

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAETANO DECIAN LAZZARI

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE
UMA PLATAFORMA BIOMECÂNICA 2D
APLICADA AO CICLISMO**

Porto Alegre
2010

CAETANO DECIAN LAZZARI

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE
UMA PLATAFORMA BIOMECÂNICA 2D
APLICADA AO CICLISMO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Porto Alegre
2010

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

CAETANO DECIAN LAZZARI

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE UMA PLATAFORMA
BIOMECÂNICA APLICADA AO CICLISMO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Brasil

Prof. Dr. Milton Antonio Zaro, UFRGS

Pós-Doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina – Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2010

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à memória de meus avós Filomena Firigolo Lazzari, Antônio Lazzari, Graciosa Lago Decian e Izidoro Luiz Decian.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ines e Luiz Antônio; ao meu irmão, Alexandre, à minha namorada, Patricia, pelo imenso apoio durante o curso.

Agradeço também aos colegas e amigos, Felipe, Giovani, Henrique, Jean e Rodolfo por tornarem os desafios do curso mais simples e alegres.

Por fim, agradeço aos colegas do IEE, e especialmente ao Prof. Alexandre Balbinot, pelo empenho despendido a este trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de medir as forças atuantes em ambos pedais de uma bicicleta de estrada. A estrutura é baseada em plataformas de força que utilizam como base uma pedivela de alumínio, permitindo compatibilidade com qualquer pedal convencional. Foram criados no ambiente de desenvolvimento SolisWorks2010TM modelos sólidos em três dimensões para que as características estáticas e dinâmicas pudessem ser exploradas, através da técnica de elementos finitos. Cada braço da pedivela foi instrumentada com duas pontes de Wheatstone utilizando tecnologia extensométrica. Os sinais foram condicionados em uma placa de circuito impresso fixada diretamente à estrutura e os dados foram transmitidos sem fio através dos canais de comunicação disponíveis através da tecnologia BluetoothTM. Como resultado, as células de carga apresentam boa linearidade, tendo seu erro máximo de não linearidade, definido como valor percentual da faixa de interesse, entre 2,1 e 2,8%. Os demais elementos constituintes do sistema também se mostraram totalmente operacionais, permitindo ao sistema efetuar, inclusive, medições de força diretamente em pista.

Palavras-chave: Instrumentação Biomédica, Células de Carga Extensométricas, Ciclismo.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop a system for measuring both right and left pedal forces during cycling. This method is based on a force platform mounted on a regular aluminium crankset allowing it to be installed on any pedal model. The 3D solid models of the crankset were established in the SolisWorks2010™ design suite, where the static and dynamic characteristics of the structure were explored through the finite element method. Each crankset arm was instrumented with two Wheatstone bridges of foil strain gages. Strain gage signals were conditioned on a printed circuit board attached to the crankset and data was transmitted over Bluetooth™ technology wireless data channels. The load cells have good linearity. The nonlinearity, reported as a percentage of full range, was quantified at 2,1 % and 2,8 %. Also, all the other features are fully operational. As a result, the system allows on-track pedal load measurements.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 CONTEXTO TEÓRICO	15
2.1 Estudo da força aplicada ao pedal	17
2.2 Potência mecânica	20
2.3 Dinamometria e extensometria	23
2.4 Alternativas de construção para células de carga	26
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	29
3.1 Análise das alternativas de construção	29
3.2 Projeto da célula de carga	31
3.3 Procedimentos para a modelagem	34
3.4 Análise estrutural	38
3.5 Cadeia de medida proposta	41
3.6 Extensometria, condicionamento e calibração	41
3.7 Sistema de aquisição de dados	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 Condições gerais das simulações realizadas	50
4.2 Resultados da análise estrutural	52
4.3 Validação experimental da célula de carga	55
4.4 Teste e funcionamento do sistema	58
5 CONCLUSÕES	64
6 TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS	67
ANEXO A PERFIS DO MODELO	69
ANEXO B ENSAIOS ESTÁTICOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO	77
ANEXO C ENSAIOS DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO	84

ANEXO D	PROJETO DE EXPERIMENTOS - ANOVA	90
ANEXO E	ROTINA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	92
ANEXO F	GUIA PARA EFETUAR ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMI- COS NO SOLIDWORKS 2010	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Variáveis de interesse.	16
Figura 2.2:	Plano de ação de forças.	17
Figura 2.3:	Orientação da força na fase de recuperação.	18
Figura 2.4:	Hierarquia entre energias.	20
Figura 2.5:	Teste de VO_2 , ensaio cinemático e ensaio cinético.	22
Figura 2.6:	Modelo cinemático.	22
Figura 2.7:	Curva tensão X deformação.	24
Figura 2.8:	Extensômetro do tipo folha.	25
Figura 2.9:	Viga sob carga.	25
Figura 2.10:	Diagrama de ligação para ponte de Wheatstone:	26
Figura 2.11:	Pedal instrumentado.	27
Figura 2.12:	SRM Training System.	28
Figura 3.1:	Decomposição de forças para diferentes estruturas de célula de carga.	30
Figura 3.2:	Diagrama de blocos do sistema experimental.	31
Figura 3.3:	Pedivela Dahon 170mm em liga de alumínio AL6061.	33
Figura 3.4:	Modelagem por Loft.	35
Figura 3.5:	Modelagem por Loft com linhas guias.	36
Figura 3.6:	Exemplos de perfis.	36
Figura 3.7:	Modelagem por Loft: unindo perfis longitudinais.	37
Figura 3.8:	Modelagem por Loft: unindo superfícies tridimensionais.	37
Figura 3.9:	Modelo sólido finalizado.	38
Figura 3.10:	Ensaio dinâmico com acelerômetro: pedivela engastado com acelerômetro triaxial Delta Tron 4520.	40
Figura 3.11:	Sistema de condicionamento NI SCXI 1530 e de aquisição NI SCXI 1600.	40
Figura 3.12:	Cadeia de medida proposta.	41
Figura 3.13:	Extensômetro cimentado à estrutura.	42
Figura 3.14:	Circuito condicionador, canal 1 de 4.	44
Figura 3.15:	Circuito condicionador de sinais fixado à pedivela esquerda.	45
Figura 3.16:	Pesos padrão utilizados na calibração estática.	45
Figura 3.17:	Procedimento para ensaio de calibração.	46
Figura 3.18:	Módulo Bluetooth: BlueSMiRF Gold WRL-00582.	47
Figura 3.19:	Fluxograma para aquisição de dados.	48
Figura 3.20:	Esquema elétrico do sistema de aquisição.	49
Figura 4.1:	Malha sólida utilizada nas simulações estáticas e dinâmicas.	51
Figura 4.2:	Esforço normal ao eixo longitudinal: deformação e tensão.	53
Figura 4.3:	Resultados para o teste de impacto: domínio tempo e frequência.	55

Figura 4.4:	Curva de calibração estática para célula de carga esquerda.	57
Figura 4.5:	Curva de calibração estática para célula de carga direita.	57
Figura 4.6:	Pedivela instrumentada, lado direito.	59
Figura 4.7:	Eixo com cabo transmissor.	60
Figura 4.8:	Eixo com cabo transmissor acoplado ao movimento central.	60
Figura 4.9:	Sistema instalado em uma bicicleta de estrada.	61
Figura 4.10:	Sistema em uso.	61
Figura 4.11:	Ensaio biomecânico: análise das componentes de força.	62
Figura 4.12:	Ensaio biomecânico: análise da potência instantânea.	63
Figura 6.2:	Sistema proposto.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1:	Comparação entre sistemas.	32
Tabela 4.1:	Características da malha.	51
Tabela 4.2:	Propriedades do material.	52
Tabela 4.3:	Modos de frequência: ensaio simulado.	54
Tabela 4.4:	Modos de frequência: principais componentes espectrais do ensaio realizado com o acelerômetro.	54
Tabela 4.5:	Calibração estática.	56
Tabela 4.6:	Resultados do Projeto de Experimentos.	56

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ECG	Eletrocardiografia
EMG	Eletromiografia
GDL	Graus de Liberdade
IEE	Laboratório de Instrumentação Eletro-Eletrônica
RF	Radio Frequência
SPP	<i>Serial Port Profile</i>
USART	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>
VO_2	Taxa de Consumo de Oxigênio

1 INTRODUÇÃO

Em contribuição para o estudo da biomecânica, o presente trabalho apresenta o projeto, desenvolvimento, construção e validação de uma célula de carga para estudo de fenômenos dinamométricos relacionados com a coordenação das forças atuantes sobre o pedal. O sistema desenvolvido é baseado em um pedivela forjado em liga de alumínio, permitindo compatibilidade com pedais e/ou eixos de movimento central convencionais para uma bicicleta de estrada.

O ciclismo é uma das modalidades onde a biomecânica encontra vasta aplicação pois as características que influenciam no desempenho dos atletas são extremamente técnicas e grande parte das variáveis envolvidas são mensuráveis. Entre as principais variáveis de estudo estão a cadência, a orientação da força aplicada e a posição ergonômica do guidão, selim e pedais. Os ensaios biomecânicos também são facilitados pela posição semi-estática do atleta nas bicicletas ergométricas ou equipadas com rolo, permitindo condições de ensaio reproduzíveis. O estudo da descrição do movimento, assim como a medição de força, são facilitados pela posição do quadril, que pode ser considerada estática em algumas condições.

No ambiente descrito, o estudo da potência mecânica gerada, assim como o estudo da força aplicada em cada nó têm vital importância. A partir da caracterização de força,

obtém-se parâmetros que podem ser utilizados em ensaios biomecânicos com fins diversos, como por exemplo, avaliação de simetria entre forças, influência postural, efeitos da cadência, avaliação de novos componentes, relações entre fatores fisiológicos (SMAK *et al.*, 1999; HULL *et al.*, 1990; BERTUCCI *et al.*, 2005; KONINCKX *et al.*, 2008; DIEFENTHAELER *et al.*, 2008).

Apesar da indústria já disponibilizar equipamentos capazes de medir a potência resultante produzida pelo atleta, os equipamentos comerciais disponíveis não atendem plenamente as necessidades identificadas pelos profissionais da área (BOYD *et al.*, 1996; ALVAREZ *et al.*, 1996). Justificado por esta carência de equipamentos dinamométricos, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma célula de carga para estudo de fenômenos dinamométricos relacionados com a coordenação da pedalada para uma bicicleta de estrada.

Para isso será necessário dimensionar corretamente a estrutura mecânica e, para realizá-la, pretende-se efetuar estudos simulados acerca de seu comportamento estático e dinâmico. Validando estes estudos, serão efetuados novos testes com a estrutura mecânica escolhida para que os resultados possam ser comparados. Adicionalmente, será necessário a construção de um circuito específico para condicionamento de sinais elétricos, permitindo a interface a um sistema de aquisição de dados comercial sem fio.

2 CONTEXTO TEÓRICO

O desempenho do movimento humano pode ser melhorado de muitas maneiras, visto que a eficácia do movimento envolve fatores anatômicos, capacidades fisiológicas, psicológicas e habilidades cognitivas. A biomecânica, ciência que estuda a descrição do movimento e suas causas nas criaturas vivas, costuma ser a área que apresenta o maior número de recursos para estudo e avaliação do desempenho em atividades onde a técnica prevalece sobre a estrutura física ou capacidade fisiológica, tal como no ciclismo (KNUDSON, 2007).

O grupo dos principais equipamentos de laboratório utilizados para avaliar o desempenho do ciclista é constituído por aparatos dinamométricos, capazes de fornecer as *componentes de força aplicada* e equipamentos videográficos que, com uma câmera de alta definição e marcadores reflexivos, são capazes de descrever a *trajetória* dos segmentos dos membros inferiores.

Em auxílio aos estudos biomecânicos, variáveis fisiológicas também fornecem parâmetros interessantes. Por exemplo, *sinais mioelétricos*, capturados no ensaio de (EMG), podem ser úteis no estudo da coordenação motora, como no estudo realizado por NEPTUNE *et al.* (2000), que relaciona sinais eletromiográficos ao momento instantâneo de força aplicado. O índice ($\dot{V}O_2$) do indivíduo, mensurado pelo espirógrafo, assim como a

atividade muscular elétrica do coração, mensurada no ensaios de (ECG), por exemplo, a quantidade de energia total aeróbica produzida pelo atleta e o regime cardiovascular em que se encontra o atleta, respectivamente.

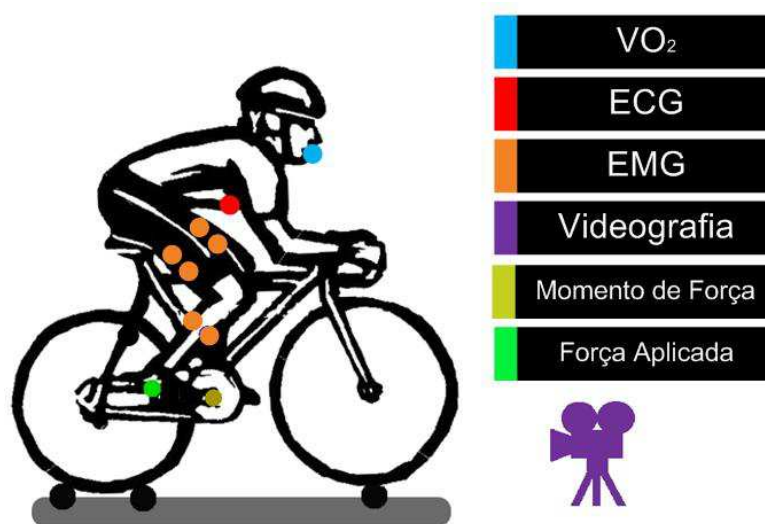


Figura 2.1: Variáveis de interesse.

Considerando-se os aparatos citados apenas equipamentos capazes de medir a força aplicada não encontram uma versão comercial disponível, cabendo aos laboratórios de pesquisa seu projeto e desenvolvimento. A seguir serão apresentados conceitos relevantes as células de carga aplicadas ao ciclismo, iniciando pelo estudo da importância da força aplicada ao pedal e potência mecânica (seções 2.1 e 2.2), em seguida são apresentados os princípios básicos que regem a dinamometria (seção 2.3) e finalmente, convergindo entre os temas tratados, são detalhadas as alternativas construtivas para células de carga (seção 2.4).

2.1 Estudo da força aplicada ao pedal

O estudo da força aplicada ao pedal desperta curiosidade desde o começo do século XX, quando os primeiros aparatos dotados de molas surgiram. No entanto, somente a partir dos estudos de HULL *et al.* (1981), quando este propôs uma célula de carga capaz de medir as componentes de força em três dimensões é que este tipo de estudo biomecânico popularizou-se, permitindo a elaboração de modelos cinéticos mais avançados. Neste mesmo estudo, é proposto um modelo a fim de avaliar a aplicação de forças em um plano sagital, representado pela Figura 2.2. Sendo:

- F a força aplicada;
- F_T a componente de força que atua perpendicularmente à pedivela, sendo a componente efetiva da força, capaz de produzir momento sobre o eixo do movimento central;
- $F_{//}$ é a componente de força que atua paralelamente à pedivela, esta componente de força não é efetiva.

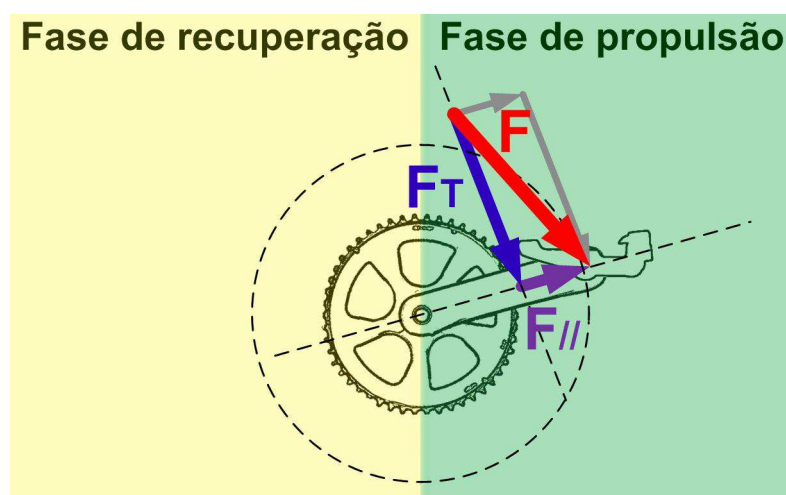


Figura 2.2: Plano de ação de forças.

Sendo o índice de efetividade r descrito pela razão adimensional:

$$r = F_T/F$$

Este índice, avaliado *ao longo do ciclo* de giro da pedivela, pode assumir valores entre -1 (caso menos eficaz, força F_T com módulo igual à F , porém em sentido contrário ao movimento) e 1 (caso mais eficaz, força F_T com módulo igual à F no mesmo sentido do movimento). Sendo que a literatura comprova que o índice de efetividade obtido ao longo da fase de propulsão está relacionado diretamente ao desempenho dos atletas, diferenciando os atletas de elite dos demais (CANDOTTI, 2003; ERICSON *et al.*, 1988; GREGOR, 2000).

Já na fase de recuperação, a literatura reporta resultados divergentes sobre a importância de “puxar” ou não o pedal. Os estudos de GREGOR (2000) apontam que o mais importante para um desempenho eficaz na fase de recuperação é minimizar o efeito das forças inefetivas, tal como ilustrado pela Figura 2.3(a). Já os estudos de CANDOTTI (2003) indicam que ciclistas apresentam melhor técnica de pedalada do que triatletas, atribuindo-se ao fato diferenças no comportamento do músculo tibial anterior, verificando a importância de se “puxar” o pedal, tal como exemplificado pela Figura 2.3(b).

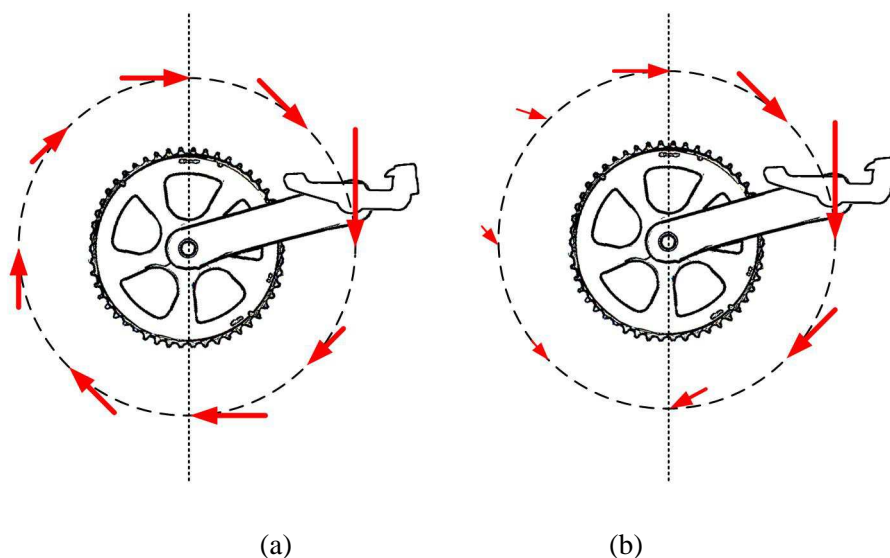


Figura 2.3: Orientação da força na fase de recuperação.

Além do estudo sobre a orientação de forças ao longo do ciclo em si, este tipo de análise também é decisivo para a determinação e estudo da diferença entre a força produzida pelo membro esquerdo e direito.

A assimetria bilateral entre as forças atuantes têm significância comprovada estatisticamente, sendo que diversos estudos sobre dominância entre membros já foram relatados. A literatura relata assimetria típica entre forças de 5 à 20 %, podendo chegar a 40% em alguns casos (CARPES *et al.*, 2008; MORNIEUX *et al.*, 2007; SANDERSON *et al.*, 2000; SMAK *et al.*, 1999).

A identificação da perna dominante pode auxiliar na prevenção de lesões e elaboração de programas individuais de treinamento. O estudo da orientação de forças individuais mostra-se importante também para que possam ser investigados os efeitos da coordenação motora. Em particular, o sobreuso de um membro pode ser uma causa comum de lesão no joelho devido a conseqüente sobrecarga no mesmo, afetando esportistas amadores e profissionais.

Recentes dispositivos comerciais capazes de medir o momento instantâneo, tais como a pedivela instrumentado SRM, cujas características estão descritas na Seção 2.4, permitem que estudos fossem realizados em campo e a existência da assimetria comprovada. Porém este procedimento de pesquisa encontra limitações, uma vez que são as forças individuais atuantes no pedal que ditam a carga de esforço intersegmental nas articulações, e não seu simples resultado combinado. A simples medida do momento resultante, portanto, não é suficiente para o estudo da coordenação motora e desenvolvimento de novos modelos matemáticos (SMAK *et al.*, 1999).

Particularmente sobre o ciclismo de escalada, segundo BERTUCCI *et al.* (2005), a carência de pesquisa na área se deve a dificuldade em obter-se dados coletados em campo

sob condições de corrida. Praticamente a totalidade dos estudos sobre orientação de forças são conduzidos em bicicletas estáticas inclinadas.

Ainda segundo DIEFENTHAELER *et al.* (2008), a queda do fator motivacional que ocorre em longos protocolos de ensaio realizados em bicicletas estacionárias pode vir a influenciar o resultado. Os casos citados comprovam a importância do estudo da força aplicada e motivam o desenvolvimento de novos sistemas para medir as componentes *individuais* da força capazes de realizar estudos em *campo*.

2.2 Potência mecânica

A potência média é definida como a quantidade de energia produzida pelo atleta em um determinado tempo. De acordo com NEPTUNE *et al.* (1998), muitas técnicas experimentais tem sido desenvolvidas para quantificar a energia despendida no movimento, podendo ser medida de diferentes maneiras e levando a diferentes resultados. A Figura 2.4 ilustra a hierarquia presente entre a energia metabólica produzida, a energia despendida pelos músculos e a energia mecânica disponível.

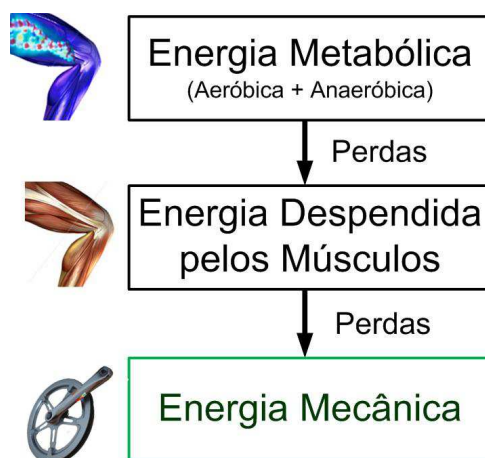


Figura 2.4: Hierarquia entre energias.

Por exemplo, pode-se medir a energia metabólica produzida pelo atleta, supondo-se

que esta esteja correlacionada com a taxa de consumo de oxigênio (VO_2). Apesar desta taxa estar correlacionada com a energia necessária para realizar movimento, existem sérias restrições que dificultam a validade desta medida. Por exemplo, este tipo de ensaio só é válido quando o metabolismo do indivíduo encontra-se abaixo do limiar anaeróbio, situação na qual a fonte principal de energia é aeróbica. Adicionalmente, a taxa de oxigênio é uma medida energética global, dificultando que diferentes componentes do sistema sejam isoladas, tais como a energia provida individualmente pelos músculos.

Mas também é possível relacionar o trabalho realizado através de técnicas da mecânica clássica, onde diversos métodos podem ser empregados, tais como o modelo cinemático, modelo da carga externa e modelo cinético.

O modelo cinemático obtém a potência gerada a partir da descrição do movimento realizado. Tal movimento geralmente é capturado através de câmeras com auxílio de marcadores reflexivos, tais como observa-se na Figura 2.5. É gerado então um modelo cinemático do corpo humano, como o ilustrado pela Figura 2.6, para o qual são estimadas as distâncias entre segmentos e centros de massa dos músculos. Então, a partir da variação da energia potencial e cinética dos elementos constituintes do sistema é estimada a potência mecânica produzida por cada um dos músculos envolvidos aplicando-se as leis de Newton pertinentes (HULL *et al.*, 1989).

O modelo da carga externa consiste em obter-se a energia mecânica através da comparação entre o esforço realizado para movimentar uma carga externa conhecida. Cita-se o exemplo de uma bicicleta ergométrica baseada em rolo de fricção, cuja potência necessária para movimentá-lo a uma dada velocidade é definida (MORIN *et al.*, 2004).

Já o modelo cinético, baseado na dinâmica reversa, estima o trabalho realizado a partir dos momentos e forças obtidos pelo sistema. Para isso, faz-se uso de equipamentos



Figura 2.5: Teste de VO_2 , ensaio cinemático e ensaio cinético.
Fonte: (CARPES *et al.*, 2008)

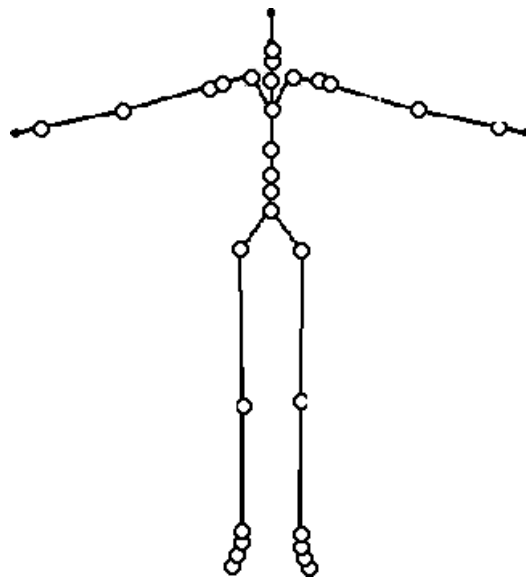


Figura 2.6: Modelo cinemático.
Fonte: (BAKER, 2010)

dinamométricos, como pedais ou pedivelas instrumentados.

A potência mecânica produzida pelo atleta, que pode ser obtida a partir dos dois últimos modelos descritos, é um dos parâmetros base na maioria dos ensaios ergométricos realizados. No campo de estudo do ciclismo, a importância da potência média como parâmetro de desempenho é comprovada por SMITH *et al.* (2001), possibilitando a investigação dos efeitos provenientes dos diversos tratamentos na análise do desempenho do atleta.

2.3 Dinamometria e extensometria

A dinamometria designa-se como todo tipo de processo cujo objetivo é a medição de forças, assim como a medição da distribuição de pressões. O grupo dos sensores costumadamente utilizados para medida de força incluem transdutores de força piezoelétricos, transdutores de força capacitivos e extensômetros de resistência elétrica.

Segundo BALBINOT & BRUSAMARELLO (2007), no qual esta seção está baseada, seu estudo tem início no século XVII com Galileu, continuados por Isaac Newton e Robert Hook que, em 1678, estabeleceu a relação existente entre tensões e deformações de corpos submetidos a esforços mecânicos. Quando uma força é aplicada longitudinalmente em uma mola, ocorre uma deflexão descrita pela lei de Hooke. :

$$F = kx$$

sendo, F [N] a força, x [m] a deflexão mecânica e k [M/m] a constante de rigidez da mola.

Normalizando:

$$\sigma = E\epsilon$$

sendo σ [N/m²] a tensão mecânica, E o módulo de Young e ϵ a deformação relativa, definida por:

$$\epsilon = \int_1^0 \frac{dl}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0}$$

Esta relações são válidas para pequenos deslocamentos, para o domínio elástico do material. A Figura 2.7 ilustra a deformação típica para materiais dúcteis, onde observa-se a linearidade para o domínio elástico.

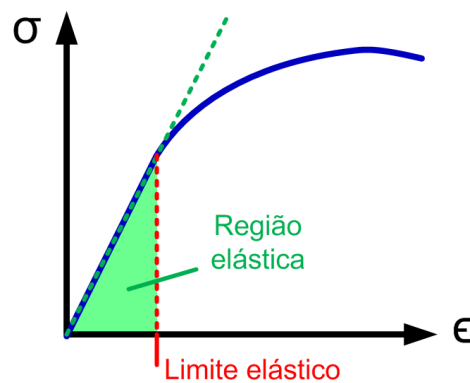


Figura 2.7: Curva tensão X deformação.

A extensometria utiliza a relação entre tensão e deformação descrita para medição de forças. Seu princípio de funcionamento baseia-se nas descobertas de Kelvin, quando este, em 1856, verificou que fios de cobre e ferro sofriam alterações na resistência elétrica quando submetidos a deformações.

Esta relação se dá por meio de uma constante K , definida como “fator *gage*”. O fator *gage* caracteriza a sensibilidade do sensor, considerando como entrada a variação no comprimento e seu sinal de saída a variação em sua resistência elétrica.

$$K = \frac{\Delta R/R_0}{\epsilon}$$

A Figura 2.8 ilustra um extensômetro do tipo folha. Este tipo de extensômetro pode ser encontrado numa ampla gama de geometrias e de comprimentos, variando desde 0,2mm

até mais de 100mm.

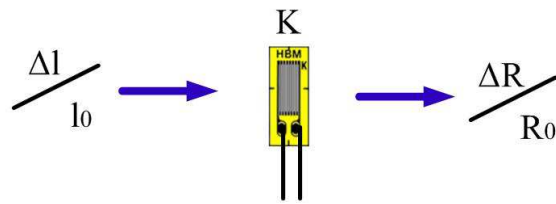


Figura 2.8: Extensômetro do tipo folha.

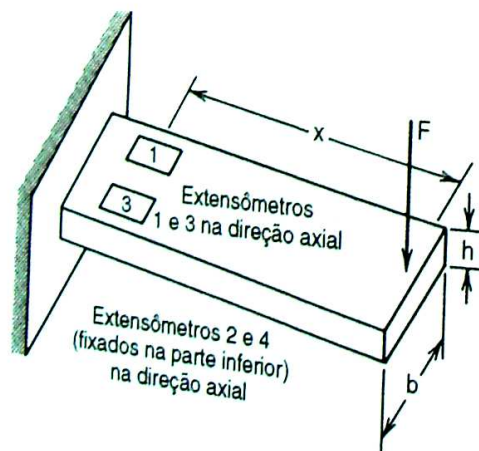


Figura 2.9: Viga sob carga.

Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007)

A Figura 2.9 ilustra a disposição para uma viga engastada com extensômetros colados em faces opostas. Para esta configuração, têm-se que a deformação local, no ponto de aplicação do extensômetro, é:

$$\epsilon = \frac{6l}{bh^2E} F.$$

resultando em uma variação na resistência, para ambos extensômetros, de

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{K}{bh^2E} 6l F$$

A Figura 2.10 propõe um esquema elétrico capaz de realizar o primeiro estágio de condicionamento dos sinais, para diferentes configurações. Uma variação na resistência

dos extensômetros causaria um desequilíbrio na ponte, resultando em um sinal de saída V_{OUT} proporcional à esta variação.

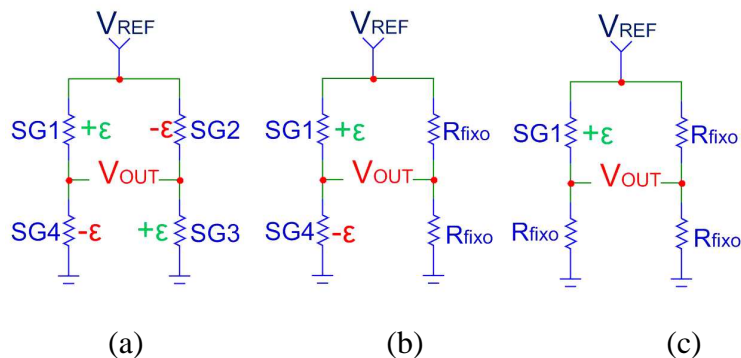


Figura 2.10: Diagrama de ligação para ponte de Wheatstone:
 (a) ponte completa (b) meia ponte (c) 1/4 de ponte

2.4 Alternativas de construção para células de carga

A literatura têm proposto diversas alternativas para o estudo das componentes individuais de força. A abordagem clássica para o desenvolvimento de uma célula de carga para este tipo de aplicação consiste na utilização de pedais instrumentados com tecnologia extensométrica (ALVAREZ *et al.*, 1996; BOYD *et al.*, 1996; HULL *et al.*, 1981). No entanto é possível, além da utilização de outros elementos sensores, implementar a célula de carga na pedivela ou braços de sua coroa.

A Figura 2.11 ilustra um típico pedal instrumentado compatível com tacos convencionais Look e conexão com cabos. Um dos principais desafios para o desenvolvimento de um pedal instrumentado envolve as características dinâmicas da estrutura. A célula de carga, assim como o *encoder* e circuitos associados demandam espaço, tornando um desafio a construção de um pedal com geometria típica.

Fato que não pode ser negligenciado na medida que estudos comprovam que a geometria do pedal está diretamente ligada ao desempenho, prejudicando nos casos onde esta

não é respeitada, a validade experimental da medida (KONINCKX *et al.*, 2008; HULL *et al.*, 1990).



Figura 2.11: Pedal instrumentado.

Fonte: (ALVAREZ *et al.*, 1996)

Segundo (KNUDSON, 2007), os avanços da biomecânica tendem a ficar defasados das mudanças que ocorrem naturalmente nos esportes. Verifica-se este fato no âmbito do ciclismo, onde é cada vez menos comum por parte dos atletas de elite a adoção de pedais compatíveis com o padrão Look clássico, usualmente utilizado nos ensaios biomecânicos, pois diversos modelos de novos pedais são lançados a todo instante com materiais e geometrias inovadoras.

A utilização de uma pedivela instrumentada surge como uma alternativa, permitindo que os novos modelos de pedais possam tornar-se compatíveis com a plataforma e, inclusive, ter sua eficácia avaliada. A pedivela é uma estrutura ordinária, tipicamente construída em alumínio ou fibra de carbono, cuja característica nominal é a distância entre eixos (movimento central / pedal), difundida tipicamente em modelos de 170mm, 172,5mm, 175mm e 179mm.

No entanto, para sua utilização surgem novos desafios. O mais notável é que a pedi-

vela gira em torno do próprio eixo, impedindo a utilização de cabos para sua interface. Embora ERICSON *et al.* (1988) cite a possibilidade de utilização do braço da pedivela como elemento base, o número de artigos reportados utilizando este tipo de plataforma ainda é pequeno. Existem, sim, sistemas comerciais tais como a pedivela instrumentada SRM, ilustrada na Figura 2.12, cujo elemento ativo são os braços da coroa, permitindo a medida do momento instantâneo aplicado, combinado por todas forças atuantes em ambos pedais. Tal modelo é capaz de operar no sistema ANT+Sport com taxa de aquisição ajustável entre 0,5 Hz à 200 Hz com resolução de oito bits por mensagem.



Figura 2.12: SRM Training System.
Fonte: Schoberer Rad Messtechnik (SRM), 2010

Este sistema têm sido amplamente adotado por equipes de ponta, tal como a equipe nacional da França e vêm servindo como base para telemetria das condições de corrida (BERTUCCI *et al.*, 2005).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O sistema a ser desenvolvido deve permitir que os requisitos estabelecidos nas seções 2.1 e 2.2 possam ser satisfeitos. Este estudo terá início com a comparação das alternativas construtivas detalhadas na seção 2.4 e escolha do elemento base dentre estas. A seguir será detalhado o projeto da célula de carga, enfatizando sua análise estrutural. Finalmente, serão demonstradas as etapas de projeto do circuito eletrônico, desde a etapa de condicionamento até a de aquisição de dados.

Espera-se que, com estes passos, seja possível obter uma célula de carga cujo erro máximo de não linearidade esteja dentro da faixa reportada pela literatura. Tais erros geralmente são reportados entre 0,5 a 5% da amplitude de faixa (WOYLES *et al.*, 2005).

3.1 Análise das alternativas de construção

A Figura 3.1 ilustra como se dá o processo para decomposição da força, comparando-o para as diferentes estruturas citadas na seção 2.4. Através dos braços da coroa, não existe a possibilidade de mensurar as componentes individuais de força, requisito estabelecido para este projeto. Sendo esta alternativa descartada, reiterada por já existirem equipamentos comerciais que realizam esta função.

A adoção de um braço de pedivela como elemento ativo, em comparação a de um

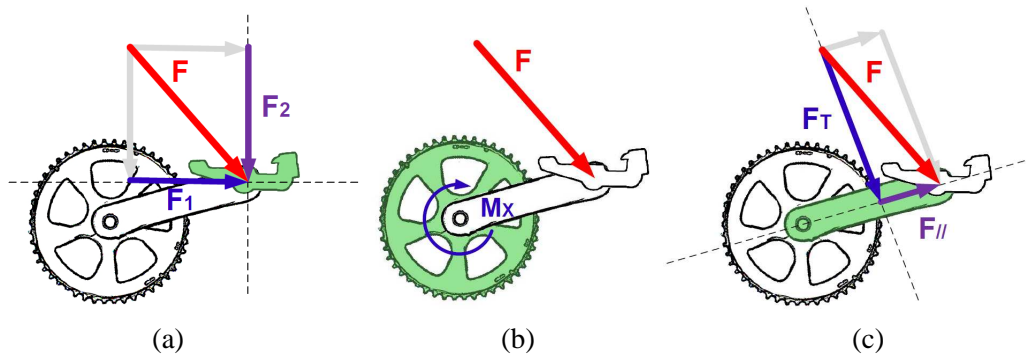


Figura 3.1: Decomposição de forças para diferentes estruturas de célula de carga. (a) pedal instrumentado (b) pedivela instrumentada (c) braços de coroa instrumentados

pedal, permite que as componentes de força normal F_T e paralela $F_{//}$ sejam mensuradas diretamente. Desta maneira não é necessária a decomposição de forças para tal, reduzindo também a propagação de erros provocados pela incerteza na medida do ângulo.

Estes fatores, associados a crescente diversificação da geometria dos pedais, levam a escolha por um sistema baseado em uma estrutura formada pelos braços da pedivela. Acredita-se que a principal dificuldade associada a esta escolha seja a necessidade de um sistema de transmissão sem fio, podendo ser superada com o emprego de um rádio transceptor comercial de baixo custo destinado a substituição de cabos.

A Figura 3.2 ilustra os elementos constituintes do sistema proposto neste trabalho. A aplicação de força na pedivela causa um desbalanço na ponte extensométrica, mensurado pelo circuito condicionador de sinais. Conectado a saída deste circuito está um sistema de comunicação sem fio ligado a um computador pessoal, onde os dados são coletados e armazenados.

Já a Tabela 3.1 ilustra as principais características funcionais dos sistemas descritos, comparando-as ao sistema aqui proposto. O principal destaque do sistema proposto é agregar portabilidade sem fio, geralmente presente apenas nos sistemas comerciais de 1GDL, às plataformas de força. Nota-se também que a adoção de uma pedivela como

elemento base da estrutura permite compatibilidade com pedais tradicionais. O mesmo é válido para o pedal como base, permitindo compatibilidade com pedivelas tradicionais.

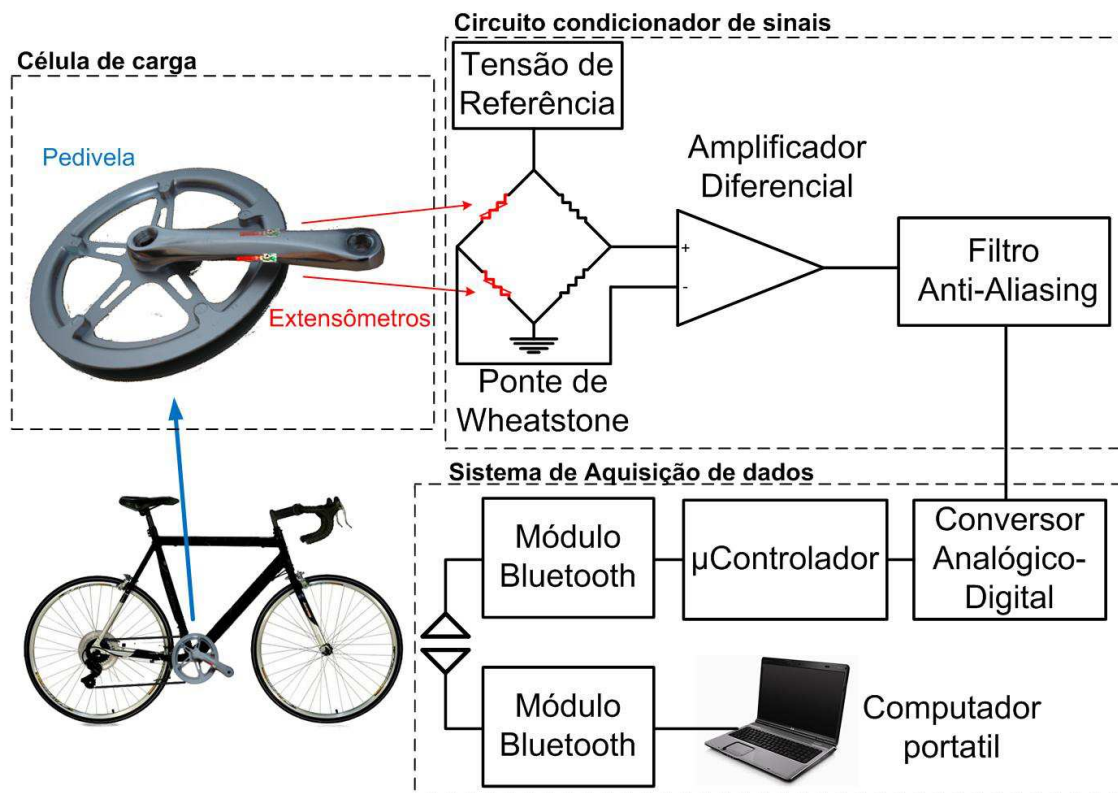


Figura 3.2: Diagrama de blocos do sistema experimental.

3.2 Projeto da célula de carga

Para implementar a estrutura base da célula de carga foram consideradas duas alternativas, usar a estrutura ou adaptá-la a partir de uma pedivela comercial. Ao longo desta seção serão detalhadas as vantagens e desvantagens associadas a cada uma das alternativas, a justificativa para opção a selecionada e os métodos escolhidos para o projeto da célula de carga.

A usinagem de uma peça específica para a função descrita permite uma série de vantagens, pois através de um projeto mecânico específico é possível ter maior controle sobre os níveis de deformação da estrutura, permitindo que os extensômetros trabalhem em sua

Tabela 3.1: Comparação entre sistemas.

	Pedal 2x2GDL clássico	Pedal 2x3GDL clássico	Sistemas comerciais 1GDL	Pedivela 2x2GDL proposto
Conjugado aplicado	✓	✓	✓	✓
Força Normal aplicada	✓	✓		✓
Força Paralela aplicada	✓	✓		✓
Força Lateral aplicada		✓		
Compatibilidade com pedivelas convencionais	✓	✓		
Compatibilidade com pedais convencionais			✓	✓
Testes em campo			✓	✓

faixa ideal para a carga solicitada. Pode-se esperar também que o comportamento final desta estrutura seja mais linear, afinal pedivelas comerciais dificilmente apresentam regiões perfeitamente simétricas que favoreçam o posicionamento paralelo e/ou ortogonal dos extensômetros. Outra vantagem é que neste caso seria possível prever os locais ideais para o posicionamento dos extensômetros, de fixação para as placas de circuito e para as proteções da célula de carga.

No entanto, existem algumas restrições para a utilização de uma peça usinada, visto que esta altera o comportamento dinâmico da estrutura devido ao emprego de geometrias e materiais incomuns a esta peça. Além disso, pesa contra também o fator custo, associado tanto ao protótipo quanto a possível produção de novas peças, pois o processo de usinagem costuma ser mais oneroso que o de forja, costumeiramente empregado na fabricação de pedivelas. Existiria também neste caso uma preocupação referente a durabilidade da peça, pois sua geometria seria atípica e haveria risco de deformar a peça durante ensaios de campo.

Portanto, neste projeto optou-se pelo emprego de uma pedivela comercial pois, além de não alterar o comportamento da estrutura, fornece uma estrutura cuja resistência mecâ-

nica está garantida pelos diversos testes realizados ao longo dos diversos lotes produzidos.

Para o desenvolvimento deste projeto foi escolhido uma pedivela comercial de características especiais, modelo Dahon 170mm em liga de alumínio AL6061, ilustrada pela Figura 3.3. A escolha é justificada pelo custo, baixa influência na dinâmica do sistema a ser agregado à peça, características de resistência mecânica e resultados satisfatórios já reportados baseados para uma estrutura similar (LAZZARI *et al.*, 2009).



Figura 3.3: Pedivela Dahon 170mm em liga de alumínio AL6061.

Para que esta pedivela comercial possa ser empregado adequadamente como célula de carga algumas características foram observadas. É preciso conhecer o material empregado na peça, já que nem todos fabricantes divulgam a liga empregada em seus produtos. A estrutura precisa ter geometria simétrica, preferencialmente com faces opostas paralelas ao longo do eixo longitudinal, permitindo um comportamento linear.

Costumeiramente a pedivela que detém a coroa apresenta geometria diferenciada. Porém neste projeto deu-se preferência para pedivelas simétricas, reduzindo o esforço de projeto.

Embora conheça-se previamente que a estrutura possua rigidez mecânica suficiente

para as condições a que esta peça será imposta, é preciso ainda determinar se existe algum ponto na estrutura que favoreça a aplicação dos extensômetros. Considerando-se a vida útil dos extensômetros utilizados (Modelo Kyowa KFG-5-120-C1-23), estabeleceu-se que a deformação relativa no ponto de aplicação dos mesmos deve ser inferior a 0,1%, para qualquer caso típico possível.

Além disso, é preciso avaliar o comportamento dinâmico ressonante da estrutura, verificando se este é responsável ou não por influenciar significativamente as variáveis de saída da célula de carga.

Para avaliar estas questões, foram gerados modelos sólidos em três dimensões para realizar a análise por elementos finitos do comportamento da peça. Posteriormente, foram realizados ensaios de impacto com acelerômetros, validando o comportamento da estrutura.

3.3 Procedimentos para a modelagem

A seguir será descrito o processo básico utilizado para a construção do modelo tridimensional, trata-se da ferramenta *Loft*, disponibilizado pelo *software* Solidworks. Com esta ferramenta é possível gerar um recurso sólido a partir da interconexão dos perfis chaves do modelo. A Figura 3.4 ilustra este processo através de alguns perfis genéricos. Foram definidos três contornos fechados ao longo de planos paralelos. A seguir estes contornos deram origem a superfícies fechadas em duas dimensões (a ferramenta é capaz de realizar esta etapa automaticamente). Finalmente estas superfícies foram unidas através de uma malha que conecta os vértices dos perfis, através do caminho mais simples encontrado por aproximações numéricas do tipo *Spline*.

No entanto, para intersecções onde a geometria desejada não é plenamente simétrica,

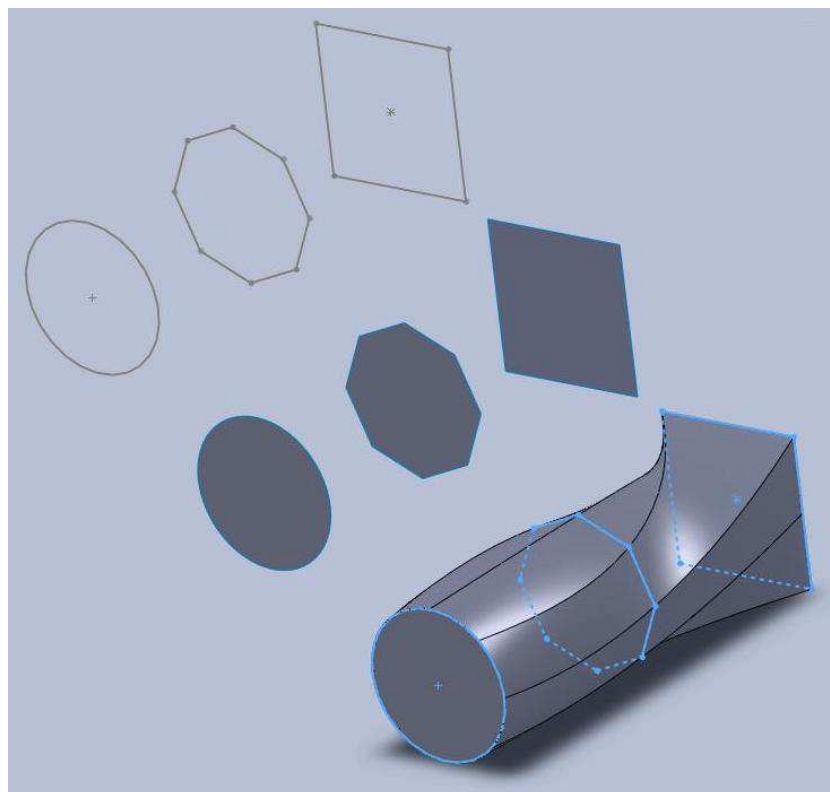


Figura 3.4: Modelagem por Loft.

é interessante que haja um controle maior sobre o caminho entre as conexões. Isto é possível através da utilização de linhas guias, que definem conexões estratégicas entre os vértices e deixam o restante do trabalho para o algoritmo de aproximação. Para o mesmo caso, a Figura 3.5 demonstra como o controle sobre as linhas guias pode ser útil.

O processo de modelagem descrito foi utilizado na peça em questão. Foram construídos 15 perfis ao longo do eixo longitudinal da peça, descrevendo a principal região de interesse da célula de carga. A Figura 3.6 ilustra dois dos perfis criados, sendo que suas interconexões podem ser observadas através da Figura 3.7. Os 15 perfis encontram-se descritos detalhadamente no Anexo A.

Esta técnica pôde ser empregada para descrever satisfatoriamente a maior parte da peça, do eixo principal da peça até 130mm, dos 170mm totais. Para o restante da peça uma técnica de modelagem similar foi utilizada, porém nesta os perfis dão lugar a superfícies

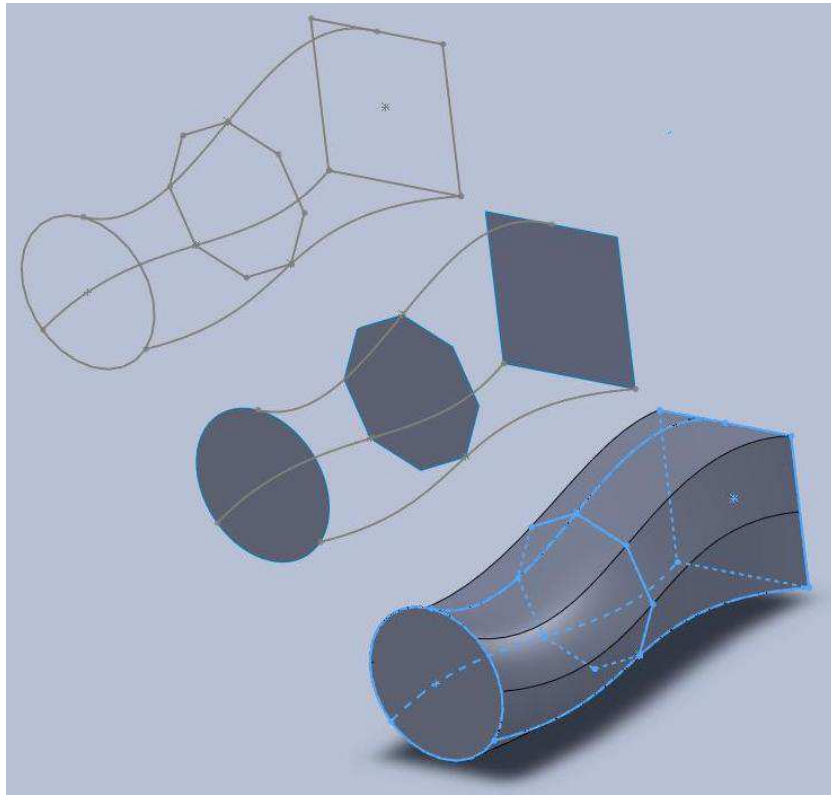
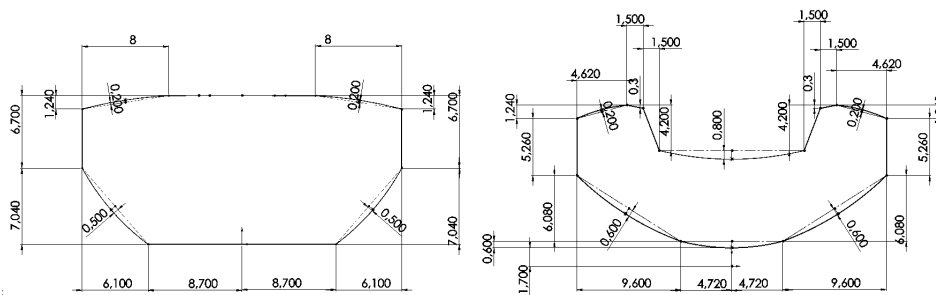


Figura 3.5: Modelagem por Loft com linhas guias.



*Todas dimensões em mm

Figura 3.6: Exemplos de perfis.

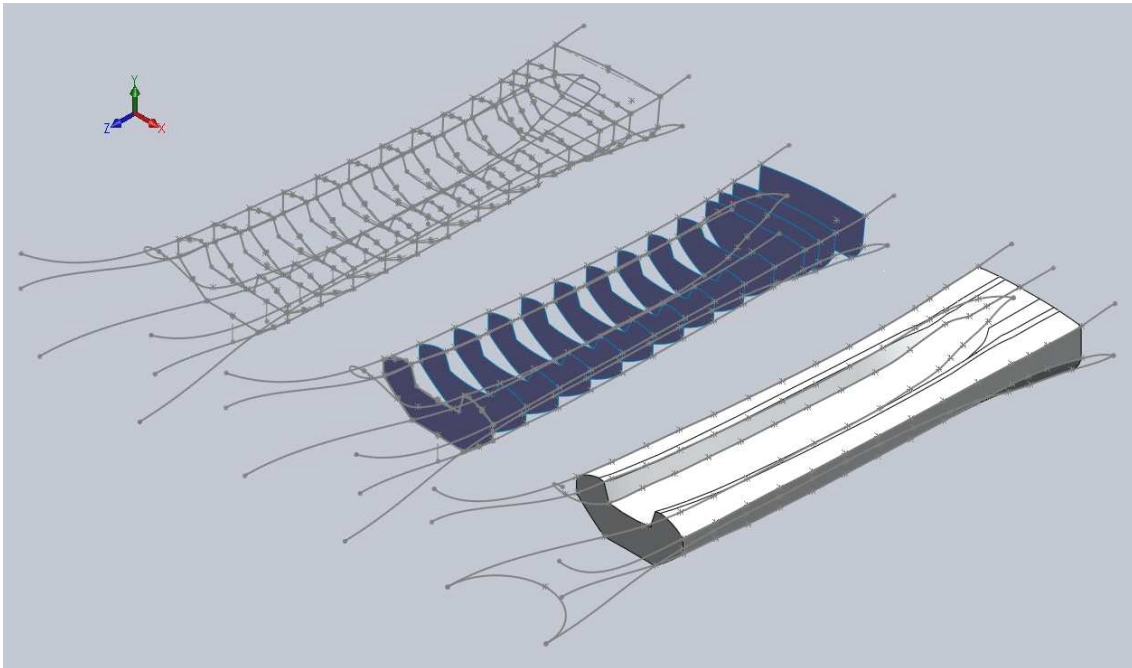


Figura 3.7: Modelagem por Loft: unindo perfis longitudinais.

tridimensionais. A Figura 3.8 exemplifica este processo e a Figura 3.9 apresenta o modelo sólido finalizado. Este modelo pode ser comparado em qualidade ao modelo real da Figura 3.3.

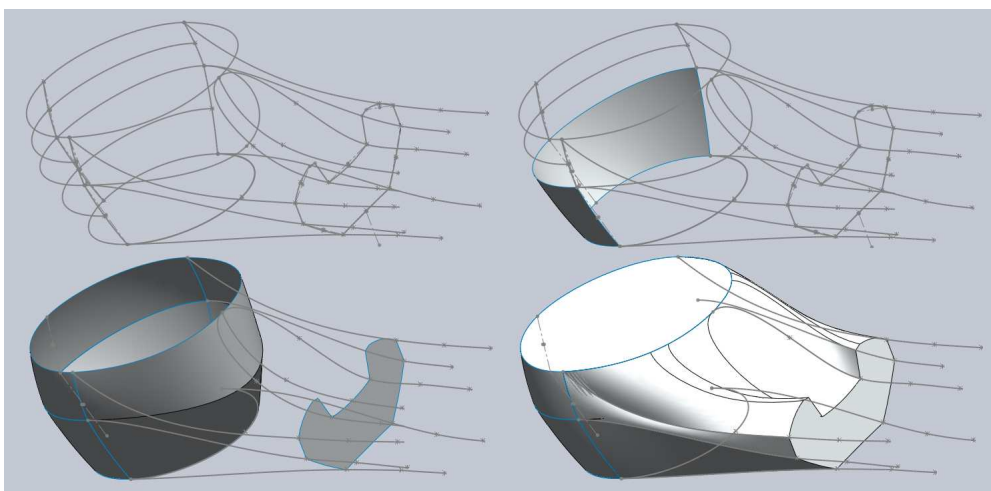


Figura 3.8: Modelagem por Loft: unindo superfícies tridimensionais.



Figura 3.9: Modelo sólido finalizado.

3.4 Análise estrutural

Para que uma célula de carga possa ser confiável, existe uma série de restrições mecânicas que devem ser satisfeitas. Entre os pontos a serem observados encontram-se o dimensionamento adequado para que a célula não sofra danos, passando pela otimização dos níveis de tensão e deformação para máxima excursão do sensor, até a verificação do comportamento dinâmico da peça, a fim de que este não influencie no resultado do sistema.

Para tal, em um primeiro momento serão simulados os níveis de tensão e deformação para os diversos carregamentos que a célula poderá vir a receber. Esta simulação se dará através da análise de tensões e deformações baseada em um modelo de elementos finitos, gerado à partir do sólido anteriormente modelado.

Sabendo que a força total aplicada a cada pedal dificilmente supera o peso total do ciclista (SANDERSON *et al.*, 2000; SMAK *et al.*, 1999), estipulou-se um carregamento de 1.000N, correspondente ao caso limite de um atleta cuja massa aproximada é de 102kg. Este carregamento foi aplicado a diferentes direções e sentidos, permitindo verificar se a peça está corretamente dimensionada, operando dentro de seu domínio elástico. O

resultado deste ensaio, reportado na seção 4.2 e ao longo do Anexo B, também indica o ponto ideal para aplicação dos extensômetros, pois deformação em excesso pode danificá-los e reduzida deformação prejudicaria a relação sinal/ruído do circuito.

Outro ponto que não pode ser negligenciado no dimensionamento da célula é seu comportamento dinâmico. Aplicar uma carga oscilatória a célula de carga cuja frequência esteja próxima a um de seus modos principais de ressonância pode danificar a célula de carga. E, mesmo que esta carga não seja capaz de romper a estrutura da peça, poderia influenciar a resposta da célula, devendo a faixa de operação da célula de carga permanecer abaixo do primeiro modo de ressonância.

As simulações realizados indicam os cinco primeiros modos de ressonância da estrutura. Seus resultados estão detalhados na Seção 4.2 sendo que seus perfis modais podem ser observados em detalhe ao longo do Anexo C.

Validando os estudos simulados, realizou-se um ensaio de resposta ao impacto da peça. Para este ensaio a peça foi engastada em posição similar à de operação, conforme ilustra a Figura 3.10, e, em seguida aplicou-se um golpe com um martelo de borracha. Espera-se que resposta da peça à este evento corresponda à uma oscilação, atenuada ao longo do tempo, cujas componentes espectrais correspondam aos principais modos de ressonância simulados.

Para aquisição dos dados de ensaios, utilizou-se um sistema específico para acelerometria da empresa National Instruments composto pelos módulos NI SCXI 1000, NI SCXI 1530 e NI SCXI 1600. A foto do sistema utilizado encontra-se na Figura 3.11. Os resultados deste ensaio e as implicações deste sobre as limitações gerais do sistema podem ser observadas na seção 4.2.



Figura 3.10: Ensaio dinâmico com acelerômetro: pedivela engastado com acelerômetro triaxial Delta Tron 4520.



Figura 3.11: Sistema de condicionamento NI SCXI 1530 e de aquisição NI SCXI 1600.

3.5 Cadeia de medida proposta

A Figura 3.12 apresenta a cadeia de medida proposta para este trabalho. O sistema é projetado para que a faixa de esforços de -600N à 600N corresponda à máxima excursão do conversor analógico digital. As etapas do condicionamento e aquisição digital de dados serão detalhadas ao longo das seções 3.6 e 3.7.

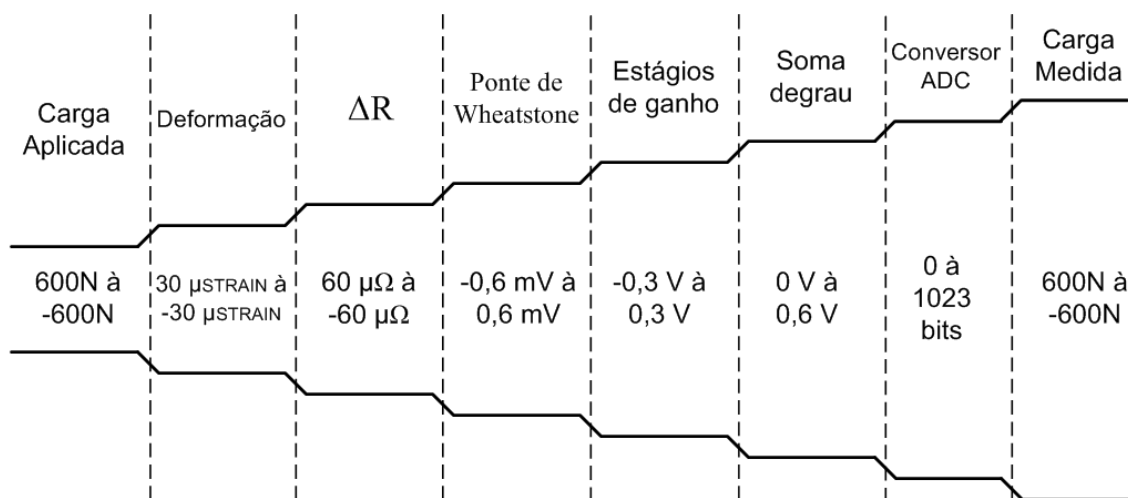


Figura 3.12: Cadeia de medida proposta.

3.6 Extensometria, condicionamento e calibração

Extensometria

Para a aplicação em questão, dentre as topologias descritas na seção 2.3, a melhor opção seria a utilização de ponte completa na configuração quatro fios. Esta topologia permitiria minimizar o ruído térmico adicionado pelos resistores que compõem a ponte, minimizar e auxiliar na compensação do efeito de expansão térmica, compensar alguns tipos de deformações não lineares e também tornaria o sistema mais imune a ruídos externos. No entanto, devido a *limitações de espaço físico* na peça, foi possível apenas implementar um sistema de *meia ponte* com os extensômetros disponíveis no laboratório

(Kyowa KFG-5-120-C1-23).

A Figura 3.13 mostra a foto de um dos extensômetros já cimentados na peça. O procedimento para realizar esta tarefa foi realizado segundo a metodologia proposta por HOFFMANN (1989), cujos passos principais são:

- marcar o local de aplicação do extensômetro;
- remover oxidação presente na peça utilizando uma lixa fina e palha de aço;
- remover gordura e detritos do processo anterior presente utilizando uma gaze embebida em álcool isopropílico;
- secar a peça;
- aplicar a cola ao extensômetro (utilizada cola à base de etil-cianoacrilato);
- posicionar o extensômetro no local adequado;
- pressionar o extensômetro por cerca de um minuto;
- verificar a integridade e isolamento do extensômetro com um multímetro;
- repetir os quatro últimos passos para adesivar os terminais;
- soldar os terminais aos extensômetros e fios.



Figura 3.13: Extensômetro cimentado à estrutura.

Condicionamento

Conforme descrito, a base do circuito condicionador, para cada canal, é uma ponte de Wheatstone constituída por dois extensômetros de 120Ω e dois resistores de precisão (1%) igualmente de 120Ω . O ideal seriam resistores da faixa de 0,1% ou ainda menores. O primeiro estágio de ganho é realizado por um amplificador de instrumentação INA126, sendo que os elementos ativos de todos os demais estágios são amplificadores operacionais OPA2604. O diagrama elétrico do circuito condicionador, pode ser observado na Figura 3.14.

Os dois primeiros estágios são responsáveis por dar um ganho de $G1 = 50$ e $G2 = 10$, totalizando um ganho total de $G = 500$ para este sistema. Entre estes estágios, existe buffer para casamento de impedância. A seguir um filtro de segunda ordem cuja frequência de corte é de 40Hz remove as componentes espectrais de alta frequência. Por fim, é somado ao sinal um *offset* de $V_{ref}/2$, a fim de normalizar este sinal para a entrada do conversor analógico-digital, ajustado para V_{ref} . A Figura 3.15 mostra uma foto do sistema já com o condicionador posicionado na pedivela.

Calibração

Devido a dificuldade de se calibrar uma célula de carga como esta dinamicamente, nas condições mais próximas possíveis da operação, o procedimento mais comum para tal é realizar o ensaio de calibração estaticamente (WOYLES *et al.*, 2005).

Para isso foram realizadas 3 séries de medidas, sorteadas aleatoriamente, num total de 17 medidas, variando de 0 a 40kgf. Foram utilizados durante este procedimento os pesos padrões apresentados pela Figura 3.16 sendo que sua disposição durante o ensaio pode ser observada na Figura 3.17.

Para validar este procedimento, foi realizado um Projeto de Experimentos com um

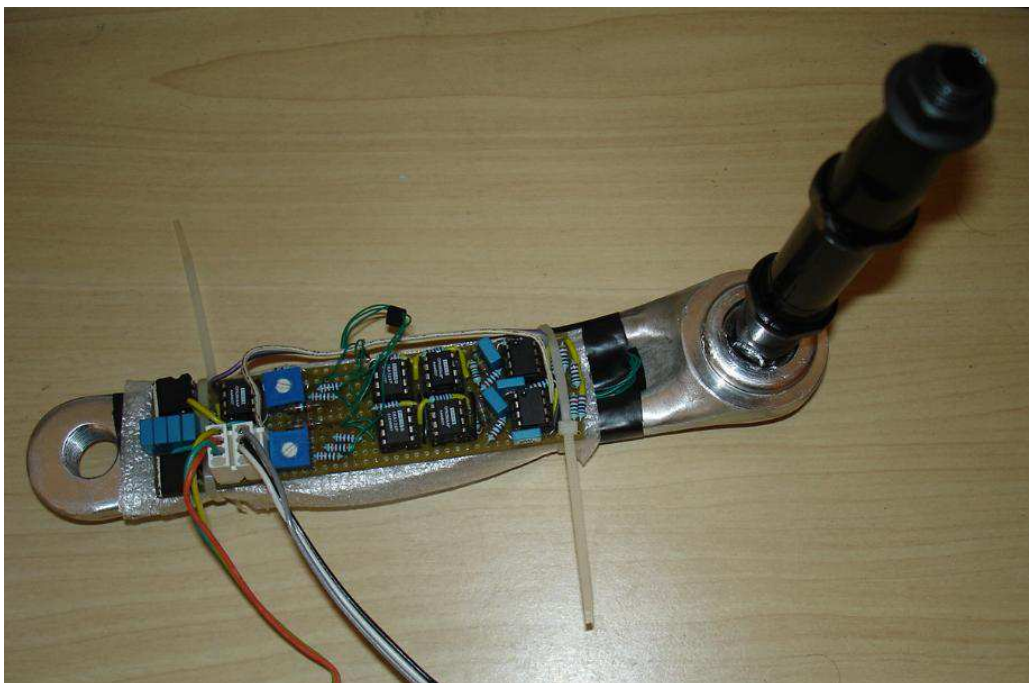


Figura 3.15: Circuito condicionador de sinais fixado à pedivela esquerda.



Figura 3.16: Pesos padrão utilizados na calibração estática.

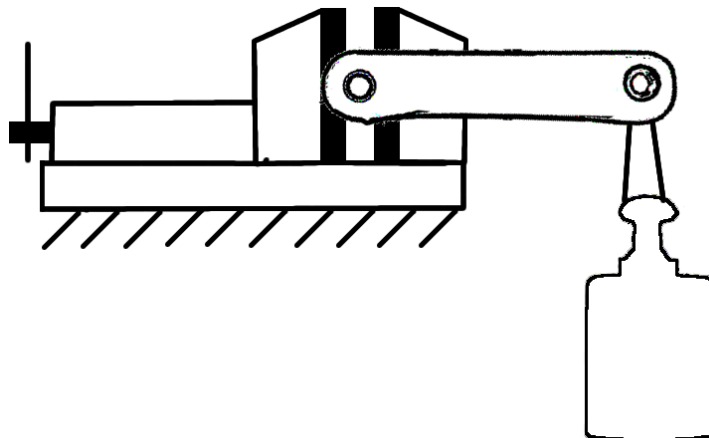


Figura 3.17: Procedimento para ensaio de calibração.

fator controlável, 17 níveis e três repetições para verificar a significância da variável de resposta. Seus resultados são apresentados na seção 4.3.

3.7 Sistema de aquisição de dados

Conforme descrito na seção 3.1, o sistema deve ser capaz de transmitir remotamente os sinais gerados pelo circuito condicionador de sinais. Para realizar esta tarefa são utilizados dois dispositivos, um microcontrolador Microchip PIC16F877A com saída serial e um módulo Bluetooth.

O microcontrolador adquire os dados de suas portas analógicas através do chaveamento de um conversor analógico digital (ADC) de 10 bits. Para evitar flutuações e realizar uma maior excursão de sinal, optou-se pela utilização da entrada referência de tensão externa, conectada a saída da referência de tensão utilizada, Intersil ILS6002 de 0,6V. A rotina implementada é simples, a cada 10 ou 50 ms, dependendo do modo de operação, é realizada uma leitura nos canais do ADC e o resultado transmitido serialmente por sua porta USART a uma taxa de 57600 bps. A rotina escrita em linguagem C (compatível com o compilador CCS) é apresentada no Anexo F. Já a Figura 3.19

O Módulo Bluetooth BlueSMiRF Gold WRL-00582, escolhido para esta aplicação em função de disponibilidade e funcionamento, é ilustrado pela Figura 3.18, sendo uma solução para substituição de cabos seriais, podendo trabalhar em qualquer taxa usual entre 2400 e 115200 bps. Mesmo com suas dimensões reduzidas (5,1 x 1,5 x 0,6 cm), sua antena interna provém alcance de até 100 metros em visada direta. Operando na banda de frequência entre 2,4 e 2,524 GHz, o módulo é capaz de funcionar em ambiente de RF hostil contendo dispositivos como WiFi, 802.11g e ZigBee graças a tecnologia de salto de frequência (RN-41 - CLASS 1 BLUETOOTH MODULE, 2009).



Figura 3.18: Módulo Bluetooth: BlueSMiRF Gold WRL-00582.

Quando este módulo é ligado, o mesmo envia sinais para que possa ser identificado e emparelhado pelos demais dispositivos Bluetooth, tais como computadores e celulares (a menos que o modo *invisível* esteja ativado). Após emparelhado, é possível iniciar o serviço Serial Port Profile (SPP), que emula uma conexão serial virtual entre os dois dispositivos.

O fluxograma deste sistema é apresentado pela Figura 3.19. E seu esquema elétrico pode ser observado na Figura 3.20.

É importante ressaltar que tanto o microcontrolador quanto o módulo bluetooth foram previamente testados, individualmente em um canal de comunicação serial RS232 sob a

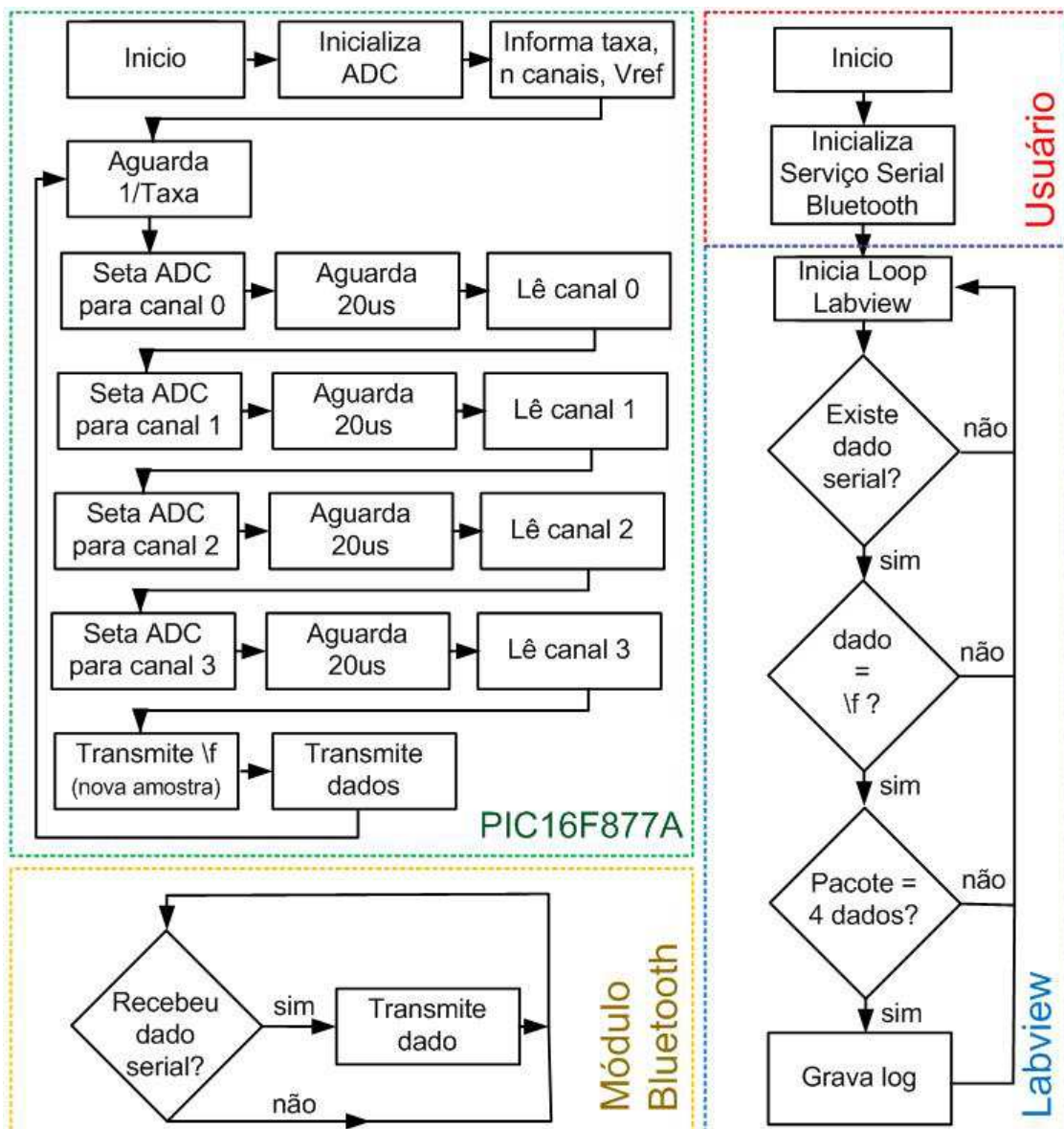


Figura 3.19: Fluxograma para aquisição de dados.

taxa escolhida de 57600bps. Desta maneira é possível identificar *isoladamente* possíveis fontes de *erro*.

Uma vez estabelecido a ligação entre ambos, foram efetuados testes de integridade para os dados transmitidos. Isso foi feito transmitindo-se, ao invés de dados correspondentes aos canais do ADC, uma sequência numérica de “00” à “99”, totalizando 300 dados de 8 bits (um por dígito mais um correspondente ao espaço). Esta sequência pôde ser observada no monitor serial Docklight, que permite alinhamento dos pacotes. Consi-

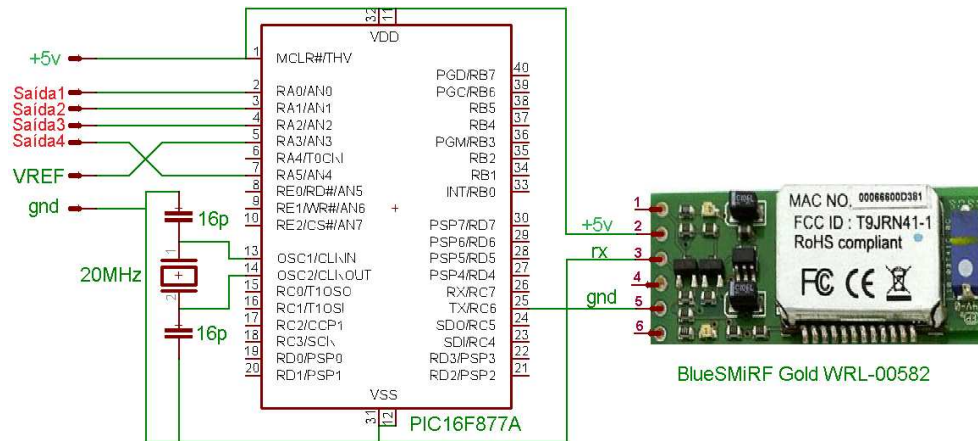


Figura 3.20: Esquema elétrico do sistema de aquisição.

derando que a sequência contém 300 dados, a probabilidade de que o link de dados seja interrompido e retorne no mesmo pacote, levando à equívocos neste processo de verificação, é de 0,3%. Os resultados destes testes são reportados pela seção 4.4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condições gerais das simulações realizadas

Para realização do algoritmo de processamento foi utilizado um computador pessoal dotado de processador Intel Dual Core 2,0 GHz com 2,0 GBytes de memória *RAM* com sistema operacional Windows XP 32 bits.

A base para a os ensaios de tensão e deformação realizados através da técnica de cálculo de elementos finitos é uma malha sólida formada por 7903 elementos cujo tamanho médio é de 4,3 mm conectados a 12906 nós, ilustrada pela Figura 4.1 e detalhada pela Tabela 4.1. Para estas condições, o desvio máximo entre o modelo gerado e simulado é de 0,22 mm.

Este limiar foi definido por ser similar a diferença encontrada entre as duas peças adquiridas. Além disso, o refinamento da malha a partir deste ponto poderia elevar significativamente o tempo de execução, que chegou a aproximadamente 5 minutos para as simulações dinâmicas.

Fundamental na determinação do resultado, os parâmetros do material simulado correspondem a liga de alumínio AL6061 empregada na construção da peça. Utilizaram-se os parâmetros pré-determinados fornecidos pela empresa Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, presentes na Tabela 4.2.

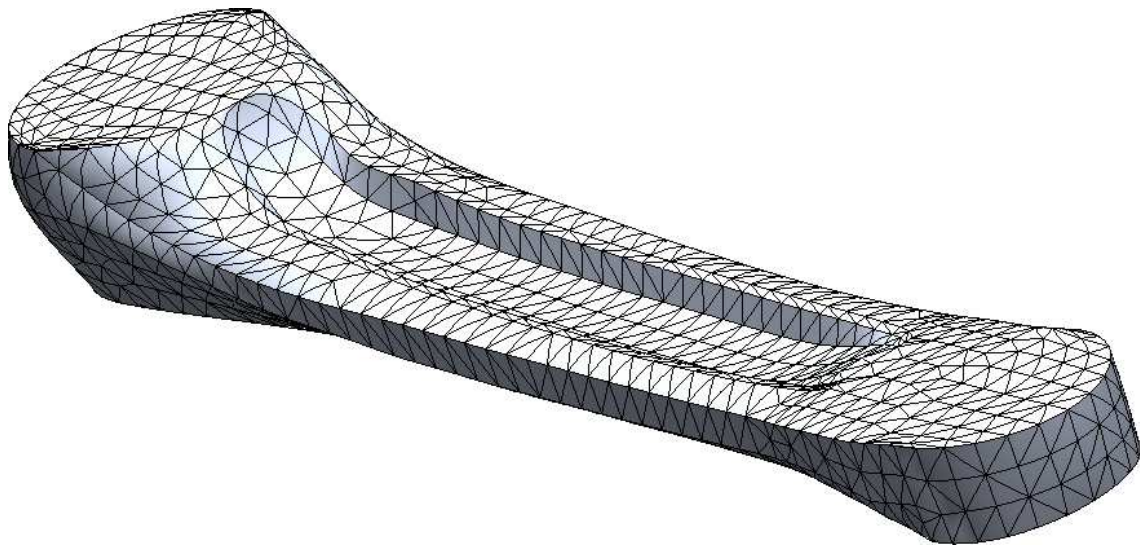


Figura 4.1: Malha sólida utilizada nas simulações estáticas e dinâmicas.

Tabela 4.1: Características da malha.

Algoritmo utilizado:	Malha simples
Transição automática:	Desativada
Superfície suave:	Ligada
Checagem jacobiana:	4 Pontos
Tamanho médio dos elementos:	4.3077 mm
Tolerância:	0.21538 mm
Qualidade:	Alta
Número de elementos:	7903
Número de nós:	12906

Fonte: Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2010

Tabela 4.2: Propriedades do material.

Material:	[SW]Liga 6061		
Tipo de modelo:	Modelo isotrópico elástico linear		
Propriedade	Valor	Unidade	Tipo de valor
Módulo de elasticidade	6.9e+010	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.33	NA	Constante
Módulo de cisalhamento	2.6e+010	N/m ²	Constante
Densidade de massa	2700	kg/m ³	Constante
Tensão Máxima	1,24E+12	N/m ²	Constante
Tensão de Escoamento	9,5E+11	N/m ²	Constante
Coefficiente de expansão térmica	2.4e-005	1/Kelvin	Constante
Condutividade térmica	170	W/(m.K)	Constante
Calor específico	1300	J/(kg.K)	Constante

Fonte: Dassault Systèmes SolidWorks Corporation

4.2 Resultados da análise estrutural

A Figura 4.2 apresenta resultado para a simulação do principal carregamento a que a estrutura será submetida, uma carga normal ao seu eixo longitudinal. Esta figura e as demais que representam diferentes esforços encontra-se detalhadas no Anexo B. Para todos os casos, a deformação relativa na *região central da peça* permanece entre a faixa de 0,01 à 0,1% , identificando a região como ideal para o posicionamento dos extensômetros.

A análise de integridade da estrutura revela para a condição mais crítica, onde os esforços de tensão poderiam chegar a 91MPa, que este valor fica abaixo do limite de resistência a fadiga do material, que é de 95Mpa. No entanto nota-se que o coeficiente de segurança desta estrutura é de apenas 4%.

A Tabela 4.3 apresenta os principais modos da frequência de ressonância para os ensaios simulados. O modo fundamental de ressonância é de cerca de 337 Hz. Os perfis de deformação para cada uma das frequências descritas na Tabela 4.3 podem ser observados em detalhe ao longo do Anexo C.

Em comparação, a Tabela 4.4 apresenta as principais componentes espectrais captu-

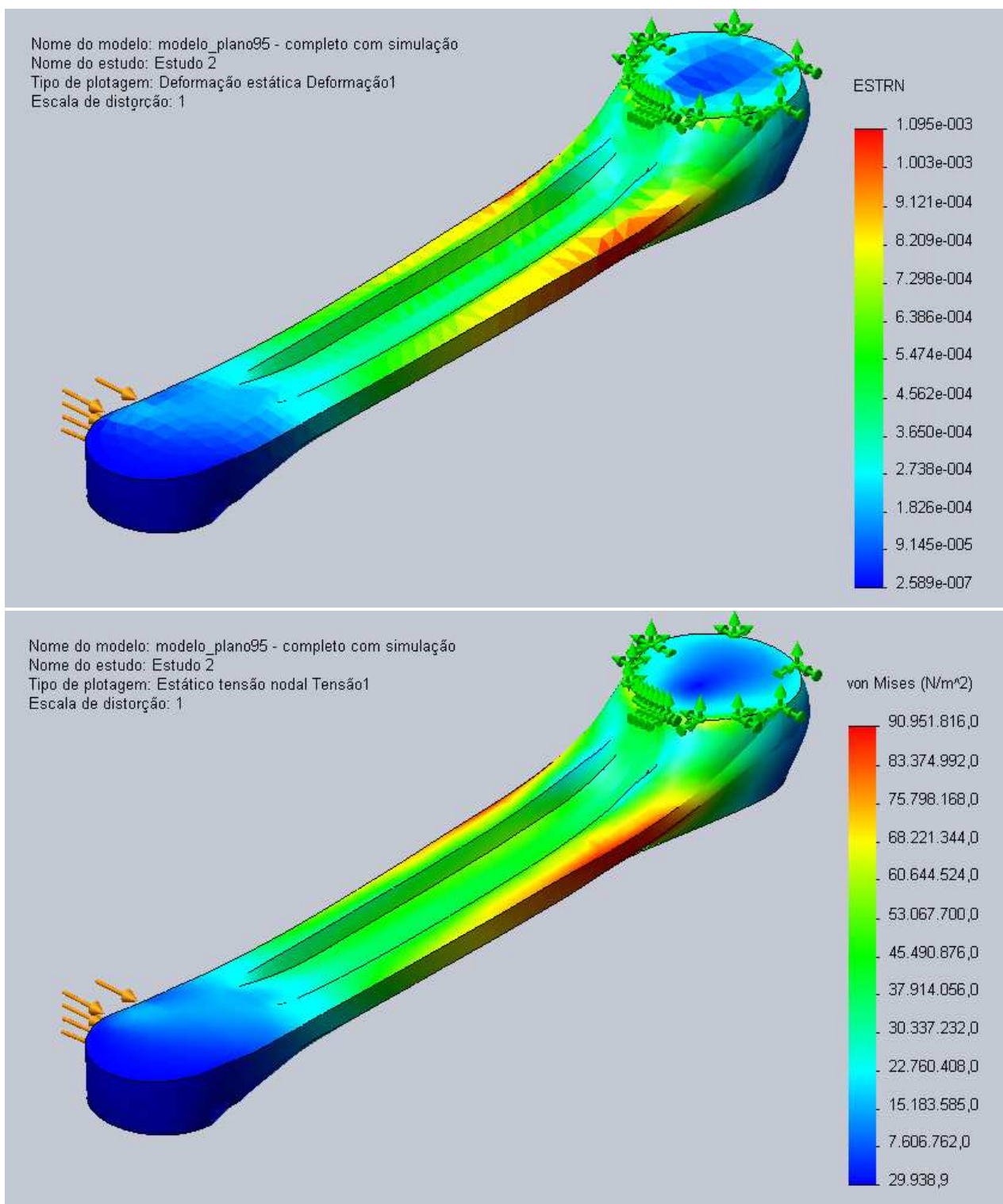


Figura 4.2: Esforço normal ao eixo longitudinal: deformação e tensão.

Tabela 4.3: Modos de frequência: ensaio simulado.

Modo	Frequência (Hz)
1	337
2	752
3	2108
4	2376
5	4237

Tabela 4.4: Modos de frequência: principais componentes espectrais do ensaio realizado com o acelerômetro.

Modo	Frequência (Hertz)
1	346
2	1690
3	4100

radas pelo ensaio de vibração realizado com o acelerômetro. A Figura 4.3 ilustra o sinal adquirido tanto para o domínio tempo como domínio frequência, permitindo visualizar o amortecimento da estrutura e as frequências de ressonância.

Nota-se que existe concordância entre o resultado esperado e obtido para o primeiro modo de vibração, o mais importante. No entanto, para os demais modos houveram divergências. Muito provavelmente o método de fixação, que no ensaio real tem sua idealidade comprometida por folgas no contato eixo/pedivela, intervém neste resultado. Verifica-se também que para o primeiro modo de vibração que seu valor fica acima da frequência de excitação primária gerada pelo atleta (0,5Hz - 2 Hz) (ERICSON *et al.*, 1988) e também pelo contato entre pinos dos dentes das correias e coroa, para um pedal de 40 dentes (20Hz - 80Hz).

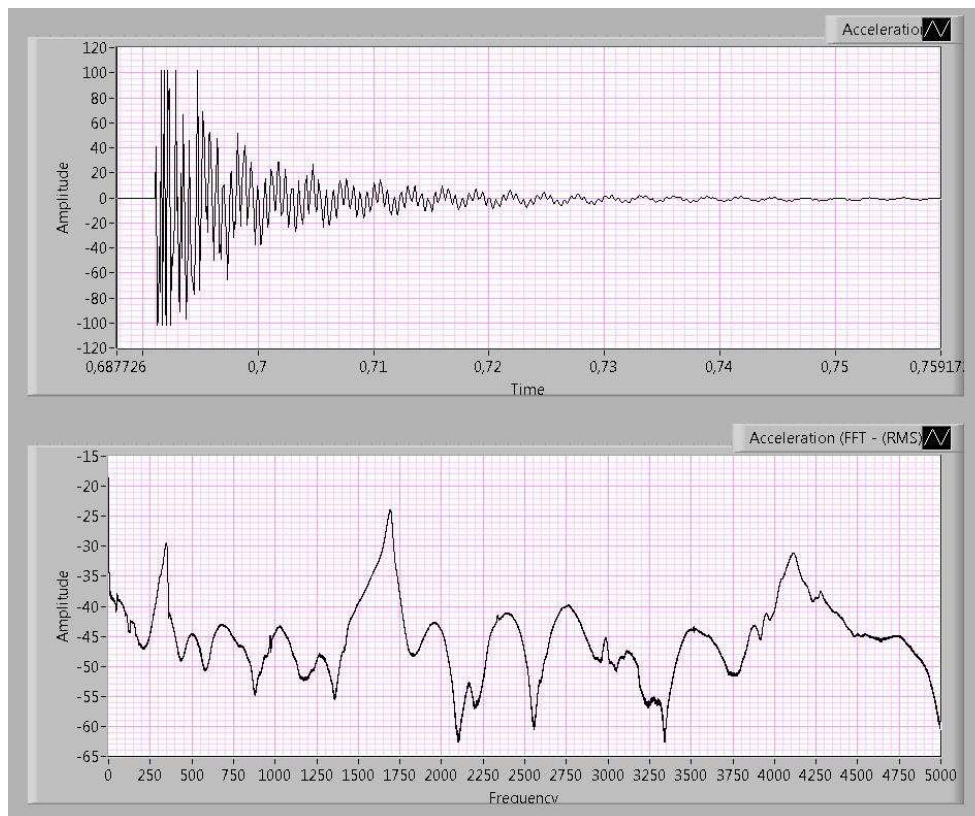


Figura 4.3: Resultados para o teste de impacto: domínio tempo e frequência.

4.3 Validação experimental da célula de carga

A Tabela 4.5 apresenta o resultado para os ensaios de calibração realizados. Foram efetuadas 3 séries de medidas, realizadas aleatoriamente, para cada célula. Sendo a variável de resposta Tensão Elétrica, dada em mV, mensurada através de um multímetro digital Minipa ET-2076 de $3 \frac{3}{4}$ dígitos.

A Tabela 4.6 apresenta o resultado para a Análise de Variância realizada. Observa-se que o fator carga é significativo, conforme esperado, e também que ambas células apresentam diferenças significativas entre si, demandando diferentes curvas de calibração. A interação entre ambos fatores também é significativa, embora não haja nenhuma implicação prática associada.

Para o ajuste de curvas, realizado através do método da regressão linear, observa-

Tabela 4.5: Calibração estática.

n	Carga (kgf)	Pedivela Esquerda			Pedivela Direita		
		a (mV)	b (mV)	c (mV)	d (mV)	e (mV)	f (mV)
1	0	300	302	301	300	301	300
2	3	318	319	317	314	315	315
3	5	328	326	327	322	323	323
4	8	344	343	343	334	336	336
5	10	352	351	353	345	343	345
6	13	372	367	366	357	358	358
7	15	380	379	375	365	366	364
8	18	395	393	391	378	378	376
9	20	402	403	400	389	387	386
10	23	416	420	421	402	401	400
11	25	427	425	427	411	407	403
12	28	441	445	441	421	418	417
13	30	451	449	451	425	432	427
14	33	467	469	469	445	441	436
15	35	478	475	473	454	450	446
16	38	493	486	485	467	460	460
17	40	503	497	498	475	470	466

Tabela 4.6: Resultados do Projeto de Experimentos.

ANOVA						
Fonte de Variação	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Grupos (Células 1 e 2)	6,37E+03	1	6,37E+03	1,10E+03	8,87E-44	3,98
Carga (kgf)	3,21E+05	16	2,01E+04	3,48E+03	1,91E-92	1,79
Interação	1,96E+03	16	1,22E+02	2,12E+01	2,39E-20	1,79
Interna	3,92E+02	68	5,76E+00	x	x	x
Total	3,30E+05	101	x	x	x	x

se, para a célula de carga 1, cuja curva de calibração é representada pela Figura 4.4, o erro máximo de não linearidade encontrado para a saída foi de 5,6mV, encontrado para a medida c16, correspondente a um erro na entrada de 1,1kgf. Já o erro quadrático médio observado é de 2,2mV, correspondente a um erro na entrada de 0,45kgf.

Analogamente, a célula 2, cuja curva de calibração é representada pela Figura 4.5, o erro máximo de não linearidade encontrado para a saída foi de 5,125mV, encontrado para a medida f14, correspondente a um erro na entrada de 1,2kgf. Sendo o erro quadrático médio observado é de 3,4mV, correspondente a um erro na entrada de 0,81kgf.

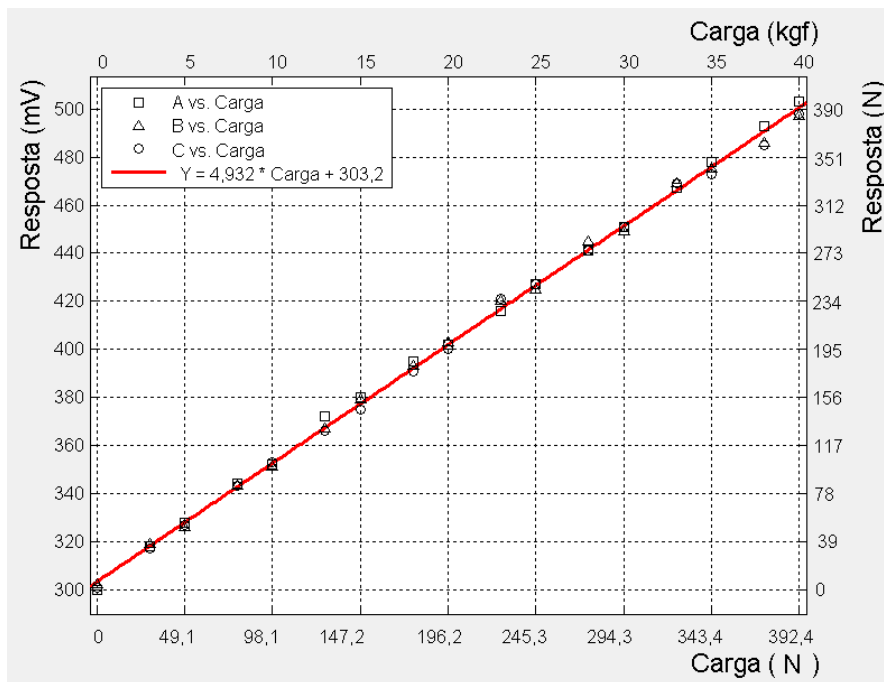


Figura 4.4: Curva de calibração estática para célula de carga esquerda.

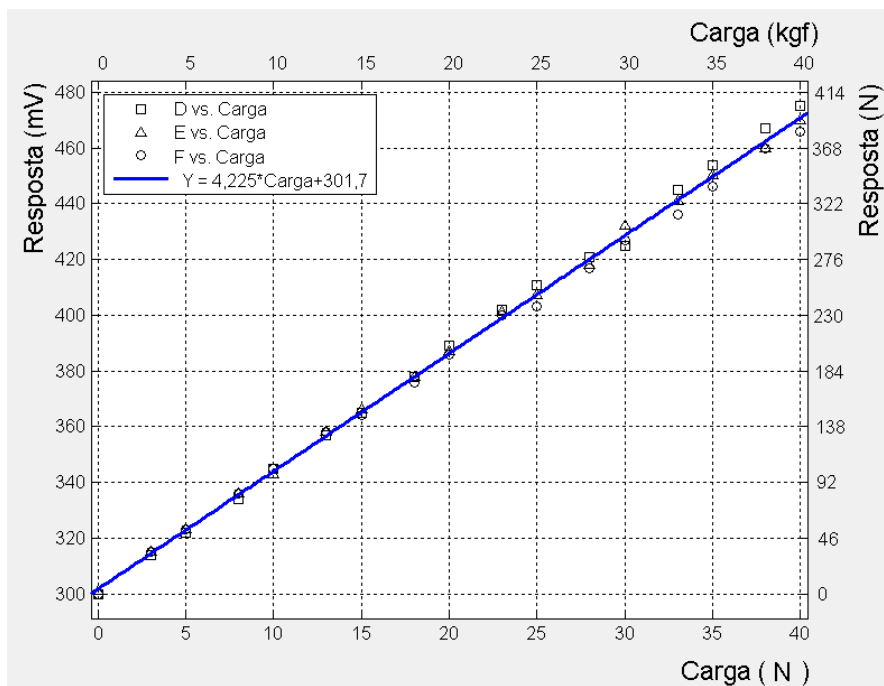


Figura 4.5: Curva de calibração estática para célula de carga direita.

4.4 Teste e funcionamento do sistema

A pedivela que contém a coroa (lado direito) detém, além de seu circuito condicionador, o módulo bluetooth e o microcontrolador, conforme observado pela Figura 4.6. Com o sistema já montado, verificou-se a integridade dos dados recebidos através do teste descrito na seção 3.7. Para os cerca de 1000 pacotes transmitidos, verificou-se que, uma vez estabelecido o link de comunicação, não houveram perdas. Este resultado se repetiu nos três ensaios realizados, sendo o primeiro estático, o segundo dinamicamente porém ainda fora da bicicleta e o terceiro na condição de operação com a bicicleta em movimento. Conclui-se então que o radio transceptor é confiável, mesmo nas condições impostas.

Para que seja feita a conexão com a saída provida pelo circuito condicionador da pedivela esquerda, utiliza-se um eixo adaptado, dotado com um cabo transmissor, conforme as Figuras 4.7 e 4.8.

O sistema completo, instalado em uma bicicleta de estrada, pode ser observado nas Figuras 4.9 e 4.10. É importante salientar que este procedimento não alterou a geometria da pedivela e os componentes agregados alteraram a massa do sistema de forma desprezível, permitindo afirmar que o modo de vibração resultante é praticamente o mesmo. Com este sistema foi possível realizar um ensaio biomecânico demonstrativo, avaliando as componentes de força normal direita e esquerda. Os resultados deste ensaio podem ser acompanhados pela Figura 4.11.

A partir destes dados é possível obter parâmetros típicos à este tipo de ensaio (SMAK *et al.*, 1999):

- a cadência é de 93 RPM, ou 9,73 rad/s;
- o pico de força da perda esquerda é de 497 N;
- o pico de força da perda direita é de 453 N;

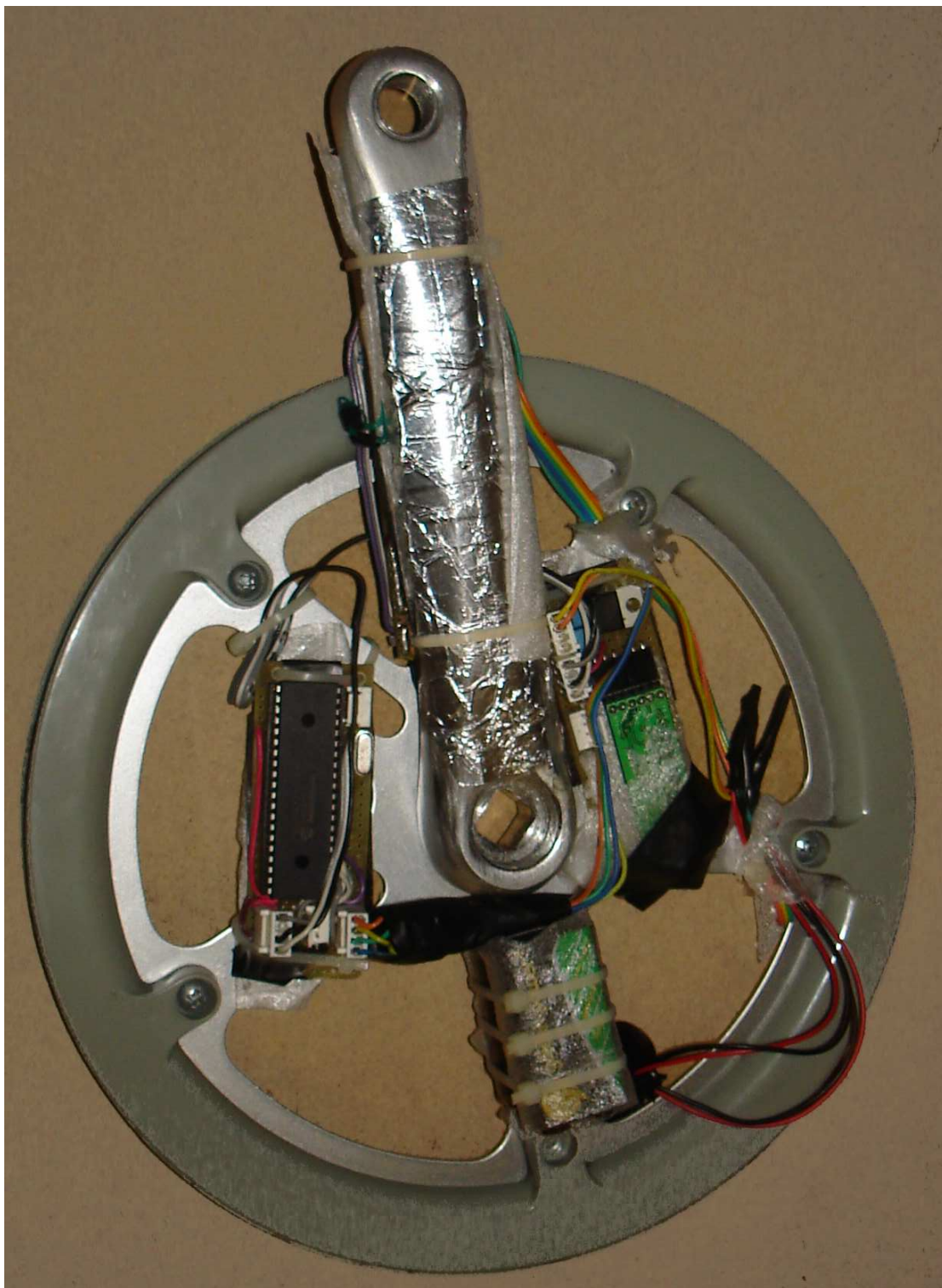


Figura 4.6: Pedivela instrumentada, lado direito.



Figura 4.7: Eixo com cabo transmissor.



Figura 4.8: Eixo com cabo transmissor acoplado ao movimento central.



Figura 4.9: Sistema instalado em uma bicicleta de estrada.



Figura 4.10: Sistema em uso.

- a assimetria entre forças (critério de pico) é de 9,3%.

E também é possível avaliar a potência instantânea, produzida individualmente por cada perna ou combinadas, conforme a Figura 4.12. De onde se obtém que:

- a potência média para o ciclo em questão é de 570W;
- a potência média para o ciclo em questão, produzida pela perna esquerda, é de 280W;
- a potência média para o ciclo em questão, produzida pela perna direita, é de 290W;
- a assimetria entre forças (critério de potência gerada) é de 3,6%.

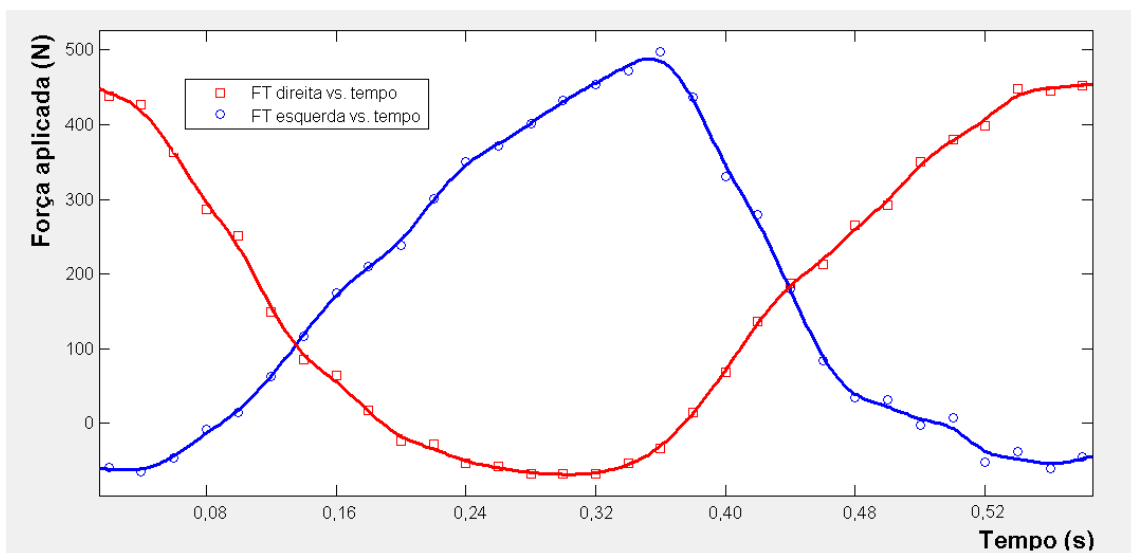


Figura 4.11: Ensaio biomecânico: análise das componentes de força.

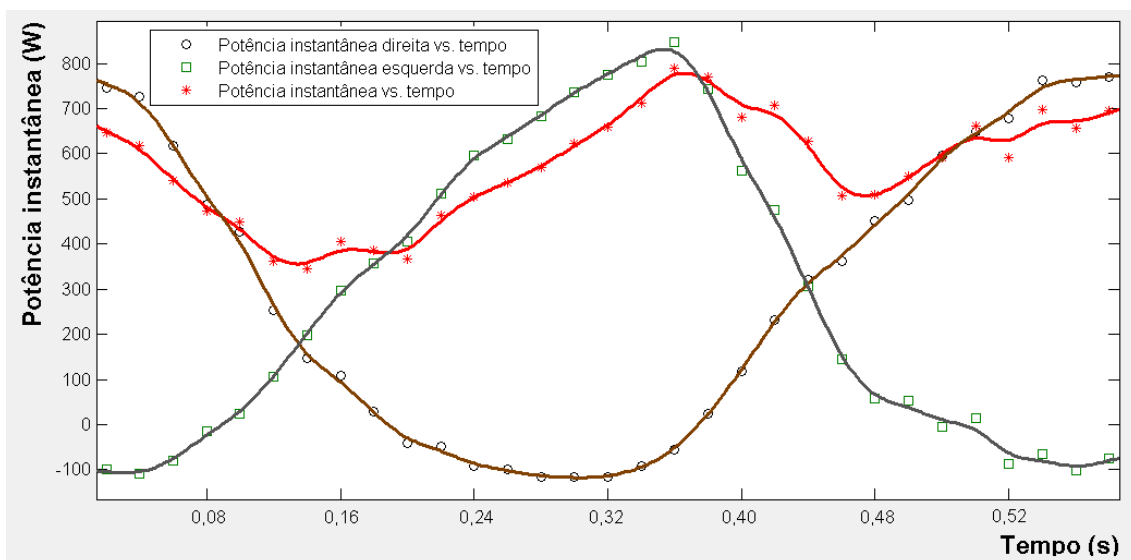


Figura 4.12: Ensaio biomecânico: análise da potência instantânea.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o principal objetivo desta pesquisa, o desenvolvimento de uma célula de carga aplicada ao ciclismo, foi satisfeito. Destaca-se o erro máximo de não-linearidade obtido, de 2,8% e 2,1% para as células direita e esquerda, respectivamente, ficando abaixo do limiar estabelecido de 5%. E também a resposta dinâmica da estrutura, cujo primeiro modo ressonante é de cerca de 340 Hz, ficando significativamente acima da frequência mais alta prevista para operação, de cerca de 80 Hz.

Norteados pelo objetivo principal descrito, os objetivos específicos foram decisivos para realização deste projeto. A análise mecânica da estrutura permitiu a célula de carga, mesmo operando em uma topologia de meia ponte, ter uma boa resposta devido a excursão do elemento sensor. O circuito condicionador pôde ser implementado e portado para um espaço reduzido e, juntamente com o sistema de aquisição sem fio, permitiu uma implementação plenamente funcional da estrutura.

Este trabalho abre perspectivas para estudos na área, permitindo a realização de ensaios biomecânicos em campo. Adicionalmente, também poderá vir a servir como base para o desenvolvimento de novos aparados.

6 TRABALHOS FUTUROS

Desenvolvimento da plataforma

A seguir serão apresentadas propostas para o desenvolvimento desta plataforma, que futuramente estará a disposição do IEE para pesquisa.

Inicialmente, sugere-se que sejam projetadas proteções capazes de isolar os componentes sensíveis do sistema a impactos. Desta maneira seria possível realizar ensaios biomecânicos sem restrições.

Também podem ser realizadas melhorias no circuito de alimentação, que atualmente conta com 4 baterias de 9V e reguladores de tensão para 5V. Selecionando-se um conjunto de pilhas ou baterias cuja tensão resultante mantenha-se entre 4,8 e 5,2V, é possível alimentar diretamente o sistema, aumentando sua autonomia e reduzindo seu peso.

A aquisição de novos extensômetros, menores que os atuais, permitiria implementar uma topologia de ponte completa, obtendo melhor resposta. Para os quatro canais implementados, seriam necessários 16 extensômetros. Sugere-se ainda que seja efetuado um procedimento de calibração mais elaborado, através de uma matriz de calibração ao invés de curvas.

A portabilidade do sistema pode ser elevada a um novo patamar utilizando-se os recursos Bluetooth SSP. É possível portar o sistema de aquisição para um celular convencional,

armazenando os dados em seu cartão microSD.

Túnel de vento virtual

Sugere-se como exemplo de aplicação o desenvolvimento de um sistema capaz de identificar o posicionamento ideal para selim e guidão, em substituição aos ensaios realizados em túneis de vento, conforme proposto pela Figura 6.2. Seria possível implementá-la através da utilização da pedivela desenvolvida como elemento capaz de medir potência (em vermelho), equipamentos videográficos identificando o ângulo entre membros (em roxo), atuadores lineares varrendo as possíveis combinações cartesianas (em verde) e de um algoritmo capaz de reproduzir o cenário em questão por dinâmica de fluidos computacionais (CFD).

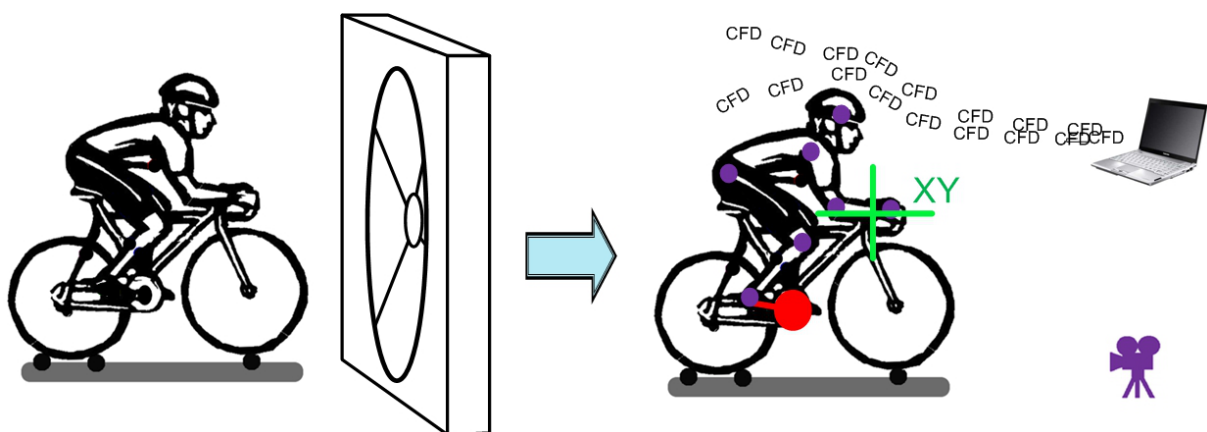


Figura 6.2: Sistema proposto.

REFERÊNCIAS

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

BAKER, M. J. **EuclideanSpace**: building a 3d world. www.euclideanspace.com: [s.n.], 2010.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 1.ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007. v.2.

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

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

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

CARPES, F. P.; ROSSATO, M.; FARIA, I. E.; MOTA, C. B. Bilateral Pedaling Asymmetry During a Simulated 40-km Cycling Time-Trial. **The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness**, [S.l.], v.47, p.45–51, 2008.

DIEFENTHAELER, F.; VAZ, M. A. Aspectos Relacionados à Fadiga Durante o Ciclismo: uma abordagem biomecânica. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, [S.l.], v.14, n.5, p.472–477, 2008.

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

GREGOR, R. J. Biomechanics of Cycling. **Exercise and Sport Science**, [S.l.], 2000.

HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements Using Strain Gages**. 1.ed. Alsbach, Alemanha: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989.

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

HULL, M. L.; GONZALEZ, H. Multivariable Optimization of Cycling Biomechanics. **Journal of Biomechanics**, [S.l.], v.22, p.15–41, 1989.

HULL, M. L.; GONZALEZ, H. K. The Effect of Pedal Platform Height on Cycling Biomechanics. **International Journal of Sport Biomechanics**, [S.l.], v.6, n.1, p.1–17, 1990.

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

KONINCKX, E.; LEEMPUTTE, M. V.; HESPEL, P. Effect of a Novel Pedal Design on Maximal Power Output and Mechanical Efficiency in Well Trained Cyclists. **Journal of Sports Sciences**, [S.l.], v.26, n.1, p.1015–1023, 2008.

LAZZARI, C. D.; BORGES, G. M.; MACEDO, R. B. **Relatório Final da disciplina Instrumentação A: célula de carga aplicada ao ciclismo**. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

MORIN, J.-B.; BELLI, A. A Simple Method for Measurement of Maximal Downstroke Power on Friction-Loaded Cycle Ergometer. **Journal of Biomechanics**, [S.l.], v.37, p.141–145, 2004.

MORNIEUX, G.; GUENETTE, J. A.; SHEEL, W. A.; SANDERSON, D. J. Influence of Cadence, Power Output and Hypoxia on the Joint Moments Distribution During Cycling. **European Journal of Applied Physiology**, [S.l.], v.102, p.11–18, 2007.

NEPTUNE, R.; HERZOG, W. Adaptation of Muscle Coordination to Altered Task Mechanics During Steady-State Cycling. **Journal of Biomechanics**, [S.l.], v.33, p.165–172, 2000.

NEPTUNE, R. R.; BOGERT, A. J. van den. Standard Mechanical Energy Analyses Do Not Correlate With Muscle Work in Cycling. **Journal of Biomechanics**, [S.l.], v.31, p.239–245, 1998.

RN-41 - Class 1 Bluetooth Module. Roving Networks. www.rovingnetworks.com: [s.n.], 2009.

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

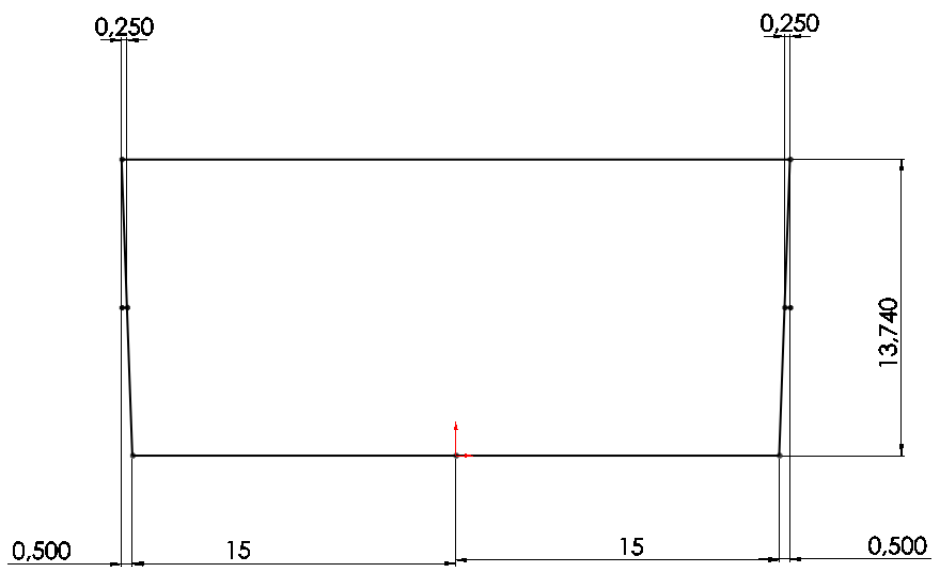
SMAK, W.; NEPTUNE, R.; HULL, M. The Influence of Pedaling Rate on Bilateral Asymmetry in Cycling. **Journal of Biomechanics**, [S.l.], v.32, n.899-906, p.1–17, 1999.

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

WOOLLES, A. L.; ROBINSON, A. J.; KEEN, P. S. A Static Method for Obtaining a Calibration Factor for SRM Bicycle Power Cranks. **Sports Engineering**, [S.l.], v.8, p.137–144, 2005.

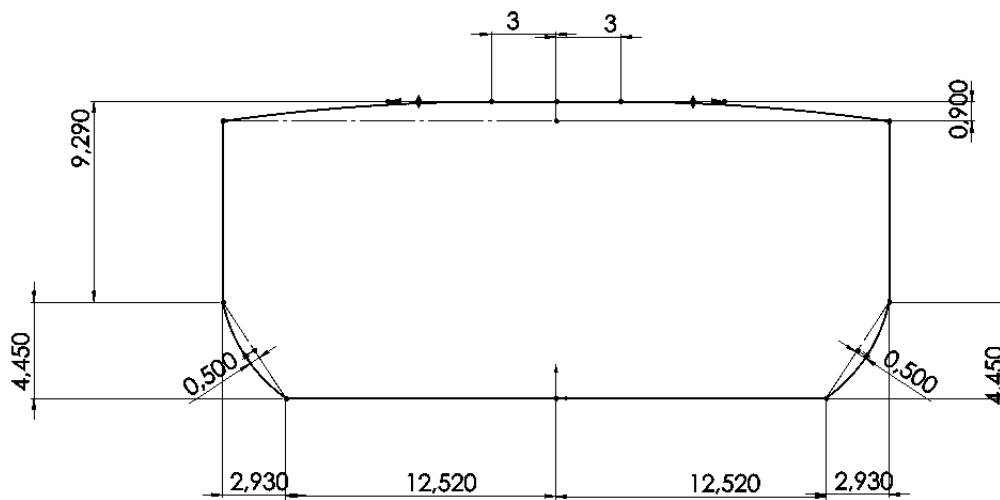
ANEXO A PERFIS DO MODELO

As Figuras A.1 à A.15 ilustram os perfis reconstruídos ao longo da peça.



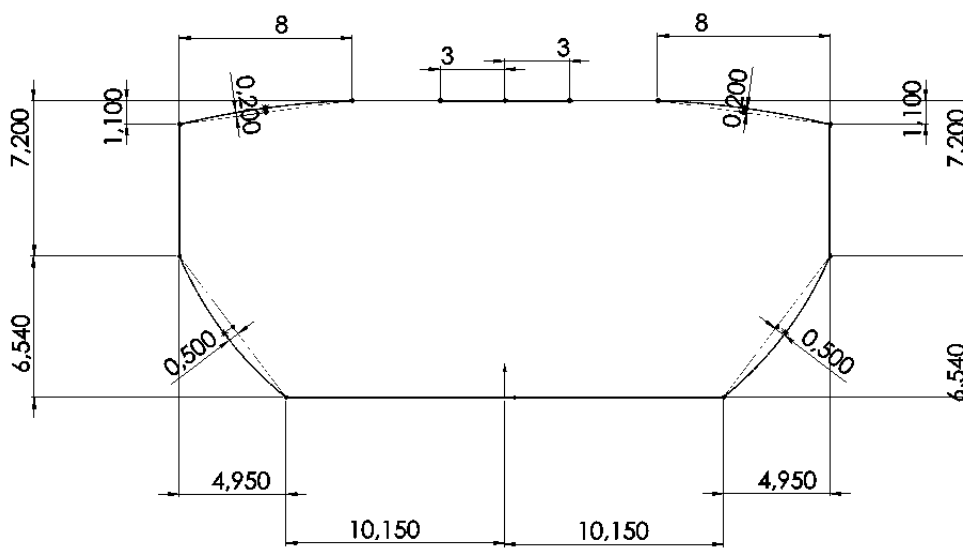
*Todas dimensões em mm

Figura A.1: Perfil à 0 mm.



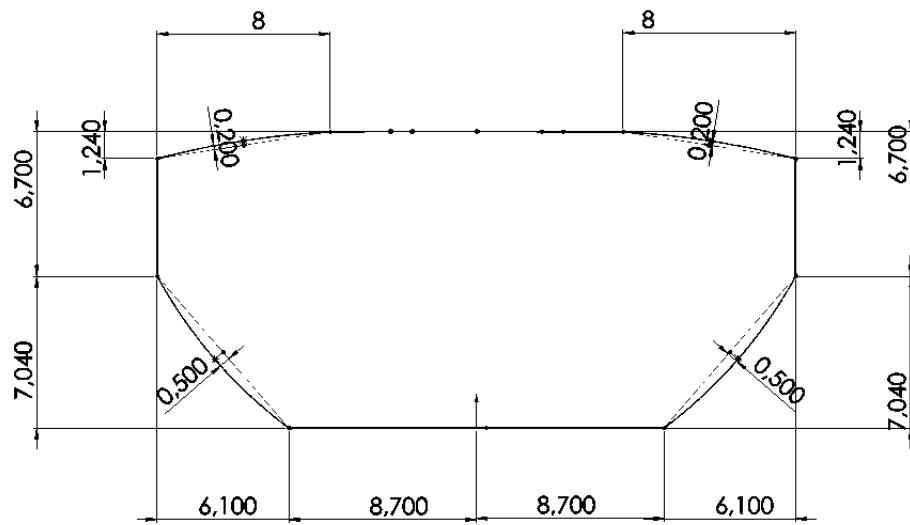
*Todas dimensões em mm

Figura A.2: Perfil à 10 mm.



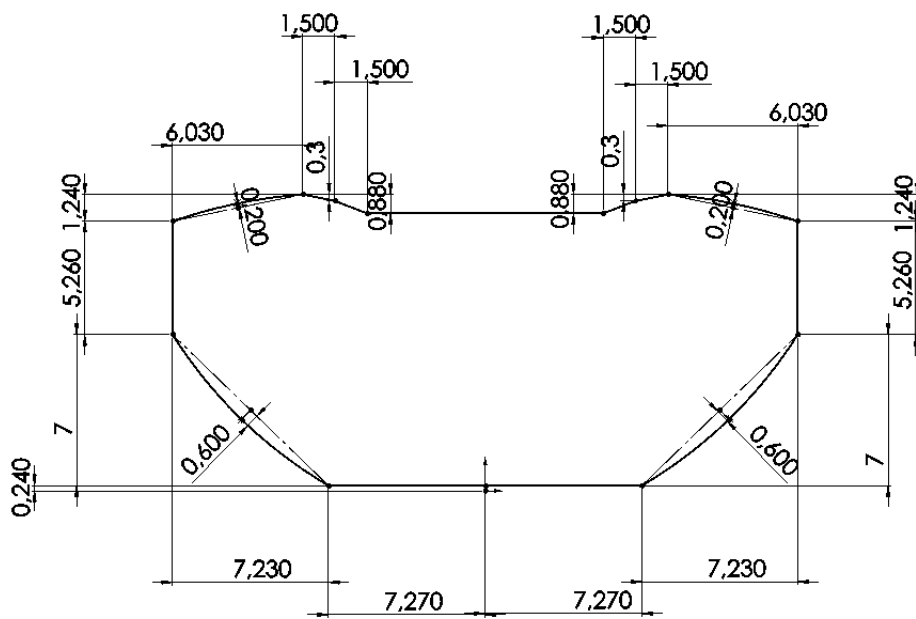
*Todas dimensões em mm

Figura A.3: Perfil à 20 mm.



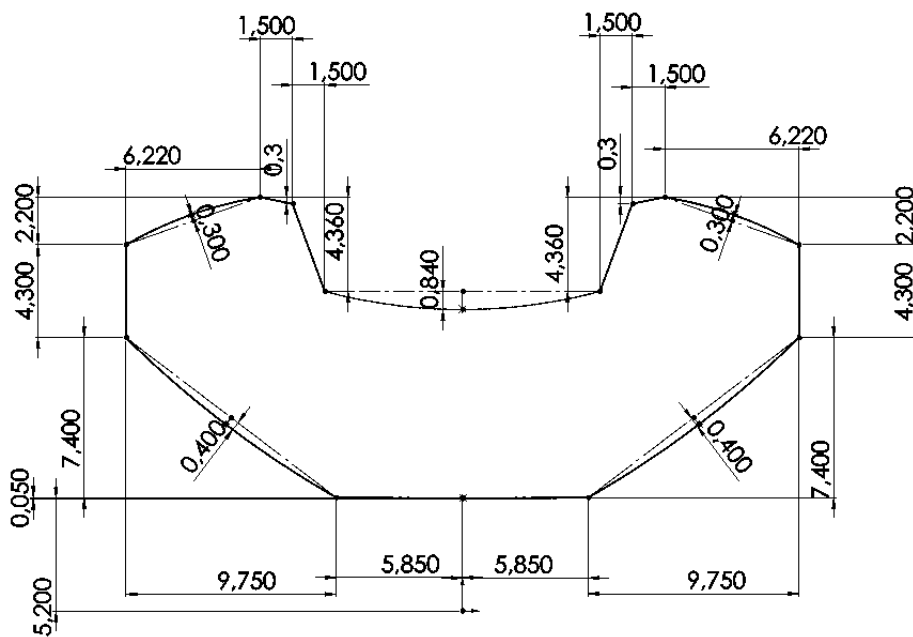
*Todas dimensões em mm

Figura A.4: Perfil à 25 mm.



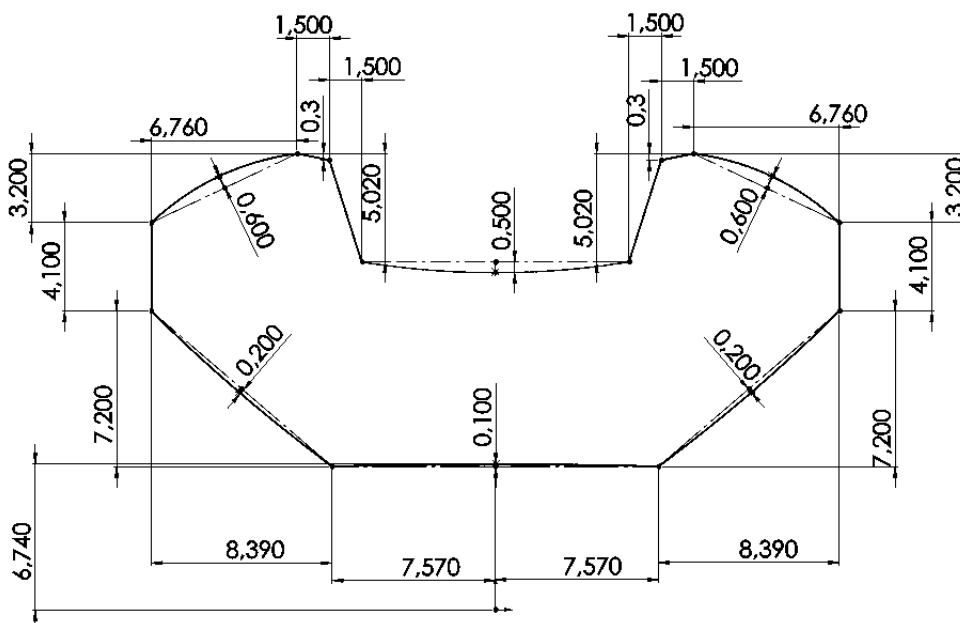
*Todas dimensões em mm

Figura A.5: Perfil à 30 mm.



*Todas dimensões em mm

Figura A.14: Perfil à 120 mm.



*Todas dimensões em mm

Figura A.15: Perfil à 130 mm.

ANEXO B ENSAIOS ESTÁTICOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

As Figuras B.1 B.2 B.3 B.4 B.5 B.6 apresentam os resultados dos ensaios de tensão e deformação para as diferente cargas aplicadas.

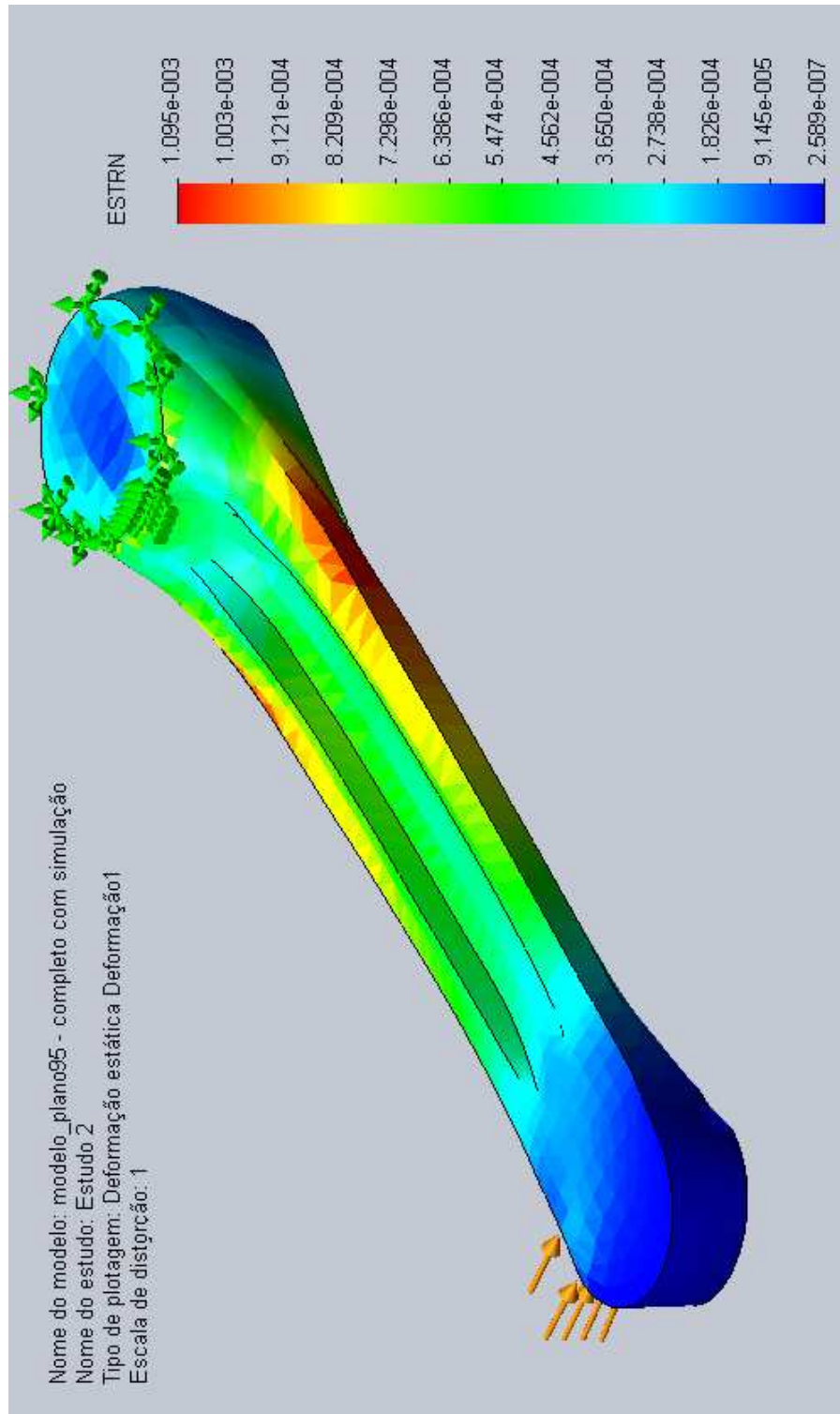


Figura B.1: Esforço normal ao eixo longitudinal: deformação.

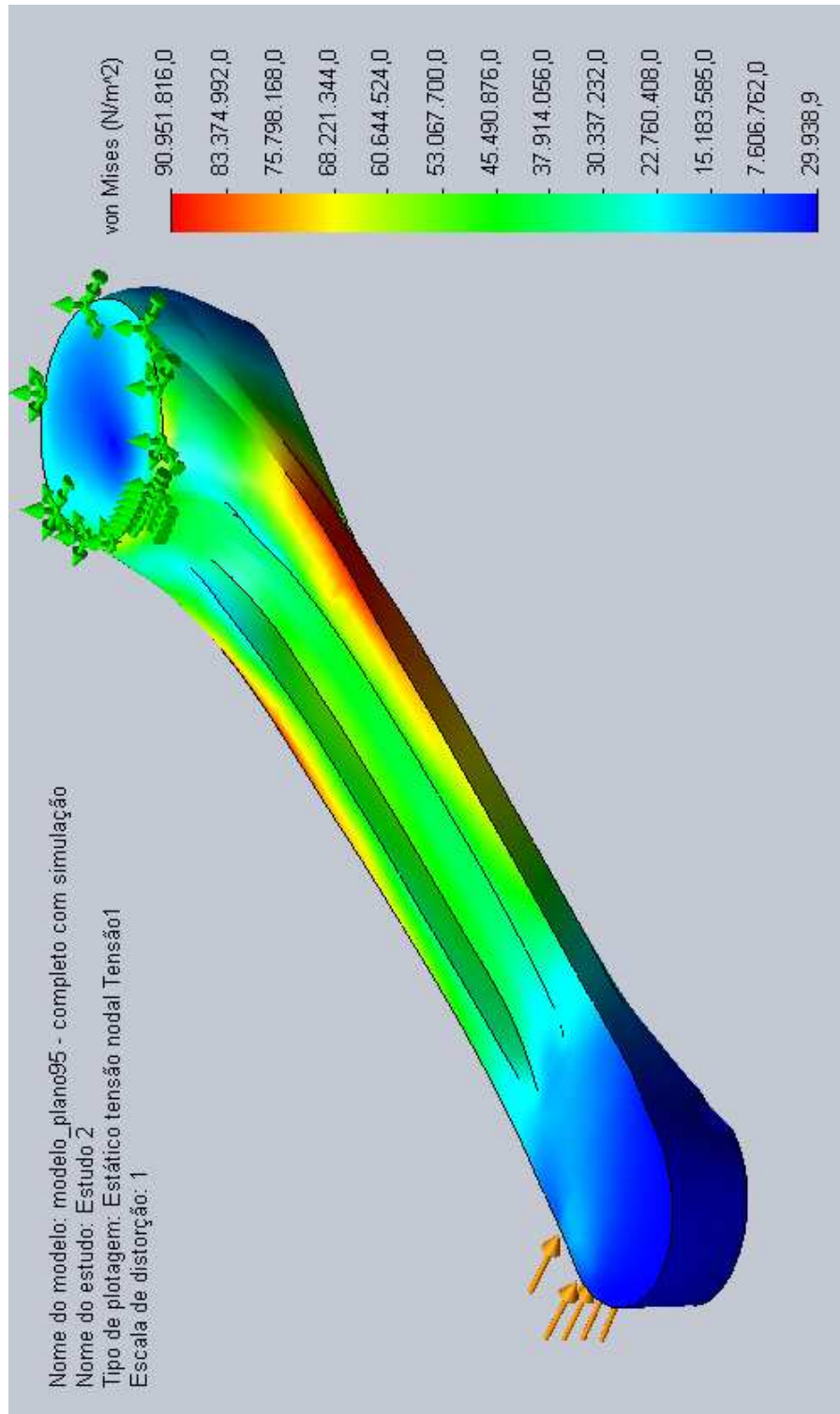


Figura B.2: Esforço normal ao eixo longitudinal: tensão.

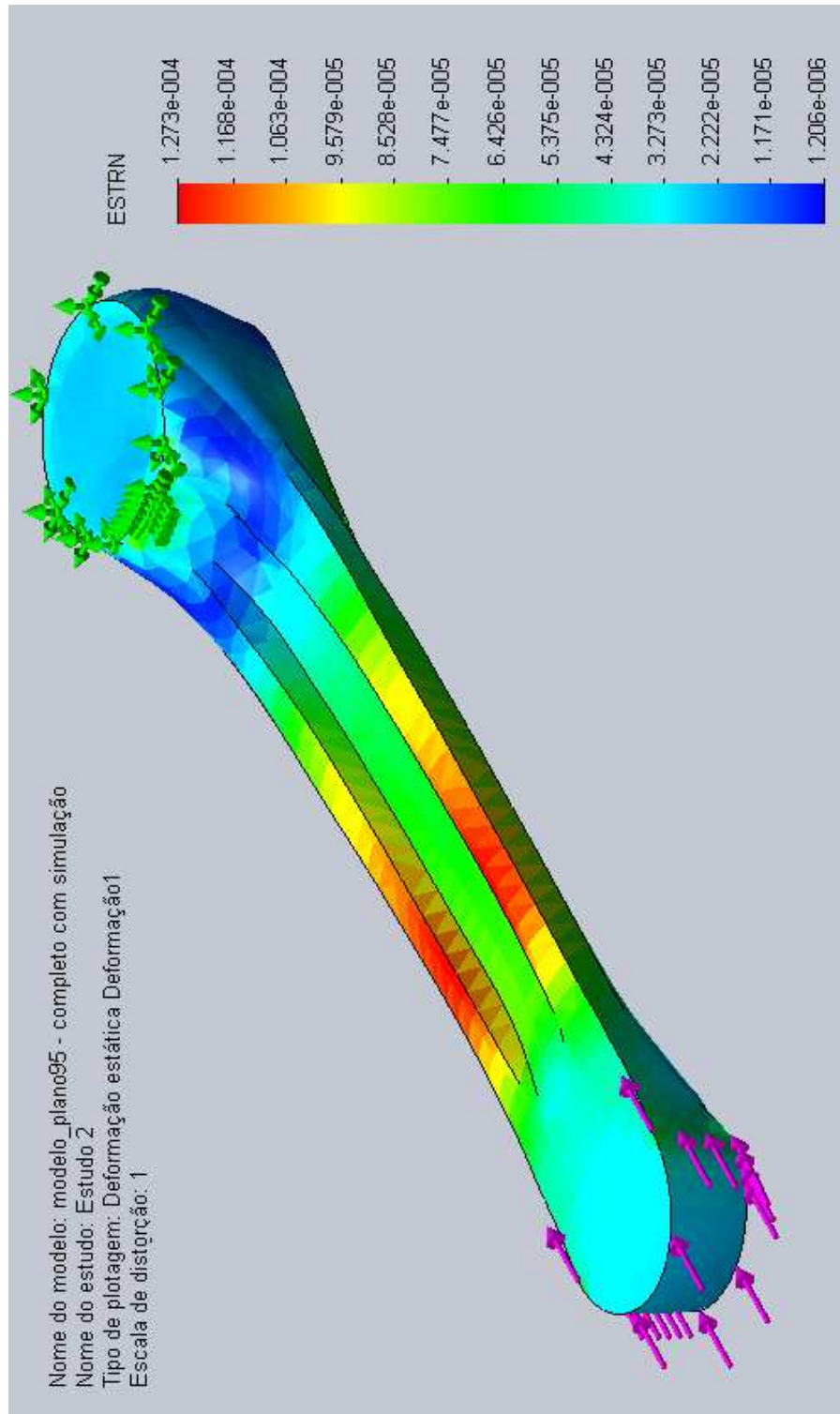


Figura B.3: Esforço de compressão: deformação.

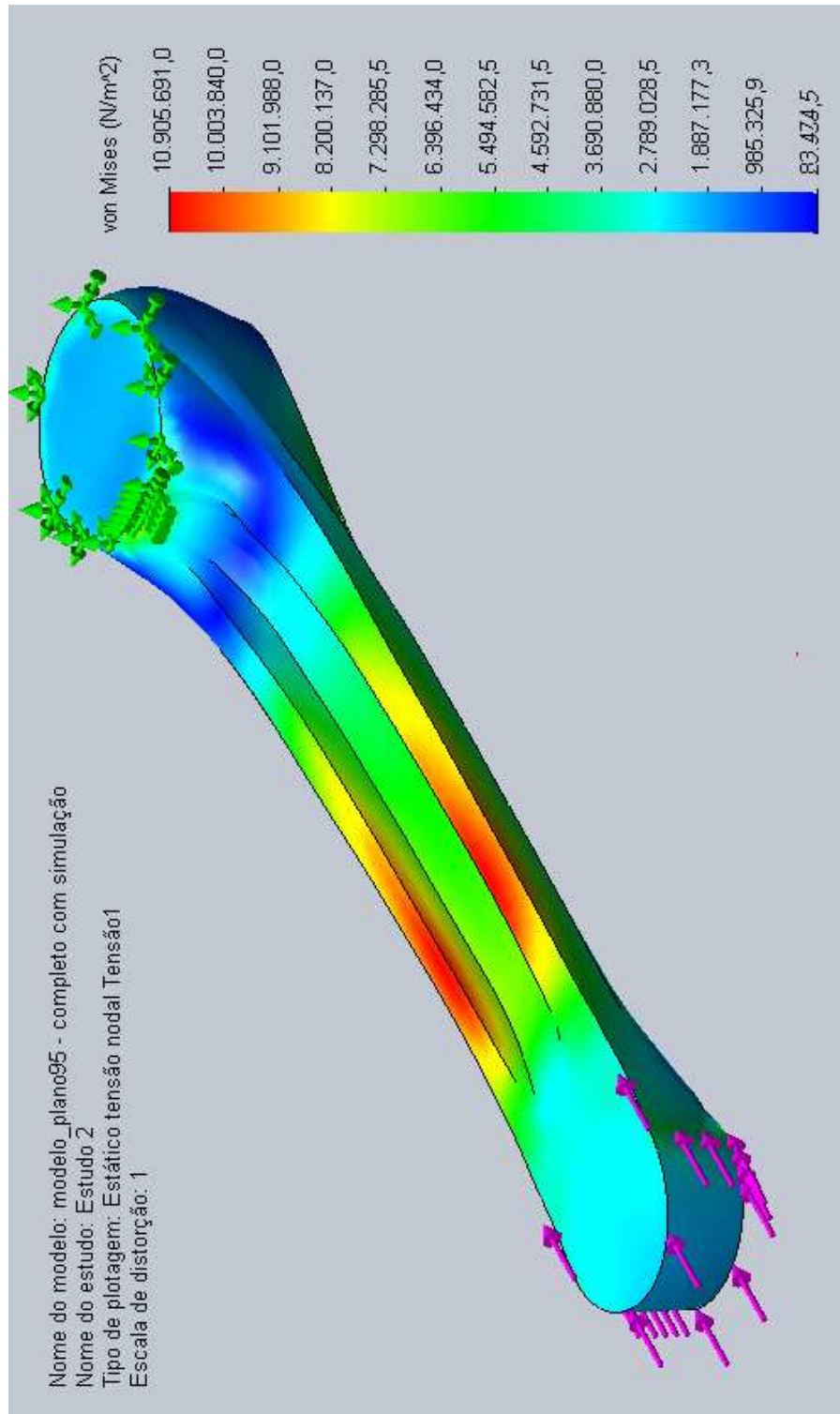


Figura B.4: Esforço de compressão: tensão.

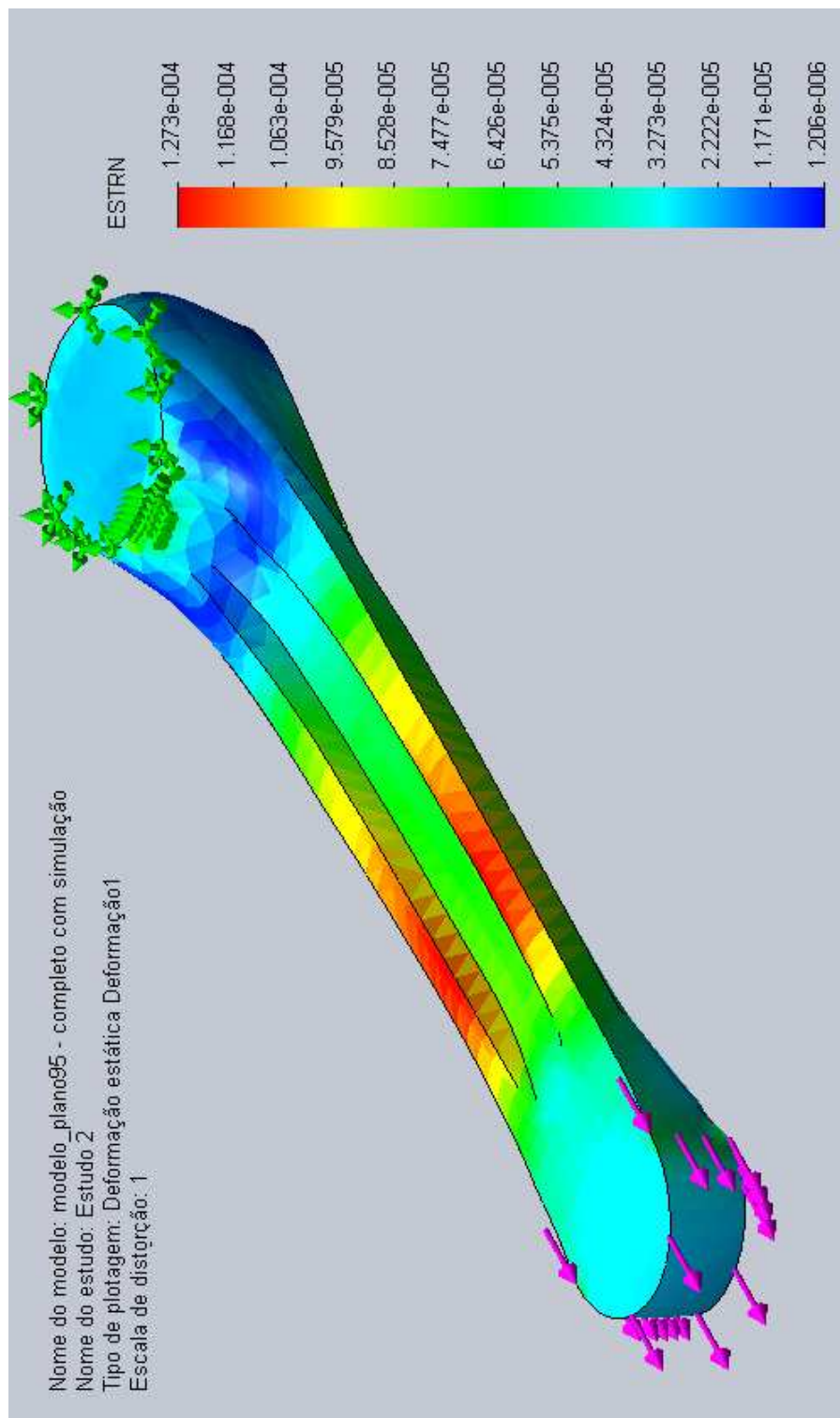


Figura B.5: Esforço de tração: deformação.

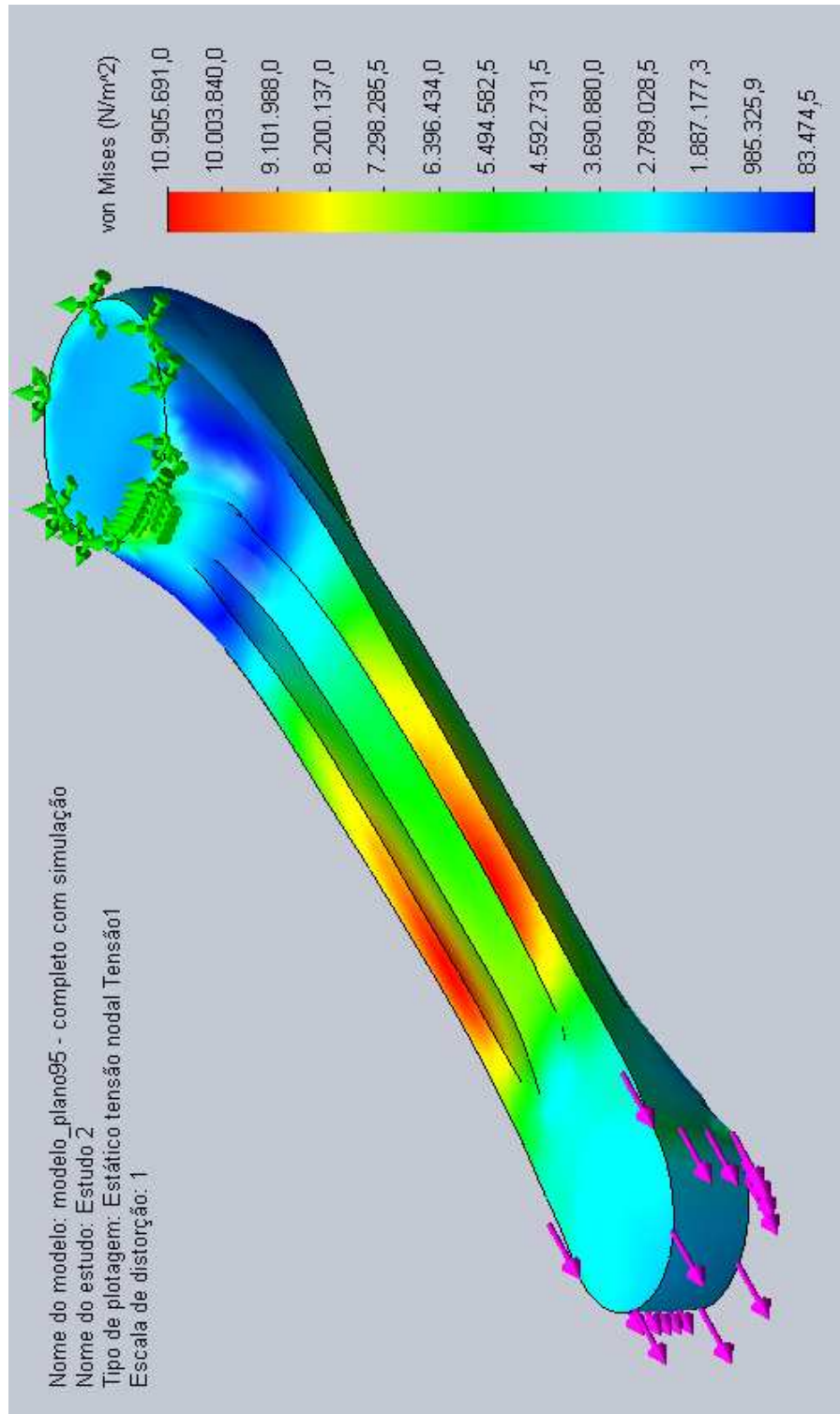


Figura B.6: Esforço de tração: tensão.

ANEXO C ENSAIOS DINÂMICOS DE VIBRAÇÃO

As figuras C.1, C.2, C.3, C.4 e C.5 apresentam o perfil das deformações provocadas pela excitação em seus respectivos modos de vibração.

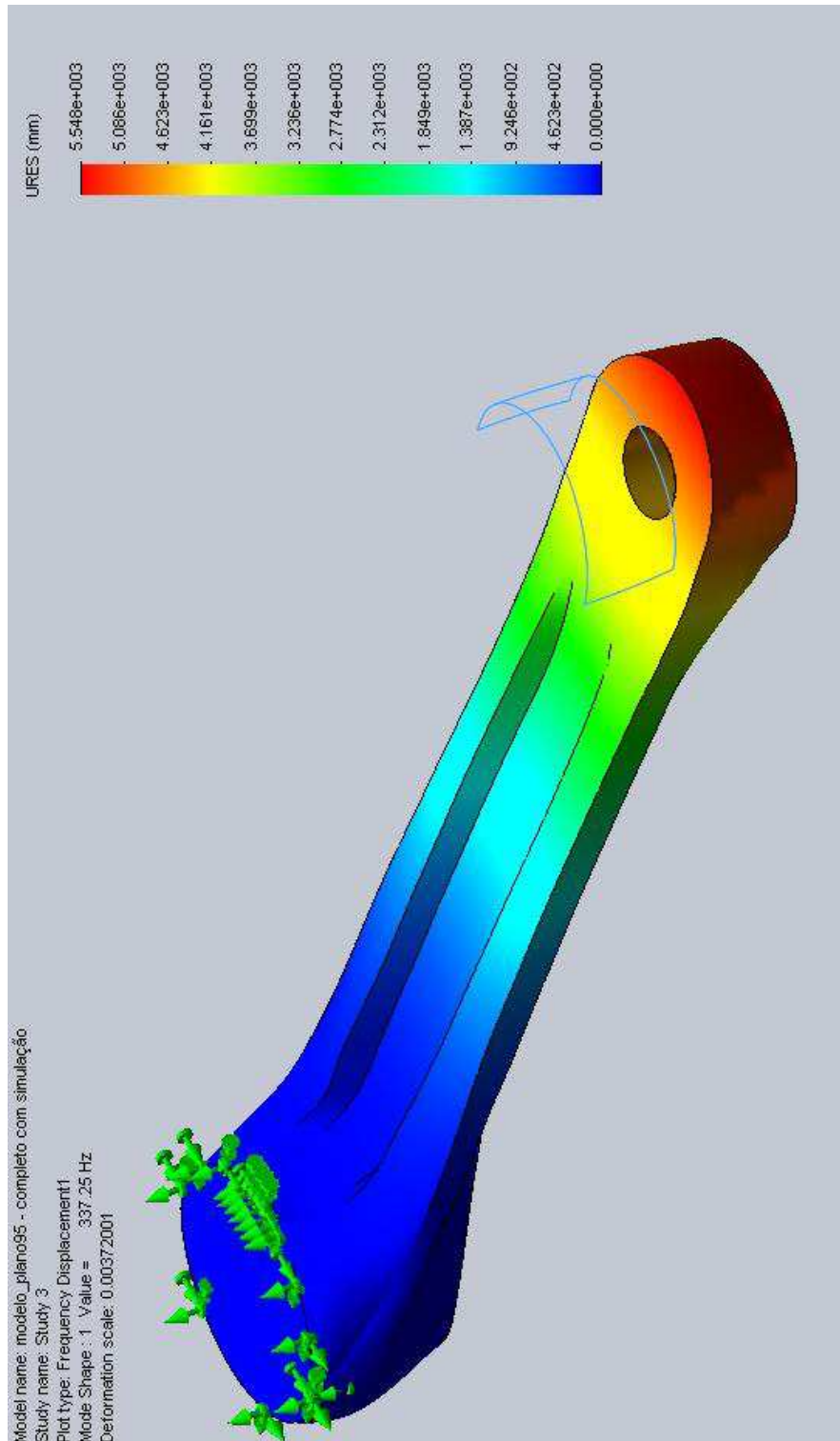


Figura C.1: Ensaio dinâmico de ressonância: modo 1.

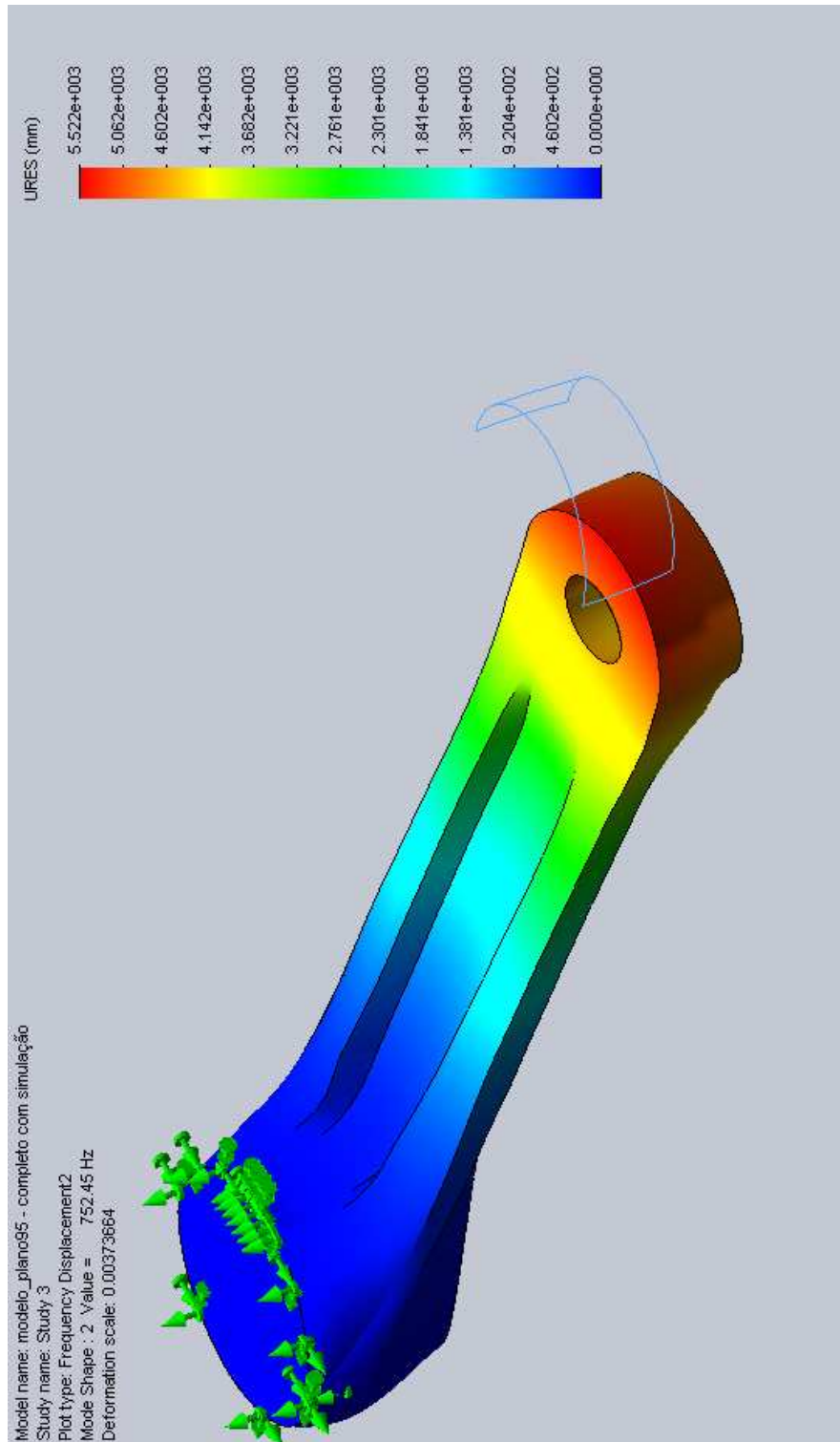


Figura C.2: Ensaio dinâmico de ressonância: modo 2.

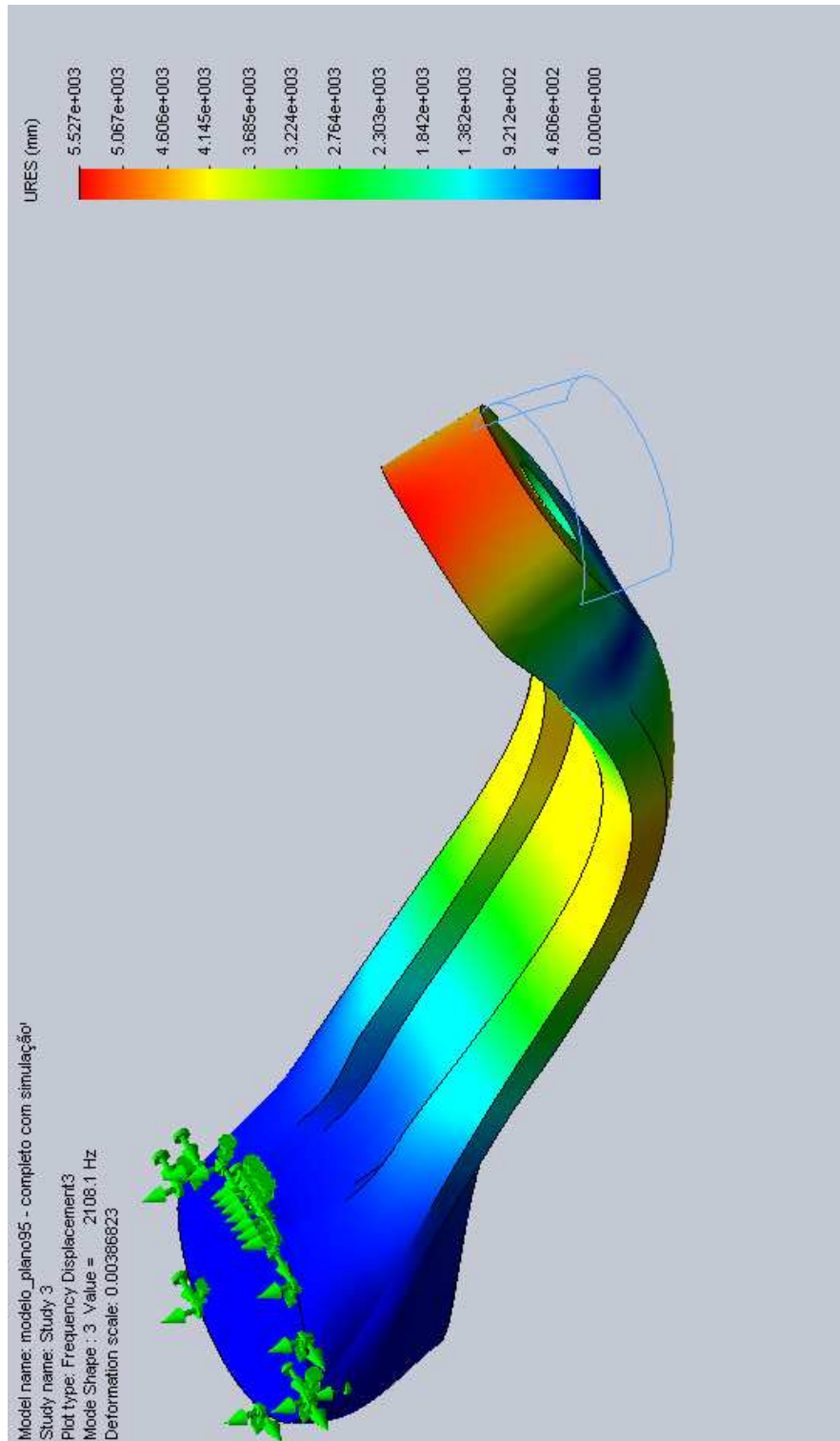


Figura C.3: Ensaio dinâmico de ressonância: modo 3.

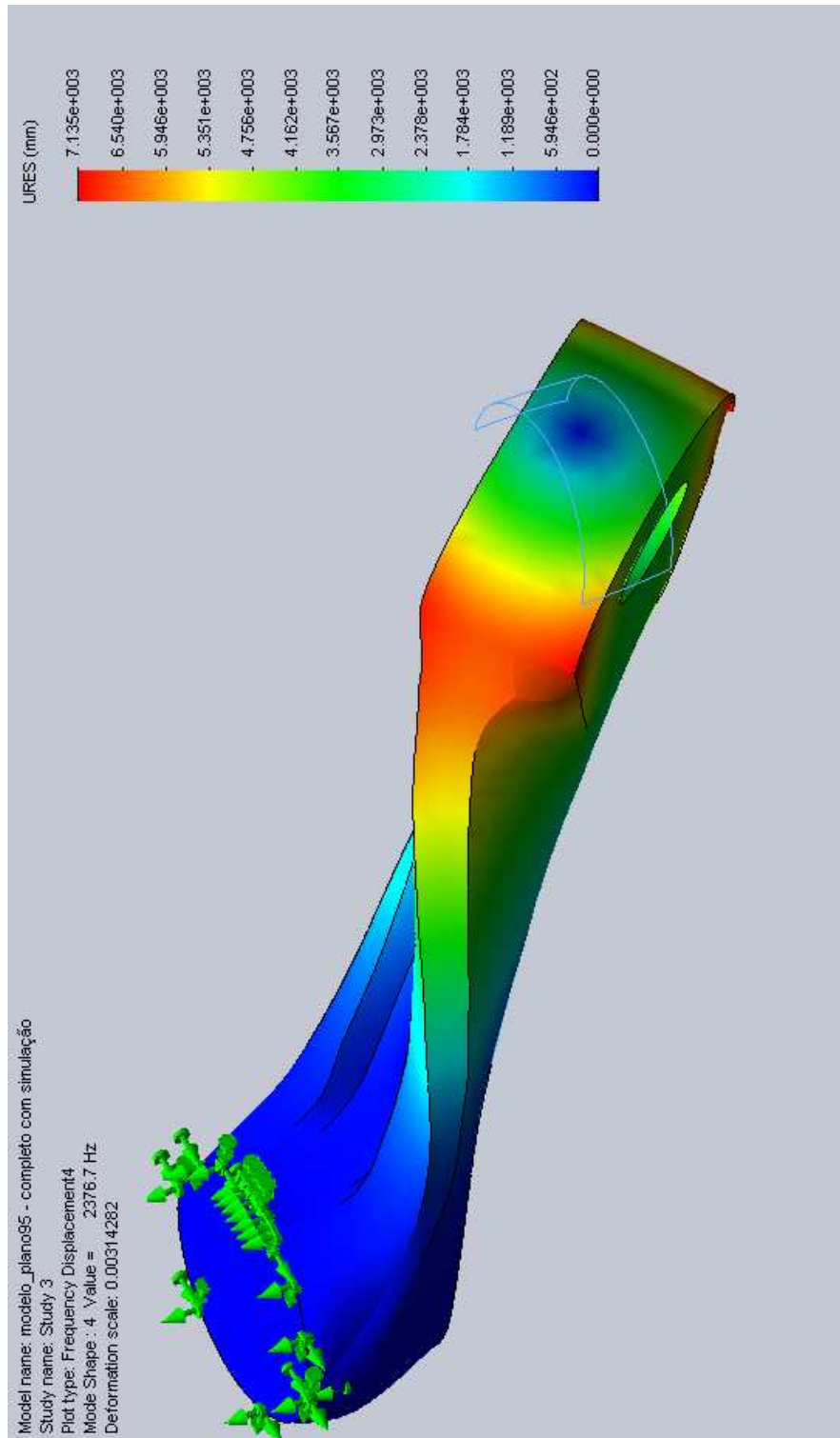


Figura C.4: Ensaio dinâmico de ressonância: modo 4.

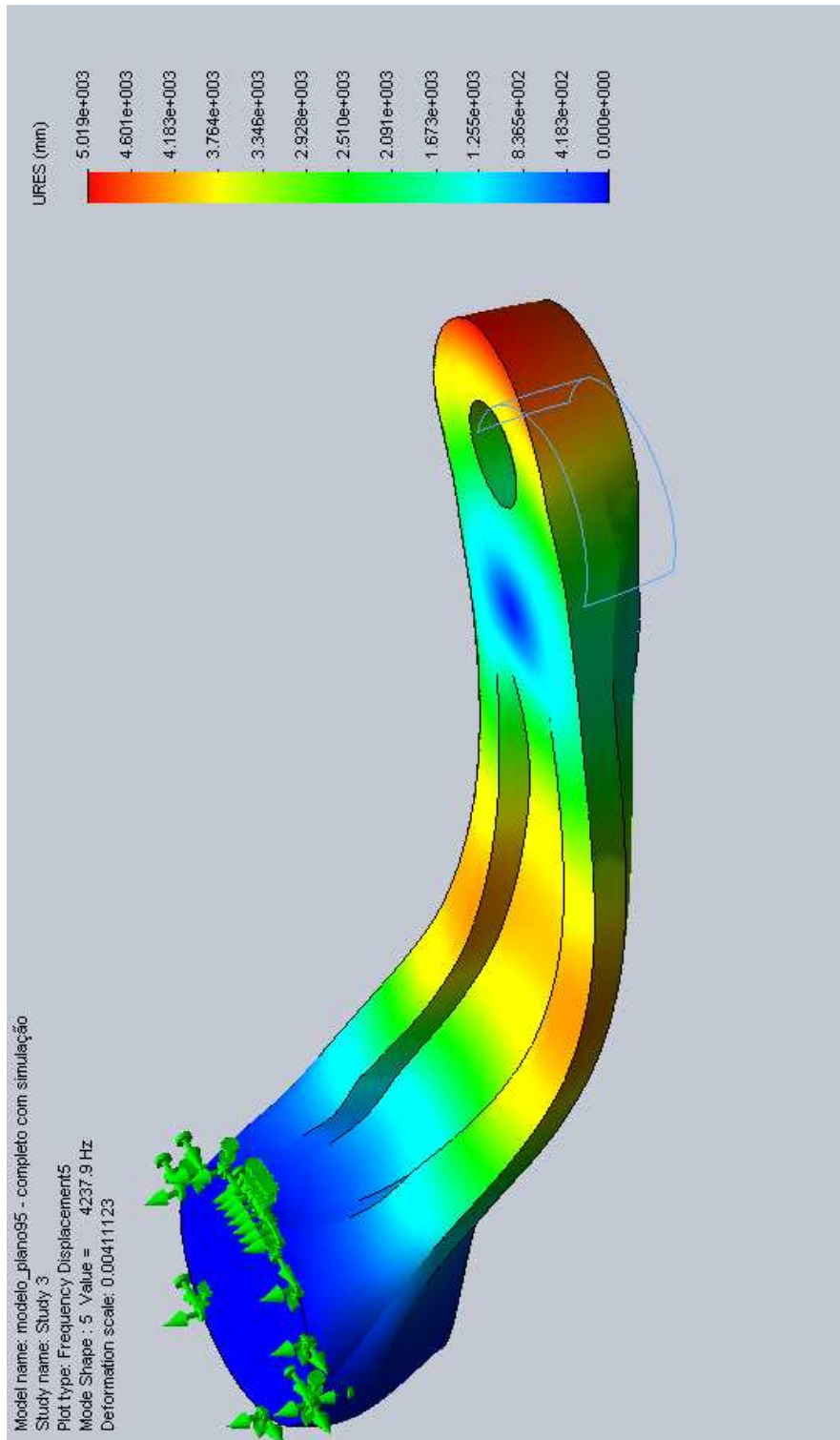


Figura C.5: Ensaio dinâmico de ressonância: modo 5.

ANEXO D PROJETO DE EXPERIMENTOS - ANOVA

A Tabela D.1 apresenta os resultados da análise de variância realizada, sendo que seu cálculo intermediário pode ser verificado na Tabela D.2.

Tabela D.1: Resultados do Projeto de Experimentos.

ANOVA						
Fonte de Variação	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Grupos (Células 1 e 2)	6,37E+03	1	6,37E+03	1,10E+03	8,87E-44	3,98
Carga (kgf)	3,21E+05	16	2,01E+04	3,48E+03	1,91E-92	1,79
Interação	1,96E+03	16	1,22E+02	2,12E+01	2,39E-20	1,79
Interna	3,92E+02	68	5,76E+00	x	x	x
Total	3,30E+05	101	x	x	x	x

Tabela D.2: Procedimento ANOVA.

Procedimento para ANOVA: Dois fatores à 17 níveis com três repetições

C=0kgf C=3kgf C=5kgf C=8kgf C=10kgf C=13kgf C=15kgf C=18kgf C=20kgf C=23kgf C=25kgf C=28kgf C=30kgf C=33kgf C=35kgf C=38kgf C=40kgf Total

<i>Célula1</i>																	
Contagem	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	51
Soma	903,0	954,0	981,0	1030,0	1056,0	1105,0	1134,0	1179,0	1205,0	1257,0	1279,0	1327,0	1351,0	1405,0	1426,0	1464,0	20554,0
Média	301,0	318,0	327,0	343,3	352,0	368,3	378,0	393,0	401,7	419,0	426,3	442,3	450,3	468,3	475,3	488,0	403,0
Variância	1,0	1,0	1,0	0,3	1,0	10,3	7,0	4,0	2,3	7,0	1,3	5,3	1,3	1,3	6,3	19,0	3728,5
<i>Célula2</i>																	
Contagem	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	51
Soma	901,0	944,0	968,0	1006,0	1033,0	1073,0	1095,0	1132,0	1162,0	1203,0	1221,0	1256,0	1284,0	1322,0	1350,0	1387,0	19748,0
Média	300,3	314,7	322,7	335,3	344,3	357,7	365,0	377,3	387,3	401,0	407,0	418,7	428,0	440,7	450,0	462,3	387,2
Variância	0,3	0,3	0,3	1,3	1,3	0,3	1,0	1,3	2,3	1,0	16,0	4,3	13,0	20,3	16,0	16,3	2738,1
<i>Total</i>																	
Contagem	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Soma	1804,0	1898,0	1949,0	2036,0	2089,0	2178,0	2229,0	2311,0	2367,0	2460,0	2500,0	2583,0	2635,0	2727,0	2776,0	2851,0	2909,0
Média	300,7	316,3	324,8	339,3	348,2	363,0	371,5	385,2	394,5	410,0	416,7	430,5	439,2	454,5	462,7	475,2	484,8
Variância	0,7	3,9	6,2	19,9	18,6	38,4	53,9	75,8	63,5	100,4	119,1	171,9	155,4	238,3	201,5	211,8	264,6

ANEXO E ROTINA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

A seguir é apresentada a rotina escrita em linguagem C, desenvolvida pra o microcontrolador Microchip PIC16f877A, a ser processada com o compilador CCS.

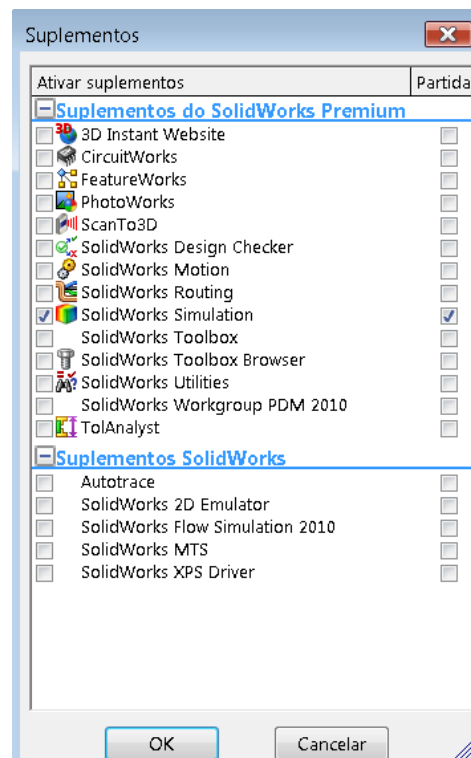
```
include <16F877A.h>
fuses HS,NOWDT
device ADC=10 // A define a resolução do ADC utilizado para 10 bits
use delay(clock=20000000) // 20MHz
use rs232(baud=57600, UART1) //taxa de 57600bps
void main() {
    int16 i, value0, value1, value2, value3;
    float Vlido0, Vlido1, Vlido2, Vlido3;
    printf("Amostrando, 4 canais, VREF=0,6V :");
    setup_adc_ports(AN0_AN1_AN2_AN4_VSS_VREF);
    //configura para 4 canais e tensão de referência
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32); //
    delay_ms(50); //(50) 50ms = 20Hz //(10) 10ms = 100Hz
    do {
        delay_ms(48);//
        set_adc_channel( 0 );
        delay_us(20);
        value0 = read_adc();
        set_adc_channel( 1 );
        delay_us(20);
        value1 = read_adc();
        set_adc_channel( 2 );
        delay_us(20);
        value2 = read_adc();
        set_adc_channel( 4 );
        delay_us(20);
        value3 = read_adc();
        Vlido0=(float)value0;
        Vlido1=(float)value1;
        Vlido2=(float)value2;
        Vlido3=(float)value3;
        printf(" \f \n ");
        //Quebra de linha, identificando nova amostra
        printf("\n % 3.0f",Vlido0);
        printf("\n % 3.0f",Vlido1);
        printf("\n % 3.0f",Vlido2);
```

```
        printf("\n % 3.0f",Vlido2);  
    } while (TRUE);  
}
```

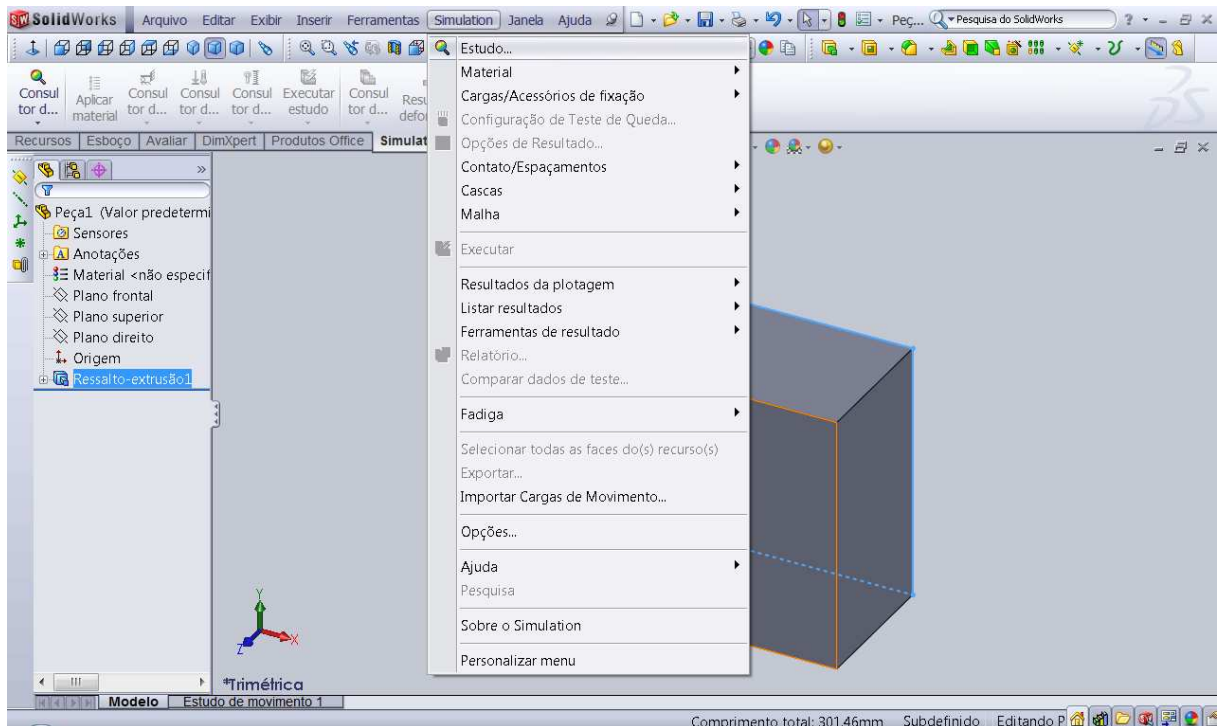
ANEXO F GUIA PARA EFETUAR ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS NO SOLIDWORKS 2010

A seguir será descrito brevemente o processo necessário para realização dos ensaios estáticos e dinâmicos, através da utilização do suplemento Solidworks Simulation Premium 2010. Este suplemento, evolução da ferramenta CosmosWorks, é disponibilizado juntamente com a licença Premium do SolidWorks.

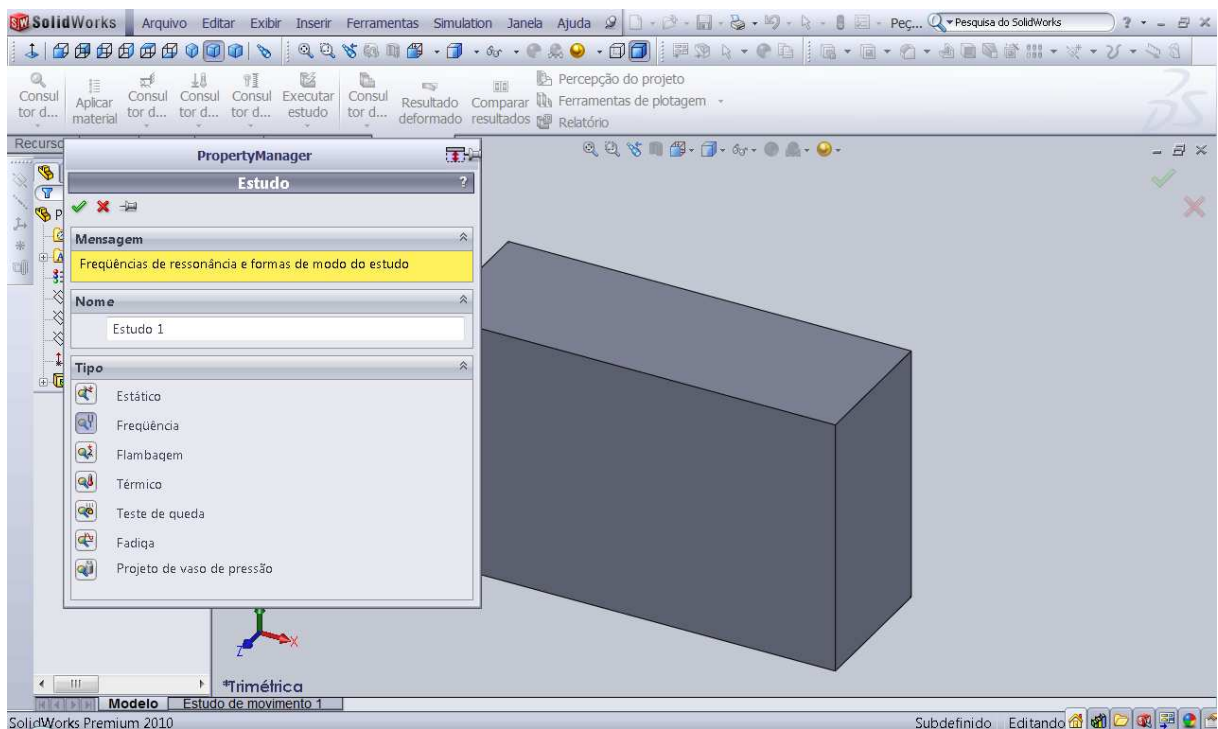
Para ativa-la, certificando-se que a mesma esteja instalada, basta acessar o menu Ferramentas > Suplementos. Marcando em seguida o campo *Partida* para o suplemento, fazendo com que este passe a ser iniciado regularmente no ambiente SolidWorks.



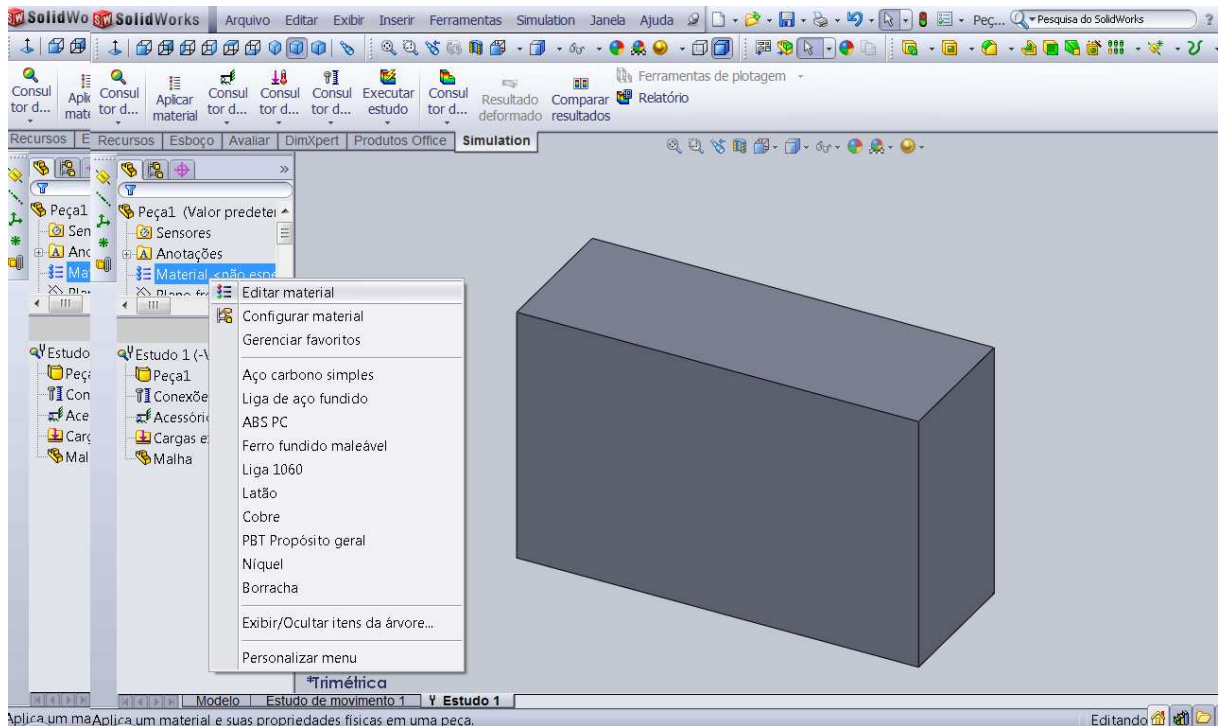
Inicia-se o estudo através do menu: Simulation> Estudo.



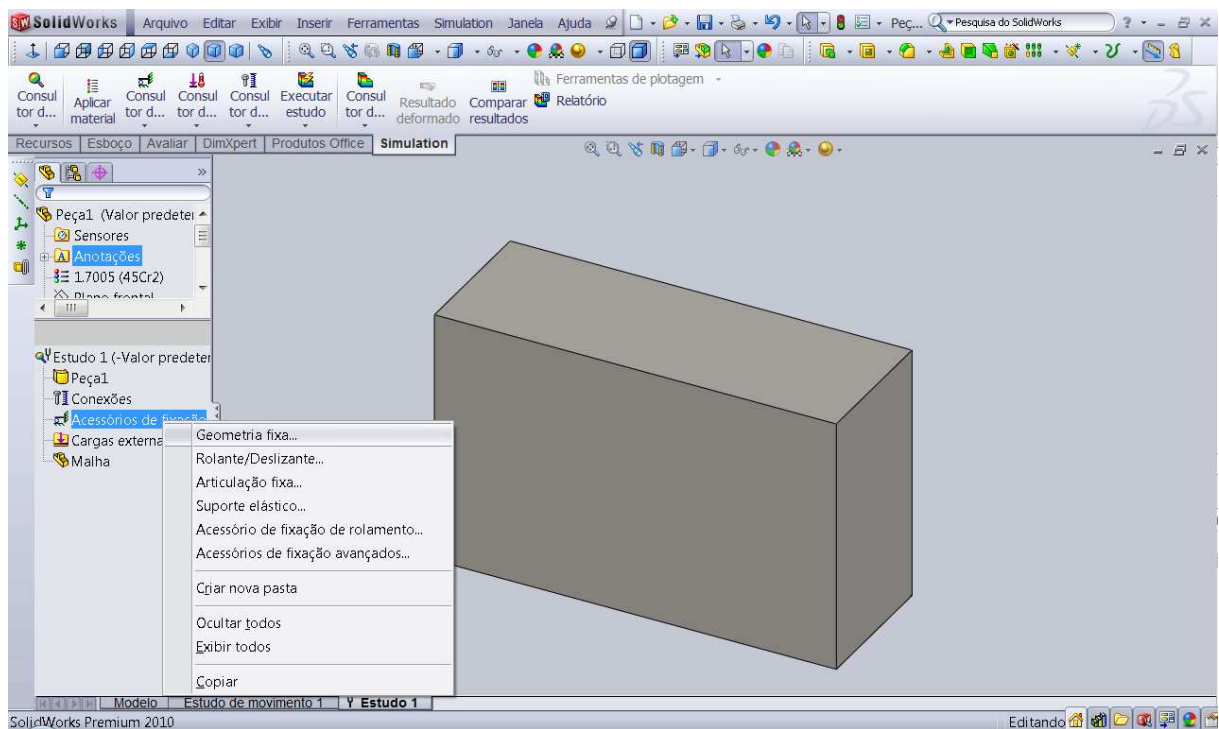
Em seguida é possível escolher entre vários tipos de estudo. Por exemplo, o estudo *Estático* permite avaliar as tensões e deformações para a peça. Já o estudo *Frequência* permite avaliar as frequências de ressonâncias da peça, assim como suas formas modais de deformação.



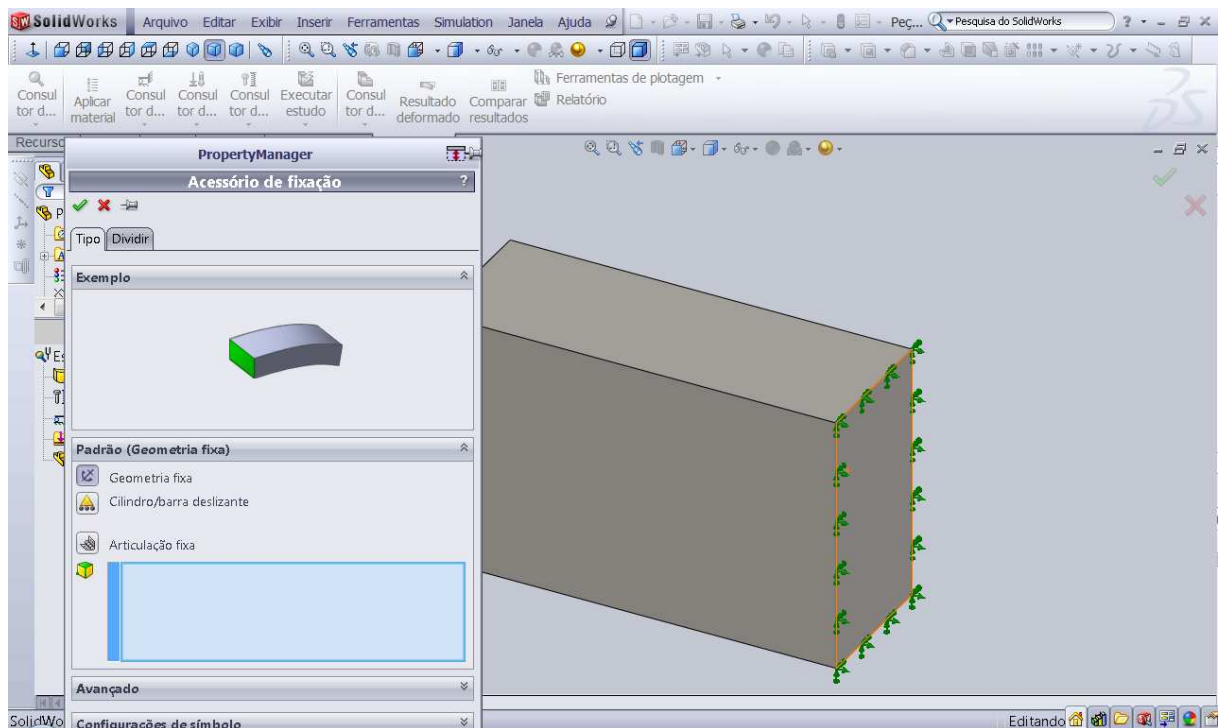
Uma vez escolhido o tipo de estudo, é necessário aplicar o material, clicando com o botão direito encima de *Material* e, em seguida, em *Editar Material* no menu subsequente.



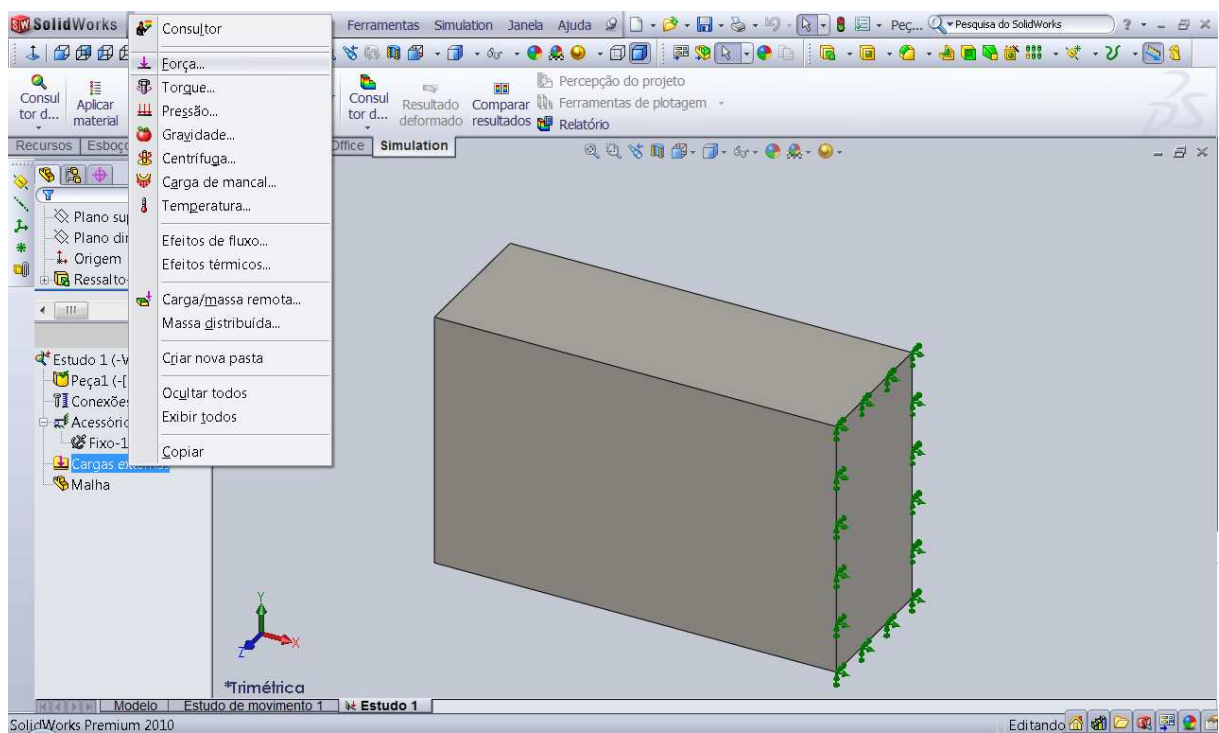
Agora é necessário definir o tipo de engaste, clicando com o botão direito em cima de *Acessórios de fixação*, neste caso optou-se por uma *Geometria fixa*,



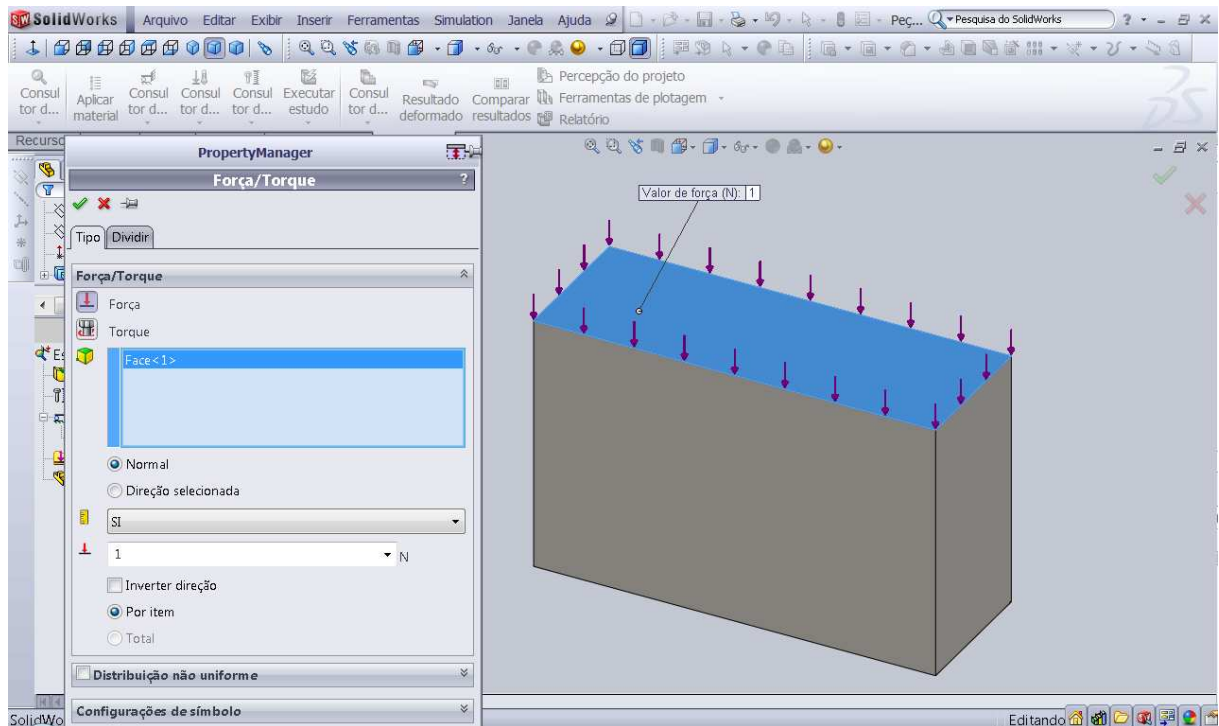
escolhendo então a face à ser engastada.



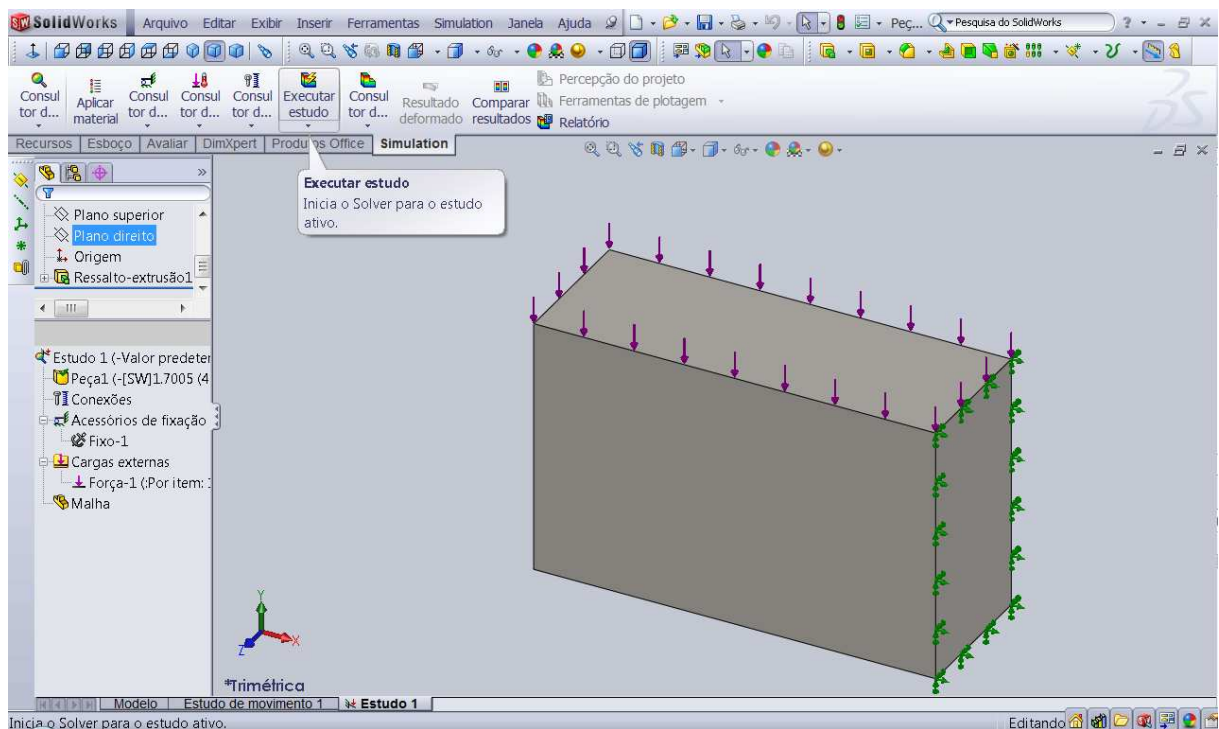
A seguir aplicam-se as cargas as quais a estrutura está submetida, clicando-se com o botão direito acima de *Cargas externas* e, em seguida,



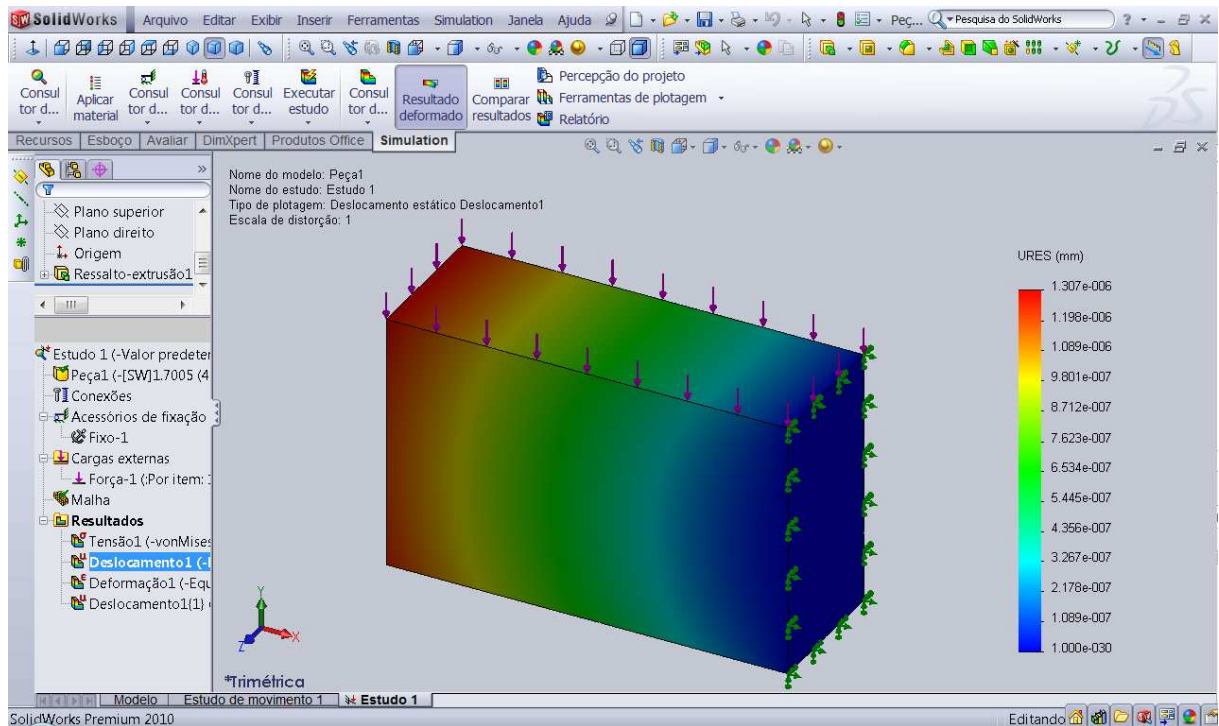
seleciona-se a face à qual a força está aplicada e sua distribuição, direção, sentido e módulo.



Repete-se os procedimentos anteriores, caso necessário, até que todos elementos de fixação e carregamentos estejam contemplados. Finalizando, basta clicar em *Executar estudo*.



Obtém-se então o resultado desejado, de acordo com o tipo de estudo,



sendo que estes podem ser fornecidos de maneira compacta e objetiva através do recurso *Relatório*.

