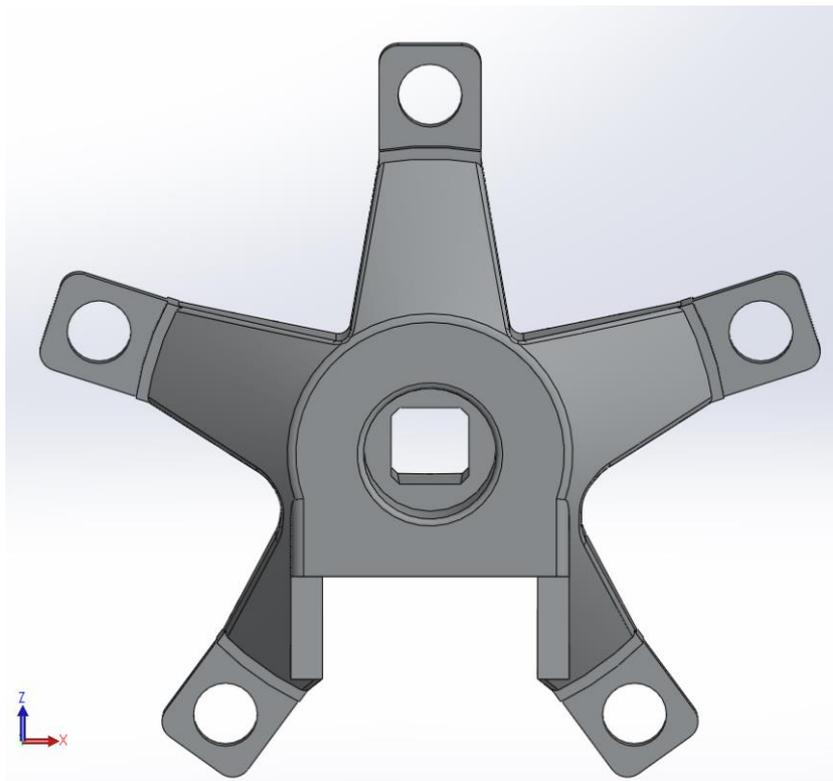


Figura 24 - Parte inferior do pedivela direito: vista frontal.

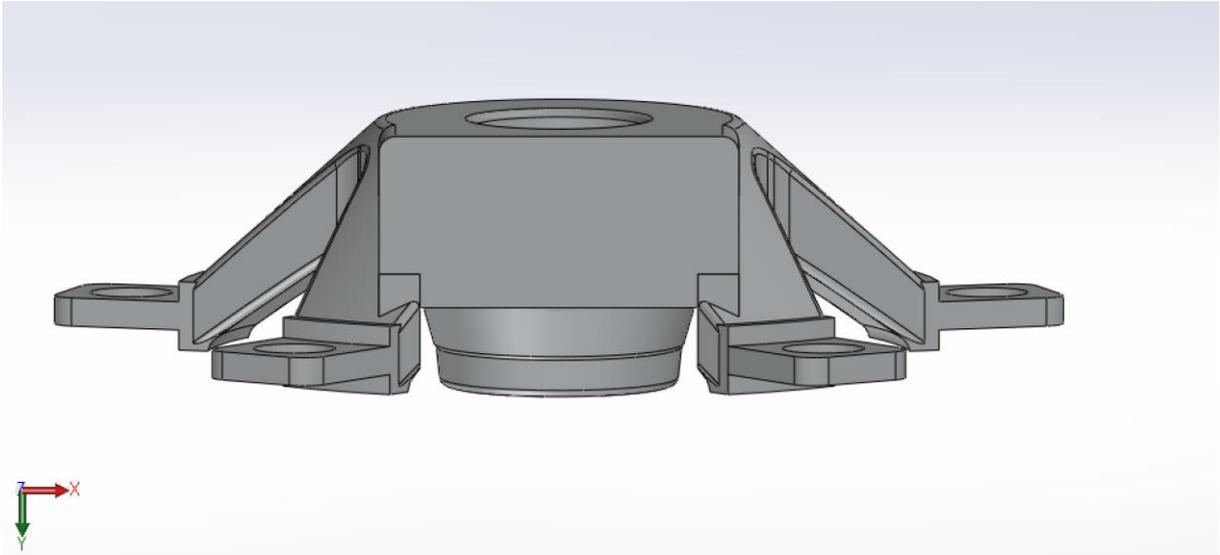
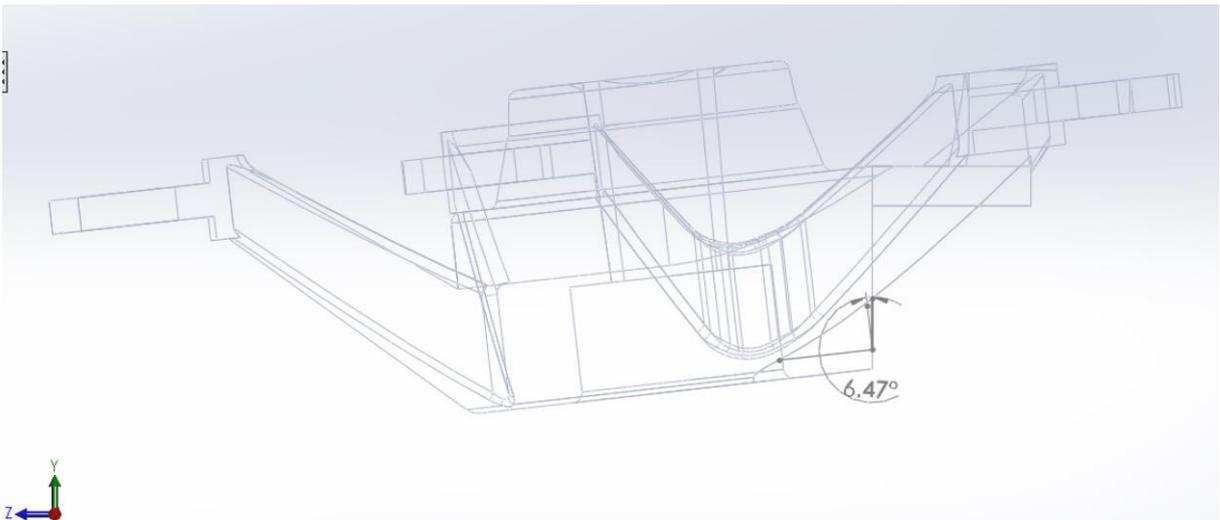


Figura 25 - Parte inferior do pedivela direito: vista lateral.



Por fim, seguindo os mesmos procedimentos realizados nas peças anteriormente citadas, realizou-se a modelagem da parte superior das células de carga, responsável pelo acoplamento mecânico entre o eixo do pedal da bicicleta e o pedivela. Para essa parte, utilizou-se as dimensões de furação, acoplamento com pedal, furação e roscas obtidas através das medidas do pedivela comercial, apresentado anteriormente na Figura 18. As vistas do modelo computacional da parte superior de ambos os pedivelas são apresentadas na Figura 26 a Figura 28.

Figura 26 - Parte superior dos pedivelas direito e esquerdo: vista isométrica.

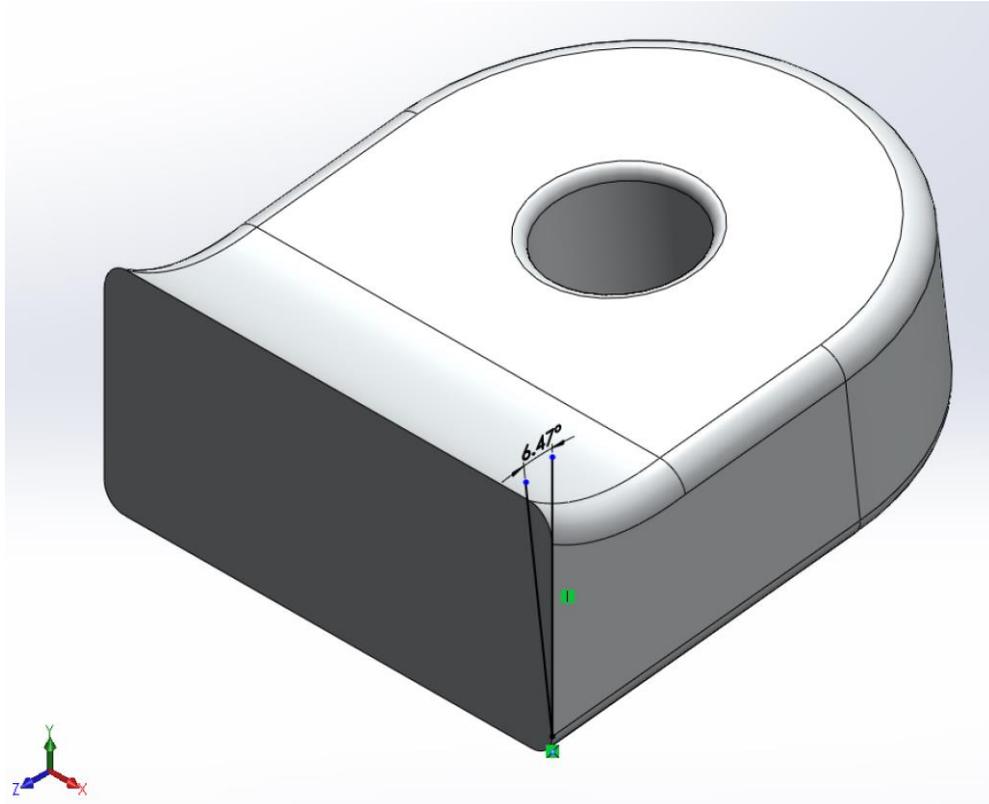


Figura 27 - Parte superior dos pedivelas direito e esquerdo: vista lateral.

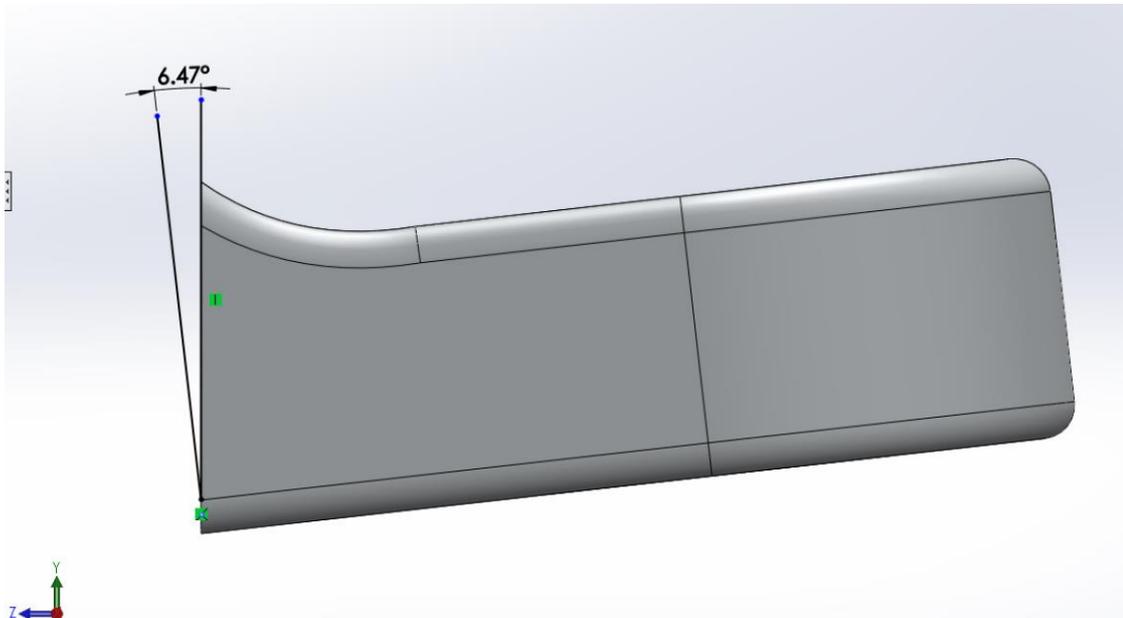
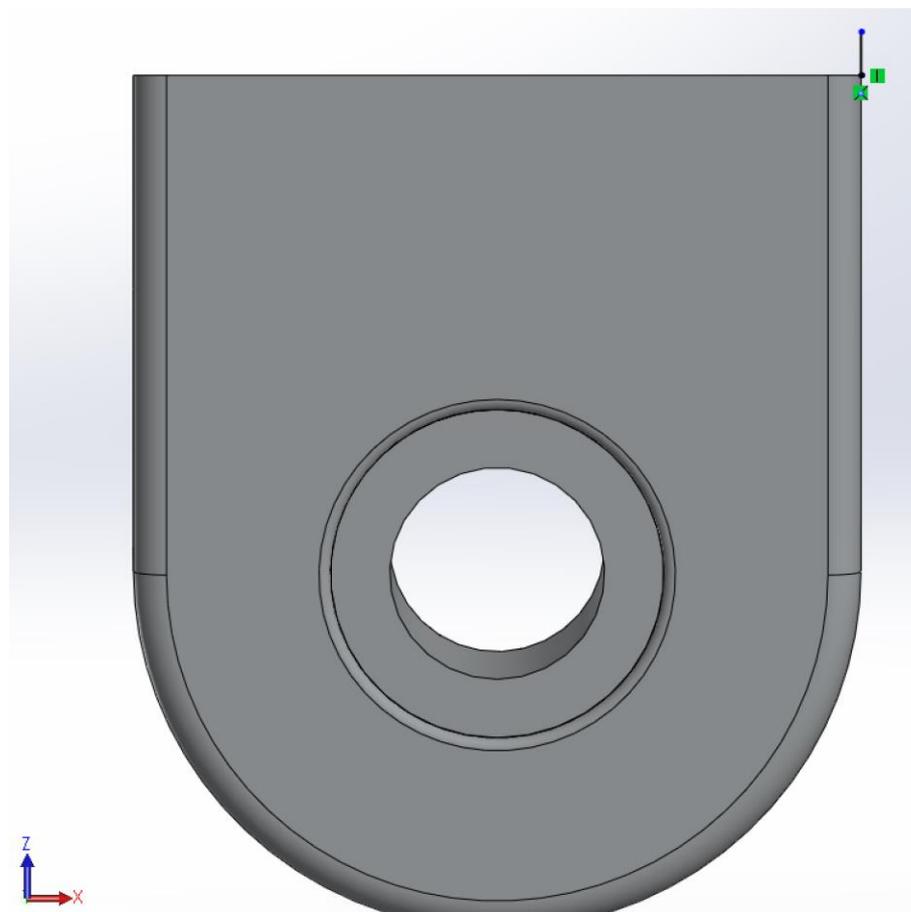


Figura 28 - Parte superior dos pedivelas direito e esquerdo: vista superior.



Nota-se que em ambas as partes inferiores e superiores apresentadas – pedivela esquerdo e direito, existe um ângulo de $6,47^\circ$ entre o plano no qual ocorre a interligação com a parte central da célula de carga e o eixo normal à superfície superior do pedivela. Esse ângulo foi assim definido para obter-se a mesma ergonomia e a mesma distância medida entre o quadro e o pedivela apresentada no modelo comercial da *FSA* (utilizado como referência). Dessa forma ao fixar-se o pedal ao pedivela experimental, tem-se a mesma distancia entre o pedal e o quadro da bicicleta que ter-se-ia utilizando-se o pedivela comercial.

Em sequência, definidas e modeladas todas as partes de ambos os pedivelas, utilizou-se a ferramenta *assembly* do SolidWorks™ 2015 para gerar um novo sólido no qual as partes são, efetivamente, interligadas, através de pontos de referência estabelecidos em cada parte anteriormente citada e a peça final é montada. Dessa forma, efetuou-se a montagem dos pedivelas esquerdo, apresentado na Figura 29 e Figura 30, e direito, representado pela Figura 31 e Figura 32.

Figura 29 - Pedivela esquerdo: vista isométrica inferior.

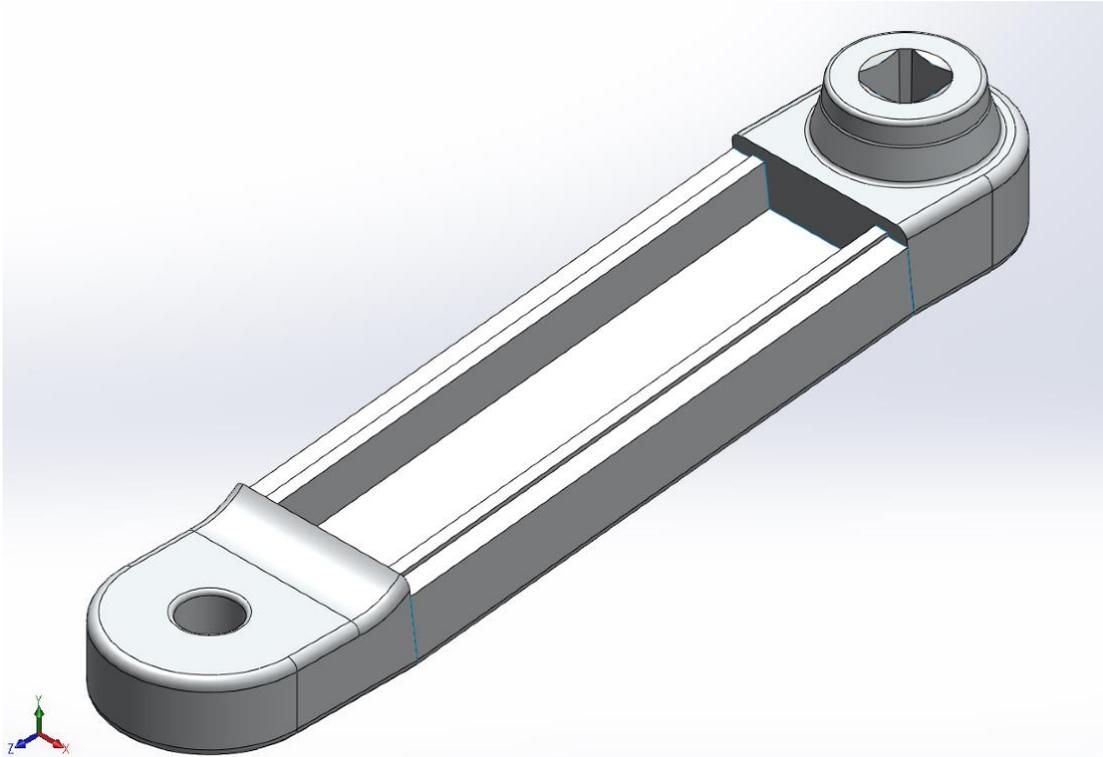
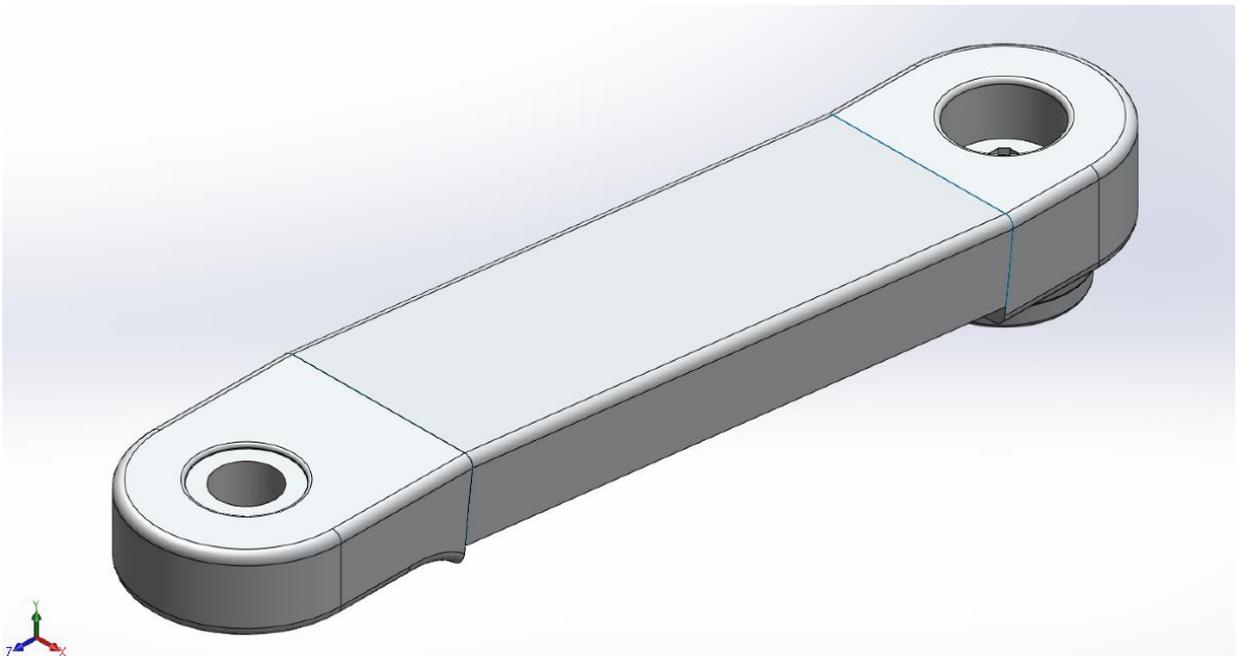


Figura 30 - Pedivela esquerdo: vista isométrica superior.



As dimensões referentes à cada célula de carga desenvolvida são apresentadas no Anexo A e B.

Figura 31 - Pedivela direito: vista isométrica superior.

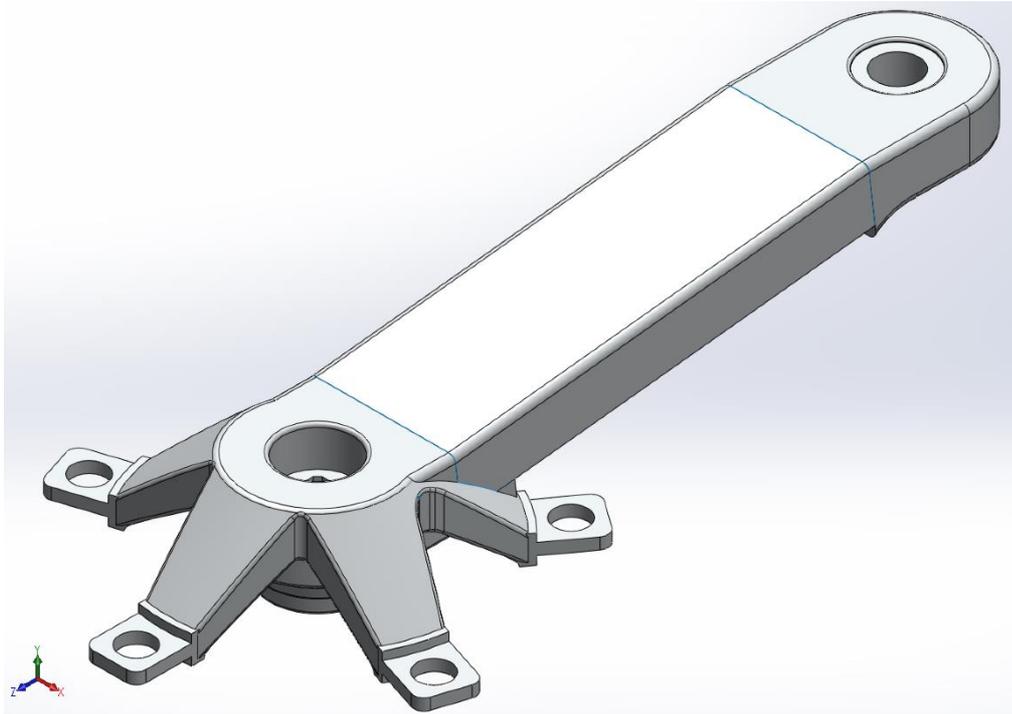
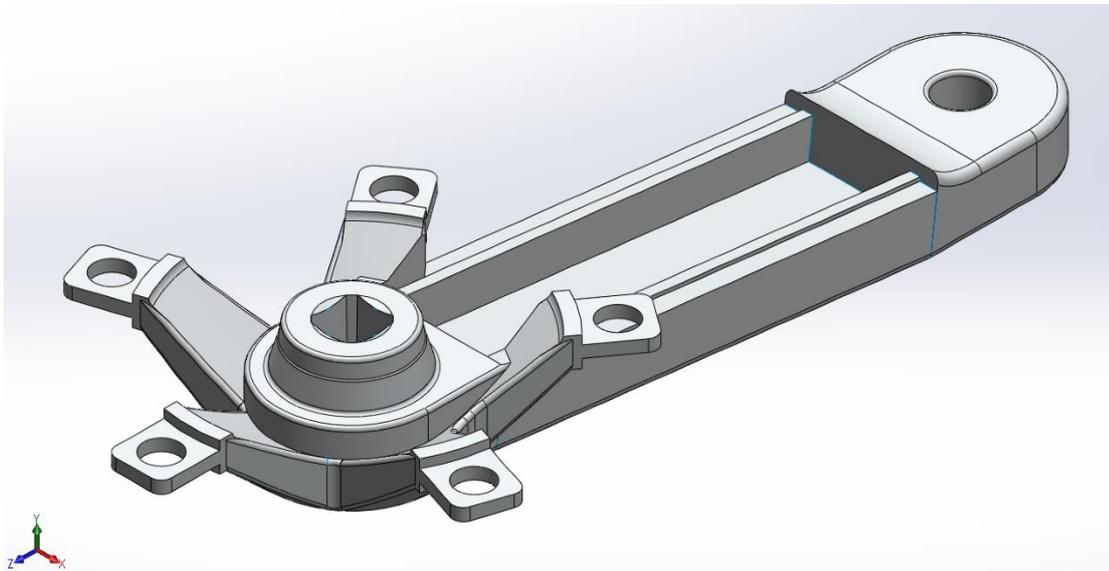
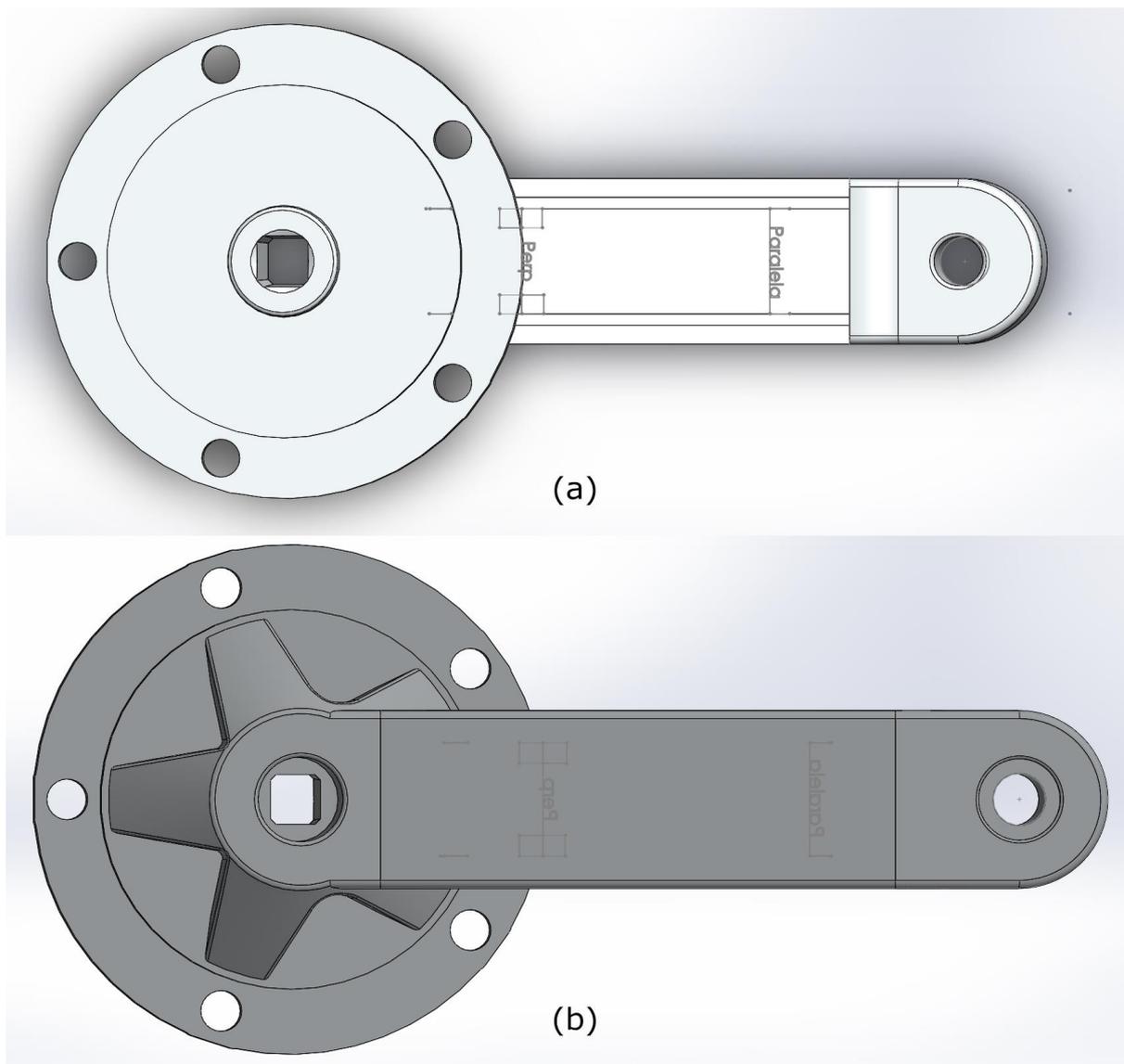


Figura 32 - Pedivela direito: vista isométrica inferior.



Devido ao processo de fabricação adotado (usinagem de um bloco de alumínio 6082 T6 em centro de usinagem CNC de 3 eixos), tornou-se necessário realizar algumas modificações nas dimensões do pedivela direito. O modelo virtual da célula de carga experimental fabricada é apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Modelo virtual do pedivela experimental fabricado: (a) vista inferior e (b) vista superior.



Dessa forma, a partir desta parte desse trabalho, todas as análises e simulações computacionais são realizadas com base no modelo virtual apresentado na Figura 33. As dimensões do pedivela direito experimental são apresentadas no ANEXO C.

3.1.4 Procedimento de análise estrutural da célula de carga projetada

A partir do modelo 3D do pedivela desenvolvido e apresentado na Seção 3.1.3, através da ferramenta de simulação SolidWorks 2015, definiu-se o Alumínio 6061 T6 como o material de construção do protótipo. Realizaram-se simulações estáticas com aplicação de cargas na direção perpendicular, paralela e lateral, referenciadas ao eixo do pedivela, conforme apresentado na Figura 14, e analisou-se as deformações mecânicas no modelo da

célula de carga experimental para valores de cargas compreendidos no regime de operação da mesma (movimento de pedalada de um ciclista com massa de 75kg).

Em seguida, realizou-se a simulação dinâmica, com objetivo de obter-se as frequências de ressonância do pedivela e compará-las com as frequências naturais experimentais, visto que, se algum dos modos ressonantes naturais coincidir com as frequências das oscilações do sistema, a medida pode ser influenciada, ou, em casos mais graves danificar ou destruir a célula de carga. Dessa forma, a frequência de oscilação máxima da carga aplicada durante a operação deve estar abaixo do primeiro modo ressonante principal da célula de carga.

3.1.5 Usinagem e procedimento de cimentação dos extensômetros

Considerando-se o modelo computacional desenvolvido e apresentado na Seção 3.1.3 e as simulações de carregamento estático, apresentadas na Seção 3.1.4; definiu-se como material adequado à fabricação da peça o Alumínio da série 6000 com tratamento térmico T6, amplamente utilizado em peças destinadas ao ciclismo, devido as suas propriedades mecânicas. Por uma questão de disponibilidade no comércio local, optou-se pela liga 6082 T6, cujas propriedades mecânicas são equivalentes à liga 6061 T6, mesma utilizada no pedivela comercial abordado na Seção 3.1.1. As propriedades gerais da liga de Alumínio escolhida são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do Alumínio 6082 T6.

Propriedade Mecânica	Módulo	Unidades (S.I)
Modulo elástico	69	GPa
Coefficiente de Poisson	0,33	Sem unidade
Modulo de cisalhamento	310	MPa
Massa especifica	2,7	g/cm ³
Resistencia à tração	310	MPa
Limite de escoamento	260	MPa
Coefficiente de expansão térmica	0,000024	/K
Condutividade térmica	180	W/(m.K)
Calor especifico	896	J/(Kg.K)

Fonte: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6082-T6-Extrusions_338.ashx.

A partir das dimensões externas de cada célula de carga, em conjunto com a empresa escolhida para realização da usinagem, definiu-se os tamanhos dos blocos de Alumínio necessários para confecção das peças, estes, maiores do que as dimensões finais do pedivela, devido a área necessária para fixação das mesmas na base do centro de usinagem. Sendo assim, providenciou-se dois blocos de Alumínio de liga 6082 T6 com as dimensões apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões externas dos blocos de Alumínio pré-usinagem.

Pedivela	Largura [mm]	Altura [mm]	Profundidade [mm]
Esquerdo	135	51	270
Direito	45	51	225

Utilizando-se os modelos computacionais das células de carga, ajustou-se as referências de cada peça de acordo com os utilizados pelo centro de usinagem de três eixos – CNC, e exportou-se os arquivos para o formato *parasolid*. Posteriormente, através do software *SurfCam*, produzido pela *Vero Software*, gerou-se a sequência de comandos utilizada pela fresadora para usinagem de cada uma das faces da peça. Dessa forma, cada lado de ambas peças foi usinado utilizando-se um passo de 0,1mm, e uma fresa esférica de 3mm de diâmetro para garantir acabamento satisfatório. A furação foi realizada nessa etapa. Na Figura 34 e Figura 35 são apresentadas algumas fotos das principais etapas do processo de usinagem. Para realização das roscas de fixação dos pedais foi necessária a fabricação de duas ferramentas, visto que as características das mesmas são exclusivas para a aplicação, e, dessa forma, não existem machos de corte prontos para o fresamento das mesmas no mercado nacional. As únicas ferramentas prontas encontradas são fabricadas pela empresa Norte Americana *ParkTool Co.*; em função da importação e prazos foi impossibilitado seu uso. Sendo assim, utilizando-se as medidas dos eixos de fixação do pedivela comercial, fabricou-se, em um torno CNC, dois machos de corte de aço inoxidável, apresentados na Figura 36, cujas características permitem a elaboração da rosca interna de 9/16 polegadas de diâmetro com passo 20 fios por polegada – 9/16” 20 TPI, um deles com rosca direita e outro com rosca esquerda. Em sequência, com o uso de um centro de usinagem convencional, fixou-se cada uma das peças na base da ferramenta, e utilizou-se as ferramentas fabricadas para realizar o rosqueamento interno para fixação do eixo do pedal em cada um dos pedivelas.

Figura 34 - Fotos do pedivela esquerdo em processo de usinagem: (a) realização da furação superior e (b) processo de usinagem da cavidade interna.

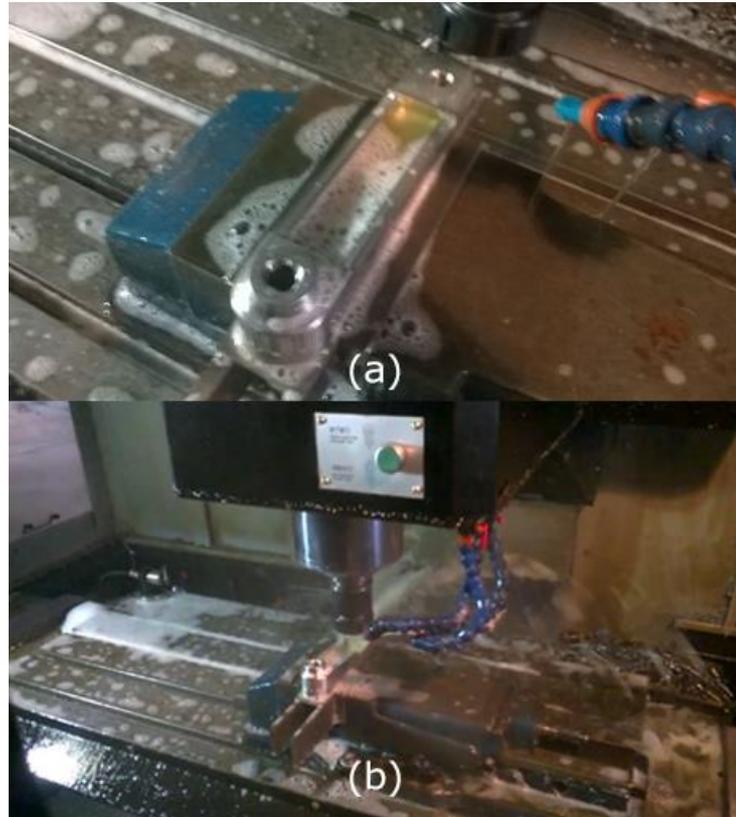


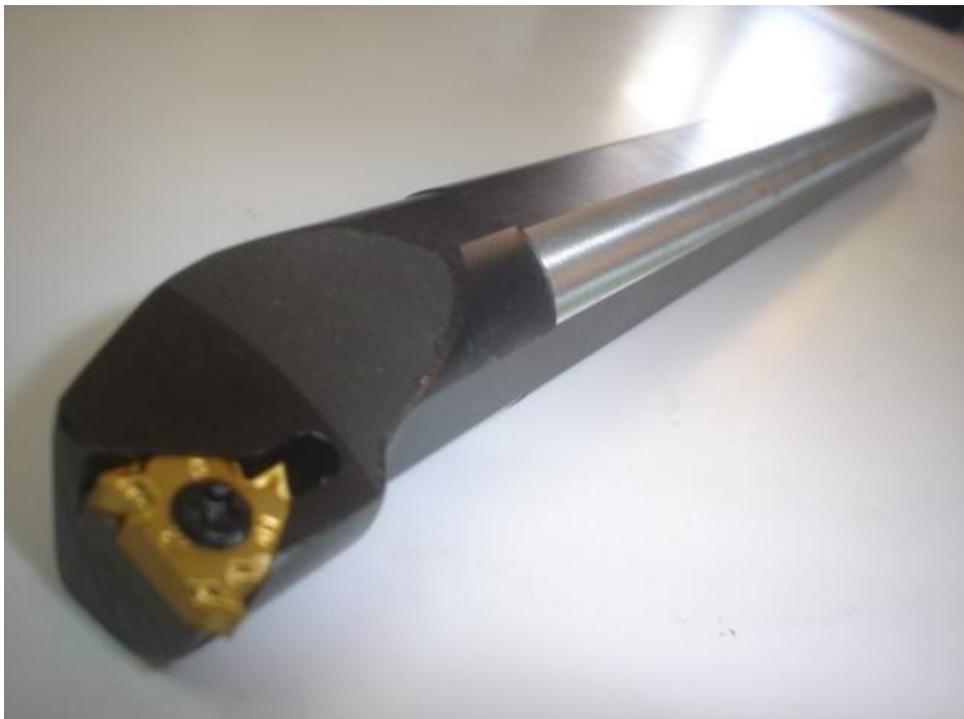
Figura 35 - Foto do pedivela direito em processo de usinagem: (a) etapa inicial da usinagem, bloco de Alumínio praticamente inteiro e (b) etapa intermediária de usinagem.



Figura 36 - Foto do macho de corte artesanal fabricado em aço inox.



Figura 37 - Foto da ferramenta para rosqueamento interno.



Por fim, utilizou-se a ferramenta apresentada na Figura 37 para usinar as roscas presentes no furo concêntrico à cavidade de acoplamento ao eixo da caixa central, presente no quadro da bicicleta, responsáveis pela fixação do extrator de pedivela. Por último, programou-

se o centro de usinagem CNC manualmente para fresar a rosca de 22mm de diâmetro, com passo de 1mm por volta.

A partir dos dados obtidos através da simulação estática apresentada na Seção 3.1.4, identificou-se as regiões de máxima deformação da célula de carga para cada eixo de aplicação de força. Definidos os locais, marcou-se os no desenho através da ferramenta *sketch* disponível do *software* SolidWorks, e mediu-se a posição exata de colagem dos extensômetros, conforme apresentado na Figura 38 e Figura 39.

Figura 38 - Posicionamento dos extensômetros do pedivela esquerdo.

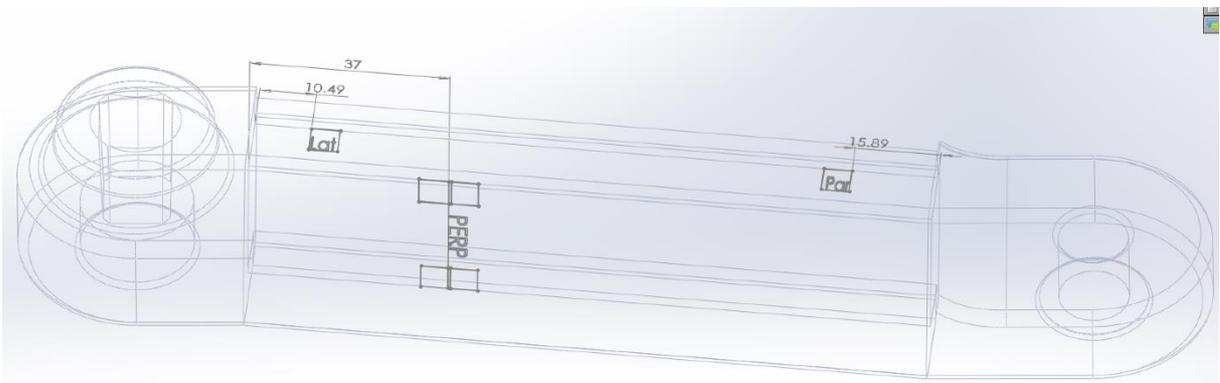
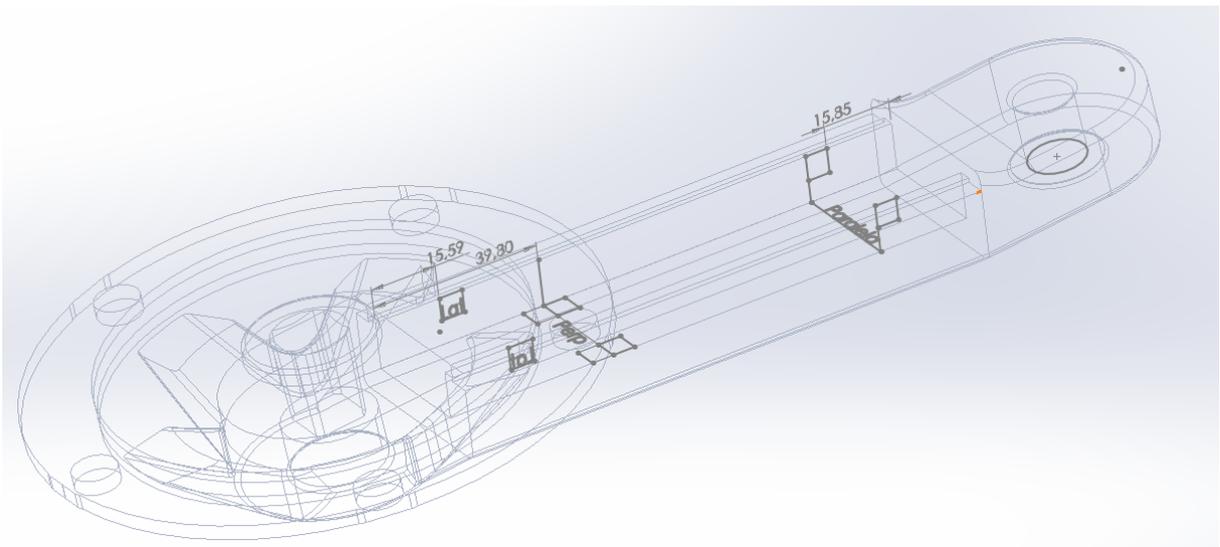


Figura 39- Posicionamento dos extensômetros do pedivela direito.



Posteriormente, com auxílio de um paquímetro, identificou-se nas peças as posições de cimentação dos extensômetros e realizou-se o preparo da superfície de colagem de acordo com os critérios rigorosos da área de instrumentação.

Logo em seguida, com a superfície da célula de carga mecanicamente preparada e descontaminada, utilizou-se o adesivo para cimentação modelo Z70, fabricado pela HBM e apropriado ao material da célula de carga e ao extensômetro selecionado, para cimentar os *strain gages* nos pontos anteriormente definidos. Todos os extensômetros utilizados no processo são fabricados pela HBM e são do modelo 1-LY13-1.5/350, cujos dados elétricos e mecânicos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Extensômetro HBM modelo 1-LY13-1.5/350.

Modelo	1-LY13-1.5/350
Lote	A903/10
Fator Gage (K)	1,94±0,0168
Resistencia Elétrica	350±0,704Ω
Sensibilidade Transversal	0,20%
Compensação de Temperatura	Alumínio
Coefficiente de Temperatura	23e-6/K
Coefficiente de Temperatura do fator Gage	101 ± 5,77[e-6/K]
a - Comprimento da Grelha	1,5mm
b - Largura da Grelha	1,2mm
c - Comprimento da Base	5,7mm
d - Largura da Base	4,7mm

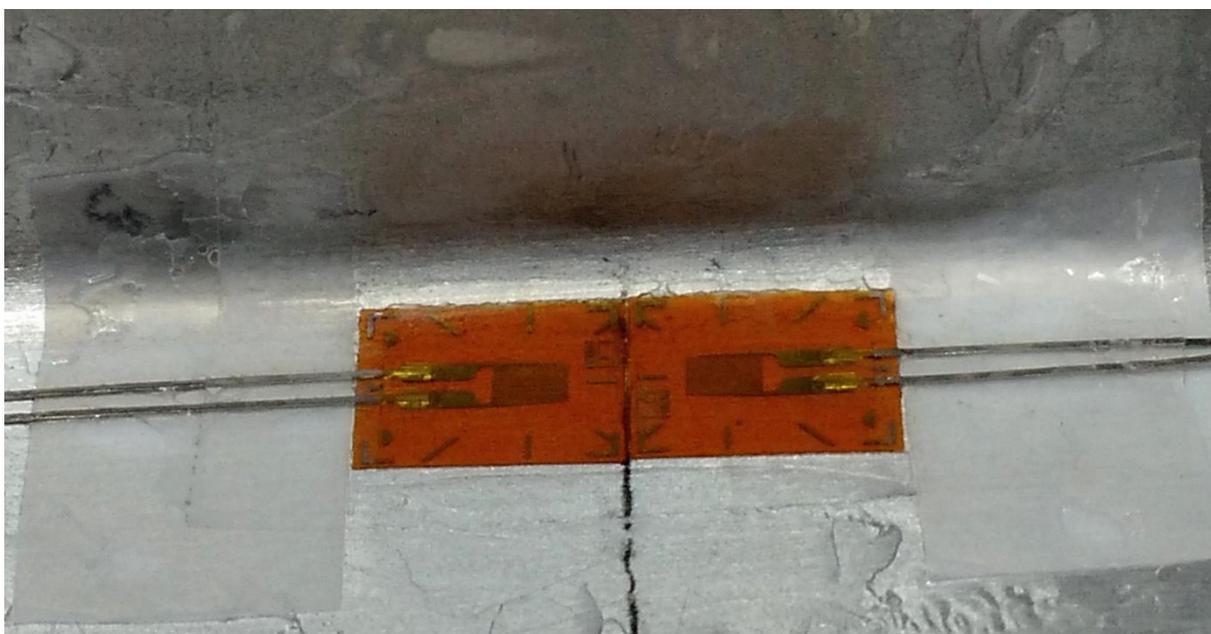
Fonte: adaptado de (HBM, *datasheet* referente ao lote A903/10, 2014).

A escolha do extensômetro apresentado foi realizada devido à baixa incerteza da resistência elétrica e do *fator gage*, às dimensões mecânicas apropriadas para a aplicação e a confiabilidade apresentada pelo fabricante. Por consequência, optou-se por utilizar o adesivo com base cianoacrilato do mesmo fabricante.

O procedimento de cimentação utilizado é o recomendado pelo fabricante através do manual de instruções fornecido junto com a cola. O resultado final de colagem pode ser visto em detalhe na Figura 40.

Após à cimentação, utilizando-se o mesmo processo de descontaminação, marcação, posicionamento e colagem, cimentou-se os terminais de contatos elétricos, para posteriormente soldar os fios de cobre maleáveis entre os terminais de solda e os terminais de cada extensômetro. A Figura 41 apresenta a relação entre deformação aparente em função da temperatura do extensômetro do lote A903/10. O resultado final de posicionamento dos *strain gages* pode ser visto da Figura 42 à Figura 47, onde são apresentados os números dos extensômetros, referentes à ligação elétrica ilustrada na Figura 48.

Figura 40 - Foto dos extensômetros cimentados e parte da estrutura do pedivela esquerdo.



Nota-se que para a direção perpendicular, utilizou-se quatro *strain gages* ativos, formando uma configuração de Ponte completa, já para as direções lateral e paralela, utilizou-se dois extensômetros ativos e dois *dummies* (extensômetros passivos) para cada.

O esquemático que representa as conexões elétricas realizadas na Ponte de *Wheatstone*, e a numeração dos extensômetros, referente à medida da deformação na direção perpendicular, paralela e lateral são apresentadas na Figura 48. Nota-se que para Figura 47 (a) e (b), são inseridos extensômetros externos, cimentados em uma outra peça fabricada com o mesmo material utilizado na célula de carga, porém, mecanicamente desacoplada, para completar a Ponte de *Wheatstone*.

A adição de dois extensômetros *dummies* por Ponte, cimentados em uma peça de mesmo material, para completar as Pontes de *Wheatstone* dos Canais 2, 3, 5 e 6, é necessária para compensação da deformação aparente causada pela variação de temperatura. Como as

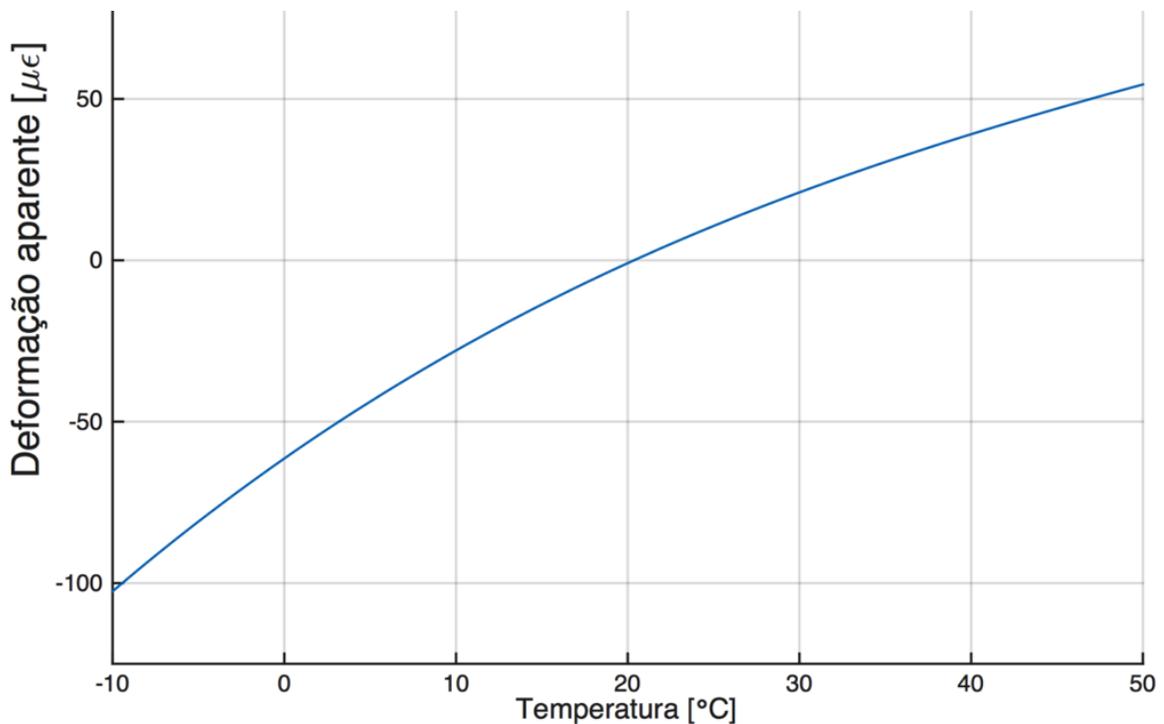
peças estão expostas a mesma temperatura ambiente e são fabricadas do mesmo material, a deformação relativa causada pela dilatação térmica é uniforme em todos os pontos de cimentação dos extensômetros, que, dessa forma, sofrem mesma deformação aparente, e, conseqüentemente, variam igualmente sua resistência elétrica, assim, é minimizado o desequilíbrio na Ponte em função da variação da temperatura. A deformação aparente em função da temperatura é um dado fornecido pelo fabricante do extensômetro (HBM, 2014), e pode ser calculado pela Equação (16) (cujos coeficientes são específicos do lote A903/10, utilizado neste projeto):

$$\varepsilon_S = -61,40 + 3,71 \cdot T - 3,84 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 2,11 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + (T - 20) \cdot 0,3 + 0,01710 \cdot L \cdot 10^{-3} \cdot (T - 20) \quad (16)$$

onde T é a temperatura em [°C], L é o comprimento dos terminais de solda do extensômetro em [m] e ε_S a deformação aparente em [$\mu\varepsilon$].

Dessa forma, a partir da Equação (16), e da faixa de temperatura de operação proposta para a célula de carga experimental, -10°C a 50°C, gerou-se a curva apresentada na Figura 41.

Figura 41 - Deformação aparente em função da temperatura.



Nota-se, através da Figura 41, que há uma variação de aproximadamente 150 $\mu\varepsilon$ na deformação aparente para a faixa de temperatura escolhida para a aplicação, desta forma,

torna-se necessário a compensação para todos os eixos de medida, já que valor de fundo de escala de deformação em cada eixo é próximo ao valor de deformação aparente.

Figura 42 - Extensômetros em configuração de Ponte com *dummy*, pedivela direito: direção lateral.

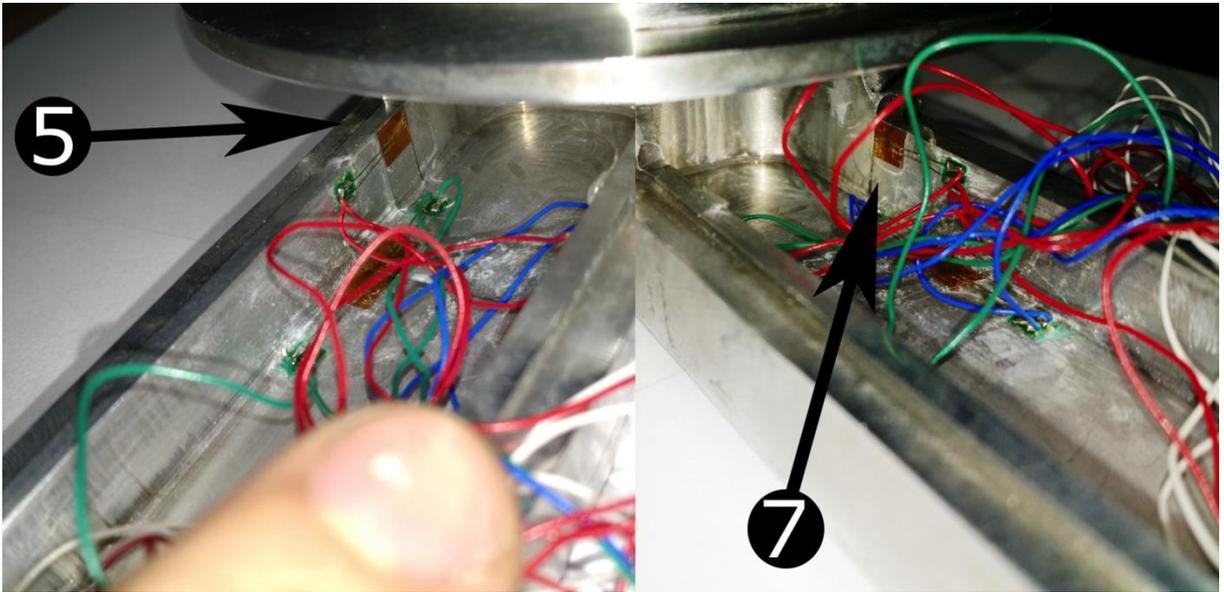


Figura 43 - Extensômetros em configuração de Ponte completa, (a) pedivela esquerdo: direção perpendicular, (b) pedivela direito: direção perpendicular.

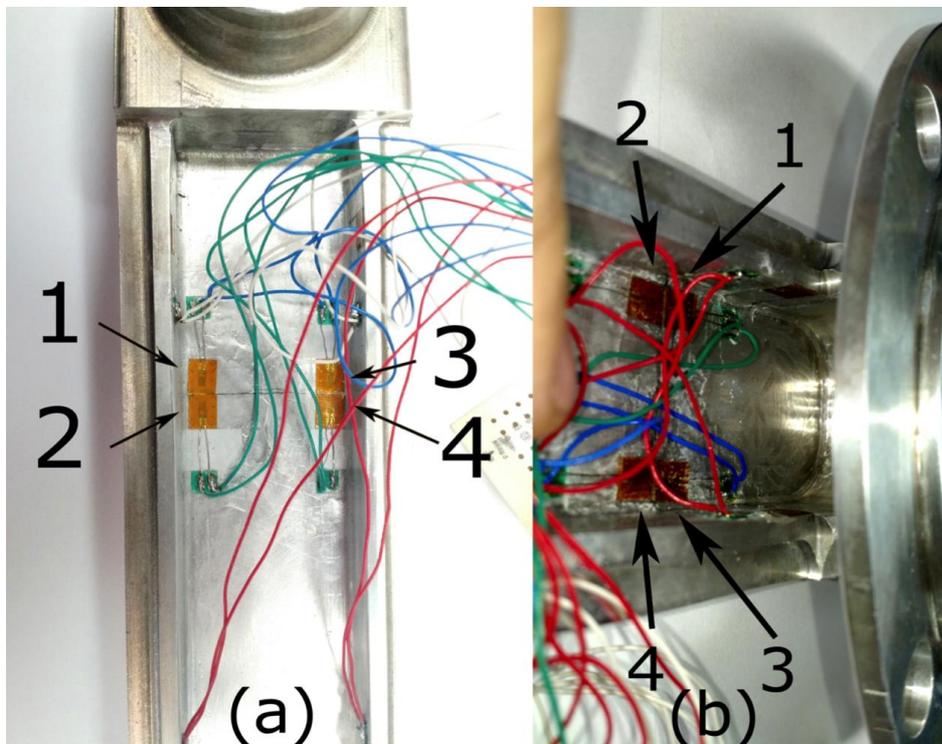


Figura 44 - Extensômetros em configuração de Ponte com *dummy*, pedivela esquerdo, lado 1: direção paralela e lateral.

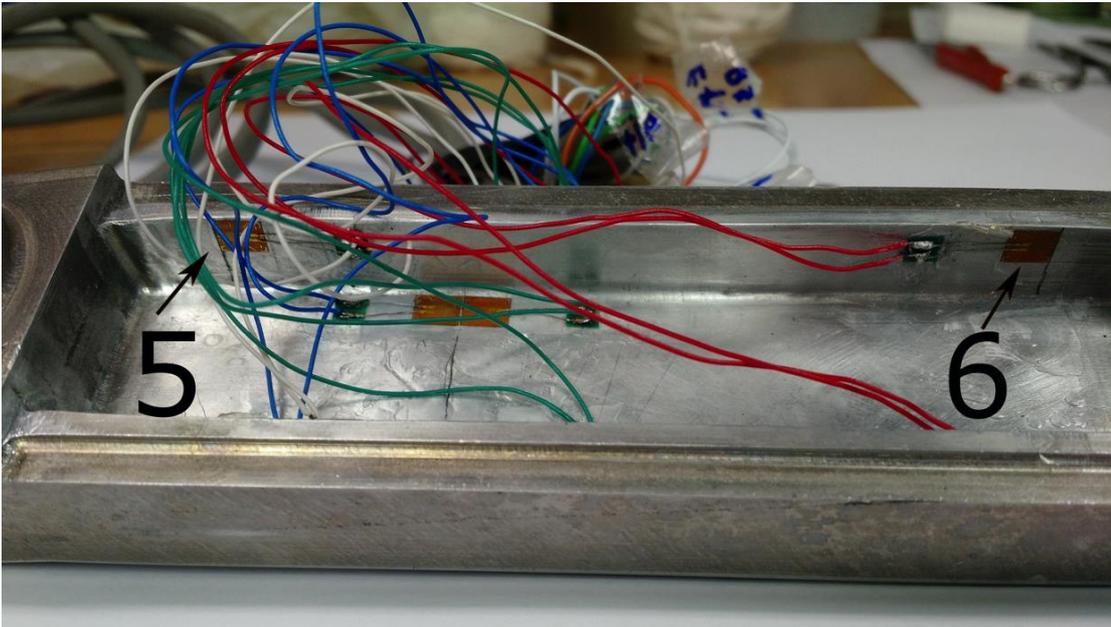


Figura 45 - Extensômetros em configuração de Ponte com *dummy*, pedivela esquerdo, lado 2: direção paralela e lateral.

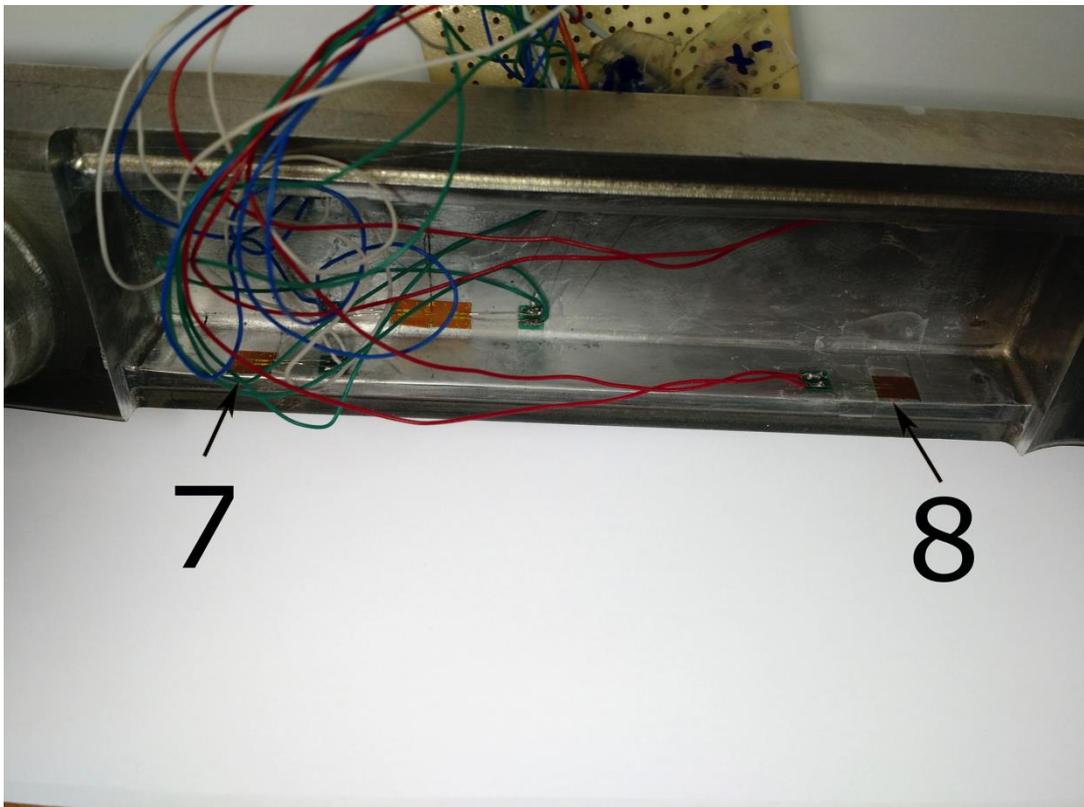


Figura 46 - Extensômetros em configuração de Ponte com *dummy*, pedivela direito: direção paralela e lateral.

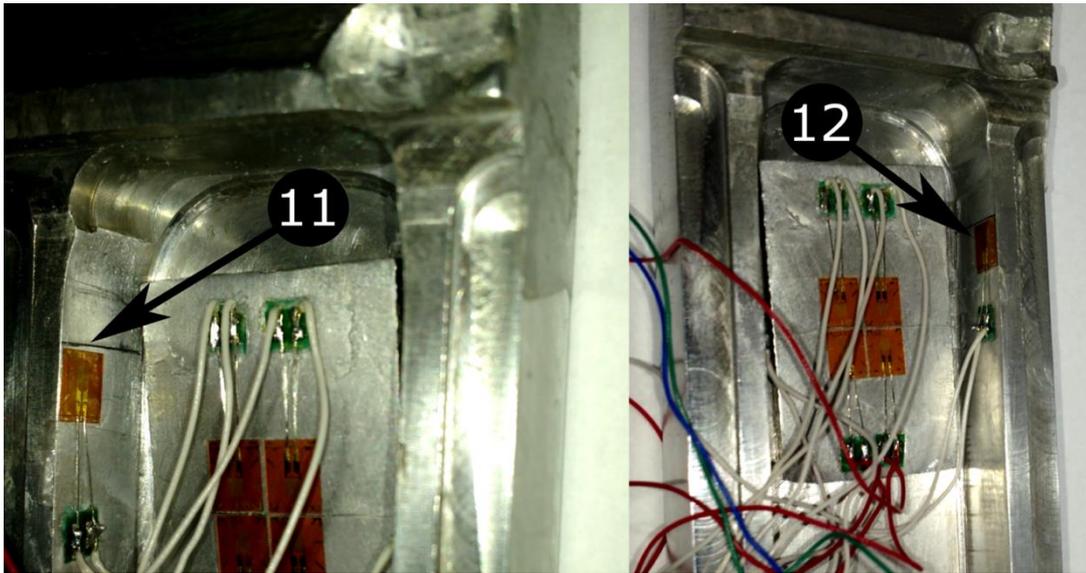


Figura 47- Extensômetros mecanicamente desacoplados - *dummies*, presentes nas Pontes de *Wheatstone* referentes as medidas das componentes de força na direção lateral e paralela: (a) pedivela esquerdo, (b) pedivela direito.

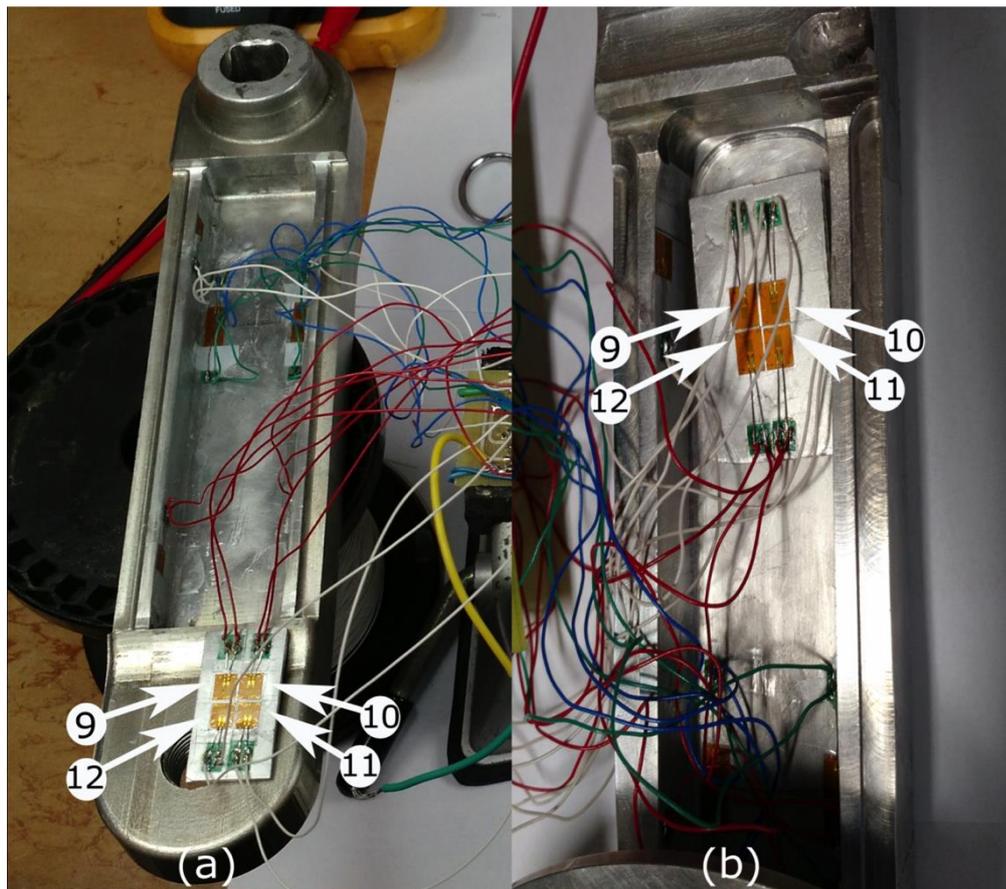
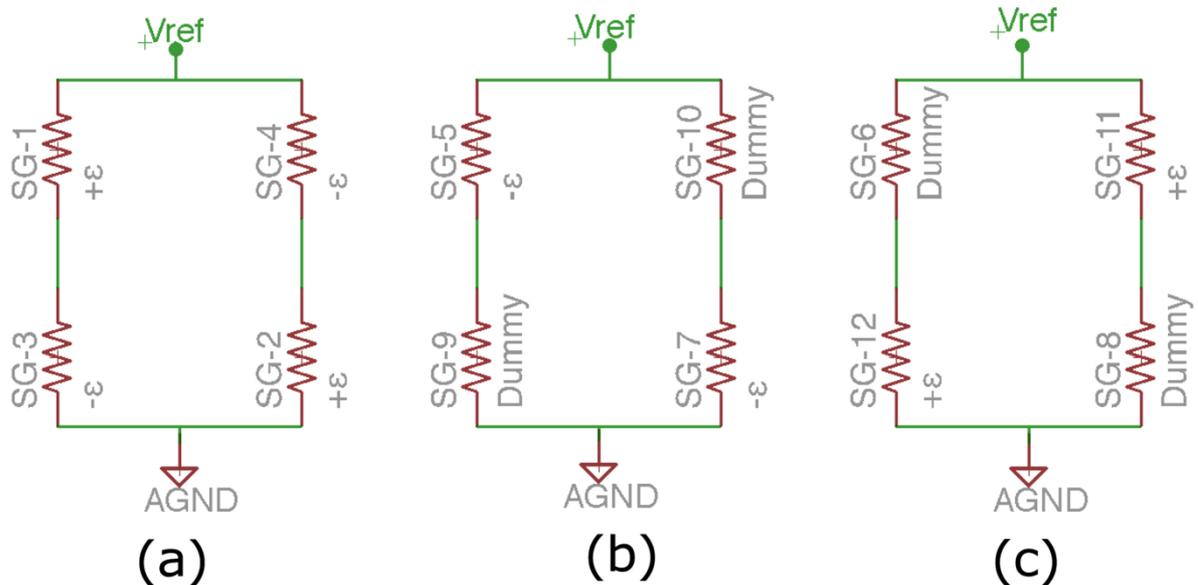


Figura 48 - Esquema de ligação elétrica das Pontes de *Wheatstone* de ambos os pedivelas: (a) direção perpendicular, (b) direção lateral e (c) direção paralela.



3.2 Procedimento para determinação das funções de transferência experimentais

Nesta seção, são abordados os ensaios de deformação da célula de carga a partir da aplicação de cargas estáticas. Essa etapa tem como objetivo levantar as funções de transferência experimentais para cada pedivela.

Para realização desse ensaio, engastou-se o pedivela em um suporte adaptado, cuja fixação é equivalente à presente em uma bicicleta convencional, e, com ajuda de um nível, ajustou-se a altura dos pés do suporte, de forma a alinhar o pedivela com o eixo vertical, para o levantamento da função de transferência experimental da aplicação de carga na direção paralela, e horizontal, para as direções lateral e perpendicular, respectivamente. Em sequência, aplicou-se cargas de 0 até 75kg, com resolução de 5kg, na direção perpendicular, e de 0 até 30kg na direção lateral e paralela.

Para aquisição de dados e condicionamento, utilizou-se o módulo de aquisição NI-9237 da *National Instruments*, especificamente desenvolvido para este tipo de medida, composto por 4 Canais com tensão de alimentação de referência e condicionamento para cada uma das Pontes de *Wheatstone*, todos com taxa de aquisição de 50kS/s a uma resolução de 24bits. A leitura apresenta uma incerteza de 0,20% e o resultado é fornecido em *microstrains*. Desta forma, com auxílio de uma placa de contatos, montou-se os circuitos apresentados na Figura 48. Utilizando-se um cabo com conector RJ-50, conectou-se cada uma das Pontes de *Wheatstone*, ao equipamento de medida. Posteriormente, elaborou-se um instrumento de

medida virtual, com auxílio do *software* LabVIEW™ 2013, onde configurou-se os Canais de aquisição em topologia de Ponte completa – com 4 *strain gages* ativos para a direção perpendicular e 2 ativos para cada uma das restantes; definiu-se a taxa de amostragem para adquirir 1000 *samples* a uma frequência de aquisição de 1kHz. Ao rodar o aplicativo, são realizadas 10 medidas da deformação em cada um dos eixos. Dessa forma, os dados são armazenados em uma matriz que, ao final da execução de cada *loop*, é exportada para uma tabela.

A partir dos dados coletados, realizou-se as regressões lineares referentes aos carregamentos em cada uma das direções, através do *software* MATLAB™ 2014b, e, assim, obteve-se as funções de transferência experimentais de cada uma das direções. Posteriormente, calculou-se o erro de linearidade de cada uma das funções de transferência através da Equação (17):

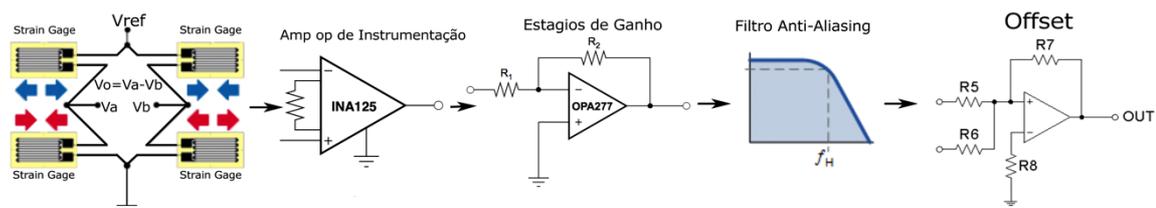
$$\text{Erro de Linearidade \%} = 100 \cdot \left(\frac{Diff_{max}}{FE} \right) \quad (17)$$

onde Erro de Linearidade representa o erro percentual gerado pela maior distância entre uma reta ideal e a curva de calibração, $Diff_{max}$ é a maior distância entre a reta ideal e a curva de calibração, e FE o fundo de escala na unidade utilizada na aplicação (BALBINOT, 2011).

3.3 Projeto do Circuito de Condicionamento de Sinal

Para o desenvolvimento do circuito de condicionamento de sinal, considerou-se as topologias propostas em (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011), além das utilizadas no projeto anteriormente desenvolvido por (NASCIMENTO, 2014) e (BALBINOT, *et al.*, 2015), adequando-as aos resultados obtidos na Seção 3.2 deste trabalho. Dessa forma, com base nessas considerações, elaborou-se o diagrama de blocos apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Diagrama de blocos do sistema de condicionamento proposto.



A partir das funções de transferências experimentais obtidas para cada eixo, através dos ensaios de carregamento realizados na Seção 3.2, e da faixa de carregamento

anteriormente definida com base em uma massa de até 75kg, projetou-se o circuito de condicionamento. Dessa forma, considerou-se que o carregamento máximo ocorre na direção perpendicular, para a qual considerou-se a aplicação de uma força máxima de módulo 735,7N. Já para as direções paralela e perpendicular, foi estipulado um máximo carregamento de módulo 294,3N.

O circuito condicionador de cada célula de carga é composto por 3 Canais com circuitos de mesma topologia, entretanto, com etapas de amplificação de ganhos diferentes. Para facilitar a compreensão, nomeou-se os Canais da seguinte forma:

- Canais 1, 2 e 3: respectivos as forças perpendicular, lateral e paralela do pedivela esquerdo – sem coroa;
- Canais 4, 5 e 6: respectivos as forças perpendicular, lateral e paralela do pedivela direito – lado da coroa.

Dessa forma, esse capítulo aborda o projeto e detalhes de cada um dos blocos utilizados nos condicionadores utilizados para os 6 Canais, e, nos Anexos D e E, encontram-se os esquemáticos do circuito completo com os valores de todos os componentes. Vale ressaltar que todos os componentes utilizados neste projeto tem encapsulamento SMD, sendo os resistores do tipo 1206 E96 (1%) e capacitores do tipo 0805 E12 (10%).

3.3.1 Circuito de Alimentação

Para alimentação de cada um dos circuitos de condicionamento, optou-se por utilizar 4 baterias do tipo Polímero de Lítio (*LiPo*), cujas características são apresentadas na Tabela 4, devido as dimensões físicas, baixo custo de operação e autonomia. As duas baterias foram ligadas em série para cada uma das alimentações, positiva e negativa, configurando uma alimentação simétrica de 7,4V. Estimou-se o consumo do circuito condicionador de sinais, de cada uma das células de carga, em 60mA e do circuito de aquisição e transmissão de dados em 80mA. Dessa forma, a autonomia do sistema é estimada em aproximadamente 1 hora e 30 minutos.

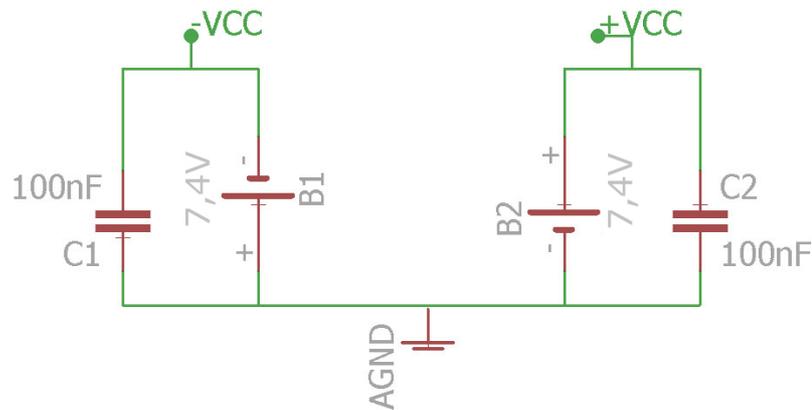
Sendo assim, para alimentação do sistema, utilizou-se o circuito apresentado na Figura 50, onde nota-se, além das baterias, dois capacitores de 100nF em paralelo com cada conjunto de baterias, cuja função é reduzir o ruído presente na alimentação.

Tabela 4 - Propriedades bateria LP 502030.

Propriedade	Valor
Largura [mm]	20,5
Comprimento [mm]	30,5
Altura [m]	5
Composição	Lítio/dióxido de manganês.
Tensão Nominal [V]	3,7
Corrente máxima [mA]	360mA
Capacidade de armazenamento de Corrente [mAh]	240

Fonte: *Datasheet*, LP502030, *Dynamis*, 2015.

Figura 50 - Esquemático do circuito de alimentação utilizado em ambos os condicionadores.



3.3.2 Tensão Elétrica de Referência

Para a referência de tensão elétrica e implementação do primeiro estágio de ganho, utilizou-se o circuito integrado INA125UA, fabricado pela *Texas Instruments*. A escolha desse componente é justificada por ser um amplificador específico para instrumentação de Pontes de *Wheatstone*, com referência de tensão elétrica de precisão integrada e excelentes características de rejeição a modo comum (CMRR), ruído, dentre outras, apresentadas na Tabela 5, exigidas pela aplicação.

Primeiramente projetou-se o circuito de referência de tensão, para alimentar a Ponte de *Wheatstone* e o circuito de ajuste de *offset*; para isso, utilizou-se a saída de referência de tensão elétrica de 5V do *INA125UA*, adicionando-se um transistor de junção bipolar do tipo *NPN*, com encapsulamento *SMD*, modelo *BC817* para reforço de corrente elétrica. Sendo assim, a base do transistor é conectada ao pino 4 do circuito integrado, que, por realimentação, fornece tensão elétrica suficiente na base do transistor para compensar a queda

V_{BE} . Dessa forma, tem-se uma tensão elétrica de referência autocompensada, estável, e com uma variação máxima de 18ppm/°C, como especificado no *datasheet* do circuito integrado. Sendo assim, o circuito de referência de tensão elétrica é apresentado na Figura 51 e tem saída de tensão elétrica representada na Equação (18). É importante ressaltar que a tensão elétrica de referência deve ser estável, visto que a tensão de saída da Ponte é diretamente proporcional à tensão de alimentação.

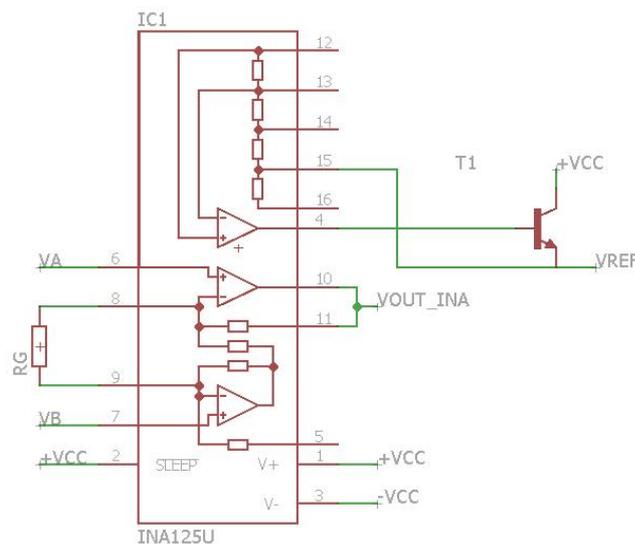
Tabela 5 - Principais características do circuito integrado INA125UA.

Propriedade	Valor
Faixa de Alimentação	$\pm 1,35V$ a $\pm 18V$
Corrente Quiescente	$460\mu A$
Baixa Corrente de entrada	$20nA$
Baixa variação de <i>offset</i>	$2\mu V/^{\circ}C$
Tensão de Referência	$5V \pm 0,5\%$
Baixa variação na tensão de referência	$18ppm/^{\circ}C$
Baixo nível de Ruído	$38nV/\sqrt{Hz}$
Alto CMR	$100dB$
Faixa de Ganho	4 a 10000 V/V
Encapsulamento	SO-16

Fonte: *Datasheet*, INA125UA, Texas Instruments, 2015.

$$V_{ref} = 5V \pm 0,5\% \quad (18)$$

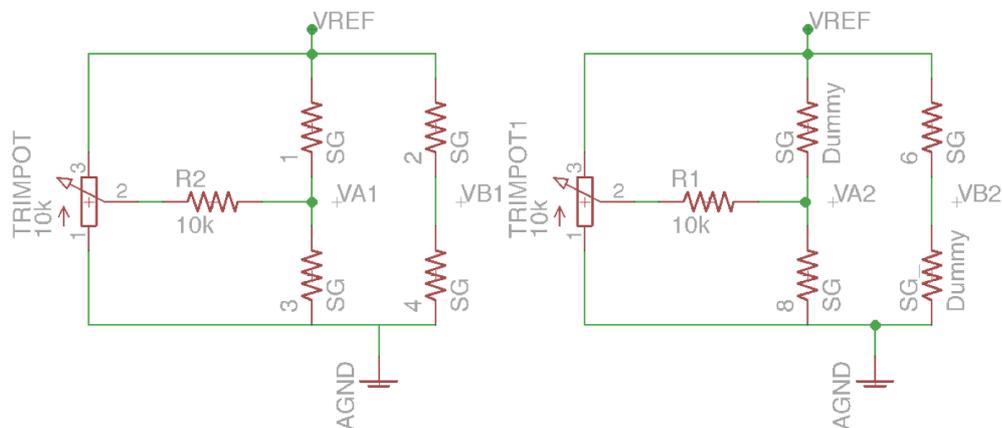
Figura 51 - Esquemático do circuito de referência de tensão elétrica dos Canais 1 a 6.



3.3.3 Ponte de *Wheatstone* e Circuito de Ajuste de Zero

Para garantir uma saída de tensão nula quando não há deformação mecânica na célula de carga, deve-se utilizar um circuito de ajuste de zero, já que a resistência elétrica dos extensômetros apresenta uma incerteza de $0,704\ \Omega$, desequilibrando a Ponte mesmo na ausência de deformação. Dessa forma, utilizou-se um *trimpot* e um resistor com valores de $10\text{k}\Omega$ e tolerância de 1%, conforme apresentado na Figura 52, para realizar-se o ajuste de zero.

Figura 52 - Esquemático das Pontes de *Wheatstone* com ajuste de *offset*: (a) configuração de Ponte completa referente aos Canais 1 e 4, (b) Configuração de Ponte com *dummies* referente aos Canais 2, 3, 5 e 6.



A corrente elétrica que circula pelo extensômetro deve estar abaixo do máximo permitido pelo fabricante de acordo com o material ao qual o mesmo é cimentado, já que o dispositivo é um resistor de resistência variável, e este, por sua vez, dissipa uma potência, que, em excesso, pode resultar em alterações nas medidas ou mesmo ocasionar dano ao componente, (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2011). Sendo assim, a corrente elétrica que circula por cada um dos braços das Pontes completas implementadas nos Canais 1 a 6, é apresentada na Equação (19):

$$I = \frac{5,0}{2.350} = 7,14\text{ mA} \quad (19)$$

Dessa forma, nota-se que as correntes elétricas que circulam pelos extensômetros estão abaixo do limite imposto pelo fabricante.

A tensão elétrica de saída e a sensibilidade das Pontes dos Canais 1 e 4 é apresentada nas Equações (20) e (21), e as dos Canais 2, 3, 5 e 6, nas Equações (22) e (23), respectivamente.

$$V_{out\ ponte\ completa} = V_a - V_b = V_{ref} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = V_{ref} \cdot K \cdot \varepsilon = (5,0) \cdot (1,94) \cdot \varepsilon = (9,7 \cdot \varepsilon) V \quad (20)$$

$$S_{out\ ponte\ completa} = \frac{dV_{out\ ponte\ completa}}{d\varepsilon} = 9,7 \frac{V}{\varepsilon} = 0,0097 \frac{mV}{\mu\varepsilon} \quad (21)$$

$$V_{out\ meia\ ponte} = V_a - V_b = \frac{V_{ref}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{V_{ref}}{2} \cdot K \cdot \varepsilon = (2,5) \cdot (1,94) \cdot \varepsilon = (4,85 \cdot \varepsilon) V \quad (22)$$

$$S_{out\ meia\ ponte} = \frac{dV_{out\ meia\ ponte}}{d\varepsilon} = 4,85 \cdot \frac{V}{\varepsilon} = 0,00485 \frac{mV}{\mu\varepsilon} \quad (23)$$

onde V_{ref} é a tensão elétrica de alimentação da Ponte de *Wheatstone*, K é o fator *gage* dos extensômetros que compõe a Ponte e ε é a deformação relativa em *strains* da célula de carga no ponto de aplicação dos *strain gages*.

3.3.4 Estágios de Amplificação

Como a ordem de grandeza do sinal de tensão elétrica de saída da Ponte é na faixa de $[mV]$, é necessário amplificá-lo antes de realizar a aquisição com o conversor analógico digital. Dessa forma, optou-se por realizar a amplificação do sinal em quatro estágios.

Para um melhor aproveitamento da resolução do conversor analógico digital, deve-se utilizar toda a faixa de tensão elétrica de operação do mesmo, que, nesse projeto, é de 0 a 5V. Dessa forma, para determinar o ganho total por canal, utilizou-se os dados experimentais de deformação adquiridos através do procedimento apresentado na Seção 3.2 e as Equações (20) e (22), ajustando-o para a saída de tensão elétrica de cada canal respeitar a faixa de -2,5V a 2,5V.

O primeiro estágio de amplificação é realizado pelo mesmo amplificador operacional de instrumentação (INA125UA), já apresentado na Seção 3.3.2, cujas principais características elétricas são apresentadas na Tabela 5. A saída de tensão elétrica do circuito integrado utilizado é a apresentada nas Equações (24) e (25):

$$V_{out} = (V_{in}^+ - V_{in}^-) \cdot G V \quad (24)$$

$$G = \left(4 + \frac{60k}{RG}\right) \quad (25)$$

onde V_{out} é a saída de tensão elétrica do circuito integrado em [V], V_{in}^+ e V_{in}^- as entradas de tensão elétrica diferencial em [V], G o ganho do amplificador em [V/V], e RG a resistência elétrica de ajuste de ganho do amplificador operacional de instrumentação em [Ω].

Assim, a saída de tensão elétrica de cada uma das Pontes de *Wheatstone* – V_a e V_b , é conectada à entrada diferencial do amplificador operacional - V_{in}^+ e V_{in}^- , conforme os esquemáticos da Figura 51 e Figura 52, resultando na saída em tensão elétrica, para cada canal, apresentada na Equação (26).

$$V_{out_ina} = (V_a - V_b) \cdot \left(4 + \frac{60k}{RG}\right) \quad (26)$$

onde V_{out_ina} é a saída de tensão elétrica do respectivo canal em [V], V_a e V_b as entradas de tensão elétrica diferencial em [V], G o ganho do amplificador em [V/V], e RG a resistência elétrica de ajuste de ganho do amplificador operacional de instrumentação em [Ω].

O valor do ganho de primeiro estágio definido para cada canal e o valor da resistência elétrica RG (com tolerância de 1%), respectiva ao mesmo, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ganho referente ao primeiro estágio de cada canal.

Canais	RG [Ω]	Ganho no primeiro estágio [V/V]
1	5,6k	14,71
2	6,2k	13,68
3	25k	6,400
4	5,6k	14,71
5	9,1k	10,59
6	62k	4,970

Para os próximos estágios de ganho, utilizou-se o circuito integrado *OPA4227* fabricado pela *Texas Instruments*. A escolha desse componente é justificada pelas características elétricas apresentadas na Tabela 7, adequadas à aplicação, e, também, por ser composto de quatro amplificadores operacionais em apenas um encapsulamento *SO-16*, o que poupa espaço físico na placa de circuito impresso.

O segundo estágio de amplificação é realizado pelo amplificador operacional 1 do circuito integrado (*OPA4227*), cujas características são apresentadas na Tabela 7, ligado na configuração de amplificador não inversor, (FRANCO, 2015). O circuito utilizado é

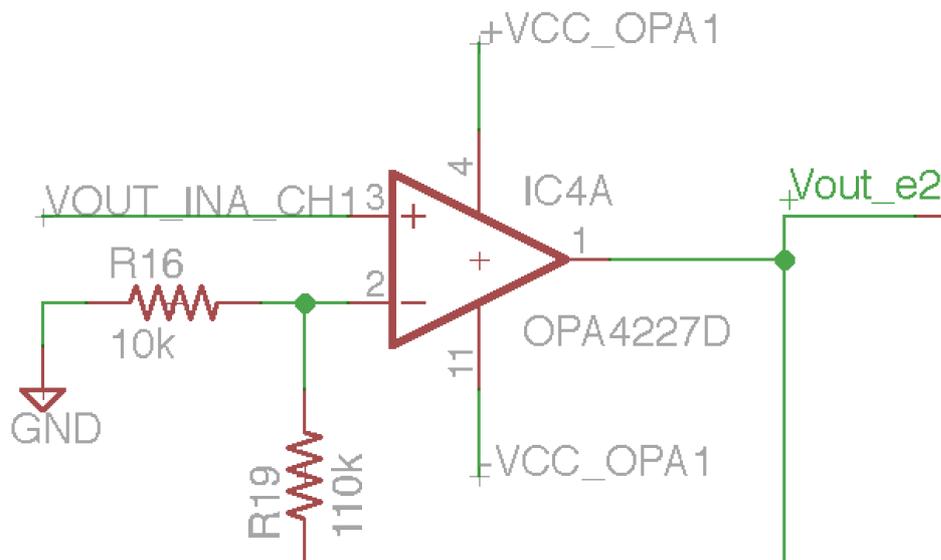
apresentado na Figura 53, o ganho pode ser calculado pela Equação (27), e tem o valor definido de acordo com cada canal, e apresentado na Tabela 8.

Tabela 7 - Características elétricas do circuito integrado OPA4227.

Propriedade	Valor
Faixa de Alimentação	$\pm 2,5\text{V}$ a $\pm 18\text{V}$
Tensão de <i>offset</i> de entrada	$10\ \mu\text{V}$
Baixa corrente quiescente	$3,7\text{mA}$
Baixa variação de <i>offset</i>	$\pm 0,3\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
GBW	8MHz
Baixo nível de Ruído	$3\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Alto CMRR	100dB
Ganho em laço aberto	160dB
Encapsulamento	SO-14

Fonte: Datasheet, OPA4227, Texas Instruments, 2015.

Figura 53 - Segundo estágio de Amplificação, Canais 1 a 6.



$$V_{out_e2} = (V_{out_ina_CH}) \cdot \left(1 + \frac{R19}{R16}\right) \quad (27)$$

onde V_{out_e2} é a saída em tensão elétrica do segundo estágio de amplificação de cada um dos Canais de 1 a 6, em [V], $V_{out_ina_CH}$ é a saída de tensão elétrica do primeiro estágio de amplificação do respectivo canal [V], $R19$ e $R16$ são os resistores, com tolerância de 1%, que definem o ganho do bloco, em [V/V].

Tabela 8 - Ganho do segundo estágio de amplificação para cada canal.

Canal	Valor do ganho de segundo estágio [V/V]
Canal 1	11
Canal 2	3,64
Canal 3	9,46
Canal 4	7,93
Canal 5	4,1
Canal 6	9,46

3.3.5 Circuito de Filtragem e Terceiro Bloco de Ganho

Para possibilitar a aquisição do sinal de interesse com alta fidelidade, normalmente utiliza-se uma frequência de amostragem, no mínimo, cinco a dez vezes a frequência do fenômeno que se quer medir. Para evitar o efeito de *aliasing*, utiliza-se um filtro passa-baixa, com frequência de corte superior à frequência do fenômeno físico à ser medido, e, por sua vez, ajusta-se a frequência de amostragem de acordo com a ordem do filtro utilizado, de forma que as componentes espectrais das frequências acima da desejada, tenham uma atenuação de, pelo menos 40dB.

Neste contexto, projetou-se um filtro *Butterworth* passa-baixa, de quarta ordem, na topologia *Sallen-Key*, com ganho não unitário e ajustado de acordo com cada canal, cuja frequência de corte para todos os Canais é de 37Hz. O filtro foi projetado e calculado com auxílio do *software* Filter Pro Desktop Versão 3.1, da *Texas Instruments*, utilizando valores comerciais de resistores da série E96 de 1% de tolerância e capacitores da série E12 de 10% de tolerância. As principais características dos filtros projetados podem ser observadas na Tabela 9. O filtro é composto por dois circuitos operacionais do circuito integrado OPA4227.

Tabela 9 - Principais características do filtro passa baixa dos Canais de 1 a 6.

Características comuns a todos os Canais	
Topologia	Sallen-Key
Resposta	Butterworth
Frequência de Corte	37Hz
Ordem	4
Numero de estágios	2
Fator de Qualidade do primeiro estágio	0,54
Fator de qualidade do segundo estágio	1,31

Continuação da Tabela 9: Principais características do filtro passa baixa dos Canais de 1 a 6.

Características Individuais	
Ganho dos Canais 1 e 4	12,84[V/V]
Ganho dos Canais 2 e 5	16,20[V/V]
Ganho dos Canais 3 e 6	36,48[V/V]

Fonte: (Filter Pro Desktop 3.1.)

Para todos os Canais, a topologia utilizada é a mesma, alterando-se apenas o ganho através de alterações nos valores dos componentes. A função de transferência que descreve a topologia utilizada em cada um dos blocos presente nos filtros *Butterworth* é apresentada nas Equações (28) e (29). As Equações (30), (31), (32) e (33) apresentam o cálculo e a função de transferência do Canal 1 e 4, já determinados os valores dos componentes utilizados. A Equação (34) apresenta a função de transferência dos filtros implementados nos Canais 2 e 5 e a Equação (35) dos Canais 4 e 6, respectivamente. A Figura 54 apresenta o esquemático elétrico do filtro utilizado no Canal 1 e a Figura 55 a resposta em frequência do mesmo.

$$H_{\text{filtro por bloco}}(s) = \frac{G}{S^2 + S \cdot \left(\frac{1}{C_6 R_{22}} + \frac{1}{C_6 R_{25}} + \frac{(1-G)}{C_3 R_{25}} \right) + \frac{1}{C_6 C_3 R_{22} R_{25}}} \quad (28)$$

$$G = \frac{R_{31} + R_{28}}{R_{28}} = 3,583 \text{ [V/V]} \quad (29)$$

$$H_{\text{filtro bloco 1}}(s) = \frac{192459,869}{S^2 + S \cdot 405,092 + 53709,731} \quad (30)$$

$$H_{\text{filtro bloco 2}}(s) = \frac{212685,976}{S^2 + S \cdot 134,437 + 59354,226} \quad (31)$$

$$H_{\text{filtro completo}}(s) = \frac{V_{\text{out}e3}}{V_{\text{out}e2}} = H_{\text{filtro bloco 1}}(s) \cdot H_{\text{filtro bloco 2}}(s) \quad (32)$$

$$H_{\text{filtro completo CH1 e 4}}(s) = \frac{40933515079,1}{S^4 + S^3 \cdot 539,585 + S^2 \cdot 167531,435 + S \cdot 31267832,056 + 3187902466,210} \quad (33)$$

$$H_{\text{filtro completo CH2 e 5}}(s) = \frac{47842568097,3}{S^4 + S^3 \cdot 551,636 + S^2 \cdot 163664,813 + S \cdot 28714327,373 + 2811684442,810} \quad (34)$$

$$H_{\text{filtro completo CH3 e 6}}(s) = \frac{112306652866,0}{S^4 + S^3 \cdot 631,812 + S^2 \cdot 196877,462 + S \cdot 35252924,565 + 3119629246,290} \quad (35)$$

Figura 54 - Esquemático do circuito de filtragem desenvolvido para os Canais 1 a 6. Os valores nominais dos componentes apresentados neste esquemático são referentes aos Canais 1 e 4, apenas.

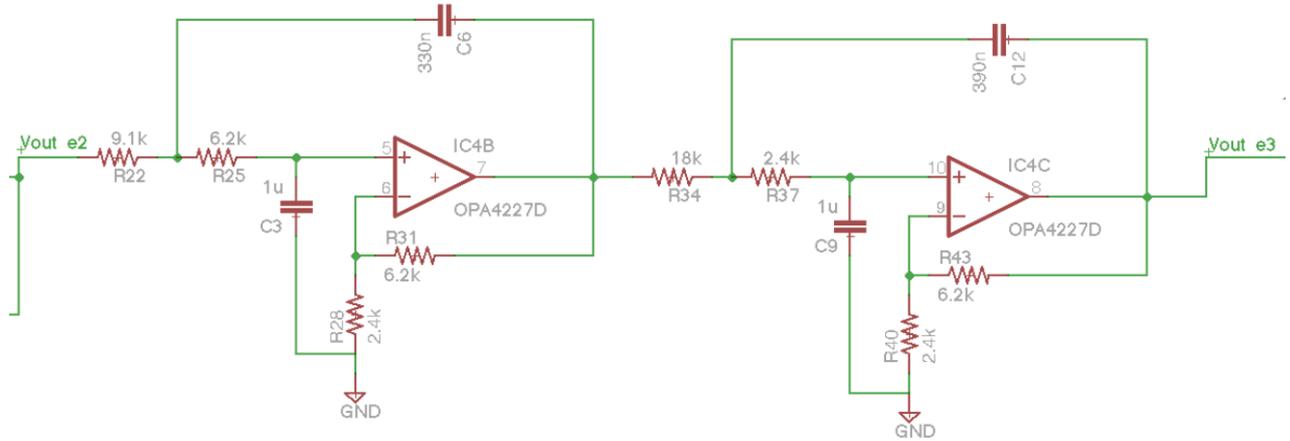
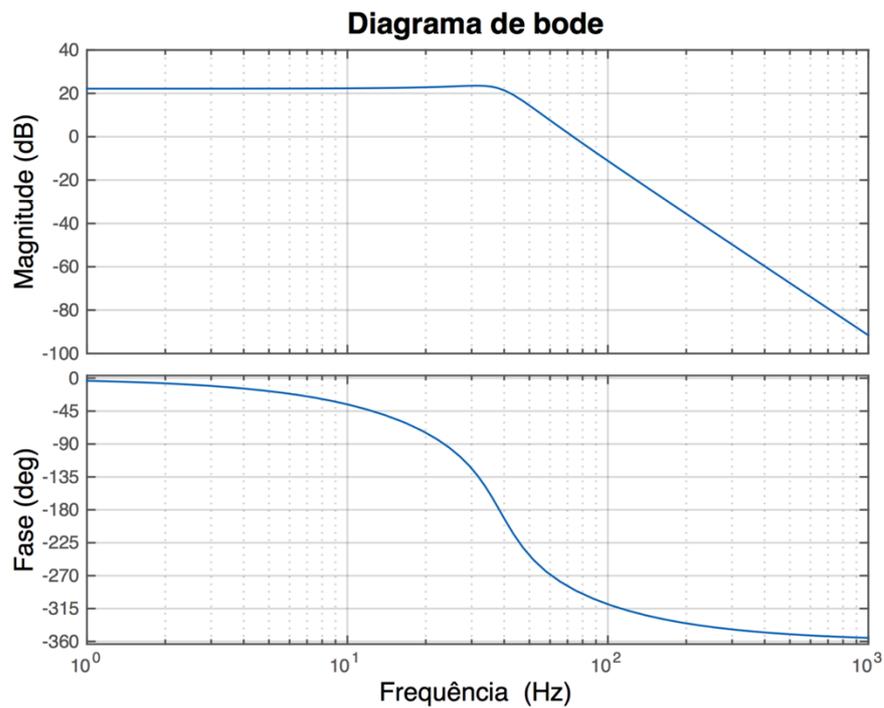


Figura 55 - Diagrama de bode do filtro projetado para o Canal 1.



Dessa forma, os valores finais de ganho em tensão elétrica dos sinais obtidos na saída na Ponte, considerando a amplificação em cada etapa do condicionador, é apresentado na Tabela 10.

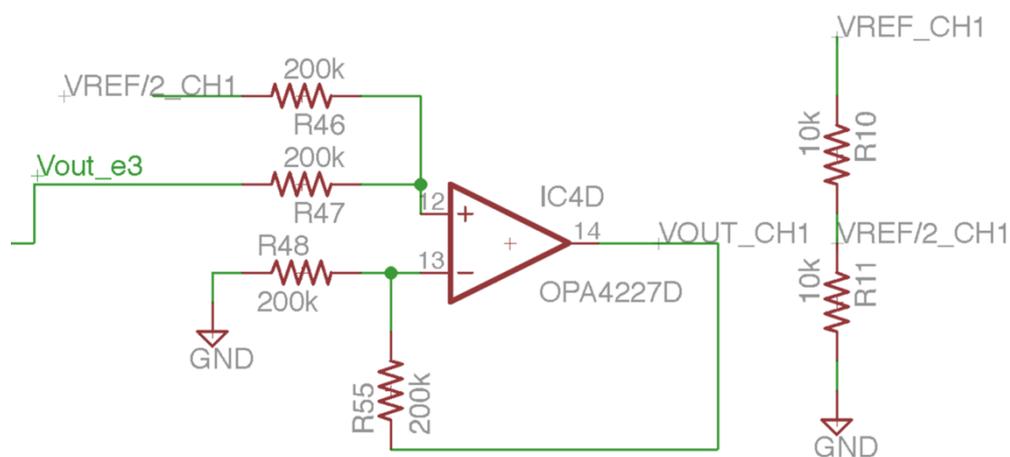
Tabela 10 - Valores teóricos calculados dos ganhos por estágio e canal.

Número do Canal	Estágio 1 [V/V]	Estágio 2 [V/V]	Estágio 3 [V/V]	Estágio 4 [V/V]	Ganho Total [V/V]
1	14,71	11,00	3,583	3,583	1810
2	13,68	3,640	4,025	4,025	806,7
3	6,400	9,460	6,039	6,039	2208
4	14,71	7,930	3,583	3,583	1498
5	10,59	4,100	4,025	4,025	703,4
6	4,970	9,460	6,039	6,039	1715

3.3.6 Circuito Somador e Função de Transferência do Circuito Condicionador

Como o conversor analógico digital utilizado tem entrada de tensão elétrica na faixa de 0V a 5V, e o sinal elétrico de saída do filtro tem excursão de -2,5V a 2,5V, torna-se necessário elevar a tensão elétrica de saída do filtro em 2,5V. Dessa forma, para elevar a tensão elétrica de saída em 2,5V, utilizou-se um circuito com a topologia de somador não inversor, com o quarto amplificador operacional disponível no circuito integrado OPA4227. Para a referência de tensão elétrica de 2,5V, utilizou-se um divisor resistivo formado por dois resistores de $10\text{k}\Omega \pm 1\%$, ligado na mesma referência de tensão elétrica que alimenta a Ponte (V_{ref}). O circuito utilizado é apresentado na Figura 56 e é idêntico para todos os Canais.

Figura 56 - Circuito somador: Canais 1 a 6.



Sendo assim, a expressão da saída de tensão elétrica para o canal 1 pode ser descrita pelas Equações (36), (37) e (38).

$$V_{out_CH1} = G1. G2. G3. G4. \left(\frac{R_{46}}{R_{46} + R_{47}} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_{55}}{R_{48}} \right) \cdot (V_{a_CH1} - V_{b_CH1}) \quad (36)$$

$$+ \left(\frac{R_{47}}{R_{46} + R_{47}} \right) \cdot \left(1 + \frac{R_{55}}{R_{48}} \right) \cdot \left(\frac{R_{11}}{R_{10} + R_{11}} \right) \cdot V_{ref_CH1}$$

$$V_{out_CH1} = G1. G2. G3. G4. (9,7 \cdot \varepsilon V) + \frac{V_{ref_CH1}}{2} \quad (37)$$

$$V_{out_CH1} = 12,82.11.3,583.3,583. (9,7 \cdot \varepsilon V) + 2,5 = (20149,800 \cdot \varepsilon + 2,5) V \quad (38)$$

Como os Canais usam mesma topologia, apresentam apenas ganhos teóricos diferentes, por extensão, as Equações (39) a (43) descrevem a tensão de saída elétrica dos Canais 2 a 6.

$$V_{out_CH2} = (4207,146 \cdot \varepsilon + 2,5) V \quad (39)$$

$$V_{out_CH3} = (10708,853 \cdot \varepsilon + 2,5) V \quad (40)$$

$$V_{out_CH4} = (14526,177 \cdot \varepsilon + 2,5) V \quad (41)$$

$$V_{out_CH5} = (3411,562 \cdot \varepsilon + 2,5) V \quad (42)$$

$$V_{out_CH6} = (8316,091 \cdot \varepsilon + 2,5) V \quad (43)$$

Para avaliar o correto funcionamento do circuito de condicionamento, alimentou-se o mesmo com uma tensão elétrica simétrica de 7,4V, valor proposto na Seção 3.3.1, utilizando-se uma fonte de tensão *POL-16E*, fabricada pela empresa *Politerm*. Posteriormente, utilizando um multímetro digital de 6,5 dígitos, modelo *DMM4050*, fabricado pela empresa *Tektronix*, com resolução e incerteza apresentados na Tabela 11, mediu-se a tensão elétrica de saída de cada estágio gerada pela aplicação de uma carga mecânica de fundo de escala em cada um dos Canais. A partir dos valores medidos, determinou-se os ganhos experimentais dos estágios e a tensão de *offset* ajustada no somador.

Por fim, para verificar o correto funcionamento dos filtros passa-baixa implementados, utilizou-se um gerador de sinais de função arbitrária, modelo *AFG3052* e um osciloscópio, modelo *TDS2001C*, ambos fabricados pela *Tektronix*.

Sendo assim, gerou-se o sinal senoidal através do gerador de sinais e observou-se a saída do filtro no osciloscópio para sinais de entrada com frequências acima e abaixo da frequência de corte.

Tabela 11 - Valores de incerteza e resolução do multímetro *Tektronix DMM4050* para as escalas utilizadas.

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

Fonte: *Datasheet DMM4050, Tektronix, 2015.*

3.3.7 Sistema de Aquisição de Dados com ArduImu

Para possibilitar a aquisição e a análise das formas de onda e valores da tensão elétrica de saída do condicionador da célula de carga, torna-se necessária a digitalização do mesmo. Contudo, como o sistema se encontra em movimento durante a aplicação, deve-se utilizar uma forma de armazenamento, ou transmissão sem cabos (MILANI, 2014). Dessa forma, para aquisição do sinal analógico, utilizou-se os conversores analógico-digitais presentes em uma plataforma de desenvolvimento comercial modelo ArduImu V3, fabricado pela *3DRobotics*, cujo microprocessador é um AtMega328P, fabricado pela empresa *Atmel*.

O sinal de tensão elétrica analógico, com faixa entre 0V e 5V é convertido para digital pelo conversor *A/D* de 10 bits, presente no microcontrolador, gerando um valor digital entre 0 e 1023, que representam 0V e 5V, respectivamente, conforme a Equação (44).

$$V_{out_digital} = \frac{V_{out_analógico}}{5} \cdot 1023 \quad (44)$$

onde $V_{out_analógico}$ é o valor de tensão elétrica em [V] e $V_{out_digital}$ é um valor inteiro a ser processado.

A alimentação do sistema é compartilhada com a do condicionador de sinais do pedivela esquerdo, lado onde o microcontrolador foi fixado. Para evitar flutuações na medida de tensão elétrica dos conversores *A/D*, utilizou-se a referência de tensão elétrica de 5V utilizada no circuito de condicionamento.

Após adquirido, o valor digital é transmitido para um computador pessoal, através de um módulo de transmissão e recepção sem fio de 2,4GHz, modelo XBee, fabricado pela empresa *Digi International Inc.* O pacote de dados é recebido pelo computador via serial,

através do módulo de recepção, conectado na porta USB, e armazenado em um arquivo de formato .log através do *software* XCTU, desenvolvido pelo fabricante do XBee.

Para interpretação do arquivo .log, desenvolveu-se um código no *software* MATLAB R2015a, desenvolvido pela empresa *MathWorks*®, que lê o arquivo, interpreta o pacote de dados e decodifica de hexadecimal para decimal, gerando as matrizes com os valores da saída de tensão elétrica digital. Por fim, converte-se o valor numérico de tensão elétrica digital de cada canal para o valor numérico em [mV], aplicando-se nas funções de transferência experimentais, apresentadas na Seção 4.5. Os códigos desenvolvidos são apresentados no final deste trabalho, nos Anexos F e G.

Para determinação da autonomia do sistema, alimentou-se o circuito com as baterias de 7,4V, conforme apresentado na Seção 3.3.1, e mediu-se o consumo de corrente elétrica do sistema de aquisição e transmissão, utilizando-se o multímetro DMM4050, da empresa *Tektronix*.

3.3.8 Projeto das Cadeias de Medidas Propostas

A cadeia de medidas apresenta cada uma das etapas utilizadas no projeto, desde a faixa de valores apresentados no fenômeno físico de interesse, neste caso, força, até a saída do sinal que representa o valor medido. Desta forma, as cadeias de medida propostas para esse projeto, são apresentadas na Figura 57 à Figura 62. Como trabalho futuro é proposto a definição dos níveis de ruído para cada uma das etapas da Cadeia de Medidas, sendo assim, completando todo projeto de cada etapa da correspondente Cadeia de Medidas.

Figura 57 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 1.

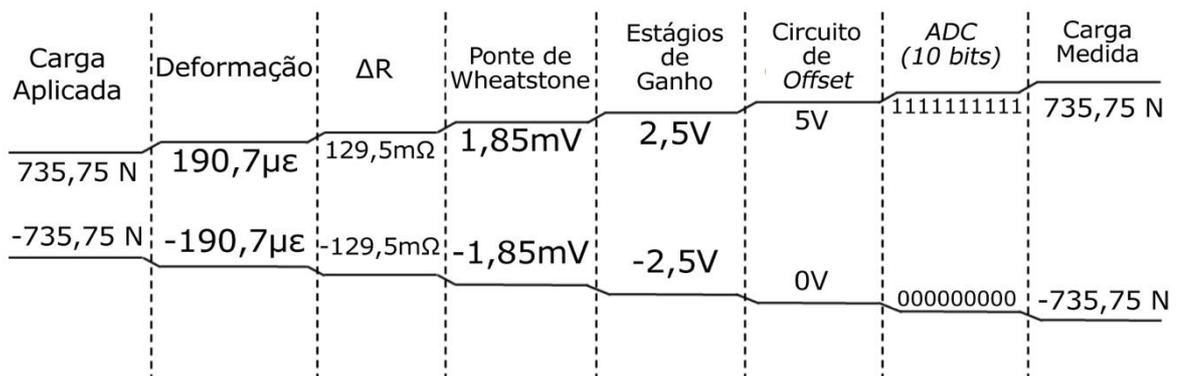


Figura 58 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 2.



Figura 59 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 3.



Figura 60 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 4.

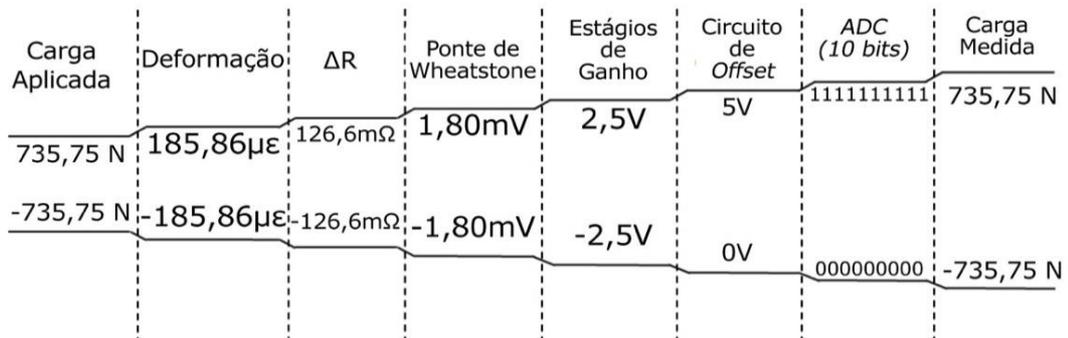


Figura 61- Cadeia de Medidas proposta para o Canal 5.

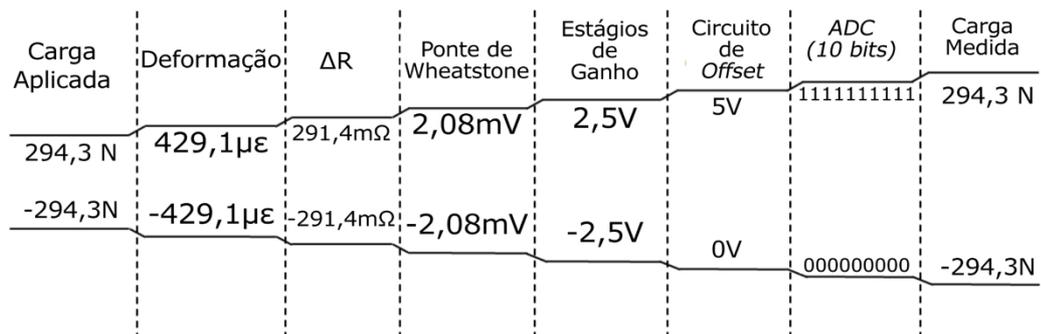


Figura 62 - Cadeia de Medidas proposta para o Canal 6.



3.4 Procedimento de Calibração Estática do Sistema

Para realização do ensaio, assim como na Seção 3.2, engastou-se o pedivela em um suporte adaptado, cuja fixação é equivalente à presente em uma bicicleta convencional, e, com ajuda de um nível, ajustou-se a altura dos pés do suporte, de forma a alinhar o pedivela com o eixo vertical, para o levantamento da função de transferência experimental da aplicação de carga na direção paralela, e horizontal, para as direções lateral e perpendicular. A seguir, aplicou-se cargas de 0kg até 75kg, com resolução de 5kg, na direção perpendicular e de 0kg até 30kg na direção lateral e paralela.

Utilizando-se uma fonte de tensão *POL-16E*, fabricada pela empresa *Politerm*, alimentou-se o circuito de condicionamento com uma tensão elétrica simétrica de 7,4V. Posteriormente, utilizando um multímetro digital de 6,5 dígitos, modelo *DMM4050*, fabricado pela empresa *Tektronix*, com resolução e incerteza apresentados na Tabela 11, mediu-se a tensão elétrica de saída de cada um dos Canais, configurando-se o multímetro para calcular a média e desvio padrão de 50 medidas de tensão elétrica sucessivas.

3.5 Procedimento de Ensaio Dinâmico do Sistema

Para análise dos modos ressonantes das células de carga, engastou-se os pedivelas em um suporte fixado em uma parede, utilizando-se o método do impacto. Dessa forma, fixou-se um acelerômetro piezoelétrico comercial tri-axial modelo *DeltaTron 4520* fabricado pela *Brüel & Kjaer*, cujas características são apresentadas na Tabela 12, na lateral da peça. A fixação em ambos os pedivelas foi feita com fita dupla face, conforme é representado na Figura 63.

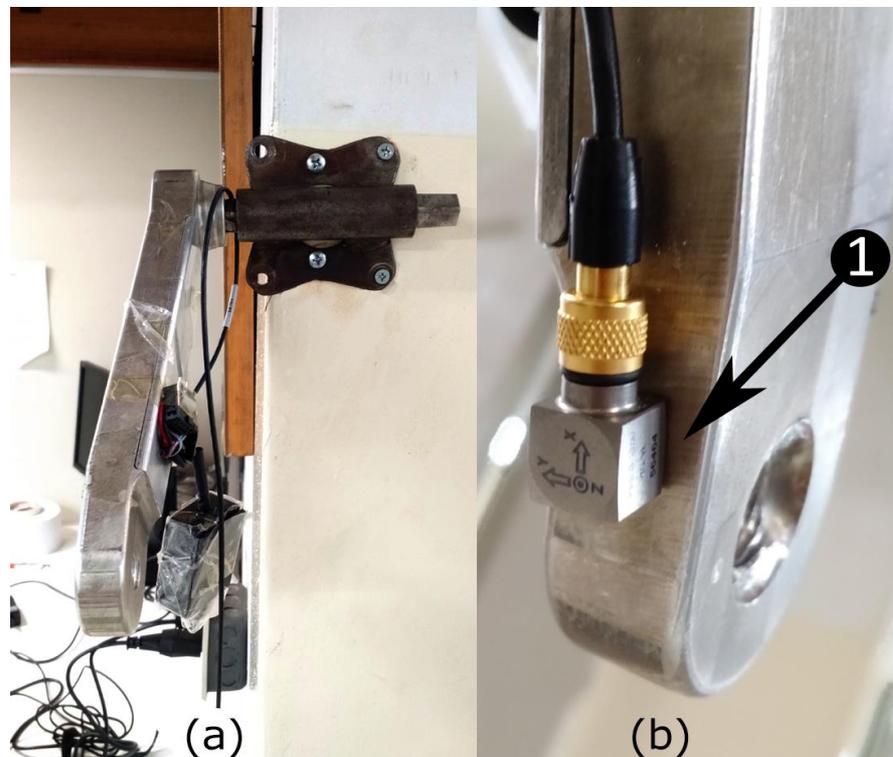
Para condicionamento e aquisição do sinal elétrico de saída de cada um dos Canais do sensor, utilizou-se o sistema de aquisição modelo NI-CDAQ 9174 em conjunto com o módulo para acelerometria NI9234, ambos fabricados pela *National Instruments*. Por fim, conectou-se o sistema de aquisição ao *software* LabView™ 2013 e adquiriu-se 50000 amostras à uma frequência de amostragem de 10kHz. A partir do sinal adquirido no domínio do tempo, aplicou-se a operação matemática de *FFT* e obteve-se o espectro de frequência da resposta dinâmica do sistema.

Tabela 12 - Tabela de calibração do acelerômetro tri-axial DeltaTron 4520 fabricado pela *Brüel & Kjaer*.

Eixo	X	Y	Z
Sensibilidade no eixo de medição [mV/g]	10,25	10,43	9,817
Faixa de Frequência [Hz]	2-7k	2-7k	2-7k
Frequência de Ressonância [kHz]	30	30	40
Sensibilidade Transversal ao eixo	< 5%	< 5%	< 5%
Faixa de medida [g]	500g	500g	500g

Fonte: Datasheet Deltatron 4050, *Brüel & Kjaer*, 2009.

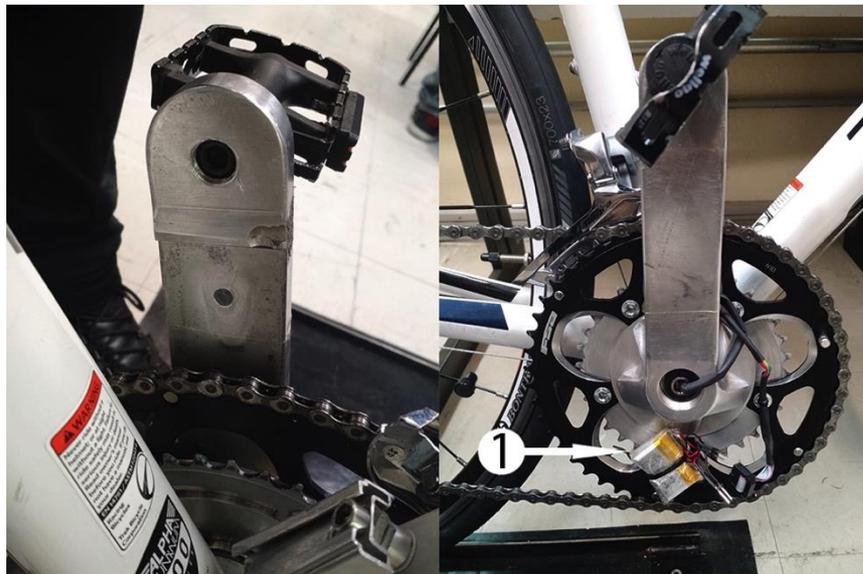
Figura 63 - Fixação do pedivela para realização do ensaio dinâmico: (a) pedivela esquerdo, (b) detalhe da fixação do acelerômetro e (1) acelerômetro.



3.6 Montagem do Sistema e Procedimentos de Ensaio com a Bicicleta

Para montagem do sistema completo na bicicleta, primeiramente fixou-se os pedivelas no eixo central da bicicleta. Para cada pedivela, utilizou-se um conjunto de baterias, como apresentado na Seção 3.3.1, fixando-as de forma a não interferir no funcionamento mecânico ou ergonômico da bicicleta. Posteriormente, fixou-se o módulo de aquisição e transmissão no pedivela esquerdo, passando-se os cabos de conexão do sistema de condicionamento do pedivela direito, Canais 4 a 6, pelo eixo central da bicicleta, e conectando-os no ArduIMU. Os Canais 1 a 6, são conectados nas entradas analógicas A0 a A7, presentes no microcontrolador. Na Figura 64 e Figura 65 é ilustrada a plataforma de força completa, instalada na bicicleta.

Figura 64 - Plataforma de força montada, pedivela direito: (1) sistema de alimentação.



Com o sistema montado, alimentou-se o circuito com as baterias, iniciou-se o *software* de aquisição, como apresentado na Seção 3.3.7, conferindo a devida recepção dos pacotes de dados. Na sequência, utilizou-se um rolo de treinamento para realizar o ensaio da pedalada. O rolo possibilita o uso da bicicleta, em ambiente interno e permite que o ciclista seja submetido à condições semelhantes às de competição (NASCIMENTO, 2014). A estrutura utilizada no ensaio pode ser visualizada na Figura 66, onde se percebe o sujeito pedalando a bicicleta de estrada.

Figura 65 - Plataforma de força montada, pedivela direito: (1) Sistema de alimentação e (2) Sistema de aquisição e transmissão.



Figura 66 - Ensaio de desempenho de ciclista amador em ambiente fechado.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenvolvimento da célula de carga experimental

Para realização das simulações das células de carga apresentadas nesse capítulo, definiu-se como material, no *software* SolidWorks™ 2015, o Alumínio 6061 T-6, cujas características são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas do 6061 T6.

Propriedade Mecânica	Módulo	Unidades (S.I)
Modulo elástico	69	GPa
Coeficiente de Poisson	0.33	Sem unidade
Modulo de cisalhamento	310	MPa
Massa especifica	2,7	g/cm ³
Resistencia à tração	310	MPa
Limite de escoamento	275	MPa
Coeficiente de expansão térmica	0,0000234	/K
Condutividade térmica	166,9	W/(m.K)
Calor específico	896	J/(kg.K)

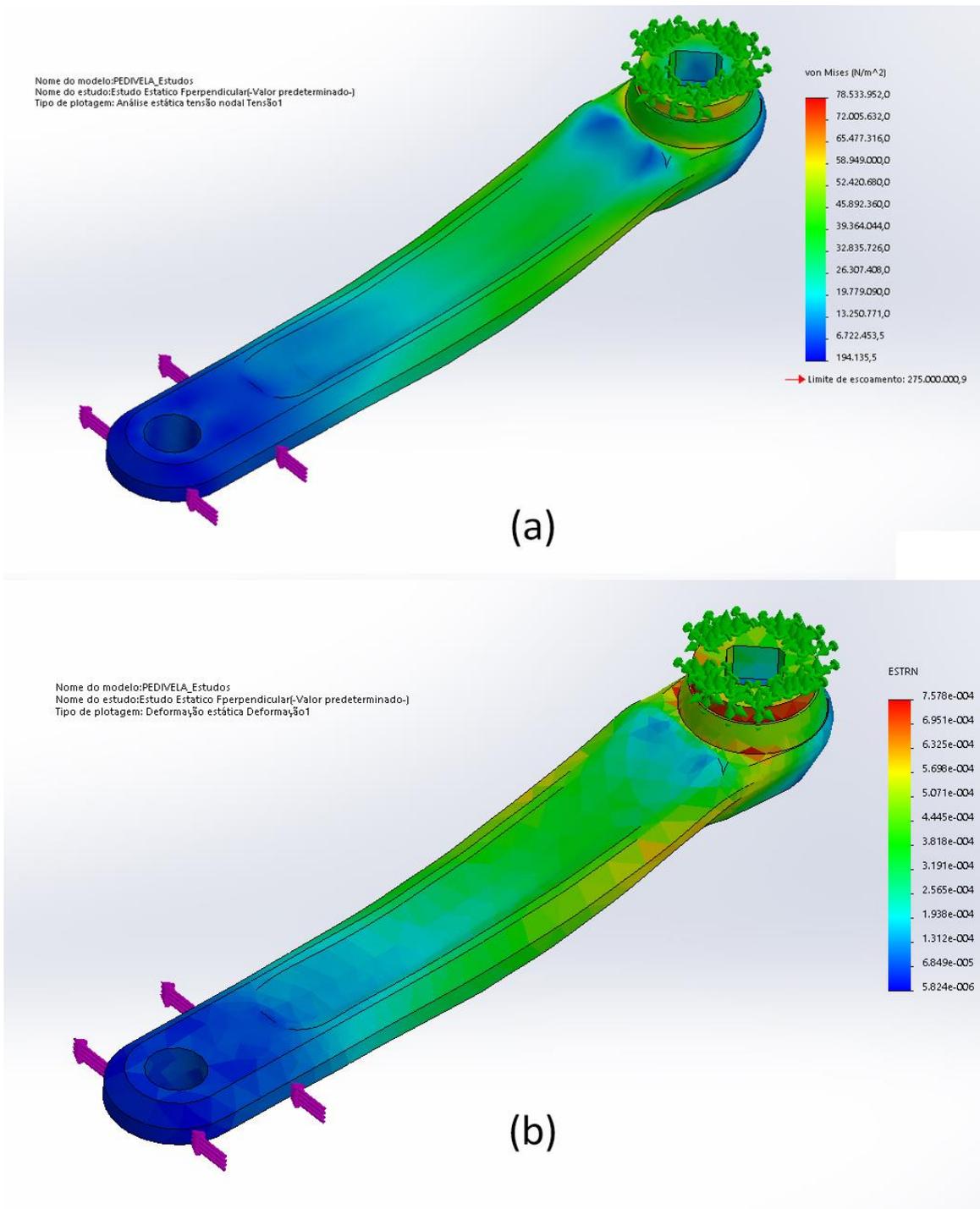
Fonte: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6061-T6-Extrusions_145.ashx

4.1.1 Resultados da análise estrutural da célula comercial

A Figura 67 apresenta os resultados da simulação estática, de tensão mecânica (a) e deformação (b), para aplicação da carga de 735,75N na direção perpendicular, do pedivela comercial fabricado pela FSA. Nota-se que a tensão mecânica tem módulo máximo de 78,53MPa na proximidade do furo de acoplamento, o que confere um fator de segurança de 3, já que a tensão limite de escoamento do material de fabricação é de 275MPa. Além disso, nota-se que o ponto de maior deformação relativa, com espaço suficientemente para cimentar um extensômetro, apresenta um valor de aproximadamente 600 $\mu\epsilon$.

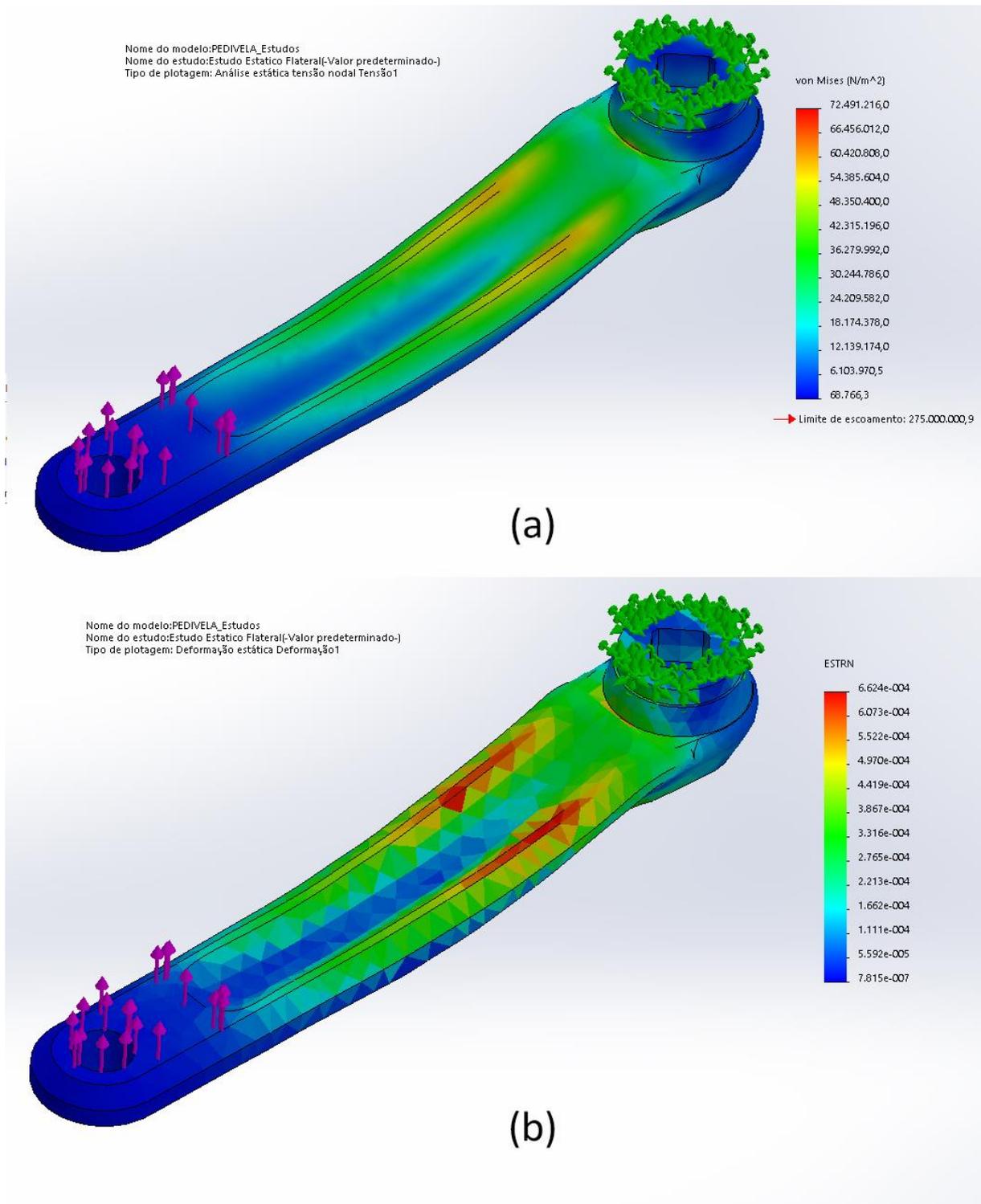
A Figura 68 ilustra os resultados da tensão mecânica (a) e deformação (b) para aplicação de um carregamento de 294,3N na direção lateral. Nota-se que a tensão mecânica tem módulo máximo de 72,49MPa na proximidade do furo de acoplamento, o que confere um fator de segurança de 3. O ponto de maior deformação relativa, com espaço suficientemente para cimentar um extensômetro, apresenta um valor de aproximadamente 300 $\mu\epsilon$.

Figura 67 – Padrão de tensões mecânicas e deformação, célula de carga comercial: direção perpendicular.



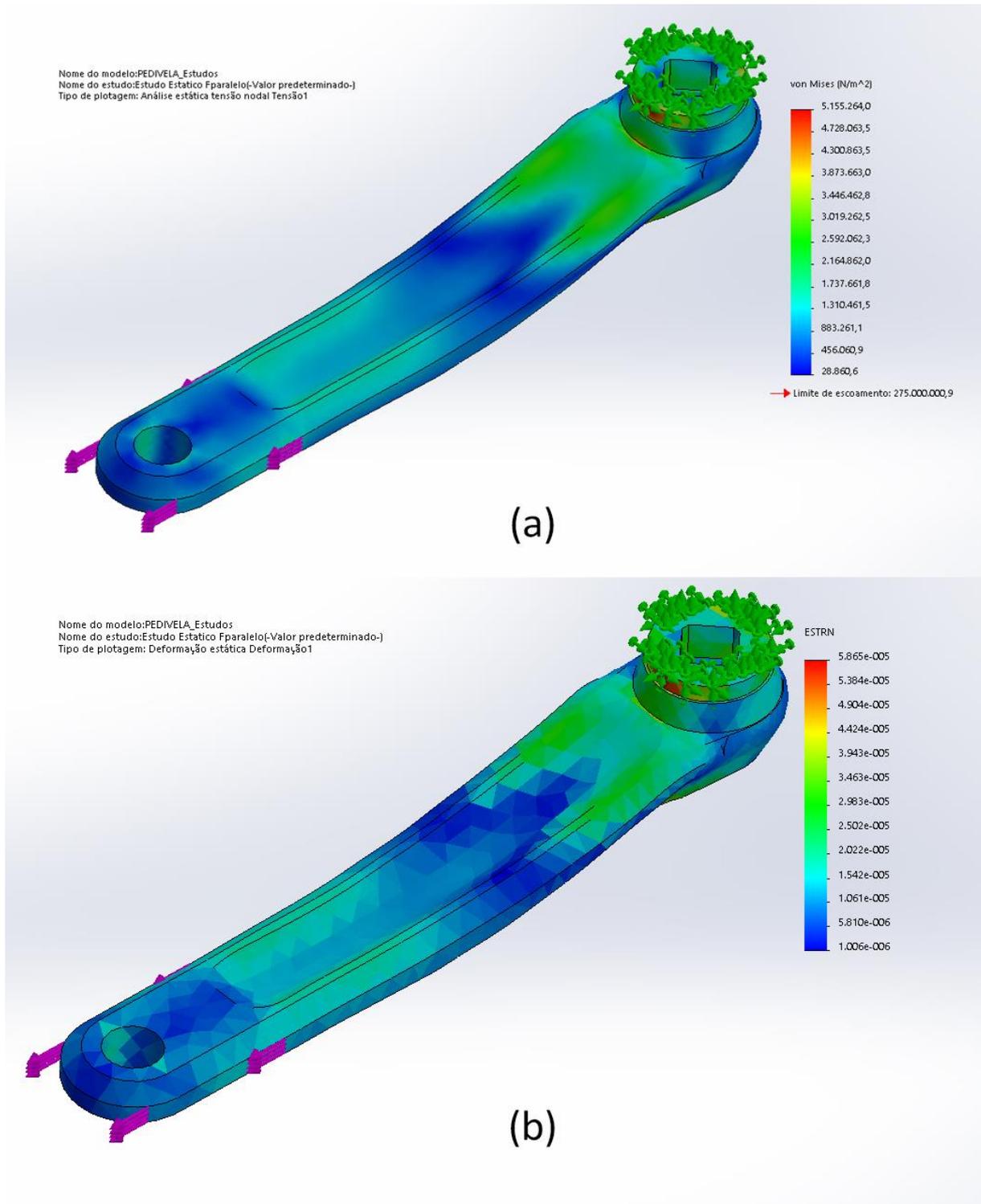
A Figura 69 ilustra os resultados da tensão mecânica (a) e deformação (b) para aplicação de um carregamento de 294,3N na direção lateral. Nota-se que a tensão mecânica tem módulo máximo de 72,49MPa na proximidade do furo de acoplamento, o que confere um fator de segurança de 3. O ponto de maior deformação relativa, com espaço suficientemente para cimentar um extensômetro, apresenta um valor de aproximadamente 275 $\mu\epsilon$.

Figura 68- Padrão de tensões mecânicas e deformação, célula de carga comercial: direção lateral.



Dessa forma, utilizou-se os dados apresentados nesta Seção para definir as dimensões físicas da célula de carga experimental. Os resultados obtidos através das simulações realizadas a partir do modelo virtual da célula de carga experimental são apresentados na Seção 4.1.2.

Figura 69- Padrão de tensões mecânicas e deformação, célula de carga comercial: direção paralela.



4.1.2 Resultados da análise estrutural virtual da célula de carga experimental

A Figura 70 e a Figura 71 apresentam a tensão mecânica e a deformação, respectivamente, obtidas através da simulação estática, para aplicação da carga de 735,75N na direção perpendicular, do pedivela experimental. Percebe-se que a tensão mecânica tem módulo máximo de 42,23MPa, o que confere um fator de segurança de 6, já que a tensão limite de escoamento do material utilizado na fabricação do pedivela é de 275MPa. Através da Figura 71, nota-se que a deformação relativa, no ponto de cimentação dos extensômetros, referentes à medida da componente de força perpendicular, apresenta um valor de $186 \mu\epsilon$.

Figura 70 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Mises, do pedivela direito: carregamento na direção perpendicular.

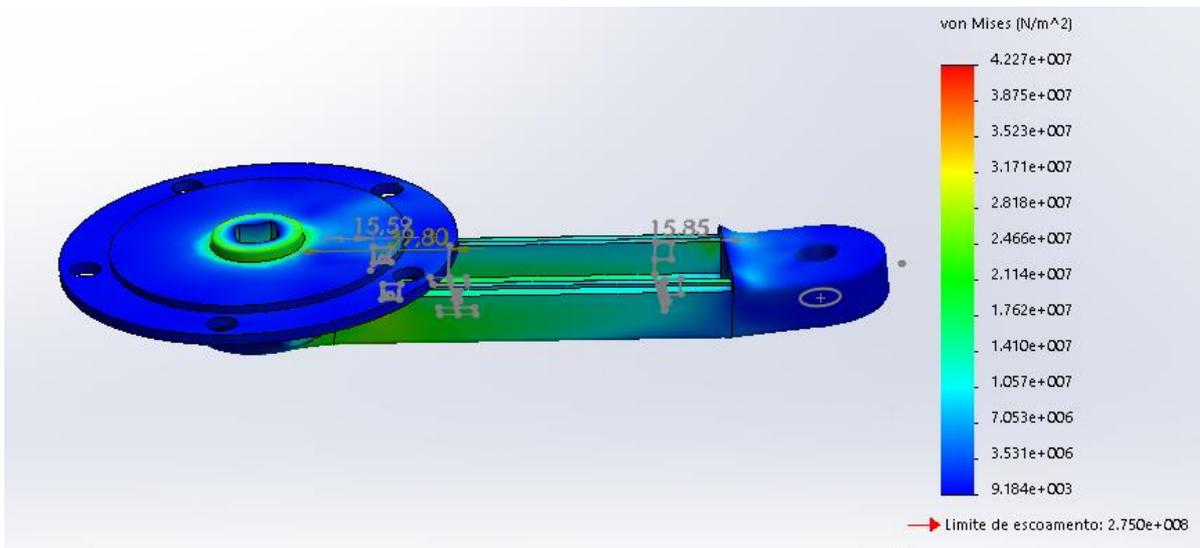
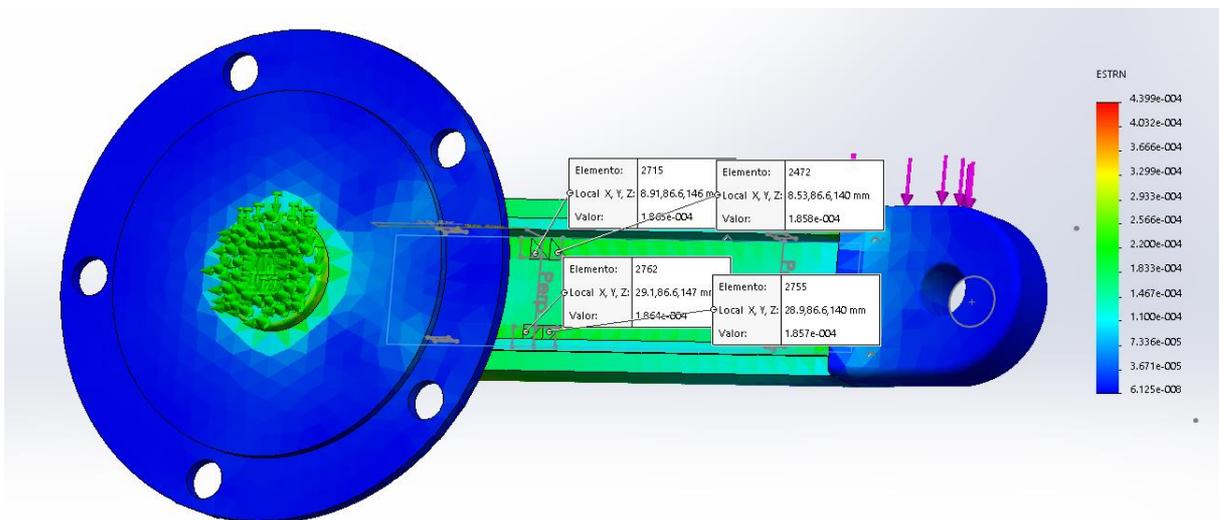


Figura 71 - Deformação relativa do pedivela direito: carregamento na direção perpendicular.



Na Figura 72 e na Figura 73 é apresentada a distribuição de tensão mecânica e a deformação, obtidas através da simulação estática, para aplicação da carga de 294,3N na direção lateral, do pedivela experimental. Nota-se que a tensão mecânica tem módulo máximo de 75,2MPa, o que confere um fator de segurança de 3. Através da Figura 73, nota-se que a deformação relativa, no ponto de cimentação dos extensômetros referentes à medida da componente de força lateral, apresenta um valor de 429 $\mu\epsilon$.

Figura 72 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Mises, do pedivela direito: carregamento na direção lateral.

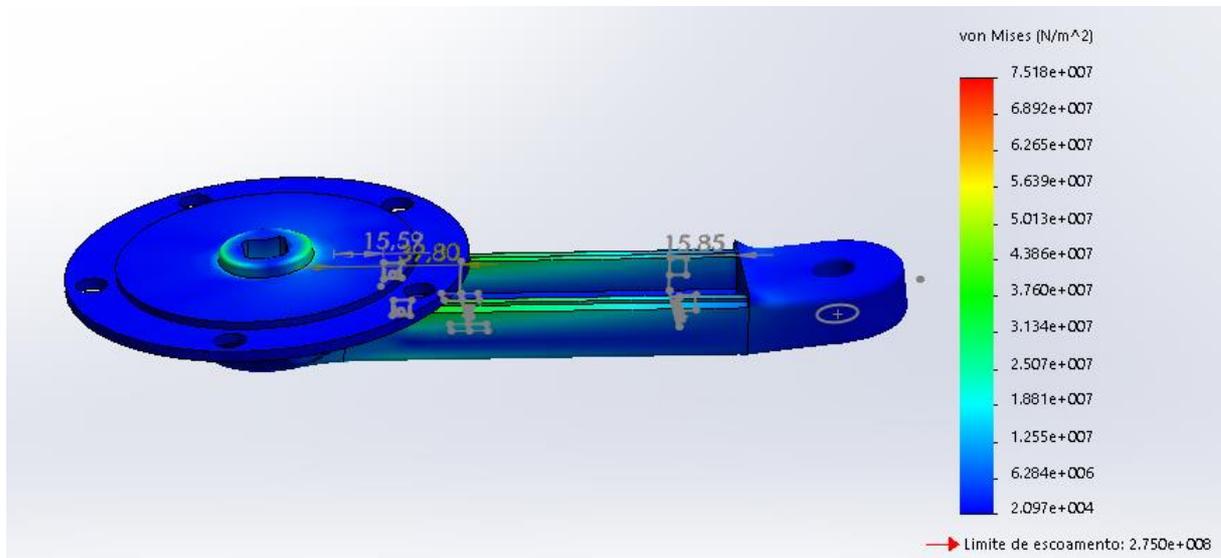
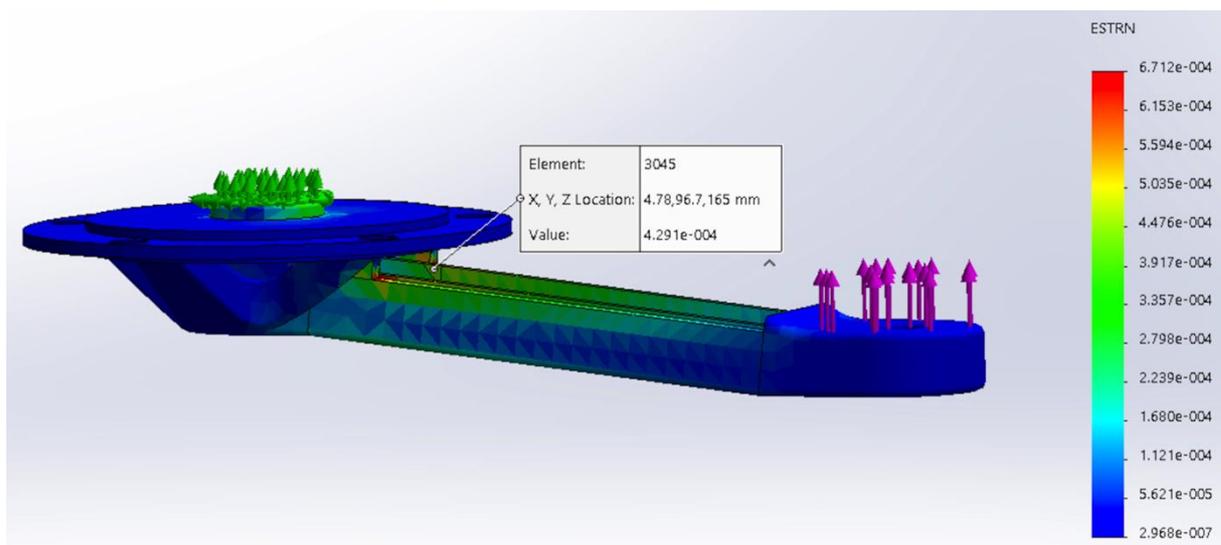


Figura 73 - Deformação relativa do pedivela direito: carregamento na direção lateral.



A Figura 74 e a Figura 75 apresentam a tensão mecânica e a deformação, obtidas através da simulação estática, para aplicação da carga de 294,3N na direção paralela, do

pedivela experimental. Nota-se que a tensão mecânica tem módulo máximo de 5,4MPa, o que confere um fator de segurança de 50, já que a tensão limite de escoamento do material de fabricação é de 275MPa. Através da Figura 75, percebe-se que a deformação relativa, no ponto de cimentação dos extensômetros referentes à medida da componente de força paralela, apresenta um valor de $7 \mu\epsilon$.

Figura 74 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Mises, do pedivela direito: carregamento na direção paralela.

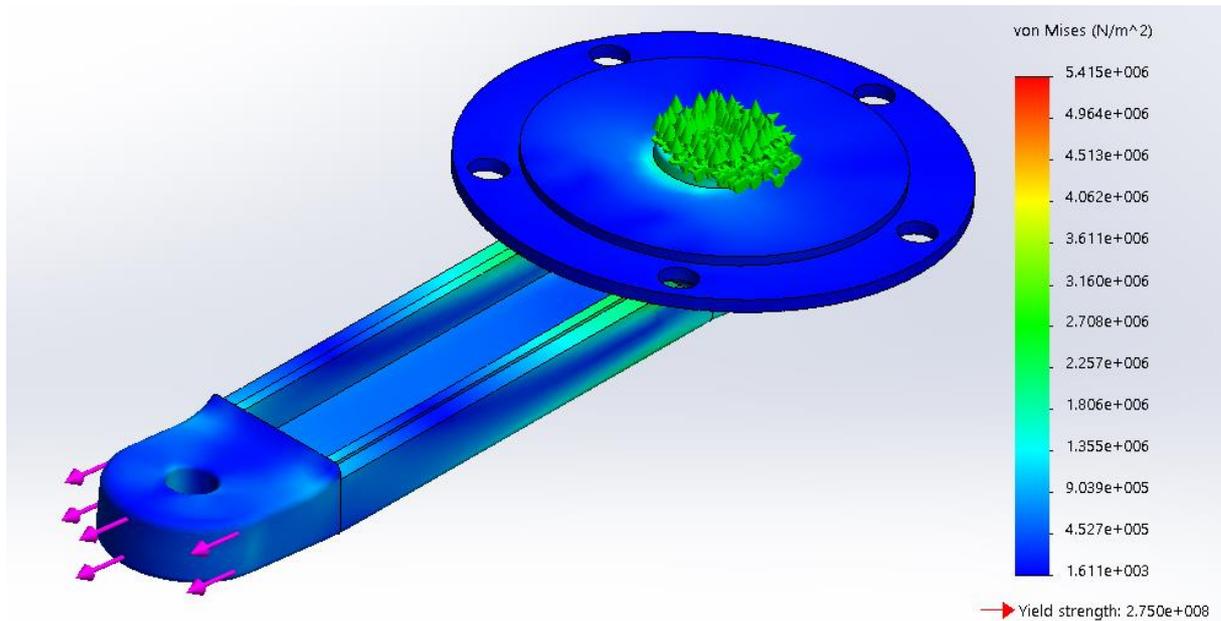
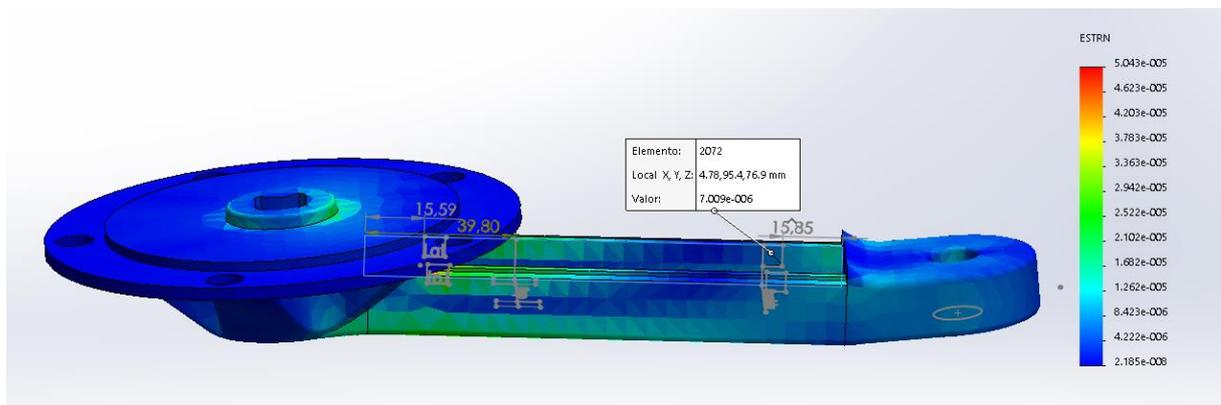


Figura 75 - Deformação relativa do pedivela direito: carregamento na direção paralela.



A Figura 76 apresenta a tensão mecânica e a Figura 77, a deformação relativa, para aplicação da carga de 735,75N na direção perpendicular, do pedivela experimental. Nota-se que a tensão mecânica tem módulo máximo de 69,4MPa, o que confere um fator de segurança de módulo 3. Através da Figura 77, nota-se que a deformação relativa, no ponto de

cimentação dos extensômetros, referentes à medida da componente de força perpendicular, apresenta um valor médio de $190,1 \mu\epsilon$.

Figura 76 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Mises, do pedivela esquerdo: carregamento na direção perpendicular.

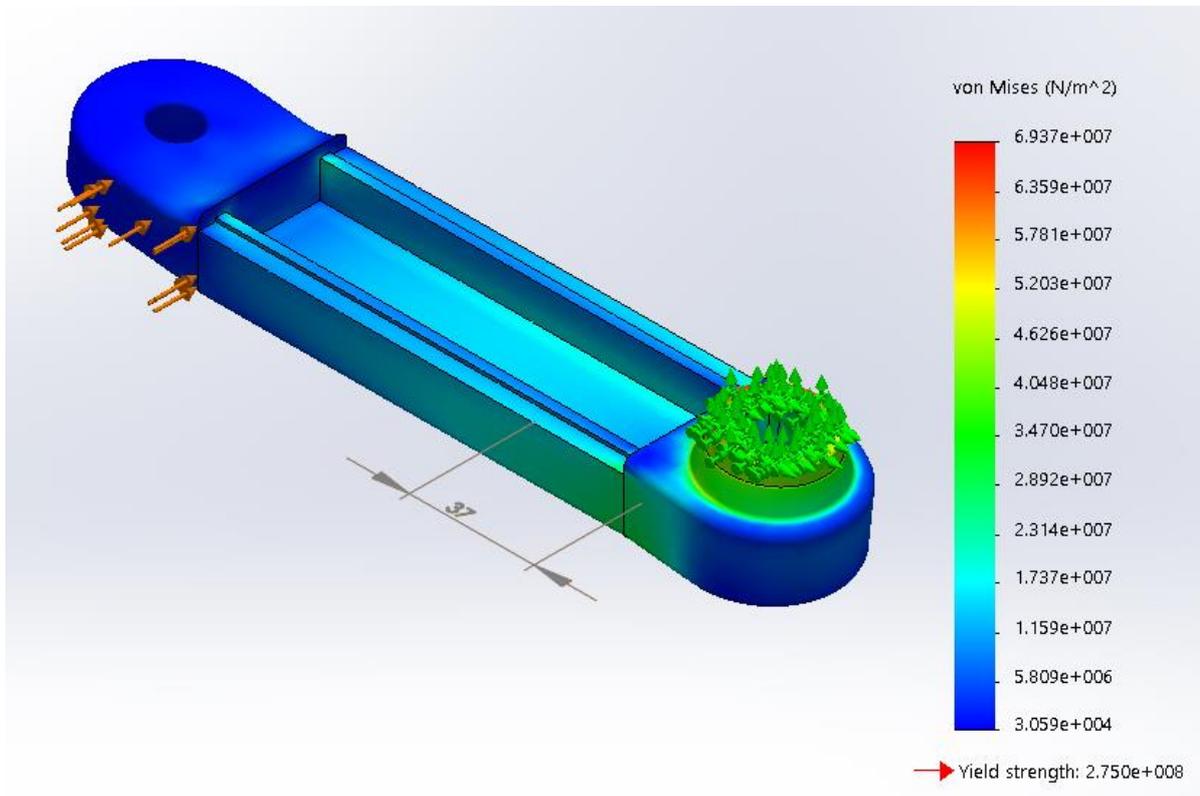
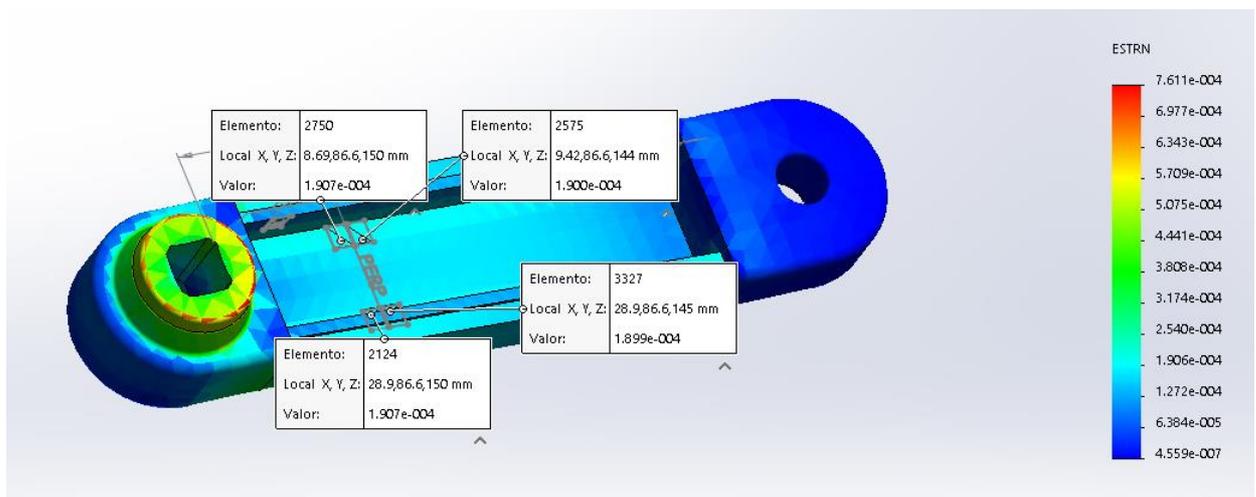


Figura 77 - Deformação relativa do pedivela esquerdo: carregamento na direção perpendicular.



A Figura 78 e a Figura 79 apresentam a tensão mecânica e a deformação relativa, para aplicação da carga de 294,3N na direção lateral, da célula de carga experimental. Percebe-se

que a tensão mecânica tem módulo máximo de 67,0MPa, o que confere um fator de segurança de módulo 4. Através da Figura 79, nota-se que a deformação relativa, no ponto de cimentação dos extensômetros referentes à medida da componente de força lateral, apresenta um valor de 475 $\mu\epsilon$.

Figura 78 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela esquerdo: carregamento na direção lateral.

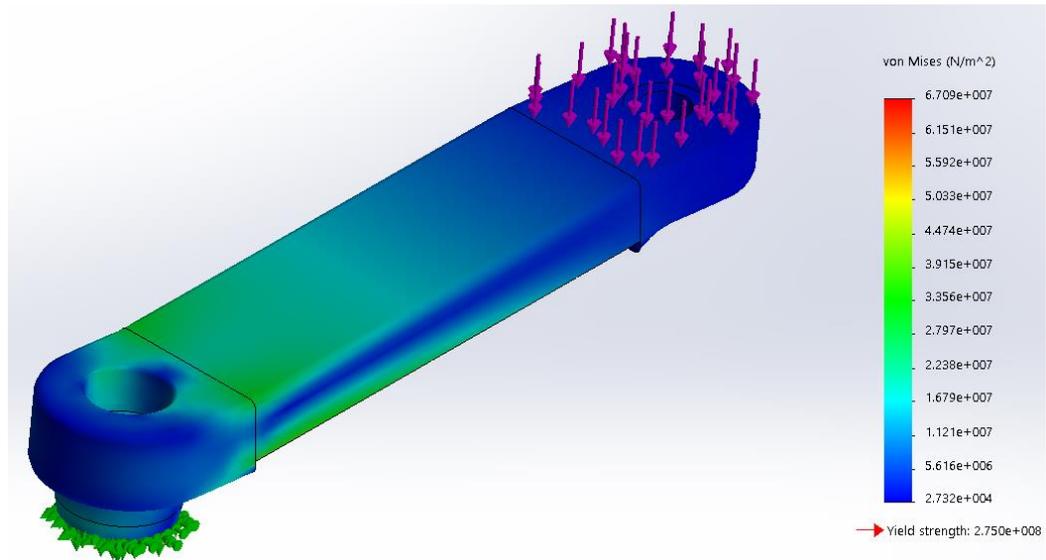
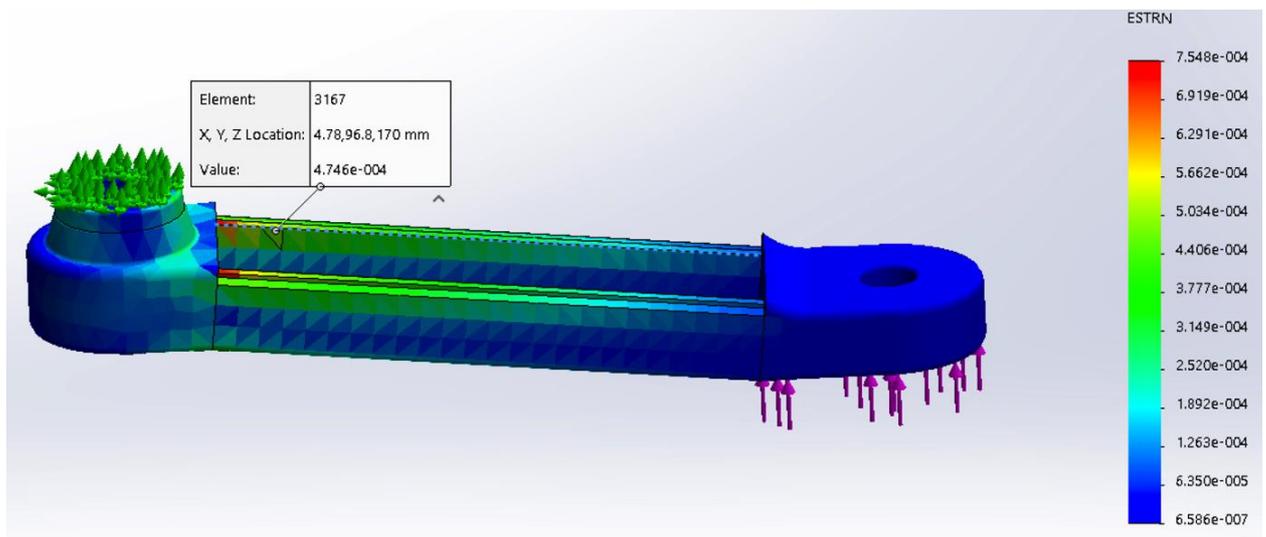


Figura 79 - Deformação relativa do pedivela esquerdo: carregamento na direção lateral.



A Figura 80 e a Figura 81 apresentam os resultados da simulação estática, para aplicação da carga de 294,3N na direção lateral, do pedivela experimental. Percebe-se, através da Figura 80 que a tensão mecânica tem módulo máximo de 7,61MPa, o que confere um fator

de segurança de 36, considerando que a tensão limite de escoamento do material de fabricação é de 275MPa. Através da Figura 81, nota-se que a deformação relativa, no ponto de cimentação dos extensômetros referentes à medida da componente de força paralela, apresenta um valor de $7 \mu\epsilon$.

Figura 80 - Distribuição da tensão mecânica, pelo critério de von Misses, do pedivela esquerdo: carregamento na direção paralela.

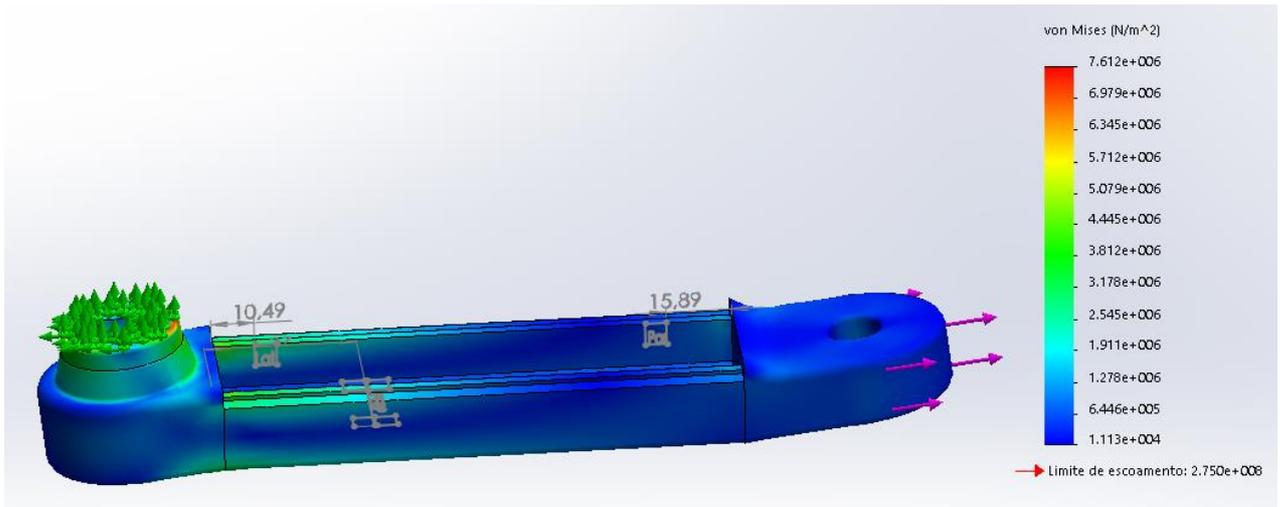
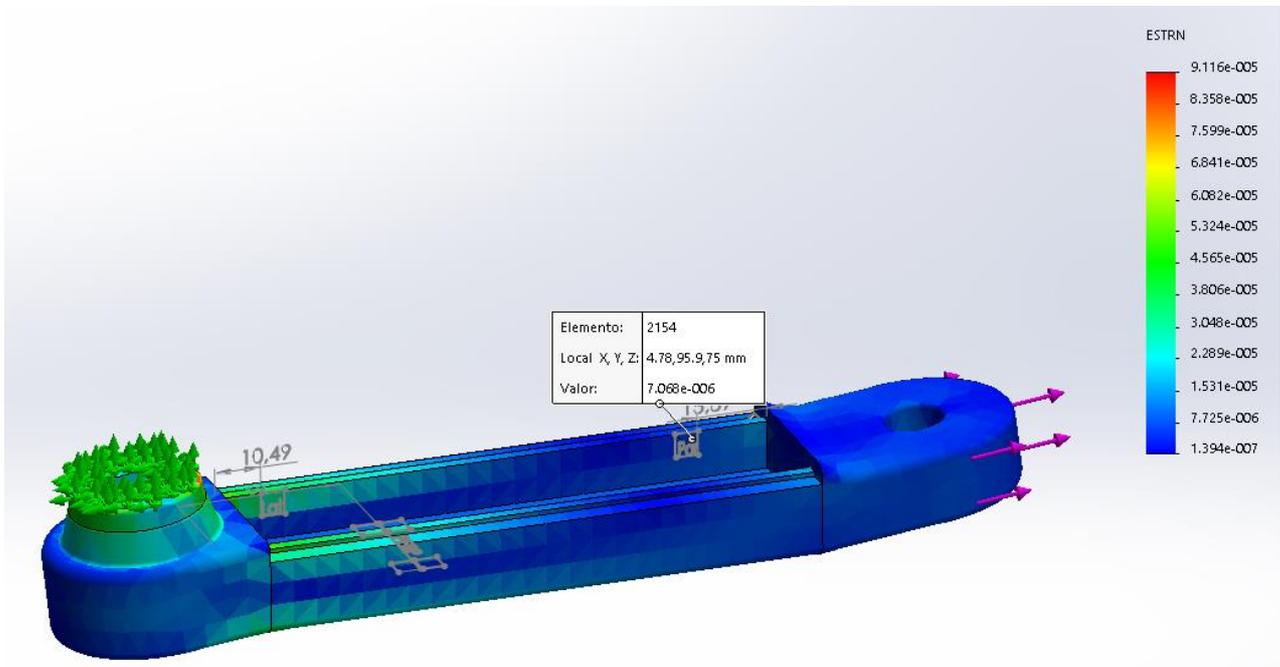


Figura 81 - Deformação relativa do pedivela esquerdo: carregamento na direção paralela.



Pela análise da Figura 79 e da Figura 81, nota-se as regiões de deformação principal devido ao carregamento na direção lateral e paralela não são isoladas entre si, dessa forma,

não é possível desacoplar mecanicamente a medida da força nessas duas componentes. Portanto, a plataforma de força medirá a combinação das duas forças. Para um carregamento na direção lateral, ter-se-á uma deformação de 17%, em relação ao ponto de deformação máximo dessa componente, no ponto de medida da deformação referente ao carregamento na direção paralela. Para um carregamento na direção paralela, ter-se-á uma deformação de 600%, em relação ao ponto de medida dessa componente, no ponto de medida da deformação referente ao carregamento na direção lateral.

Apesar de não haver um completo desacoplamento mecânico, a partir das funções de transferência obtidas durante o ensaio de carregamento estático, é possível desacoplar as forças via *software*; este tema não é abordado no presente trabalho.

A Figura 82 e a Figura 83 apresentam o resultado da simulação dinâmica para o primeiro modo ressonante da célula de carga experimental. Nota-se que, para o pedivela direito, a frequência de ressonância fundamental é de 380,01Hz, já para o esquerdo, é de 325,57Hz. Os valores de frequência obtidos para os outros modos ressonantes são apresentados na Tabela 14 e, as respectivas ilustração encontram-se nos Anexos I e J.

Figura 82 – Resultado da simulação dinâmica, primeiro modo ressonante: pedivela direito.

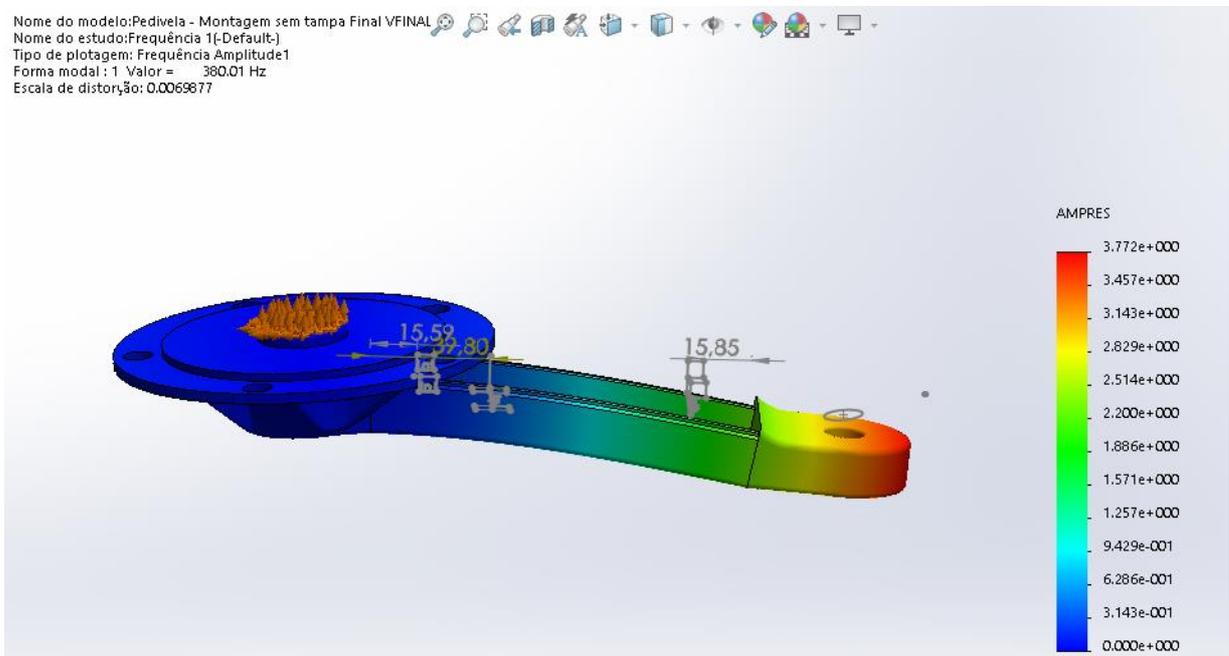


Figura 83 - Resultado da simulação dinâmica, primeiro modo ressonante: pedivela esquerdo.

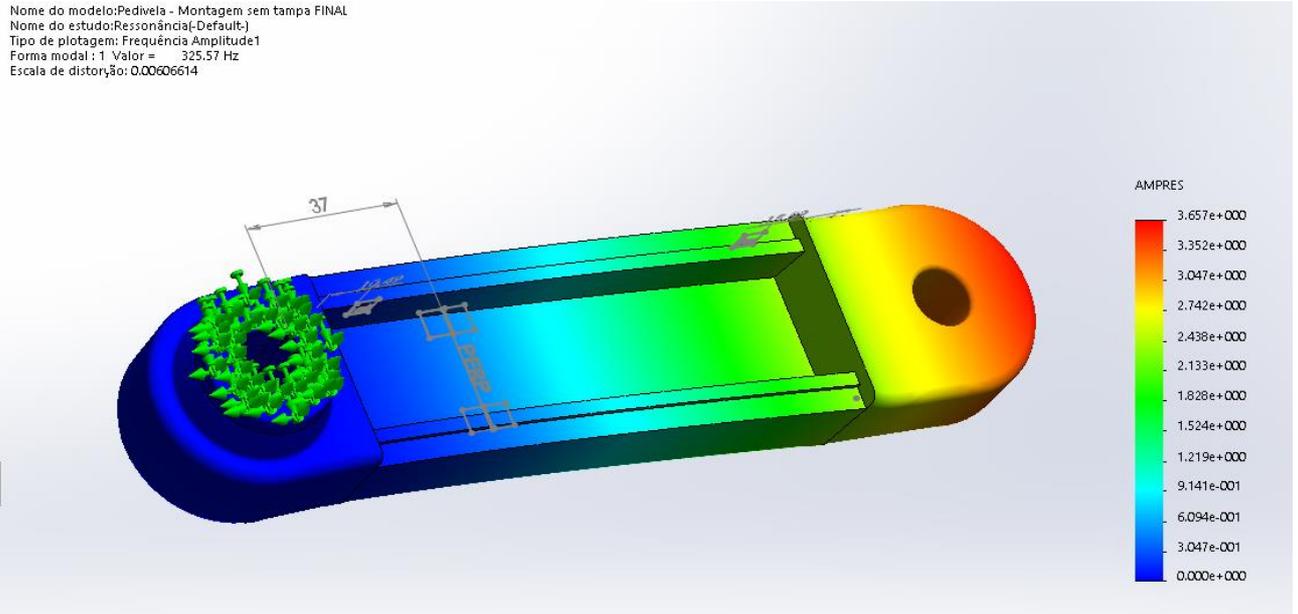


Tabela 14 - Modos ressonantes referentes ao pedivela direito e esquerdo.

Pedivela	Modo Ressonante	Frequência [Hz]
Direito	1	380,01
	2	714,79
Esquerdo	1	325,57
	2	623,62

Sendo assim, já que a máxima frequência do fenômeno físico ao qual o pedivela é submetido é da ordem de 2Hz (NABINGER, 2006), a razão entre a frequência de ressonância da célula de carga e a frequência a qual é submetida durante a aplicação é de, aproximadamente, 160 para a célula de carga esquerda e 180 para a célula de carga direita. Portanto, considera-se que a frequência do primeiro modo ressonante é adequada à aplicação.

4.2 Determinação das Funções de Transferência Experimentais de Deformação

Na Figura 84 à Figura 86 são apresentados as curvas e funções de transferência geradas a partir das medidas de deformação relativa, em [$\mu\text{m}/\text{m}$], nos pontos de colagem dos extensômetros, em função da carga, em [N], aplicada no pedivela esquerdo. Os resultados referentes ao pedivela direito, são apresentados na Figura 87 à Figura 89.

Figura 84 – Curva de deformação do pedivela esquerdo em função da aplicação de força na direção perpendicular.

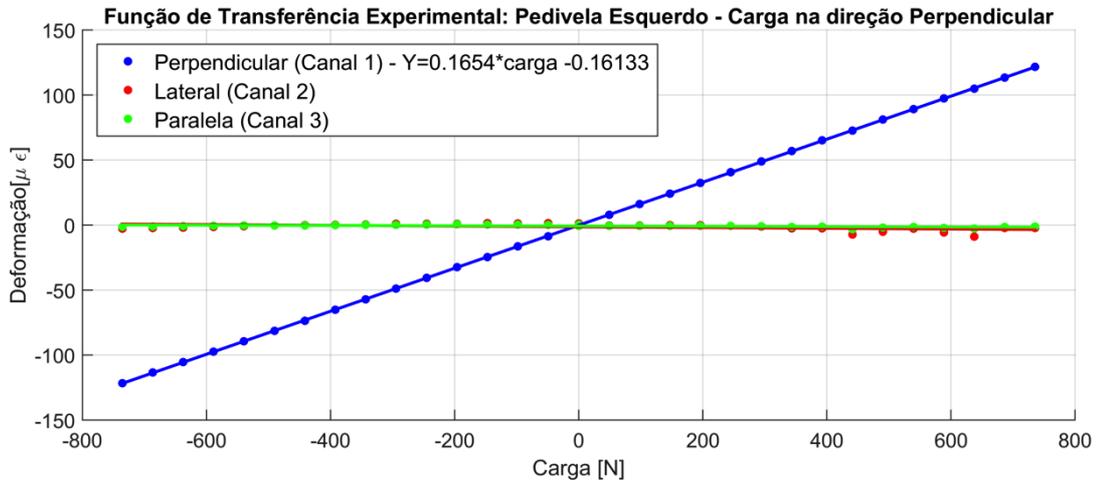


Figura 85 - Curva de deformação do pedivela esquerdo em função da aplicação de força na direção lateral.

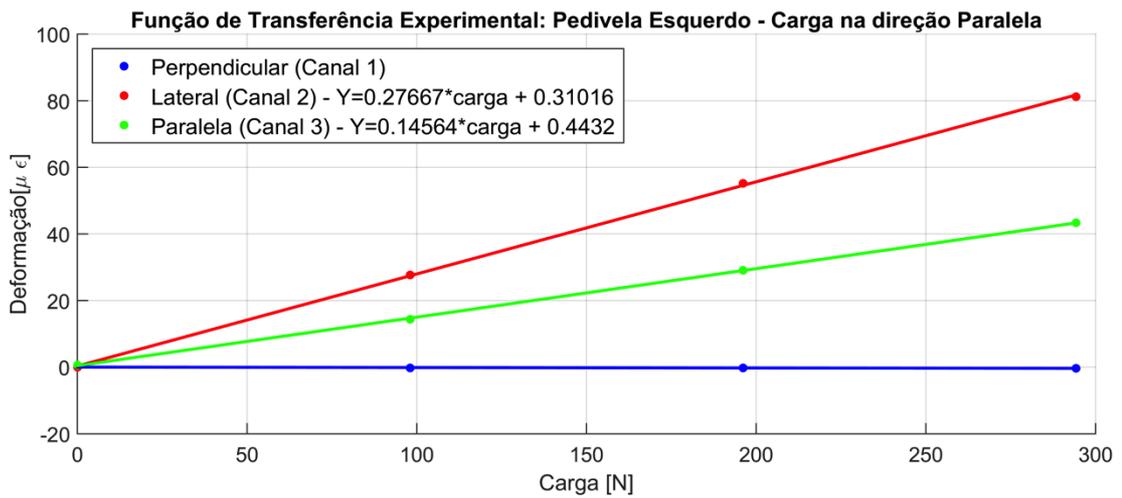


Figura 86 - Curva de deformação do pedivela esquerdo em função da aplicação de força na direção paralela.

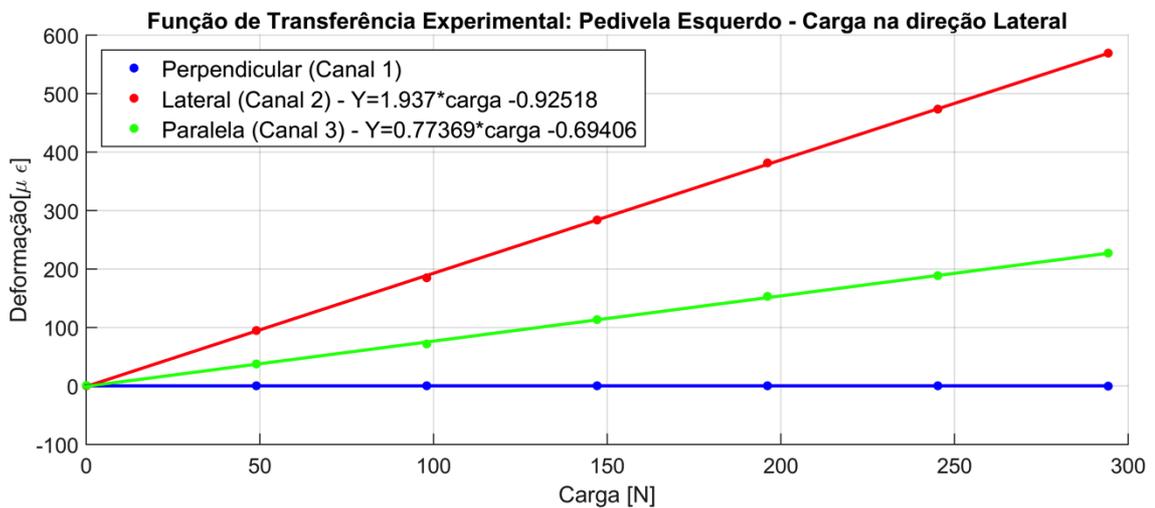


Figura 87 - Curva de deformação do pedivela direito em função da aplicação de força na direção perpendicular.

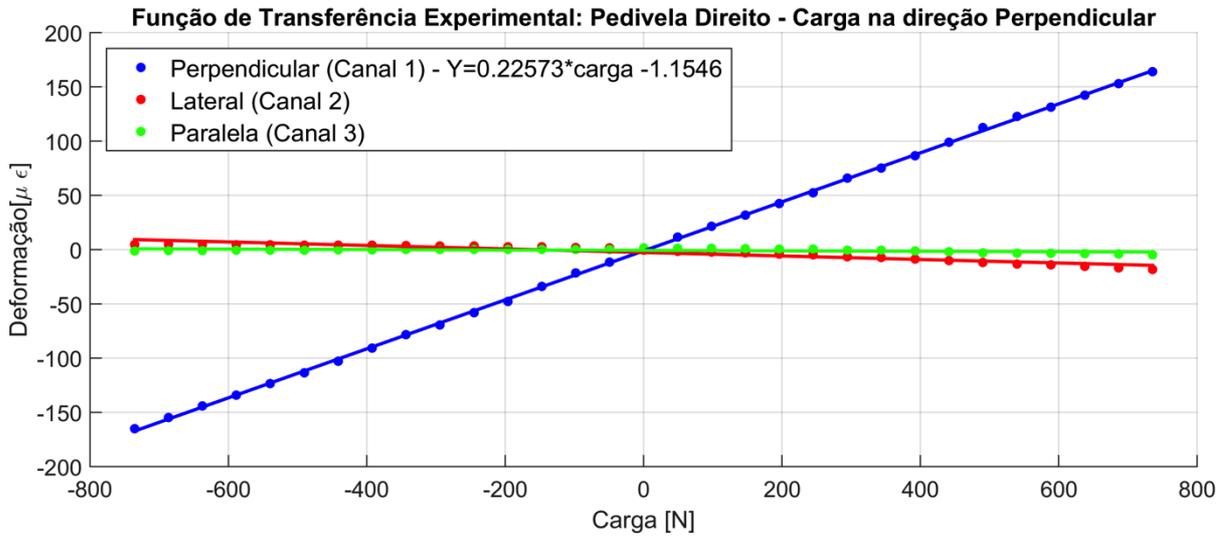


Figura 88 - Curva de deformação do pedivela direito em função da aplicação de força na direção lateral.

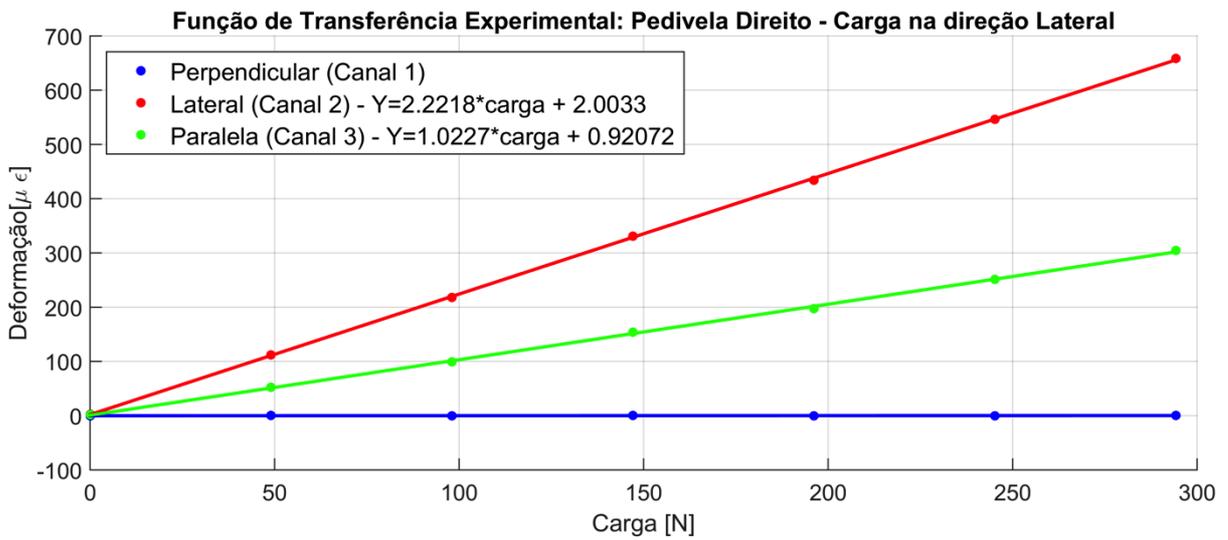
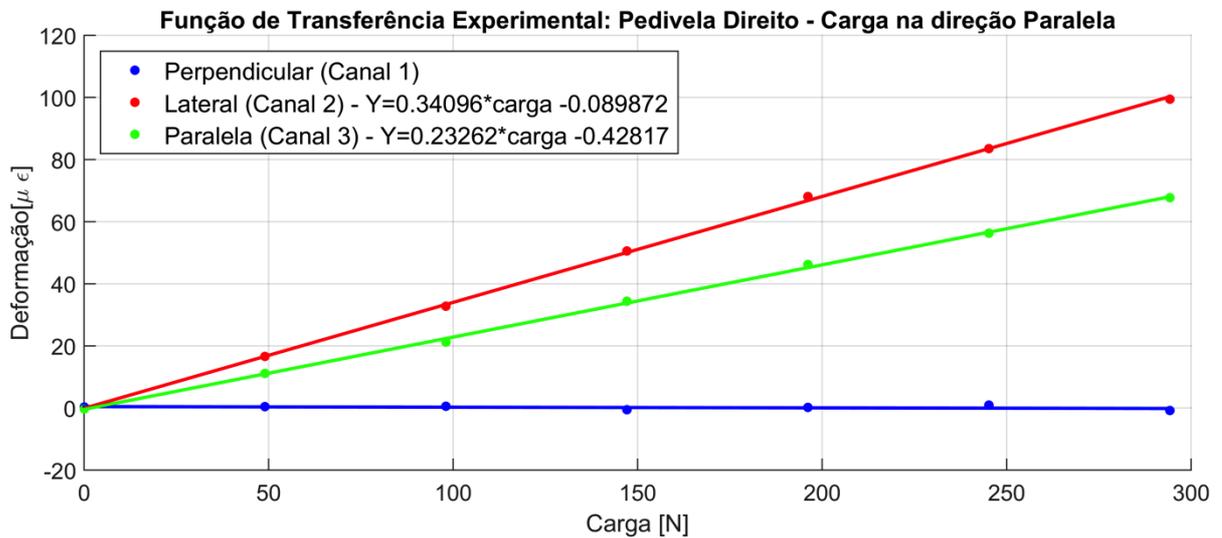


Figura 89 - Curva de deformação do pedivela direito em função da aplicação de força na direção paralela.



Nota-se através da análise da Figura 84 à Figura 89 que a maior deformação ocorre no eixo de aplicação de carga lateral, para a aplicação de força no respectivo eixo. Além disso, percebe-se a dependência entre as deformações lateral e paralela, de forma que, para um carregamento na direção lateral, tem-se uma medida de deformação no eixo paralelo de 39,9% da medida no eixo lateral, para o pedivela esquerdo, e de 46,0% para o pedivela direito. Para um carregamento na direção paralela, têm-se que, a medida de deformação na direção paralela, é equivalente a 52,9% da medida de deformação no eixo lateral, para a célula de carga esquerda, e de 67,8% para a célula de carga direita. Por fim, percebe-se que não há relação entre a medida de força no eixo perpendicular e os outros eixos, visto que, para um carregamento na direção perpendicular (Figura 84 e Figura 87), os eixos referentes as deformações na direção paralela e lateral não apresentam uma linha de tendência, apenas algumas variações em torno do eixo das abscissas, causadas pelo deslocamento do centro de massa durante o ensaio de levantamento da função de transferência experimental, já que o processo foi realizado manualmente, com pesos padrão e um suporte cuja estrutura não garante o perfeito nivelamento da peça. A mesma característica de desacoplamento, é percebida na

Figura 85 à Figura 89, onde nota-se que o carregamento na direção lateral e paralela não causa deformação na direção perpendicular.

A partir das curvas de calibração experimental obtidas e da Equação (17), calculou-se os valores do erro de linearidade para cada canal. A Tabela 15 apresenta as funções de transferência da deformação em $[\mu\epsilon]$ em função da carga em [N], o erro de linearidade, o carregamento e a sensibilidade, respectivos a cada canal.

É importante ressaltar que este tipo de ensaio, para uma engenharia eficiente e com respeito à área de medidas, deveria ter sido realizado em uma máquina de ensaios, com laudo de calibração válido, valores de incerteza definidos, dentre outros parâmetros necessários para o procedimento de calibração padrão de uma célula de carga.

Tabela 15 - Características principais das células de carga.

Canal	Carregamento		Deformação [$\mu\epsilon$]	Função de Transferência [$\mu\epsilon$]	Erro de Linearidade [%]	Sensibilidade [$\mu\epsilon/N$]
	Carga [kg]	Carga [N]				
1	± 75	$\pm 735,7$	$\pm 121,6$	$y = 0,1654 \cdot carga - 0,1613$	0,4006	0,1653
2	± 30	$\pm 294,3$	$\pm 569,2$	$y = 1,937 \cdot carga - 0,9252$	0,7104	1,934
3	± 30	$\pm 294,3$	$\pm 43,38$	$y = 0,1456 \cdot carga + 0,4432$	0,7903	0,1474
4	± 75	$\pm 735,7$	$\pm 164,9$	$y = 0,2257 \cdot carga - 1,155$	1,836	0,2241
5	± 30	$\pm 294,3$	$\pm 658,1$	$y = 2,222 \cdot carga + 2,003$	0,5675	2,236
6	± 30	$\pm 294,3$	$\pm 67,76$	$y = 0,2326 \cdot carga - 0,4282$	1,787	0,2302

Através dos resultados apresentados na Tabela 15, nota-se que os erros de linearidade máximos são de 1,836%, para o Canal 4 (medida de força na direção perpendicular do pedivela direito), e 1,787% para o canal 6 (medida de força na direção paralela do pedivela direito). Para os outros Canais, o erro de linearidade fica abaixo de 1%. Além disso, nota-se que a sensibilidade dos Canais de medida das forças perpendicular e paralela fica na faixa de 0,2 [$\mu\epsilon/N$], enquanto a sensibilidade dos Canais 3 e 6 (medida de força na direção lateral) fica na faixa de 2 [$\mu\epsilon/N$], o que está de acordo com a simulação.

Por fim, observa-se que a maior diferença entre o valor de deformação máxima simulado e o valor medido ocorre na direção de aplicação de força perpendicular do pedivela esquerdo, onde a deformação máxima simulada é 56% maior do que o valor máximo medido experimentalmente para um mesmo carregamento. Para as outras direções, em média, o valor difere em aproximadamente 34%, exceto para os Canais 3 e 6 (medidas das forças na direção paralela do pedivela esquerdo e direito, respectivamente), que, pelos motivos já citados neste capítulo (à respeito de desacoplamento mecânico entre as forças paralela e lateral, e ausência de uma máquina de ensaios para realizar a calibração de forma correta), não apresenta semelhança.

4.3 Ensaio Dinâmico

A análise dinâmica das células de carga é fundamental para a determinação da frequência de ressonância do primeiro modo ressonante, visto que este deve ter valor acima do fenômeno físico que se deseja medir. Dessa forma, a Figura 90 e a Figura 91 apresentam a resposta dinâmica experimental das células de carga desenvolvidas, no domínio do tempo e da frequência, de acordo com o procedimento experimental descrito na Seção 3.5.

Através da Figura 90 e da Figura 91, estima-se que, a frequência do primeiro modo ressonante é de 140Hz para o pedivela esquerdo e 136Hz, para o direito, o que difere do valor encontrado na análise virtual. A diferença entre os valores, experimental e virtual, tipicamente está associada a dois fatores: o primeiro (mais influente), é a diferença entre a forma como é realizado o engaste da peça no modelo computacional e no experimental, e o segundo, as diferenças dimensionais (devido ao processo de fabricação) entre o modelo virtual da célula de carga e a célula de carga experimental.

Figura 90 - Curvas da resposta dinâmica no domínio do tempo e frequência: Pedivela Esquerdo.

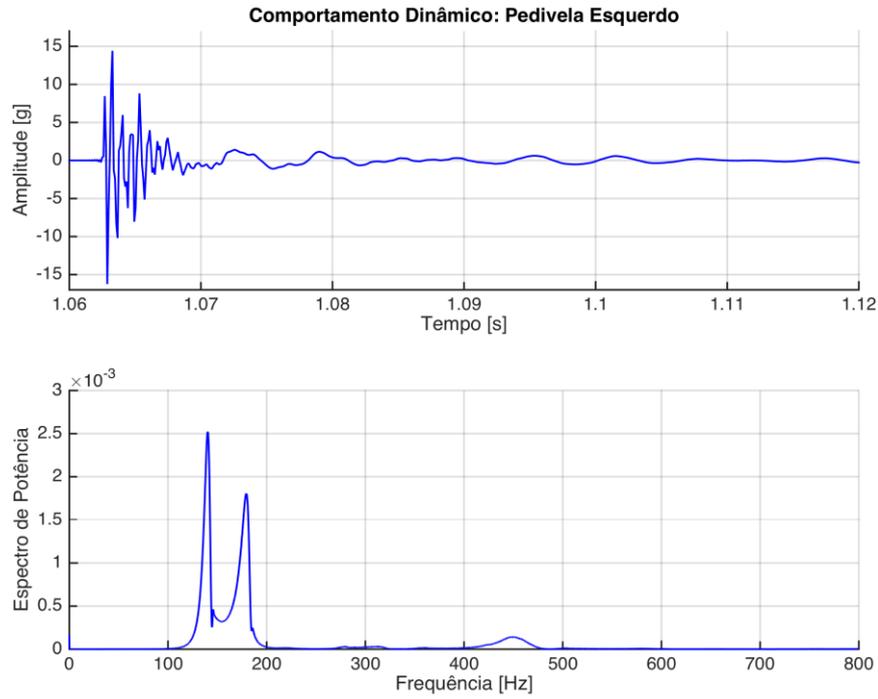
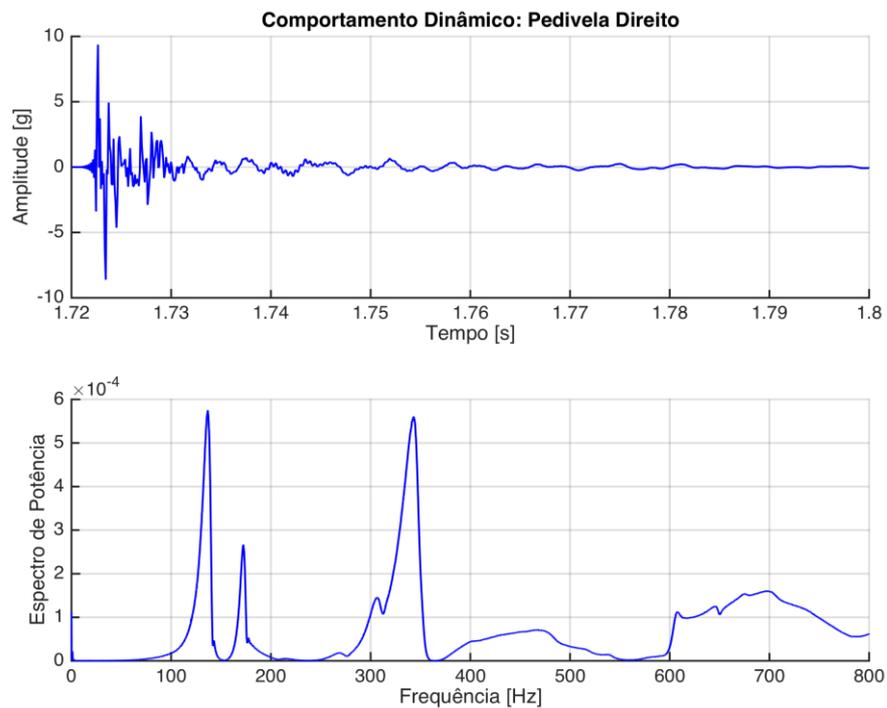


Figura 91- Curvas da resposta dinâmica no domínio do tempo e frequência: Pedivela Direito.



Dessa forma, visto que a máxima frequência do fenômeno físico ao qual o pedivela é submetido é da ordem de 2Hz, a razão entre a frequência de ressonância da célula de carga e a frequência a qual é submetida é de, aproximadamente, setenta. Sendo assim, considera-se que

a frequência de ressonância da célula de carga experimental é suficientemente alta para evitar a ocorrência de interferência construtiva entre a oscilação gerada pelo fenômeno físico ao qual a célula de carga é submetida e a frequência de oscilação do primeiro modo de ressonante da peça. Portanto, considera-se que não há risco da célula de carga sofrer danos estruturais ou mesmo desintegrar-se por entrar em ressonância durante a aplicação.

4.4 Validação do Circuito de Condicionamento

Para validação do circuito de condicionamento, para cada canal, mediu-se o valor de tensão elétrica de saída da Ponte, a tensão elétrica de *offset* – adicionada pelo somador, e a saída de tensão elétrica de cada estágio apresentado na Seção 3.3. A partir dos valores medidos, calculou-se o ganho em cada etapa, para comparação com os valores teóricos, apresentados na Seção 3.3.5. A Tabela 16 apresenta os valores medidos na saída de cada estágio do condicionador e a Tabela 17 apresenta os valores dos ganhos calculados à partir das medidas, respectivamente.

Tabela 16 - Tensão elétrica medida na saída de cada estágio de amplificação, para cada canal.

Canal	V_{out_Ponte} [mV]	V_{out_ina} [mV]	V_{out_e1} [mV]	V_{out_e2} [V]	V_{out_e3} [V]	V_{out_CH} [V]	V_{offset} [V]
1	0,9632601	13,84110	150,9296	0,5433327	1,946770	4,409150	2,462380
2	2,476141	33,03764	120,0282	0,4975719	2,038227	4,499407	2,461180
3	0,9339996	5,964415	56,98403	0,3407736	2,071433	4,525033	2,453600
4	1,652143	23,84817	193,4696	0,6935054	2,481923	4,974428	2,492505
5	3,344027	34,74568	143,3348	0,5917026	2,444336	4,923469	2,479133
6	1,438114	7,173793	68,20236	0,4099062	2,456230	4,964046	2,507816

Tabela 17 - Valores de ganho por estágio, por canal, calculados através dos valores de tensão elétrica medidos.

Canal	Estágio 1 [V/V]	Estágio 2 [V/V]	Estágio 3 [V/V]	Estágio 4 [V/V]	Ganho Total [V/V]
1	14,368	10,9045	3,5999	3,5832	2021,0
2	13,343	3,6331	4,1455	4,0963	823,20
3	6,3859	9,5540	5,9802	6,0786	2217,8
4	14,435	8,1126	3,5846	3,5788	1502,2
5	10,390	4,1253	4,1281	4,1310	731,00
6	4,9883	9,5072	6,0101	5,9922	1708,0

Através da comparação entre os valores de ganhos em tensão elétrica teóricos, apresentados na Seção 3.3.5 (Tabela 10), e os valores de ganhos em tensão elétrica experimentais, apresentados na Tabela 17, nota-se que a diferença média entre os valores de

ganho total por canal teórico e experimental é de 1,24%, e o pior caso ocorre no canal 5, onde a diferença é de 3,98%. Esses valores são aceitáveis visto que os resistores utilizados no circuito condicionador tem tolerância de 1% de seu valor nominal.

Da Figura 92 à Figura 94, é apresentada a saída em tensão elétrica do Canal 3, para aplicação de um sinal senoidal de amplitude de $23,2\text{mV}_{pp}$ e frequências de 23,02Hz, 37Hz e 74Hz, na entrada do segundo estágio de amplificação do respectivo canal. Pela Tabela 17, sabe-se que o ganho em tensão elétrica do canal 3, a partir da entrada do segundo estágio de ganho, é de $347,30[\text{V/V}]$. Dessa forma, na Figura 92, o ganho em tensão elétrica é de $341,38[\text{V/V}]$, o que é esperado, já que a frequência do sinal de entrada está abaixo da frequência de corte do filtro. A partir da Figura 93, nota-se que o ganho em tensão elétrica para um sinal elétrico senoidal com frequência de 36,98Hz é de $289,65[\text{V/V}]$, o que representa uma atenuação de 1,43dB em relação a um sinal de entrada de mesma amplitude, mas frequência de 23,02Hz. Por fim, através da Figura 94, percebe-se que o ganho em tensão elétrica para um sinal elétrico senoidal com frequência de 74,18Hz é de $43,10[\text{V/V}]$, o que representa uma atenuação de 17,97dB em relação a um sinal de entrada de mesma amplitude, mas frequência de 23,02Hz.

O mesmo procedimento de medidas e análise foi realizado para os outros Canais, e apresentou resultados similares de atenuação. Por esse motivo, optou-se por apresentar apenas os resultados referentes ao Canal 3.

Figura 92 - Teste de banda de passagem do Canal 3: Frequência de entrada abaixo da frequência de corte do filtro.

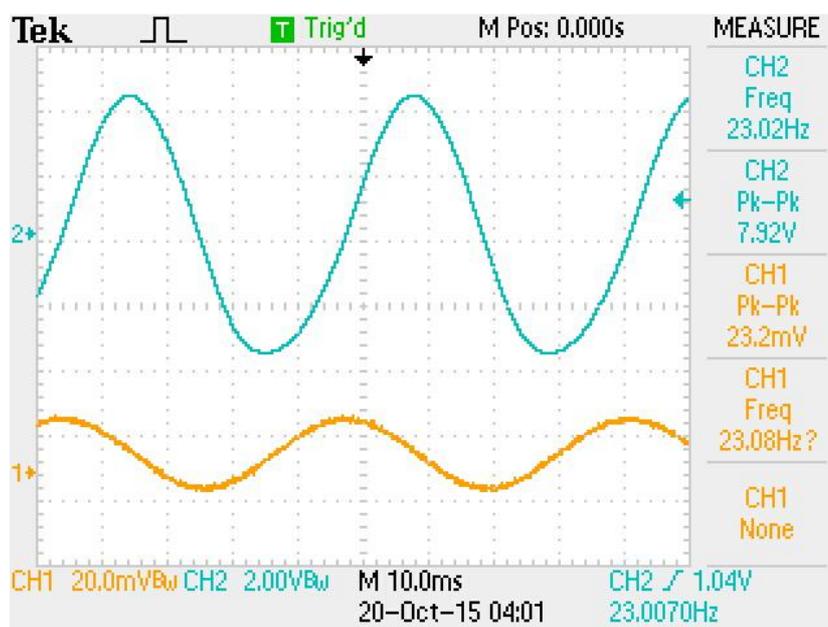


Figura 93 - Teste de banda de passagem do Canal 3: Frequência de entrada na frequência de corte do filtro.

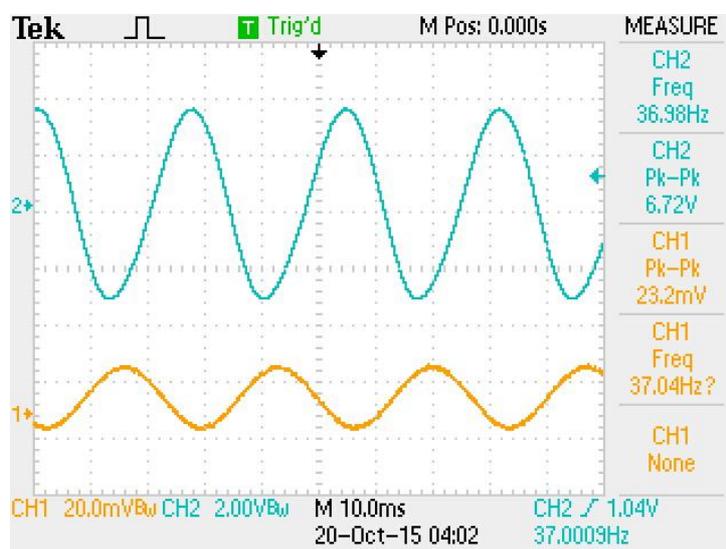
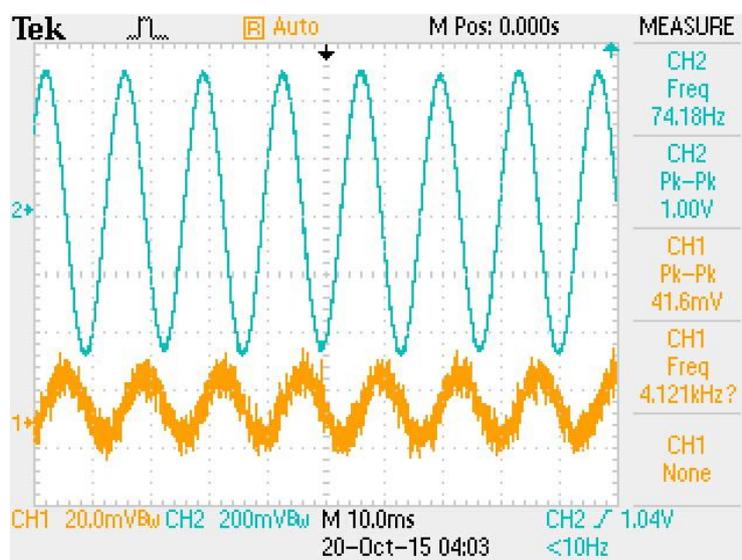


Figura 94 - Teste de banda de passagem do Canal 3: Frequência de entrada acima da frequência de corte do filtro.



4.5 Determinação das Funções de Transferência Experimentais de Tensão de Saída

Na Figura 95 à Figura 97 são apresentados os pontos de tensão elétrica medidos na saída de cada canal do condicionador de sinais do pedivela esquerdo, para a aplicação de carga mecânica no eixo perpendicular (Canal 1), lateral (Canal 2) e paralelo (Canal 3). São apresentadas, também, as respectivas funções de transferência. Os resultados referentes ao pedivela direito, são apresentados na Figura 98 à Figura 100.

Figura 95 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela esquerdo, aplicação de força na direção perpendicular.

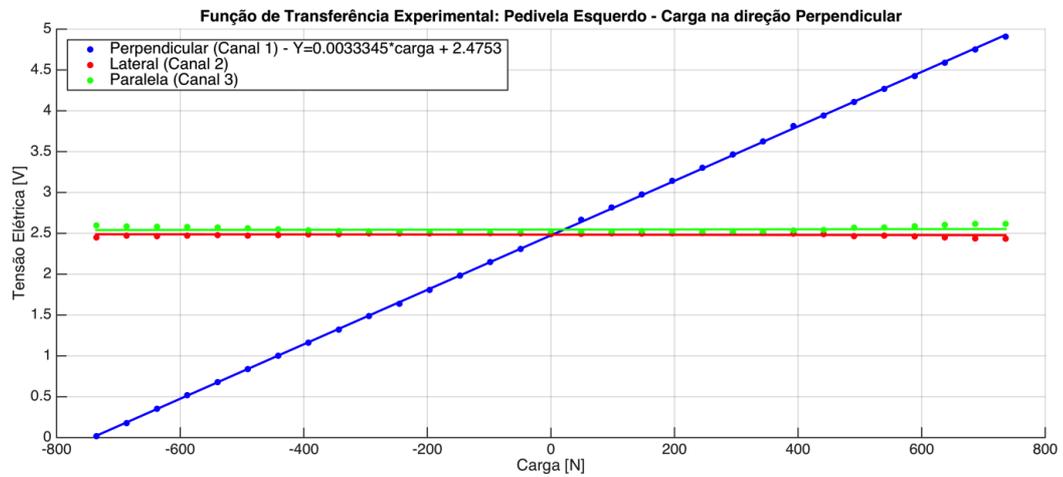


Figura 96 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela esquerdo, aplicação de força na direção lateral.

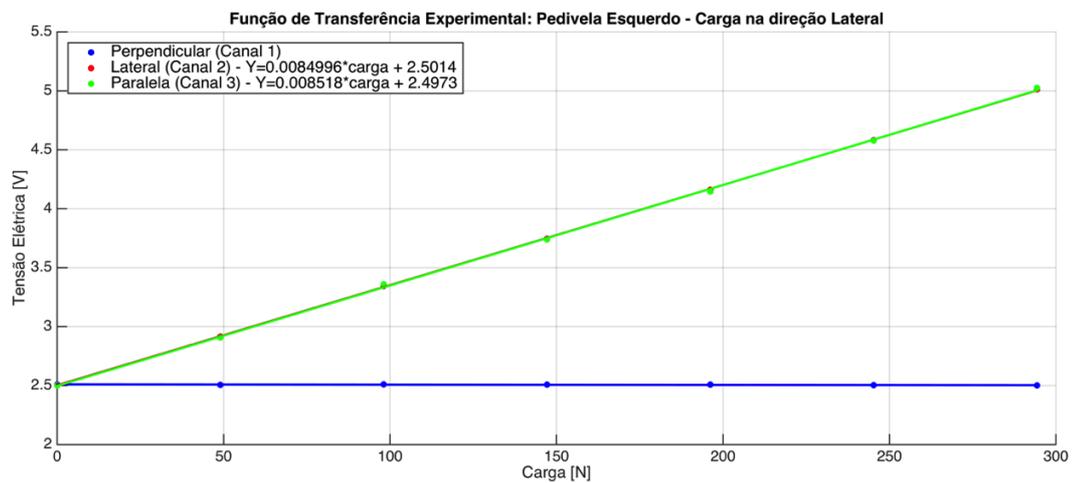


Figura 97 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela esquerdo, aplicação de força na direção paralela.

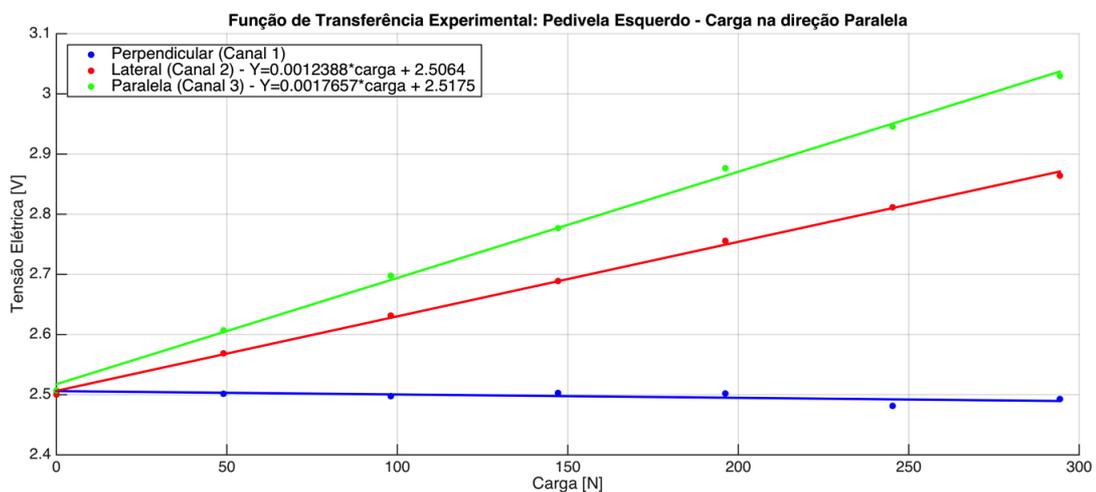


Figura 98 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela direito, aplicação de força na direção perpendicular.

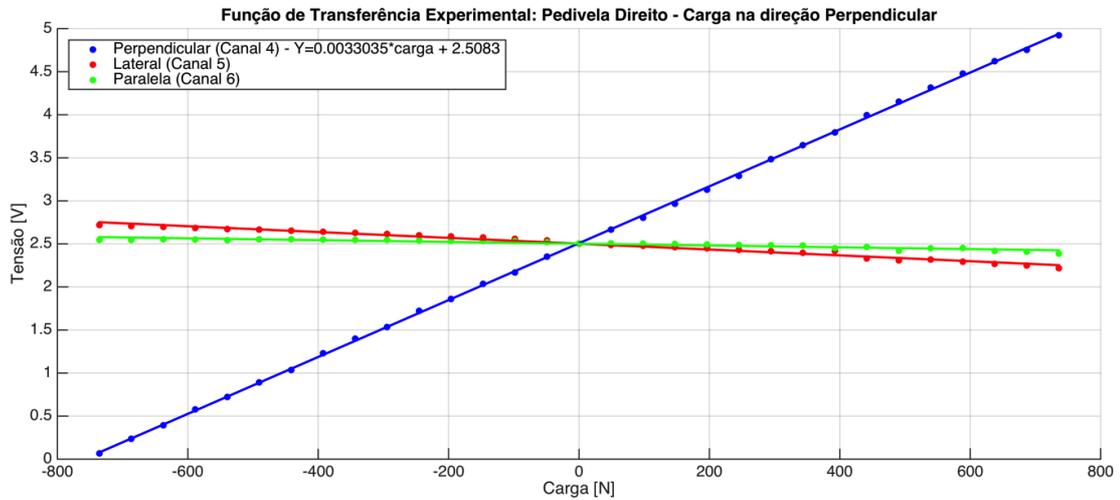


Figura 99 - Tensão elétrica de saída do circuito condicionador de sinais: pedivela direito, aplicação de força na direção lateral.

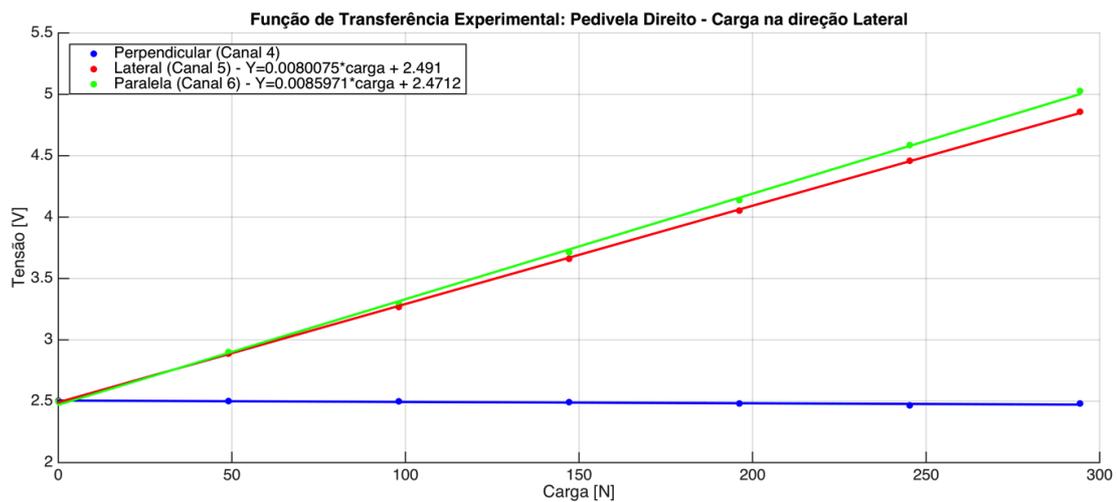
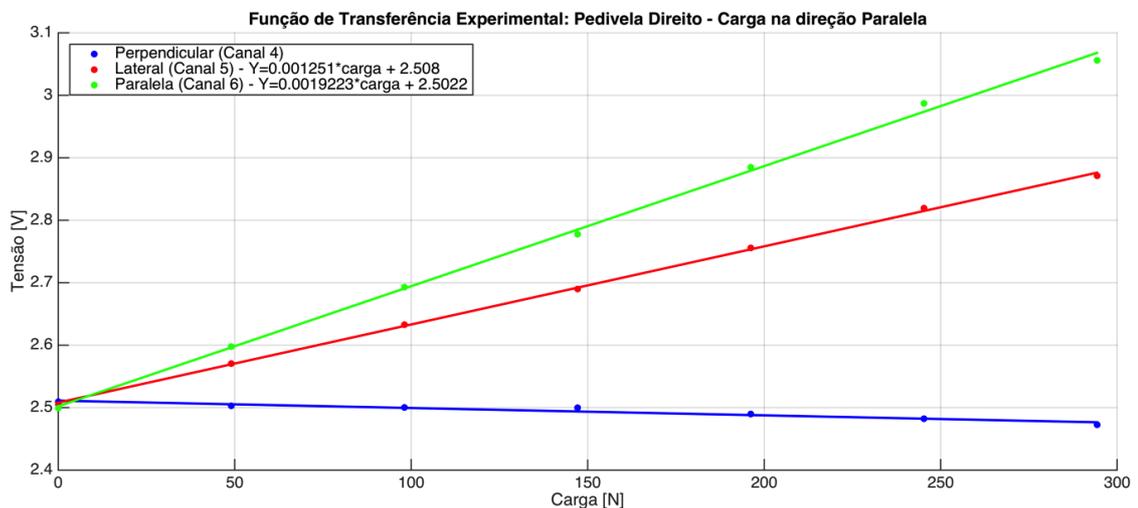


Figura 100 - Tensão elétrica de saída do condicionador de sinais: pedivela direito, aplicação de força na direção paralela.



A partir das curvas de calibração experimental obtidas e da Equação (17), calculou-se os valores do erro de linearidade e sensibilidade para cada canal. A Tabela 18 apresenta as funções de transferência da tensão elétrica de saída de cada canal, em [mV], em função da carga aplicada, em [N], o erro de linearidade e a sensibilidade, respectivos a cada canal.

Tabela 18 - Características principais da células de carga.

Canal	Carregamento		Faixa de tensão de saída [V]	Função de Transferência [mV]	Erro de Linearidade [%]	Sensibilidade [mV/N]
	Carga [kg]	Carga [N]				
1	±75	±735,7	0,0220 a 4,929	$y = 3,334 \cdot carga + 2475$	0,5981	3,334
2	±30	±294,3	0,0001 a 5,003	$y = 8,500 \cdot carga - 2501$	0,1858	8,500
3	±30	±294,3	1,998 a 3,037	$y = 1,766 \cdot carga - 2517$	0,4125	1,766
4	±75	±735,7	0,0777 a 4,939	$y = 3,303 \cdot carga - 2508$	0,6034	3,303
5	±30	±294,3	0,1344 a 4,8476	$y = 8,007 \cdot carga - 2491$	0,2049	8,007
6	±30	±294,3	1,936 a 3,0679	$y = 1,922 \cdot carga - 2502$	0,4406	1,922

A partir dos resultados apresentados na Tabela 18, observa-se que o erro de linearidade está abaixo de 1% para todos os canais, e apresenta valor máximo de 0,6034% para o Canal 4 (medida de força na direção perpendicular do pedivela direito).

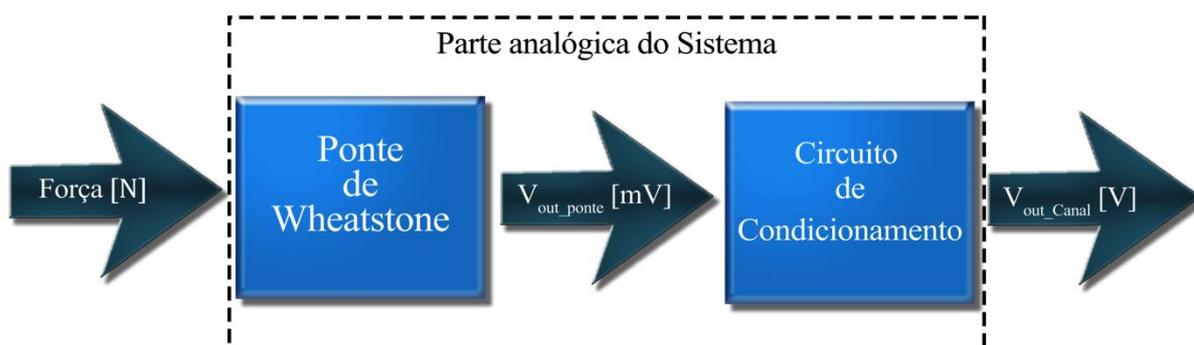
Além disso, nota-se que a sensibilidade é em torno de 3,3 [mV/N], para os Canais respectivos a medida das forças aplicadas na direção perpendicular; em torno de 1,8 [mV/N] para os Canais respectivos à medida de força na direção paralela e, em torno de 8,25 [mV/N] para os canais respectivos à medida de força na direção lateral.

Por fim, pela análise das curvas apresentadas na Figura 95 à Figura 100, observa-se que a faixa de tensão elétrica de saída de cada um dos Canais é de, aproximadamente, 0V a 5V. Dessa forma, tem-se que a faixa de tensão elétrica de saída do condicionador é adequada à faixa de tensão elétrica de entrada do conversor analógico-digital utilizado, e, por consequência, aproveita-se integralmente a resolução do *ADC (Analogic to Digital Converter)*.

4.6 Análise de Incertezas

Nesta etapa do trabalho, foram analisados blocos maiores do sistema analógico, para facilitar a análise da propagação de incertezas. A seguir, são analisados as incertezas padrões e as incertezas combinadas dos blocos apresentados na Figura 101.

Figura 101 - Diagrama de blocos da parte analógica do Sistema.



4.6.1 Análise de incertezas referente a sensibilidade da Ponte de *Wheatstone*

A primeira fonte de incerteza está relacionada a saída de tensão elétrica da Ponte de *Wheatstone*. Essa, por sua vez, tem origem na tolerância dos extensômetros utilizados e na tensão elétrica de referência. Para realização da análise, considerou-se que a célula de carga encontra-se sem carga, dessa forma, já que os extensômetros que compõe a Ponte possuem mesmo valor nominal, a saída de tensão elétrica da Ponte de *Wheatstone* teórica é de 0V. Nesse caso, como a alimentação da Ponte (V_{ref}) é de 5V, a tensão elétrica nos pontos V_a e V_b deve ser igual a 2,5V. A tensão elétrica de saída de um dos braços da Ponte do Canal 1 pode ser representada pela Equação (45).

$$V_a = V_b = V_{ref} \cdot \frac{R_{sg3}}{R_{sg3} + R_{sg1}} \quad (45)$$

onde R_{sg3} é a resistência elétrica, em $[\Omega]$, do extensômetro 3, R_{sg1} é a resistência elétrica, em $[\Omega]$, do extensômetro 1, referentes ao canal 1 (conforme ilustrado na Figura 46) e V_{ref} é a tensão elétrica de referência que alimenta o circuito elétrico da Ponte.

Para cálculo da incerteza padrão de componentes do circuito cuja precisão é informada em forma de tolerância, considerou-se que o valor experimental da grandeza em questão

segue uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade, cuja faixa de valores está compreendida entre valor nominal menos a tolerância e o valor nominal mais a tolerância. Dessa forma, a Equação (46) representa a expressão utilizada para cálculo da incerteza padrão de cada componente utilizado neste trabalho.

$$\sigma = \frac{\text{Valor Nominal} \cdot \text{tolerância}}{\sqrt{3}} \quad (46)$$

onde σ é a incerteza padrão do componente, na mesma unidade do *Valor Nominal*, *tolerância* é o valor da tolerância percentual informado pelo fabricante do componente, e *Valor Nominal*, é o valor nominal do componente utilizado.

As resistências elétricas dos extensômetros são de 350 Ω , com incerteza de 0,707 Ω , a alimentação é de 5,00 V com incerteza de 14,4 mV, portanto, a incerteza padrão referente a saída de tensão elétrica da Ponte de *Wheatstone* é apresentada nas Equações (47) a (49).

$$u_{c,Va} = \sqrt{\frac{\partial V_a^2}{\partial V_{ref}} \cdot \sigma_{V_{ref}}^2 + \frac{\partial V_a^2}{\partial R_{sg1}} \cdot \sigma_{R_{sg1}}^2 + \frac{\partial V_a^2}{\partial R_{sg3}} \cdot \sigma_{R_{sg3}}^2} \quad (47)$$

$$u_{c,Va} = \sqrt{(0,500)^2 \cdot (5,0,005 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}})^2 + (3,57e-3)^2 \cdot (350,0,0035 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}})^2 + (3,57e-3)^2 \cdot (350,0,0035 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}})^2} \quad (48)$$

$$u_{c,Va} = 8,04 \text{ mV} \quad (49)$$

Dessa forma, a tensão elétrica de saída de um dos braços da Ponte de *Wheatstone* do canal 1 pode ser representada pela Equação (50).

$$V_a = V_b = 2,50 \text{ V} \pm 8,04 \text{ mV} \quad (50)$$

Como as Pontes utilizadas nos demais Canais (canal 2 a 6) utilizam componentes de valores nominais e tolerância equivalentes, suas saídas de tensão elétrica também podem ser representadas pela Equação (50). Dessa forma, a incerteza de 8,04 mV para a saída de cada braço da Ponte justifica a utilização do circuito de ajuste de zero apresentado na Seção 3.3.3, que permite o ajuste da tensão elétrica de V_a , para equilibrar a Ponte quando a célula de carga encontra-se sem carregamento.

A saída de tensão elétrica da Ponte de *Wheatstone* com quatro extensômetros ativos pode ser representada pela Equação (51) e a com dois extensômetros ativos, pela Equação (52). Dessa forma, como apresentado anteriormente na Seção 3.3, a sensibilidade da Ponte pode ser representada pelas Equações (53) e (54).

$$V_{out_4activeSG} = V_{ref} \cdot (k \cdot \varepsilon) V \quad (51)$$

$$V_{out_2activeSG} = \frac{1}{2} V_{ref} \cdot (k \cdot \varepsilon) V \quad (52)$$

$$S_{out_4activeSG} = \frac{\partial V_{out_4activeSG}}{\partial \varepsilon} = (V_{ref} \cdot k) V \quad (53)$$

$$S_{out_2activeSG} = \frac{\partial V_{out_2activeSG}}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{2} (V_{ref} \cdot k) V \quad (54)$$

onde $V_{out_4activeSG}$ e $V_{out_2activeSG}$ é a tensão elétrica de saída da Ponte de *Wheatstone*, em [V], com 4 ou 2 extensômetros ativos, ε é a deformação relativa em [$\mu\text{m}/\text{m}$], k é o fator *gage* do extensômetro e V_{ref} é a tensão elétrica de referência que alimenta a Ponte.

Portanto, a incerteza da tensão elétrica de saída da Ponte de *Wheatstone* pode ser representada pelas Equações (55) a (58).

$$u_{c_Out_4activeSG} = \sqrt{\frac{\partial S_{out_4activeSG}}{\partial V_{ref}}^2 \cdot \sigma_{V_{ref}}^2 + \frac{\partial S_{out_4activeSG}}{\partial k}^2 \cdot \sigma_k^2} \quad (55)$$

$$u_{c_Out_4activeSG} = \sqrt{(1,94)^2 \cdot \left(5,0,005 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + (5)^2 \cdot \left(1,94 \cdot 0,015 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,0855 \text{ V}/\varepsilon \quad (56)$$

$$u_{c_Out_2activeSG} = \sqrt{\frac{\partial S_{out_2activeSG}}{\partial V_{ref}}^2 \cdot \sigma_{V_{ref}}^2 + \frac{\partial S_{out_2activeSG}}{\partial k}^2 \cdot \sigma_k^2} \quad (57)$$

$$u_{c_Out_2activeSG} = \sqrt{\left(\frac{1,94}{2}\right)^2 \cdot \left(5,0,005 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2 \cdot \left(1,94 \cdot 0,015 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,0443 \text{ V}/\varepsilon \quad (58)$$

onde $u_{c_Out_4activeSG}$ e $u_{c_Out_2activeSG}$ são as incertezas de tensão elétrica, em [V], de saída para uma Ponte de *Wheatstone*, em [V], com 4 ou 2 extensômetros ativos, k é o fator *gage* do extensômetro e V_{ref} é a tensão elétrica de referência que alimenta a Ponte.

4.6.2 Análise de incertezas referente ao circuito de condicionamento

Como o circuito de condicionamento apresenta vários estágios de ganho em tensão elétrica do sinal de saída das Pontes de *Wheatstone*, a não idealidade dos resistores utilizados em cada estágio, gera uma incerteza na medida. Essa, por sua vez afeta apenas a sensibilidade

do circuito, já que o valor de tensão elétrica de saída referente ao somador de *offset* é ajustável através do potenciômetro. Dessa forma, as Equações (59) e (60), já mencionadas na Seção 3.3, representam a saída de tensão elétrica do canal 1 e a sensibilidade do respectivo canal.

$$V_{outCH1} = (V_{refCH1} \cdot K \cdot \varepsilon) \cdot \left(4 + \frac{60k}{RG}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{19}}{R_{16}}\right) \cdot \left(\frac{R_{31} + R_{28}}{R_{28}}\right) \cdot \left(\frac{R_{43} + R_{40}}{R_{40}}\right) \cdot \left(\frac{R_{46}}{R_{46} + R_{47}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{55}}{R_{48}}\right) + \left(\frac{R_{47}}{R_{46} + R_{47}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{55}}{R_{48}}\right) \cdot \left(\frac{R_{11}}{R_{10} + R_{11}}\right) \cdot V_{ref_CH1} \quad (59)$$

$$S_{outCH1} = \frac{\partial V_{outCH1}}{\partial \varepsilon} = (V_{refCH1} \cdot K) \cdot \left(4 + \frac{60k}{RG}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{19}}{R_{16}}\right) \cdot \left(\frac{R_{31} + R_{28}}{R_{28}}\right) \cdot \left(\frac{R_{43} + R_{40}}{R_{40}}\right) \cdot \left(\frac{R_{46}}{R_{46} + R_{47}}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_{55}}{R_{48}}\right) \quad (60)$$

Sendo assim, a incerteza combinada referente à sensibilidade do canal 1 é apresentada nas Equações (61) a (64).

$$u_{c_SoutCH1} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{outCH1}}{\partial V_{refCH1}} \cdot \sigma_{V_{refCH1}}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial K} \cdot \sigma_K^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial RG} \cdot \sigma_{RG}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{19}} \cdot \sigma_{R_{19}}^2 \right.} \quad (61)$$

$$\left. + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{16}} \cdot \sigma_{R_{16}}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{31}} \cdot \sigma_{R_{31}}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{28}} \cdot \sigma_{R_{28}}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{43}} \cdot \sigma_{R_{43}}^2 \right.$$

$$\left. + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{40}} \cdot \sigma_{R_{40}}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{46}} \cdot \sigma_{R_{46}}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{47}} \cdot \sigma_{R_{47}}^2 + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{55}} \cdot \sigma_{R_{55}}^2 \right.$$

$$\left. + \frac{\partial S_{outCH1}}{\partial R_{48}} \cdot \sigma_{R_{48}}^2 \right)$$

$$u_{c_SoutCH1} = \sqrt{\left(\begin{aligned} &(1,2347e + 7 \cdot 2,0833e - 4) + (8,2014e + 7 \cdot 2,8227e - 4) + (3,1604 \cdot 1,0453e + 3) \\ &+ (2,5509e - 2 \cdot 3,3333e + 5) + (2,5510 \cdot 3,3333e + 3) + (4,1735 \cdot 1,2813e + 3) \\ &+ (27,852 \cdot 192,00) + (4,1735 \cdot 1,2813e + 3) + (27,852 \cdot 192,00) \\ &+ (1,9292e - 3 \cdot 1,3333e + 6) + (1,9292e - 3 \cdot 1,3333e + 6) + (1,9292e - 3 \cdot 1,3333e + 6) \\ &+ (1,9292e - 3 \cdot 1,3333e + 6) \end{aligned} \right)} \quad (62)$$

$$u_{c_SoutCH1} = 324,27 V/\varepsilon \quad (63)$$

$$S_{outCH1} = 19604 \frac{V}{\varepsilon} \pm 1,65\% \quad (64)$$

onde $u_{c_SoutCH1}$ é a incerteza combinada para a sensibilidade do Canal 1 e S_{outCH1} é a sensibilidade do Canal 1.

A incerteza combinada referente à sensibilidade dos outros Canais foi calculada de forma similar e é apresentada na Tabela 19, juntamente com a incerteza referente à saída das Pontes de *Wheatstone* de cada canal, obtidas na Seção 4.6.1.

Tabela 19 - Incerteza combinada por canal.

Canal	Sensibilidade da Ponte [V/ε]	Incerteza da Sensibilidade da Ponte (%)	Sensibilidade do Canal [V/ε]	Incerteza da Sensibilidade do Canal (%)
1	9,70	0,881	19604	1,65
2	4,85	0,913	3992,5	3,22
3	4,85	0,913	10756	3,21
4	9,70	0,881	14571	1,59
5	4,85	0,913	3545,3	3,16
6	4,85	0,913	8283,8	3,22

Os valores de incerteza apresentados são ocasionados, principalmente, pelo uso de resistores com tolerância de 1% para realização das etapas de ganho. Dessa forma, como a tolerância dos extensômetros é de 0,35%, recomenda-se o uso de resistores com tolerância igual ou inferior à dos extensômetros, para reduzir a incerteza combinada. É importante ressaltar que nessa análise foram desconsiderados os circuitos internos dos amplificadores operacionais e capacitores, para facilitar a mesma. Poder-se-ia estender a análise considerando os modelos elétricos internos de cada componente, assim como a incerteza padrão e figura de ruído do mesmo. Essas características afetam a incerteza combinada do sistema, contudo, devido à complexidade e demanda de tempo para realização desta análise, este não é o foco do presente trabalho.

4.7 Cadeias de Medida Experimentais

A cadeia de medidas experimental apresenta cada uma das etapas utilizadas no projeto, desde a faixa de valores apresentados no fenômeno físico de interesse, neste caso, força, até a saída do sinal que representa o valor medido. Desta forma, as cadeias de medida levantadas experimentalmente, são apresentadas na Figura 102 à Figura 107. Como trabalho futuro é proposto a definição dos níveis de ruído para cada uma das etapas da Cadeia de Medidas, sendo assim, completando todo projeto de cada etapa da correspondente Cadeia de Medidas.

Nota-se, pela comparação com as cadeias de medida apresentadas na Seção 3.3.6, que há uma certa diferença entre os valores propostos e os obtidos experimentalmente, para os estágios de Deformação, Variação da Resistência Elétrica e Saída da Ponte de *Wheatstone*,

principalmente para os Canais referentes as medidas das forças nos eixos paralelo e lateral. Isso ocorre pelo fato de não haver total desacoplamento mecânico entre as forças acima citadas, além de pequenas variações entre o modelo simulado e o modelo experimental. Além disso, nota-se que, para os Canais 1 e 4, respectivos ao eixo de medida da força perpendicular, há maior semelhança entre a cadeia de medida proposta – obtida através das simulações e cálculos, e a experimental – obtida através de medidas e ensaios experimentais.

Figura 102 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 1.

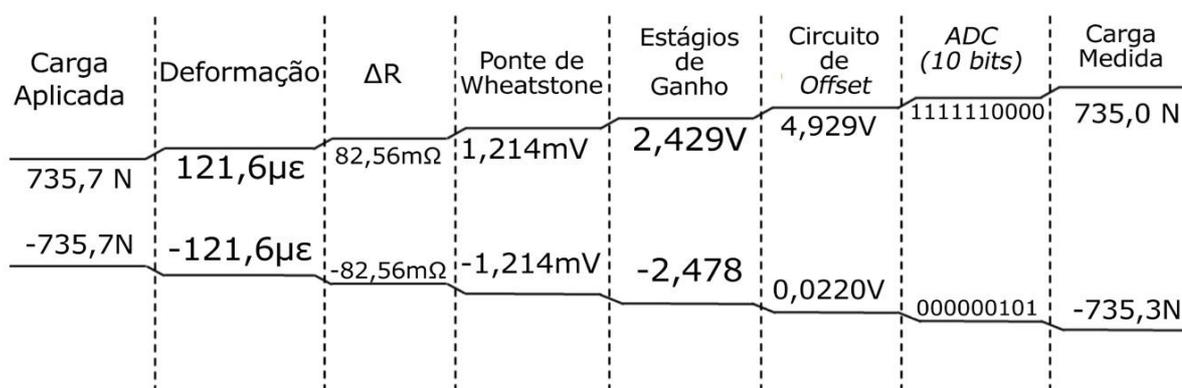
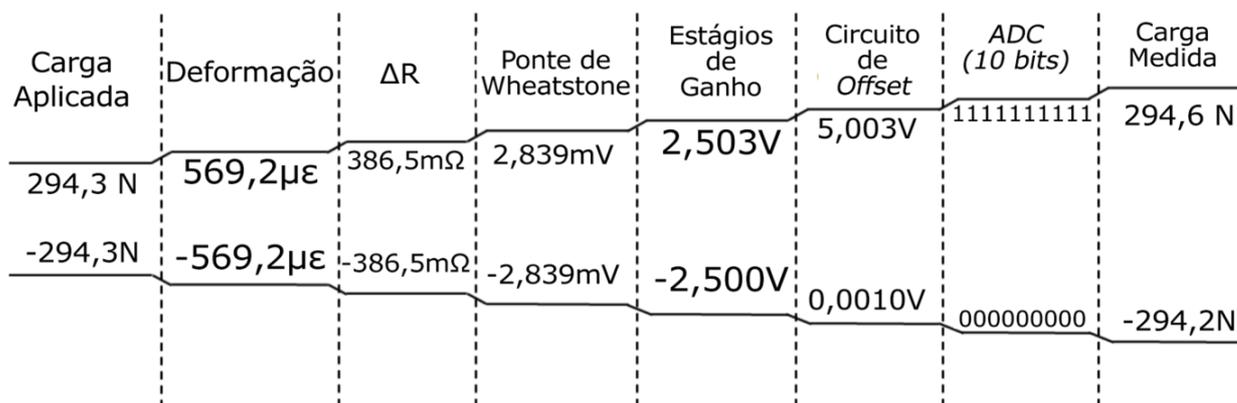


Figura 103 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 2.



Entretanto, para todos os Canais, à partir dos estágios de ganho, há semelhança entre os valores propostos e experimentais, exceto para os Canais referentes às medidas da força no eixo paralelo, já que o ganho deste teve que ser reduzido e ajustado para que a medida de fundo de escala não seja atingida pela aplicação de força na direção lateral, já que estas forças não estão completamente desacopladas.

Figura 104 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 3.

Carga Aplicada	Deformação	ΔR	Ponte de Wheatstone	Estágios de Ganho	Circuito de Offset	ADC (10 bits)	Carga Medida
294,3 N	43,38 ϵ	29,45m Ω	0,2142mV	0,5370V	3,037V	1001101101	293,4N
-294,3N	-43,38 $\mu\epsilon$	-29,45m Ω	-0,2142mV	-0,5020V	1,998V	0110011001	-293,3N

Figura 105 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 4.

Carga Aplicada	Deformação	ΔR	Ponte de Wheatstone	Estágios de Ganho	Circuito de Offset	ADC (10 bits)	Carga Medida
735,7 N	164,9 $\mu\epsilon$	112,0m Ω	1,618mV	2,439V	4,939V	1111110011	736,6 N
-735,7N	-164,9 $\mu\epsilon$	-112,0m Ω	-1,618mV	-2,422	0,0777V	000001000	-735,7N

Figura 106 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 5.

Carga Aplicada	Deformação	ΔR	Ponte de Wheatstone	Estágios de Ganho	Circuito de Offset	ADC (10 bits)	Carga Medida
294,3 N	67,76 $\mu\epsilon$	46,01m Ω	0,3313mV	0,5680V	3,068V	1001110100	295,2N
-294,3N	-67,76 $\mu\epsilon$	-46,01m Ω	-0,3313mV	-0,5640V	1,936V	0110001100	-294,7N

Figura 107 - Cadeia de Medidas Experimental do Canal 6.

Carga Aplicada	Deformação	ΔR	Ponte de Wheatstone	Estágios de Ganho	Circuito de Offset	ADC (10 bits)	Carga Medida
294,3 N	658,1 $\mu\epsilon$	446,8m Ω	3,224mV	2,348V	4,8476V	1111100000	294,4 N
-294,3N	-658,1 $\mu\epsilon$	-446,8m Ω	-3,224mV	-2,366V	0,1344V	0000011011	-294,6N

Por fim, da Tabela 20 à Tabela 25 são apresentadas as características de sensibilidade, erro de linearidade e resolução de entrada e saída para cada canal. A resolução de entrada, por definição, é a menor variação do sinal de entrada que resulta em um valor mensurável na saída; a resolução de saída é a maior variação na saída em função de uma variação infinitesimal na entrada. Dessa forma, como as medidas para o levantamento das funções de transferência foi realizado com aplicação de cargas em com resolução de 49,05N, considerou-se, esta, a resolução de entrada da cadeia de medidas. Portanto, a resolução mínima de cada um dos estágios subsequentes está atrelada a esta.

Tabela 20 - Características complementares à cadeia de medidas, estágio 1: deformação.

Canal	Resolução de Entrada [N]	Resolução de Saída [$\mu\epsilon$]	Sensibilidade [$\mu\epsilon/N$]	Erro de Linearidade (%)
1	49,05	8,107	0,1653	0,4006
2	49,05	94,87	1,9341	0,7104
3	49,05	7,230	0,1474	0,7903
4	49,05	10,99	0,2241	1,836
5	49,05	109,7	2,2362	0,5675
6	49,05	11,29	0,2302	1,787

Tabela 21 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 2: variação de resistência elétrica.

Canal	Resolução de Entrada [$\mu\epsilon$]	Resolução de Saída [Ω]	Sensibilidade [$\Omega/\mu\epsilon$]	Erro de Linearidade (%)
1	8,107	0,0220	0,0027	0,4006
2	94,87	0,1288	0,0014	0,7104
3	7,230	0,0098	0,0014	0,7903
4	10,99	0,0299	0,0027	1,836
5	109,7	0,1489	0,0014	0,5675
6	11,29	0,0153	0,0014	1,787

Tabela 22 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 3: saída de tensão elétrica da Ponte de *Wheatstone*.

Canal	Resolução de Entrada [Ω]	Resolução de Saída [mV]	Sensibilidade [mV/ Ω]	Erro de Linearidade (%)
1	0,0220	0,0809	3,676	0,5981
2	0,1288	0,5064	3,672	0,1858
3	0,0098	0,0390	3,637	0,4125
4	0,0299	0,1079	3,613	0,6034
5	0,1489	0,5373	3,607	0,2049
6	0,0153	0,0552	3,601	0,4406

Através dos valores de sensibilidade da Ponte de *Wheatstone*, apresentados na Tabela 22, percebe-se que há coerência com o valor teórico calculado a partir da Equação (14), (aproximadamente $3,6 \text{ mV}/\Omega$), já que a Ponte é composta apenas por extensômetros de mesmo valor nominal de resistência elétrica R_0 . Dessa forma, desconsiderando-se a tolerância dos extensômetros, tem-se que a razão característica da Ponte tem valor unitário, e sua sensibilidade normalizada em função da razão característica é de, aproximadamente, 0,25 para todos os canais.

Nota-se que, apesar das Pontes de *Wheatstone* apresentarem razão característica unitária (conforme abordado na Seção 2.3, quanto mais próximo da unidade for a razão característica maior será o erro de linearidade para uma mesma variação na resistência elétrica dos extensômetros que compõe a Ponte), o erro de linearidade experimental ficou abaixo de 0,6% para todos os canais. Isso ocorre pois é respeitada a condição imposta ao realizar a linearização, de que $(r + 1) \gg x$. Para este caso, percebe-se que o maior valor de x (maior razão entre a variação da resistência elétrica do extensômetro e a resistência elétrica nominal do extensômetro) ocorre no Canal 5, e tem modulo 0,00128. Sendo assim, $(r + 1)$ é, aproximadamente, três ordens de grandeza maior do que x , e, por consequência, a condição $(r + 1) \gg x$ é satisfeita.

Tabela 23 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 4: bloco de amplificação.

Canal	Resolução de Entrada [mV]	Resolução de Saída [mV]	Sensibilidade [V/V]	Erro de Linearidade (%)
1	0,0809	163,6	2021	0,5981
2	0,5064	416,9	823,2	0,1858
3	0,0390	86,58	2218	0,4125
4	0,1079	162,1	1502	0,6034
5	0,5373	392,8	731,0	0,2049
6	0,0552	94,33	1708	0,4406

Tabela 24 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 5: bloco somador de *offset*.

Canal	Resolução de Entrada [mV]	Resolução de Saída [mV]	Sensibilidade [V/V]	Erro de Linearidade (%)
1	163,6	163,6	1	0,5981
2	416,9	416,9	1	0,1858
3	86,58	86,58	1	0,4125
4	162,1	162,1	1	0,6034
5	392,8	392,8	1	0,2049
6	94,33	94,33	1	0,4406

Nota-se que a resolução de saída experimental é limitada pela metodologia utilizada para realização dos ensaios de deformação. Como os ensaios foram realizados com pesos padrão e um suporte artesanal, torna-se inviável realizá-los com uma resolução maior, visto que isso exigiria uma quantidade maior de pesos padrão, com menor valor de massa unitário, o que ocuparia um volume ainda maior do que os pesos utilizados, ocasionando outros problemas relacionados ao deslocamento de massa e contato dos pesos com o suporte. Sendo assim, estima-se que, caso o ensaio fosse realizado em uma máquina de ensaios, poder-se-ia chegar a uma resolução final menor.

Tabela 25 - Características complementaras à cadeia de medidas, estágio 6: conversor analógico-digital.

Canal	Resolução de Conversão [V]	Resolução de Entrada [V]	Resolução de Saída Experimental [N]	Resolução de Saída Mínima em função do ADC [N]
1	0,0049	0,1636	48,37	1,466
2	0,0049	0,4169	48,88	0,5750
3	0,0049	0,0866	49,83	2,768
4	0,0049	0,1621	48,82	1,480
5	0,0049	0,3928	48,83	0,6104
6	0,0049	0,0943	48,31	2,543

Os valores de resolução de saída mínima, apresentados na Tabela 25, são os valores de resolução mínima de entrada do sistema, para qual haveria uma variação na saída, considerando a limitação imposta pela resolução de entrada do *ADC* utilizado em função das características de sensibilidade do sistema completo. Dessa forma, percebe-se que a resolução de saída experimental do sistema é limitada pela resolução da carga aplicada durante o ensaio e não pelo *hardware* utilizado.

4.8 Autonomia do Sistema

A partir das medições de tensão elétrica e corrente realizadas em cada módulo do sistema, obteve-se o consumo para cada um dos ramos de alimentação ($\pm V_{cc}$), e calculou-se a duração do conjunto de baterias. Os valores das correntes medidas e da autonomia do sistema estimada encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 - Consumo e autonomia do sistema desenvolvido.

Módulo	Corrente drenada da alimentação [mA]	
	+V _{cc}	-V _{cc}
Circuito de Condicionamento Esquerdo	55,76	10,00
Circuito de Condicionamento Direito	55,79	10,06
Módulo transmissão Xbee e ArduImu	70,55	0,00
Consumo Total	182,1	20,06
Capacidade da bateria [mAh]	480,0	480,0
Autonomia estimada [h]	2,636	23,93

Nota-se que o consumo de energia para a alimentação de tensão elétrica positiva é de aproximadamente 9 vezes o consumo da negativa. Dessa forma, já que a autonomia para as baterias que fornecem a tensão elétrica positiva é de, aproximadamente, 2,6 horas e a das baterias que fornece a tensão elétrica negativa é de, aproximadamente, 24 horas, pode-se aumentar a autonomia total do sistema para aproximadamente 4,4 horas, invertendo-se a ordem das baterias após 2,2 horas de uso; o tipo de conector utilizado permite a inversão dos módulos de bateria.

4.9 Ensaio Biomecânico

O ensaio biomecânico foi realizado em ambiente interno, com auxílio do rolo de treinamento desenvolvido por MILANI (2014). Durante a aquisição de dados, o ciclista, cujo peso é de 73kg, procurou manter a cadência e velocidade (mantendo-se a mesma relação de marchas na bicicleta) durante o movimento de pedalada. Enquanto isso, realizou-se o envio do sinal de tensão elétrica de saída do sistema (digitalizado com uma taxa de amostragem de 200Hz), através do sistema de comunicação sem fio entre o módulo *XBee* e um computador. A duração do ensaio foi de 300 segundos.

O processamento do sinal e cálculo das forças aplicadas na célula de carga, através do *software* MATLAB®. Sendo assim, a partir da rotina apresentada no Anexo H, o valor de tensão elétrica de saída, de cada canal, do condicionador foi substituído nas funções de transferência de carga em função da tensão elétrica de saída (obtidas através das funções de transferência apresentadas na Seção 4.5 – Tabela 18). A Figura 108 apresenta as forças (perpendicular, lateral e paralela) aplicadas no pedivela esquerdo, e a Figura 109, ilustra as forças aplicadas no pedivela direito. É importante observar que o sinal apresentado é um trecho de cada sinal (com duração de 3 segundos), para facilitar a compreensão do mesmo.

Figura 108 - Componentes de força aplicadas ao pedivela esquerdo durante o ensaio no rolo de treinamento.

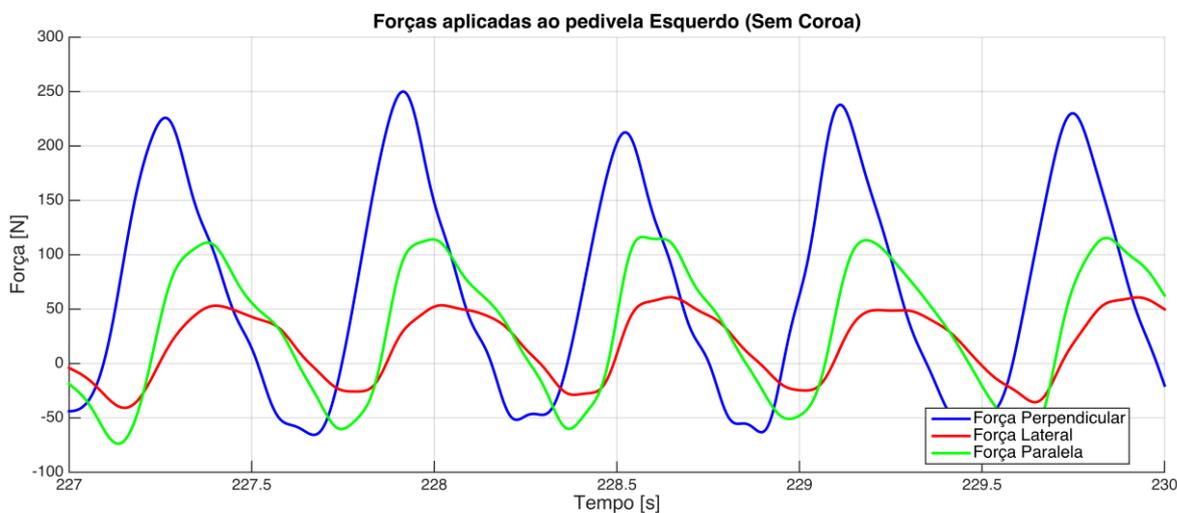
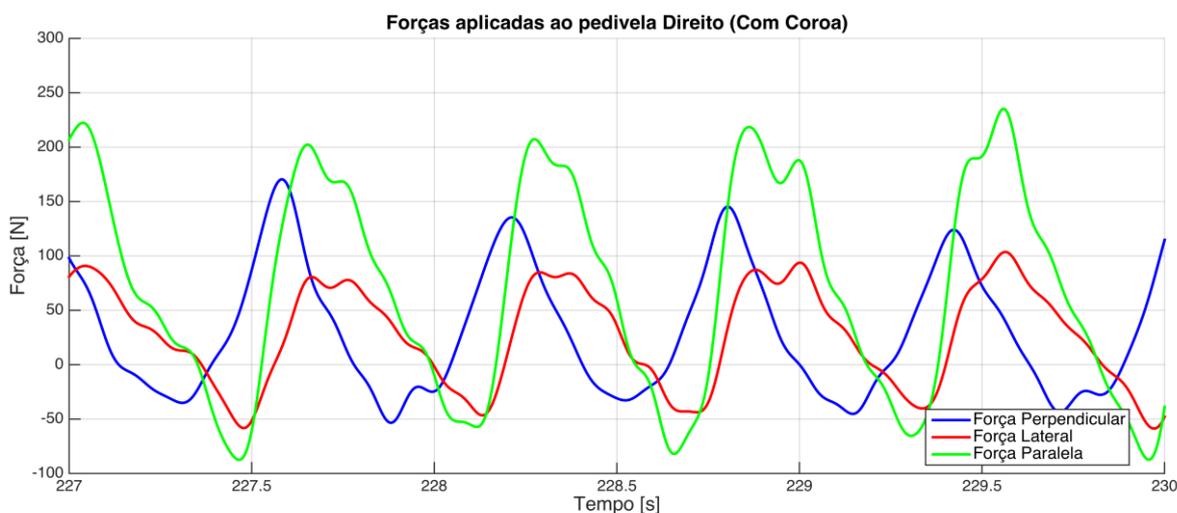


Figura 109– Componentes de força aplicadas ao pedivela direito durante o ensaio no rolo de treinamento.



Através da comparação entre os gráficos apresentados na Figura 108 e na Figura 109, observa-se que a máxima força efetiva (força na direção perpendicular) aplicada pelo ciclista durante o ensaio é de 250N para o pedivela esquerdo e 170N para o pedivela direito, o que indica uma assimetria máxima de 60,5% entre as forças aplicadas pelo membro direito e esquerdo durante o ensaio. Além disso, percebe-se que a assimetria média entre os membros ao longo do ensaio é de 44,4% (obtida através da razão entre as médias dos picos de força na direção perpendicular aplicada em cada um dos pedivelas). Pode-se perceber que as forças aplicadas na direção lateral (não efetivas) apresentam valores máximos de 60,6N para o pedivela esquerdo e 103N para o pedivela direito, o que representa uma assimetria máxima,

entre os membros, de 70,0%. As forças aplicadas na direção paralela (não efetivas), tem valor máximo de 115N para o pedivela esquerdo e 230N para o pedivela direito, o que representa uma assimetria máxima, entre os membros, de 100%.

Nota-se que as forças aplicadas por cada membro durante a pedalada são complementares, visto que os picos de força se intercalam ao longo do tempo. Além disso, percebe-se que o módulo e sentido das forças é semelhante com o descrito pela literatura, conforme abordado na Seção 2.4.

5 CONCLUSÕES

A partir do presente trabalho, foi possível compreender as características biomecânicas do movimento de pedalada, assim como as componentes de força aplicadas pelo ciclista durante o movimento. Para isso, realizou-se a revisão bibliográfica apresentada na Seção 2 do trabalho, onde abordou-se trabalhos anteriores sobre o assunto, assim como um breve estudo sobre as técnicas de pedalada.

Em sequência, a partir do modelo virtual de um pedivela comercial da marca FSA desenvolvido por NASCIMENTO (2014), foi possível analisar as deformações do pedivela comercial em função dos esforços aplicados durante o movimento de pedalada. A partir dos valores encontrados para as deformações, e de características como a área de seção transversal do pedivela comercial e dimensões que afetam a ergonomia, desenvolveu-se o conjunto mecânico de células de carga (pedivela esquerdo e direito), com espaço interno suficiente para abrigar os extensômetros e o circuito de condicionamento. A partir do modelo virtual das células de carga projetadas, executou-se as simulações, e constatou-se que as deformações máximas para aplicação de carga em cada um dos eixos estavam de acordo com a aplicação. Além disso, definiu-se os pontos de cimentação dos extensômetros, com base nos pontos de maior deformação mecânica para a aplicação de força em cada um dos eixos de medida.

Com a estrutura virtual validada através das simulações, providenciou-se os blocos de Alumínio 6082 T6 e, a partir do modelo virtual 3D, utilizou-se um centro de usinagem CNC para fabricar as células de carga (pedivela direito e esquerdo).

Definidos os pontos de maior deformação, cimentou-se os extensômetros e utilizou-se o sistema comercial de medida de deformação, fabricado pela *National Instruments* para medir a deformação em cada um dos eixos para aplicação de cargas nas direções estabelecidas na Seção 3. A partir das deformações obtidas durante o ensaio de deformação e da frequência do fenômeno físico de interesse, projetou-se o sistema de condicionamento, onde definiu-se as topologias dos blocos de ganho e filtragem, assim como os ganhos de cada um dos quatro estágios de amplificação de cada canal e a frequência de corte dos filtros passa baixas utilizados no circuito.

Posteriormente, elaborou-se a placa de circuito impresso e montou-se os condicionadores de sinais utilizando-se componentes *SMD* de valores definidos no projeto teórico. Em seguida, realizaram-se os ensaios de deformação preliminares, para verificar o correto valor de ganho de tensão elétrica para cada Canal, e ajustou-se os mesmos com base na faixa de saída de 0V para célula de carregamento sem carga e 5V para fundo de escala. Por

fim, ajustados todos os ganhos, realizou-se a validação do circuito condicionador, através de medidas de tensão elétrica na saída de cada um dos estágios e da atenuação dos filtros passa baixas para diferentes frequências. Assim, constatou-se que o circuito de condicionamento está adequado à aplicação.

Na etapa seguinte, levantou-se as funções de transferência experimentais de cada canal, aplicando-se carga com resolução de 5kg para cada um dos eixos de medida, e medindo-se a tensão elétrica de saída de cada um dos canais do circuito de condicionamento. A partir das medidas, constatou-se que o erro de linearidade ficou abaixo de 0,6% para todos os canais.

Em seguida, utilizando-se um módulo de desenvolvimento *ArduImu* e um módulo de transmissão e recepção sem fio *XBee*, desenvolveu-se o sistema de aquisição e transmissão de dados sem fio. A partir dos dados adquiridos, elaborou-se uma rotina de importação dos dados e substituição dos valores de tensão elétrica de saída do condicionador nas funções de transferência experimentais, para obtenção das forças aplicadas à célula de carga durante a pedalada.

Por fim, montou-se o sistema na bicicleta de estrada e realizou-se ensaios de pedalada em ambiente interno com auxílio de um rolo de treinamento. A partir dos dados coletados, gerou-se curvas de força em função do tempo, durante a pedalada do ciclista, e realizou-se uma breve análise dos padrões obtidos, com base nos conceitos teóricos apresentados na Seção 2 do trabalho.

Dessa forma, a partir deste trabalho, foi possível desenvolver e validar um sistema completo, de medição, aquisição e transmissão sem fio, para análise das forças aplicadas por um ciclista durante o movimento de pedalada.

6 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são apresentadas propostas de melhorias para a plataforma de força desenvolvida, com base na experiência adquirida ao longo deste trabalho:

- Analisar estruturalmente a célula de carga, visando o desacoplamento total dos pontos de medida de deformação das forças lateral e paralela.
- Realizar o processo de calibração estática das células de carga em uma máquina de ensaios devidamente calibrada, com resolução de, pelo menos 500g, e com características de incerteza conhecidas.
- Fabricar as placas de circuito impresso referentes ao circuito de condicionamento com tecnologia multicamadas, para diminuir ao máximo o tamanho das placas e o cabeamento externo.
- Utilizar conversores analógico-digitais de precisão, específicos para área instrumentação, e um sistema de aquisição de dados com microcontrolador já incluído no circuito de condicionamento, evitando, assim, o uso de múltiplas placas de circuito impresso.
- Agregar um circuito de carga e controle de tensão elétrica das baterias ao sistema da plataforma de força, de forma a viabilizar a recarga das baterias sem necessidade de utilizar um carregador externo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BINI, R. Rodrigo; CARPES, P. Felipe. **Biomechanics of Cycling**. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

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

BALBINOT, A. **Notas de Aula. Disciplina de Instrumentação**. Porto alegre: UFRGS, 2014.

MILANI, C. **Plataforma de Treinamento Instrumentada e Sistema de Aquisição, Armazenamento e Transmissão de Dados sem Fio para Plataforma de Força Aplicada ao Ciclismo**. Porto Alegre: Projeto de diplomação do curso de Engenharia Elétrica da UFRGS, 2014.

NASCIMENTO, J. S. B. **Desenvolvimento de Uma Plataforma de Força Para Análise Tridimensional da Força Aplicada Pelo Ciclista**. Porto Alegre: Projeto de diplomação do curso de Engenharia Elétrica da UFRGS, 2014.

BALBINOT, A.; CASAS, O. V.; DALAZEN, R.; CENE, V. **Complete factorial design experiment for 3D load cell instrumented crank validation**. Milão: conferência IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2015.

BALBINOT, A.; MILANI, C.; NASCIMENTO, J. S. B. **A New Crank Arm-Based Load Cell for the 3D Analysis of the Force Applied by a Cyclist**. Switzerland: Sensors Journal, 2014.

BALBINOT, A.; CASAS, O. V.; DALAZEN, R.; CENE, V. **3D Load Cell for measure Force in a bicycle crank**. Londres, Inglaterra: Measurement Journal, 2015. Artigo em prelo.

SOVNDAL, S., **Cycling Anatomy**. Estados Unidos da América: Human Kinetics, 2009.

KAUTZ, S. A.; NEPTUNE, R. R. Biomechanical Determinants of Pedaling Energetics: Internal and External Work Are Not Independent. EUA, American College of Sports Medicine, 2002.

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

SANDERSON, D. J.; HENNIG, E. M.; BLACK, A. H. **The Influence of Cadence and Power Output on Force Application and in-Shoe Pressure Distribution During Cycling by Competitive and Recreational Cyclists.** Journal of Sports Sciences, [S.l.], v.18, p.173–181, 2000.

LAZZARI, C. D. **Desenvolvimento e estudo de uma Plataforma Biomecânica 2D aplicada ao Ciclismo.** Porto Alegre: Projeto de diplomação do curso de Engenharia Elétrica da UFRGS, 2010.

FRANCO, S. **Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits.** Nova Iorque, Estados Unidos da América: McGraw-Hill Education, 2015.

SCHMIDT, A. **Competitive Cycling.** Reino Unido, Meyer & Meyer Sport, 2014.

BOSCH, P. V. D. **Cycling for Triathletes.** Oxford, Reino Unido: Meyer & Meyer Sport, 2014.

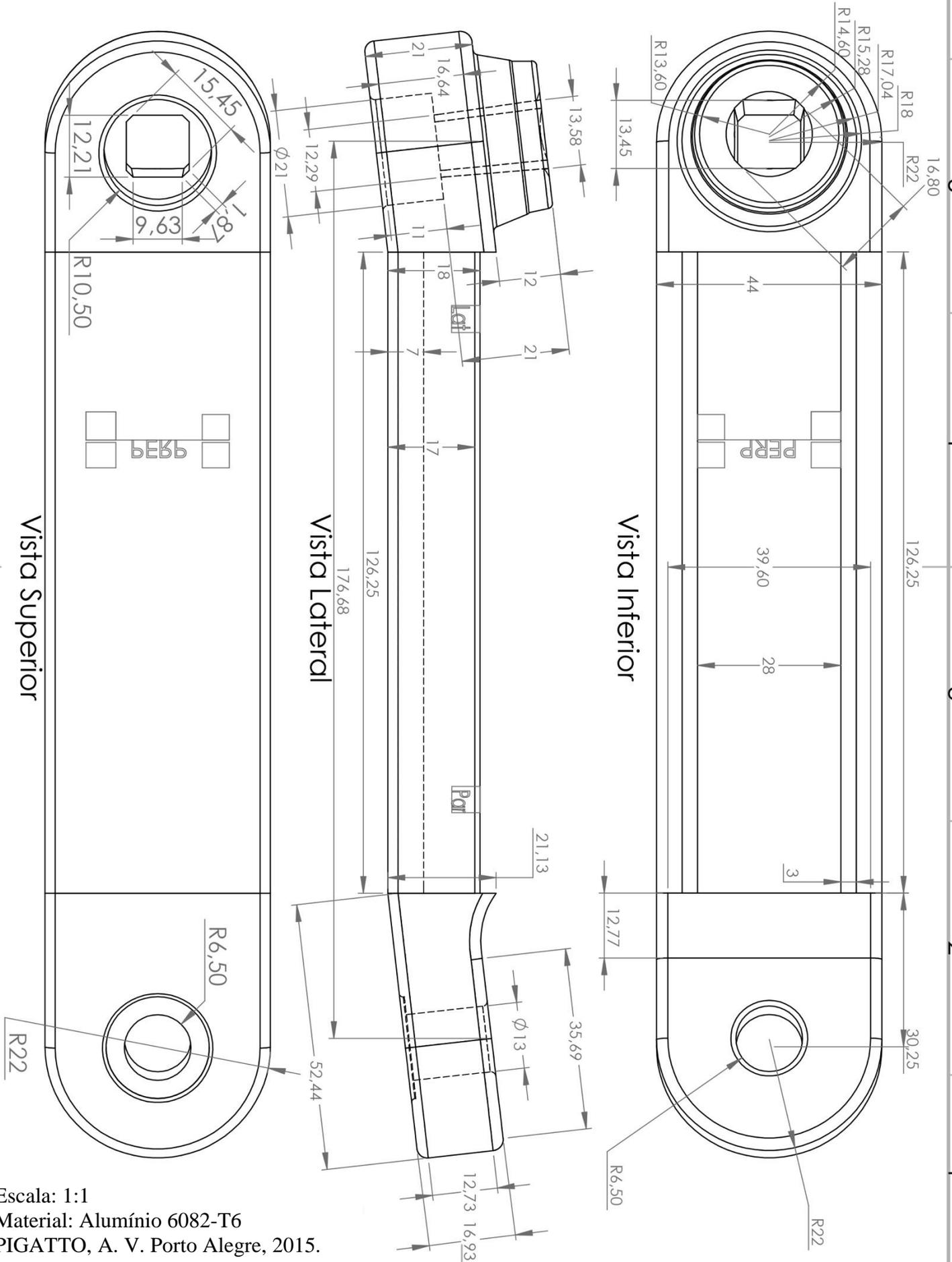
HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages.** Alsbach, Alemanha: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

MURRAY, W. M.; MILLER, W. R. **The Bonded Electrical Resistance Strain Gage.** Nova Iorque, Estados Unidos da América: Oxford University Press, 1992.

GARCÍA, M. A. P.; ANTÓN, J. C. A.; RODRIGUEZ, J. C. C.; MARTIN, F. J. F.; ORTEGA, G. J. G. **Instrumentación Electronica.** Ed. Paraninfo-Thomson, 2008.

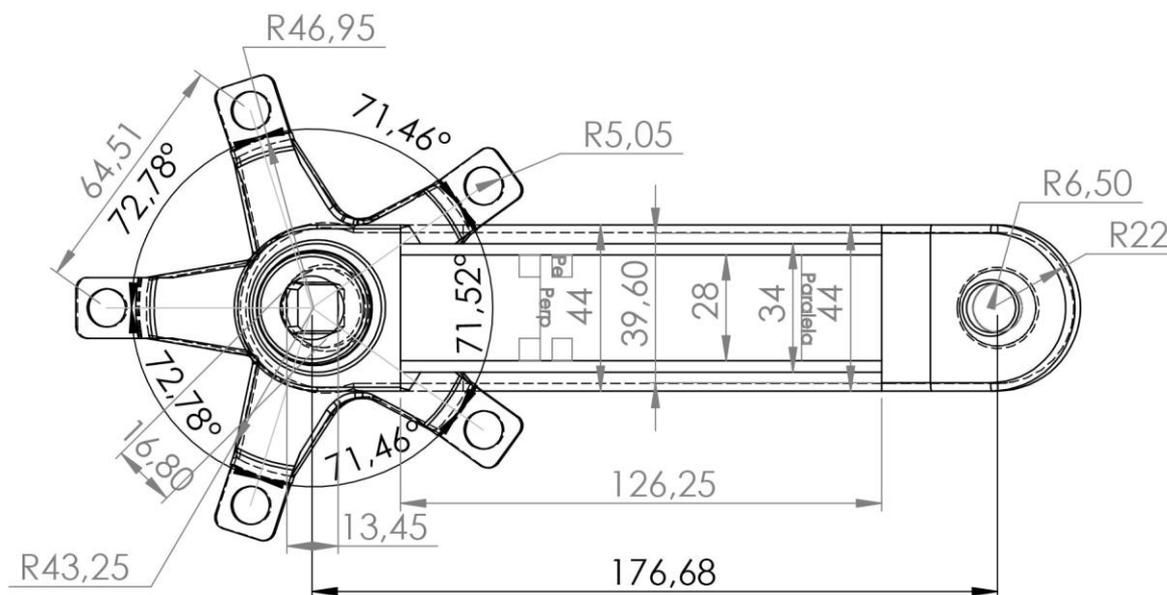
NABINGER, E. **Análise Dinamométrica Tridimensional da Pedalada de Ciclistas.** Porto Alegre: Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. UFRGS, 2006.

ANEXO A – DIMENSÕES DO PEDIVELA ESQUERDO.

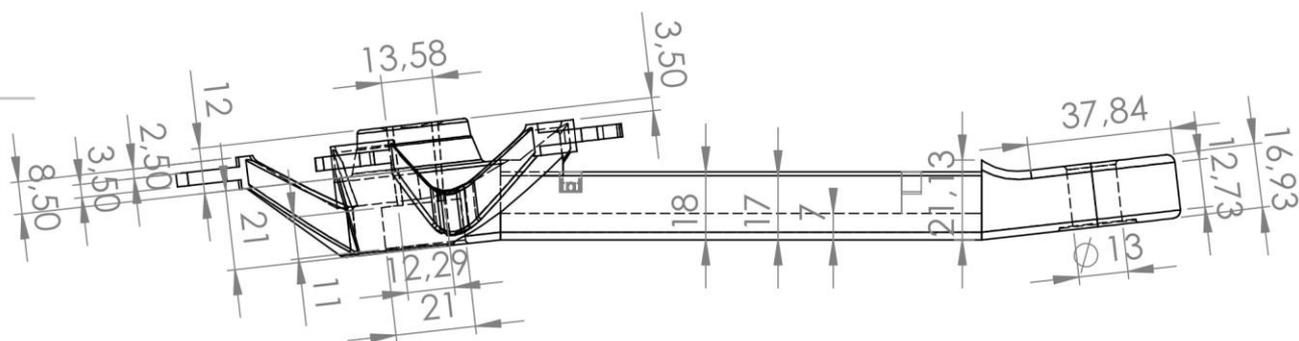


Escala: 1:1
 Material: Alumínio 6082-T6
 PIGATTO, A. V. Porto Alegre, 2015.

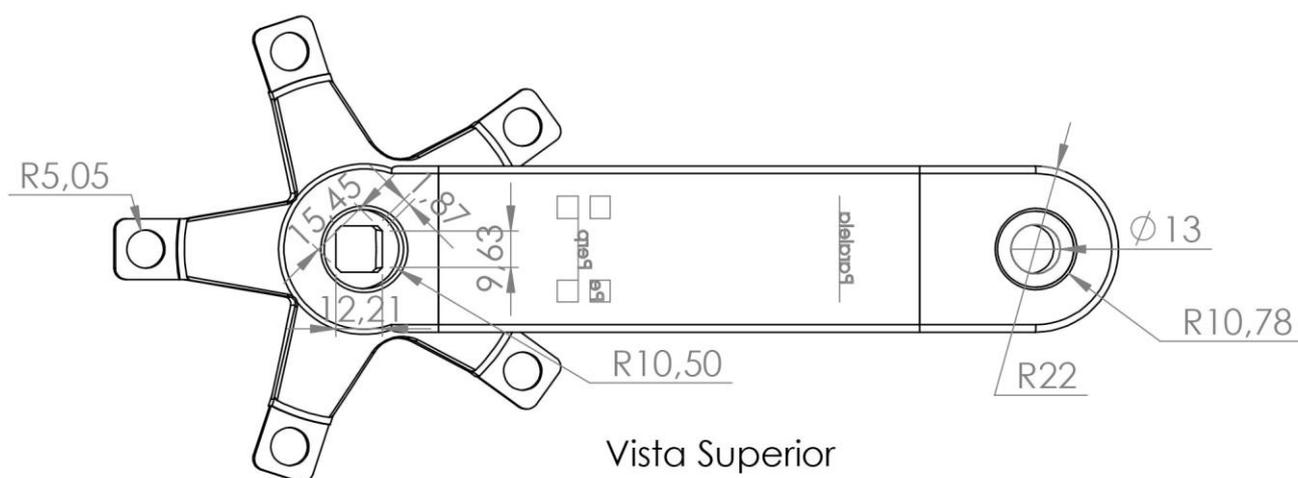
ANEXO B – DIMENSÕES DO PEDIVELA DIREITO TEÓRICO.



Vista Inferior



Vista Lateral



Vista Superior

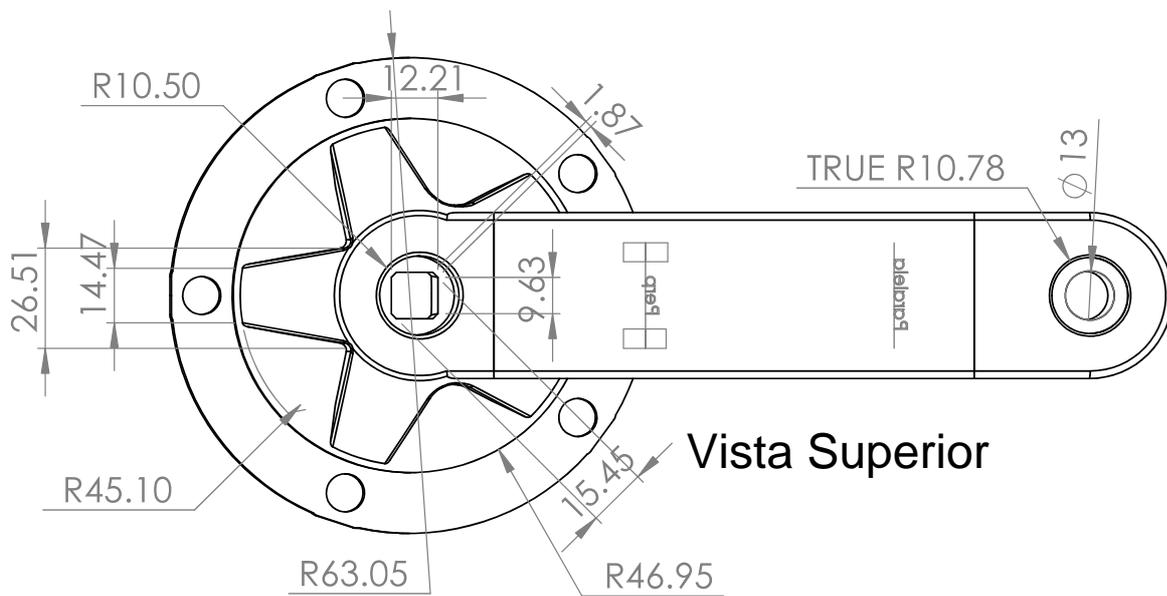
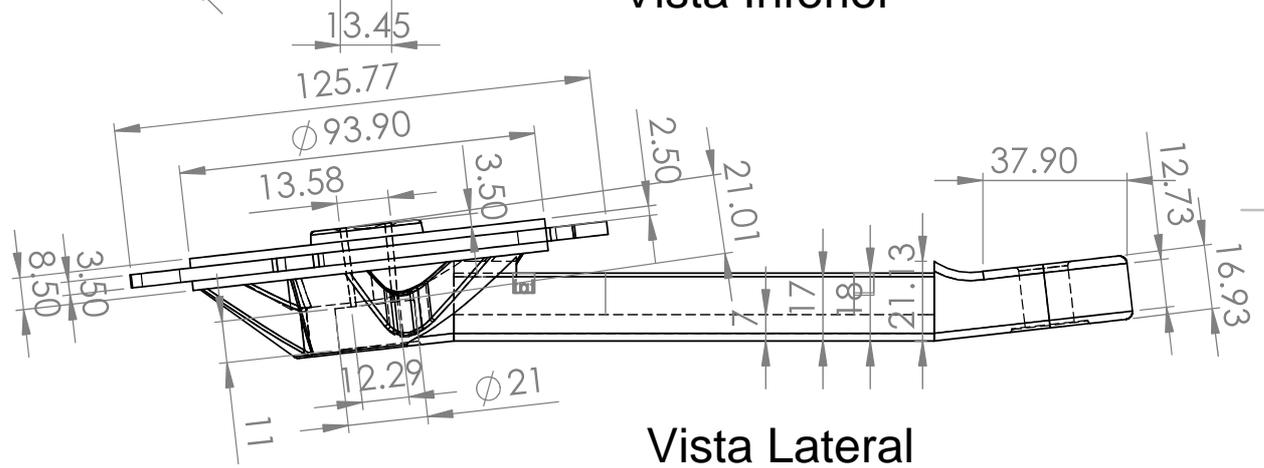
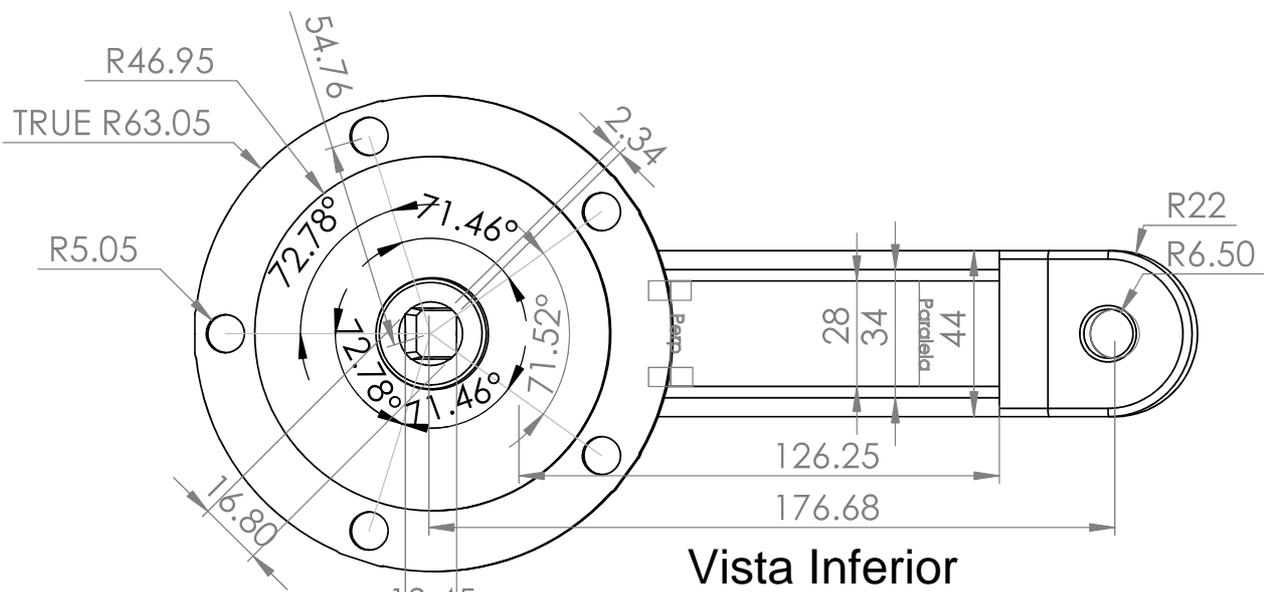
Escala: 1:2

Material: Alumínio 6082-T6

PIGATTO, A. V. Porto Alegre, 2015.

ANEXO C – DIMENSÕES DO PEDIVELA DIREITO EXPERIMENTAL.

125

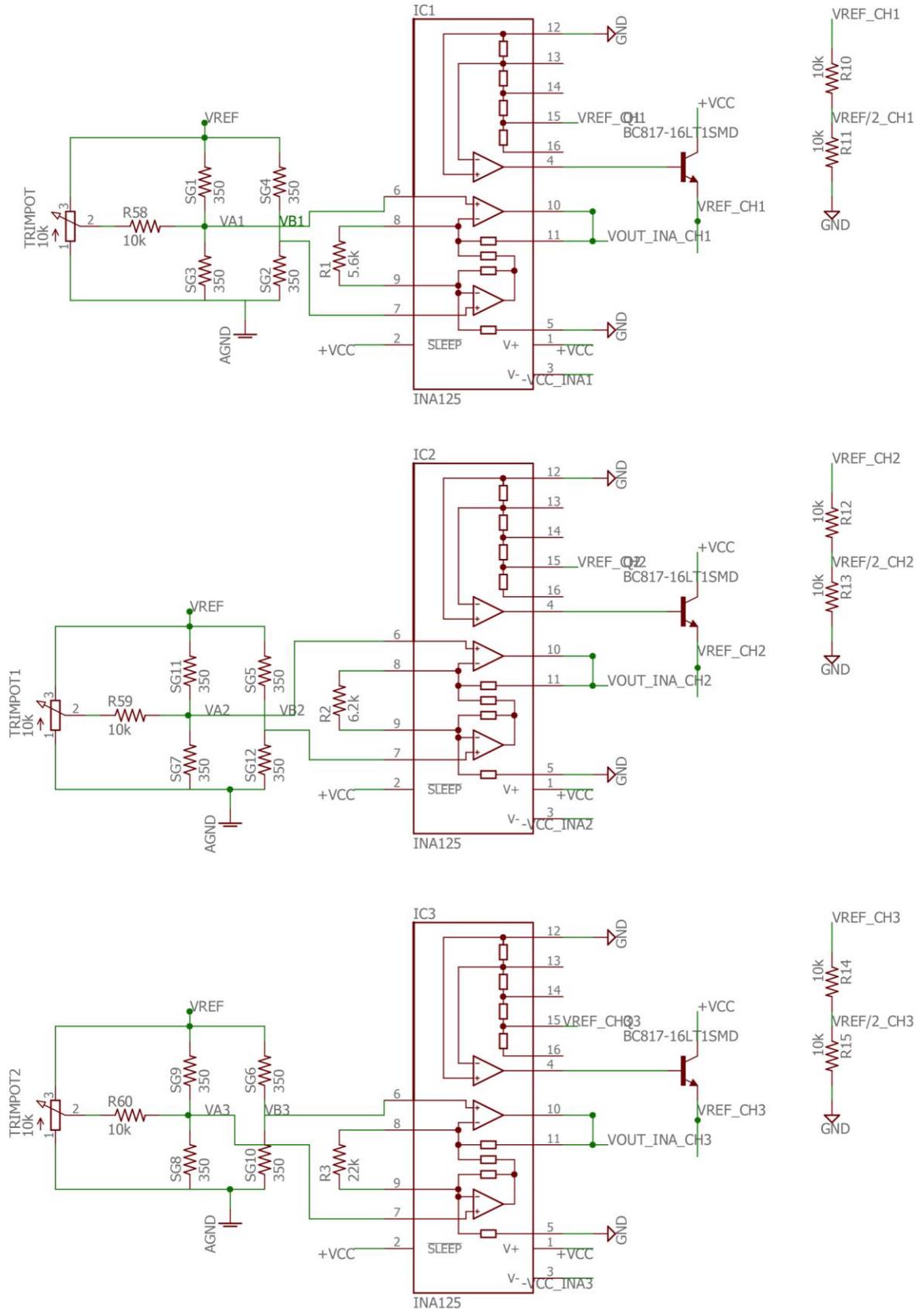


Escala: 1:2

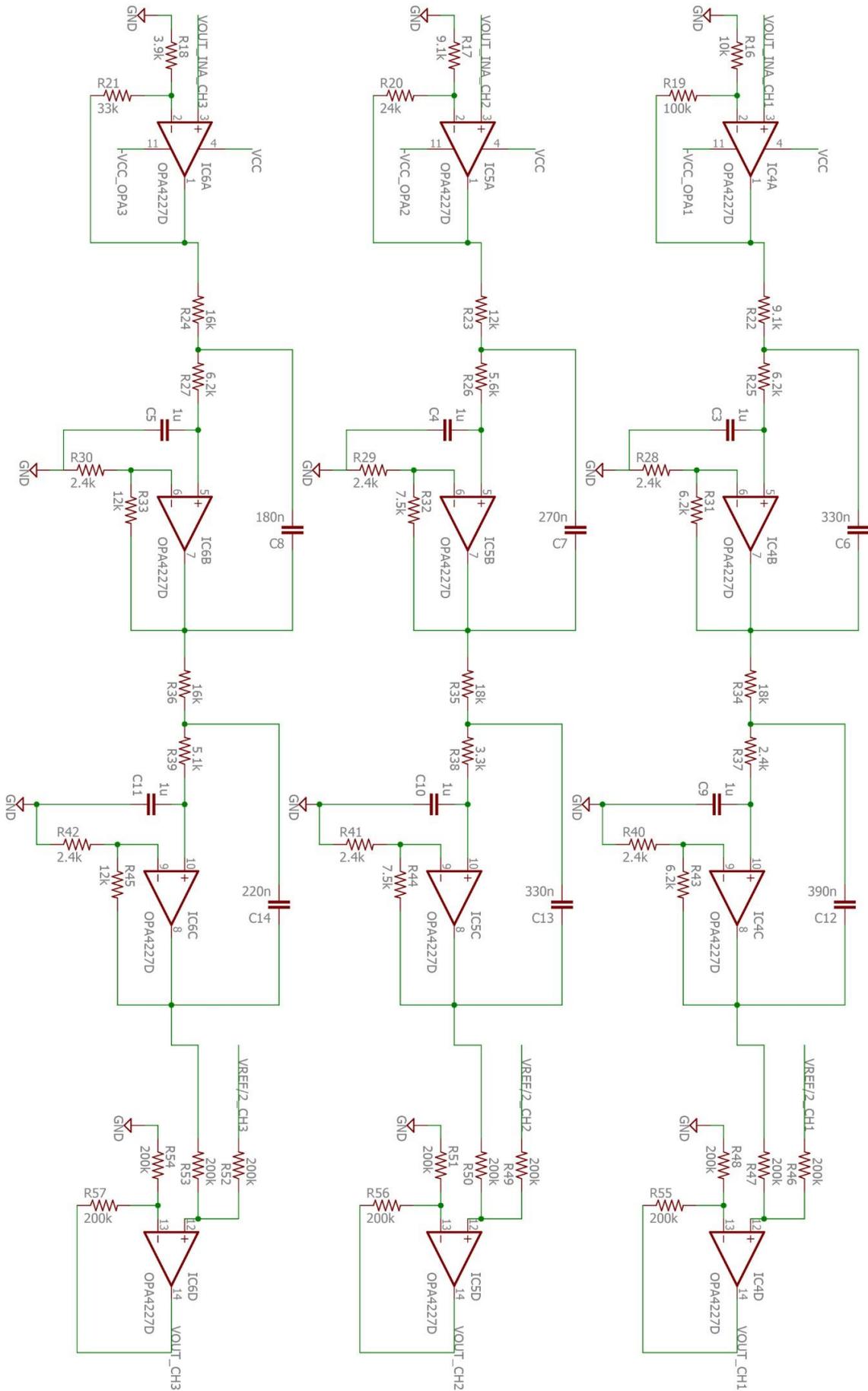
Material: Alumínio 6082-T6

PIGATTO, A. V. Porto Alegre, 2015.

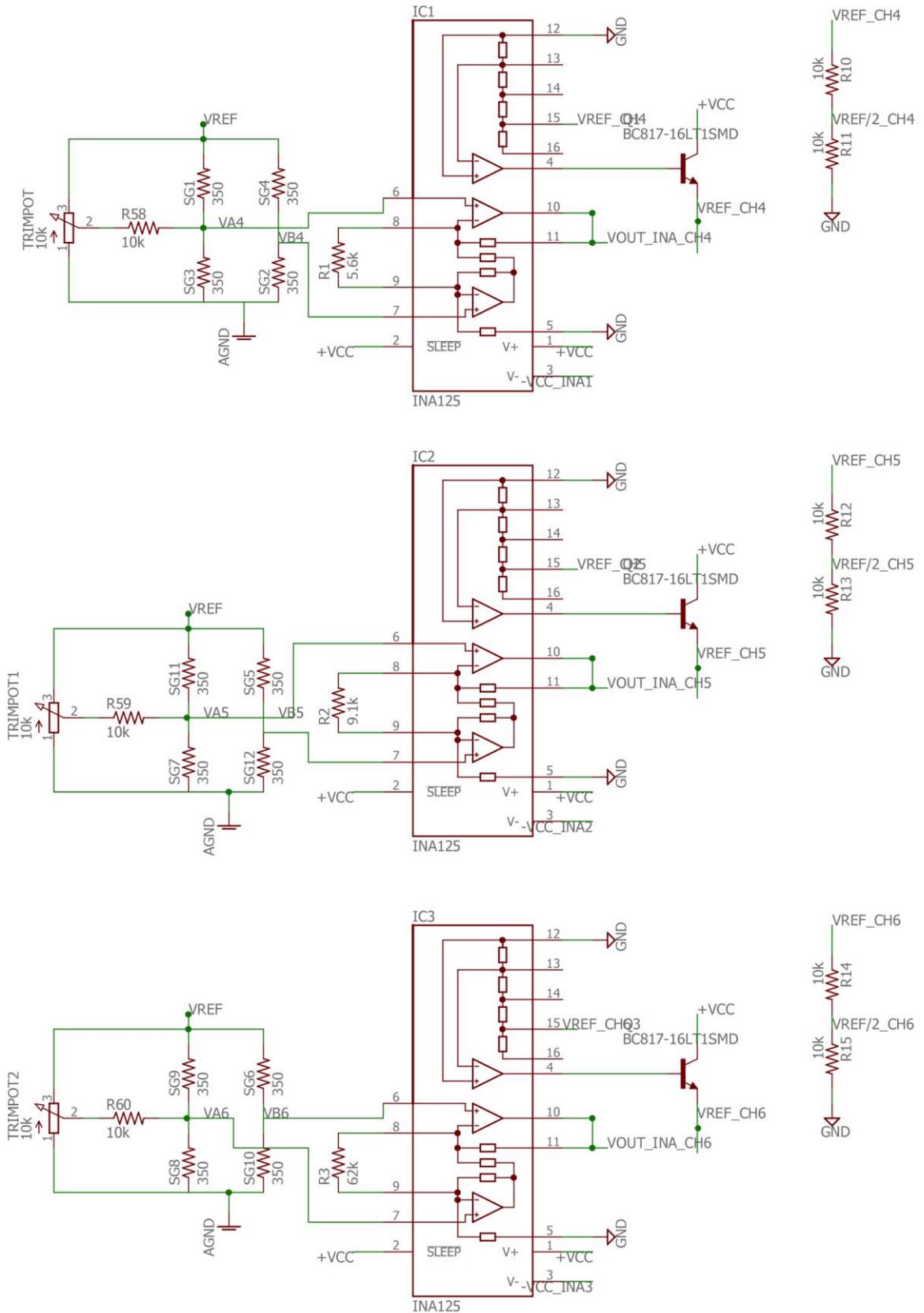
ANEXO D – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DOS CANAIS 1 A 3 – PRIMEIRA PARTE.



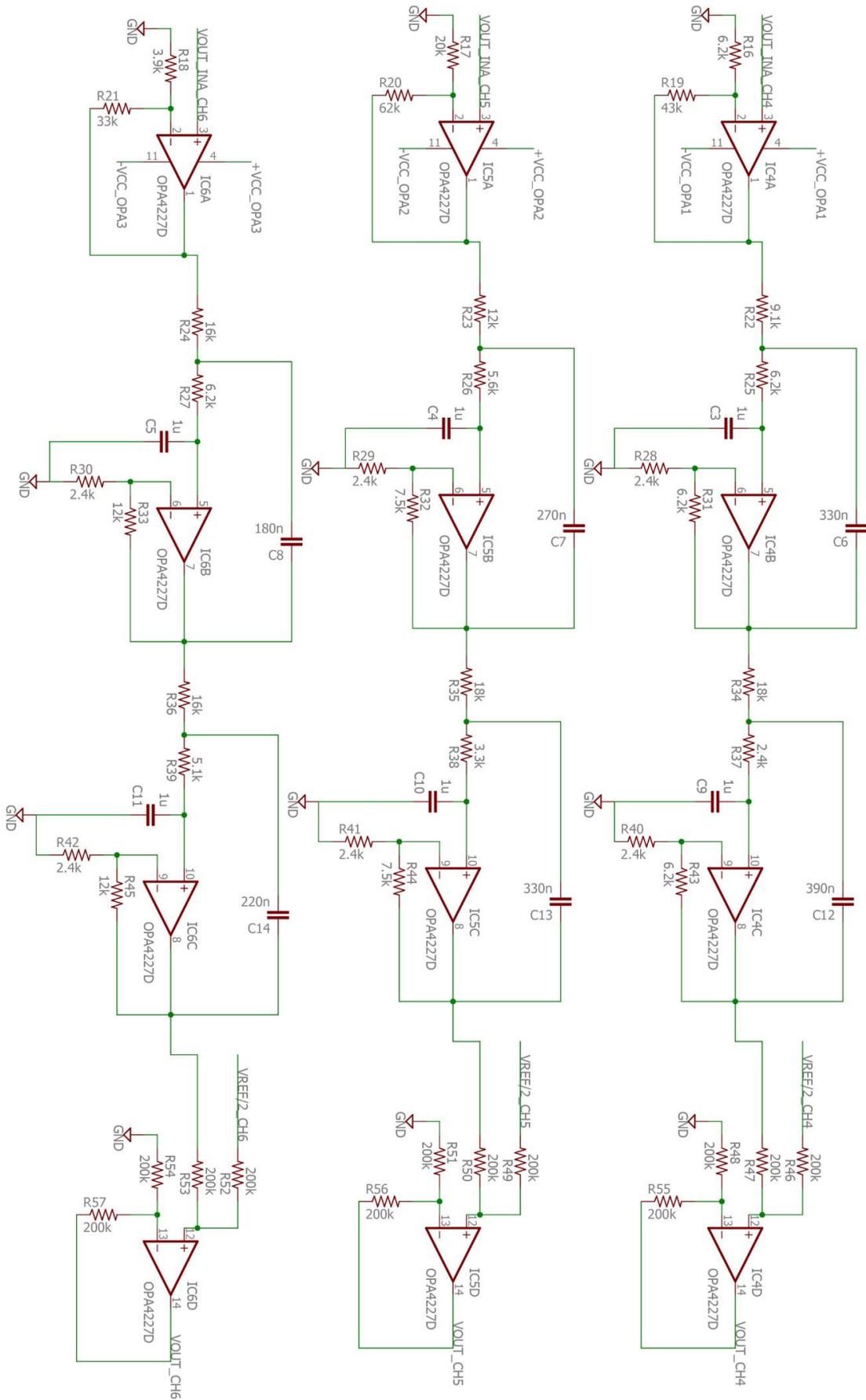
ANEXO D – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DOS CANAIS 1 A 3 – SEGUNDA PARTE.



ANEXO E – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DOS CANAIS 4 A 6 – PRIMEIRA PARTE.



ANEXO E – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DOS CANAIS 4 A 6 – SEGUNDA PARTE.



ANEXO F – ROTINA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO IMPLEMENTADA NO ARDUIMU.

```

#define Led 6

int canal1_0, canal2_0, canal3_0, canal4_0, canal5_0, canal6_0;
int canal1_1, canal2_1, canal3_1, canal4_1, canal5_1, canal6_1;
int canal1_2, canal2_2, canal3_2, canal4_2, canal5_2, canal6_2;
int canal1_3, canal2_3, canal3_3, canal4_3, canal5_3, canal6_3;
int canal1_4, canal2_4, canal3_4, canal4_4, canal5_4, canal6_4;

long tempo;
long timer_1 = 0;
long timer_2 = 0;
long timeNow = 0;

int cycleCount = -1;
int cicly_led = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(38400);
  pinMode(Led,OUTPUT);
}

void loop()
{
  timeNow = millis();

  if((timeNow-timer_1) >= 1000)
  {
    timer_1 = timeNow;
    led_control();
  }

  if((timeNow-timer_2) >= 5)
  {
    timer_2 = timeNow;
    cycleCount++;

    switch (cycleCount)
    {
      case(0):
        canal1_0 = analogRead(A0);
        canal2_0 = analogRead(A1);
        canal3_0 = analogRead(A2);
        canal4_0 = analogRead(A3);
        canal5_0 = analogRead(A6);
        canal6_0 = analogRead(A7);
        break;
    }
  }
}

```

```
case(1):
    canal1_1 = analogRead(A0);
    canal2_1 = analogRead(A1);
    canal3_1 = analogRead(A2);
    canal4_1 = analogRead(A3);
    canal5_1 = analogRead(A6);
    canal6_1 = analogRead(A7);
    break;

case(2):
    canal1_2 = analogRead(A0);
    canal2_2 = analogRead(A1);
    canal3_2 = analogRead(A2);
    canal4_2 = analogRead(A3);
    canal5_2 = analogRead(A6);
    canal6_2 = analogRead(A7);
    break;

case(3):
    canal1_3 = analogRead(A0);
    canal2_3 = analogRead(A1);
    canal3_3 = analogRead(A2);
    canal4_3 = analogRead(A3);
    canal5_3 = analogRead(A6);
    canal6_3 = analogRead(A7);
    break;

case(4):
    canal1_4 = analogRead(A0);
    canal2_4 = analogRead(A1);
    canal3_4 = analogRead(A2);
    canal4_4 = analogRead(A3);
    canal5_4 = analogRead(A6);
    canal6_4 = analogRead(A7);

    output_serial();
    break;

case(5):
    canal1_0 = analogRead(A0);
    canal2_0 = analogRead(A1);
    canal3_0 = analogRead(A2);
    canal4_0 = analogRead(A0);
    canal5_0 = analogRead(A1);
    canal6_0 = analogRead(A2);
    break;

case(6):
    canal1_1 = analogRead(A0);
```

```

    canal2_1 = analogRead(A1);
    canal3_1 = analogRead(A2);
    canal4_1 = analogRead(A3);
    canal5_1 = analogRead(A6);
    canal6_1 = analogRead(A7);
    break;

case(7):
    canal1_2 = analogRead(A0);
    canal2_2 = analogRead(A1);
    canal3_2 = analogRead(A2);
    canal4_2 = analogRead(A3);
    canal5_2 = analogRead(A6);
    canal6_2 = analogRead(A7);
    break;

case(8):
    canal1_3 = analogRead(A0);
    canal2_3 = analogRead(A1);
    canal3_3 = analogRead(A2);
    canal4_3 = analogRead(A3);
    canal5_3 = analogRead(A6);
    canal6_3 = analogRead(A7);
    break;

case(9):
    canal1_4 = analogRead(A0);
    canal2_4 = analogRead(A1);
    canal3_4 = analogRead(A2);
    canal4_4 = analogRead(A3);
    canal5_4 = analogRead(A6);
    canal6_4 = analogRead(A7);

    output_serial();
    cycleCount = -1;
    break;
}
}
}

void output_serial()
{

// Delimiter
Serial.write(171);
Serial.write(205);
Serial.write(239);
Serial.write(153);

// Iteration 0

```

```
Serial.write(canal1_0 >> 8);
Serial.write(canal1_0 & 0xff);
Serial.write(canal2_0 >> 8);
Serial.write(canal2_0 & 0xff);
Serial.write(canal3_0 >> 8);
Serial.write(canal3_0 & 0xff);
Serial.write(canal4_0 >> 8);
Serial.write(canal4_0 & 0xff);
Serial.write(canal5_0 >> 8);
Serial.write(canal5_0 & 0xff);
Serial.write(canal6_0 >> 8);
Serial.write(canal6_0 & 0xff);
```

```
// Iteration 1
```

```
Serial.write(canal1_1 >> 8);
Serial.write(canal1_1 & 0xff);
Serial.write(canal2_1 >> 8);
Serial.write(canal2_1 & 0xff);
Serial.write(canal3_1 >> 8);
Serial.write(canal3_1 & 0xff);
Serial.write(canal4_1 >> 8);
Serial.write(canal4_1 & 0xff);
Serial.write(canal5_1 >> 8);
Serial.write(canal5_1 & 0xff);
Serial.write(canal6_1 >> 8);
Serial.write(canal6_1 & 0xff);
```

```
// Iteration 2
```

```
Serial.write(canal1_2 >> 8);
Serial.write(canal1_2 & 0xff);
Serial.write(canal2_2 >> 8);
Serial.write(canal2_2 & 0xff);
Serial.write(canal3_2 >> 8);
Serial.write(canal3_2 & 0xff);
Serial.write(canal4_2 >> 8);
Serial.write(canal4_2 & 0xff);
Serial.write(canal5_2 >> 8);
Serial.write(canal5_2 & 0xff);
Serial.write(canal6_2 >> 8);
Serial.write(canal6_2 & 0xff);
```

```
// Iteration 3
```

```
Serial.write(canal1_3 >> 8);
Serial.write(canal1_3 & 0xff);
Serial.write(canal2_3 >> 8);
Serial.write(canal2_3 & 0xff);
Serial.write(canal3_3 >> 8);
Serial.write(canal3_3 & 0xff);
Serial.write(canal4_3 >> 8);
Serial.write(canal4_3 & 0xff);
```

```
Serial.write(canal5_3 >> 8);
Serial.write(canal5_3 & 0xff);
Serial.write(canal6_3 >> 8);
Serial.write(canal6_3 & 0xff);

// Iteration 4
Serial.write(canal1_4 >> 8);
Serial.write(canal1_4 & 0xff);
Serial.write(canal2_4 >> 8);
Serial.write(canal2_4 & 0xff);
Serial.write(canal3_4 >> 8);
Serial.write(canal3_4 & 0xff);
Serial.write(canal4_4 >> 8);
Serial.write(canal4_4 & 0xff);
Serial.write(canal5_4 >> 8);
Serial.write(canal5_4 & 0xff);
Serial.write(canal6_4 >> 8);
Serial.write(canal6_4 & 0xff);
}

void led_control()
{
  if(cicly_led == 0)
  {
    cicly_led = 1;
    digitalWrite(Led,HIGH);
  }
  else
  {
    cicly_led = 0;
    digitalWrite(Led,LOW);
  }
}
```

ANEXO G – ROTINA DE AQUISIÇÃO IMPLEMENTADA NO MATLAB.

```

clear all; close all; clc;

extension = '*.log';
title     = 'Select the XCTU .log file';
directory = 'C:/Users/frajo/Desktop/Aquisições Bike';

[FileName,PathName] = uigetfile(extension,title,directory);

[time,ID,data] = importfile(FileName,2,inf);

i_1 = 0;
i_2 = 0;

for i = 1:size(data,1)      % Varredura das linhas

    % IMU 1
    if ID{i,1}(1,9:12) == '7890'

        i_1 = i_1 + 1;
        % Interation 0
        FORCES_DIGITAL(i_1,1) = hex2dec(data{i,1}(1,1:4));
        FORCES_DIGITAL(i_1,2) = hex2dec(data{i,1}(1,5:8));
        FORCES_DIGITAL(i_1,3) = hex2dec(data{i,1}(1,9:12));
        FORCES_DIGITAL(i_1,4) = hex2dec(data{i,1}(1,13:16));
        FORCES_DIGITAL(i_1,5) = hex2dec(data{i,1}(1,17:20));
        FORCES_DIGITAL(i_1,6) = hex2dec(data{i,1}(1,21:24));

        i_1 = i_1 + 1;
        % Interation 1
        FORCES_DIGITAL(i_1,1) = hex2dec(data{i,1}(1,25:28));
        FORCES_DIGITAL(i_1,2) = hex2dec(data{i,1}(1,29:32));
        FORCES_DIGITAL(i_1,3) = hex2dec(data{i,1}(1,33:36));
        FORCES_DIGITAL(i_1,4) = hex2dec(data{i,1}(1,37:40));
        FORCES_DIGITAL(i_1,5) = hex2dec(data{i,1}(1,41:44));
        FORCES_DIGITAL(i_1,6) = hex2dec(data{i,1}(1,45:48));

        i_1 = i_1 + 1;
        % Interation 2
        FORCES_DIGITAL(i_1,1) = hex2dec(data{i,1}(1,49:52));
        FORCES_DIGITAL(i_1,2) = hex2dec(data{i,1}(1,53:56));
        FORCES_DIGITAL(i_1,3) = hex2dec(data{i,1}(1,57:60));
        FORCES_DIGITAL(i_1,4) = hex2dec(data{i,1}(1,61:64));
        FORCES_DIGITAL(i_1,5) = hex2dec(data{i,1}(1,65:68));
        FORCES_DIGITAL(i_1,6) = hex2dec(data{i,1}(1,69:72));

        i_1 = i_1 + 1;
        % Interation 3
        FORCES_DIGITAL(i_1,1) = hex2dec(data{i,1}(1,73:76));
        FORCES_DIGITAL(i_1,2) = hex2dec(data{i,1}(1,77:80));
        FORCES_DIGITAL(i_1,3) = hex2dec(data{i,1}(1,81:84));
        FORCES_DIGITAL(i_1,4) = hex2dec(data{i,1}(1,85:88));
        FORCES_DIGITAL(i_1,5) = hex2dec(data{i,1}(1,89:92));
        FORCES_DIGITAL(i_1,6) = hex2dec(data{i,1}(1,93:96));

        i_1 = i_1 + 1;
    end
end

```

```
% Iteration 4
FORCES_DIGITAL(i_1,1) = hex2dec(data{i,1}(1,97:100));
FORCES_DIGITAL(i_1,2) = hex2dec(data{i,1}(1,101:104));
FORCES_DIGITAL(i_1,3) = hex2dec(data{i,1}(1,105:108));
FORCES_DIGITAL(i_1,4) = hex2dec(data{i,1}(1,109:112));
FORCES_DIGITAL(i_1,5) = hex2dec(data{i,1}(1,113:116));
FORCES_DIGITAL(i_1,6) = hex2dec(data{i,1}(1,117:120));
```

```
end
```

ANEXO H – ROTINA DE GERAÇÃO DOS GRÁFICOS DO ENSAIO BIOMECÂNICO, IMPLEMENTADA NO MATLAB.

```

close all;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% a) Definição das Equações de Transferência do pedivela
% a.1) Definição dos períodos de cálculo de offset com base no ensaio.
% análise dos gráficos pelo usuário e entrada dos valores iniciais e finais
% de cada intervalo.
prompt='Deseja inserir os intervalos de Calibração? Digite 1 para SIM e 0
para Não \n';
ask_offset=input(prompt)

if(ask_offset==1)
    plot(time_p, FORCES_DIGITAL_FILT);
    prompt='Insira o valor inicial do primeiro intervalo de Calibração de
offset \n T1i=';
    T1i=input(prompt)
    prompt='Insira o valor final do primeiro intervalo de Calibração de
offset \n T1f=';
    T1f=input(prompt)
    prompt='Insira o valor inicial do primeiro intervalo de Calibração de
offset \n T2i=';
    T2i=input(prompt)
    prompt='Insira o valor final do primeiro intervalo de Calibração de
offset \n T2f=';
    T2f=input(prompt)
end;

%T1i; %Valor do tempo inicial para Cálculo do offset no início da
aquisição.
%T1f; %Valor do tempo final para Cálculo do offset no início da aquisição.
%T2i; %Valor do tempo inicial para Cálculo do offset no final da aquisição.
%T2f; %Valor do tempo final para Cálculo do offset no final da aquisição.

h_1 =
designfilt('lowpassfir','FilterOrder',8,'PassbandFrequency',20,'PassbandRipple',0.5, 'SampleRate',200);
FORCES_DIGITAL_FILT = filtfilt(h_1, FORCES_DIGITAL);
time_p=[0:1./200:(size(FORCES_DIGITAL(:,1))-1)./200];

%a.2) Cálculo dos offsets médios de cada canal.
O_CH1=(mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T1i.*200:T1f.*200,1))+mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T2i.*200:T2f.*200,1)))./2;
O_CH2=(mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T1i.*200:T1f.*200,2))+mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T2i.*200:T2f.*200,2)))./2;
O_CH3=(mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T1i.*200:T1f.*200,3))+mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T2i.*200:T2f.*200,3)))./2;
O_CH4=(mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T1i.*200:T1f.*200,4))+mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T2i.*200:T2f.*200,4)))./2;
O_CH5=(mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T1i.*200:T1f.*200,5))+mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T2i.*200:T2f.*200,5)))./2;
O_CH6=(mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T1i.*200:T1f.*200,6))+mean(FORCES_DIGITAL_FILT(T2i.*200:T2f.*200,6)))./2;

```

```
%a.3) Cálculo da Força em valor digital com anulação de offset:
```

```
F_CH1_D=FORCES_DIGITAL_FILT(:,1)-O_CH1;
F_CH2_D=FORCES_DIGITAL_FILT(:,2)-O_CH2;
F_CH3_D=FORCES_DIGITAL_FILT(:,3)-O_CH3;
F_CH4_D=FORCES_DIGITAL_FILT(:,4)-O_CH4;
F_CH5_D=FORCES_DIGITAL_FILT(:,5)-O_CH5;
F_CH6_D=FORCES_DIGITAL_FILT(:,6)-O_CH6;
```

```
%a.4) Conversão da força para [mV]
```

```
F_CH1_A=F_CH1_D.*(5./1023);
F_CH2_A=F_CH2_D.*(5./1023);
F_CH3_A=F_CH3_D.*(5./1023);
F_CH4_A=F_CH4_D.*(5./1023);
F_CH5_A=F_CH5_D.*(5./1023);
F_CH6_A=F_CH6_D.*(5./1023);
```

```
%a.5) Aplicação dos coeficientes angulares:
```

```
F_CH1=-F_CH1_A./(3.334e-3);
F_CH2=F_CH2_A./(8.500e-3);
F_CH3=F_CH3_A./(8.500e-3);
F_CH4=F_CH4_A./(3.303e-3);
F_CH5=F_CH5_A./(8.007e-3);
F_CH6=F_CH6_A./(8.597e-3);
```

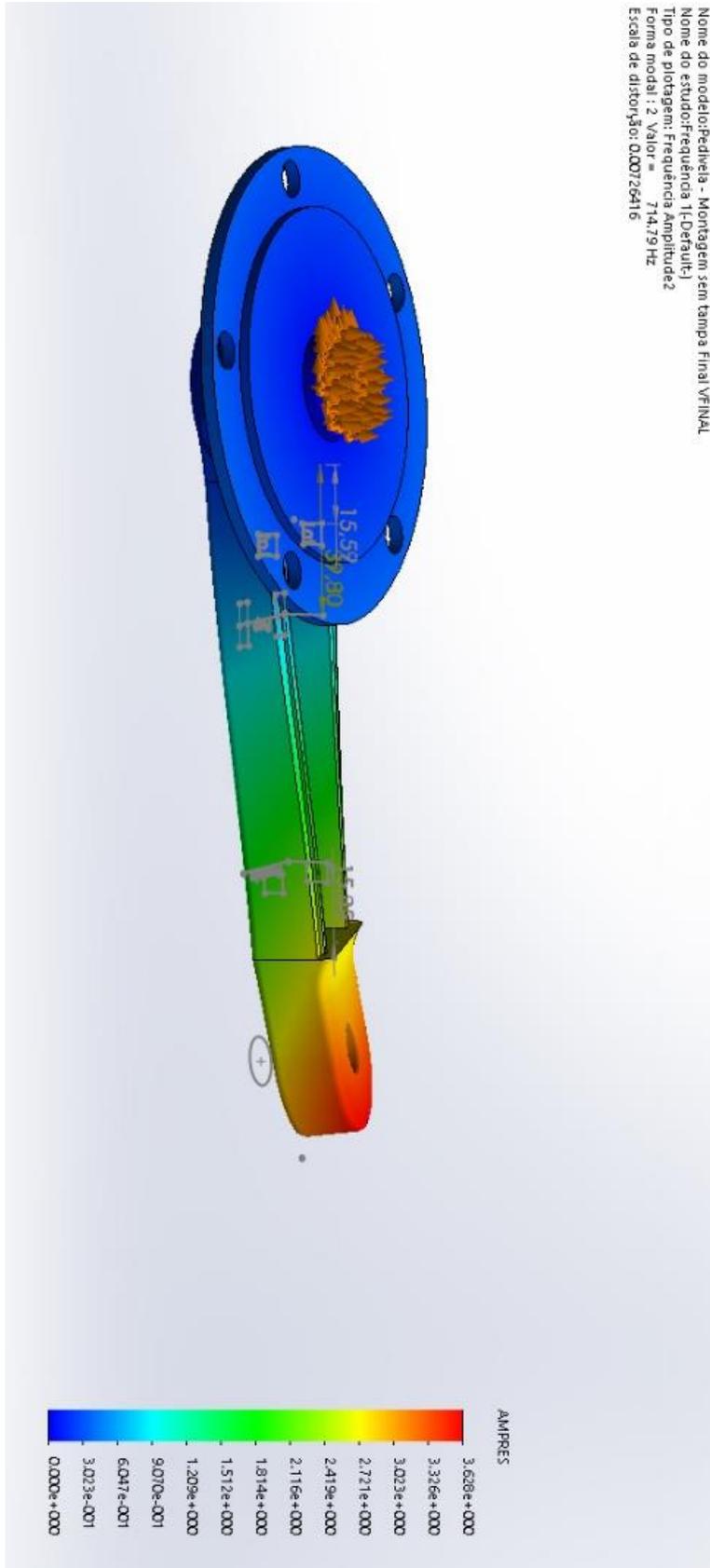
```
close all;
```

```
esqplot=figure (1);
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
set(gca, 'position', [0.055 0.115 0.90 0.80], 'units', 'normalized');
set(gca, 'FontSize', 13);
set(esqplot, 'Position', [0 0 1000 450]);
hold on;
plot(time_p, F_CH1, 'b', 'LineWidth', 2.2);
plot(time_p, F_CH2, 'r', 'LineWidth', 2.2);
plot(time_p, F_CH3, 'g', 'LineWidth', 2.2);
xlabel('Tempo [s]', 'FontSize', 16);
ylabel('Força [N]', 'FontSize', 16);
xlim([227 230]);
clear title;
title('Forças aplicadas ao pedivela Esquerdo (Sem Coroa)', 'FontSize', 16);
lperp=legend('Força Perpendicular', 'Força Lateral', 'Força Paralela', 'Location', 'best');
set(lperp, 'FontSize', 14);
grid on;
hold off;
print(esqplot, 'ensaio_rolo_1_esquerdo', '-dpdf', '-r0');
print(esqplot, 'ensaio_rolo_1_esquerdo', '-dpng', '-r300');
```

```
dirplot=figure (2);
set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
set(gca, 'position', [0.055 0.115 0.90 0.80], 'units', 'normalized');
set(gca, 'FontSize', 13);
set(dirplot, 'Position', [0 0 1000 450]);
hold on;
plot(time_p, F_CH4, 'b', 'LineWidth', 2.2);
plot(time_p, F_CH5, 'r', 'LineWidth', 2.2);
```

```
plot(time_p,F_CH6,'g','LineWidth',2.2);
xlabel('Tempo [s]','FontSize',16);
ylabel('Força [N]','FontSize',16);
xlim([227 230]);
clear title;
title('Forças aplicadas ao pedivela Direito (Com Coroa)', 'FontSize', 16);
lperp=legend('Força Perpendicular', 'Força Lateral', 'Força
Paralela', 'Location', 'best');
set(lperp, 'FontSize',14);
grid on;
hold off;
print(dirplot,'ensaio_rol_1_direito','-dpdf','-r0');
print(dirplot,'ensaio_rol_1_direito','-dpng','-r300');
```

ANEXO I – SIMULAÇÕES DINÂMICAS DO PEDIVELA DIREITO.



ANEXO J – SIMULAÇÕES DINÂMICAS DO PEDIVELA ESQUERDO.

