

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

CIRO HORNER HOE DE CASTRO

**SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS POR ELEMENTOS FINITOS E
VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS POR EXTENSOMETRIA**

São Carlos
2012

CIRO HORNER HOE DE CASTRO

**SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS POR
ELEMENTOS FINITOS E VALIDAÇÃO
DOS RESULTADOS POR
EXTENSOMETRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica

ORIENTADOR: PROF. EDSON GESUALDO

São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

H355s Horner Hoe de Castro, Ciro
SIMULAÇÃO DE ESFORÇOS POR ELEMENTOS FINITOS E
VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS POR EXTENSOMETRIA / Ciro
Horner Hoe de Castro; orientador Edson Gesualdo. São
Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Extensômetro. 2. elementos finitos. 3.
datalogger. 4. instrumentação. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ciro Horner Hoe de Castro

Título: "Simulação de esforços por elementos finitos e validação dos resultados por extensometria"

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 05 / 12 / 2012,*

com NOTA 10,0 (dez), pela Comissão Julgadora:

Prof. Assistente Edson Gesualdo (Orientador)
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Luiz Augusto Martin Gonçalves
SEM/EESC/USP

Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Agradeço a Deus, por tudo. *Gloria in excelsis Deo - et in terra pax hominibus bonæ voluntatis*

Dedico esse trabalho a:

Meus pais, que me ensinaram a aprender e sem os quais eu não seria nada do que sou hoje e a meu irmão e à minha irmã, que me ajudam a manter os pés no chão.

Agradecimentos

Correndo o risco de cometer injustiças, seguem aqui meus agradecimentos:

Ao Prof. Gesualdo, que me orientou durante esse trabalho e durante os últimos anos como meu tutor.

Ao Prof. Alvaro Costa Neto, que forneceu os extensômetros e pela orientação, tanto nos tempos de Equipe quanto agora.

Ao Jaime Marini Jr. do Laboratório de Eletrônica Embarcada, pelo auxílio e empolgação.

Ao Jorge Nicolau dos Santos do Laboratório de Termodinâmica, por compartilhar o conhecimento de *LabVIEW*®.

Ao Roberto Carlos Pratavieira do Laboratório de Termodinâmica, pelo fornecimento dos extensômetros e solicitude.

Ao José Francisco de Moraes (China) do Laboratório de Dinâmica, pela prestatividade e por evitar a perda de mais extensômetros me ensinando a colá-los.

À Cristina Marcia Machado Pessa Fonseca do Laboratório de Dinâmica, pela quase inesgotável paciência e maior ainda solicitude.

Ao Luiz Carlos Neves do Laboratório de Metrologia, pela ajuda com o traçador.

Ao Pedro Donizete Luchesi, Edson Roberto dos Santos, Flavio Borges de Oliveira, Marcelo Carlos Nery, José Orlando Lombardo, João do Bonfim Santos e Ronaldo Izzi da Oficina Mecânica da EESC, pelos empréstimos, conselhos, auxílios, pelo café e pelas conversas.

Ao Rui Bertho da Oficina Mecânica do Depto. de Eng. Elétrica, pela confiança, auxílio e pelas histórias.

À Jussara Ramos Zoia, por não ter desistido de mim.

Ao Alessandro Rodrigo Locati e Cesar Domingues do Laboratório de Ensino do Depto. de Eng. Elétrica, pelos componentes e pelas dicas.

À CoC-EE e claro, ao João Batista Betoni, por terem permitido a minha permanência aqui durante esses anos todos.

Ao Lucas Pacheco, pelo auxílio com o mundo do PIC.

Ao Yves Aurélio Pepe de Andrade, pela companhia, ajuda e inspiração.

À Brunna Flavyyelle da Silva Cândido, pelo incentivo constante.

À Unimagna Metalúrgica pelo patrocínio e prestação de serviços.

À PTC e equipe, tanto do Brasil quanto dos EUA, pelo fornecimento de licenças e solução de problemas; em especial, ao Helio Samora e Stacie Kaufman.

A todos os mestres e professores que tive na vida, profissionais ou não. Peculiaridades, manias e crenças à parte, agradeço pela vontade de ensinar e compartilhar sua experiência comigo.

Àquelas pessoas que fazem funcionar esse monstro que é a nossa Universidade: docentes, funcionários, técnicos, terceirizados e claro, a nós contribuintes. E quanto aos que se aproveitam das falhas e burocracias que o sistema possui em proveito próprio, prejudicando o país inteiro no processo, deixo aqui meu desprezo e a indignação com suas atitudes.

A todos aqueles cujos caminhos, em algum momento, cruzaram com o meu: amigos, companheiros, familiares, conhecidos, desafetos... A minha formação e evolução deve muito a vocês.

E finalmente, a você que está lendo esse trabalho, tornando-o mais do que apenas palavras deitadas no papel, esquecido em algum canto, meu muito obrigado.

Sumário

Folha de Aprovação.....	5
Agradecimentos.....	9
Sumário	11
Lista de figuras	15
Lista de tabelas.....	19
Siglas e abreviaturas	21
Resumo	23
Abstract	25
1. Introdução.....	27
1.1. Motivação.....	27
1.2. Introdução ao método dos elementos finitos.....	28
1.3. Extensometria [4]	30
1.3.1. Célula de carga [6]	32
1.4. Considerações finais	33
2. Materiais e métodos.....	35
2.1. O componente: braço de suspensão	35
2.1.1. Comportamento mecânico do material	35
2.1.2. Simulações.....	36
2.1.3. Extensômetros	39
2.2. <i>Jig</i> de testes	40
2.2.1. Célula de carga	42
2.2.1.1. Calibração	50
2.2.2. Instrumentação eletrônica	51
2.2.2.1. Eletrônica analógica	51
2.2.2.2. Eletrônica digital	54
2.2.2.3. Montagem	58
2.2.2.4. Instrumento virtual	59

2.3. Pós-processamento dos dados	61
2.4. Considerações finais	63
3. Resultados.....	65
3.1. Resultados das simulações	65
3.1.1. Carregamento vertical	65
3.1.1.1. <i>Single Pass</i> não linear	65
3.1.1.2. <i>Multi Pass</i> linear	66
3.1.1.3. <i>Single Pass</i> montado no <i>jig</i>	68
3.1.2. Carregamento lateral.....	69
3.1.2.1. <i>Single Pass</i> não linear	69
3.1.2.2. <i>Multi Pass</i> linear	70
3.1.2.3. <i>Single Pass</i> montado no <i>jig</i>	71
3.1.3. Resumo das simulações.....	73
3.2. Calibração da célula de Carga	74
3.3. Medições no componente.....	76
3.3.1. Carregamento vertical	76
3.3.2. Carregamento lateral.....	83
4. Conclusões	91
4.1. Comparação dos dados experimentais com simulados - Carregamento vertical	91
4.2. Comparação dos dados experimentais com simulados - Carregamento lateral	91
4.3. Análises.....	92
5. Comentários e trabalhos futuros	95
Referências bibliográficas.....	99
Apêndices.....	101
A1. Elementos <i>p</i> versus elementos <i>h</i> [3]	101
A1.1. Convergência de elementos <i>h</i> (método tradicional).....	101
A1.2. Convergência de elementos- <i>p</i>	103
B1. Montagem do circuito para condicionamento analógico da saída da célula de carga	105

B2.	<i>Layout</i> da PCB do circuito analógico completo	105
B3.	<i>Layout</i> da PCB do microcontrolador	106
C1.	Programa em <i>MATLAB</i> ® para pós processamento dos dados	107
D1.	Programa do PIC	111

Lista de figuras

Figura 1: Extensômetro utilizado na célula de carga	31
Figura 2: Ponte de Wheatstone.....	32
Figura 3: Vista explodida do braço.....	35
Figura 4: Comportamento mecânico: materiais ferrosos e não ferrosos.....	36
Figura 5: Malha em processo de refino.....	37
Figura 6: Travamentos e cargas	38
Figura 7: Simulação preliminar.....	38
Figura 8: Simulação do componente no <i>jig</i>	39
Figura 9: Extensômetro fixado no braço de suspensão.....	39
Figura 10: Locais de fixação dos extensômetros	40
Figura 11: Células de carga consideradas	40
Figura 12: Estrutura	41
Figura 13: Braço de suspensão e fixações	41
Figura 14: Estrutura com o braço montado	42
Figura 15: Montagem pronta para aquisição.....	42
Figura 16: Célula de carga escolhida.....	42
Figura 17: Especificações do extensômetro.....	43
Figura 18: Extensômetro e célula de carga limpa	43
Figura 19: Traçagem da posição dos extensômetros.....	44
Figura 20: Posicionamento e fixação	44
Figura 21: Preparação para aplicação do adesivo	45
Figura 22: Aplicação do adesivo	45
Figura 23: Resultado da colagem	46
Figura 24: Colocação dos contatos.....	46
Figura 25: Verificação da resistência do extensômetro	47
Figura 26: Medição da resistência de isolamento.....	47
Figura 27: Terminais protegidos.....	48
Figura 28: Disposição dos extensômetros na célula	48
Figura 29: Ponte de Wheatstone formada pelos extensômetros	49
Figura 30: Vista lateral da célula com conexões prontas.....	49
Figura 31: Amplificador de ponte HBM®.....	50
Figura 32: Montagem para calibração da célula de carga.....	50
Figura 33: Célula com 98 kg aplicados	51
Figura 34: Circuito de ponte e amplificador.....	53
Figura 35: Gerador de tensão de referência.....	54

Figura 36: Circuito do PIC e amplificador montado para testes.....	56
Figura 37: Densidade espectral de potência para amplitude da rugosidade (pista de asfalto).....	57
Figura 38: Circuito do microcontrolador	57
Figura 39: Caixa montada com painel aberto.....	58
Figura 40: Conectores blindados	59
Figura 41: Caixa em funcionamento	59
Figura 42: Transceptor RF e adaptador USB.....	60
Figura 43: Teste do VI	60
Figura 44: Diagrama de blocos do VI utilizado nos testes.....	61
Figura 45: Teste de recepção e demultiplexação.....	61
Figura 46: Leitura de teste da célula de carga	62
Figura 47: Comparativo das filtragens.....	63
Figura 48: Visão geral do resultado da simulação.....	65
Figura 49: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 2, 3 e 4	65
Figura 50: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 5, 6 e 7	66
Figura 51: Visão geral do resultado da simulação.....	66
Figura 52: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 2, 3 e 4	67
Figura 53: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 5, 6 e 7	67
Figura 54: Visão geral do resultado da simulação.....	68
Figura 55: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 2, 3 e 4	68
Figura 56: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 5, 6 e 7	69
Figura 57: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 5, 6 e 7	69
Figura 58: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 2, 3 e 4	70
Figura 59: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 5, 6 e 7	70
Figura 60: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 2, 3 e 4	71
Figura 61: Visão geral do resultado da simulação.....	71
Figura 62: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 2, 3 e 4	72
Figura 63: <i>Strain</i> nas regiões dos canais 5, 6 e 7	72
Figura 64: Pontos experimentais e aproximação linear do comportamento da célula de carga	75
Figura 65: Aquisição da célula de carga e curva filtrada	76
Figura 66: Aquisição canal 2 e curva filtrada.....	77
Figura 67: Aquisição canal 3 e curva filtrada.....	77
Figura 68: Aquisição canal 4 e curva filtrada.....	78
Figura 69: Aquisição canal 5 e curva filtrada.....	78
Figura 70: Aquisição canal 6 e curva filtrada.....	79

Figura 71: Aquisição canal 7 e curva filtrada.....	79
Figura 72: Comparação deformação e força aplicada canal 2.....	80
Figura 73: Comparação deformação e força aplicada canal 3.....	80
Figura 74: Comparação deformação e força aplicada canal 4.....	81
Figura 75: Comparação deformação e força aplicada canal 5.....	81
Figura 76: Comparação deformação e força aplicada canal 6.....	82
Figura 77: Comparação deformação e força aplicada canal 7.....	82
Figura 78: Aquisição da célula de carga e curva filtrada	83
Figura 79: Aquisição canal 2 e curva filtrada.....	83
Figura 80: Aquisição canal 3 e curva filtrada.....	84
Figura 81: Aquisição canal 4 e curva filtrada.....	84
Figura 82: Aquisição canal 5 e curva filtrada.....	85
Figura 83: Aquisição canal 6 e curva filtrada.....	85
Figura 84: Aquisição canal 7 e curva filtrada.....	86
Figura 85: Comparação deformação e força aplicada canal 2.....	86
Figura 86: Comparação deformação e força aplicada canal 3.....	87
Figura 87: Comparação deformação e força aplicada canal 4.....	87
Figura 88: Comparação deformação e força aplicada canal 5.....	88
Figura 89: Comparação deformação e força aplicada canal 6.....	88
Figura 90: Comparação deformação e força aplicada canal 7.....	89

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores obtidos das simulações	73
Tabela 2: Dados coletados para calibração da célula de carga.....	74
Tabela 3: Comparação valores experimentais/simulados, carga vertical	91
Tabela 4: Comparação valores experimentais/simulados, carga lateral.....	91

Siglas e abreviaturas

FEA – Finite element analysis

CFD – Computational fluid dynamics

MPa – Mega pascal

EDP – Equação diferencial parcial

PCB – *Printed circuit board*, placa de circuito impresso

VI – Instrumento virtual do *LabVIEW*®

IIR – *Infinite impulse response*, resposta infinita ao impulso

FIR – *Finite impulse response*, resposta finita ao impulso

AI - Amplificador de instrumentação

SNR - *Signal noise ratio*, relação sinal-ruído

Resumo

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema de validação para as simulações dos projetos realizados pela Equipe EESC USP Baja SAE. Para se alcançar esse propósito são realizadas simulações com a técnica de elementos finitos, no *software Pro/mechanica®*, de um componente da suspensão do veículo. O componente disponível é submetido a esforços em uma bancada de testes, e as deformações correspondentes aos esforços aplicados são medidas com o emprego de extensômetros, da eletrônica necessária para condicionamento dos sinais provenientes dos mesmos e do sistema digital que faz a conversão e a transmissão sem fios dos dados coletados. Para a medição das forças aplicadas é utilizada uma célula de carga, restaurada e calibrada para este propósito. Utilizou-se um instrumento virtual em *LabVIEW®* para aquisição dos dados e o *MATLAB®* para pós processamento. Também foram estudados diferentes métodos de simulação por elementos finitos voltados as simulações estruturais e métodos de filtragem computacional para reduzir o conteúdo de ruídos do sinal.

Palavras chave: Extensômetro, elementos finitos, *datalogger*, instrumentação.

Abstract

The objective of this work is to develop a system to validate the design simulations made by the EESC USP Baja SAE Team. In order to achieve this, finite element analyses of a vehicle's suspension arm were made, using the Pro/mechanica® software. This element was subjected to loads on a testing jig, and the corresponding strains were measured with the use of strain gages and its signal conditioning, and also the digital system for conversion and wireless transmission of the data. To measure the applied forces, a load cell was used, restored and calibrated for this purpose. A LabVIEW®'s virtual instrument was used for data acquisition and MATLAB® employed for post-processing. Different finite element methods applied to structural simulations and computational filtering algorithms to reduce noise content on the signal were also investigated.

Keywords: Strain gage, finite elements, datalogging, instrumentation.

1. Introdução

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema que permite a medição de esforços mecânicos em um componente veicular, valendo-se da utilização e aquisição de dados por extensometria. Os valores adquiridos foram utilizados para validação das simulações estruturais previamente realizadas.

1.1. Motivação

Esse trabalho foi motivado pelas atividades desenvolvidas durante a participação na Equipe EESC USP Baja SAE, sendo que no último ano (gestão iniciada em abril de 2011 e encerrada em junho de 2012), foi realizado o projeto dos componentes da suspensão traseira, que comparados com os componentes do ano anterior, apresentaram reduções de 4 kg de massa e R\$ 600,00 de custo, graças ao emprego das ferramentas de CAE. Essas reduções são bastante expressivas quando se têm limites de potência e concorrentes bastante competitivos.

Para alcançar esses valores, utilizou-se no componente braço de suspensão a liga de alumínio 6351 T6. Para se minimizar o problema da fadiga e garantir uma durabilidade razoável, o braço traseiro foi simulado e dimensionado de modo que o componente apresentasse vida útil de 10^5 ciclos de carregamento [1] (conforme descrito em 2.1.12.1.1. Comportamento mecânico do material).

Esse dimensionamento se provou suficiente, pois a peça suportou sete horas em pista, das quais cinco em competição. Porém a modelagem realizada não reflete a realidade, já que deveria ter sido considerada a distância entre o contato do pneu/pavimento e o ponto de aplicação da força no componente e a influência da geometria de suspensão, pois a variação de bitola produz um arrastamento (*scrub*) do pneu no sentido transversal do mesmo e a variação da cambagem gera momentos fletores e torçores de elevada amplitude, fatores que provocaram falhas em componentes anteriormente utilizados em competições.

Para se aperfeiçoar o projeto existente, torna-se necessário averiguar a fidelidade das simulações no mundo real, aplicando-se as mesmas cargas e com a peça travada pelos mesmos *constraints* utilizados na simulação, e quantificar os esforços sofridos pelo componente.

Uma vez validada a metodologia de simulação, poder-se-á corrigi-la com os dados obtidos em condições reais de utilização, permitindo maior critério e eficiência de projeto.

O objetivo desse trabalho foi realizar essa validação em laboratório, com a peça fixada em um *jig* de testes, submetida aos esforços que ocorreriam em pista. Para cumprir esse objetivo, realizaram-se os seguintes procedimentos:

- Simulação dos esforços e efeitos no componente;
- Construção de uma armação de testes (*jig*) que permita reproduzir as condições de esforços que foram empregadas na simulação;
- Instalação de extensômetros no braço de suspensão;
- Comparação dos resultados obtidos nos testes com os obtidos nas simulações;
- Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados (*datalogger*);

Apesar da existência de *dataloggers* para extensômetros comerciais, de elevada confiabilidade e precisão, o custo elevado dos mesmos inviabiliza sua aquisição pela Equipe.

1.2. Introdução ao método dos elementos finitos

Os programas de CAE (*computer aided engineering*) utilizados em projetos mecânicos, na indústria, podem ser classificados como programas de análises por elementos finitos e programas de análises de dinâmica multicorpos. Estes últimos realizam análises de movimento para calcular forças, posições, velocidades e acelerações de componentes, prevendo o comportamento de montagens e conjuntos. Nessa categoria pode-se citar o programa *MSC® Adams®* (bastante popular devido aos módulos específicos para simulações de dinâmica automotiva, ferroviária e aeronáutica, entre outros).

Já a técnica de elementos finitos pode ser utilizada na análise de campos elétricos e magnéticos, de escoamento de fluidos (*CFD – Computational Fluid Dynamics*), de comportamento térmico e de estruturas, sendo essa última a abordada nesse trabalho.

O procedimento de análise por elementos finitos consiste da divisão de um corpo em elementos que sejam simples na forma (linha, triângulo, quadrado, tetraedro, pentaedro ou hexaedro), tão pequenos quanto possível e que estejam permanentemente ligados entre si pelos seus vértices (nós). Elementos pequenos são importantes devido ao comportamento formulado por aproximação utilizando equações aplicáveis somente a elementos de tamanho infinitesimal. No entanto, uma quantidade finita dos elementos é necessária de modo a tornar possível o cálculo das equações em um tempo finito [2]. O conjunto de elementos e seus nós é chamado de malha.

O *software* de FEA (*Finite Element Analysis*) consiste de três partes distintas: pré-processador, *solver* e pós-processador. No pré-processador são realizadas tarefas como definição da malha, cargas e travamentos (*constraints*) e caracterização do material (isotropismo ou anisotropismo, orientação, densidade e módulo de Young). Já no *solver* são aplicadas e resolvidas as equações nos elementos, resultando em valores numéricos para deslocamentos e tensões em cada elemento. Finalmente, no pós-processador, esses valores são transferidos para o modelo, resultando em imagens tridimensionais facilitando a visualização pelo projetista.

Dentre os programas que realizam esse tipo de análise estão os renomados MSC® *Patran*®, *Nastran*®, *ANSYS*® e *PTC*® *Pro/mechanica*®.

Nesse trabalho, utilizou-se o programa *Pro/mechanica*®, por ser um módulo pré-carregado no programa de modelagem CAD *Pro/engineer*®, utilizado na Equipe EESC USP Baja SAE. Por ser integrado, agiliza-se o projeto, eliminando a etapa de importação e tratamento, além de economizar tempo de pré-processamento já que a parametrização permite a atualização do modelo em caso de alterações. Em programas onde não ocorre essa integração, como por exemplo, o *ANSYS*® *workbench*®, é necessária a importação de modelos neutros e tratamento do modelo antes do pré-processamento.

Além desse motivo, a escolha recaiu sobre esse *software* devido ao programa de fornecimento gratuito de licenças para universidades e estudantes e aos treinamentos disponibilizados.

Outra vantagem desse programa é a utilização do método-p de cálculo, que fornece resultados precisos com menor trabalho e/ou conhecimento do usuário por trabalhar com polinômios de interpolação de elevado grau.

Em resumo [3]:

- A mesma malha pode ser utilizada durante a análise de convergência, ao invés de recriar a malha ou refinar localmente como requerido pelo método-h;
- A malha quase sempre é mais grosseira e contém menos elementos do que as de código-h. A quantidade reduzida de elementos utilizados pelo *Pro/mechanica*® (que pode chegar a alguns pares de ordem de magnitude inferior) inicialmente reduz a carga computacional, porém caso seja necessária a elevação da ordem polinomial na busca pela convergência, essa carga se eleva consideravelmente;

- As restrições para tamanho e formato são menos severas para elementos-p do que para elementos-h (que apresentam preocupações com razão de aspecto, obliquidade, etc.);
- Geradores automáticos de malha, que costumam produzir malhas ruins para elementos-h são muito mais eficientes com os elementos-p, devido às exigências e limitações menos severas de geometria de malha.
- Uma vez que a mesma malha é utilizada ao longo da análise, essa pode ser amarrada direta e parametricamente à geometria. Esse é o principal motivo que faz o *Pro/mechanica*® capaz de realizar estudos de sensibilidade e otimização, durante os quais parâmetros geométricos de um corpo podem mudar mas o programa não necessita recriar a malha da peça.

Para um esclarecimento maior sobre as abordagens por elementos-h e elementos-p pode-se consultar o Apêndice A.1 Elementos p *versus* elementos h

1.3. Extensometria [4]

Os extensômetros (*strain gages* ou *strain gauges*) são componentes utilizados como sensores de deformação relativa (*strain*). Existem diversos tipos de extensômetros disponíveis comercialmente:

- Resistivos;
- Piezoresistivos;
- Capacitivos;
- Piezoelétricos;
- Fotoelásticos;
- Mecânicos;

Cada um apresentando vantagens e desvantagens em relação aos outros.

O extensômetro mais comum, empregado em engenharia civil e mecânica, é o resistivo que se baseia na variação da resistência elétrica sofrida por um condutor quando submetido à deformações.

Apesar de observada pela primeira vez por volta de 1850, por Charles Wheatstone, e estudado por Lorde Kelvin, a primeira tentativa de sucesso de empregar esse efeito em medições de deformações se deu em por volta de 1938, utilizando tecidos de seda com um filamento condutor intermeado na trama ou lenços de papel com o filamento superposto no laboratório de sismologia do MIT.

Atualmente, utilizam-se extensômetros resistivos consistindo de um filme metálico com sua estrutura formada através de processos foto-químicos, montados em um filme de resina ou polímero (Figura 1). O verso desse filme é então colado na peça sob teste com um adesivo adequado. Podem ser utilizados adesivos de base epóxi ou cianoacrilato, desde que os mesmos não interfiram nas deformações que a peça sofre.

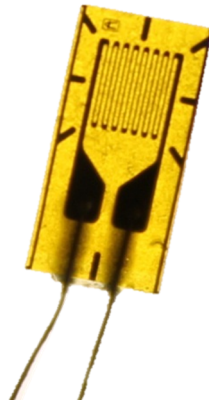


Figura 1: Extensômetro utilizado na célula de carga

O valor de *strain* medido por um extensômetro pode ser relacionado com o valor de tensão mecânica (*stress*) à que a amostra é submetida. Essa relação é linear na região elástica do material e é própria de cada material, sendo caracterizada pelo módulo de Young:

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

Equação 1: Módulo de Young

A sensibilidade de um extensômetro resistivo é denominada *Gage Factor* e é definida como a razão entre a variação relativa da resistência e a deformação relativa ε (strain):

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\varepsilon} \text{ onde } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Equação 2: Gage Factor

Como a variação ΔR de um extensômetro é da ordem de 10^{-4} a $10^{-2} \Omega/\Omega$, se torna necessária a utilização de um método que possibilite medir essa variação com precisão. O circuito mais adequado para isso é a ponte de Wheatstone, que pode ser observada na Figura 2 abaixo.

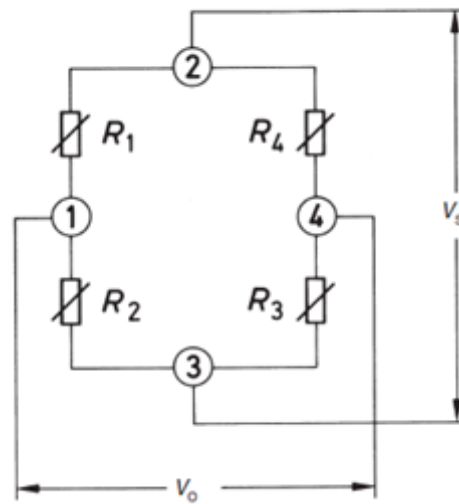


Figura 2: Ponte de Wheatstone

Após modelar o circuito, obtém-se o seguinte equacionamento [5]:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Equação 3: Modelagem da ponte de Wheatstone

Caso a ponte não seja constituída por quatro extensômetros, deve-se igualar os valores de ε referentes aos ramos invariantes à zero. Pode-se notar que a sensibilidade é proporcional à quantidade de braços variantes, além de obter melhor compensação térmica.

Devido à saída diferencial da ponte de Wheatstone, o amplificador mais adequado para o condicionamento analógico da saída da ponte é o amplificador de diferença ou o amplificador de instrumentação para se evitar o carregamento da ponte.

1.3.1. Célula de carga [6]

Nesse trabalho foi utilizada uma célula de carga no *jig* de testes, permitindo o conhecimento da amplitude da força aplicada no componente e registro da mesma.

Apesar de existirem uma grande variedade de tipos, as células de cargas baseadas em extensômetros são as mais utilizadas atualmente. Esse tipo de célula é um transdutor que converte força em uma saída elétrica mensurável e pode ser classificado de acordo com a maneira de se detectar a força (flexão, cisalhamento, tração, compressão, torção, etc.).

As células de carga usualmente apresentam, com a aplicação da força, uma deformação elástica com tração de um lado e compressão do outro, permitindo assim o uso de quatro extensômetros ativos, um em cada braço da ponte, quadruplicando a sensibilidade e compensando a temperatura.

1.4. Considerações finais

Assim, como é mostrado nos capítulos seguintes, simulou-se o comportamento de um braço de suspensão, construiu-se uma estrutura para submeter a peça real aos esforços correspondentes que sofre no veículo em movimento; mediu-se as forças com o emprego de uma célula de carga e as deformações correspondentes com extensometria. Compararam-se os resultados experimentais e simulados com o objetivo de se validar as considerações feitas na simulação da peça.

2. Materiais e métodos

2.1. O componente: braço de suspensão

Esse trabalho não abordará as etapas de projeto do braço de suspensão, atendo-se apenas à simulação em sua configuração final.

O componente é um braço de suspensão traseiro, para ser utilizado em um sistema *semi-trailing arm* (Figura 3). A fixação do amortecedor foi movida do braço para a manga de eixo, de modo que o mesmo sofresse menos esforços de flexão. Seu material é o alumínio aeronáutico 6351, com tratamento térmico T6. Esse material é largamente utilizado na indústria, pois é uma liga de alumínio soldável com maior facilidade (não necessita preaquecimento, atmosfera controlada ou outras particularidades, sendo soldável com equipamento TIG) de maior resistência.

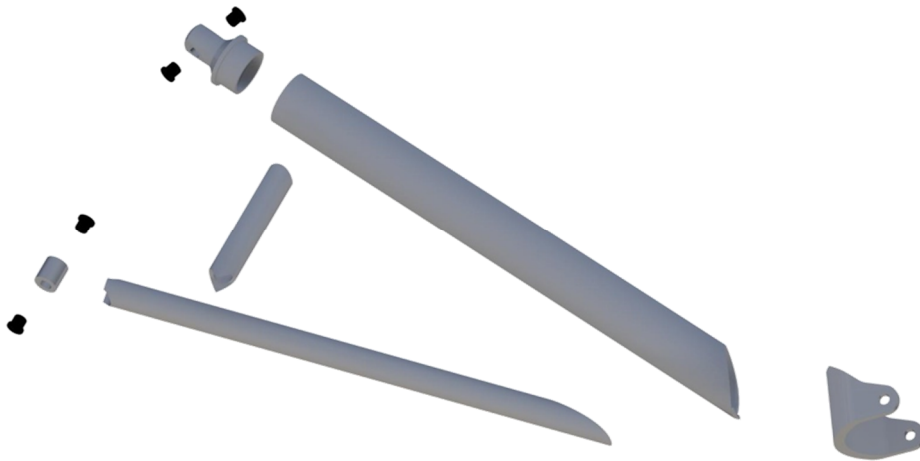


Figura 3: Vista explodida do braço

2.1.1. Comportamento mecânico do material

Por ser uma liga não ferrosa, esse material sofre do efeito de fadiga. Esse efeito, que começou a ser mais estudado após o advento da era da aviação a jato, consiste na diminuição progressiva da resistência mecânica de um material quando o mesmo é submetido a esforços cíclicos.

Até mesmo materiais de elevada resistência, como ligas de titânio, não estão imunes a esse efeito, porém o comportamento dos materiais ferrosos (ligas de ferro-carbono, como aços, inoxidáveis ou ferros fundidos) é diferente: enquanto que nos metais não ferrosos sua resistência mecânica decai com a aplicação de ciclos de carregamento, independente da amplitude dos mesmos, nas ligas ferrosas existe um patamar onde

se considera que a aplicação de ciclos de certa amplitude máxima não interfere na resistência da liga, conforme pode ser observado na Figura 4 [7].

Como mostra a figura, um componente de aço que esteja sujeito à solicitações de cerca de 22 kpsi (151,6 MPa) teria o que é conhecido por vida útil infinita. Já um componente de metal não ferroso iria sofrer uma quebra por fadiga em algum momento, por menor que fosse a solicitação.

Por esse motivo, o dimensionamento não é feito aplicando-se o coeficiente de segurança na tensão admissível (tensão na qual ocorre o escoamento, ou seja, a deformação passa de elástica para plástica), mas sim em valores inferiores encontrados em tabelas, relacionados com a quantidade de ciclos dessa amplitude que a peça suporta.

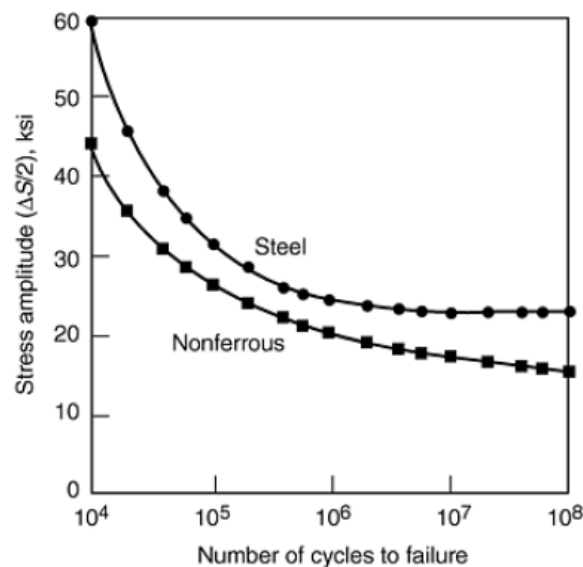


Figura 4: Comportamento mecânico: materiais ferrosos e não ferrosos

De modo a se obter um componente confiável, o braço foi dimensionado de modo que, na situação equivalente a 3 g de desaceleração vertical e 2 g de desaceleração lateral, a tensão máxima não ultrapassasse 100 MPa, resultando em uma vida útil da ordem de 10^5 ciclos [1]. Esses valores de desaceleração foram escolhidos com base na experiência da equipe, e o presente trabalho objetiva estabelecer critérios de validação que fundamentem a experiência.

2.1.2. Simulações

A primeira simulação realizada pretende identificar os problemas e corrigi-los, com simulações mais simples e rápidas. Assim as *constraints* foram simplificadas e iniciou-se o refino de malha (Figura 5). Como o componente é composto por tubos de diferentes diâmetros que se juntam em ângulos agudos, era esperado que ocorressem pro-

blemas nessas junções. Nessa simulação foi aplicada uma força diretamente nos furos de fixação da manga de eixo e a restrição da rotação da bandeja imposta pelo amortecedor foi feita na face superior da fixação da manga de eixo.

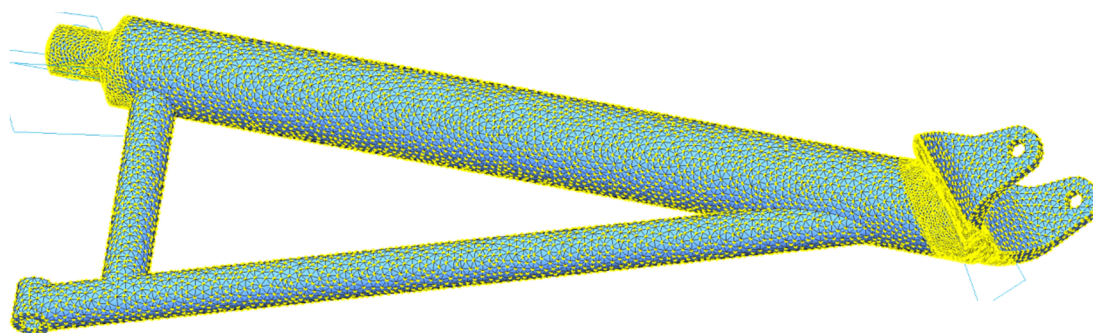


Figura 5: Malha em processo de refino

Após essa rodada de simulações (Figura 7), foi observado que as condições de contorno não eram satisfatórias, pois a fixação real no carro induz momentos que torcem a estrutura. Além disso, a entrada de cargas vindas da pista se dá no pneu e as dimensões do mesmo (raio e *offset*) também produzem elevados valores de momentos, que dependem das condições da pista e dinâmica do veículo. Assim, novas condições foram impostas na simulação, de modo a melhorar a fidelidade da mesma. A restrição que o amortecedor impõe no componente foi definida em um ponto fora do mesmo, utilizando-se de conexões rígidas (*rigid links*) para relacionar esse ponto com as áreas de contato. Além disso, definiu-se um ponto no espaço cujo posicionamento reflete o contato do pneu com o pavimento e nesse ponto foram aplicados os esforços verticais e laterais (equivalentes à uma aterrissagem e a carga advinda de uma curva), conforme pode ser visto na Figura 6.

Para fins de comparação, essas simulações foram realizadas pelo método de '*multi-pass adaptive*', variando-se os polinômios de grau 1 até 9, ou até a convergência ser atingida dentro de um intervalo de 12% e pelo método de '*single pass adaptive*' não linear, considerando as grandes deformações, buscando a convergência de 10%. A convergência no primeiro caso é mais garantida devido ao elevado grau alcançado pelos polinômios, porém como o componente possui um comprimento maior que a largura se torna interessante a consideração das grandes deformações, feitas pela simulação não linear.

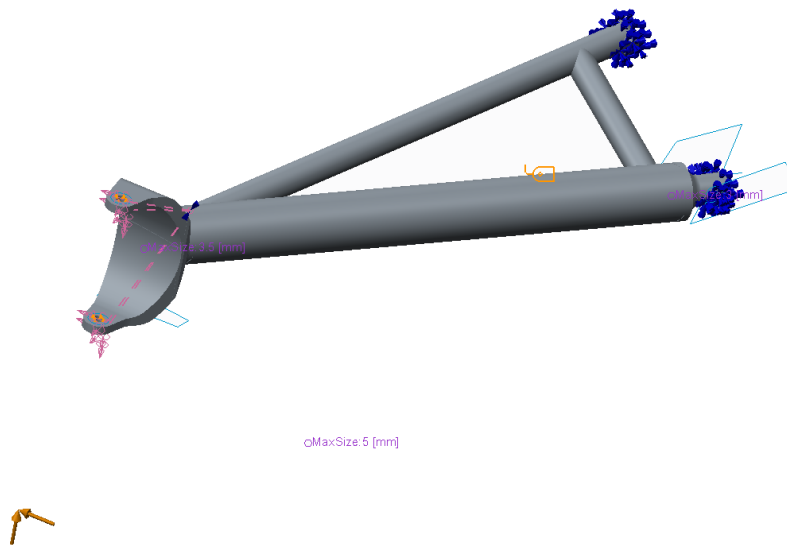


Figura 6: Travamentos e cargas

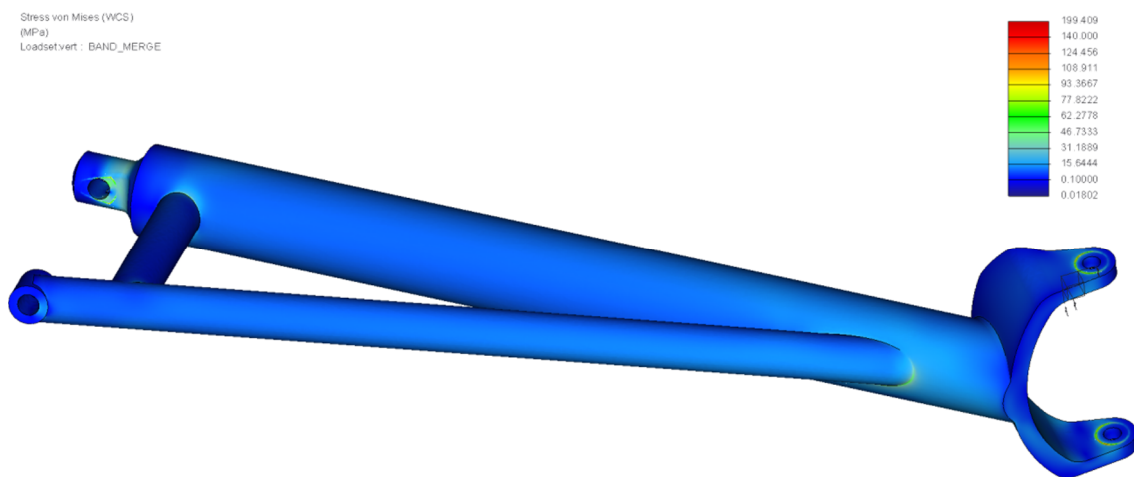


Figura 7: Simulação preliminar

Finalmente, uma última simulação foi feita depois da estrutura de testes estar projetada. A simulação foi feita com o componente montado na estrutura, considerando as interfaces de contato e deformações da estrutura, de modo que as condições fossem mais fiéis ao que seria observado nos testes (Figura 8).

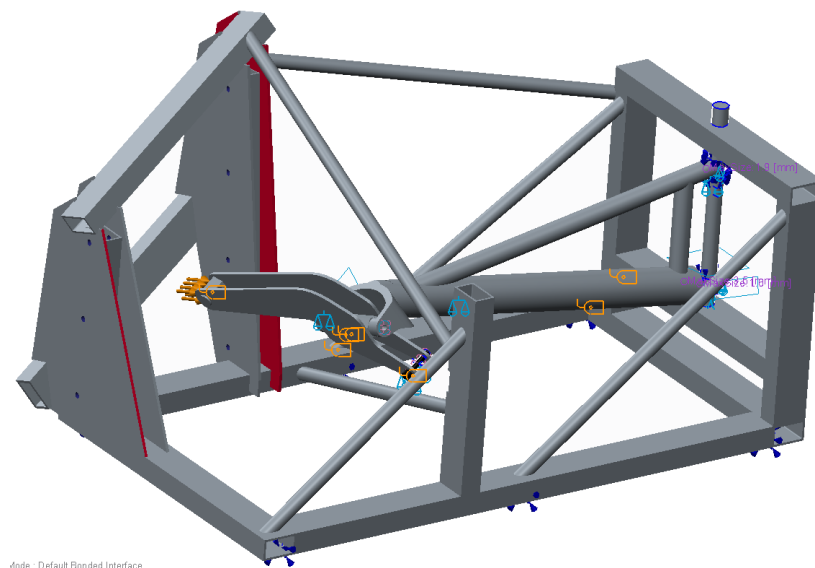


Figura 8: Simulação do componente no *jig*

2.1.3. Extensômetros

Os extensômetros instalados no componente são da Kyowa®, modelo KFG-10-120-C1-23. Suas características são *Gage Factor* de 2,15, comprimento de 10 mm, compensação térmica para alumínio e resistência nominal de 120 Ω .

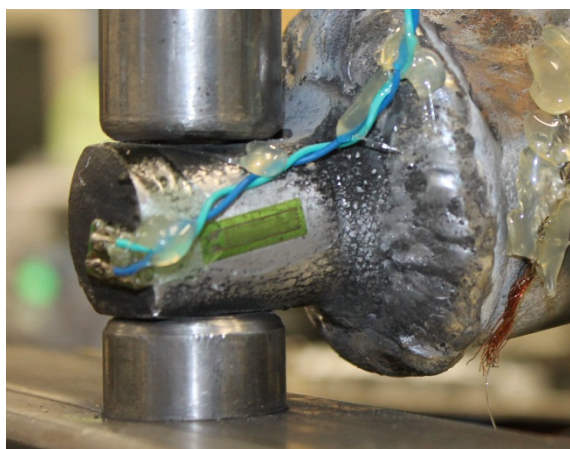


Figura 9: Extensômetro fixado no braço de suspensão

Os locais de fixação dos extensômetros (Figura 9) foram escolhidos observando as regiões de concentração de tensão nas simulações. Além disso, como os extensômetros são relativamente grandes, foram escolhidas regiões com gradientes não muito acentuados e com estado plano de tensões, ou seja, longe de concentrações em soldas e similares. Os locais podem ser observados na Figura 10 abaixo.

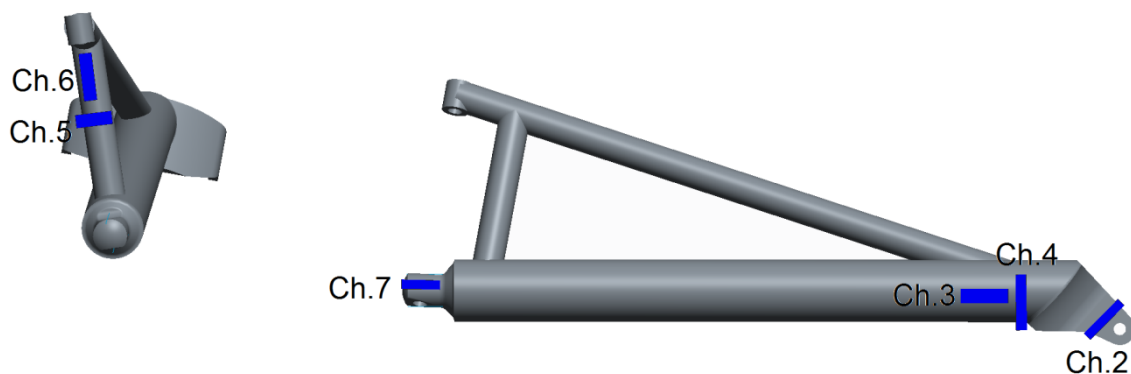


Figura 10: Locais de fixação dos extensômetros

2.2. Jig de testes

A estrutura utilizada para fixar o componente durante a realização dos testes estáticos foi projetada de forma a ter uma elevada resistência, minimizando as deformações, com a aplicação das cargas, e as interferências nas medições. Assim, ela foi projetada com tubos de aço, de secção retangular 30 mm x 50 mm, com quatro milímetros de espessura e geometria que proporcionasse elevada rigidez.

Seu projeto foi feito no *Pro/engineer*®, para garantir a reprodução das condições de contorno utilizadas no *Pro/mechanica*®. Algumas opções foram consideradas para aplicação de cargas definidas, por exemplo, com pesos, porém a opção adotada foi a de utilizar uma rosca para regular a carga aplicada com maior precisão, permitindo a aplicação de cargas mais elevadas com economia de espaço e maior praticidade. Para medir a carga aplicada pela rosca foi utilizada uma célula de carga. Algumas opções foram consideradas, conforme observado na Figura 11. A célula escolhida foi a primeira do lado esquerdo por ter características mais favoráveis.

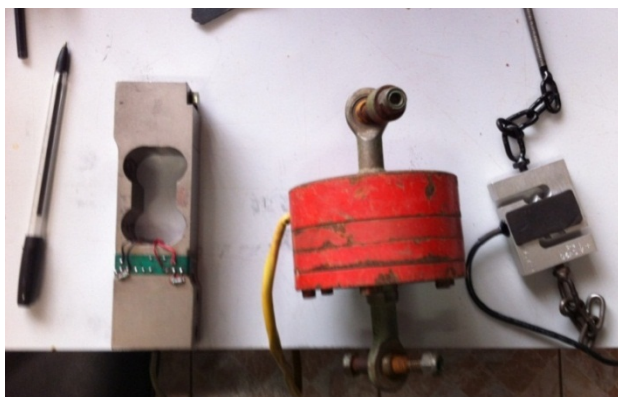


Figura 11: Células de carga consideradas

O projeto levou em consideração a facilidade de fabricação e montagem, pois a geometria apresenta angulações nos três eixos (Figura 12). Optou-se por utilizar chapas de aço cortadas a *laser* nos suportes da célula de carga, garantindo o correto posicionamento das entradas de carga. Chapas de aço também foram utilizadas parafusadas no braço de suspensão de modo a se obter a entrada de cargas nos pontos corretos (Figura 13), equivalentes à fixação do amortecedor e ao contato pneu-pavimento.

O projeto e a estrutura fabricada podem ser vistos montados na Figura 14 e na Figura 15, configurada para aplicação de carregamento lateral. Em caso de aplicação de carregamento vertical o volante e a célula de carga devem ser fixados no outro tubo de suporte.

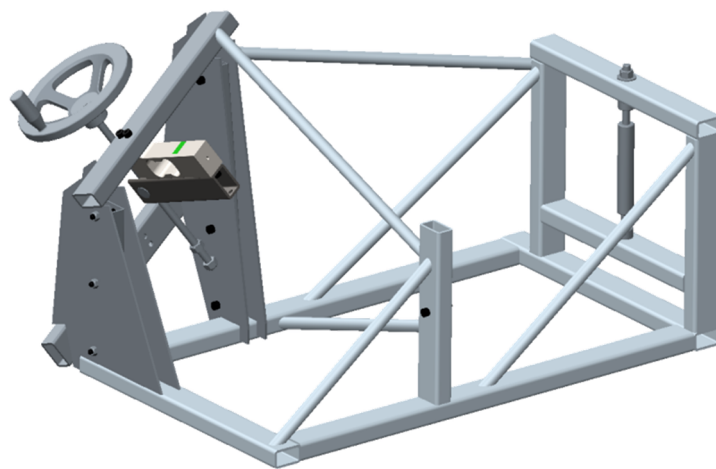


Figura 12: Estrutura

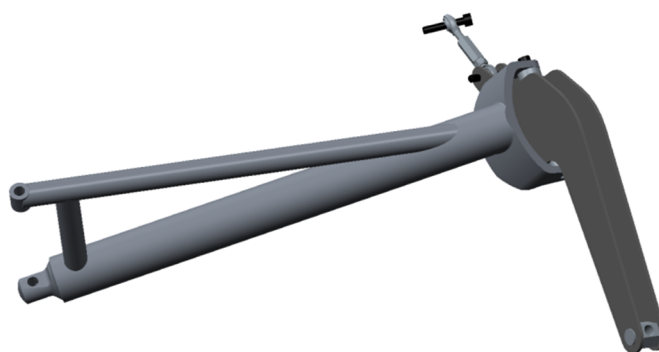


Figura 13: Braço de suspensão e fixações

A fabricação foi realizada na Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Elétrica, utilizando solda por eletrodo revestido nos locais onde a corrente elevada promoveria uma penetração adequada, ou MIG onde necessária soldagem com menor intensidade de corrente.

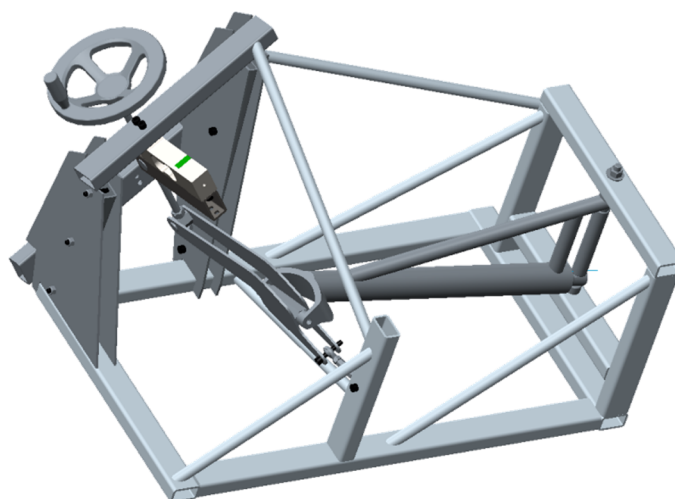


Figura 14: Estrutura com o braço montado



Figura 15: Montagem pronta para aquisição

2.2.1. Célula de carga

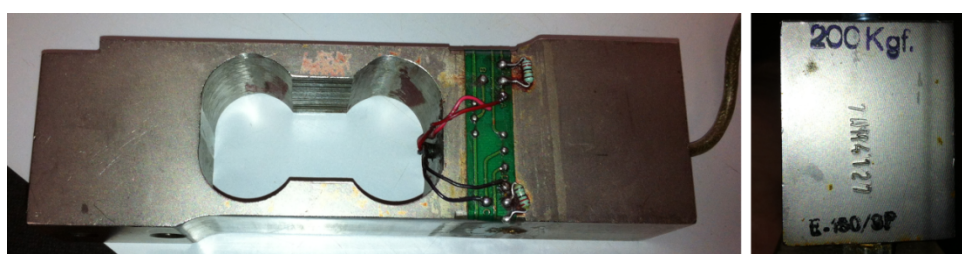


Figura 16: Célula de carga escolhida

A célula mais adequada possui capacidade máxima de 200 kg e foi retirada de uma balança digital (Figura 16). Em uma primeira verificação a mesma apresentava um

extensômetro com resistência bastante diferente e outro em aberto. A melhor solução encontrada foi a de retirar os extensômetros velhos, colar novos e descobrir o novo comportamento da célula, permitindo a obtenção de resultados precisos.

Os extensômetros que substituiriam os antigos são da marca Kyowa®, modelo KFD-2-C1-11, com comprimento de rede de dois milímetros.(Figura 17 e Figura 18)

TEMPERATURE COMPENSATION FOR TEMPERATURKOMPENSATION FÜR COMPENSATION DE TEMPERATURE POUR COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA PARA		STEEL STAHL AÇO	STAINLESS STEEL ROSTFREIER STAHL AÇO INOXIDÁVEL	ALUMINIUM ALUMINIUM ALUMÍNIO	MAGNESIUM MAGNESIUM MAGNÉSIO	GAGE RESISTANCE WIDERSTAND RESISTANCE RESISTÊNCIA	Ω 120.2 ± 0.3
TYPE, TIPO KFD-2-C1-11	ADOPTABLE THERMAL EXPANSION ABGESTIMMT FÜR WÄRMEAUDEHNUNGS KÖEFFIZIENT COEFFICIENT DE DILATATION COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA AFERIDO	10.8 PPM / °C			GAGE FACTOR K-FAKTOR FACTEUR DE JAUGE FATOR DA RESISTÊNCIA	2.10 ± 1 %	
GAGE LENGTH MESSGITTER LÄNGE LONGUEUR DE LA JAUGE COMPRIMENTO DA RESISTÊNCIA		2 m.m.			THERMAL OUT PUT WÄRMEABGABE DERIVE THERMIQUE RENDIMENTO TÉRMICO	± 1.8 $\mu\text{E} / ^\circ\text{C}$	
GAGE FACTOR CHANGE WITH TEMPERATURE TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DES K-FAKTORS DERIVE THERMIQUE DU FACTEUR DE JAUGE MUDANÇA DO FATOR DE CALIBRAÇÃO COM A TEMPERATURA						0.012 % / °C	
LOT NO. GRUNDSTÜCK NR.	LOT NO. LOTE NO.	Y1130-035			QUANTITY MENGE	QUANTITÉ QUANTIDADE	10

Figura 17: Especificações do extensômetro



Figura 18: Extensômetro e célula de carga limpa

O adesivo recomendado pelo fabricante é um adesivo epóxi da própria Kyowa®, porém a aquisição do mesmo seria inviável em termos de custo e tempo, assim optou-se pela utilização de um adesivo de cianoacrilato, o *Loctite®* 496, que possui desempenho satisfatório [8].

Assim procedeu-se à retirada da cola e dos extensômetros antigos através de lixamento. Em seguida foi feito acabamento com lixa grão 220, de modo a diminuir as imperfeições e adequar a rugosidade.

Feito o acabamento, foi utilizado um traçador de altura e o desempenho do Laboratório de Metrologia para marcar a posição em que os novos extensômetros seriam colados (Figura 19).

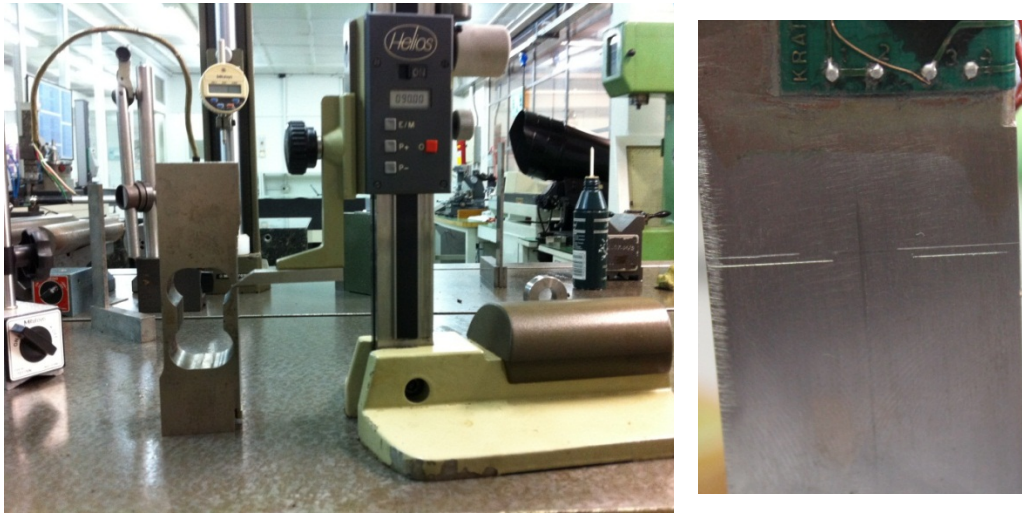


Figura 19: Traçagem da posição dos extensômetros

Em seguida, utilizando acetona e gaze, a superfície e as mãos do aplicador foram limpas de modo a não ter oleosidade, sujeiras ou fiapos de tecido. Feito isso, os novos extensômetros foram alinhados nas marcações. Para evitar que seus contatos aderissem ao metal da célula e provocassem curto-circuito, a embalagem que envolve o sensor foi utilizada para proteger os mesmos. Depois de posicionado, utilizou-se fita adesiva para mantê-lo na posição (Figura 20).

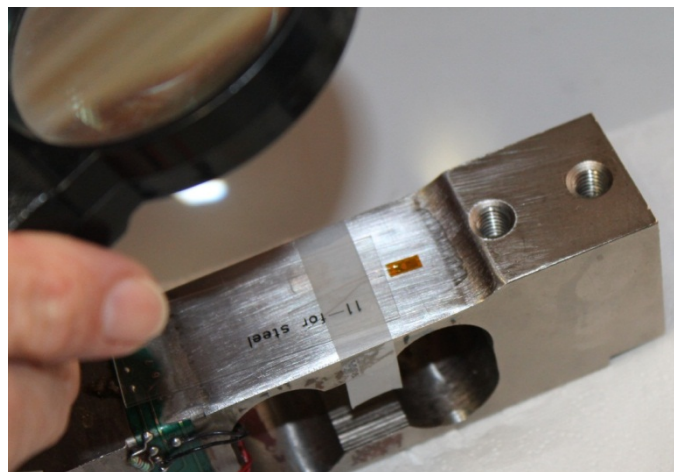


Figura 20: Posicionamento e fixação

Com o auxílio de uma lâmina fina, o extensômetro foi levantado, permitindo o acesso à área de colagem (Figura 21).

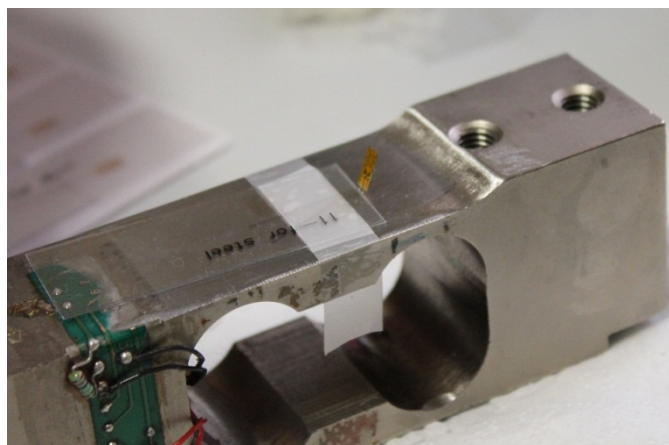


Figura 21: Preparação para aplicação do adesivo

Utilizando uma espátula (Figura 22), uma pequena quantidade de adesivo foi depositada na área de colagem (cerca de meia gota). Alguns testes indicaram que o excesso de cola (uma gota) atrasa a cura e promove a adesão dos terminais, além de resultar em movimentação do sensor e consequente posicionamento inadequado.



Figura 22: Aplicação do adesivo

Rapidamente após a aplicação do adesivo, o extensômetro foi pressionado contra o adesivo utilizando um filme de polietileno, que não é afetado por adesivos de base epóxi ou cianoacrilato. Foram realizados movimentos oscilatórios, sem retirar a pressão, de modo que o adesivo escoasse e preenchesse toda a área dos extensômetros e o excesso fosse removido.

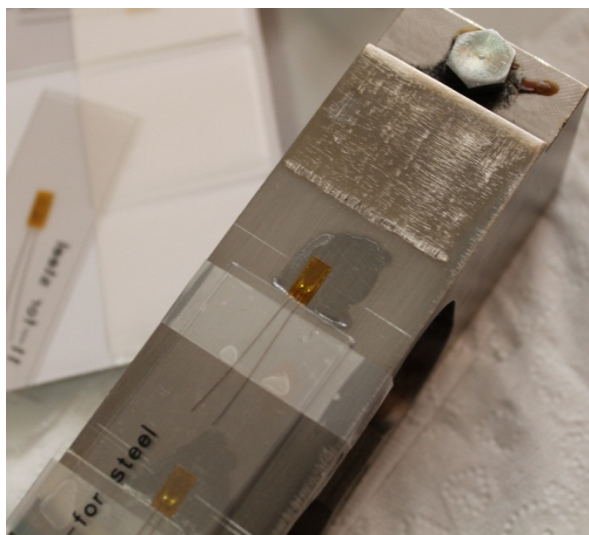


Figura 23: Resultado da colagem

Após cerca de 20 s, o filme de polietileno é removido e o extensômetro está posicionado (Figura 23).

Para não se impor cargas mecânicas nos fios terminais dos extensômetros foram colados contatos de conexão na célula de carga, permitindo a soldagem de fios mais robustos nos fios do extensômetro.

Foi aplicada fita adesiva entre o terminal de conexão e o extensômetro, evitando que seus fios entrassem em contato com a célula (Figura 24).

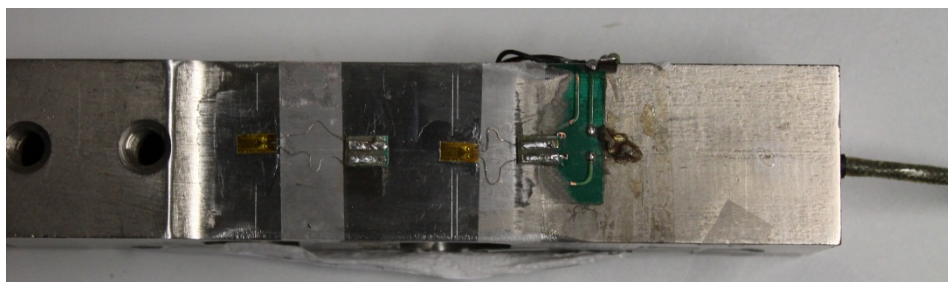


Figura 24: Colocação dos contatos

Nesse ponto foi realizada a verificação da qualidade do serviço realizado. As resistências do extensômetro e de isolamento foram medidas com um multímetro HP® 974A, que possui display de 4½ dígitos e precisão de 0,06% para medição de resistências [9]. A resistência do extensômetro foi medida diretamente nos terminais do mesmo, e comparada com o valor informado pelo fabricante, de $120,2 \pm 0,3 \, \Omega$ (Figura 25).



Figura 25: Verificação da resistência do extensômetro

Já a resistência de isolamento foi medida entre os terminais do extensômetro (um a um) e o corpo da célula de carga e deveria ser da casa de vários M Ω . Conforme se observa na Figura 26 abaixo, o valor dessa resistência superou a escala do multímetro.



Figura 26: Medição da resistência de isolamento

Na sequência foram protegidos os terminais de conexão dos extensômetros para que não entrassem em contato com o metal da célula, além de evitar que se prendessem em algo e sofressem dano. Para essa tarefa, foi utilizado o adesivo bicomponente de base epóxi “Araldite® 10 minutos”. A escolha recaiu sobre esse composto, pois o mesmo cura rapidamente e sua viscosidade impede que o mesmo escoe, sendo assim, útil para a formação de glóbulos sobre os fios (Figura 27).

Depois de aplicado, aguardou-se a cura do mesmo e iniciou-se a soldagem da fiação de modo a se obter a configuração de ponte de Wheatstone. Para isso, foram utilizadas: a película com trilhas e a fiação original presente na célula, porém com algumas alterações, como a remoção de resistores de balanceamento e inserção de emendas (*jumpers*).

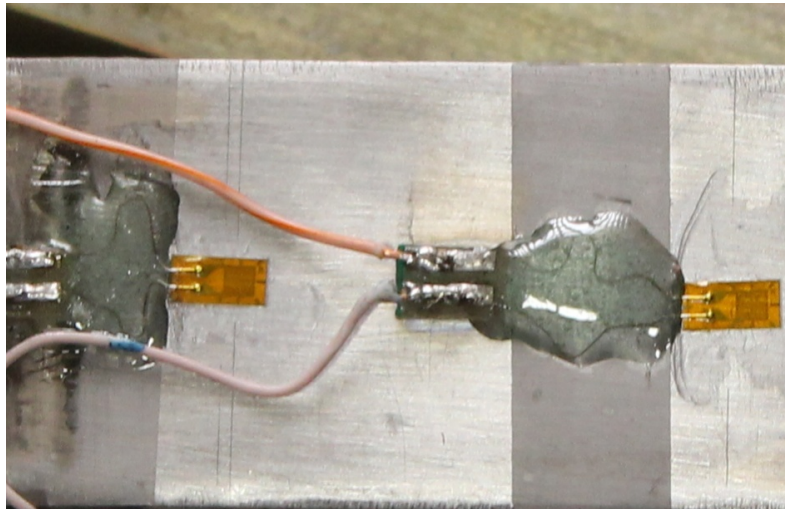


Figura 27: Terminais protegidos

De modo a realizar as conexões corretamente, adotou-se a seguinte numeração dos extensômetros:

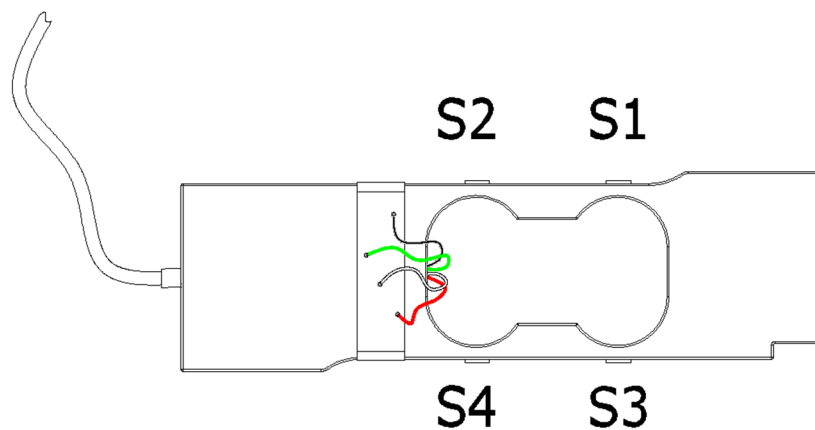


Figura 28: Disposição dos extensômetros na célula

E as conexões foram feitas para se obter o seguinte circuito:

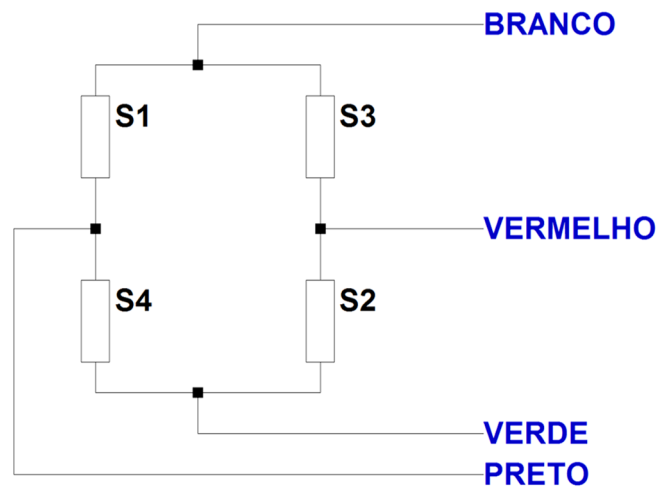


Figura 29: Ponte de Wheatstone formada pelos extensômetros

O resultado final da célula, com suas conexões, pode ser observado na Figura 30 abaixo:

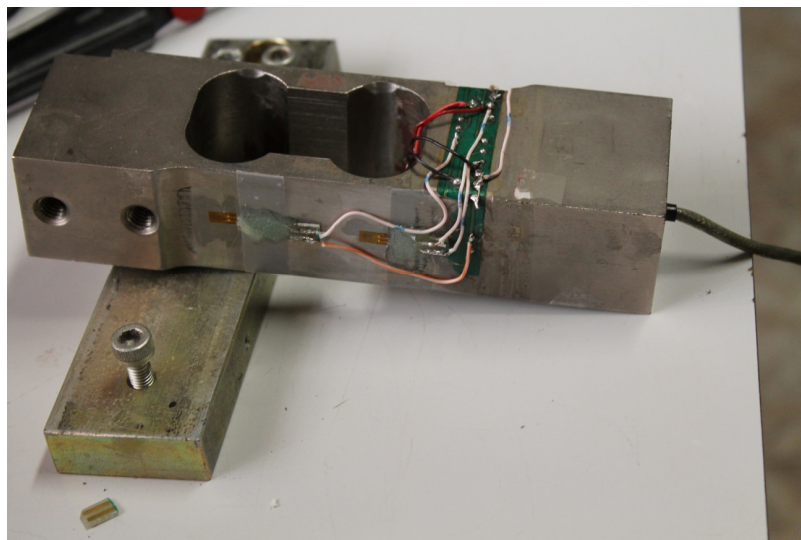


Figura 30: Vista lateral da célula com conexões prontas

A verificação do funcionamento da mesma foi feita utilizando-se o amplificador da HBM® (Figura 31), disponibilizado pelo Laboratório de Dinâmica. O mesmo possui um conector de quatro fios, que devem ser conectados aos ramos da ponte de Wheatstone formada pelos extensômetros. Esse equipamento possui ajuste de sensibilidade e de zero, permitindo a calibração e utilização de diversos tipos de células de carga.



Figura 31: Amplificador de ponte HBM®

2.2.1.1. Calibração

O procedimento de calibração da célula de carga consistiu na fixação da mesma em um suporte rígido, fixação do braço definitivo (Figura 32) e utilização de pesos conhecidos para obtenção da curva e posterior programação da mesma no PIC, de modo a obter a indicação no display em quilogramas-força.



Figura 32: Montagem para calibração da célula de carga

Foi utilizado um multímetro de bancada HP® modelo 34401A, devido a sua elevada precisão e resolução de décimos de milivolt. Após montado o experimento, foram acrescentados pesos de 2 kg (Figura 33) e as tensões de saída do amplificador registradas. O resultado pode ser observado na Figura 64.



Figura 33: Célula com 98 kg aplicados

2.2.2. Instrumentação eletrônica

A instrumentação do trabalho pode ser dividida em duas partes: analógica e digital. A parte analógica é responsável pela obtenção e condicionamento do sinal de interesse, enquanto a parte digital faz a conversão e transmissão dos dados para posterior aquisição.

2.2.2.1. Eletrônica analógica

Os extensômetros utilizados são componentes passivos, que respondem à deformação com pequena alteração do valor de resistência elétrica. De modo a se obter uma leitura utilizável, é necessário um meio de se converter essa variação ôhmica em tensão elétrica, e o método utilizado para isso foi a ponte de Wheatstone. Ainda assim, o valor de tensão que é observado na saída da ponte é bastante reduzido, sendo necessária a utilização um amplificador para proporcionar um sinal útil. Para evitar problemas como carregamento, necessidade de casamento de impedâncias e garantir uma boa rejeição de modo comum (melhorando a imunidade do circuito à ruídos), optou-se por utilizar amplificadores de instrumentação [10]. Após pesquisar os fabricantes e o mercado regional, optou-se pelo modelo INA121, da *Texas Instruments®/BurrBrown*, devido principalmente ao custo e acessibilidade.

Devido às limitações do circuito digital (o conversor A/D não trabalhar com tensões negativas) foi adicionado um circuito à entrada REF do amplificador que fornece uma tensão ajustável, adicionando assim um *offset* à saída do amplificador, permitindo que a saída seja sempre positiva independente da excursão da entrada.

Como as condições exatas das deformações do componente eram desconhecidas, optou-se por fazer a leitura dos extensômetros independentemente, cada um com sua respectiva ponte e circuito amplificador. Assim os demais braços das pontes foram completados com resistores de valor nominal $120\ \Omega$ e tolerância de 1%. Essa solução não é ideal, pois a resposta térmica de um resistor difere da de um extensômetro, e para máxima precisão dever-se-ia completar os braços da ponte com outros extensômetros do mesmo lote de fabricação, e posicioná-los próximos à região de medição, de modo a submetê-los às mesmas condições térmicas. A próxima opção seria a utilização de resistores de altíssima precisão e estabilidade (variação térmica de $2\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$, tolerância de 0,005%), porém por razões financeiras ambas as alternativas foram descartadas.

Devido à forma construtiva da célula de carga, a mesma utiliza quatro extensômetros e a conexão destes é feita diretamente ao circuito, sem a necessidade de resistores adicionais para completar a ponte.

A ponte conta com um sistema de balanceamento, que permite o ajuste de zero através de potenciômetros multivoltas de precisão, compensando desvios advindos de tolerância, variação térmica, deformações durante a colagem ou até mesmo as condições iniciais do teste. Cada ponte conta com dois potenciômetros, um para ajuste fino e outro para ajuste grosseiro do balanceamento. O circuito final, consistindo de amplificador de instrumentação (AI), ajuste de offset e balanceamento da ponte pode ser visto na Figura 34.

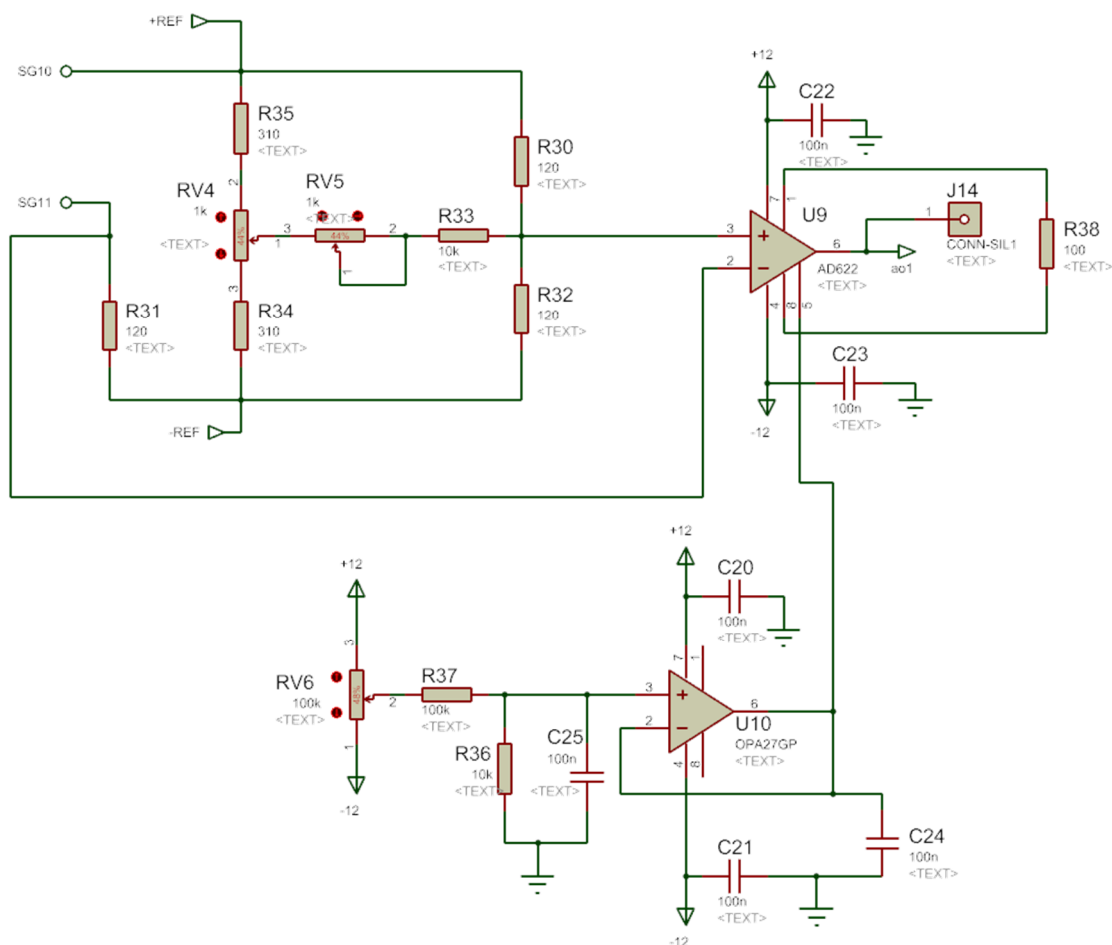


Figura 34: Circuito de ponte e amplificador

Necessitou-se gerar uma tensão altamente regulada para a alimentação das pontes. O componente escolhido para isso foi o UA723, da *Texas Instruments*. Destaca-se sua “alta rejeição de *ripple*, excelente regulação de carga e de entrada e excelente estabilidade térmica” [11]. Seguindo sua folha de dados, foram acrescentados os componentes necessários para se obter proteção contra curto-circuito e uma chave foi utilizada para se escolher entre sinal de saída de 2 ou 1 V. Adicionou-se também um estágio de saída, utilizando pares *Darlington* complementares TIP125 e TIP122, além de um pré-amplificador agindo como buffer realimentado, garantindo o fornecimento de corrente relativamente elevado sem ruído e sem carregar o regulador. A configuração final (Figura 35) é uma fonte de tensão simétrica regulada com elevada capacidade de corrente (5 A).

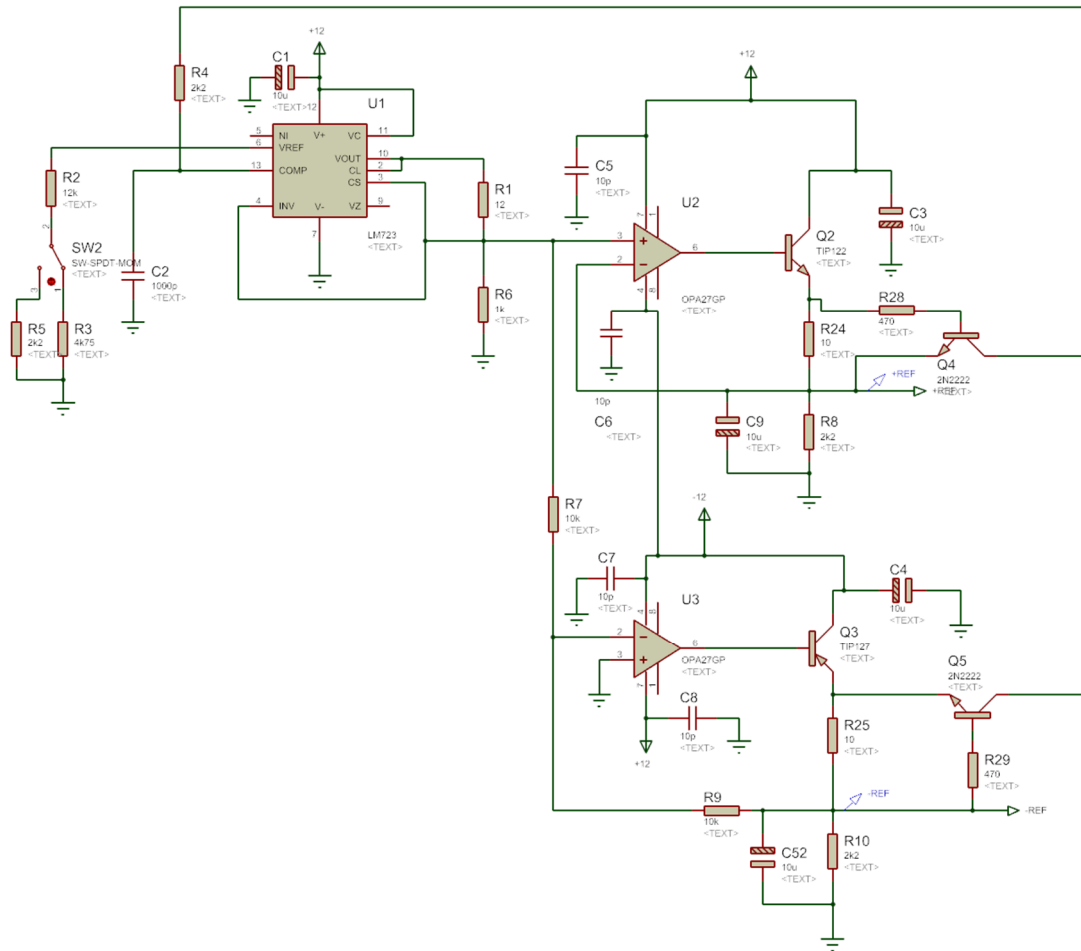


Figura 35: Gerador de tensão de referência

A saída dos amplificadores de instrumentação já é suficiente para análise e interpretação dos valores dos extensômetros, e por esse motivo foi prevista a instalação de um conector externo para acesso a esses terminais.

Escolhida a configuração do circuito, foi montado um amplificador para ponte em matriz de contatos (*proto board*) de modo a testar sua funcionalidade (Figura B1). Depois de verificada, projetou-se o *layout* de uma placa de circuito impresso que comportasse todos os sete amplificadores mais o gerador de referência (Figura B2).

2.2.2.2. Eletrônica digital

Para maior comodidade e praticidade, era interessante a possibilidade de registro dos dados para posterior análise em gráficos, tratamento matemático, etc. Como o sistema deveria ser utilizado em sistemas embarcados automotivos, restaram duas opções a ser consideradas: armazenamento digital em memória EEPROM ou transmissão sem fios dos dados para um computador remoto. A utilização de memórias tem o inconveniente

niente de necessitar de uma conexão posterior com fios para transferência, além de limitar a duração das aquisições devido ao risco de transbordamento da mesma.

Assim, a opção escolhida foi a transmissão sem fios de dados para um computador, e utilização de um instrumento virtual para tratamento e aquisição dos dados. O *software* escolhido para isso foi o *National Instruments® LabVIEW®*, por possuir um modo de programação gráfico e bastante intuitivo através de blocos.

Para a comunicação sem fios foi escolhido um transceptor *Xbee®* modelo PRO do fabricante *Digi International®*. Esse transceptor opera dentro do padrão IEEE *ZigBee* série 1 e apesar de ser mais limitado quando utilizado em redes do que um equipamento série 2, para a aplicação presente ele se torna bastante atraente graças a facilidade de utilização. Os motivos que pesaram para escolha do padrão *ZigBee* foram alcance de até 1,6 km em descampado, potência de transmissão de 63 mW e taxa de transmissão de RF de 250 kbps. [12], custo relativamente reduzido e a padronização, permitindo maior modularidade e expansibilidade do sistema, além de fácil reposição de componentes.

Além disso, como o sistema também poderia ser utilizado em bancada com a aplicação de esforços medidos pela célula de carga, se tornou necessária a exibição da força medida pela mesma, permitindo saber o momento de interromper o teste. A escolha recaiu sobre um *display* de cristal líquido 16 colunas por duas linhas, por ser de simples aplicação.

De modo a permitir uma futura expansão do sistema, os sinais dos extensômetros foram multiplexados, ocupando assim apenas uma entrada analógica do microcontrolador. O multiplexador analógico escolhido foi o DG408, pelas características favoráveis à instrumentação. Seu comportamento foi simulado no *LTspice IV®*, para garantir que o mesmo não iria interferir no valor do sinal de entrada.

Unindo todas essas funções, foi escolhido um microcontrolador PIC16F877. Esse modelo possui 32 entradas/saídas digitais, das quais oito podem ser configuradas para trabalhar como entradas analógicas do conversor A/D integrado de 10 *bits*. Seu custo acessível e disponibilidade pesaram para a escolha.

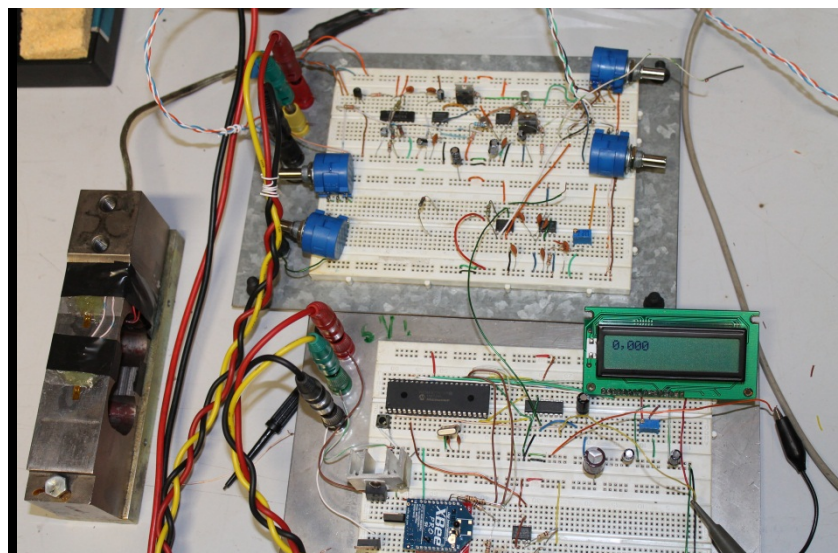


Figura 36: Circuito do PIC e amplificador montado para testes

Consultando a folha de dados do microcontrolador observa-se que o tempo de conversão para cada *bit* é de cerca de $4 \mu\text{s}$. Considerando 10 *bits* e sete canais, tem-se que a frequência máxima aproximada de aquisição de dados será de 425 Hz por canal. De acordo com a teoria de dinâmica veicular [13], as excitações advindas da pista acima de 25 Hz possuem amplitudes reduzidas e, portanto, podem ser consideradas como vibração sonora ao invés de vibração de *ride*.

A análise de distribuições espectrais de perfil de pista disponíveis na literatura mostra que são feitas até a frequência de 50 Hz para velocidades de cerca de 80 km/h (Figura 37). Assim pode-se concluir que essa frequência do conversor é suficiente para atender ao critério de *Nyquist* para amostragem de excitações de pista e que a filtragem do sinal com frequência de corte próxima de 40 Hz não acarretaria grande perda de informação para fins de dimensionamento estrutural.

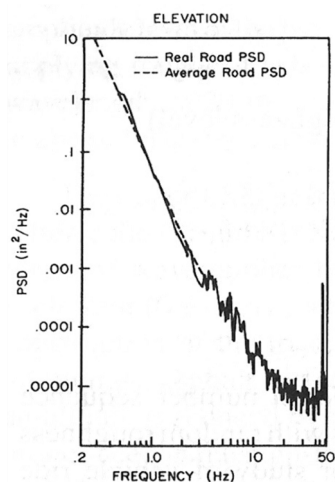


Figura 37: Densidade espectral de potência para amplitude da rugosidade (pista de asfalto)

Após definido o sistema, projetaram-se as conexões do microcontrolador (Figura 38) e um circuito digital simplificado (apenas um canal de entrada analógica) foi simulado no *Proteus ISIS®*, de modo a verificar a funcionalidade do algoritmo e das conexões.

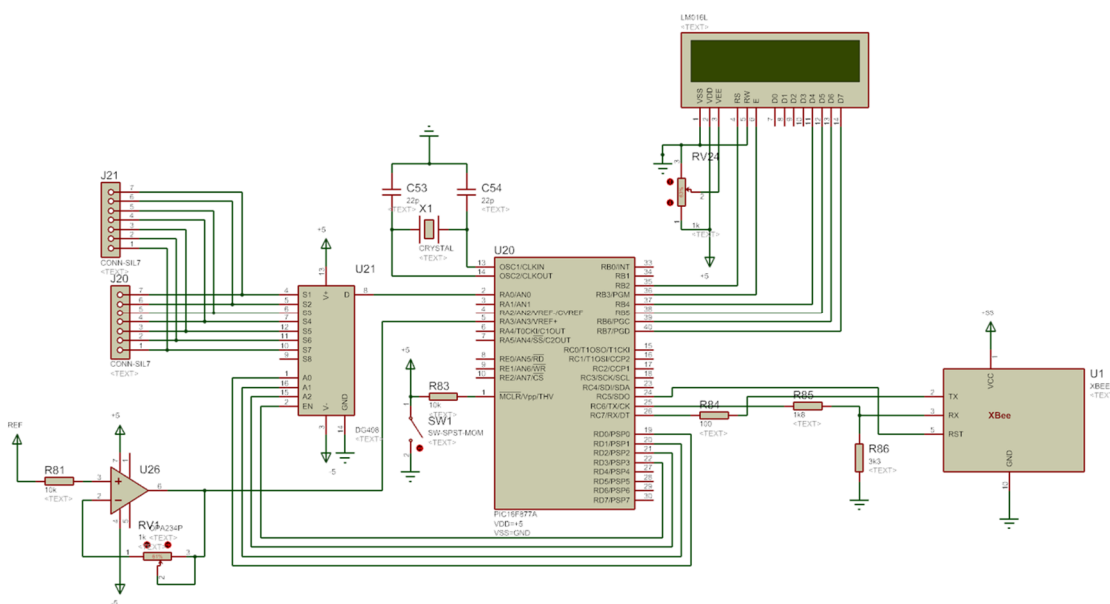


Figura 38: Circuito do microcontrolador

O algoritmo foi feito no programa *MikroC®* por ter bibliotecas e funções predefinidas, facilitando a programação. Após verificada a operação, montou-se um circuito na *proto-board* (Figura 36) e verificou-se a funcionalidade e alcance da comunicação sem fios. O alcance medido foi de cerca de 45 m, quando *bits* começaram a ser perdidos, porém a presença de três paredes de alvenaria contribuíram para essa redução do

alcance. Para esse teste foi utilizado o programa *X-CTU*, da própria *Digi*, e os valores lidos no terminal.

Na sequência projetou-se a placa de circuito impresso onde os componentes foram montados (Figura B3). Essas placas foram fabricadas pela Cirvale Circuitos Impressos, pela elevada qualidade das mesmas.

2.2.2.3. Montagem

A intenção de utilizar o sistema de aquisição em pista requer a montagem dos componentes eletrônicos de maneira robusta e protegida. Assim foi adquirida uma caixa de plástico ABS do fabricante PATOLA, que conta com uma porta articulada e selada, permitindo o fácil acesso aos componentes internos para manutenção ou ajuste (Figura 39).

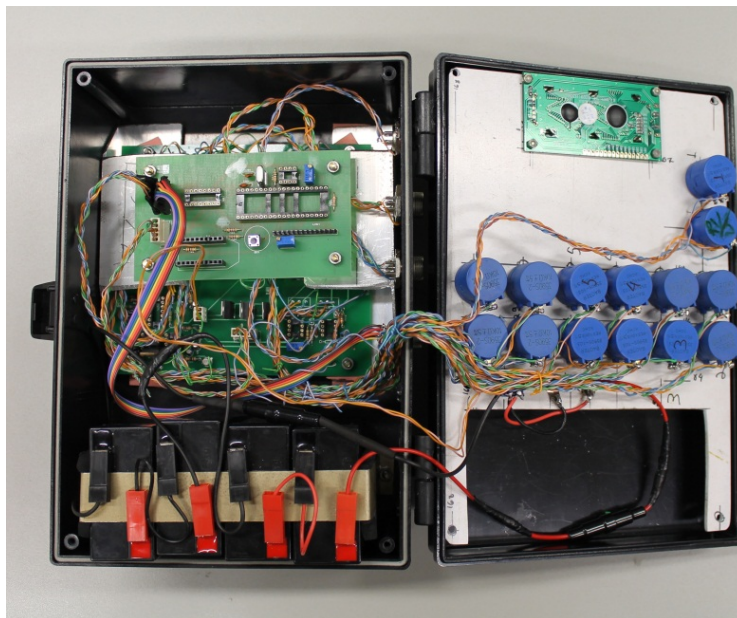


Figura 39: Caixa montada com painel aberto

Utilizou-se o programa de desenho *AutoCAD®* para elaborar um esboço bidimensional da caixa e prever o posicionamento dos componentes: placas, baterias, *display* de LCD, potenciômetros de ajuste e chaves. Com esse esboço foi possível projetar as fixações e furações, além de permitir estimar a quantidade de material necessário para compra.

O acesso para manutenção foi planejado, permitindo o acesso aos componentes internos e recarga das baterias sem a necessidade de desmontar. Para isso, os fios utilizados possuem comprimento suficiente para permitir a abertura do painel frontal e retirada das placas sem necessidade de desconexão.

A caixa contém conectores blindados nas laterais (Figura 40), para conexão dos extensômetros, célula de carga e acesso à saída analógica dos amplificadores. Abrindo-se a porta tem-se acesso aos potenciômetros de ajuste das pontes, ao *display* que indica a leitura da célula de carga, à chave de seleção de tensão de alimentação da ponte, à chave de liga/desliga e aos conectores para carregamento da bateria (Figura 41), todos esses fixados em uma chapa de PVC. Removendo-se essa chapa é possível acessar os *trimpot's* de ajuste, presentes nas PCB's.



Figura 40: Conectores blindados

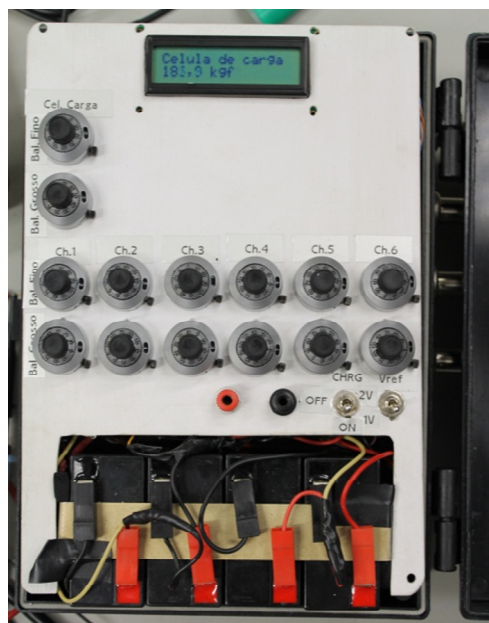


Figura 41: Caixa em funcionamento

2.2.2.4. Instrumento virtual

O instrumento virtual desenvolvido em *LabVIEW®* faz a leitura dos dados entrando pela porta serial, utilizando o adaptador USB/Zigbee (Figura 42), e os organiza para armazenamento.

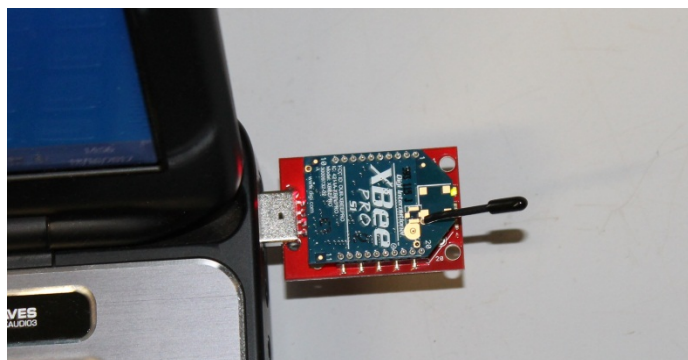


Figura 42: Transceptor RF e adaptador USB

Os dados são transmitidos pelo PIC de maneira sequencial, em *strings* de caracteres separados por “*line feed's*”. Para possibilitar a demultiplexação dos canais, o microcontrolador transmite o número do canal antes do valor da leitura, assim a demultiplexação se torna um problema de separar os canais através da classificação em intervalos (se for maior que x, então subtrai x e obtém a leitura do canal $(x/10)$; senão: se for maior que x-1, subtrai x-1 e obtém a leitura do canal $(x-1/10)$; senão...).

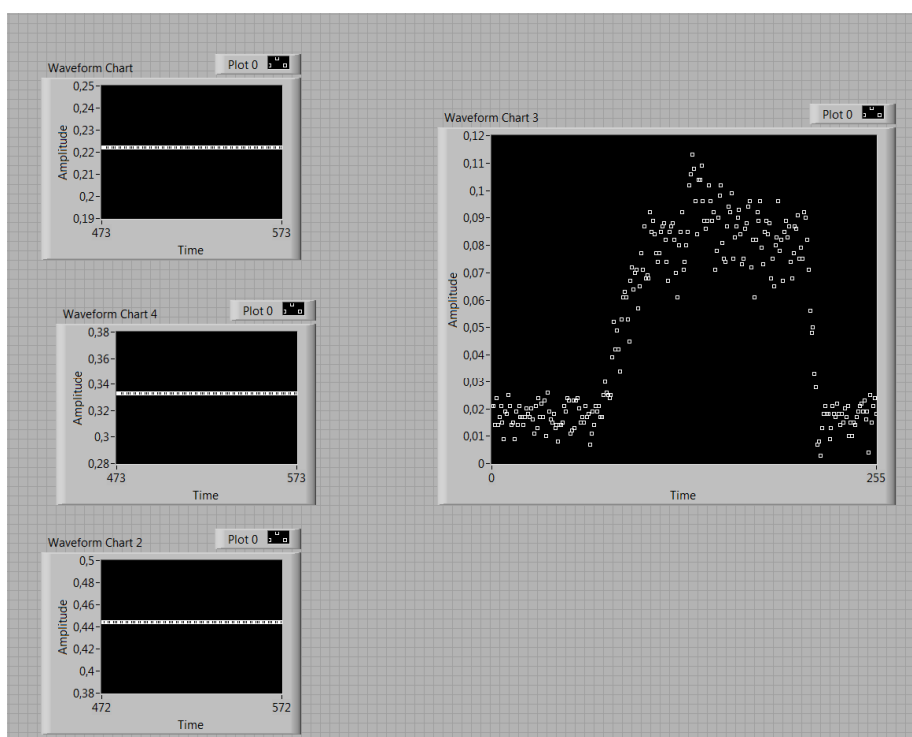


Figura 43: Teste do VI

Na Figura 43 acima pode-se ver o teste realizado com o circuito montado em *protoboard* e alimentado por fonte de tensão. O gráfico maior, à direita, representa a leitura da célula de carga, na qual se observa o momento de aplicação de força, e os demais gráficos são valores constantes programados no PIC para teste de demultiplexação.

Observa-se também a presença de ruídos significativos, conforme mencionado anteriormente, problema que foi posteriormente amenizado pela utilização de baterias para alimentação e circuito montado em PCB.

Parte do VI foi derivado do exemplo “*Advanced Serial Write and Read*”, incluso na instalação do programa, que possui mais recursos do que foram utilizados. Para desenvolvimento posterior seria interessante tornar o programa mais enxuto.

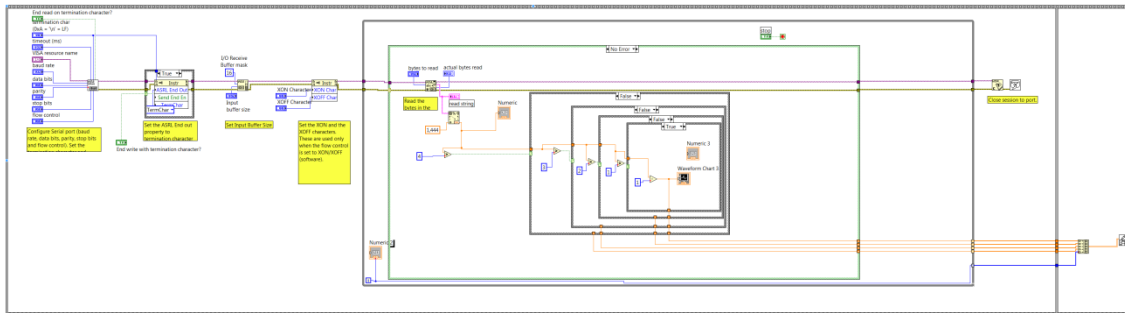


Figura 44: Diagrama de blocos do VI utilizado nos testes

Os dados processados pelo VI (Figura 44) são armazenados em um arquivo .m para processamento pelo *MATLAB*®, permitindo a obtenção de gráficos e a utilização das ferramentas matemáticas deste.

2.3. Pós-processamento dos dados

O *MATLAB*® foi utilizado para observação dos dados, realização das operações matemáticas (retirada do offset, cálculo do *strain* a partir das tensões elétricas, etc.), filtragem e comparação.

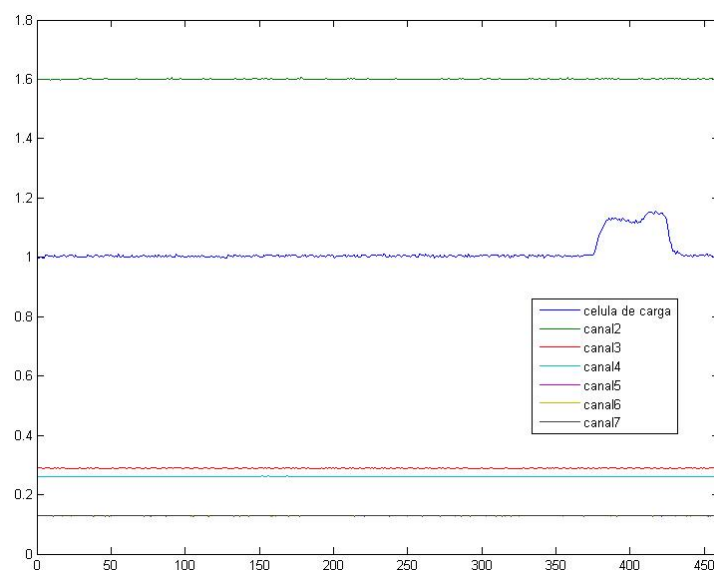


Figura 45: Teste de recepção e demultiplexação

A Figura 45 apresenta os dados adquiridos em um teste de recepção. A célula de carga estava conectada no canal 1, enquanto os demais canais foram conectados em um divisor de tensão resistivo e portanto apresentam valores constantes. Os canais 5, 6 e 7 foram conectados à um mesmo ponto do divisor, apresentando valores iguais de tensão.

Os dados obtidos da célula de carga nessa leitura foram o ponto de partida para a definição de um filtro. Como pode-se observar foi aplicada uma força em determinado momento, resultando em uma espécie de degrau.

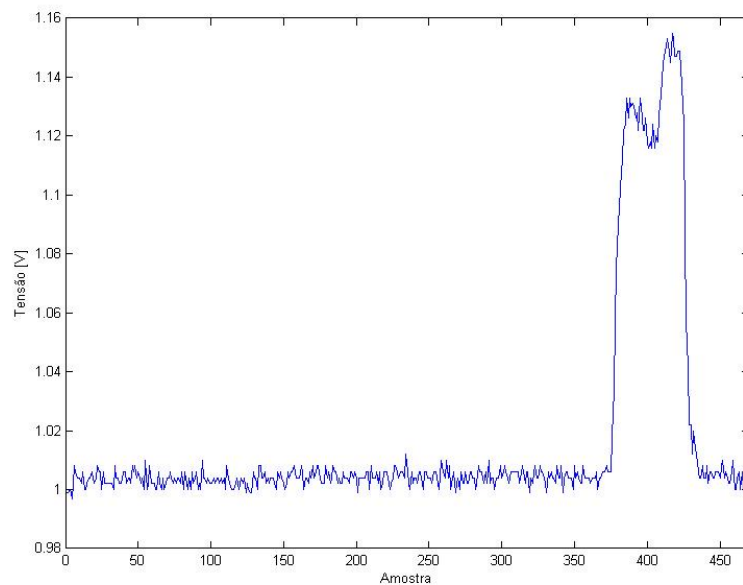


Figura 46: Leitura de teste da célula de carga

Conforme observa-se na Figura 46 acima, o sinal apresenta um conteúdo de ruídos de baixa amplitude, que não têm utilidade. Assim, foi realizada a filtragem do mesmo, utilizando-se um algoritmo em *MATLAB*®. O desenvolvimento do filtro foi feito utilizando-se a ferramenta 'fdatool', que gera o programa com a função de transferência do filtro digital a partir de dados como frequência de amostragem e frequência de corte. Foram feitos testes com filtros FIR e IIR, e o resultado pode ser observado na Figura 47 abaixo.

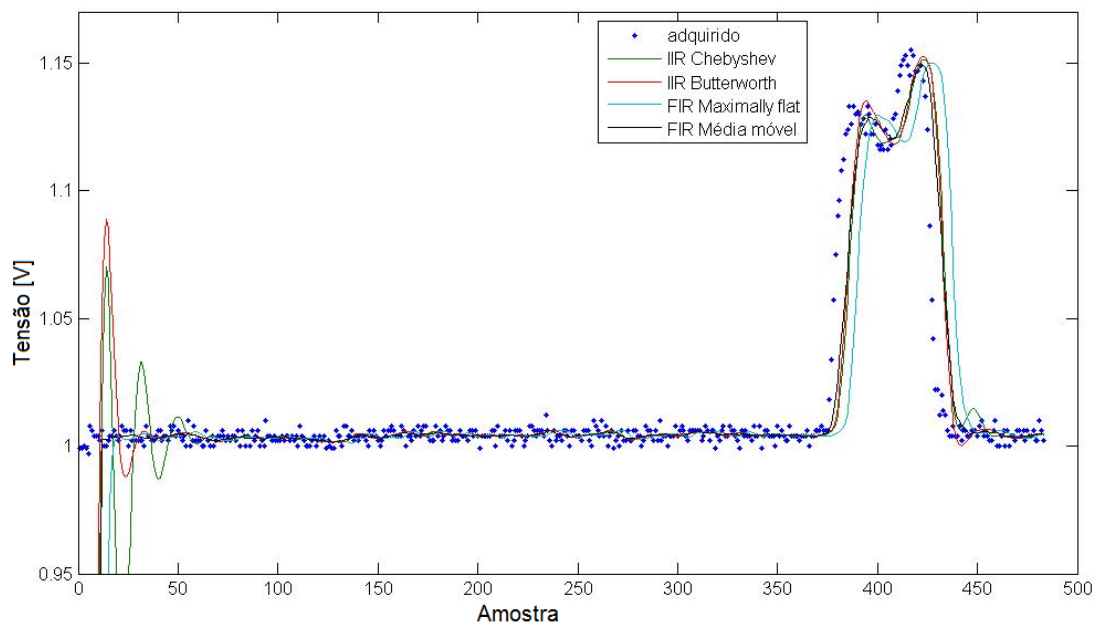


Figura 47: Comparativo das filtragens

Conforme observa-se, os filtros IIR promovem um atraso menor no sinal, porém apresentam elevada oscilação no início do sinal, e também oscilações menores na descida do degrau. Já os filtros FIR, que possuem resposta ao impulso finita, apresentaram comportamento menos oscilatório. A filtragem pelo algoritmo de média móvel apresentou um atraso menor do que o *Maximally flat*, sendo proporcional à janela utilizada para cálculo da média. O comportamento em fase desse filtro não é adequado, porém como esse sistema não será utilizado em sistemas de controle, ou aquisições de alta frequência como acelerômetros, julgou-se o algoritmo de média móvel como a melhor opção para o presente trabalho.

2.4. Considerações finais

Assim, neste capítulo, mostraram-se todos os procedimentos utilizados nas simulações, extensometria e tratamento dos sinais. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 3.

3. Resultados

3.1. Resultados das simulações

As figuras que seguem (Figura 48 à Figura 63) resultam das simulações realizadas. Mostram as regiões com maiores deformações (próximo do vermelho), e normalmente correspondem às regiões de maior tensão mecânica, sendo mais suscetíveis a sofrer ruptura. Nessas regiões foram escolhidas as localizações para colagem dos extensômetros.

3.1.1. Carregamento vertical

3.1.1.1. *Single Pass* não linear

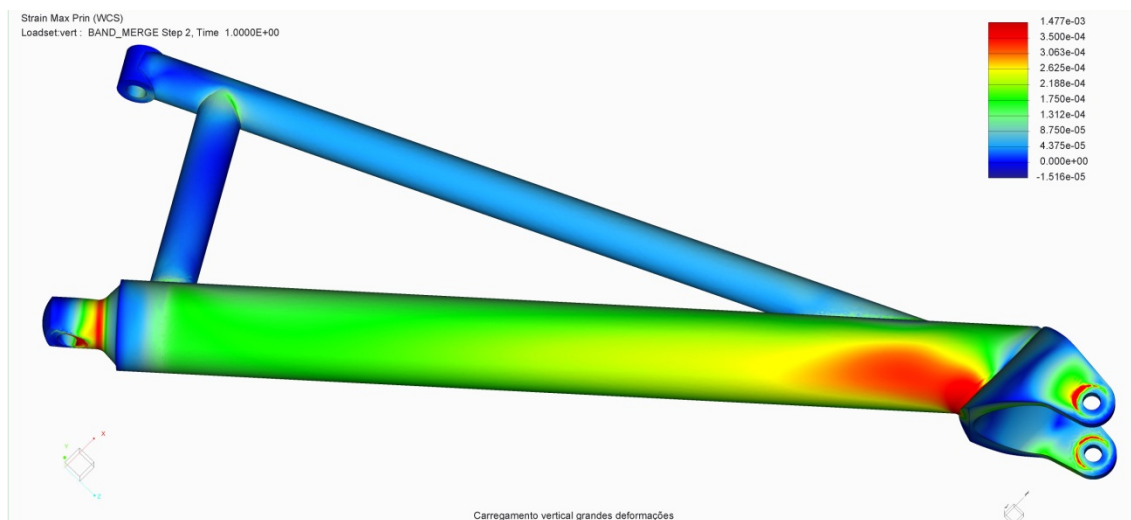


Figura 48: Visão geral do resultado da simulação

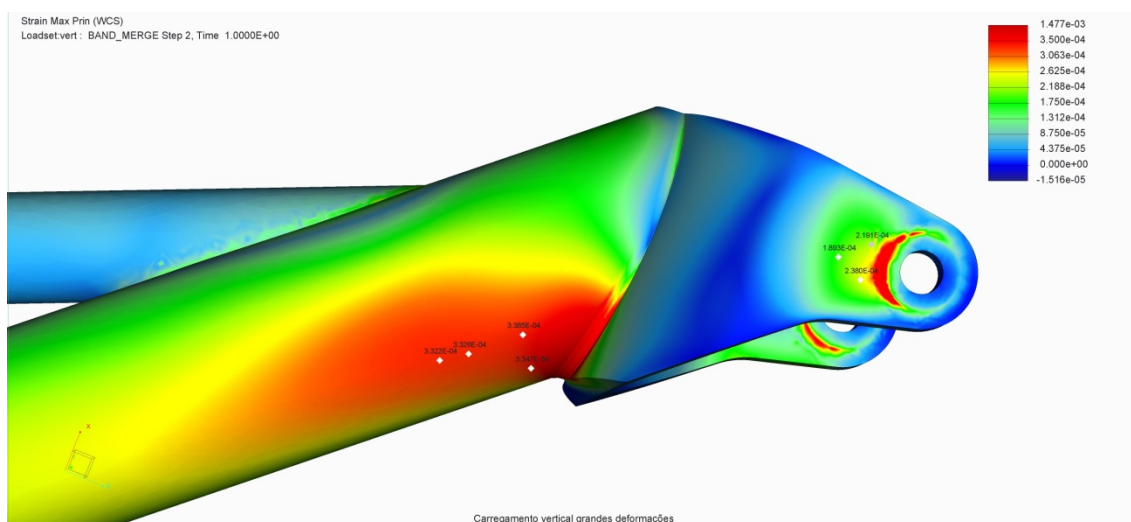


Figura 49: Strain nas regiões dos canais 2, 3 e 4

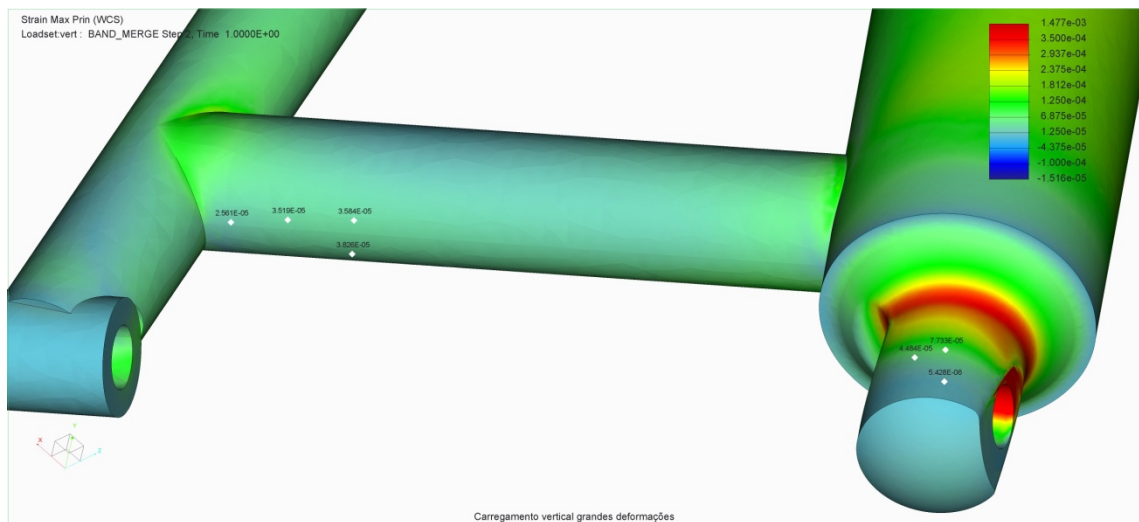


Figura 50: *Strain* nas regiões dos canais 5, 6 e 7

3.1.1.2. Multi Pass linear

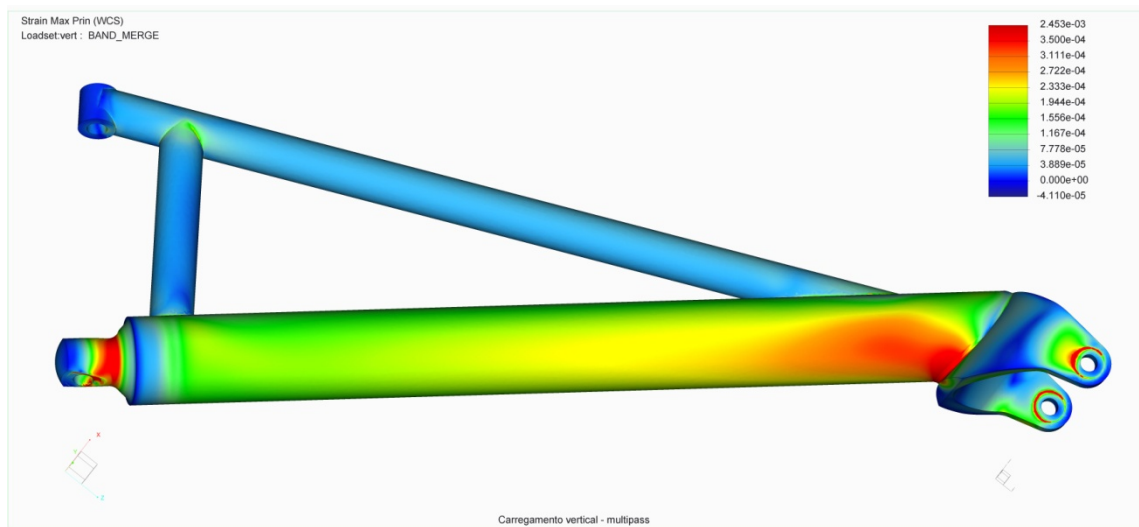


Figura 51: Visão geral do resultado da simulação

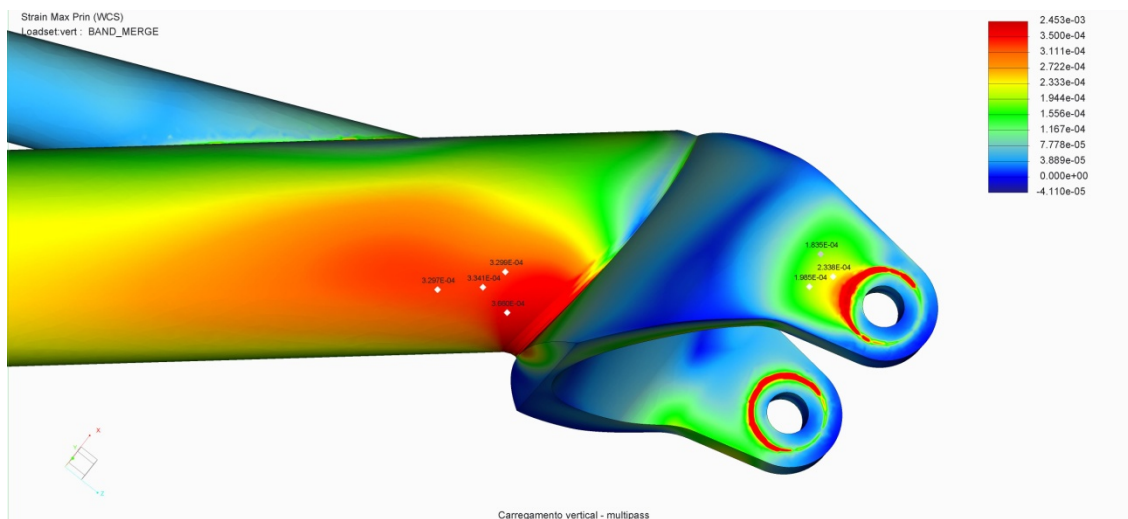


Figura 52: *Strain* nas regiões dos canais 2, 3 e 4

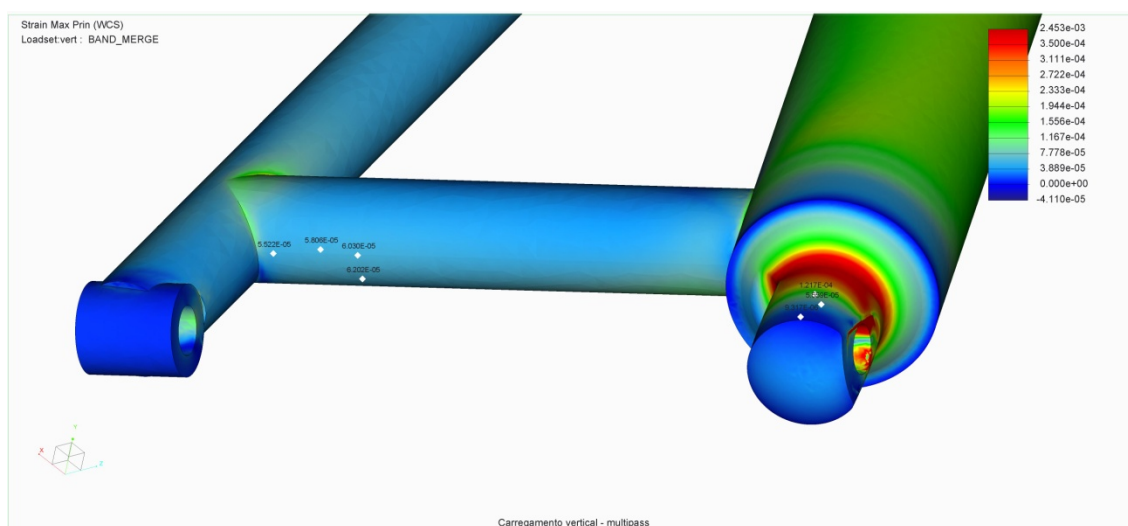


Figura 53: *Strain* nas regiões dos canais 5, 6 e 7

3.1.1.3. Single Pass montado no jig

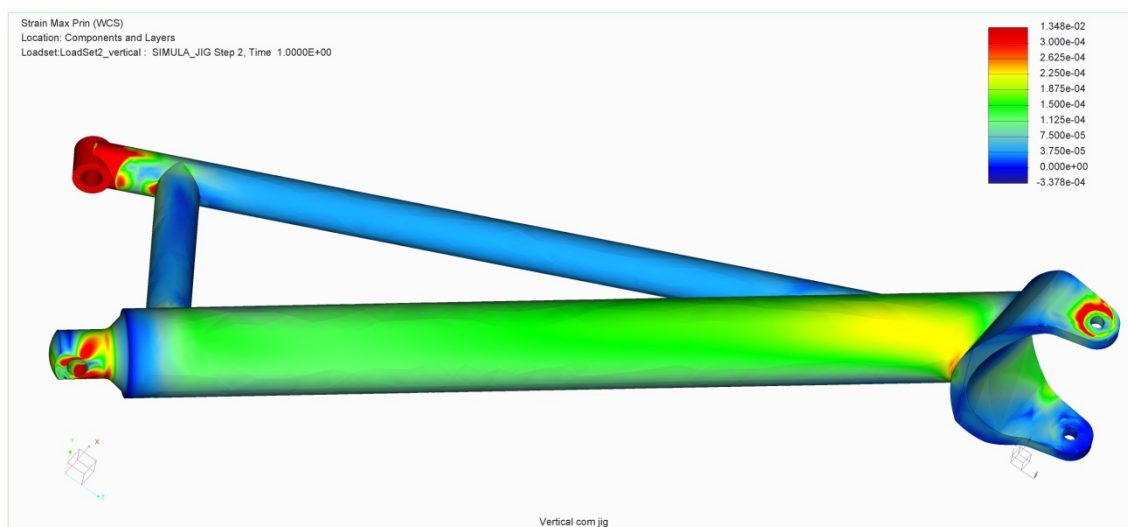


Figura 54: Visão geral do resultado da simulação

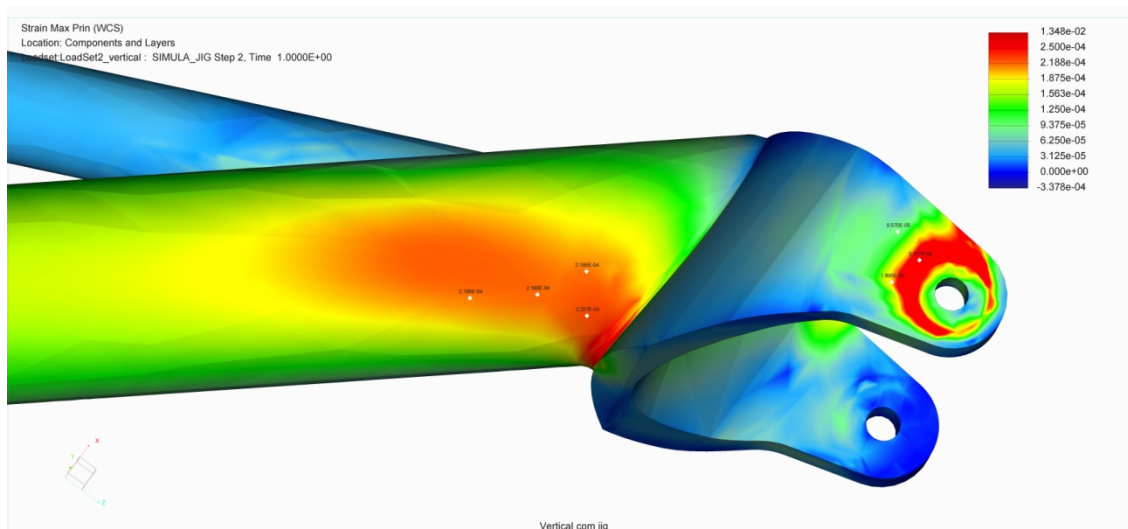


Figura 55: Strain nas regiões dos canais 2, 3 e 4

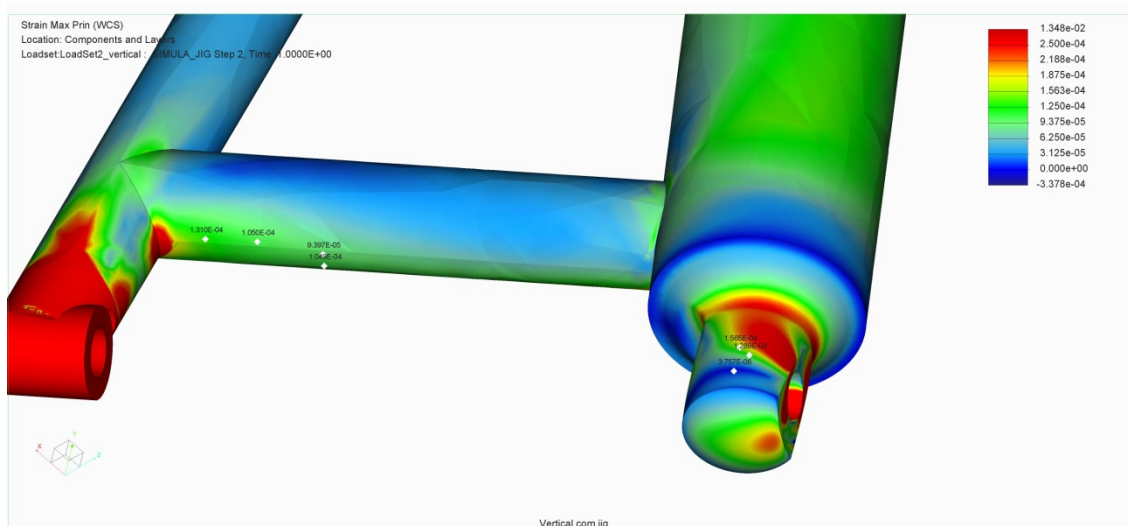


Figura 56: *Strain* nas regiões dos canais 5, 6 e 7

3.1.2. Carregamento lateral

3.1.2.1. *Single Pass* não linear

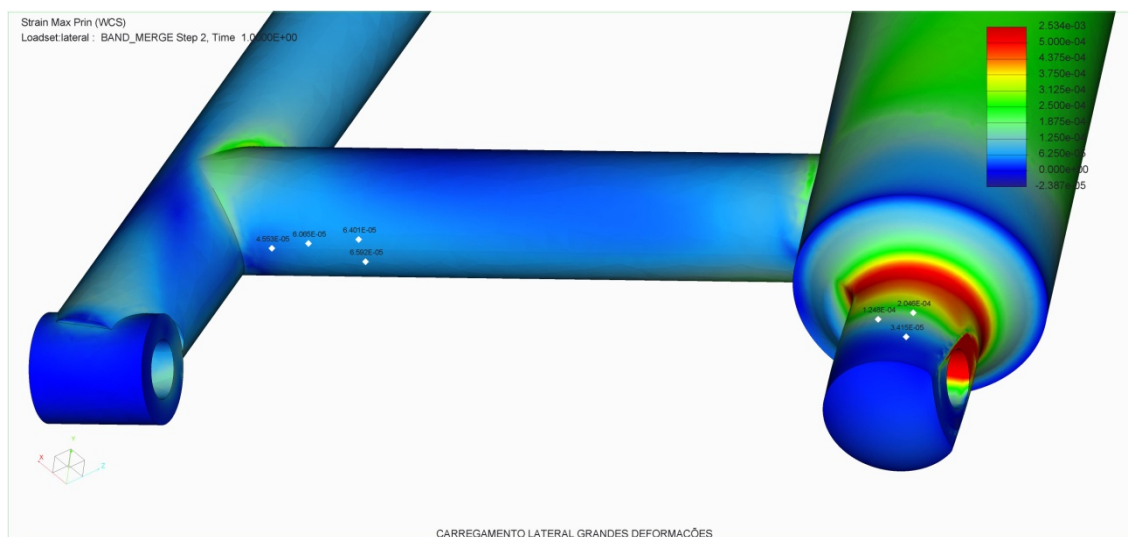


Figura 57: *Strain* nas regiões dos canais 5, 6 e 7

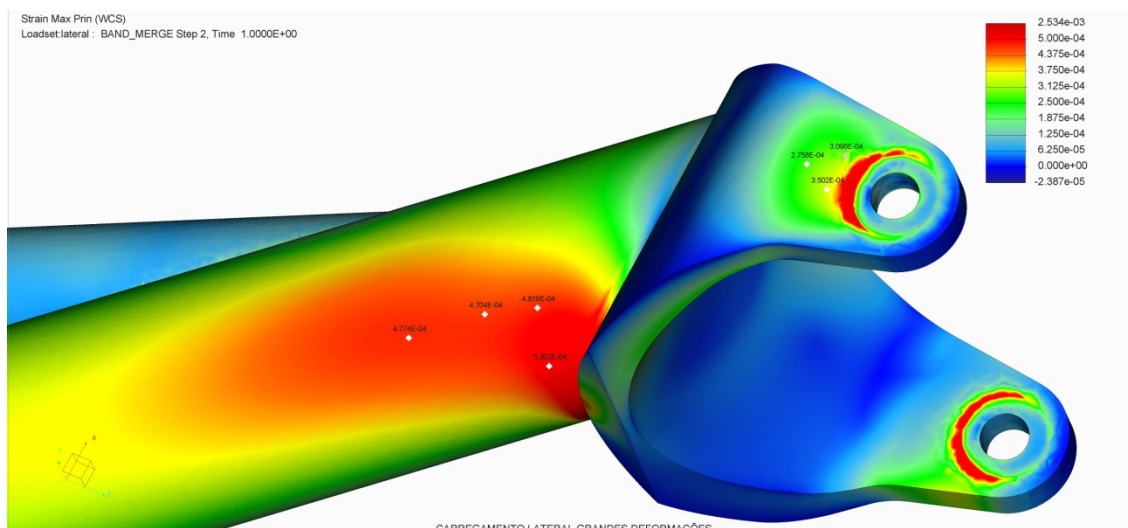


Figura 58: *Strain* nas regiões dos canais 2, 3 e 4

3.1.2.2. *Multi Pass* linear

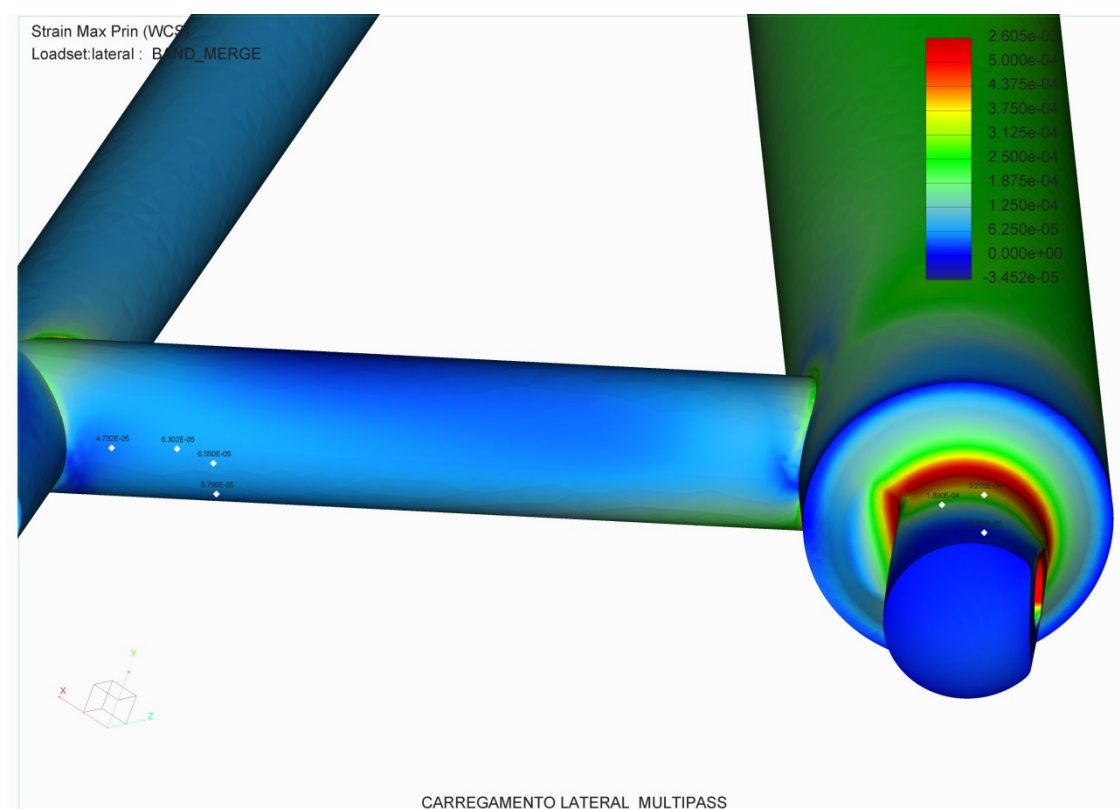


Figura 59: *Strain* nas regiões dos canais 5, 6 e 7

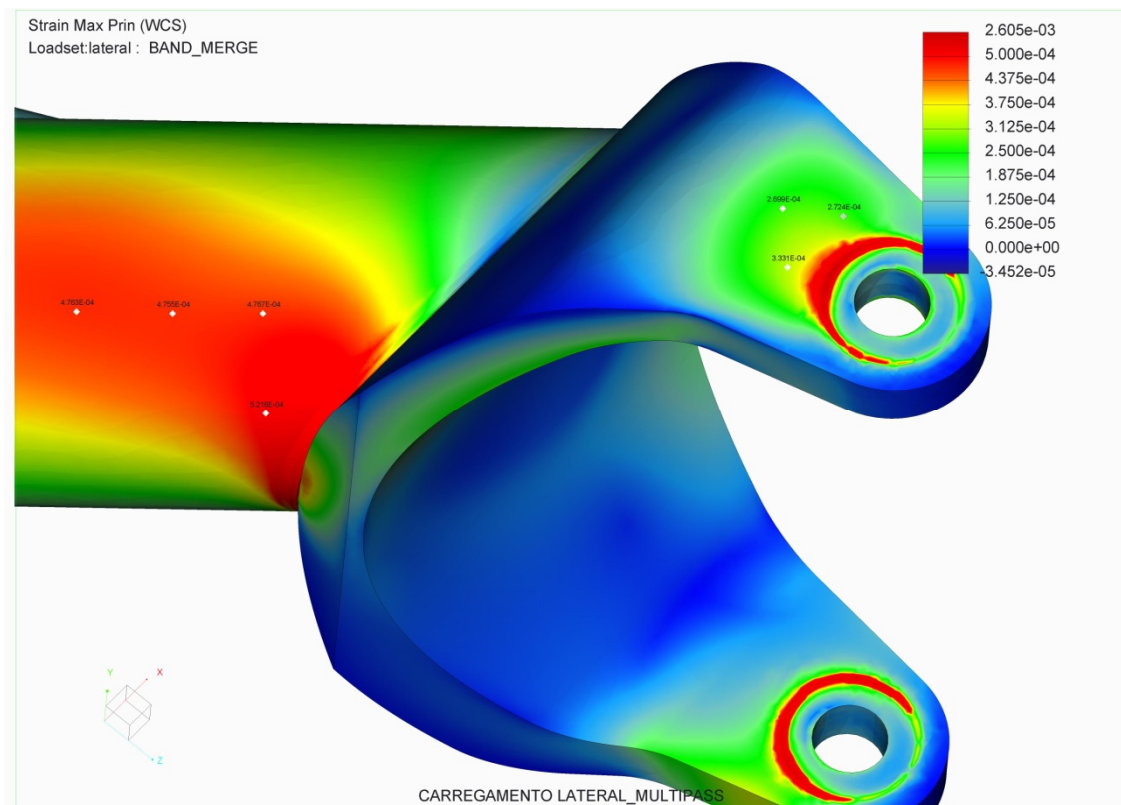


Figura 60: Strain nas regiões dos canais 2, 3 e 4

3.1.2.3. Single Pass montado no jig

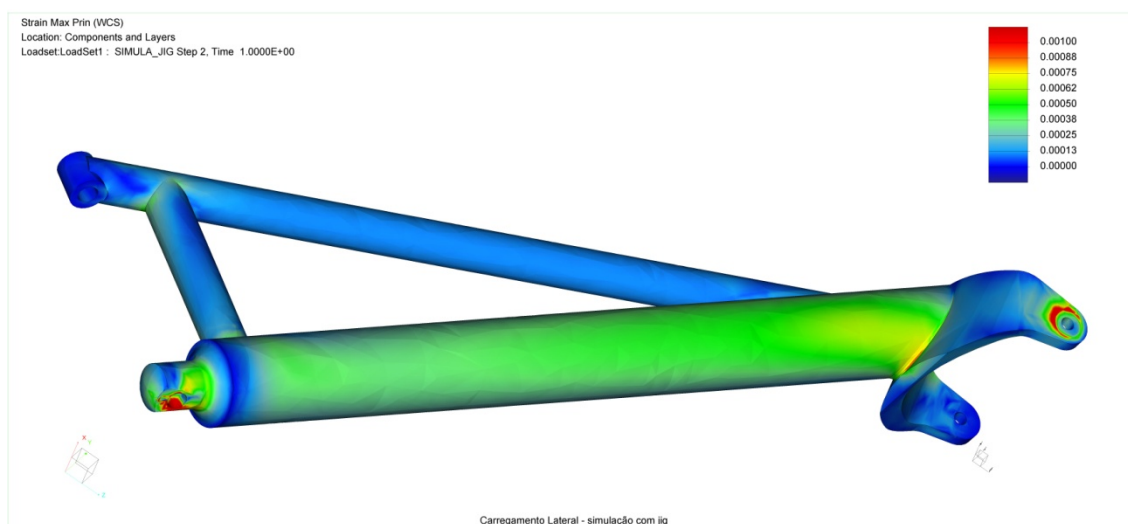


Figura 61: Visão geral do resultado da simulação

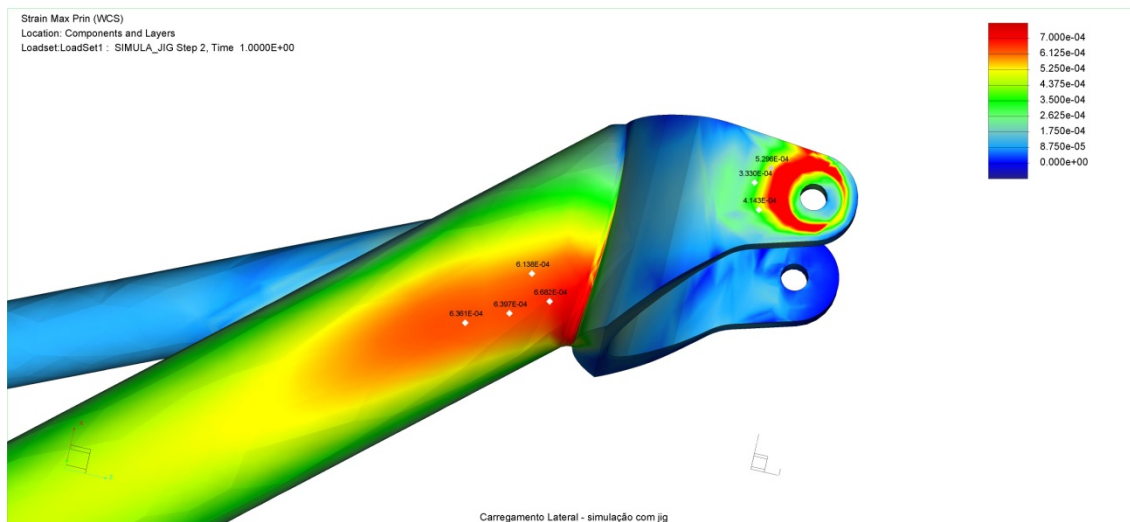


Figura 62: Strain nas regiões dos canais 2, 3 e 4

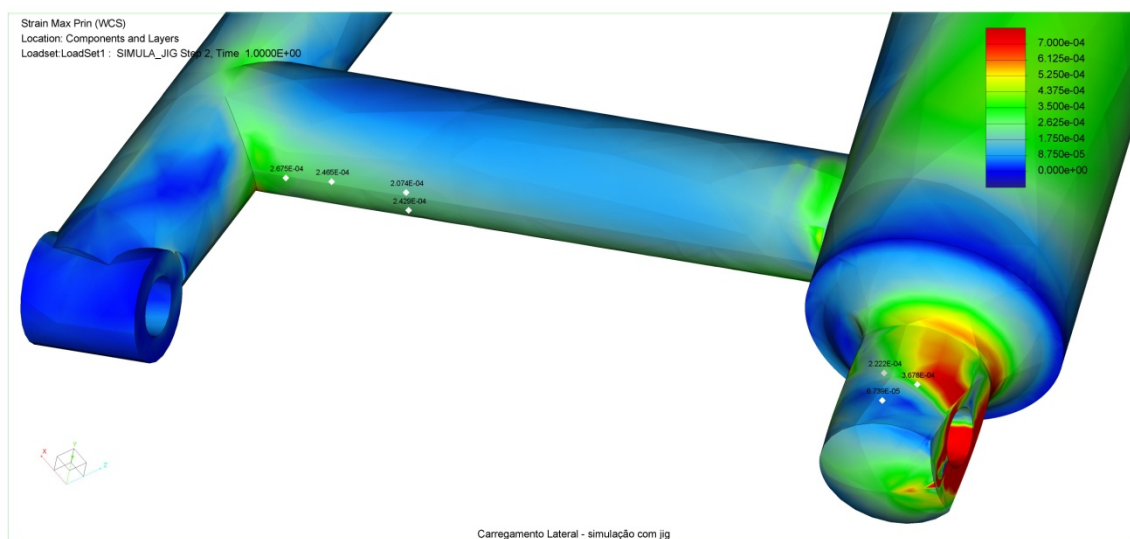


Figura 63: Strain nas regiões dos canais 5, 6 e 7

3.1.3. Resumo das simulações

A coluna 'Canal' relaciona os valores das simulações mecânicas com os canais de saída da extensometria.

Como o valor de deformação medida pelo extensômetro é a média das deformações ocorridas em sua área, foram medidos alguns valores nas simulações, em posições correspondentes aos locais de instalação dos sensores, e suas médias foram calculadas.

Tabela 1: Valores obtidos das simulações

Simulação	Canal	Valores			Média
Carregamento vertical, Single Pass e jig	ch2	$9,57.10^{-5}$	$3,16.10^{-4}$	$1,90.10^{-4}$	$2,00.10^{-4}$
	ch3	$2,19.10^{-4}$	$2,19.10^{-1}$	-	$1,10.10^{-1}$
	ch4	$2,19.10^{-1}$	$2,26.10^{-1}$	-	$2,22.10^{-1}$
	ch5	$9,40.10^{-5}$	$1,05.10^{-4}$	-	$9,94.10^{-5}$
	ch6	$1,31.10^{-4}$	$1,05.10^{-4}$	-	$1,18.10^{-4}$
	ch7	$3,76.10^{-6}$	$1,29.10^{-4}$	$1,57.10^{-4}$	$9,64.10^{-5}$
Carregamento lateral, Single Pass e jig	ch2	$5,30.10^{-4}$	$3,30.10^{-4}$	$4,14.10^{-4}$	$4,25.10^{-4}$
	ch3	$6,36.10^{-4}$	$6,40.10^{-4}$	-	$6,38.10^{-4}$
	ch4	$6,14.10^{-4}$	$6,68.10^{-4}$	-	$6,41.10^{-4}$
	ch5	$1,83.10^{-4}$	$2,41.10^{-4}$	-	$2,12.10^{-4}$
	ch6	$2,52.10^{-4}$	$2,49.10^{-4}$	-	$2,51.10^{-4}$
	ch7	$8,33.10^{-5}$	$1,18.10^{-4}$	$3,75.10^{-4}$	$1,92.10^{-4}$
Carregamento vertical, Single Pass e não linear	ch2	$2,19.10^{-4}$	$1,89.10^{-4}$	$2,38.10^{-4}$	$2,15.10^{-4}$
	ch3	$3,32.10^{-4}$	$3,33.10^{-4}$	-	$3,32.10^{-4}$
	ch4	$3,39.10^{-4}$	$3,35.10^{-4}$	-	$3,37.10^{-4}$
	ch5	$3,58.10^{-5}$	$3,83.10^{-5}$	-	$3,71.10^{-5}$
	ch6	$2,56.10^{-5}$	$3,52.10^{-5}$	-	$3,04.10^{-5}$
	ch7	$7,73.10^{-5}$	$4,48.10^{-5}$	$5,43.10^{-6}$	$4,25.10^{-5}$
Carregamento lateral, Single Pass e não linear	ch2	$3,10.10^{-4}$	$2,76.10^{-4}$	$3,50.10^{-4}$	$3,12.10^{-4}$
	ch3	$4,77.10^{-4}$	$4,70.10^{-4}$	-	$4,74.10^{-4}$
	ch4	$4,82.10^{-4}$	$5,30.10^{-4}$	-	$5,06.10^{-4}$
	ch5	$6,40.10^{-5}$	$6,59.10^{-5}$	-	$6,50.10^{-5}$
	ch6	$4,55.10^{-5}$	$6,07.10^{-5}$	-	$5,31.10^{-5}$
	ch7	$2,05.10^{-4}$	$3,42.10^{-5}$	$1,25.10^{-4}$	$1,21.10^{-4}$

Carregamento vertical, Multi Pass	ch2	$1,84 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-4}$	$2,05 \cdot 10^{-4}$
	ch3	$3,30 \cdot 10^{-4}$	$3,34 \cdot 10^{-4}$	-	$3,32 \cdot 10^{-4}$
	ch4	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$3,66 \cdot 10^{-4}$	-	$2,98 \cdot 10^{-4}$
	ch5	$6,03 \cdot 10^{-5}$	$6,20 \cdot 10^{-5}$	-	$6,12 \cdot 10^{-5}$
	ch6	$5,52 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-5}$	-	$5,66 \cdot 10^{-5}$
	ch7	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-5}$	$9,32 \cdot 10^{-6}$	$6,22 \cdot 10^{-5}$
Carregamento lateral, Multi Pass	ch2	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-4}$
	ch3	$4,76 \cdot 10^{-4}$	$4,76 \cdot 10^{-4}$	-	$4,76 \cdot 10^{-4}$
	ch4	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$5,22 \cdot 10^{-4}$	-	$4,99 \cdot 10^{-4}$
	ch5	$6,55 \cdot 10^{-5}$	$5,80 \cdot 10^{-5}$	-	$6,17 \cdot 10^{-5}$
	ch6	$4,73 \cdot 10^{-5}$	$6,30 \cdot 10^{-5}$	-	$5,52 \cdot 10^{-5}$
	ch7	$8,23 \cdot 10^{-6}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$3,22 \cdot 10^{-4}$	$1,76 \cdot 10^{-4}$

3.2. Calibração da célula de Carga

Os valores medidos de tensão e os respectivos pesos aplicados encontram-se abaixo.

Tabela 2: Dados coletados para calibração da célula de carga

Peso [kgf]	Tensão [mV]	Peso [kgf] (cont)	Tensão [mV] (cont)
0	1000	59	1210
9	1030	61	1217
11	1037	63	1224
13	1049	64	1231
15	1055	66	1234
17	1063	68	1243
19	1070	69	1243
21	1081	71	1252
23	1085	73	1259
25	1089	74	1266
27	1097	76	1273
29	1106	78	1276
31	1115	79	1286
33	1119	81	1290
35	1125	83	1292

Peso [kgf]	Tensão [mV]	Peso [kgf] (cont)	Tensão [mV] (cont)
37	1131	84	1298
39	1140	86	1304
41	1148	88	1314
43	1154	90	1322
45	1160	92	1330
47	1169	94	1339
49	1174	96	1346
51	1183	98	1354
53	1188	-	-
54	1191	-	-
56	1199	-	-
58	1206	-	-

Esses valores foram plotados em um gráfico, de modo a se verificar o comportamento da célula de carga:

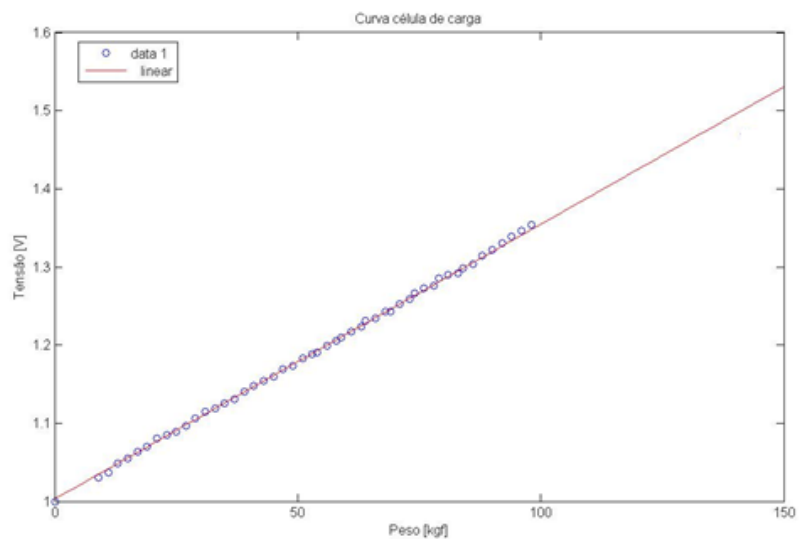


Figura 64: Pontos experimentais e aproximação linear do comportamento da célula de carga

Como o comportamento observado é bastante próximo do linear, obteve-se a equação da reta:

$$V_{out} = 0,0035166 \cdot F + 1,003$$

Equação 4: Reta de interpolação para célula de carga

3.3. Medições no componente

3.3.1. Carregamento vertical

Com o componente fixado no *jig*, a célula de carga foi fixada no suporte inferior, reproduzindo o carregamento vertical feito nas simulações. A força foi aplicada progressivamente e os valores adquiridos.

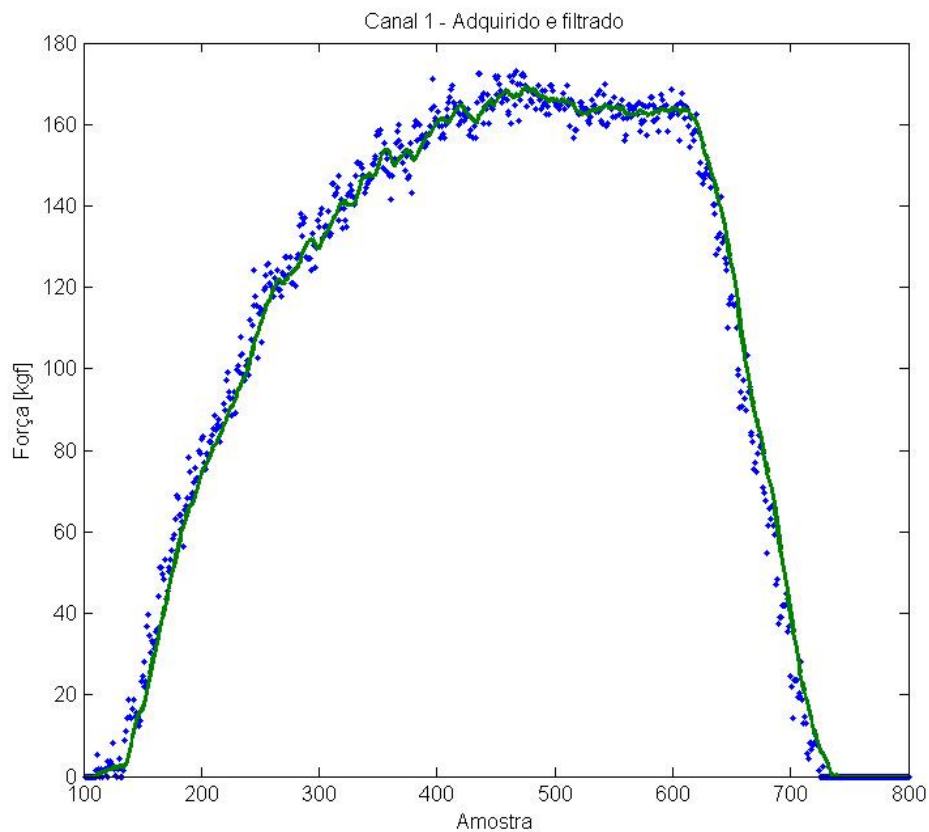


Figura 65: Aquisição da célula de carga e curva filtrada

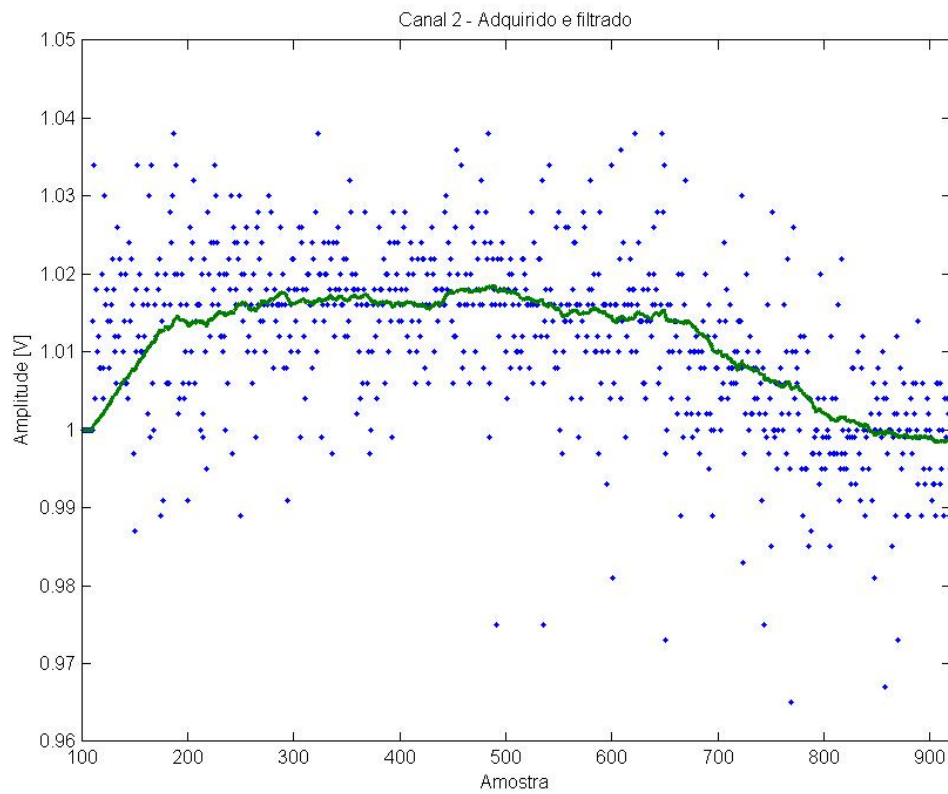


Figura 66: Aquisição canal 2 e curva filtrada

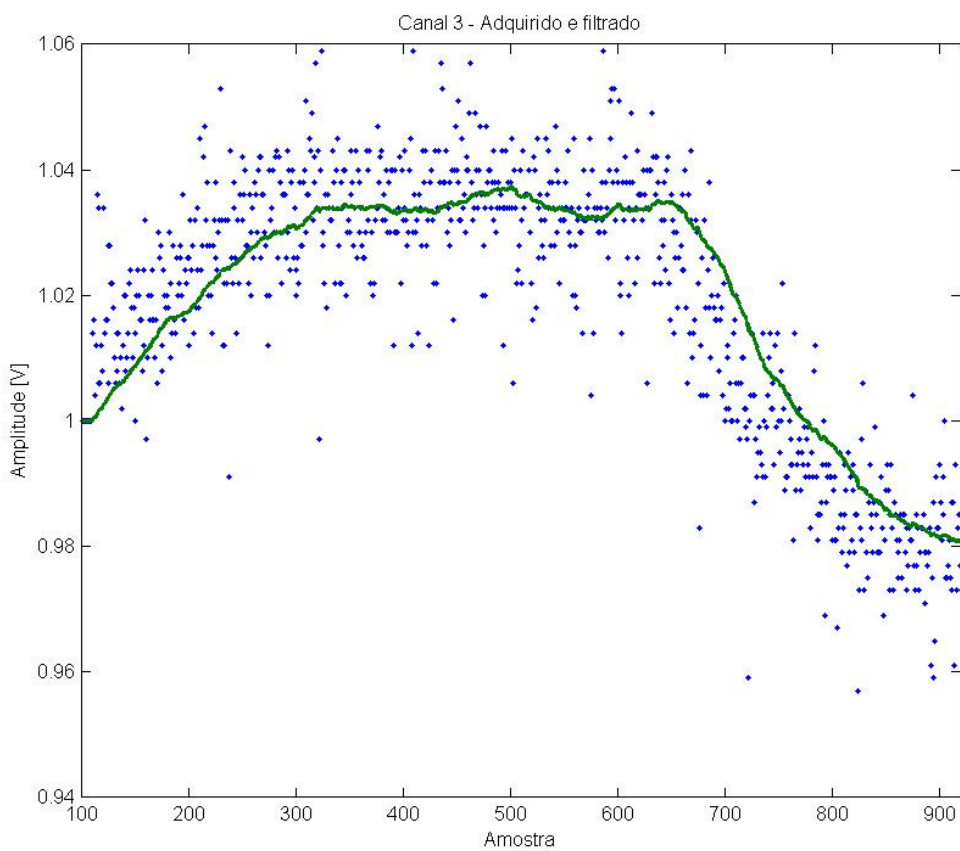


Figura 67: Aquisição canal 3 e curva filtrada

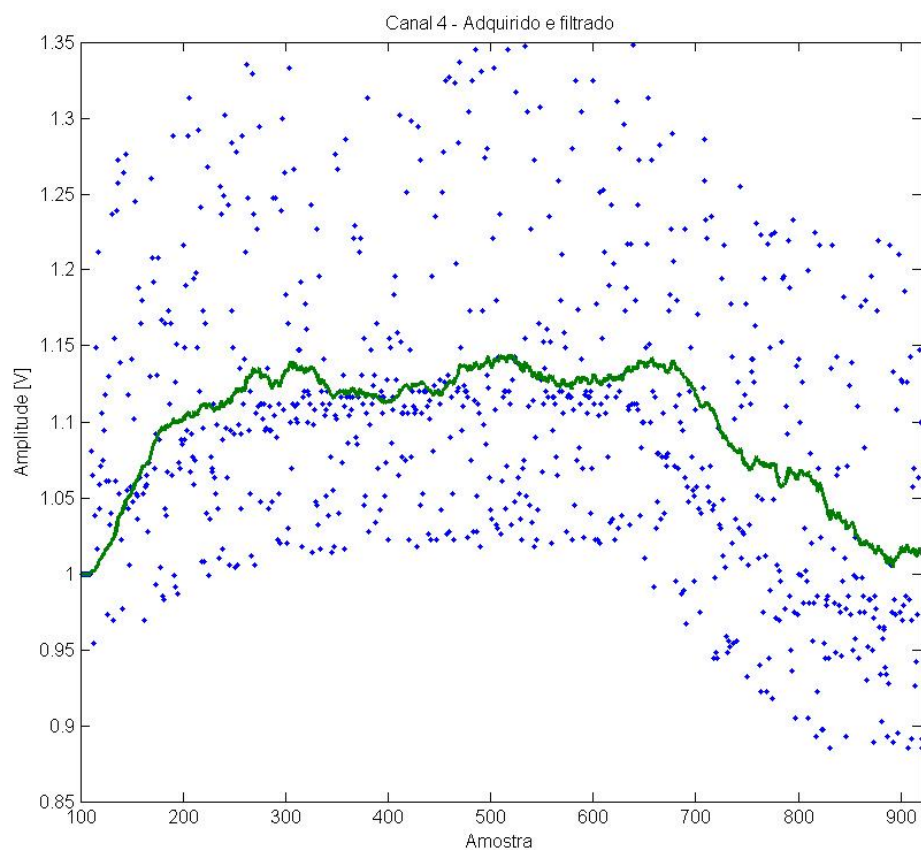


Figura 68: Aquisição canal 4 e curva filtrada

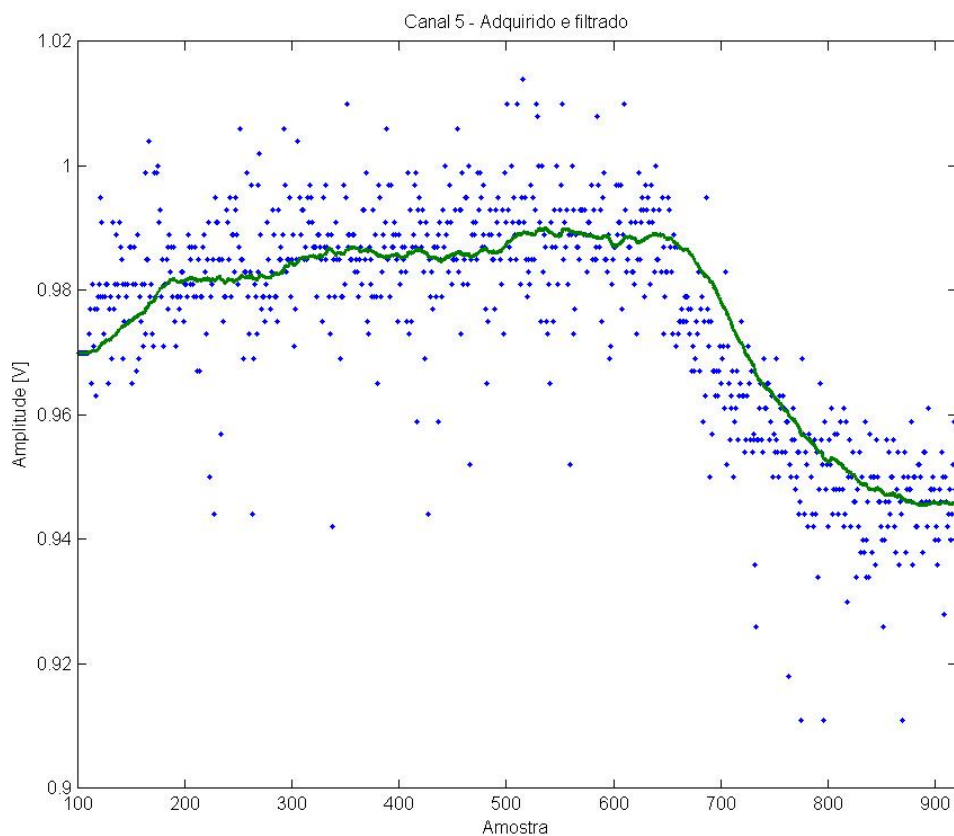


Figura 69: Aquisição canal 5 e curva filtrada

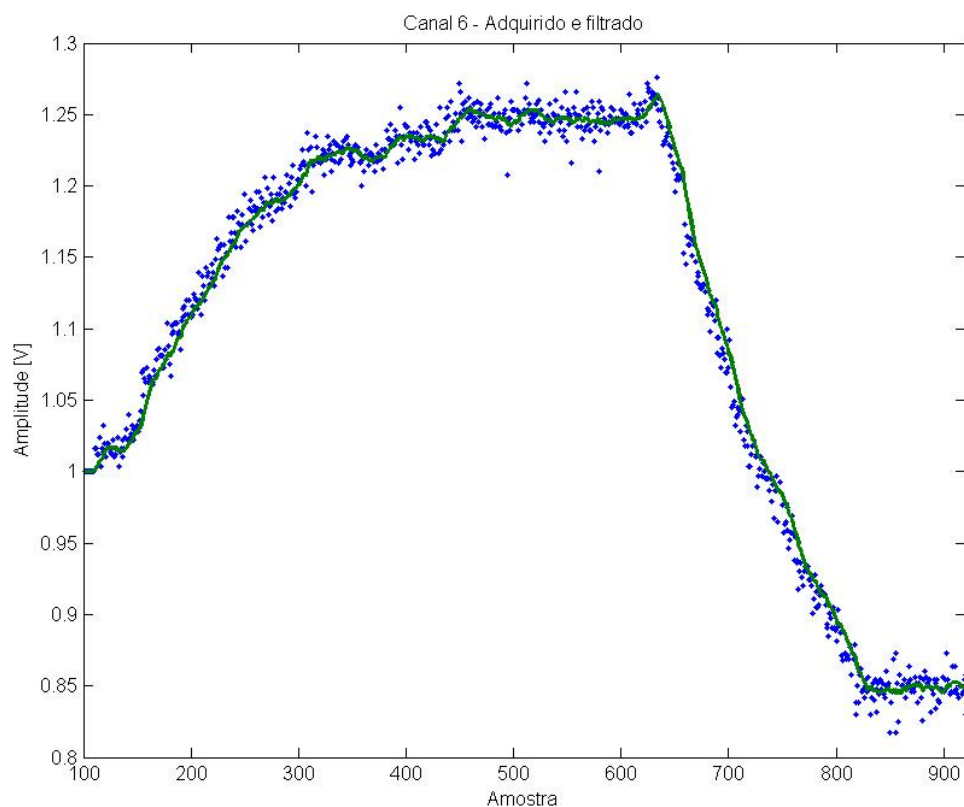


Figura 70: Aquisição canal 6 e curva filtrada

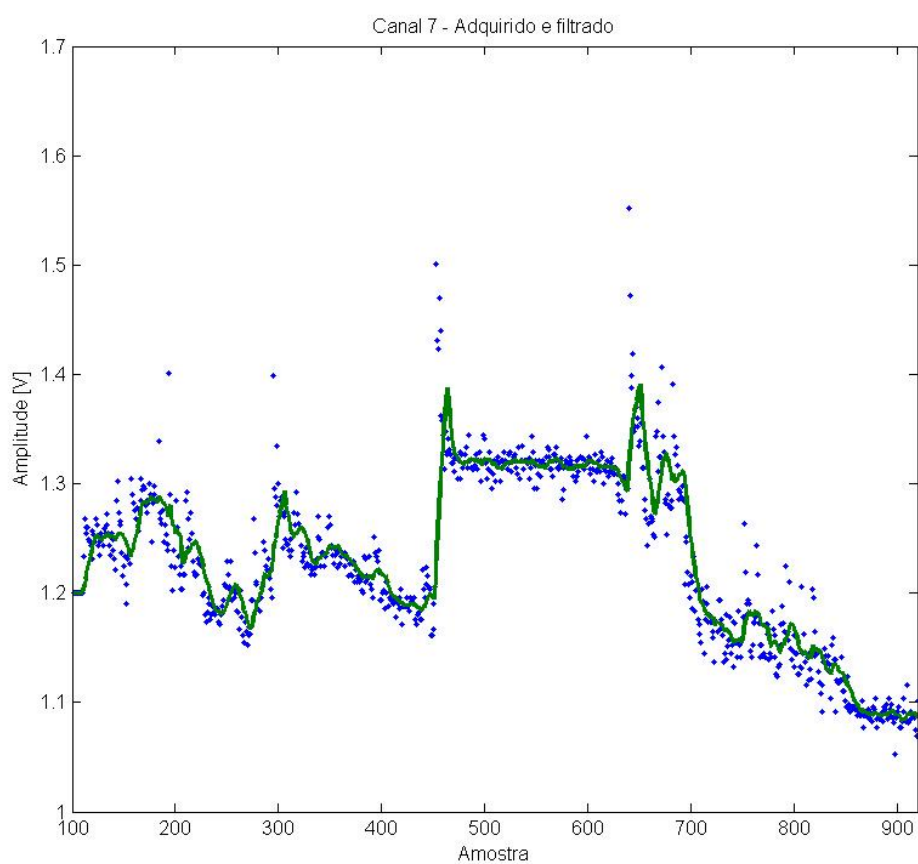


Figura 71: Aquisição canal 7 e curva filtrada

Com os valores adquiridos e filtrados de tensão de saída na ponte foi possível o cálculo da deformação sofrida equivalente:

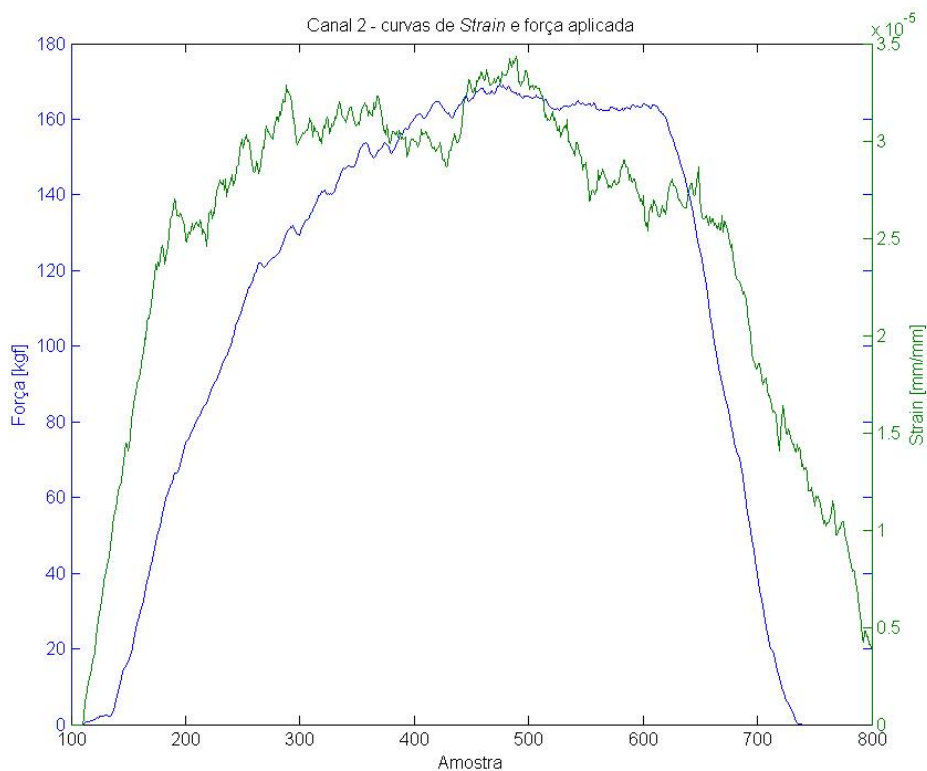


Figura 72: Comparação deformação e força aplicada canal 2

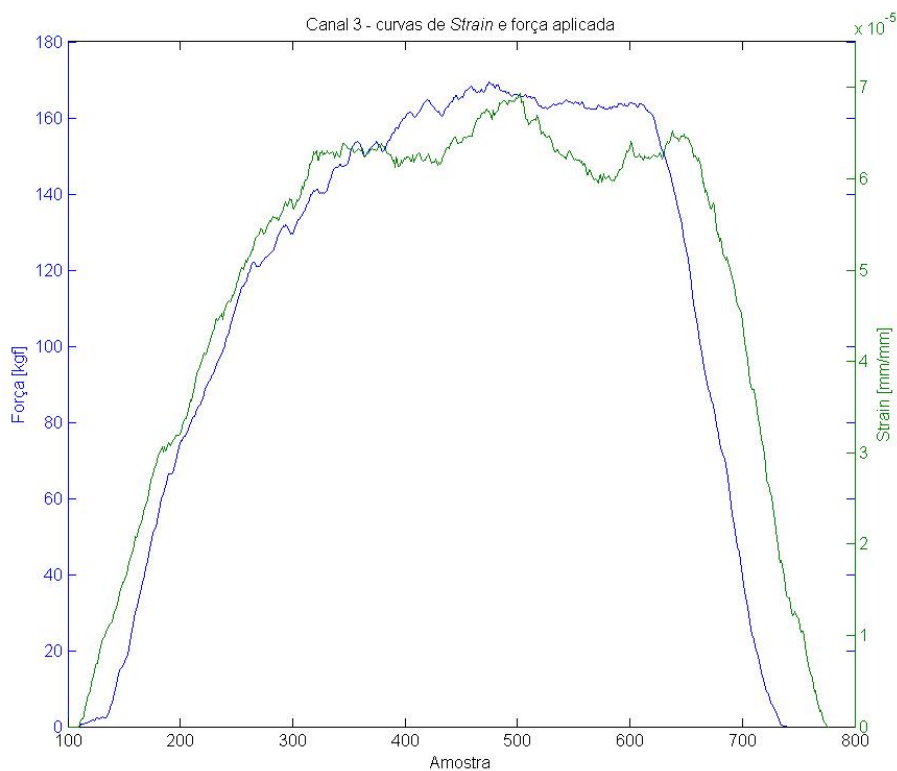


Figura 73: Comparação deformação e força aplicada canal 3

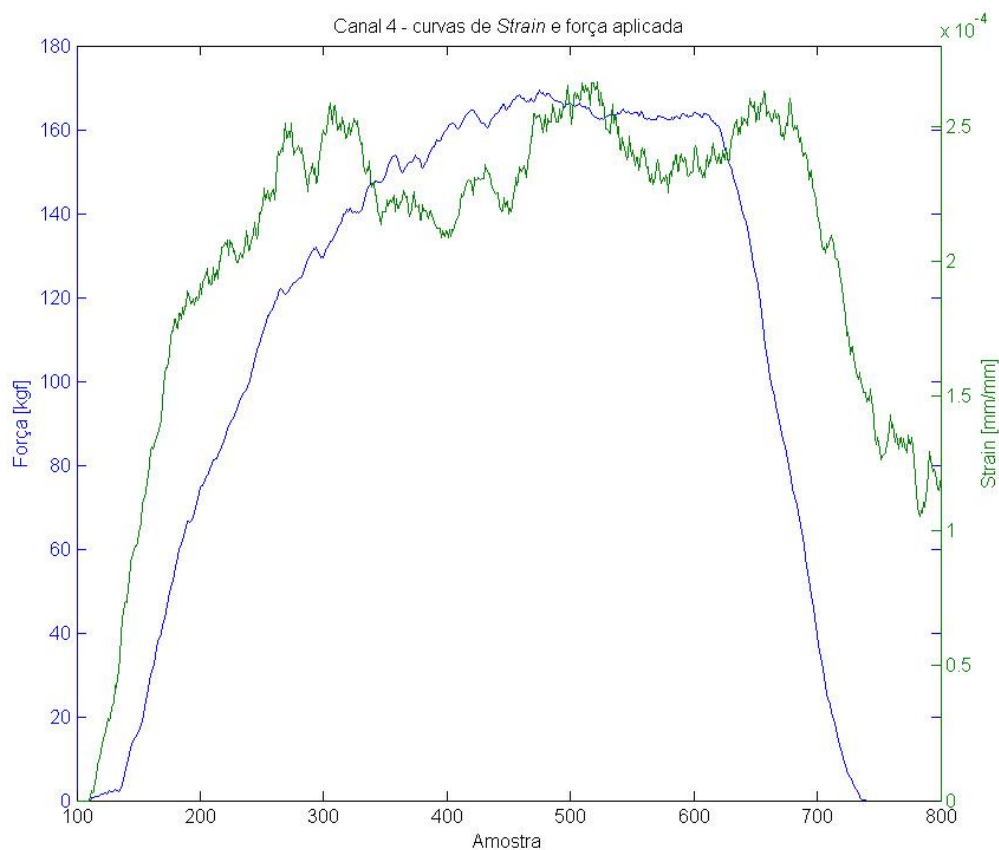


Figura 74: Comparação deformação e força aplicada canal 4

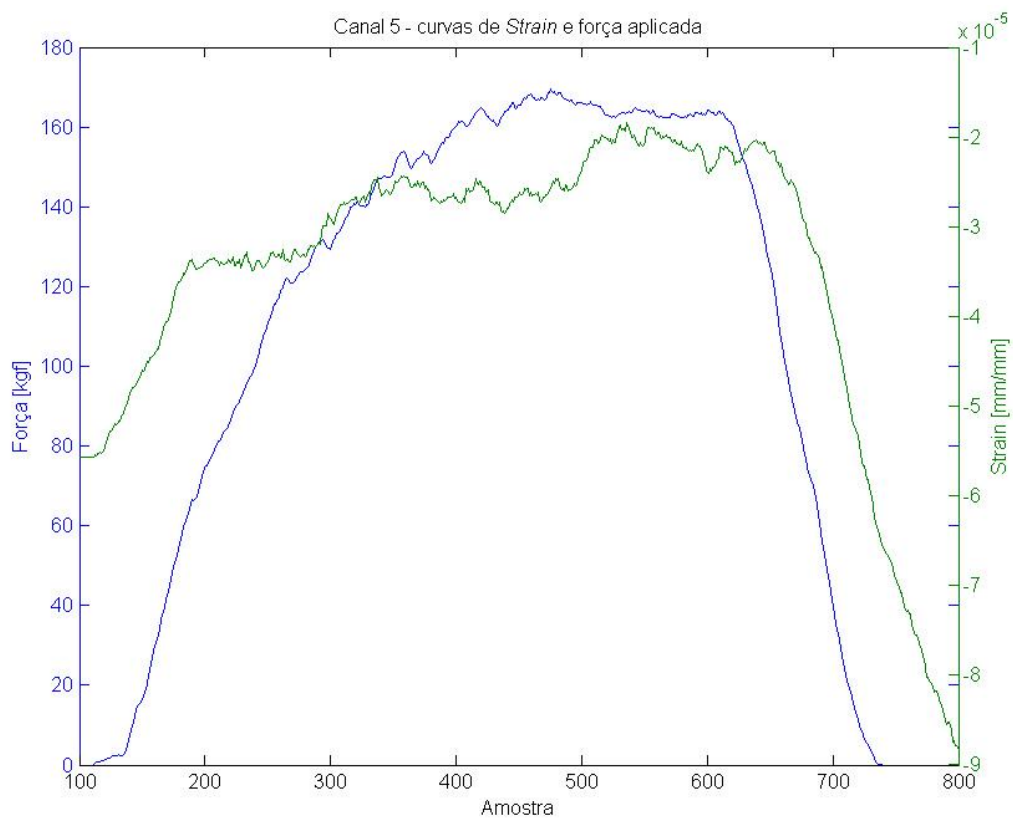


Figura 75: Comparação deformação e força aplicada canal 5

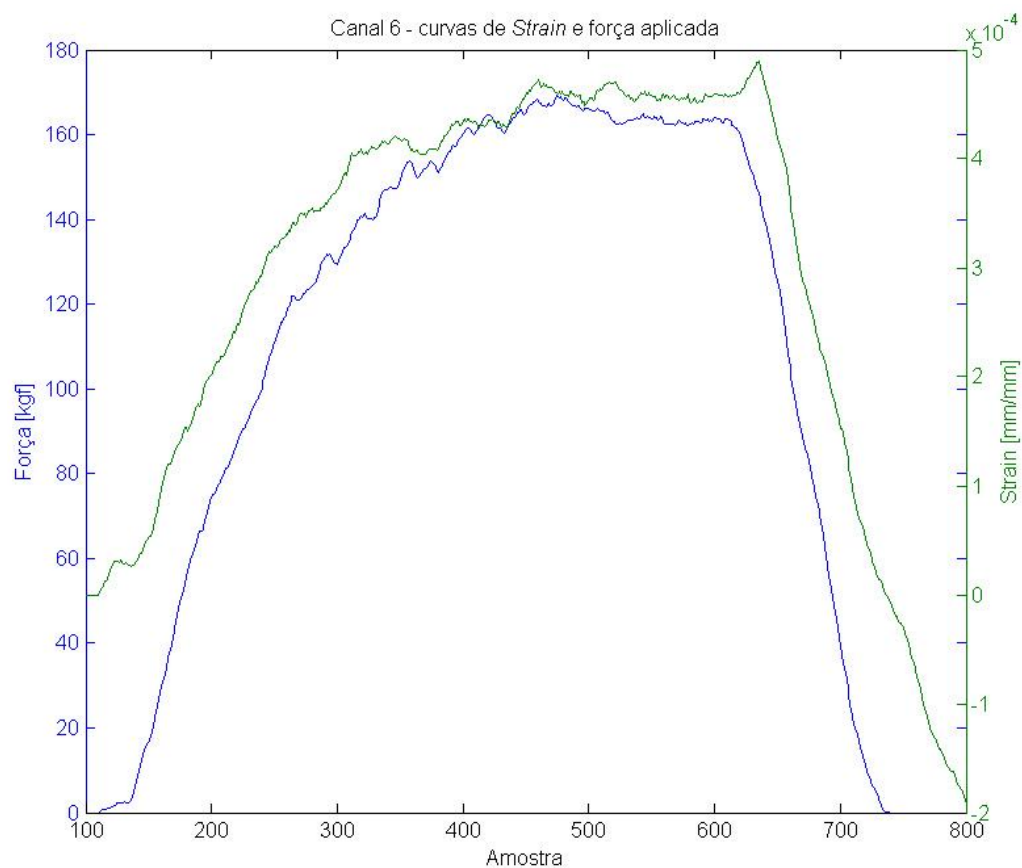


Figura 76: Comparação deformação e força aplicada canal 6

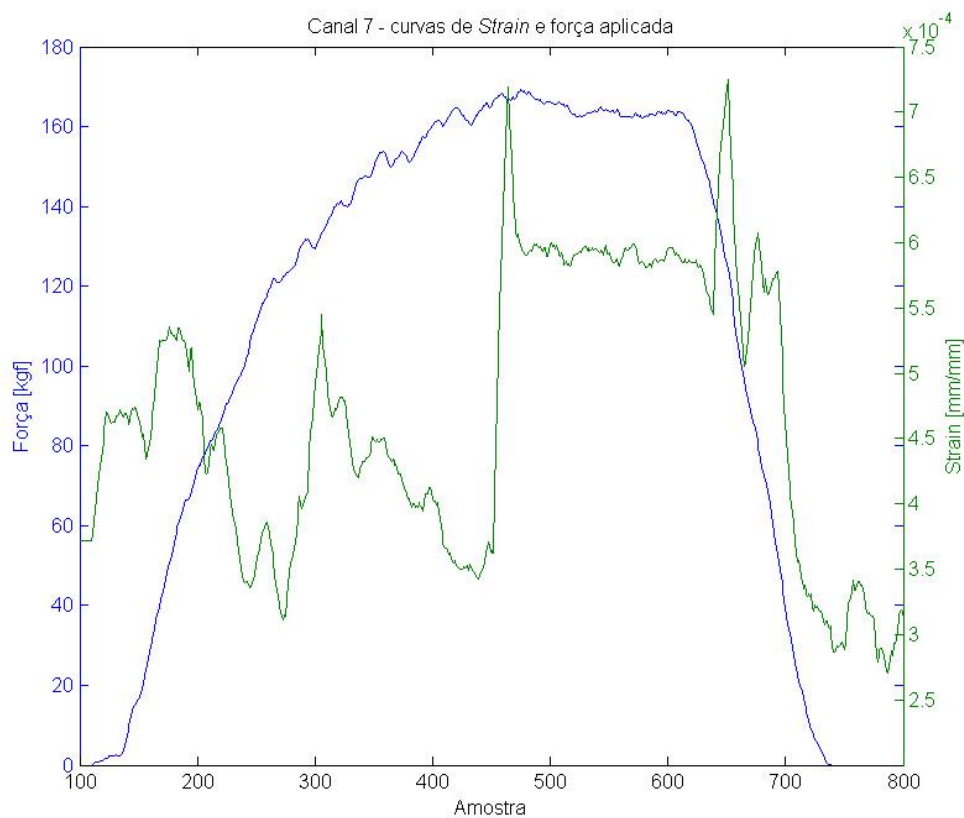


Figura 77: Comparação deformação e força aplicada canal 7

3.3.2. Carregamento lateral

Para essa série de aquisições, a célula de carga foi fixada no suporte superior, e de maneira equivalente, foi-se aplicando a força progressivamente e os valores adquiridos.

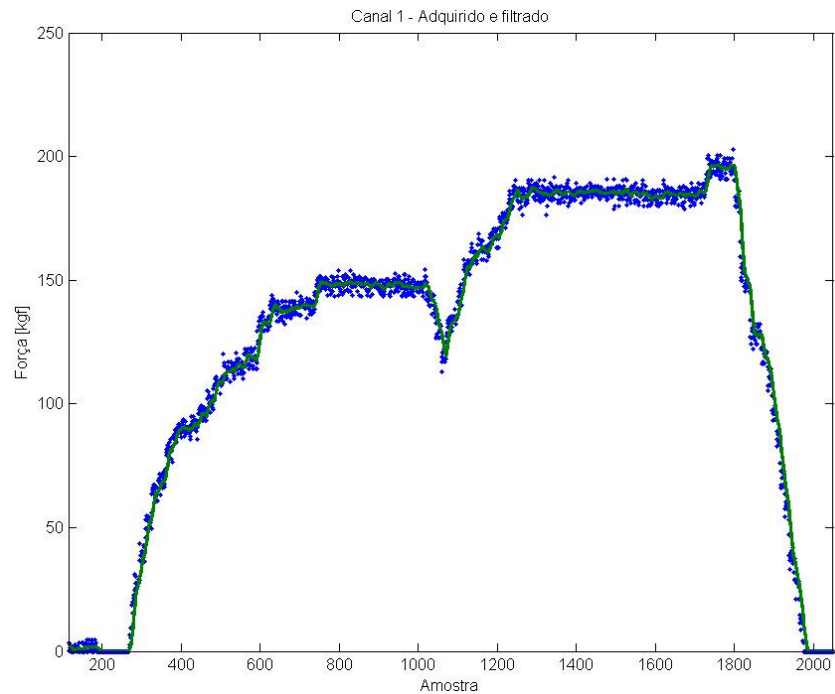


Figura 78: Aquisição da célula de carga e curva filtrada

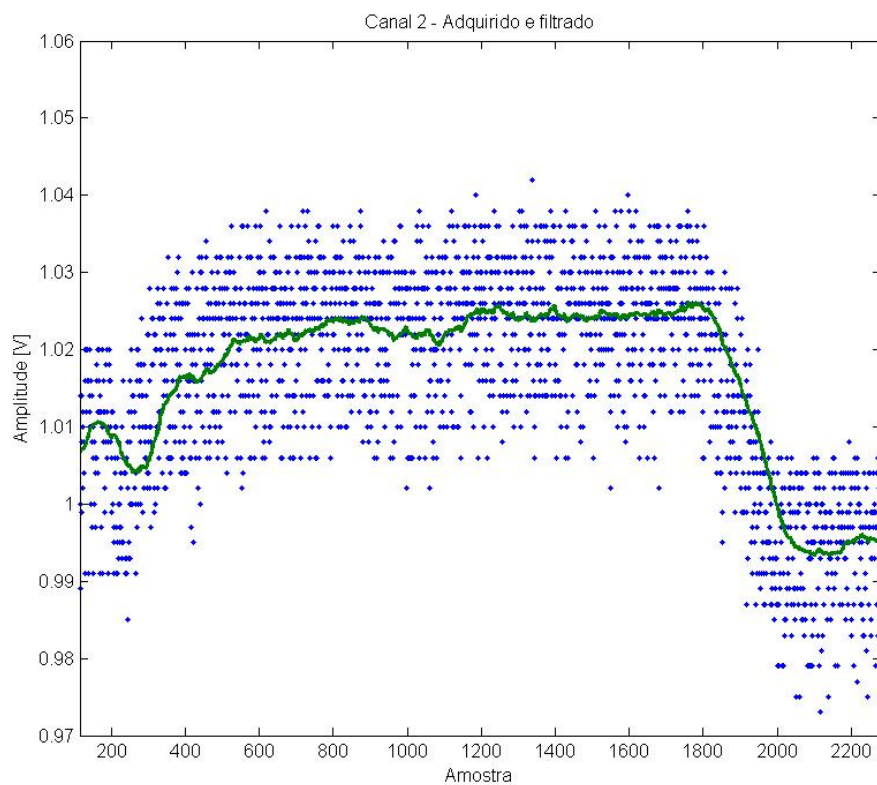


Figura 79: Aquisição canal 2 e curva filtrada

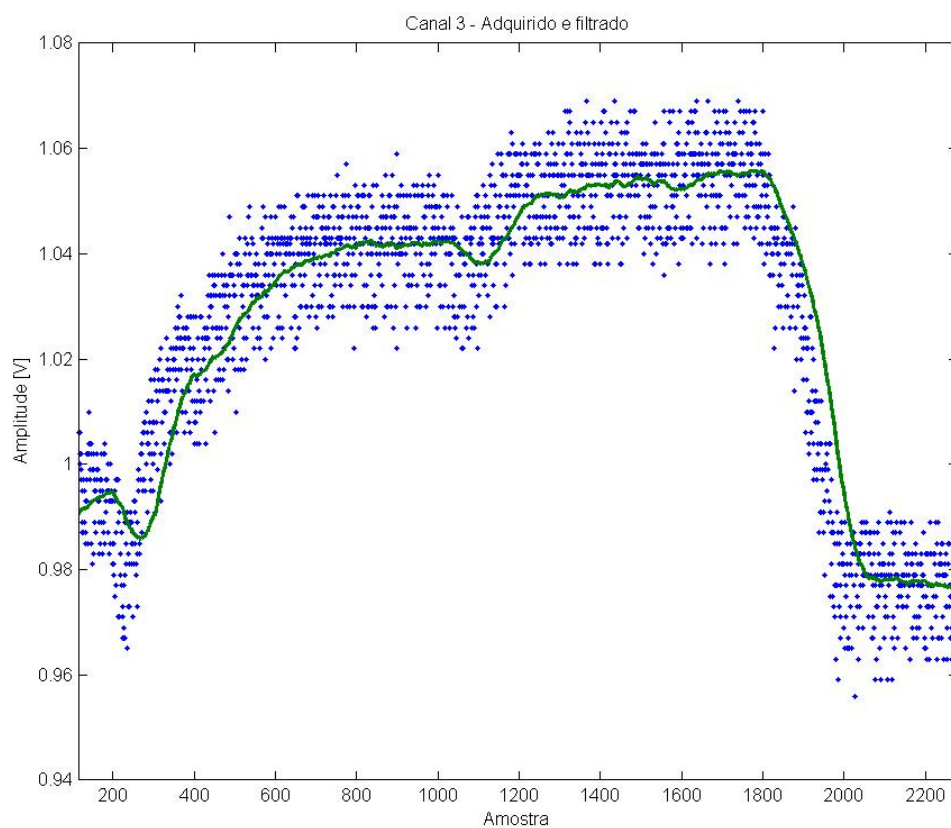


Figura 80: Aquisição canal 3 e curva filtrada

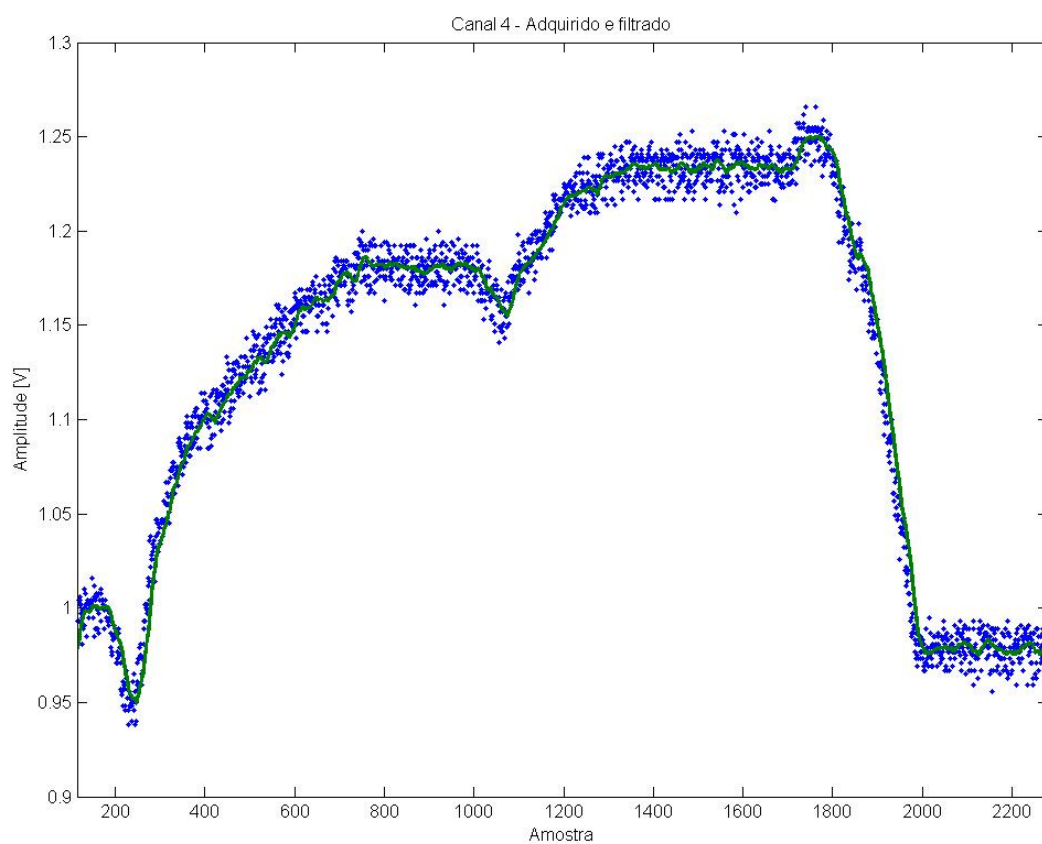


Figura 81: Aquisição canal 4 e curva filtrada

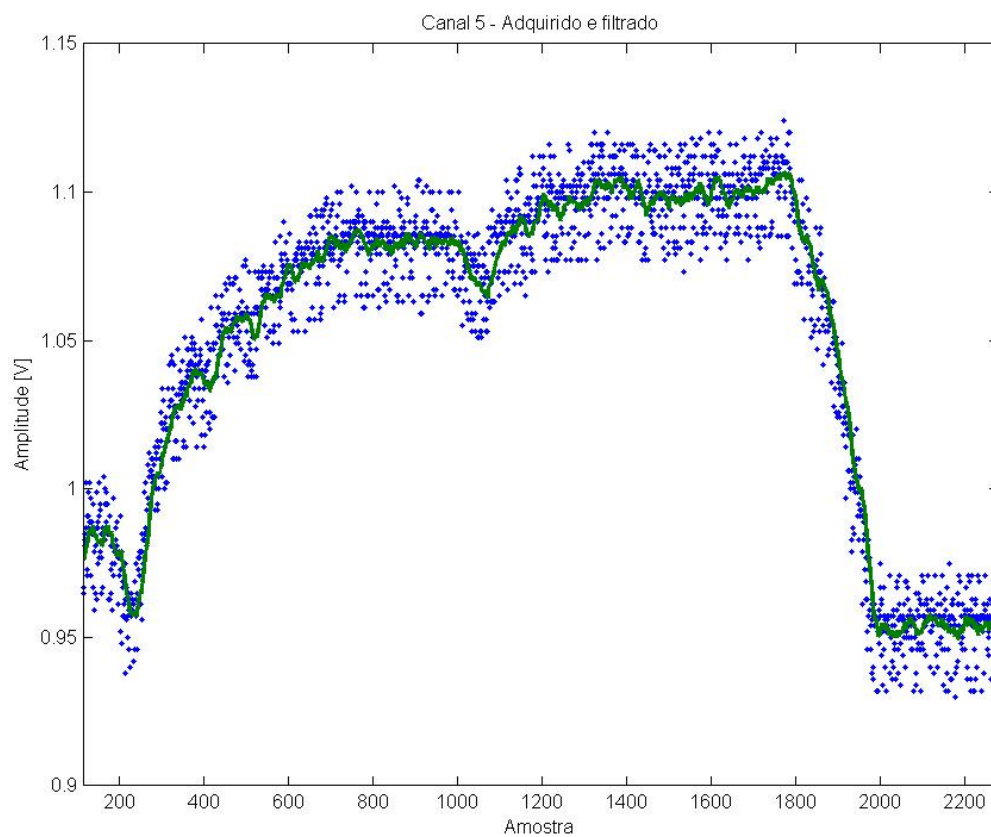


Figura 82: Aquisição canal 5 e curva filtrada

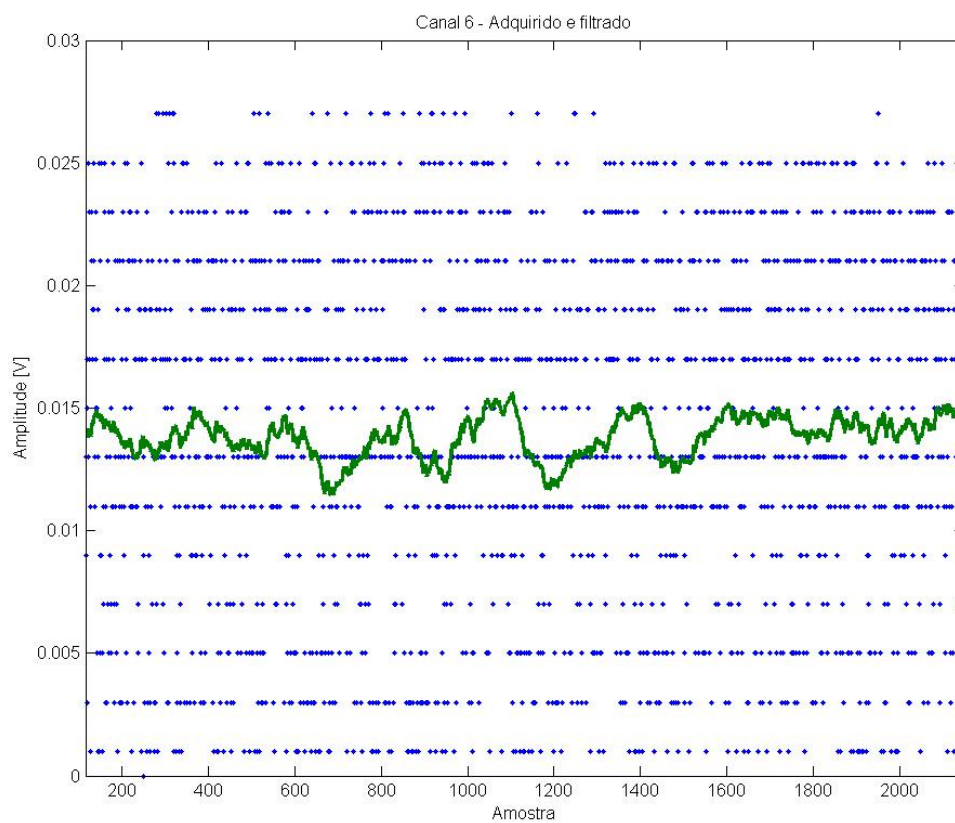


Figura 83: Aquisição canal 6 e curva filtrada

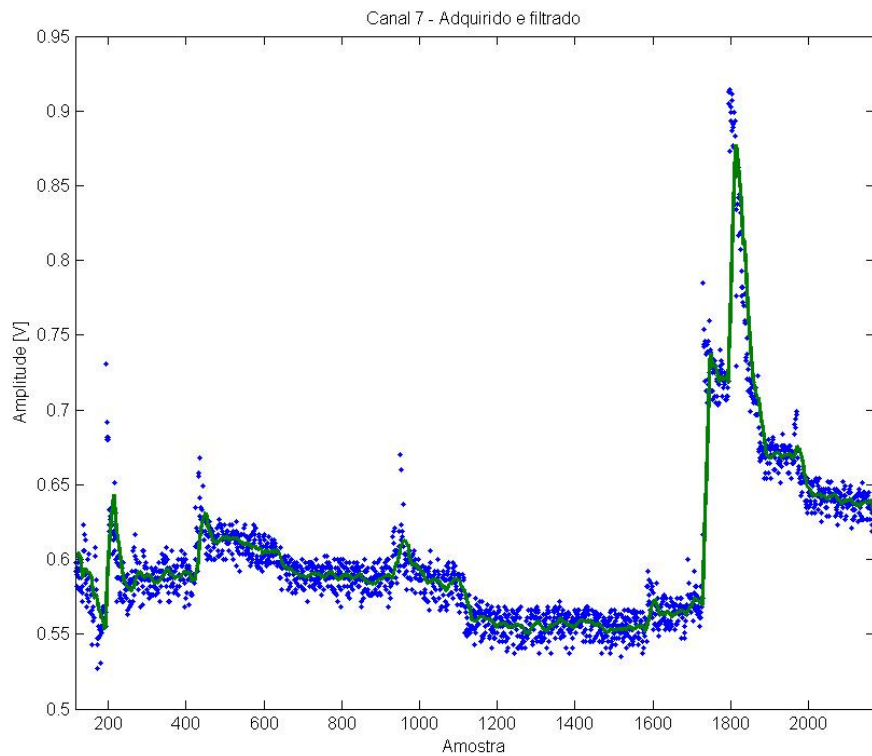


Figura 84: Aquisição canal 7 e curva filtrada

Novamente, após filtrados os valores foram plotados juntamente com a curva de força para análise do comportamento.

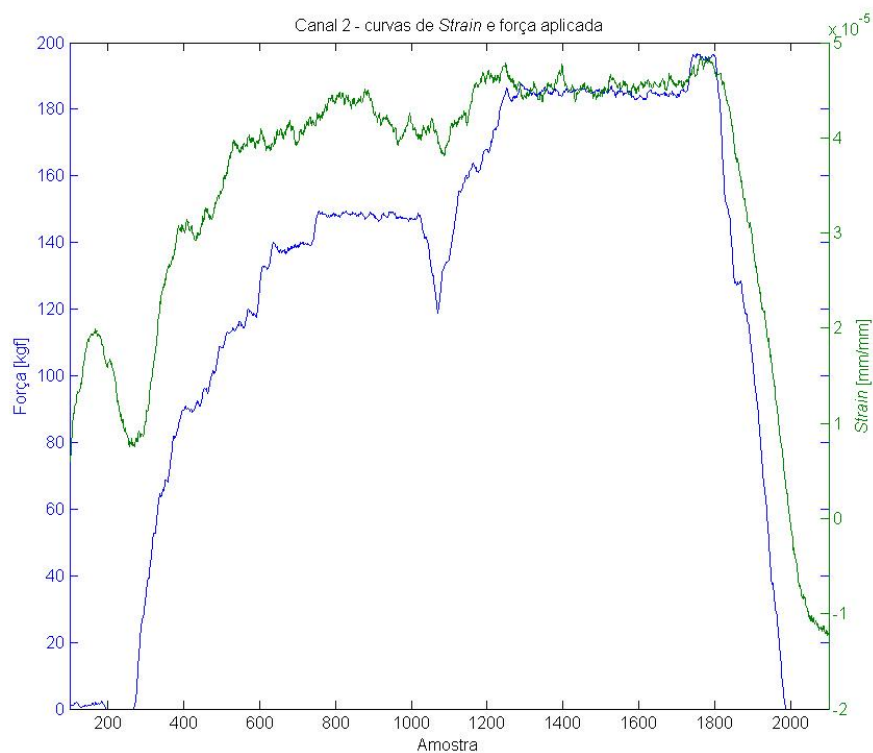


Figura 85: Comparação deformação e força aplicada canal 2

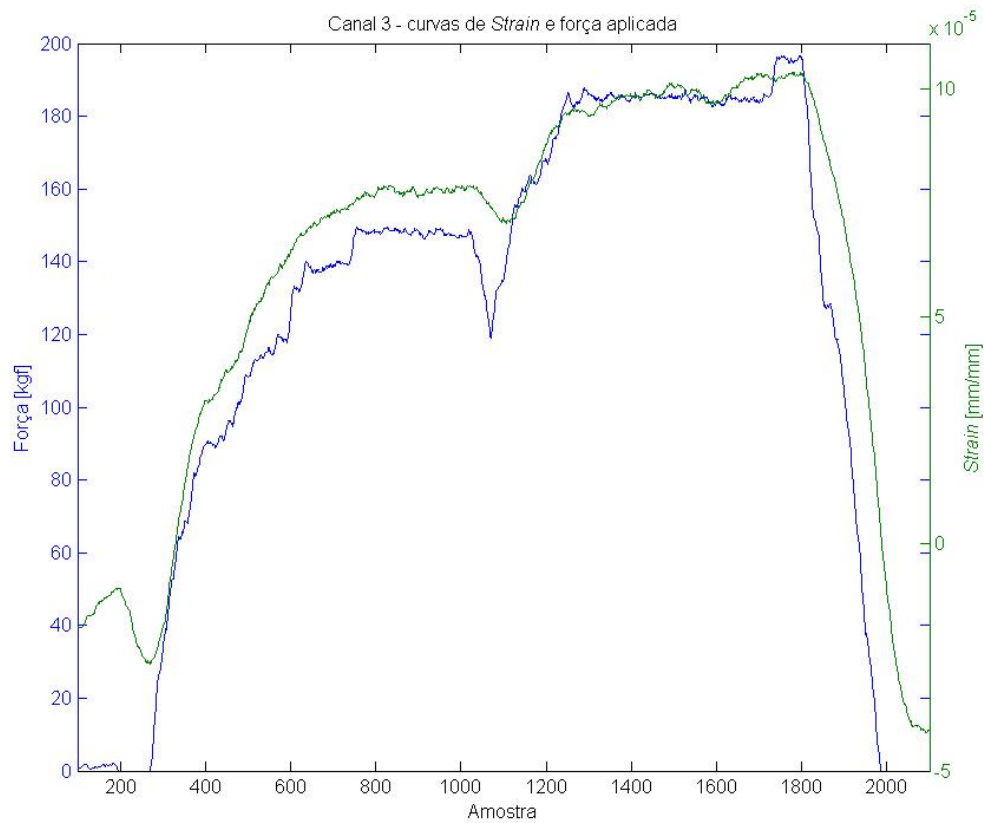


Figura 86: Comparação deformação e força aplicada canal 3

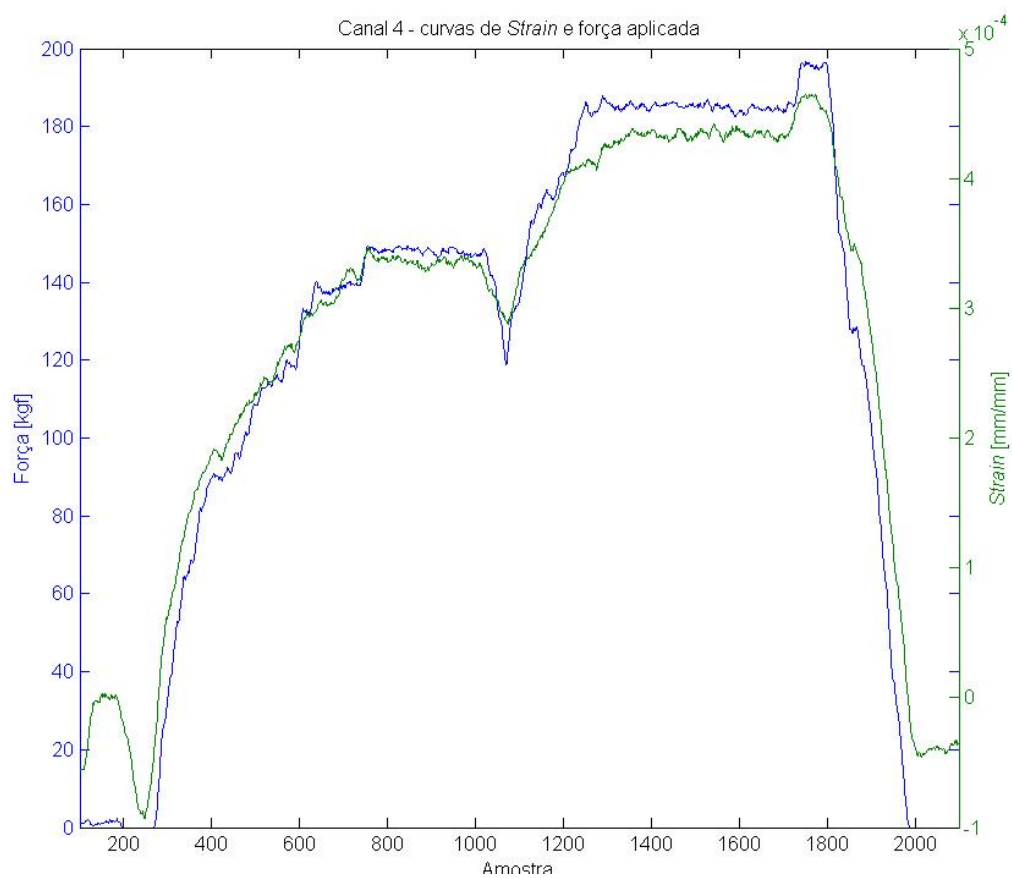


Figura 87: Comparação deformação e força aplicada canal 4

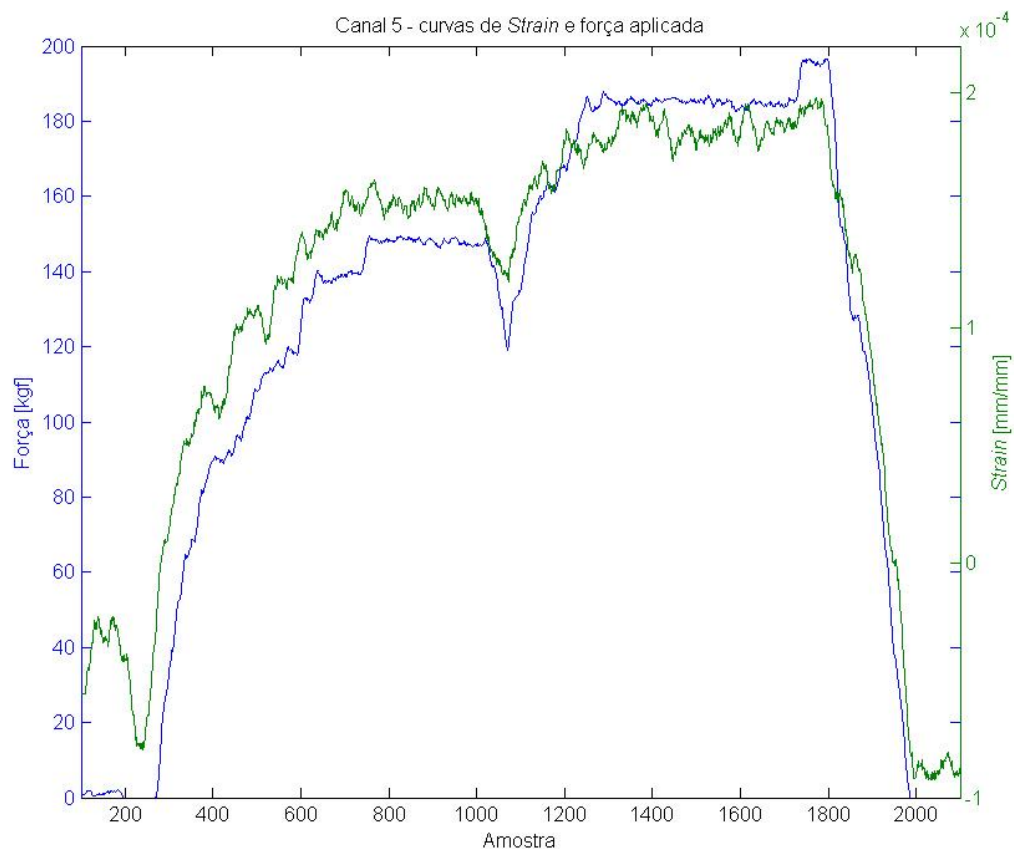


Figura 88: Comparação deformação e força aplicada canal 5

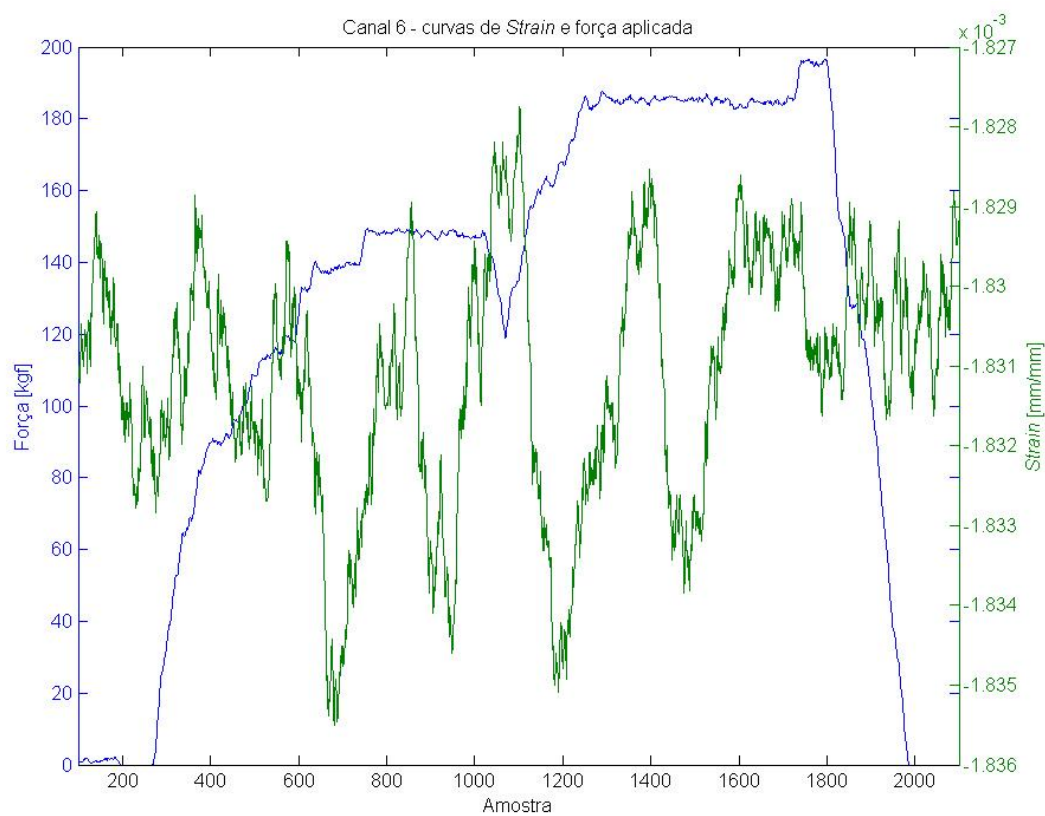


Figura 89: Comparação deformação e força aplicada canal 6

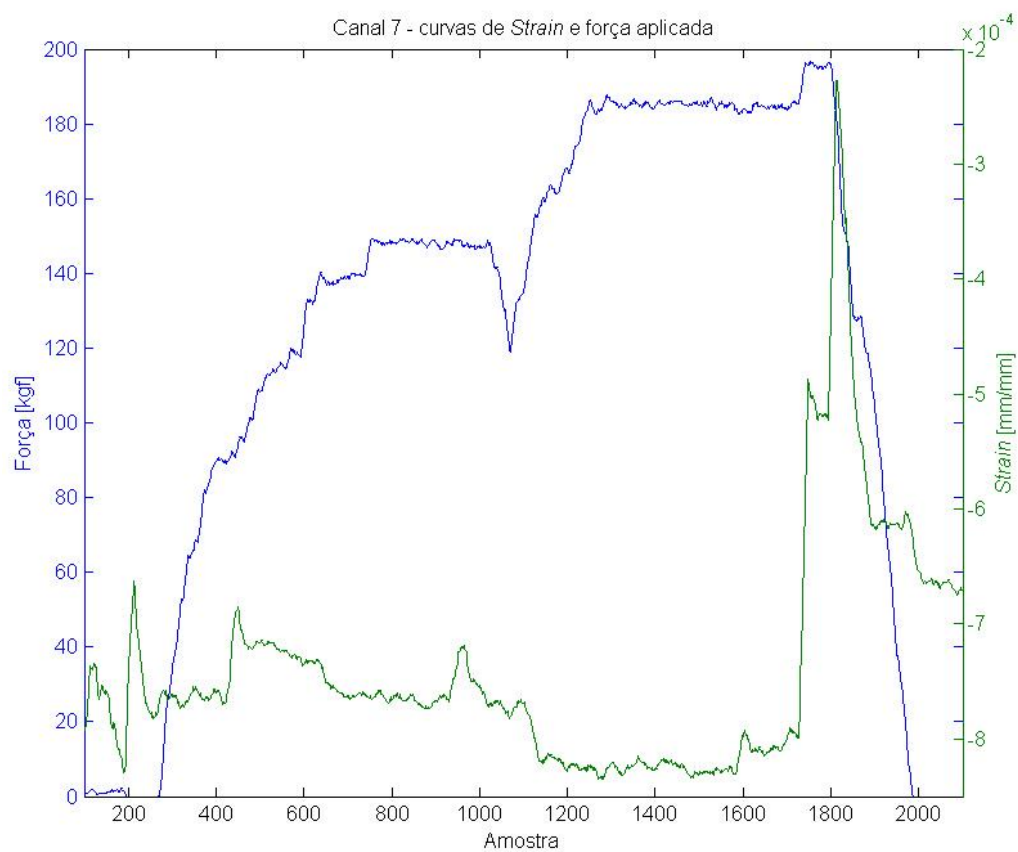


Figura 90: Comparação deformação e força aplicada canal 7

4. Conclusões

4.1. Comparação dos dados experimentais com simulados - Carregamento vertical

Tabela 3: Comparação valores experimentais/simulados, carga vertical

Método	Canal			
	2	3 e 4	5 e 6	7
Experimental	$3,1039 \cdot 10^{-5}$	$2,4562 \cdot 10^{-4}$	$4,5376 \cdot 10^{-4}$	$2,1010 \cdot 10^{-4}$
Single Pass não linear	$2,1547 \cdot 10^{-4}$	$3,3450 \cdot 10^{-4}$	$3,3725 \cdot 10^{-5}$	$4,2533 \cdot 10^{-5}$
Afastamento do experimental	594,189%	36,185%	-92,568%	-79,756%
Classificação	Inaceitável	Razoável	Inaceitável	Inaceitável
Multi Pass	$2,0527 \cdot 10^{-4}$	$3,1493 \cdot 10^{-4}$	$5,8900 \cdot 10^{-5}$	$6,2202 \cdot 10^{-5}$
Afastamento do experimental	561,327%	28,215%	-87,020%	-70,394%
Classificação	Inaceitável	Bom	Inaceitável	Inaceitável
Single Pass com jig	$2,0030 \cdot 10^{-4}$	$2,2048 \cdot 10^{-4}$	$1,0872 \cdot 10^{-4}$	$9,6386 \cdot 10^{-5}$
Afastamento do experimental	545,325%	-10,238%	-76,041%	-54,124%
Classificação	Inaceitável	Bom	Inaceitável	Inaceitável

4.2. Comparação dos dados experimentais com simulados - Carregamento lateral

Tabela 4: Comparação valores experimentais/simulados, carga lateral

Método	Canal			
	2	3 e 4	5 e 6	7
Experimental	$5,9810 \cdot 10^{-5}$	$5,1771 \cdot 10^{-4}$	$2,8348 \cdot 10^{-4}$	$-1,5810 \cdot 10^{-4}$
Single Pass não linear	$3,1187 \cdot 10^{-4}$	$4,8998 \cdot 10^{-4}$	$5,9028 \cdot 10^{-5}$	$1,2118 \cdot 10^{-4}$
Afastamento do experimental	421,429%	-5,357%	-79,178%	23,350%
Classificação	Inaceitável	Ótimo	Inaceitável	Bom
Multi Pass	$2,9180 \cdot 10^{-4}$	$4,8753 \cdot 10^{-4}$	$5,8458 \cdot 10^{-5}$	$1,7591 \cdot 10^{-4}$
Afastamento do experimental	387,878%	-5,830%	-79,379%	-11,265%
Classificação	Inaceitável	Ótimo	Inaceitável	Ótimo
Single Pass com jig	$4,2463 \cdot 10^{-4}$	$6,3945 \cdot 10^{-4}$	$2,3145 \cdot 10^{-4}$	$1,9223 \cdot 10^{-4}$
Afastamento do experimental	609,970%	23,516%	-18,354%	--21,590%
Classificação	Inaceitável	Bom	Bom	Bom

4.3. Análises

O objetivo de desenvolver um sistema para aquisição de dados de extensômetros foi atingido com sucesso. Tal sistema, apesar da necessidade de precisão não é necessariamente complexo, pois emprega diversos conceitos simples de engenharia elétrica (ponte de Wheatstone, amplificadores de instrumentação, conversão A/D, comunicação serial, etc.) em conjunto.

A calibração da célula de carga demonstra que o comportamento do material no regime elástico é linear, e os valores experimentais coletados desviam muito pouco da reta, mostrando que os procedimentos para construção, amplificação e teste são adequados.

Os conectores e cabos blindados empregados juntamente com a utilização de fios em pares trançados se mostraram eficientes na redução do ruído, como pode ser observado nas aquisições da célula de carga. Já os dados adquiridos dos extensômetros apresentaram maior conteúdo de ruído, porém como o circuito nos dois casos é praticamente igual, é necessário descobrir se o ruído está sendo induzido no cabeamento externo ou no circuito interno.

Um teste foi realizado aumentando-se o ganho dos amplificadores de instrumentação, o que trouxe melhor sensibilidade e melhor relação sinal-ruído (SNR), porém também ocorreu a saturação da saída do conversor A/D (é possível configurar um ganho que melhore a relação sinal-ruído e não sature o conversor, porém os resistores necessários para isso não estavam disponíveis no momento da montagem). Caso o ruído estivesse sendo originado no caminho entre o extensômetro e o amplificador, e não estivesse presente em modo comum, o aumento do ganho o amplificaria ainda mais, o que permite concluir que esse não é o caso e que a blindagem é eficiente.

O componente empregado nos testes é um componente usado e bastante sofrido, por motivos de tempo e financeiros. Esse componente sofreu deformações durante o tratamento térmico e quebrou durante testes, tendo sido remendado algumas vezes. Certamente esse fato contribuiu para a divergência encontrada na comparação dos valores simulados e experimentais, além de ter trazido dificuldades no ajuste da montagem no *jig*, conforme explicado mais abaixo.

Visivelmente as leituras do canal 2 estão muito abaixo do esperado, o que indica que o extensômetro foi colado fora do eixo correto. A utilização de rosetas nesse caso resolveria o problema, uma vez que a área para colagem de outro extensômetro igual é limitada.

Conforme se observa na Figura 83: Aquisição canal 6 e curva filtrada) e na Figura 89: Comparação deformação e força aplicada canal 6), houve uma leitura de ruídos elevados, sem a identificação de nenhuma tendência que seria observável mesmo com a presença de ruídos caso o canal estivesse funcional. A verificação do sistema indica que o motivo disso é um conector que está com mau contato nos terminais.

Já no canal 7 observa-se um comportamento curioso. Durante a realização das medidas foi notada uma dificuldade de se balancear essa ponte, e também observa-se uma tendência que se repetiu em ambas as condições de carregamento. A análise da curva parece indicar a ocorrência do escoamento do material (que também resultaria em um desbalanceamento da ponte), que pode ser atribuído ao fato dos furos dos olhais de fixação estavam ovais e os ajustes folgados.

Além desse comportamento incomum, verifica-se que o valor medido de deformação foi superior aos valores simulados para o caso de carregamento vertical. Como mencionado, foi observado um ajuste folgado na outra fixação da bandeja, fazendo esta suportar menos esforços do que deveria e sobrecarregando a fixação onde está instalado o extensômetro conectado ao canal 7. Além disso, como o furo está oval, verifica-se uma resistência diferente para cada condição de carregamento.

No par canal 5/canal 6: os valores experimentais indicam uma deformação consideravelmente superior do que indicado pelas simulações, mesmo com o canal 6 sendo desconsiderado da análise no caso lateral, devido à falta de informação presente no sinal. O motivo é a presença de uma mão-francesa soldada na extremidade oposta do tubo onde foram instalados os sensores. Trata-se de um remendo feito após a quebra do componente, que não está presente nas simulações.

Os canais 3 e 4 apresentaram valores condizentes com todas as simulações, indicando que essa condição (gradiente suave em espaço suficiente para fixação e soma vetorial das leituras) é bastante eficiente e deve ser buscada sempre que possível.

Para validação definitiva das simulações se tornam necessárias algumas modificações no procedimento realizado, tais como instalação de extensômetros tipo roseta, garantir a funcionalidade de todos os canais e principalmente, utilizar um componente que corresponda ao modelo utilizado no *software*.

A aquisição de dados extensiométricos é uma grande aliada para a engenharia, tanto de projeto quanto de manutenção, fornecendo ao engenheiro uma visão única das condições a que um componente é submetido.

5. Comentários e trabalhos futuros

Em trabalhos de instrumentação é sempre crítica a presença de ruídos, principalmente trabalhando-se com sinais de pequena amplitude como os sinais empregados em extensometria. Em diversos pontos do circuito foram incluídos capacitores, que se mostraram úteis na filtragem do ruído. Após a montagem do circuito na placa, notou-se a presença de ruídos nas saídas dos amplificadores de instrumentação e na saída do regulador de tensão que alimenta o circuito digital. Para evitar os problemas que esses ruídos estavam causando foram soldados capacitores adicionais, e mesmo de maneira improvisada, a solução funcionou adequadamente.

Durante os testes em *protoboard* foi observada uma grande oscilação e presença de ruídos em diversos pontos do circuito, inclusive no aterramento. Após diversas tentativas de filtragem, concluiu-se que a origem do mesmo era a própria rede elétrica da Universidade e, portanto, de difícil controle. Esse ruído, em determinados momentos, induziu oscilações de até 200 mV na saída dos amplificadores, provocando a leitura e transmissão de valores aleatórios, dificultando o processo de testes para validação. A utilização de baterias eliminou esses ruídos, vindos da rede elétrica, que está cada vez mais poluída por harmônicas geradas por sistemas com disparo de fase, como inversores de frequência, reatores, fontes chaveadas, etc.

O alcance da comunicação sem fios obtido em testes foi de 45 m, conforme exposto no item 2.2.2.2. (Eletrônica digital). Esse valor não deve ser considerado como sendo definitivo, pois o teste foi realizado dentro do campus, com a presença de diversos obstáculos para a comunicação. Conforme mencionado anteriormente, o alcance máximo teórico deveria ser superior a 1 km em terreno aberto, que é o caso das pistas de teste ou competição.

Foi verificado que caso alguma conexão com o extensômetro seja rompida ou mesmo se o sistema for ligado sem ter todas as entradas conectadas, é gerado um desbalanceamento da ponte de Wheatstone, provocando a saturação da saída dos A/D's, resultando na queima do microcontrolador. Uma alternativa para evitar isso seria a utilização de um circuito limitador ou simplesmente alimentar os amplificadores com 5 V.

Alguns extensômetros utilizados foram fixados perpendiculares ao eixo do tubo, pois a intenção era realizar a leitura aos pares, obtendo a deformação na região somando-se (vetorialmente) as deformações nos sentidos perpendiculares. Porém essa fixação se mostrou pouco sensível, e a medição teria sido melhor se os extensômetros fossem posicionados conforme a literatura, a 45 graus com o eixo.

Já o emprego de extensômetros especializados permitiria uma maior gama de ensaios, como por exemplo, o emprego de rosetas, que permitiriam conhecer a deformação no ponto sem a necessidade de se colar dois extensômetros separados e consequentemente distantes.

O *jig* inicialmente foi projetado para ser fabricado com tubos de quatro milímetros de parede, porém a indisponibilidade regional desse material levou à fabricação do mesmo com tubos de três milímetros. Foram observadas deformações elásticas em alguns pontos durante a realização dos ensaios, que contribuem para divergências com os valores simulados, pois mesmo as simulações feitas com o *jig* não consideraram a deformação no suporte da célula de carga, que diminui a parte da força efetivamente aplicada no componente.

A filtragem realizada pelo *MATLAB*® se beneficiaria de uma taxa amostragem maior, permitindo maior imunidade ao ruído e menor atraso na filtragem. Isso seria possível com a utilização de um microcontrolador mais avançado ou outro conversor A/D, de maior velocidade.

Essa filtragem se deu pelo algoritmo de 'média móvel', porém como cada canal possuía uma SNR diferente foram utilizadas janelas diferentes para suavizar cada canal, resultando em atrasos diferentes, que podem ser observados nos gráficos comparativos de força e deformação. Como nesse trabalho foi feita a interpretação visual, essa diferença nos atrasos não interfere no resultado final.

Referente às figuras: Figura 66 à Figura 71 e Figura 79 à Figura 84 (exceto pela Figura 83), apesar dos desvios serem grandes, as médias dos valores está bem definida, e seu comportamento segue o observado na célula de carga, permitindo a obtenção de informações e conclusões úteis.

Para a comparação do item **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foi feita a média dos valores obtidos nas simulações para as regiões dos canais 3 e 4 e também para os canais 5 e 6. Esses valores médios foram comparados com o módulo da soma vetorial das leituras dos extensômetros dos respectivos canais.

Para a linha “Classificação” foi adotado o seguinte critério de separação dos afastamentos:

Ótimo	Bom	Razoável	Inaceitável
0 ~ ±15%	±15 ~ ±30%	±30 ~ ±40%	>±40%

Essa classificação levou em consideração que um fator de segurança adequado para projeto mecânico deve contemplar variações nas características do material e eventuais sobrecargas sem que isso prejudique o componente. Para aplicações onde peso e volume são críticos, como é o caso do Baja, normalmente são empregados fatores de segurança de 1,15 até 1,5 (calculados segundo os fatores de penalização de Collins [14], podendo ser maior que 1,5, porém nunca inferiores a 1,15), desse modo, se o valor medido está abaixo de 15% do esperado pela simulação, ele continua dentro do menor coeficiente de segurança e não deveria prejudicar a vida útil do componente, sendo considerado um resultado ótimo. Na faixa de 15 a 30% o coeficiente de segurança passa a ser mais solicitado, porém por ser um componente de suspensão crítico seu projeto é feito com coeficientes mais elevados, logo, nesse caso específico, pode-se abusar um pouco desse fato. O intervalo de 30 a 40% ainda pode ser considerado razoável, porém não recomendado pois pode antecipar o problema de fadiga. Acima disso é grande o risco de falha prematura do componente e, portanto, considerado inaceitável.

A realização de simulações muitas vezes induz uma falsa sensação de segurança. Como pôde ser observado, existem diversas maneiras de se simular uma mesma situação, gerando resultados diferentes. Analisando os critérios de Collins para determinação de coeficiente de segurança encontram-se os seguintes fatores de penalização: conhecimento preciso do carregamento e cálculo preciso das tensões [14]. Fatores que muitas vezes são subestimados pelo engenheiro de projeto, que considera a simulação suficientemente acurada e obtém um fator de segurança insuficiente.

A correção de algumas deficiências permitirá o emprego do sistema embarcado no veículo, permitindo o conhecimento da deformação que ocorre em condições reais de utilização e assim fazer a correlação com as forças atuantes, permitindo refinar as simulações dos componentes futuros.

O projeto aqui descrito é funcional, porém não pode ser considerado definitivo. Modificações poderiam ser acrescentadas, por exemplo, utilização de uma caixa blindada, otimizar o projeto das PCBs, melhorar o pós-processamento, podendo ser automatizado no próprio instrumento virtual, melhorias no esquema de transmissão e demultiplexação, entre outras.

Referências bibliográficas

- [1] Matweb, "ONLINE MATERIAL DATABASE - MATWEB," [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ca1cf891973c4745b41677780dad6240&ckck=1>. [Acesso em Outubro 2011].
- [2] Robert Bosch GmbH, Manual de Tecnologia Automotiva, Edgard Blücher, 2005.
- [3] Roger Toogood, Pro/mechanica Tutorial Structure, Alberta: SDC Publications, 2003.
- [4] K. Hoffmann, An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges, HBM.
- [5] M. G. Rubio, CURSO DE INTRODUÇÃO A INSTRUMENTAÇÃO EM ENGENHARIA, IPT.
- [6] Omega Tech, "Omega Loadcell Technical info," 2011. [Online]. Available: <http://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html>. [Acesso em Novembro 2012].
- [7] ASM, ASM Metals handbook, 10ª edição ed., vol. 19, ASM.
- [8] Henkel Loctite Adhesives Limited, "Faster. Stronger. Superior. The best Loctite® Instant Adhesives ever.," 2011. [Online]. Available: http://www.henkel.com.br/brb/content_data/CA_UK_Version.pdf. [Acesso em 25 Julho 2012].
- [9] Agilent Technologies, "Agilent 970-Series Handheld Multimeters Data Sheet," Agilent Technologies, 1998. [Online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5967-6368EN.pdf>. [Acesso em 15 Agosto 2012].
- [10] E. Gesualdo, *Notas de aula de SEL0351 - Instrumentação Eletrônica I*, São Carlos: EESC-USP, 2009.
- [11] Texas Instruments, "Folha de dados uA723," 1972. [Online]. Available: www.ti.com/lit/ds/symlink/ua723.pdf.

- [12] Digi international, "Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol," 2012. [Online]. Available: <http://www.digi.com>.
- [13] T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, 1992.
- [14] J. A. Collins, Projeto Mecanico de Elementos de Maquinas, LTC, 2006.

Apêndices

A1. Elementos *p* versus elementos *h* [3]

Nas soluções de FEA, os valores da variável dependente são computados apenas nos nós. A variação dessa variável, dentro de cada elemento da malha, é computada a partir dos valores nodais de modo a satisfazer, aproximadamente, a equação diferencial parcial (EDP) governante e uma maneira de se fazer isso é com polinômios de interpolação. De modo a satisfazer a EDP, o valor nos nós de cada elemento deve atender um conjunto de condições representadas por equações algébricas envolvendo outros valores nodais. As condições de contorno são implementadas especificando-se as variáveis nos nós de fronteira.

A1.1. Convergência de elementos *h* (método tradicional)

Seguindo a abordagem tradicional, outros programas se utilizam de polinômios de interpolação de baixa ordem em cada elemento. A variável primária da solução em análises de tensão (*stress*) é o deslocamento dos nós, e a deformação relativa (*strain*) é obtida derivando-se o campo de deslocamento e, a partir do *strain*, pode-se computar as tensões. Como as funções de interpolação costumam ser lineares (primeira ordem), a deformação e tensão nos elementos são constantes, conforme ilustrado na Figura A1. Tais discontinuidades no campo de tensão são irrealistas, resultando em valores imprecisos para tensões máximas justamente nas regiões de maior interesse, onde normalmente ocorrem elevados gradientes.



Figura A1: Tensões de von Mises em $\frac{1}{4}$ de modelo tensionado utilizando elementos de primeira ordem

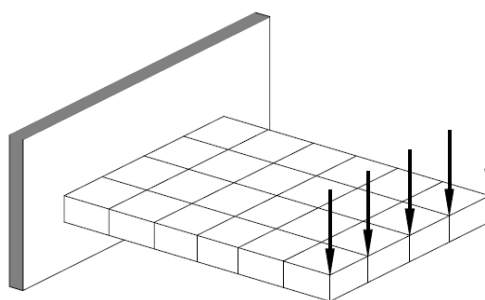


Figura A2: Um desastre certo utilizando elementos de primeira ordem

Uma situação ainda mais crítica é apresentada na Figura A2. Como a espessura da secção transversal é composta de apenas um elemento de primeira ordem, a tensão calculada será a mesma nos lados superior e inferior, claramente incorreta.

Essa situação é frequentemente mascarada pelas capacidades de pós-processamento do programa, que irá fazer a média, interpolar os valores ou realizar outras operações de suavização estritamente para efeitos visuais, resultando em uma visualização que pouco se assemelha ao que está ocorrendo ao modelo do objeto. Assim, de modo a se obter estimativas mais precisas da tensão, utilizando-se de elementos de primeira ordem, é necessária a utilização de elementos muito menores, um processo chamado de refinamento de malha. Pode não ser possível a fácil identificação das regiões com necessidade de refino de malha, assim frequentemente a malha inteira é modificada.

O refinamento prossegue até que posteriores divisões e refino não trazem alterações significativas na solução obtida. Esse processo de refinamento consecutivo até a obtenção de uma solução "boa" é denominado análise de convergência. É claro que no processo de refinamento da malha, o tamanho do problema computacional aumenta consideravelmente, chegando ao ponto em que em alguns casos, alcança-se um limite prático (por questão de tempo ou memória) antes de se convergir para uma solução aceitável com sucesso.

Esse método de refinamento de malha para análise de convergência conduz a classe de elemento-h de métodos de FEA, onde o 'h' refere-se ao tamanho dos elementos que sempre de baixas ordens, são denotados por elementos-h, e o processo de refinamento de malha é chamado convergência-h.

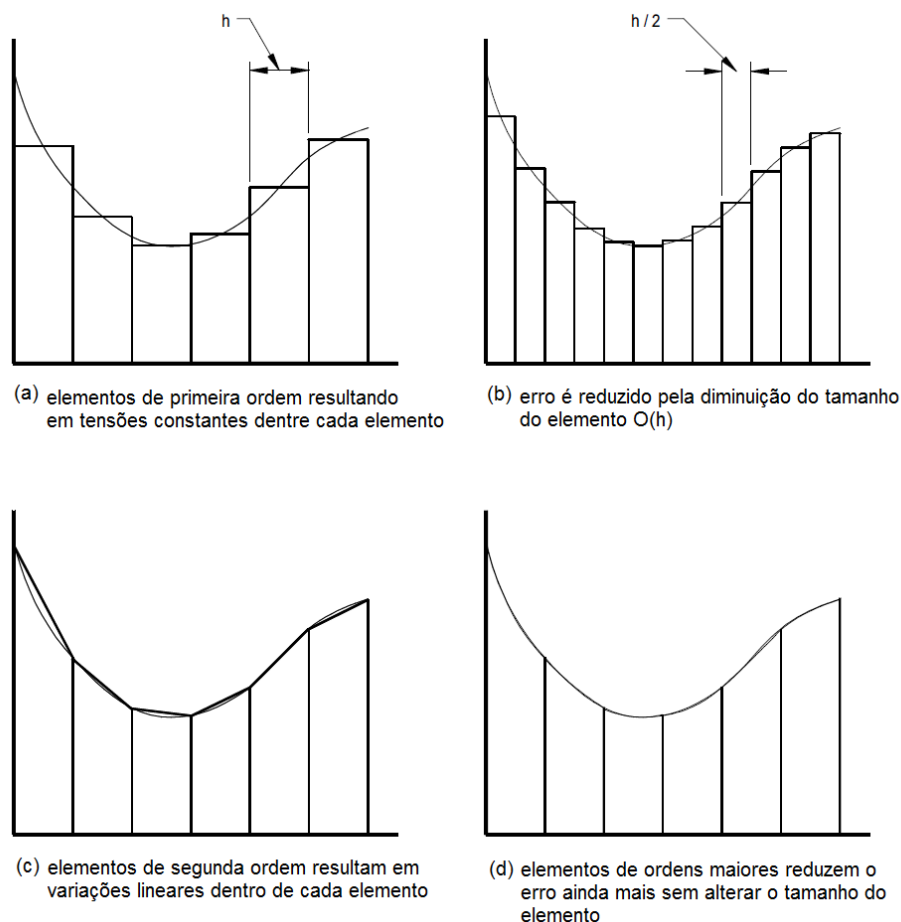


Figura A3: Aproximação da função tensão em um modelo

Essa situação é descrita nas partes (a) e (b) da Figura A3, onde uma série de passos de altura constante é utilizada para aproximar uma função suave e contínua. Quanto mais estreitos os passos, mais próxima fica a aproximação. Pode-se notar também que onde o gradiente da função é maior (como no lado esquerdo) o refinamento irá resultar em amplitudes cada vez maiores.

Além da necessidade de malhas de elementos relativamente pequenos, elementos-h são bastante sensíveis à formatos extremos, como variação brusca de seção da peça, razão de aspecto grande, obliquidades e assim por diante. Isso aumenta ainda mais a quantidade de elementos necessários para uma malha aceitável e consequentemente aumentando o custo computacional da solução.

A1.2. Convergência de elementos-p

Por outro lado, o método de elementos-p adotado pelo *Pro/mechanica*® é a seguinte: ao invés de recriar a malha constantemente e refinar a mesma diversas vezes, a convergência é obtida elevando a ordem dos polinômios de interpolação em cada elemento, e a malha permanece a mesma em cada iteração, denominada *p-loop*. A

utilização de polinômios de interpolação de maior ordem para análise de convergência conduz a classe de elementos-p de métodos de FEA, onde o 'p' denota polinomial. Esse método é ilustrado nas partes (c) e (d) da Figura A3. Apenas elementos em regiões de maior gradientes têm a ordem dos polinômios elevada.

Além disso, examinando os efeitos da elevação de grau polinomial, o programa consegue monitorar o erro esperado da solução e automaticamente elevar a ordem, apenas nos elementos onde se faz necessário. Assim, a análise de convergência é realizada automaticamente, com a resolução prosseguindo até que um limite de precisão (definido pelo usuário) é satisfeito. Com o *Pro/mechanica*®, o limite para a ordem polinomial é nove. Em teoria, é possível prosseguir com ordens maiores, mas o custo computacional sobe muito depressa. Se a solução não consegue convergir mesmo com esses polinômios de nono grau, pode ser necessário um refino de malha, tornando-a mais densa de modo que polinômios de menor ordem sejam suficientes.

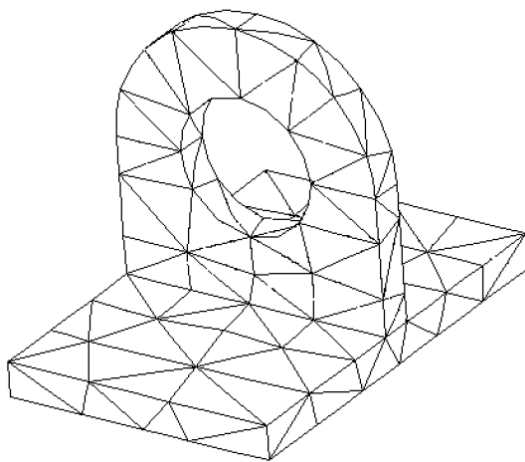


Figura A4: Malha tetraédrica sólida de elementos-h

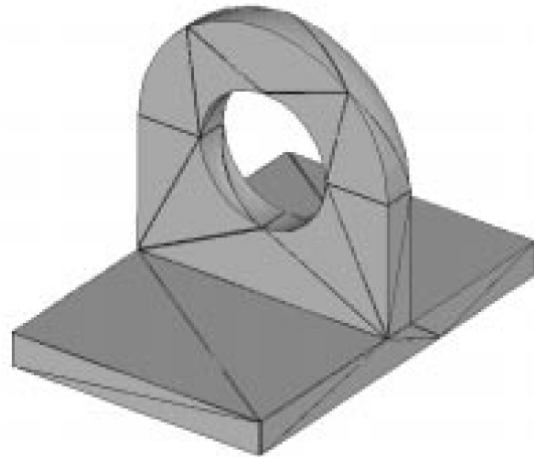


Figura A5: Malha tetraédrica de elementos-p

B1.Montagem do circuito para condicionamento analógico da saída da célula de carga

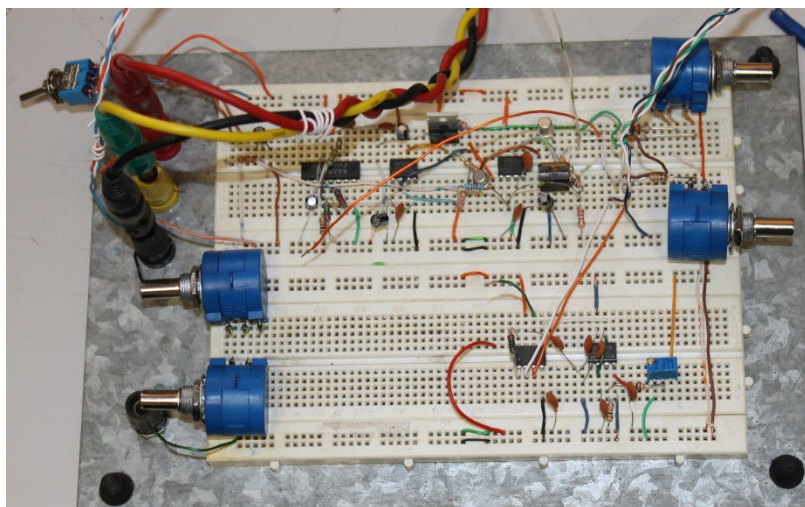


Figura B1: Circuito montado em *protoboard*

B2.Layout da PCB do circuito analógico completo

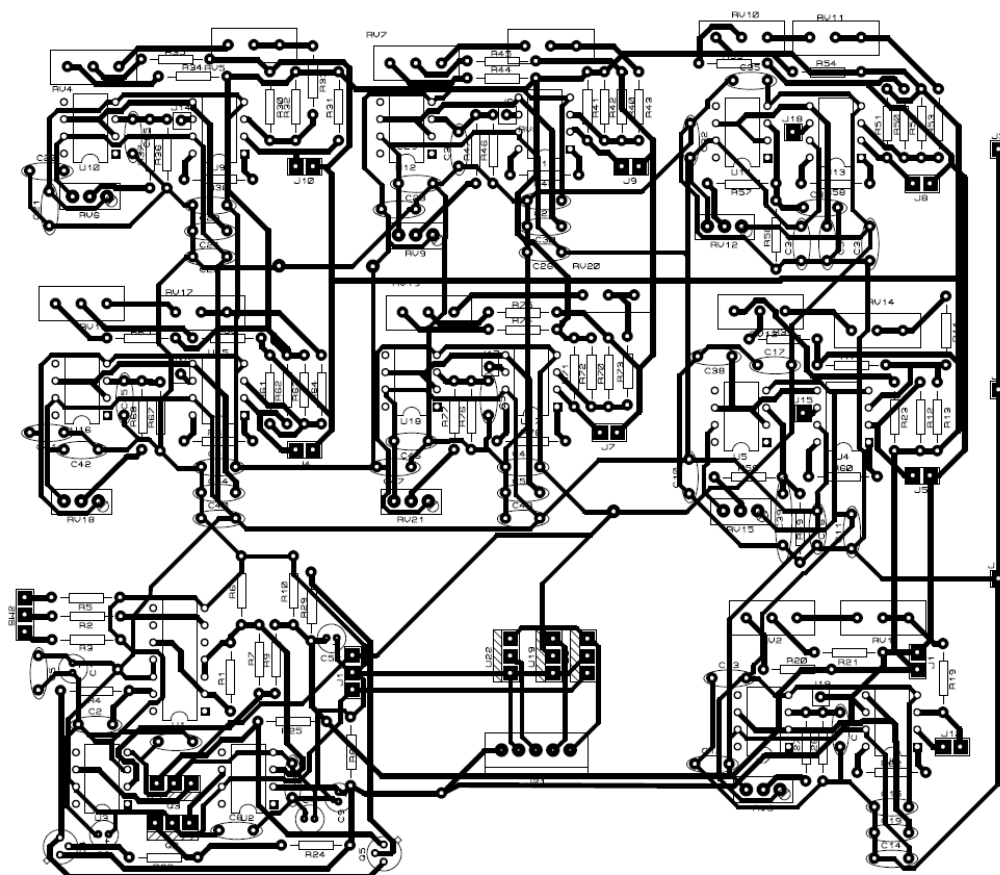


Figura B2: Layout da PCB

B3. Layout da PCB do microcontrolador

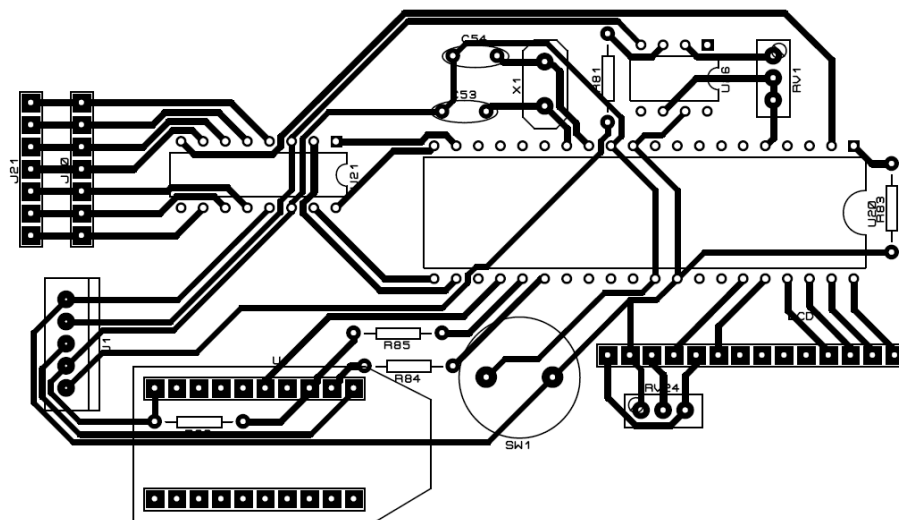


Figura B3: Layout da PCB do microcontrolador

C1.Programa em MATLAB® para pós processamento dos dados

```
ch1=[%... dados omitidos

a = 1;
b = [1/12 1/12 1/12 1/12 1/12 1/12 1/12 1/12 1/12 1/12 1/12 1/12];
%coef do filtro de media movel
n=20;
b2 = (1/n).*ones(1,n);
n=90;
b3 = (1/n).*ones(1,n);

%filtragem dos canais
ch1movav= filter(b,a,ch1);
ch2movav= filter(b3,a,ch2);
ch3movav= filter(b3,a,ch3);
ch4movav= filter(b2,a,ch4);
ch5movav= filter(b2,a,ch5);
ch6movav= filter(b3,a,ch6);
ch7movav= filter(b2,a,ch7);

%plotagem dos gráficos
plot([1:1:size(ch1,2)],ch1, '.', [1:1:size(ch1,2)],ch1movav, 'LineWidth',
2);
xlim([115,2280]);
title('Canal 1 - Adquirido e filtrado')
xlabel('Amostra')
ylabel('Força [kgf]')

figure
plot([1:1:size(ch2,2)],ch2, '.', [1:1:size(ch2,2)],ch2movav, 'LineWidth',
2);
xlim([115,2280]);
title('Canal 2 - Adquirido e filtrado')
xlabel('Amostra')
ylabel('Amplitude [V]')

figure
plot([1:1:size(ch3,2)],ch3, '.', [1:1:size(ch3,2)],ch3movav, 'LineWidth',
2);
xlim([115,2280]);
title('Canal 3 - Adquirido e filtrado')
xlabel('Amostra')
ylabel('Amplitude [V]')

figure
plot([1:1:size(ch4,2)],ch4, '.', [1:1:size(ch4,2)],ch4movav, 'LineWidth',
2);
xlim([115,2280]);
title('Canal 4 - Adquirido e filtrado')
xlabel('Amostra')
ylabel('Amplitude [V]')

figure
plot([1:1:size(ch5,2)],ch5, '.', [1:1:size(ch5,2)],ch5movav, 'LineWidth',
2);
xlim([115,2280]);
title('Canal 5 - Adquirido e filtrado')
xlabel('Amostra')
ylabel('Amplitude [V]')
```

```
figure
plot([1:1:size(ch6,2)],ch6,'.',[1:1:size(ch6,2)],ch6movav,'LineWidth',
2);
xlim([115,2150]);
title('Canal 6 - Adquirido e filtrado')
xlabel('Amostra')
ylabel('Amplitude [V]')
```

```
figure
plot([1:1:size(ch7,2)],ch7,'.',[1:1:size(ch7,2)],ch7movav,'LineWidth',
2);
xlim([115,2170]);
title('Canal 7 - Adquirido e filtrado')
xlabel('Amostra')
ylabel('Amplitude [V]')
```

%cálculo dos strains

```
vs=2;
rg=100;
ganho=1+50e3/rg;
gagefactor=2.15;
strain2=((ch2movav-1).*4)./(vs*ganho*gagefactor);
strain3=((ch3movav-1).*4)./(vs*ganho*gagefactor);
strain4=((ch4movav-1).*4)./(vs*ganho*gagefactor);
strain5=((ch5movav-1).*4)./(vs*ganho*gagefactor);
strain6=((ch6movav-1).*4)./(vs*ganho*gagefactor);
strain7=((ch7movav-1).*4)./(vs*ganho*gagefactor);
```

%plotagem dos gráficos de deformação

```
figure
[AX,H1,H2]=plotyy([1:1:size(ch1,2)],ch1movav,[1:1:size(ch2,2)],strain2
,'plot');
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Força [kgf]')
set(AX(1),'xlim',[100,2100])
set(AX(2),'xlim',[100,2100])
set(AX(1),'ylim',[0,200])
set(AX(2),'ylim',[-.02e-3,.05e-3])
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','{\itStrain} [mm/mm]')
set(AX(1),'YTickMode','auto')
set(AX(2),'YTickMode','auto')
title('Canal 2 - curvas de {\itStrain} e força aplicada')
xlabel('Amostra')
```

```
figure
[AX,H1,H2]=plotyy([1:1:size(ch1,2)],ch1movav,[1:1:size(ch3,2)],strain3
);
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Força [kgf]')
set(AX(1),'xlim',[100,2100])
set(AX(2),'xlim',[100,2100])
set(AX(1),'ylim',[0,200])
set(AX(2),'ylim',[-.05e-3,.11e-3])
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','{\itStrain} [mm/mm]')
set(AX(1),'YTickMode','auto')
set(AX(2),'YTickMode','auto')
title('Canal 3 - curvas de {\itStrain} e força aplicada')
xlabel('Amostra')
```

figure

```

[AX,H1,H2]=plotyy([1:1:size(ch1,2)],ch1movav,[1:1:size(ch4,2)],strain4
);
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Força [kgf]')
set(AX(1),'xlim',[100,2100])
set(AX(2),'xlim',[100,2100])
set(AX(1),'ylim',[0,200])
set(AX(2),'ylim',[-.1e-3,.5e-3])
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','{\itStrain} [mm/mm]')
set(AX(1),'YTickMode','auto')
set(AX(2),'YTickMode','auto')
title('Canal 4 - curvas de {\itStrain} e força aplicada')
xlabel('Amostra')

```

```

figure
[AX,H1,H2]= plo-
tyy([1:1:size(ch1,2)],ch1movav,[1:1:size(ch5,2)],strain5);
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Força [kgf]')
set(AX(1),'xlim',[100,2100])
set(AX(2),'xlim',[100,2100])
set(AX(1),'ylim',[0,200])
set(AX(2),'ylim',[-.1e-3,.22e-3])
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','{\itStrain} [mm/mm]')
set(AX(1),'YTickMode','auto')
set(AX(2),'YTickMode','auto')
title('Canal 5 - curvas de {\itStrain} e força aplicada')
xlabel('Amostra')

```

```

figure
[AX,H1,H2]= plo-
tyy([1:1:size(ch1,2)],ch1movav,[1:1:size(ch6,2)],strain6);
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Força [kgf]')
set(AX(1),'xlim',[100,2100])
set(AX(2),'xlim',[100,2100])
set(AX(1),'ylim',[0,200])
set(AX(2),'ylim',[-1.836e-3,-1.827e-3])
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','{\itStrain} [mm/mm]')
set(AX(1),'YTickMode','auto')
set(AX(2),'YTickMode','auto')
title('Canal 6 - curvas de {\itStrain} e força aplicada')
xlabel('Amostra')

```

```

figure
[AX,H1,H2]= plo-
tyy([1:1:size(ch1,2)],ch1movav,[1:1:size(ch7,2)],strain7);
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','Força [kgf]')
set(AX(1),'xlim',[100,2100])
set(AX(2),'xlim',[100,2100])
set(AX(1),'ylim',[0,200])
set(AX(2),'ylim',[-.85e-3,-.2e-3])
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','{\itStrain} [mm/mm]')
set(AX(1),'YTickMode','auto')
set(AX(2),'YTickMode','auto')
title('Canal 7 - curvas de {\itStrain} e força aplicada')
xlabel('Amostra')

```


D1.Programa do PIC

// LCD module connections

sbit LCD_RS at RB2_bit;

sbit LCD_EN at RB3_bit;

sbit LCD_D4 at RB4_bit;

sbit LCD_D5 at RB5_bit;

sbit LCD_D6 at RB6_bit;

sbit LCD_D7 at RB7_bit;

sbit LCD_RS_Direction at TRISB2_bit;

sbit LCD_EN_Direction at TRISB3_bit;

sbit LCD_D4_Direction at TRISB4_bit;

sbit LCD_D5_Direction at TRISB5_bit;

sbit LCD_D6_Direction at TRISB6_bit;

sbit LCD_D7_Direction at TRISB7_bit;

// End LCD module connections

#define vref 2

#define rts portc.f5

#define a1 1003

#define a2 3.5166

// Declaração das variaveis

int adc,peso;

float adc1;

char carac[3];

int var1,var2,var3,var,msb;

int canal;

```
// Fim da declaracao das variaveis  
  
//Funcao de selecao do multiplexador:
```

```
void mux(int canal){  
    switch(canal){  
        case 1:  
            portd.f3 = 1;  
            portd.f0 = 0;  
            portd.f1 = 0;  
            portd.f2 = 0;  
            break;  
        case 2:  
            portd.f3 = 1;  
            portd.f0 = 1;  
            portd.f1 = 0;  
            portd.f2 = 0;  
            break;  
        case 3:  
            portd.f3 = 1;  
            portd.f0 = 0;  
            portd.f1 = 1;  
            portd.f2 = 0;  
            break;  
        case 4:  
            portd.f3 = 1;
```

```
    portd.f0 = 1;

    portd.f1 = 1;

    portd.f2 = 0;

break;

case 5:

    portd.f3 = 1;

    portd.f0 = 0;

    portd.f1 = 0;

    portd.f2 = 1;

break;

case 6:

    portd.f3 = 1;

    portd.f0 = 1;

    portd.f1 = 0;

    portd.f2 = 1;

break;

case 7:

    portd.f3 = 1;

    portd.f0 = 0;

    portd.f1 = 1;

    portd.f2 = 1;

break;

default:

break;
```

```

        }

    }

// Funcao para transmissao serial

void transmit(){

    uart1_write(canal+0x30); //permite a demultiplexacao pelo LabVIEW®

    uart1_write(var);

    uart1_write(',');

    uart1_write(var1);

    uart1_write(var2);

    uart1_write(var3);

    uart1_write(0xA);

}

```

//quebra o valor convertido em caracteres ASCII

```

void condiciona(float adc1){

    adc = adc1/1023 * 1000 * vref;

    var = adc/1000;

    adc = adc - 1000*var;

    var1 = adc/100;

    adc = adc - 100*var1;

    var2 = adc/10;

    var3 = adc%10;

    var = var + 0x30;

    var1 = var1 + 0x30;

    var2 = var2 + 0x30;

```



```

    var3 = var3 + 0x30;

}

//Funcao principal
void main() {

    // Configuracoes PIC

    delay_ms(10);

    TRISA = 0xFF;

    TRISB = 0x00;

    TRISC = 0b10011111;

    TRISD = 0xF0;

    adcon1.pcfg3 = 1;    // Vref = portA3

    adcon1.pcfg2 = 0;

    adcon1.pcfg1 = 1;

    adcon1.pcfg0 = 0;

    // Fim das configuracoes PIC


    // Inicializacao do LCD

    lcd_init();

    lcd_cmd(_lcd_clear);

    lcd_cmd(_lcd_cursor_off);


    // Config do zigbee

    uart1_init(9600);

```

```

portc.f5 = 1; //reset do zigbee

lcd_out(1,1,"Celula de carga");

lcd_out(2,7,"kgf");

// Fim das inicializacoes

// LOOP PRINCIPAL

while(1){

    canal=1;    //celula de carga, a unica a ser exibida no LCD

    mux(canal);

    adc1 = adc_read(0);

    adc = adc1/1023 * 1000 * vref;

    peso=10*(adc-a1)/a2;

    var = peso/1000;

    peso = peso - 1000*var;

    var1 = peso/100;

    peso = peso - 100*var1;

    var2 = peso/10;

    var3 = peso%10;

    //converte para ASCII

    var = var + 0x30;

    var1 = var1 + 0x30;

    var2 = var2 + 0x30;

    var3 = var3 + 0x30;

    //exibe no LCD

    lcd_chr(2,1,var);

```

```

    lcd_chr(2,2,var1);

    lcd_chr(2,3,var2);

    lcd_out(2,4,"");

    lcd_chr(2,5,var3);


    transmit();    //chama rotina de transmissao

//demais canais

    canal=2;

    mux(canal);

    adc1 = adc_read(0);

    condiciona(adc1);

    transmit();


    canal=3;

    mux(canal);

    adc1 = adc_read(0);

    condiciona(adc1);

    transmit();


    canal=4;

    mux(canal);

    adc1 = adc_read(0);

    condiciona(adc1);

    transmit();

```

```
    canal=5;

    mux(canal);

    adc1 = adc_read(0);

    condiciona(adc1);

    transmit();


    canal=6;

    mux(canal);

    adc1 = adc_read(0);

    condiciona(adc1);

    transmit();


    canal=7;

    mux(canal);

    adc1 = adc_read(0);

    condiciona(adc1);

    transmit();

}

}
```

