



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE FÍSICA

GUSTAVO LOURENÇO SILVA GALVÃO

**Dimensionamento sensorial para o
desenvolvimento de um protótipo
funcional modular para a análise de
grãos**

Goiânia
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE FÍSICA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Gustavo Lourenço Silva Galvão

Título do trabalho: Dimensionamento sensorial para o desenvolvimento de um protótipo funcional modular para a análise de grãos

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Luis Miguel Gomes Abegao, Coordenador**, em 08/09/2023, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Lourenço Silva Galvão, Discente**, em 11/09/2023, às 08:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

GUSTAVO LOURENÇO SILVA GALVÃO

Dimensionamento sensorial para o desenvolvimento de um protótipo funcional modular para a análise de grãos

Trabalho de Conclusão apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Física do Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Área de concentração: Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Luis Miguel Gomes Abegão

Goiânia
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Galvão, Gustavo Lourenço Silva
Dimensionamento sensorial para o desenvolvimento de um protótipo funcional modular para a análise de grãos [manuscrito] / Gustavo Lourenço Silva Galvão. - 2023.
60 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Luis Miguel Gomes Abegão.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Física (IF), Engenharia Física, Goiânia, 2023.

Bibliografia.

Inclui siglas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Células de carga. 2. Extensômetros. 3. MEF. I. Abegão, Luis Miguel Gomes, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE FÍSICA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 25 dias do mês de agosto do ano de 2023 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Dimensionamento sensorial para o desenvolvimento de um protótipo funcional modular para a análise de grãos**”, de autoria de **Gustavo Lourenço Silva Galvão**, do curso de **Engenharia Física**, do(a) Instituto de Física da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo(a) **Prof. Dr. Luis Miguel Gomes Abegão**, IF-UFG com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Hugo José Nogueira Pedroza Dias Mello, IF-UFG, Prof. Marcus Carrião dos Santos, IF-UFG.

Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,0 (nove vírgula zero), tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luis Miguel Gomes Abegao, Coordenador**, em 08/09/2023, às 17:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Carriao Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 11/09/2023, às 13:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hugo Jose Nogueira Pedroza Dias Mello, Professor do Magistério Superior**, em 11/09/2023, às 14:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4029007** e o código CRC **CEA41CC9**.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador(a).

Gustavo Lourenço Silva Galvão

Com formação técnica em Edificações pelo Instituto Federal de Goiás. Durante sua graduação, foi pesquisador do CNPq em um trabalho de iniciação científica no Grupo de Física dos Materiais voltado a síntese e caracterização estrutural de cristais com propriedades magnéticas. Atualmente participa de um projeto na EMBRAPA unidade Arroz e Feijão, para o desenvolvimento de um protótipo modular, que busca determinar a massa absoluta de amostras de grãos, em função da umidade relativa da amostra.

Agradecimentos

Meus mais singelos agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma, direta ou indiretamente contribuíram para que eu conseguisse concluir esta etapa tão importante de minha vida.

Em especial a minha mãe Michelly do Rosário e meu pai Antônio Alexandre, por todo apoio e suporte oferecidos, afinal de contas, sem vocês, eu jamais conseguiria ter chegado até aqui. Além da minha irmã Leticia Silva, por toda paciência e incentivo prestados.

Ao professor Luís Abegão pelo voto de confiança na minha indicação para este projeto, além de todas as orientações e discussões sobre o mesmo.

Aos Dr. José Geraldo e Dr. Marcelo Narciso, pela oportunidade de trabalhar neste projeto tão desafiador.

Ao técnico de eletrônica do Instituto de Física Juracy, por todas as sugestões e auxílios prestados nos primeiros testes experimentais.

Além do projeto IPELab, por toda estrutura e serviços prestados que favoreceram muito para a concretização deste projeto.

A teoria só te leva até certo ponto.

Christopher Nolan,
filme Oppenheimer .

Resumo

Lourenço, G. S. G.. **Dimensionamento sensorial para o desenvolvimento de um protótipo funcional modular para a análise de grãos**. Goiânia, 2023. 61p. Relatório de Graduação. Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás.

Este trabalho trata do desenvolvimento de células de carga destinadas a um dispositivo modular, que possa ser utilizado em campo, para a avaliação da massa específica de amostras de grãos com base em sua umidade relativa, proposto pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Foram analisadas a viabilidade de desenvolvimento de células de carga a partir de transdutores de princípio resistivo, a exemplo do resistor sensível a força (FSR) e os extensômetros (Strain Gauges), além de transdutores de princípio piezoelétrico. A investigação das células de carga se deu por meio de abordagens teóricas a partir de análises tensoriais das células de carga, sendo realizadas por meio de simulações computacionais adotando o Método dos Elementos Finitos (FEM), através do software Autodesk FUSION 360. Enquanto a análise experimental das células de carga se deu por meio da avaliação das tensões elétricas, obtidas em função de diferentes massas de referência certificadas pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Os resultados experimentais preliminares obtidos neste trabalho demonstraram que dentre as células de carga analisadas, a célula de carga baseada em SG modelo *Single Point* é a forma mais precisa para a determinação da massa de amostras de grãos de 2-100 g, ao apresentar um comportamento linear entre a tensão elétrica e a massa no *range* mencionado. Além disso, os resultados teóricos podem ser correlacionados aos resultados experimentais devido o comportamento linear observado entre a deformação mecânica e a tensão na faixa equivalente das massas experimentais utilizadas. Por conta dos baixos preços e ótimos resultados alcançados, este trabalho demonstra que os sensores SG alcançaram o maior desempenho geral para serem utilizados em um futuro protótipo de dispositivo de baixo custo, para a quantificação da massa específica de amostras de grãos de maneira precisa.

Palavras-chave

Células de Carga, Extensômetros, MEF.

Abstract

Lourenço, G. S. G.. **Sensory dimensioning for the development of a modular functional prototype for grain analysis**. Goiânia, 2023. 61p. Relatório de Graduação. Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás.

This work discusses and reports load cells for evaluating the specific mass of grains based on their relative humidity to develop a future prototype device to be used in the field by the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA). The load cells investigated in this work were based on strain gauge (SG) and force sensitive resistor (FSR). The load cells' analysis was made by theoretical and experimental approaches. A stress tensor component theoretical analysis was carried out through computational simulations using Finite Element Methods (FEM) via Autodesk FUSION 360 software. On the other hand, the experimental results were obtained by acquiring the voltage as a function of the National Institute of Standards and Technology (NIST) traceable reference masses. The experimental preliminary results acquired in this work show that a load cell based on SG is the most accurate way to measure the grain's mass from 2-100 g. In fact, SG presented a linear behavior between voltage and mass in the mentioned mass range. Also, the theoretical results can be correlated with the experimental ones once a linear behavior was observed between the mechanical deformation and tension in the equivalent range of the experimental masses used. Moreover, the SG also has the lowest price of the investigated sensors. Therefore, this work shows that SG achieved the highest overall performance to be used in a future low-cost prototype device to quantify the specific mass of several grains in a straightforward but reliable way.

Keywords

Load Cell, Strain Gauge, FEM.

Sumário

Lista de Figuras	12
Lista de Tabelas	14
Siglas	15
1 Introdução	16
1.1 Contextualização	16
1.2 Objetivos Gerais	18
1.3 Objetivos Específicos	18
2 Fundamentação Teórica	19
2.1 Especificações técnicas de um instrumento de medida	19
2.2 Tensões e deformações em sólidos	21
2.3 Sensores e Transdutores	24
2.4 Células de Carga	26
2.4.1 Transdutor de força piezoelétrico	26
2.4.2 Extensômetro de resistência elétrica (<i>strain gauges</i>)	28
2.4.3 Sensor de Filme Fino FSR	32
2.5 Ponte de Wheatstone	34
3 Materiais e Métodos	36
3.1 Desenvolvimento do projeto	36
3.1.1 Design	36
3.1.2 Portabilidade	37
3.1.3 Condições experimentais	37
3.2 Dimensionamento das Células de Carga	38
3.2.1 Extensômetros (<i>Strain Gauge</i>)	39
Célula de Carga modelo A: SG modelo <i>Single Point</i>	39
Célula de Carga modelo B: SG modelo Proposto	41
3.2.2 Célula de Carga modelo C: FSR	43
3.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)	44
4 Resultados e Discussão	46
4.1 Simulação de tensão estática	46
4.1.1 Célula de Carga Modelo A	46
4.1.2 Célula de Carga Modelo B	48
4.2 Testes Experimentais	51

5	Conclusão e Perspectivas Futuras	56
	Referências Bibliográficas	57
A	Resultados da simulação de tensão estática	59
B	Resultados experimentais	61

Lista de Figuras

1.1	Medidor volumétrico de perdas de grãos destinado a lavouras de feijão. (SILVA J. G. E AIDAR, 1999)	17
2.1	Diagrama das forças resultantes aplicadas sobre um corpo. (HIBBELER, 2009)	22
2.2	Estado geral das tensões mecânicas. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)	22
2.3	Diagrama Tensão (σ) x Deformação (ϵ), indicando os intervalos elásticos e plásticos. Imagem de Autor Desconhecido licenciado em CC BY adaptada para fins didáticos e ilustrativos.	24
2.4	Estrutura do PZT: (a) simétrica, acima da temperatura de Curie e (b) assimétrica, abaixo da temperatura de Curie.(BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)	27
2.5	Diagrama Esquemático sensor PZT: (a) disco único e (b) discos empilhados conectados paralelamente.(BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)	27
2.6	Extensômetro de resistência elétrica uniaxial, com indicação dos seus respectivos componentes.(BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)	29
2.7	Extensômetro de resistência elétrica Biaxial.(VISHAY,)	31
2.8	Extensômetro de resistência elétrica triaxial.(VISHAY,)	31
2.9	Extensômetro de resistência elétrica de pressão. (VISHAY,)	31
2.10	Detalhes da construção FSR. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)	33
2.11	Configuração Ponte de Wheatstone.(USP, 2015)	34
2.12	Extensômetros em pares na configuração de ponte completa, em uma célula de carga modelo <i>Single Point</i> . Imagem de Autor Desconhecido licenciado em CC BY, adaptada para fins didáticos e ilustrativos.	35
3.1	Layout final do aparato para teste e definição dos sensores.	37
3.2	Diagrama da Célula de carga <i>Single Point</i> . (FLINTEC,)	39
3.3	Design do suporte para a célula de carga Single Point adaptada para o AFAL.	41
3.4	Design da célula de carga SG modelo B .	41
3.5	Sensor SG Full Bridge BF350-3EB (DATASHEET... , a)	42
3.6	Sensor FSR modelo RP-S40-ST	43
3.7	Design da célula de carga modelo B com a adoção do sensor. FSR e a presença do concentrador de pressão no formato de tronco de cone.	43
3.8	Imagem ilustrativa da malha com fator de 2%, adotada na simulação de análise tensorial da célula de carga B .	45

4.1	Ilustração do nível de deformação sofrido pela célula de carga Single Point de alumínio sob a tensão de 0,4 [N]. Com destaque a deformação local em um dos ponto de fixação dos extensômetros.	47
4.2	Ilustração do nível de deformação equivalente sofrido pela célula de carga modelo B , com lâmina de alumínio e espessura de 0,4 [mm] sob a força de 0,4 [N]. Com destaque a deformação local do ponto de fixação do extensômetro.	48
4.3	Gráfico da deformação frente a tensão aplicada sob a lâmina de alumínio.	49
4.4	Gráfico da deformação frente a tensão aplicada sob a lâmina de Latão.	50
4.5	Gráfico da deformação frente a tensão aplicada sob a lâmina de plástico ABS.	50
4.6	Conjunto de pesos padrões de 100, 50, 20, 10, 10, 5, 2 e 2 gramas adotados para fins de calibração.	51
4.7	Sistema experimental, composto pelo peso padrão a esquerda que esta sobre a célula de carga ligada pela <i>protoboard</i> ao multímetro e a placa de desenvolvimento ESP32	52
4.8	Gráfico dos resultados experimentais e da simulação de tensão estática, da Tensão de saída (V_o) da célula de carga <i>Single Point</i> em função da massa aplicada.	53
4.9	Gráfico da Tensão de saída (V_o) da célula de carga proposta em função da massa.	54
4.10	Gráfico da Tensão de saída (V_o) da célula de carga que utiliza o sensor FSR em função da massa.	54

Lista de Tabelas

2.1	Características típicas de extensômetros metálicos e semicondutores.	31
3.1	Características técnicas da célula de carga Single Point. (XNQ E. C.,)	40
3.2	Características técnicas do extensômetro Full Bridge BF350-3EB (DATASHEET..., a)	42
3.3	Características técnicas Sensor de Força Resistivo FSR. (DATASHEET..., c)	44
4.1	Planilha Orçamentaria comparativa entre as células de carga.	46
4.2	Propriedades do materiais considerados para simulação.	47
A.1	Resultados provenientes da simulação da célula de carga modelo A , composta por Alumínio.	59
A.2	Resultados da análise de tensão para a célula de carga de modelo B , sob diferentes espessuras, com o disco sendo composto por Alumínio.	59
A.3	Resultados da análise de tensão para a célula de carga de modelo B , sob diferentes espessuras, com a lâmina sendo composta por Latão.	60
A.4	Resultados da análise de tensão para a célula de carga de modelo B , sob diferentes espessuras, com a lâmina sendo composta por plástico ABS.	60
B.1	Resultados experimentais provenientes da célula de carga modelo A .	61
B.2	Resultados experimentais provenientes da célula de carga modelo B .	61
B.3	Resultados experimentais provenientes da célula de carga modelo C .	61

Siglas

AFAL Aparato Funcional para Avaliação de Lavouras.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias.

FSR *Force Sensitive Resistor.*

IEC *International Electrotechnical Commission.*

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

ISO *International Organization for Standardization.*

IUPAC *International Union of Pure and Applied Chemistry.*

JCGM *Joint Committee for Guides in Metrology.*

MEF Método dos Elementos Finitos.

MVP Medidores Volumétricos de Perdas.

NIST *National Institute of Standards and Technology.*

PZT Titanato Zirconato de Chumbo.

SG *Strain Gauge.*

VIM Vocabulário Internacional de Metrologia.

Introdução

1.1 Contextualização

A quarta revolução industrial ou indústria 4.0 esta sendo marcada pela integração de áreas como a manufatura aditiva, biologia sintética, realidade virtual, a IoT (*Internet of Things*) e a grande produção e processamento de dados (*Big Data*), o que tem favorecido grandes avanços no quesito integração e autonomia de processos. Com tais avanços já tendo alcançado até mesmo a agricultura, estabelecendo formas mais eficientes para solucionar problemas relacionados com a produtividade, assertividade e sustentabilidade da produção agrícola. Esta integração entre a indústria 4.0 e o campo só foram possíveis graças aos resultados provenientes dos grandes avanços na área de instrumentação e sensoriamento.

A instrumentação tem um amplo espectro de aplicações, surgindo em diversas áreas da ciência e tecnologia, como instrumentação científica, industrial, instrumentação automotiva, instrumentação residencial, além da instrumentação rural. O sensoriamento é uma parte fundamental do processo de instrumentação e automação, sendo a interface que gera uma grande fonte de dados, que possibilita a formação dos *insights* e recomendações aos gestores, para que os mesmos consigam a partir delas tomar suas decisões.

Dentre todas as diversas etapas da produção de grãos, seja no plantio, na colheita, transporte ou condicionamento, é de suma importância o conhecimento das propriedades e condições dos grãos. Pois, nessa era dos dados, todas as decisões são ponderadas a partir destas informações, para que se possa obter sempre os melhores resultados. Atualmente já existem alguns dispositivos que podem mensurar algumas propriedades como massa, umidade, estrutura, composição, sendo poucos destinados a medidas em campo, exigindo ambientes estáveis, controlados e profissionais estritamente qualificados. Além de terem um custo relativamente elevado, quando se analisado o público destinado.

As balanças são exemplos de instrumentos destinados ao dimensionamento do peso de corpos, que estão presentes em nosso cotidiano. Um dos instrumentos mais antigos de medida do peso de corpos é a balança de equilíbrio de pratos, uma das mais

simples e antigas, que se baseia na comparação do equilíbrio de pratos sustentados por uma haste, com um dos pratos contendo um corpo padrão ao qual já se sabe sua massa.

Com o avanço das tecnologias as balanças também evoluíram nos quesitos sensibilidade, resolução, precisão e exatidão, com alguns modelos se destacando mais em alguns quesitos do que em outros, com cada uma se limitando ao *range* da tecnologia que sua célula de carga permite. Tecnologia esta determinada pelo ambiente e condições a que se destina tal instrumento de medida.

Por se tratar de um ambiente bastante adverso, exposto às intempéries da atmosfera (temperatura, umidade, pressão, etc), a obtenção de informações concisas nessas áreas de plantio, acaba sendo um grande desafio para os produtores rurais. Dentre estes fatores, pode-se destacar a umidade dos grãos, por interferir diretamente na determinação da massa dos grãos, além de ser um fator muito relevante nas etapas de colheita e condicionamento dos grãos, a exemplo das lavouras de feijão. (FARONI et al., 2006)

A convite da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA), unidade Arroz e Feijão, este trabalho se propõe ao dimensionamento sensorial das células de carga, de um protótipo modular funcional, portátil e de baixo custo, cujo seu propósito será o de auxiliar no acompanhamento de lavouras de grãos, através da determinação da massa específica em razão da umidade relativa de pequenas amostras de grãos contidas nos Medidores Volumétricos de Perdas (MVP) - a exemplo do apresentado na Figura 1.1. Onde nos referiremos a este protótipo como Aparato Funcional para Avaliação de Lavouras (AFAL)

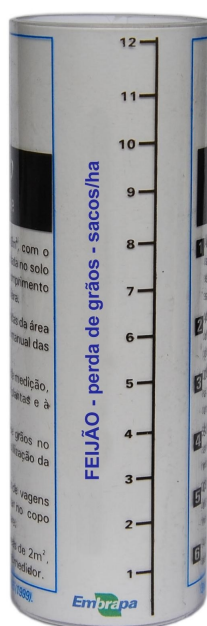


Figura 1.1: Medidor volumétrico de perdas de grãos destinado a lavouras de feijão. (SILVA J. G. E AIDAR, 1999)

1.2 Objetivos Gerais

O propósito deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), é o de dimensionamento e teste de sensores para o desenvolvimento de células de carga, para o projeto de um protótipo modular que possa realizar medidas de massa absoluta, em função da umidade relativa, para amostras de diferentes culturas de grãos. Desta forma, o objetivo deste trabalho procura atender as necessidades iniciais deste projeto focando principalmente no desenvolvimento das célula de carga, considerando as exigências provenientes das condições as quais o protótipo estará sendo exposto, com o menor custo possível.

1.3 Objetivos Específicos

Dentre todos os objetivos deste trabalho, podemos pontuar:

1. Revisão bibliográfica das principais tecnologias de transdutores que podem ser aplicados ao protótipo Aparato Funcional para Avaliação de Lavouras (AFAL);
2. Desenho dos componentes e layout do dispositivo AFAL;
3. Análise tensorial, por meio de simulações computacionais de todos os componentes projetados;
4. Dimensionamento e adaptação dos sensores, a partir de suas características gerais e específicas, com a melhor relação custo-benefício;
5. Desenvolvimento do protótipo AFAL, incorporando todos os elementos (eletrônicos e mecânicos) necessários para o seu devido funcionamento;
6. Realização de testes experimentais para a verificação de compatibilidade dos resultados provenientes das simulações.

Fundamentação Teórica

2.1 Especificações técnicas de um instrumento de medida

Por se tratar do dimensionamento e desenvolvimento de um instrumento de medida, é cabível o esclarecimento de certos termos que serão de suma importância para a melhor experiência de leitura.

Este trabalho adotará as definições conceituais do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), documento produzido pelo *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM), o qual é formado por organizações como *International Electrotechnical Commission* (IEC), *International Organization for Standardization* (ISO), *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC). Além disso é seguido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). (INMETRO, 2012)

As unidades de medida consistem em grandezas específicas adotadas por convenção, que têm por função tornar universais os resultados de medidas realizadas em qualquer parte do mundo, sob as mesmas condições. (INMETRO, 2012)

O objeto da medição da grandeza específica que se deseja medir é denominado mensurando. A especificação de um mensurando pode requerer informações de outras grandezas como tempo, temperatura ou pressão. Tais grandezas que afetam o resultado da medição do mensurando são denominadas grandezas de influência. (INMETRO, 2012)

A sensibilidade é a razão entre a variação daquilo que é indicado no sistema de medição (sensoriamento) e a variação da grandeza medida. Enquanto a resolução é a menor indicação de variação perceptível da grandeza a ser medida. Já o *range* indica a amplitude de medição ou o intervalo de atuação dos sensores e transdutores. (INMETRO, 2012)

Exatidão de uma medição, indica o grau de concordância entre o valor medido e seu verdadeiro mensurando. Algo que não pode ser confundido com a precisão, que indica o grau de concordância entre os valores medidos, obtidos a partir de repetidas medições do mesmo objeto sob as mesmas condições - Algo diretamente ligado a repetitividade das medições. (INMETRO, 2012)

Com o erro de uma determinada medição, se tratando da diferença entre o valor medido de uma grandeza e o seu valor de referência. Sendo o mesmo, composto pelo erro sistemático, aquele que é invariante mediante a repetição de medições, e o erro aleatório ou randômico, que varia de maneira aleatória mediante a repetição das medições.(INMETRO, 2012)

Dentre as diversas fontes de erros sistemáticos, podemos citar os erros de construção, relacionados a fabricação do instrumento de medida, erros de aproximação, como a suposição de linearidade entre duas variáveis independentes, erros de inserção/installação do instrumento de medida, dentre outros. Com o nível de acurácia informado pelo fabricante de um multímetro, sendo um exemplo de incerteza sistemática a ser considerado em instrumentos de medida digitais.

Das fontes de erro aleatório, podemos destacar os erros de operação provenientes do operador do instrumento, erros ambientais como a variação de umidade e temperatura e erros dinâmicos, que são resultados de múltiplos fatores que modificam o comportamento dinâmico do instrumento. O erro aleatório tem como propriedade o fato de que, se uma grandeza física for medida N vezes obteremos N resultados diferentes. Decorrente disto, podemos definir as seguintes grandezas que caracterizam tais medidas:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}; \quad \sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2-1)$$

com \bar{x} definindo o valor médio entre as N medidas tomadas sobre as mesmas condições, o que favorece para a diminuição dos erros aleatórios, σ o desvio padrão amostral que indica a incerteza média das medidas individuais e σ_m o desvio padrão da média. (TAYLOR, 2012)

Apesar de todos os cuidados que possam ser tomados para uma medição, dificilmente haverá uma medição exata, uma vez que toda medição apresentará um nível de incerteza (u). A incerteza é um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas. Ela determina o intervalo de tolerância de confiança de toda medida, através da estimativa do erro de uma medição, podendo também ser do tipo sistemático (u_{sis}) ou aleatório (u_{ale}). (INMETRO, 2012)

A flutuação de um conjunto de medições é obtido pela diferença entre o maior e o menor valor medido, dividida por 2 ($\Delta f = \frac{x_{max} - x_{min}}{2}$). Podendo a incerteza de um conjunto de medições ser avaliada como sendo do **Tipo A**, caso a flutuação de repetidas medidas tomadas sob as mesmas condições seja maior que a resolução do equipamento $\Delta f > \Delta r$ e **Tipo B** para as incertezas de uma única medição, ou caso a flutuação das medidas seja menor ou igual que a resolução do equipamento para um conjunto de medições, $\Delta f \leq \Delta r$.

As incertezas do **Tipo A** são calculadas a partir do desvio padrão da média (σ_m), e as incertezas do **Tipo B** podendo ser calculadas a partir da resolução do equipamento (nominal ou efetiva) dividida por $\sqrt{3}$. Para os casos de grandezas $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$, que sejam determinadas indiretamente por meio de outras grandezas não correlacionadas, que possuem suas próprias incertezas, são denominadas como **Tipo C**, sendo calculadas a partir das derivadas parciais de $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$ com relação as variáveis x_1, x_2, \dots, x_n , e de suas incertezas $u_{x_1}, u_{x_2}, \dots, u_{x_n}$,

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2} \quad (2-2)$$

Com a incerteza total de uma medida sendo determinada a partir da soma quadrática de suas incertezas aleatórias e sistemáticas,

$$u_{tot} = \sqrt{(u_{X_{ale}})^2 + (u_{X_{sis}})^2}. \quad (2-3)$$

2.2 Tensões e deformações em sólidos

Em 1678, Robert Hooke estabeleceu a relação entre tensões e deformações de corpos submetidos a esforços mecânicos, sendo elas aproximadamente lineares a pequenas variações. A exemplo de uma mola, que ao ser comprimida longitudinalmente, exerce uma força proporcionalmente oposta à que lhe foi aplicada, obedecendo à relação,

$$\vec{F} = -k \vec{x} \quad (2-4)$$

sendo \vec{F} [N] a força, \vec{x} [m] a deflexão mecânica e k [N/m] a constante de rigidez da mola. Com essa teoria podendo ser aplicada em outros sistemas físicos, como, em uma pequena barra de metal engastada, ou ate mesmo uma superfície plana a depender de seu formato e condições isotrópicas - aqueles que apresentam as mesmas propriedades mecânicas em todas as direções. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Quando forças externas \vec{F}_1 e \vec{F}_2 são aplicadas em um corpo, forças internas de direção e magnitudes variadas também são geradas. Essas forças internas podem ser decompostas em forças normais \vec{N} e paralelas \vec{V} à uma superfície de corte para análise, como indicado na Figura 2.1, além de Momentos de Torção \vec{T} e Fletor \vec{M} . Para que o equilíbrio seja mantido, é necessário que o somatório das forças externas e internas seja nulo. (HIBBELER, 2009)

Ao diminuirmos a superfície de análise do corpo estudado, suas forças resultantes também diminuem proporcionalmente. Tal ponto pode convenientemente ser representado por um segmento cúbico infinitesimal de volume, onde cada uma das seis faces

cartesianas poderá estar sujeita a algum tipo de força. A Figura 2.2 representa o estado geral das tensões em um elemento cúbico infinitesimal.

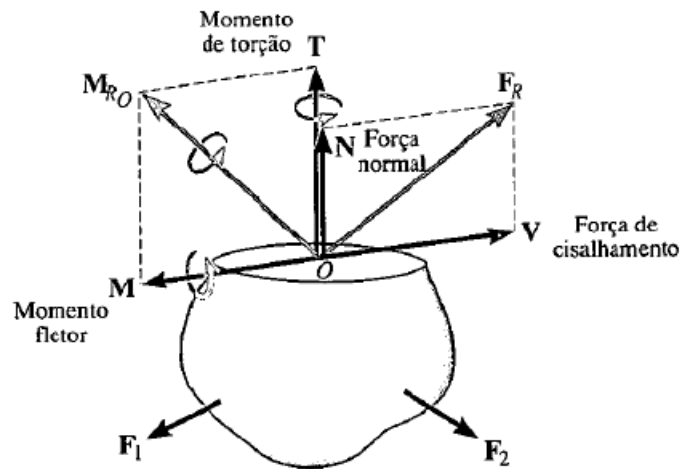


Figura 2.1: Diagrama das forças resultantes aplicadas sobre um corpo. (HIBBELER, 2009)

Quando as tensões são aplicadas perpendicularmente à superfície, são chamadas de normais e representadas por σ . As tensões aplicadas paralelamente à superfície do elemento em análise têm a denominação de tensão de cisalhamento ou de corte, e são representadas por τ .

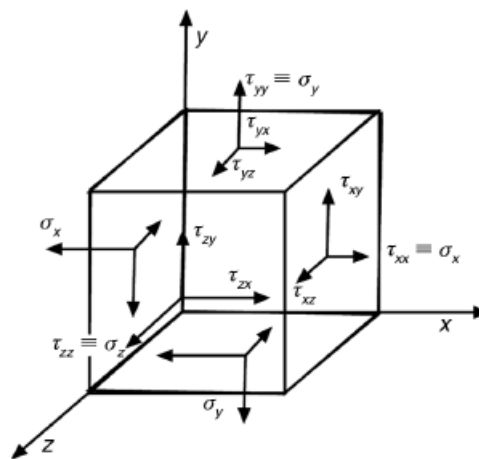


Figura 2.2: Estado geral das tensões mecânicas. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

É considerada deformação qualquer tipo de alteração que um corpo tenha sofrido ao ter sido aplicado algum tipo de força ao mesmo. Podendo as deformações serem do tipo normais ϵ ou cisalhantes γ . A deformação de um corpo não se limita apenas

a direção longitudinal em que a força é aplicada, ocorrendo também deformações nas demais direções transversais do corpo. Tal relação entre as deformações transversal e longitudinal, para materiais isotrópicos, é determinada pelo coeficiente de Poisson (ν). (HIBBELER, 2009)

A lei de Hooke também pode ser expressa em sua forma generalizada, expressa pelas seguintes equações:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \epsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad \epsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)\tau_{xy}}{E} \quad \gamma_{yz} = \frac{2(1+\nu)\tau_{yz}}{E} \quad \gamma_{zx} = \frac{2(1+\nu)\tau_{zx}}{E} \quad (2-5)$$

com σ [N/m^2] sendo a tensão mecânica, dada pela razão da força por unidade de área, ϵ a deformação por unidade de comprimento inicial em percentual (%), τ sendo a deformação cisalhante, que é caracterizado pela alteração de ângulo ocorrido entre dois segmentos de reta originalmente perpendiculares entre si e E [N/m^2] o módulo de Young ou módulo de elasticidade. (HIBBELER, 2009)

Considerando que uma força unidirecional seja aplicada somente ao longo do eixo z, em um corpo isotrópico, no limite de suas deformações elásticas, teremos as respectivas deformações nos eixos x, y e z, dadas pela equação:

$$\epsilon_x = -\nu \frac{\sigma_z}{E} = -\nu \epsilon_z \quad \epsilon_y = -\nu \frac{\sigma_z}{E} = -\nu \epsilon_z \quad \epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (2-6)$$

em que os sinais negativos de ϵ_x e ϵ_y se devem devido ao fato da força estar sendo aplicada ao longo da direção ϵ_z .

Cada material apresenta, como uma de suas propriedades, assim como a densidade ρ [kg/m^3], um módulo de elasticidade E [N/m^2]. Propriedade esta que pode ser bem observada em uma curva de tensão mecânica σ em função da deformação ϵ a exemplo da Figura 2.3 que apresenta esta curva para o ferro e diferentes tipos de Aços.

Quando um material é submetido a algum tipo de tensão mecânica, ocorre uma deformação elástica até um determinado valor de tensão, compressão ou força de cisalhamento críticos, o que é indicado pela parte linear do gráfico da Figura 2.3. (BEER E. RUSSEL JOHNSTON JR., 2011)

Durante a deformação elástica, os átomos do material são deslocados, podendo retornar para a posição de equilíbrio quando a carga mecânica é removida. A partir deste limite (E), começa a ocorrer uma deformação plástica, deformação essa em que os átomos do mesmo, não retomam as suas posições originais após a remoção da força,

ocasionando deformações permanentes nas estruturas do material, ocasionando na perda de suas características iniciais, como ilustrado na Figura 2.3.(HIBBELER, 2009)

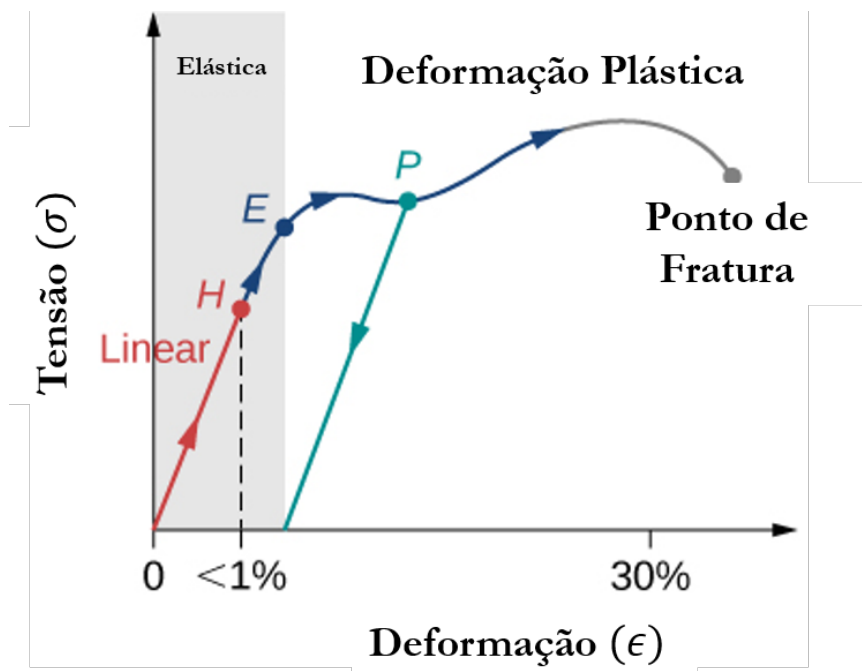


Figura 2.3: Diagrama Tensão (σ) x Deformação (ϵ), indicando os intervalos elásticos e plásticos. Imagem de Autor Desconhecido licenciado em CC BY adaptada para fins didáticos e ilustrativos.

2.3 Sensores e Transdutores

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), transdutor de medição é um dispositivo utilizado em medição que fornece uma grandeza de saída, a qual tem uma relação especificada com a grandeza de entrada. Tratando-se basicamente de um conversor de energia. Tendo como exemplos o termopar, transformador de corrente, extensômetro de resistência elétrica (Strain-Gauge), eletrodo de pH, entre outros. (INMETRO, 2012)

A uma distinção entre transdutores de entrada (sinal físico \rightarrow sinal elétrico) e transdutores de saída (sinal elétrico \rightarrow displays/atuadores). Os transdutores de entrada denominados sensores, são aqueles sensíveis a alguma forma de energia do ambiente podendo ser luminosa, térmica, cinética, entre outras. Enquanto os transdutores de saída são utilizados para a geração de sinais ou movimentos mecânicos, e nesse caso são denominados atuadores. (THOMAZINI D.; ALBUQUERQUE, 2008)

O princípio de funcionamento dos transdutores pode ser diferente de acordo com o tipo de transformação energética desejada, podendo ser basicamente: resistivo,

capacitivo, indutivo e piezoelétrico. Este trabalho foca especificamente nos resistivos e piezoelétricos. Transdutores que medem força, torque e pressão, conhecidos como células de carga, normalmente são constituídos por um elemento elástico que pode ser uma mola, anel, extensômetros, diafragmas, cilindros. Cujas características deste sensor (sensibilidade, linearidade e *range*) estarão diretamente relacionadas ao formato, tamanho e material do elemento elástico. (DALLY J. W.; RILEY, 1978)

Os transdutores podem ser usados para basicamente três tipos de medidas. As Medições Estáticas, sendo o estudo de esforços que praticamente não variam ou variam muito vagarosamente com o tempo. Medições Dinâmicas, que dimensionam os esforços que variam mais rapidamente, constituídos por uma componente alternada e outra média. Enquanto que as Medições Estático-Dinâmicas são as medidas simultâneas de esforços estáticos e dinâmicos. (SILVA, 2012)

O processo de sensoreamento é um caso particular de transmissão de informação, com transferência de energia. Essa energia pode fluir para ambos os sentidos, do mensurando para o sensor ou do sensor para o mensurando, e esse fato reflete-se no sinal de saída, que pode ser positivo ou negativo. Podem-se citar como exemplos: o elemento de platina de um termômetro do tipo RTD, rotor de uma turbina para medir vazão, tubo de Bourdon de um manômetro, boia de um instrumento de medição de nível, fotocélula de um espectrofotômetro, entre outros. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019a)

Os sensores podem ser classificados a partir de diferentes critérios como origem, fonte de alimentação, modo de operação, entre outros. Considerando a necessidade de uma fonte de alimentação, os sensores são classificados em autogeradores de energia (passivos) ou moduladores de energia (ativos). O sensor passivo não necessita de energia adicional e gera um sinal elétrico em resposta ao estímulo externo sofrido, isto é, o estímulo de entrada é convertido pelo sensor em um sinal de saída. Seus principais exemplos são os termopares e sensores piezoelétricos. Os sensores ativos requerem uma fonte de alimentação externa para sua operação. Com essa energia sendo modificada pelo sensor para a geração do sinal de saída. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019a)

Com relação ao sinal de saída (informação), os sensores podem ser analógicos ou digitais. Em sensores com saída analógica, o sinal geralmente é contínuo no tempo e a informação é obtida a partir da variação da amplitude do sinal. Enquanto que a saída de um sensor digital assume a forma de passos discretos ou estados. A saída de sensores digitais é mais fácil de ser transmitida do que a de sensores analógicos, além de estar sujeita a menos interferências e perdas de informação. O que favorece que as saídas digitais sejam geralmente mais repetitivas e confiáveis. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019a)

2.4 Células de Carga

As Células de Carga são transdutores de força muito utilizados para o dimensionamento de força, massa, torque e pressão. O principal princípio de funcionamento destas células se baseia na fixação de sensores em corpos rígidos, que ao sofrerem a deformação devido a aplicação de algum tipo de força ao conjunto, atinge também os sensores que repassam as informações ao sistema de controle.

2.4.1 Transdutor de força piezoelétrico

Em 1880, Jacques e Pierre Curie descobriram a partir de experimentos que a pressão mecânica quando aplicada a um cristal de quartzo, provocava o surgimento de potencial elétrico. Por conta disso denominaram o fenômeno de efeito piezoelétrico, uma vez que a palavra “*piezo*” originada do grego, significa pressão. Posteriormente, descobriram que o fenômeno também era reversível, ou seja, aplicando um sinal elétrico ao cristal, o mesmo se deforma. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Os cristais naturais, como o quartzo, a turmalina, o sal de Rochelle, entre outros, apresentam o efeito piezoelétrico, porém o mesmo possui intensidade baixa. A fim de melhorar essas propriedades, foram desenvolvidos materiais como $BaTiO_3$ e o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT). As células cerâmicas de PZT apresentam estrutura cúbica acima da temperatura de Curie, enquanto que abaixo da temperatura de Curie, exibem simetria tetragonal como apresentado na Figura 2.4, além de apresentarem propriedades piezoelétricas. Sendo a principal razão para o dipolo elétrico a separação de cargas entre íons positivos e íons negativos. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Quando uma tensão elétrica é aplicada ao material piezoelétrico, os domínios de *Weiss* aumentam seu alinhamento proporcionalmente ao campo aplicado. O resultado é uma alteração nas dimensões (expansão e contração) do PZT. A Figura 2.4 (a) mostra a estrutura cúbica simétrica do PZT acima da temperatura de Curie e na Figura 2.4 (b), a estrutura tetragonal abaixo da temperatura de Curie. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Os materiais piezoelétricos apresentam propriedades mecânicas e elétricas relacionadas, a tensão mecânica \vec{V} e a deformação \vec{S} , utilizadas para representar as propriedades mecânicas, que podem ser interligadas às propriedades elétricas como o campo elétrico \vec{E} , o deslocamento elétrico \vec{D} . O efeito piezoelétrico direto, resultado da aplicação do estresse mecânico ao material piezoelétrico pode ser descrita por,

$$\vec{D} = d \cdot \vec{V} + \epsilon_V \cdot \vec{E} \quad (2-7)$$

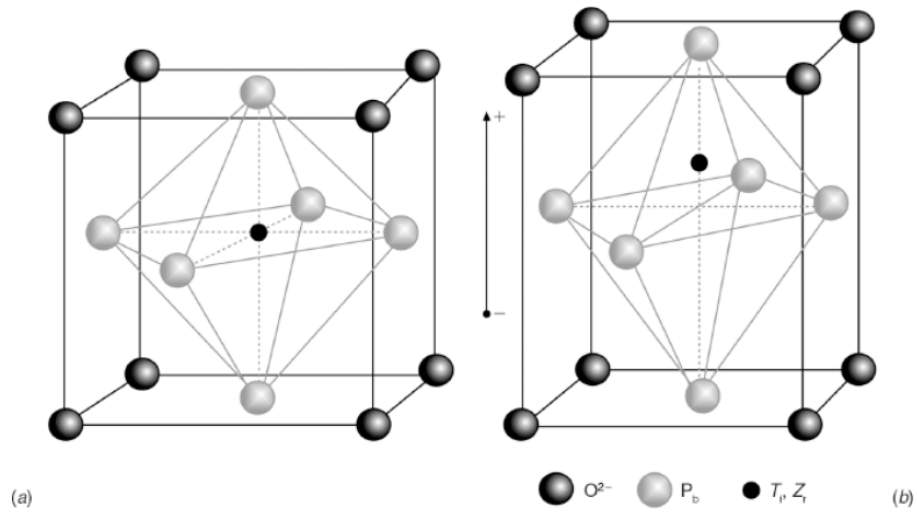


Figura 2.4: Estrutura do PZT: (a) simétrica, acima da temperatura de Curie e (b) assimétrica, abaixo da temperatura de Curie. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

enquanto o efeito piezoelétrico inverso, ao se aplicar um campo elétrico a um componente piezoelétrico, é indicado por,

$$\vec{S} = s_E \cdot \vec{V} + d \cdot \vec{E} \quad (2-8)$$

a tensão \vec{V} e o campo \vec{E} são variáveis independentes, enquanto a deformação \vec{S} e o deslocamento \vec{D} são variáveis dependentes; s_E é a elasticidade a campo elétrico constante, ϵ_V é a permissividade a tensão mecânica constante, e d é a constante piezoelétrica, com os subscritos indicando a grandeza física que é conservada. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

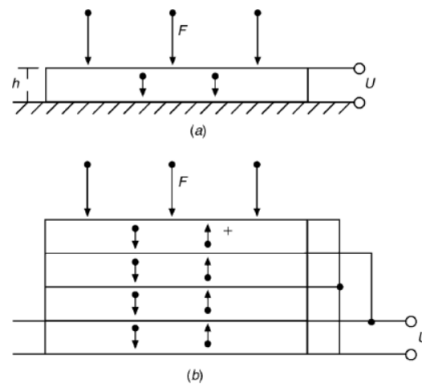


Figura 2.5: Diagrama Esquemático sensor PZT: (a) disco único e (b) discos empilhados conectados paralelamente. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Quando ligados em paralelo, como mostra a Figura 2.5(b), enquanto a carga

total seja dependente do número de discos, a tensão gerada independe, sendo a mesma de um único disco. As vantagens de utilizar uma pilha de discos são o aumento da carga, o aumento da capacitância e a consequente diminuição da impedância do elemento. Uma vez que a tensão elétrica aumenta quase que linearmente com a tensão mecânica aplicada, o PZT pode ser utilizado como sensor de força. Deve-se, entretanto, observar que as cargas elétricas surgem apenas quando a carga mecânica é aplicada. A carga elétrica será descarregada através da resistência de entrada do instrumento que é utilizado para fazer a medição. Dessa forma, não é possível utilizar o PZT na medição de força ou pressão estática. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

2.4.2 Extensômetro de resistência elétrica (*strain gauges*)

Em 1856, realizando experimentos utilizando fios de cobre e ferro, Kelvin observou que a resistência elétrica de ambos os materiais variavam quando sofriam deformação na região elástica.

Constituídos basicamente de um fio metálico, os extensômetros elétricos ou *Strain Gauge* (SG) podem ser do tipo fio ou lâmina, variando de acordo com seu formato de construção. Com ambos partindo do mesmo princípio de funcionamento, cuja resistência elétrica varia a partir da ação de forças mecânicas, causando diferenças de potencial que são associadas ao efeito sofrido pelo material, basicamente são transdutores que convertem efeitos mecânicos em variação de resistência elétrica. (AMOROS, 2008)

Sendo a resistência R de um fio genérico de comprimento l , seção transversal A e resistividade ρ dada por,

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-9)$$

a deformação longitudinal do fio, afeta todas as suas componentes determinantes de R . Considerando que a área da seção transversal do fio seja dada por $A = \frac{\pi D^2}{4}$ em que D representa o diâmetro do fio, as variações $\frac{dR}{dl}$ e $\frac{dR}{R}$ são dadas por,

$$\frac{dR}{dl} = \frac{4}{\pi} \frac{dz \left(\frac{\rho l}{D^2} \right)}{dl} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{1}{D^2} \left(\rho + l \frac{d\rho}{dl} \right) - \frac{2\rho l}{D^3} \frac{dD}{dl} \right] \quad (2-10)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} - 2 \frac{dD}{D} \quad (2-11)$$

com a constante de Poisson sendo definida como $\nu = -\frac{dD/D}{dl/l}$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} (1 + 2\nu) \quad (2-12)$$

Para pequenas variações, em seu regime elástico, a resistência de um fio metálico pode ser aproximada por,

$$R = R_0 + dR = R_0 \left(1 + \frac{dR}{R_0} \right) \approx R_0(1 + K_G \cdot \epsilon) = R_0(1 + x) \quad (2-13)$$

sendo R_0 a resistência sem nenhuma tensão mecânica aplicada, K_G o fator Gauge e x a variação relativa na resistência causada pela força aplicada, normalmente com $x < 0,02$.

Os extensômetros de resistência elétrica do tipo folha são formados por uma base e uma grade. Sendo a base uma lâmina de epóxi ou poliamida de grande elasticidade que tem três funções básicas:

- servir de base para a grade;
- possibilitar a cimentação do sensor à superfície elástica;
- isolar eletricamente a grade da superfície em que será fixado o extensômetro.

A grade formada por uma liga metálica, servirá como o elemento resistivo, que obedecerá a relação 2-13. A Figura 2.6 mostra um exemplo de extensômetro de resistência elétrica do tipo folha para medição uniaxial de forças.

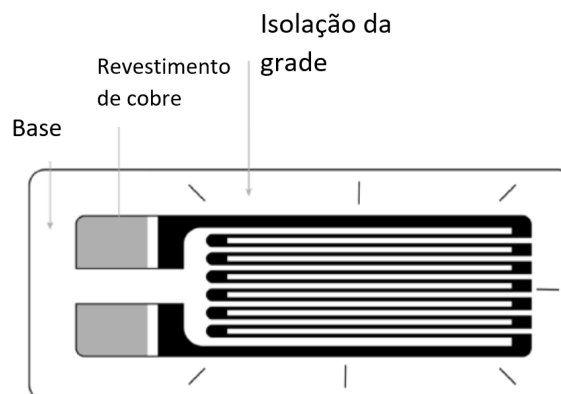


Figura 2.6: Extensômetro de resistência elétrica uniaxial, com indicação dos seus respectivos componentes. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Embora dificilmente o campo de deformações de um extensômetro seja unidirecional e uniforme sobre toda a grade. Uma boa aproximação para a variação da resistência de um SG colado em uma barra e submetido a um esforço de tração ou compressão pode ser definido como,

$$S_L = \frac{dR/R}{\epsilon} \approx \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2-14)$$

o que caracteriza a sensibilidade do condutor S_L , com R sendo a resistência, ΔR a variação e ϵ a deformação relativa. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Já para um caso mais genérico a exemplo do biaxial, temos a consideração das sensibilidades axial S_a , transversal S_t e cisalhante S_{cis} , além da consideração da deformação decorrentes dos esforços cortantes γ_{at} , como indicado na equação a seguir,

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \epsilon_a + S_t \epsilon_t + S_{cis} \gamma_{at} \quad (2-15)$$

Na maioria dos casos o fator S_{cis} é muito pequeno e acaba sendo desprezado. Já o fator S_t por ser mais significativo, acaba sendo relacionado a sensibilidade na direção axial, o que resulta no fator,

$$K_t = \frac{S_t}{S_a} \quad (2-16)$$

Isso é feito devido a condição de *Poisson*, ao surgir uma deformação na direção axial, naturalmente ocorre uma deformação na direção transversal,

$$\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} \quad (2-17)$$

aplicando as relações 2-16 e 2-17 em 2-15 chegamos em,

$$\frac{\Delta R}{R} = S_a \epsilon_a (1 - \nu K_t) \quad (2-18)$$

Com o fato K_G podendo ser definido como uma constante característica do sensor, vindo a ser chamado de fator Gauge (fator do extensômetro),

$$K_G = S_a (1 - \nu K_t) \quad (2-19)$$

chegamos a equação desejada,

$$\frac{\Delta R}{R} = K_G \epsilon \quad (2-20)$$

A possibilidade de medição em múltiplas direções é outro fator que pode diferenciar os extensômetros, os quais podem ser uniaxiais como o da Figura 2.6 que mede a distensão em apenas uma direção, biaxiais como as rosetas T da Figura 2.7, triaxiais a exemplo das rosetas em delta na Figura 2.8, ou de pressão que esta representada na Figura 2.9.

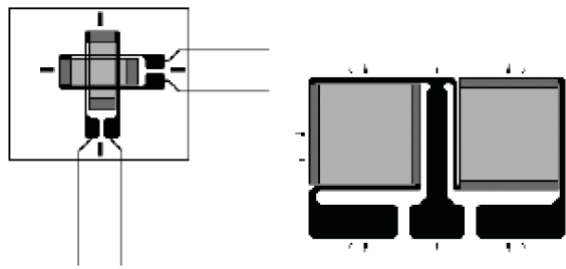


Figura 2.7: Extensômetro de resistência elétrica Biaxial.(VISHAY,)

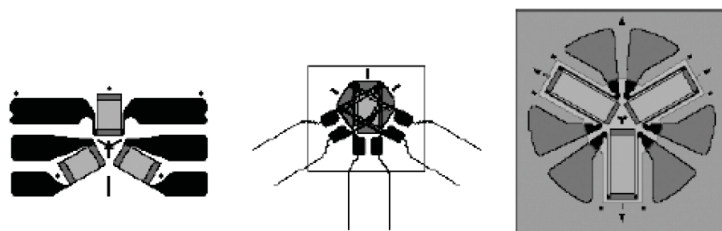


Figura 2.8: Extensômetro de resistência elétrica triaxial.(VISHAY,)

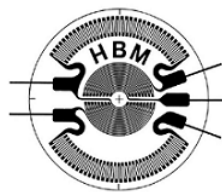


Figura 2.9: Extensômetro de resistência elétrica de pressão. (VISHAY,)

A tabela 2.1 apresenta as principais características descritivas dos extensômetros encontrados comercialmente.

Tabela 2.1: Características típicas de extensômetros metálicos e semicondutores.

Parâmetro	Metal	Semicondutor
Faixa de medição ($\mu\epsilon$)	0,1 - 50.000	0,001 - 3000
Fator Gauge (G_K)	1,8 - 4,5	40 - 200
Resistência nominal (Ω)	120 - 5000	1000 - 5000
Comprimento da grade (mm)	0,4 - 150	1 - 5

Nas aplicações estáticas, tanto a ponte de Wheatstone como o extensômetro podem ser influenciados com a variação de temperaturas, o que pode vir a ocasionar os seguintes efeitos:

1. A variação do fator do extensômetro K_G ;
2. A dilatação/contração térmica da grade, $\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta t$;
3. A dilatação/contração da célula de carga, $\frac{\Delta l}{l} = \beta \Delta t$;
4. A variação da resistência do extensômetro $\frac{\Delta R}{R} = \tau \Delta t$.

Estas variações podem ser expressas pela equação,

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha)G\Delta T + \tau\Delta T \quad (2-21)$$

sendo α o coeficiente térmico de expansão da grade do extensômetro; β o coeficiente térmico de expansão do material da célula; τ o coeficiente de temperatura da resistividade do extensômetro. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Um extensômetro é completamente compensado quando ambos os termos α e β são anulados. Algo muito dispendioso e que foge nossos objetivos, devido aos custos necessários.

Existem alguns pontos desfavoráveis ao uso dos SG, que precisam ser levados em consideração no momento do dimensionamento de uma célula de carga. Dentre os quais valem destacar:

- Quando utilizado sob altas temperaturas, além das influencias já destacadas, pode ocorrer a degradação dos isolantes e adesivos que revestem a célula de carga. O que exige algum tipo de compensação na variação de temperatura;(BECK, 1983)
- Devido aos baixos sinais de saída dos transdutores, torna-se indispensável que haja a utilização de amplificadores de sinal, além de um bom controle de ruídos;(BECK, 1983)
- Embora os SG sejam dispositivos simples de serem compreendidos e trabalhados, os mesmos exigem grandes cuidados no momento de sua instalação, devido sua alta sensibilidade deve-se ter um controle rigoroso nas etapas de instalação;(BECK, 1983)

2.4.3 Sensor de Filme Fino FSR

Similar ao sensor SG, o *Force Sensitive Resistor* (FSR) é um transdutor resistivo que apresenta uma variação de resistência diretamente dependente da pressão aplicada. Sendo importante ressaltar que a exatidão de sua sensibilidade depende diretamente da área onde a força é aplicada. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

O FSR consiste basicamente em um transdutor resistivo, ativo, analógico, que apresenta uma diminuição da resistência com o aumento da pressão aplicada na superfície ativa do sensor.

Este componente apresenta quatro camadas, como apresentado na Figura 2.10:

1. Uma camada com isolante, que acaba sendo omitida na Figura 2.10;
2. Uma superfície ativa formada por condutores, os quais são conectados aos terminais de conexão;
3. Um polímero espaçador, ao qual inclui uma abertura alinhada com a área ativa e uma entrada de ar;
4. Um substrato flexível revestido com um polímero condutor alinhado com a área ativa.

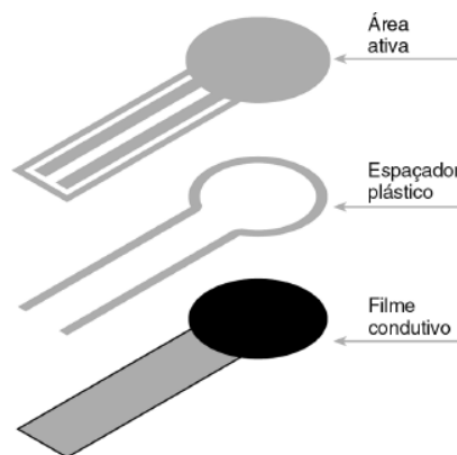


Figura 2.10: Detalhes da construção FSR. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Quando uma força externa é aplicada ao sensor, o elemento resistor é deformado contra o substrato, o ar é expelido e o material condutivo entra em contato com a área ativa. Quanto maior for a área ativa em contato com o material condutivo, menor será a resistência. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

Sua configuração eletrônica se baseia em um divisor de tensão simples, com um resistor fixo R_0 sendo colocado em série ao sensor FSR, com a tensão de saída V_{OUT} sendo dada pela equação 2-22,

$$V_{OUT} = \frac{R_0 V_{CC}}{(R_0 + R_{FSR})} \quad (2-22)$$

Como o funcionamento desse tipo de sensor depende de sua deformação, o dispositivo deve ser montado em uma base firme e plana. Todos os FSRs precisam de uma força mínima aplicada para começar a responder à variação de resistência.

Os sensores do tipo FSR são conhecidos por sua baixa precisão, com erros da ordem de 25 % e pela não linearidade de sua saída. Com este tipo de sensor não sendo tão preciso quanto um extensômetro de resistência elétrica SG. Mas a sua pequena espessura e o seu baixo custo, favoreceram o interesse por testes experimentais a fim de constatar o nível de tal imprecisão. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019b)

2.5 Ponte de Wheatstone

A ponte de Wheatstone é um circuito elétrico muito utilizado na área de instrumentação para fins de balanceamento de tensões. A exemplo dos extensômetros de resistência elétrica, que como já foi explicado, tem seu princípio de funcionamento baseado na variação da resistência elétrica diretamente proporcional à grandeza que se deseja mensurar.

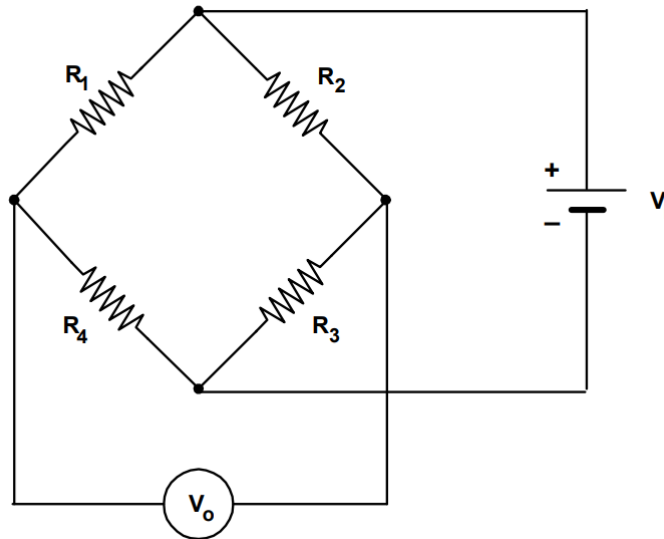


Figura 2.11: Configuração Ponte de Wheatstone.(USP, 2015)

Os extensômetros podem ser utilizados em uma das quatro configurações da ponte de Wheatstone:

A. 1/4 de ponte → apenas um extensômetro ativo

Nesta configuração utiliza-se apenas um extensômetro como dispositivo ativo à variação de resistência, na Figura 2.11 poderia ser o R1, sendo geralmente empregada para medições sem compensação de temperatura que podem ser estáticas ou dinâmicas. As demais resistências do circuito são dimensionadas de acordo com a maximização da sensibilidade do sistema, buscando sempre manter a relação $R_1 R_3 = R_2 R_4$ (DALLY JAMES W.; RILEY, 1993).

B. 1/2 ponte → dois extensômetros ativos

Adota-se nesta configuração de ponte, dois extensômetros com um como resistor ativo e o outro para fins de compensação. No caso da Figura 2.11, a resistência R1 seria a ativa e R2 serviria como compensador. Com ambos os resistores e transdutores sendo idênticos, colados utilizando-se o mesmos adesivos, bem como sendo submetidos aos mesmos processos de cura do que o resistor ativo. (DALLY JAMES W.; RILEY, 1993)

D. Ponte Completa → Montagem com quatro extensômetros ativos

Já nesta configuração da ponte, são utilizados extensômetros ativos em todos os quatro resistores da Figura 2.11. De tal forma que no caso de um corpo de prova no formato de uma viga, ocorrerá a compressão nos resistores R2 e R4 enquanto ocorre tração nos R1 e R3, de forma a maximizar os sinais de saída. Este tipo de arranjo permite obter compensação de temperatura uma vez que todos os transdutores estão sujeitos as mesmas condições de variação de temperatura, o que lhes favorece uma maior sensibilidade do que as demais configurações de ponte. (DALLY JAMES W.; RILEY, 1993)

Para um caso genérico de uma célula de carga na configuração *Single Point*, com quatro extensômetros ativos em pares (ponte completa) sujeitos a deformações iguais ϵ , a exemplo da Figura 2.12, a tensão de saída V_o será dada por:

$$V_o = \frac{V_i}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad (2-23)$$

Substituindo a relação dada pela Eq. 2-20 em Eq. 2-23 e considerando que todas as deformações ϵ_i sejam iguais em módulo, obteremos,

$$V_o = \frac{V_i K_G}{4} [\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4] = V_i \epsilon K_G \quad (2-24)$$

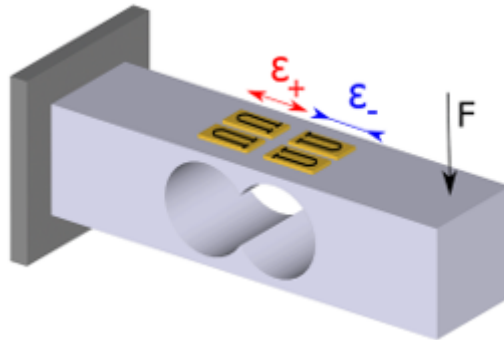


Figura 2.12: Extensômetros em pares na configuração de ponte completa, em uma célula de carga modelo *Single Point*. Imagem de Autor Desconhecido licenciado em CC BY, adaptada para fins didáticos e ilustrativos.

Materiais e Métodos

3.1 Desenvolvimento do projeto

Por tratar-se de um projeto de dimensionamento sensorial, foi desenvolvido uma base provisória para o AFAL, buscando atender a todas as necessidades e especificidades da EMBRAPA para o desenvolvimento deste protótipo. Oferecendo dinamicidade para troca simples e rápida entre os diferentes sensores propostos para este projeto. Dentre os principais critérios considerados para o *layout* do AFAL podemos destacar o design, portabilidade e condições experimentais.

3.1.1 Design

Um dos requisitos deste projeto foi o desenvolvimento de um dispositivo modular, de tal forma que o mesmo pudesse ser acoplado aos Medidores Volumétricos de Perdas (MVP) adotados pela EMBRAPA como um padrão para a avaliação de perda nas colheitas de grãos, como o exemplo de MVP apresentado na Figura 1.1. Tal aspecto modular foi algo primordial no design do dispositivo e na escolha dos sensores.

Sendo o nível de estabilidade da base do AFAL uma grandeza de influência dos sensores, foram tomados os devidos cuidados de sobredimensionamento da estrutura base e a escolha de um componente mais rígido e estável, neste caso o PLA, uma vez que esta estrutura provisória, seria desenvolvida por meio de manufatura aditiva, em uma impressora 3D de extrusão e estaria exposta as diversas variáveis como velocidade de impressão, ângulo raster e fator de preenchimento. (RAJPUROHIT; DAVE, 2018)

Todo o projeto foi desenvolvido por meio da plataforma Fusion 360, oferecida pela *Autodesk* (AUTODESK, 2023), via licença de acesso estudantil. O que possibilitou o design de todos os componentes estruturais e eletrônicos, além das simulações estruturais para fins de análise das tensões estáticas, e determinação dos índices de deformações (ϵ) dos componentes elásticos das células de carga, por meio da técnica MEF.

3.1.2 Portabilidade

Foram considerados já para este primeiro protótipo, todos os aspectos e componentes que viessem a serem necessários para o real funcionamento do dispositivo e seus primeiros testes em campo.

Como o dispositivo final a ser desenvolvido se destina para medidas em lavouras de grãos, foram tomados os devidos cuidados para que o mesmo pudesse ser manuseado por apenas um operador. Onde segurando o dispositivo com apenas uma das mãos, o operador tivesse sua outra mão livre para o total controle do painel do dispositivo e manuseio dos grãos.

3.1.3 Condições experimentais

Devido ao ambiente ao qual o protótipo seria exposto nas lavouras e áreas de colheita, onde sedimentos provenientes da poeira do campo, e do próprio processo de colheita, são fatores que prejudicam o bom funcionamento de qualquer componente eletrônico, além de influenciarem diretamente nas coletas de dados pelos sensores, ocasionando no surgimento de erros sistemáticos.

Por conta disso foram tomados os devidos cuidados para que ao final do projeto, o protótipo desenvolvido oferecesse um grau mínimo de proteção contra poeira IP60, seguindo os parâmetros da norma NBR IEC 60529 :2017. (ABNT, 2017)

A partir de todas essas considerações e repetidas adequações chegamos ao layout apresentado pela Figura 3.1.



Figura 3.1: Layout final do aparato para teste e definição dos sensores.

3.2 Dimensionamento das Células de Carga

Por trata-se de um dispositivo destinado a análise de grãos, com um foco inicial a cultura do feijão, um dos primeiros aspectos determinados foi o *range* ao qual se destinava as medidas a serem coletadas. Neste caso, adotando como referencial a capacidade volumétrica do MVP, que é de aproximadamente 170 [ml], e a densidade dos grãos de feijão, que tomando como uma média entre as diversas culturas seja de aproximadamente 800 [kg/m^3], chegamos a uma massa máxima de aproximadamente 136 [g]. Como no futuro este projeto não se limitará apenas a esta cultura, estipulamos um *range* de 0 - 300 [g].

Tratando-se da resolução, desejamos que o AFAL consiga detectar a variação unitária de acréscimo de grãos de feijão à sua balança, afim de que favoreça uma estimativa exata do número de grãos. Logo, considerando que a massa média de um grão de feijão carioca, do tipo A, seja por volta de 0,4 [g] em condições ambientes. Esperamos que nosso dispositivo apresente uma resolução de no mínimo 0,1 [g].

Após uma rigorosa revisão bibliográfica, pesquisas de mercado e alguns testes preliminares com alguns sensores disponíveis, foi decidido utilizar os sensores SG e FSR para os primeiros testes de desenvolvimento das células de carga do AFAL. Os transdutores de força Piezoelétricos foram dispensados já nos primeiros testes preliminares, ao ficar constatado a sua ineficiência para a determinação de forças estáticas.

As pequenas dimensões almejadas para o aspecto modular do AFAL e a pouca variedade de opções de sensores condizentes ao orçamento do projeto com a precisão requisitadas, foram estímulos para a tentativa de desenvolvimento de uma célula de carga específica para este projeto.

Propusemos para este trabalho três configurações distintas de células de carga (modelos **A**, **B** e **C**) para dois tipos diferentes de transdutores SG e FSR, com um modelo de célula de carga sendo desenvolvido especificamente para este protótipo. O modelo de célula de carga proposto se assemelha ao do *Single Point*, mas que ao invés de utilizarmos um elemento elástico no formato de um paralelepípedo, adotaremos no formato de um disco, que neste caso estará sendo sustentado por toda a sua circunferência ("borda"), algo que será melhor descrito na seção 3.2.1.

Embora ambos os transdutores SG e FSR sejam resistivos, cada um exige condições específicas para o seu devido funcionamento. Por conta disso, foram desenvolvidas suportes adaptados para cada célula de carga, com o objetivo de facilitar a sua troca no momento dos seus testes e garantir as estabilidades exigidas.

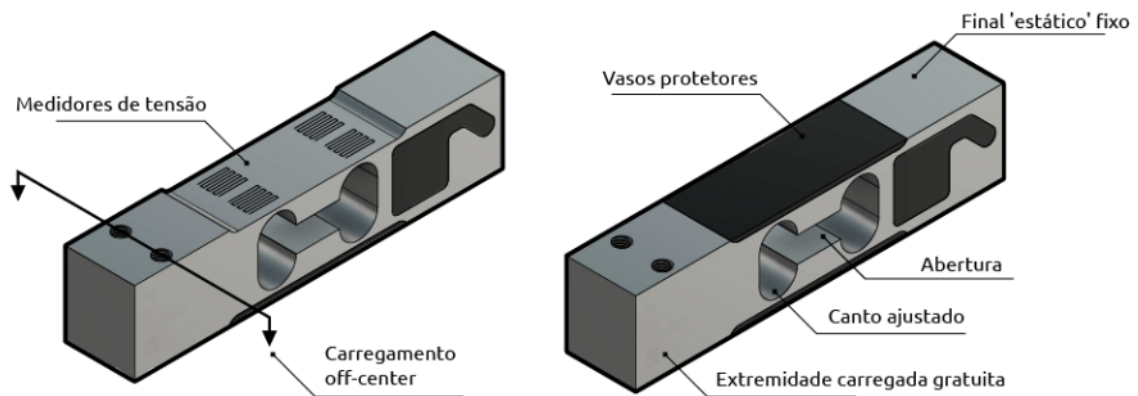


Figura 3.2: Diagrama da Célula de carga *Single Point*. (FLINTEC,)

3.2.1 Extensômetros (*Strain Gauge*)

O desenvolvimento de uma célula de carga que adote transdutores SG pode ser dividido na etapas mecânica, que é mais voltada ao sensoriamento e suas condições estruturais, e a etapa eletrônica referente a captação e tratamento dos dados obtidos. Nesta primeira fase do projeto AFAL destinada ao dimensionamento sensorial e desenvolvimento de células de carga, nosso foco se restringirá as condições físicas.

Para a parte de dimensionamento dos sensores pode-se utilizar de métodos analíticos, aplicando diretamente as equações provenientes da resistência dos materiais apresentadas na seção 2, ou utilizar dos métodos numéricos para a resolução destas equações, adotando para isso recursos computacionais.

Por não ser do objetivo deste trabalho a demonstração ou aprimoramento das técnicas de resolução de tais equações, utilizaremos dos métodos numéricos via Método dos Elementos Finitos (MEF), para a simulação e assim determinação das deformações relativas dos casos a serem analisados.

Célula de Carga modelo A: SG modelo *Single Point*

Dentre os diversos modelos de célula de carga existentes que adotam os transdutores *Strain Gauge* (SG), um que é muito utilizado em balanças eletrônicas é o modelo *Single Point* (ponto único) muito conhecido comercialmente dado a sua flexibilização para pesagens de carga desalinhadas ao seu eixo principal. Este modelo de célula de carga é bem ilustrado na Figura 3.2 em que são destacados as alocações dos medidores de tensão (transdutores SG), pontos de fixação e aplicação de carga além das aberturas. Tais aberturas servem como ponto de concentração de tensão o que intensifica a deformação e com isso a sensibilidade dos transdutores. (RICE, 2010)

No caso desta célula de carga a configuração da ponte de Wheatstone será a mesma apresentada pela figura 2.12, com a tensão de saída V_o seguindo a mesma equação 2-24, dependendo apenas do fator K_G e da deformação ϵ sofrida pelos SG localizados acima das aberturas, decorrentes do peso aplicado. A Tabela 3.1 indica as características técnicas de uma célula de carga modelo Single Point tomada como referência.

Tabela 3.1: Características técnicas da célula de carga Single Point. (XNQ E. C.,)

Celula de Carga Single Point	
Dimensões (cxlxh)	(47x9x6) [mm]
Composição	<i>Alumínio</i>
Capacidade máxima	500 [g]
Sensibilidade	$0,60 \pm 0,15$ [mV/V]
Impedância de IN/OUT	1090 ± 1 [Ω]
Tensão admissível	3 - 18 [V]
Repetibilidade	$\pm 0,03$ %
Histerese	$\pm 0,03$ %
Fluência (Creep)	$\pm 0,03$ %
Não linearidade	$\pm 0,03$ %
Temp. operacional	-10 ~ 60 [°C]
Precisão de fabricação	0,02 %

Replicaremos este modelo de célula de carga computacionalmente, tomando-a como referência para fins de comparação dos dados obtidos através das simulações, e aqueles obtidos experimentalmente. A fim verificar a compatibilidade das informações encontradas e validar as simulações do software Fusion 360, que por ser um software novo no mercado ainda não possui muitos trabalhos acadêmicos, os resultados de tais simulações encontram-se na seção 4.

Para a utilização da célula de carga *Single Point*, foi desenvolvido um pequeno suporte adaptativo que permite sua instalação de forma simples e versátil. A Figura 3.3 ilustra a célula de carga com o suporte desenvolvido.

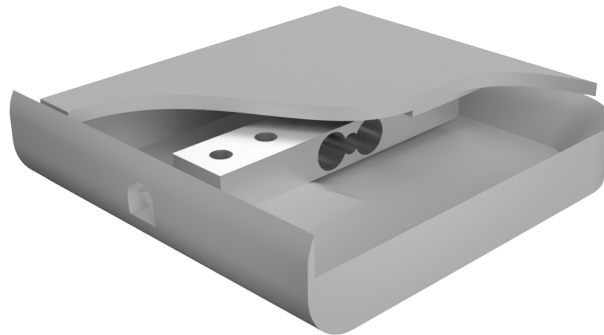


Figura 3.3: Design do suporte para a célula de carga Single Point adaptada para o AFAL.

Célula de Carga modelo B: SG modelo Proposto

Com o objetivo de obter uma célula de carga para o AFAL com as menores dimensões possíveis, especificamente quanto a sua espessura, foi proposto um modelo alternativo de célula de carga que adota extensômetros (SG) biaxiais de ponte completa.

Esta célula seria basicamente uma lâmina circular fina com propriedades elásticas, que seria sustentada pela borda de sua circunferência, de tal forma que o MVP ao ser colocado estaria sendo suportado apenas pela superfície do disco, sem a sustentação direta do suporte.

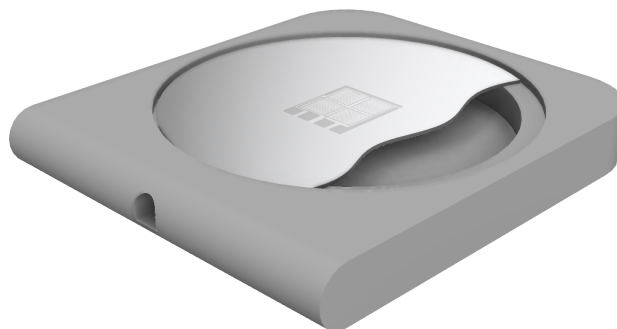


Figura 3.4: Design da célula de carga SG modelo B.

Com isso, todo o peso do MVP seria repassado diretamente a lâmina cuja deformação atingiria o extensômetro que estaria posicionado no centro da lâmina. Algo similar ao apresentado na Figura 3.4.

O extensômetro adotado será o modelo BF350-3EB similar ao apresentado na Figura 3.5, cujas características técnicas são apresentadas na tabela 3.2. Os principais motivos por sua escolha estão no fato do mesmo ser do tipo roseta biaxial, o que lhe compete a capacidade de detecção de deformações na duas direções axiais. Além do fato de possuir uma configuração de ponte completa de Wheatstone o que dispensa a adição de outros resistores para a formação da ponte de Wheatstone. Sendo sua configuração a mesma apresentada pela equação 2-24.

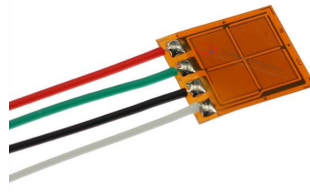


Figura 3.5: Sensor SG Full Bridge BF350-3EB (DATASHEET. . . , a)

Tabela 3.2: Características técnicas do extensômetro Full Bridge BF350-3EB (DATASHEET. . . , a)

Sensor SG Full Bridge BF350-3EB	
Dimensão total	9,6 x 8,3 [mm]
Composição da base	<i>Phenolics Epoxy</i>
Composição da grade	<i>CuNi</i>
Fator Gauge K_G	2,15 ± 10%
Resistência Nominal	350 ± 3 [Ω]
Tolerância do Resistor	<± 0.1%
limite de tensão	2,0 %
Tempo de vida	>10 ⁷ [rep.]
Temperatura de operação	-30 ~80 [°C]
Precisão de fabricação	0,02 % [FS]

Como discutido na seção 2.2, a deformação do disco está diretamente vinculado a configuração estrutural de tensão e as propriedades do material constituinte, em específico ao Módulo de Young E e o coeficiente de Poisson ν . Estando a configuração estrutural determinada pelo layout proposto na Figura 3.4, foram realizados, via simulação MEF, uma serie de análises de casos para discos de diferentes materiais, com diferentes espessuras condizentes as encontradas no mercado, com o objetivo de se determinar qual a melhor configuração para este projeto. Os resultados obtidos encontram-se na seção 4.

3.2.2 Célula de Carga modelo C: FSR

Devido ao fato de a detecção do sensor FSR ser diretamente proporcional a área que é afetada pela pressão, e o sensor encontrado no mercado com as dimensões mais próximas a do MVP, modelo RP-S40-ST indicado na Figura 3.6, não cobrir totalmente a área de sua base, a célula de carga criada a partir do mesmo exigiu a adaptação de um "concentrador de pressão". Tratando-se basicamente de um tronco de cone, cuja função é concentrar todo o peso do MVP a área sensível do sensor FSR.

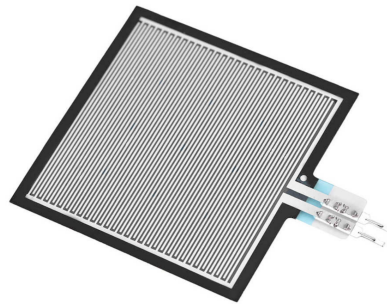


Figura 3.6: Sensor FSR modelo RP-S40-ST

A Figura 3.7 ilustra a célula de carga criada com a utilização do sensor FSR e do "concentrador de pressão" indicado pelo tronco de cone. A Tabela 3.3 indica as principais características técnicas do sensor FSR modelo RP-S40-ST adotado para a criação desta célula de carga.

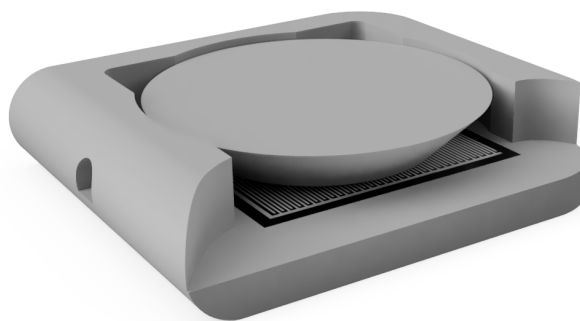


Figura 3.7: Design da célula de carga modelo **B** com a adoção do sensor FSR e a presença do concentrador de pressão no formato de tronco de cone.

Tabela 3.3: Características técnicas Sensor de Força Resistivo FSR. (DATASHEET. . . , c)

Sensor FSR RP-S40-ST	
Faixa de sensibilidade de força	0,2 - 100 [N]
Força de ativação	0,2 [N]
Repetibilidade de força parte a parte	$\pm 10\%$
Repetibilidade de força de peça única	$\pm 5\%$
Histerese	$\pm 10\%$
Resistência sem carga	$>1 [M\Omega]$
Tempo de resposta	10 [ms]
Tempo de vida	$>10^6$ [rep.]
Temperatura de operação	-40 ~85 [°C]

3.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF trata-se de uma técnica numérica que fornece soluções bastante precisas para problemas de campo complexos. O MEF envolve a divisão de estruturas complexas em um número específico de estruturas menores, algo que é chamado de discretização ou criação de malha. Após a criação das malhas cada estrutura menor é submetida a análise sob as condições de vínculo e contorno que foram condicionadas. Este processo tem como intuito simplificar problemas da engenharia, como a análise de estruturas complexas com formatos irregulares e auxiliam no aprimoramento no design de peças, a exemplo de células de carga. (KOLHAPURE; SHINDE; KAMBLE, 2017)

Dada a massa de um grão de feijão carioca de aproximadamente 0,4 [g] e considerando uma aceleração gravitacional de 9,81 m/s². Foi realizada testes simulando a adição de diferentes quantidades de feijão (1, 4, 16, 64, 256, 512, 640, 768, 892 e 1024) a uma balança, com o intuito de se avaliar o comportamento das células de carga para diferentes quantidades de grãos.

Para estas simulações foram desprezados a camada de cola devido sua pequena espessura frente as dimensões do elemento elástico (disco) ao qual o extensômetro está colado. Pressupondo que toda a deformação da superfície do elemento elástico seja integralmente transmitida à grade do extensômetro que está colado em sua superfície, algo que não afetará significativamente as simulações de tensão estática.

Com o intuito de aumentar a acurácia das análises, simulamos o comportamento das células de carga com o MVP e os suportes das células de carga. Isso com o intuito de que as tensões aplicadas não fossem transmitidas as células de carga de maneira pontual, o que poderia vir a comprometer as análises realizadas. Todos os elementos das malhas

nas simulações foram criados com um fator de 2 % do tamanho das peças originais como ilustrado na Figura 3.8.

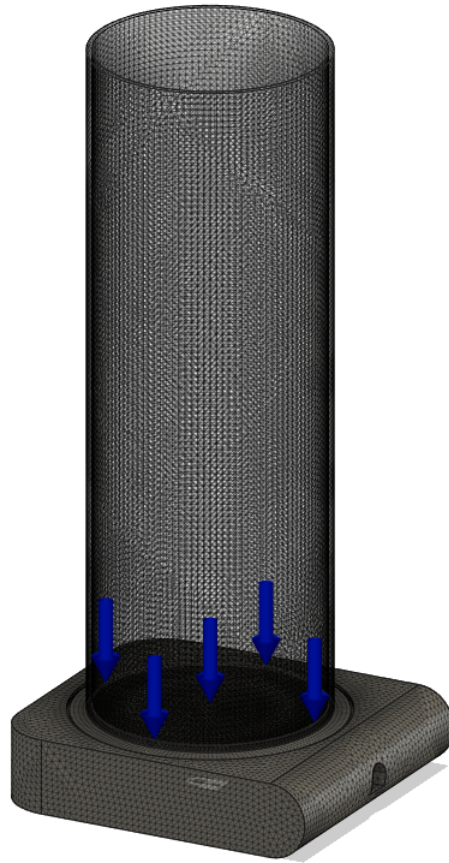


Figura 3.8: Imagem ilustrativa da malha com fator de 2%, adotada na simulação de análise tensorial da célula de carga **B**.

Resultados e Discussão

O principal objetivo das simulações computacionais é a análise e comparação dos níveis de deformações entre os dois modelos de célula de carga que utilizam de transdutores SG (**A** e **B**), para se constatar qual será o mais eficiente e apropriado para este protótipo.

No caso da opção de célula de carga que adota o sensor FSR, o tipo de tecnologia empregada para a variação da resistência neste sensor, não corresponde ao tipo de simulações empregados neste trabalho. Nos restando apenas a análise dos resultados dos testes experimentais.

Para fins de comparação e avaliação da viabilidade das diferentes células de carga analisadas, foi realizado um levantamento dos principais gastos, com a compra de materiais e prestação de serviços para a aquisição e adaptação das mesmas, sendo apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Planilha Orçamentaria comparativa entre as células de carga.

Custos	A	B	C
Sensor (R\$)	22,00	20,45	30,50
Suporte (R\$)	24,40	18,20	28,60
Custos Adicionais (R\$)	-	15,00	-
Total:	46,40	53,65	59,10

4.1 Simulação de tensão estática

4.1.1 Célula de Carga Modelo A

Como o objetivo desta simulação trata-se da análise de uma célula de carga já consolidada comercialmente para verificação dos dados simulados com os experimentais, realizamos a simulação desta configuração apenas para o seu material constituinte neste caso uma liga genérica de alumínio, cujas propriedades do material consideradas para simulação são apresentadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades dos materiais considerados para simulação.

Propriedades	Alumínio	Latão	Plástico ABS
Densidade (ρ) [kg/m ³]	2700	8490	1060
Módulo de Young (E) [GPa]	68,9	97	2,24
Coefficiente de Poisson (ν)	0,33	0,31	0,38
Resistência a escoamento [MPa]	275	124	20
Resistência máxima a tração [MPa]	310	338	29,6

Nesta simulação de análise de tensão, a célula de carga foi fixada pela sua base inferior, com as respectivas cargas de tensão sendo aplicadas na base interna do MVP. Os resultados desta análise encontram-se na tabela A.1 com as deformações informadas correspondendo a localização onde os extensômetros são fixados, logo acima das aberturas de concentração de tensão assim como é mostrado na Figura 3.2. A Figura 4.1 nos mostra uma ilustração desta simulação indicando o índice de deformação sofrida em função da carga inicial aplicada de 0,4 [g]. Destacando que o local que sofre mais deformação se encontra justamente acima das vacâncias concentradoras de deformação.

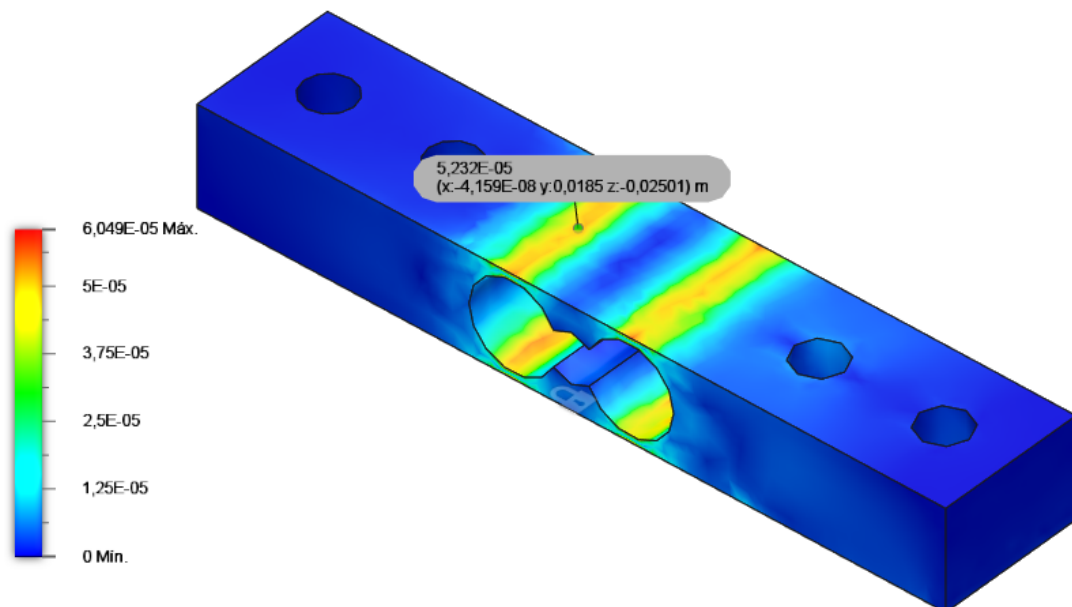


Figura 4.1: Ilustração do nível de deformação sofrido pela célula de carga Single Point de alumínio sob a tensão de 0,4 [N]. Com destaque a deformação local em um dos ponto de fixação dos extensômetros.

4.1.2 Célula de Carga Modelo B

Como a célula de carga desenvolvida para este protótipo tinha como variáveis exploráveis disponíveis o material do disco a ser adotado e a sua espessura, simulamos para três diferentes tipo de materiais facilmente encontrados no mercado, de custos acessíveis ao orçamento deste projeto, sob condições de espessura que também fossem encontrados no mercado. Sendo eles, o Alumínio o Latão e o plástico ABS, com todas as propriedades consideradas para simulação sendo apresentadas na Tabela 4.2.

Como o extensômetro BF350-3EB encontra-se localizado no centro do disco, o resultado das deformações no centro dos discos para os diferentes materiais considerados sob as diferentes espessuras, são apresentados nas Tabelas A.2, A.3 e A.4.

Avaliando o quesito deformação, observa-se a partir dos dados obtidos via simulação para a célula de carga modelo **B**, que nenhum dos diferentes materiais propostos sob nenhuma espessura apresentou uma deformação com a ordem de grandeza compatível ao modelo **A** que é tomado como referência. Notando-se alguma deformação condizente ao *range* de sensibilidade dos extensômetros metálicos comerciais ($\epsilon > 0,1\mu\epsilon$ como indicado pela Tabela 2.1), somente a partir do peso de 0,512 [N] para todos os materiais, na maioria das espessuras.

A Figura 4.2 ilustra os resultados obtidos mediante as simulações realizadas para a configuração específica do disco de Alumino de 0,3 [mm] de espessura, sendo exposto a força de 0,4 [N]

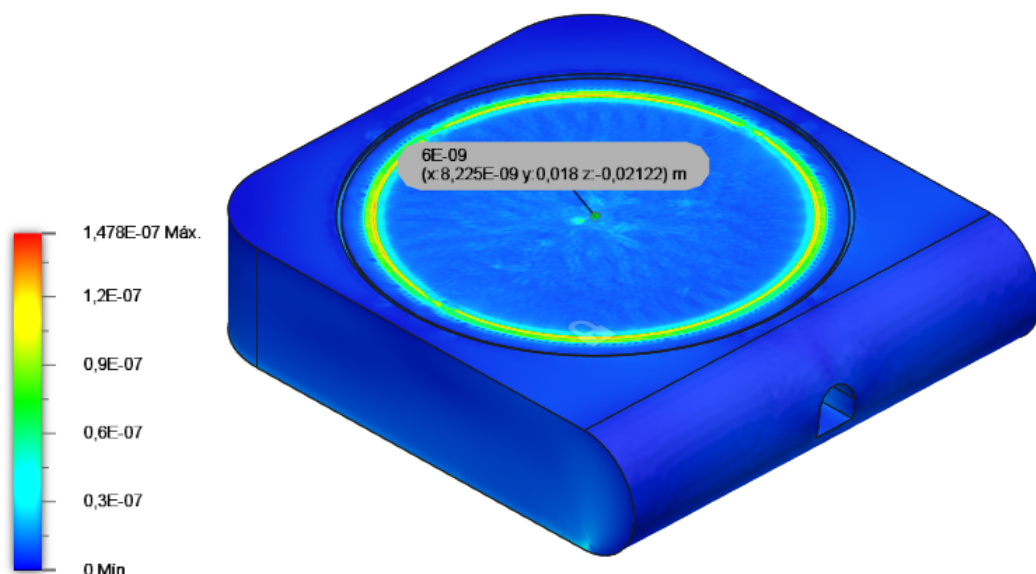


Figura 4.2: Ilustração do nível de deformação equivalente sofrido pela célula de carga modelo **B**, com lâmina de alumínio e espessura de 0,4 [mm] sob a força de 0,4 [N]. Com destaque a deformação local do ponto de fixação do extensômetro.

Tamanho diferença na ordem de grandeza entre os resultados das diferentes células de carga, pode ser justificado perante sua configuração estrutural. Uma vez que a localização onde a carga é aplicada na célula modelo **A**, não coincide com a mesma direção de nenhum dos pontos de apoio da célula de carga, a ponto de gerar equilíbrio. Resultando no surgimento do momento fletor (Torque) em sua configuração estrutural, intensificando assim as tensões nos pontos de concentração de deformação e com isso a amplificação dos índices de deformação.

O quesito linearidade das deformações frente a tensão mecânica aplicada, foi analisado mediante a aplicação de diferentes cargas. Fator este crucial para a constatação da precisão da célula de carga proposta. Algo que fica evidenciado nas representações gráficas de dispersão 4.3, 4.4 e 4.5 dos resultados obtidos das simulações.

Um comportamento interessante notado nas lâminas metálicas está na modificação do comportamento do coeficiente angular das retas de regressão linear frente a mudança das espessuras das lâminas, algo que não é notado com o plástico ABS. Tal comportamento pode ser explicado mediante a lei de Hooke em sua forma generalizada, 2-5. Onde se prevê a prevalência das tensões mecânicas longitudinais frente a deformação axial, diretamente proporcional a ν . Algo que demandará uma tensão maior para o plástico ABS uma vez que seu ν seja maior.

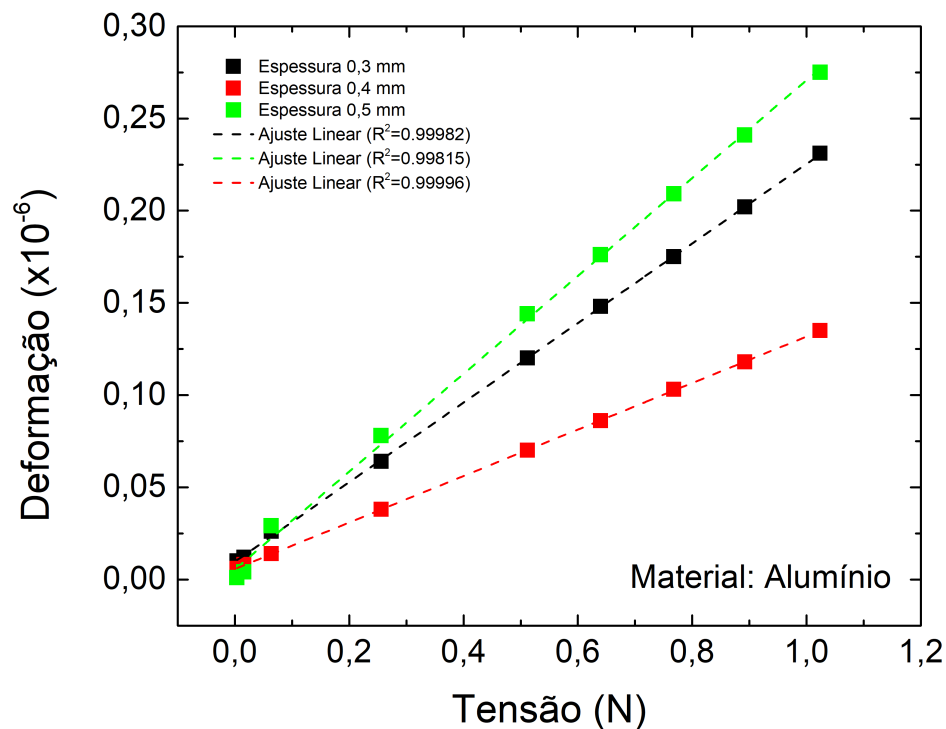


Figura 4.3: Gráfico da deformação frente a tensão aplicada sob a lâmina de alumínio.

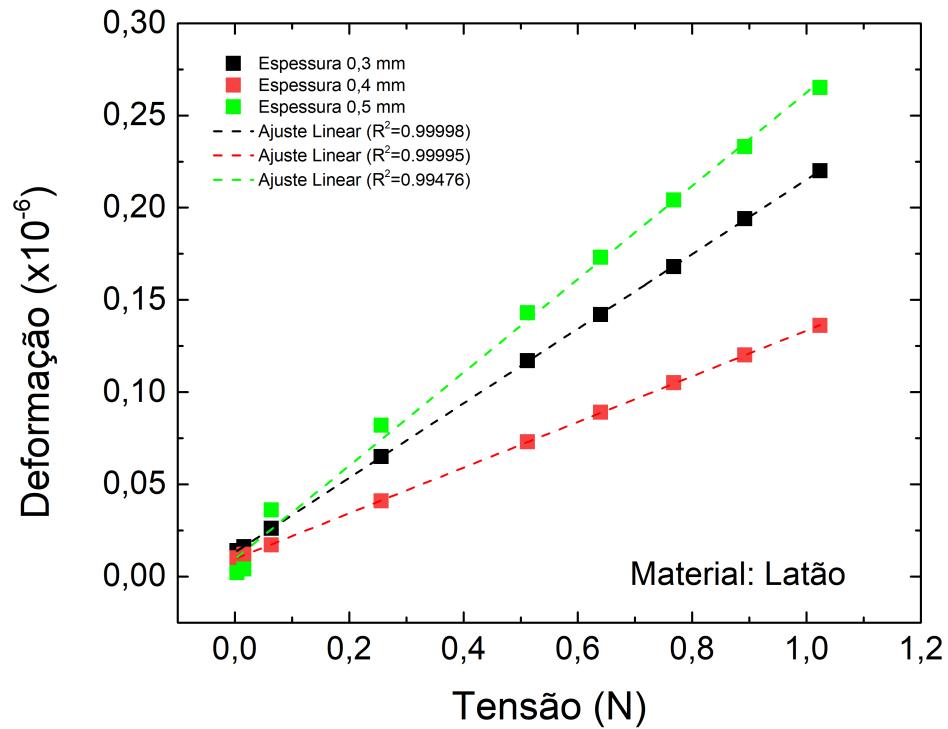


Figura 4.4: Gráfico da deformação frente a tensão aplicada sob a lâmina de Latão.

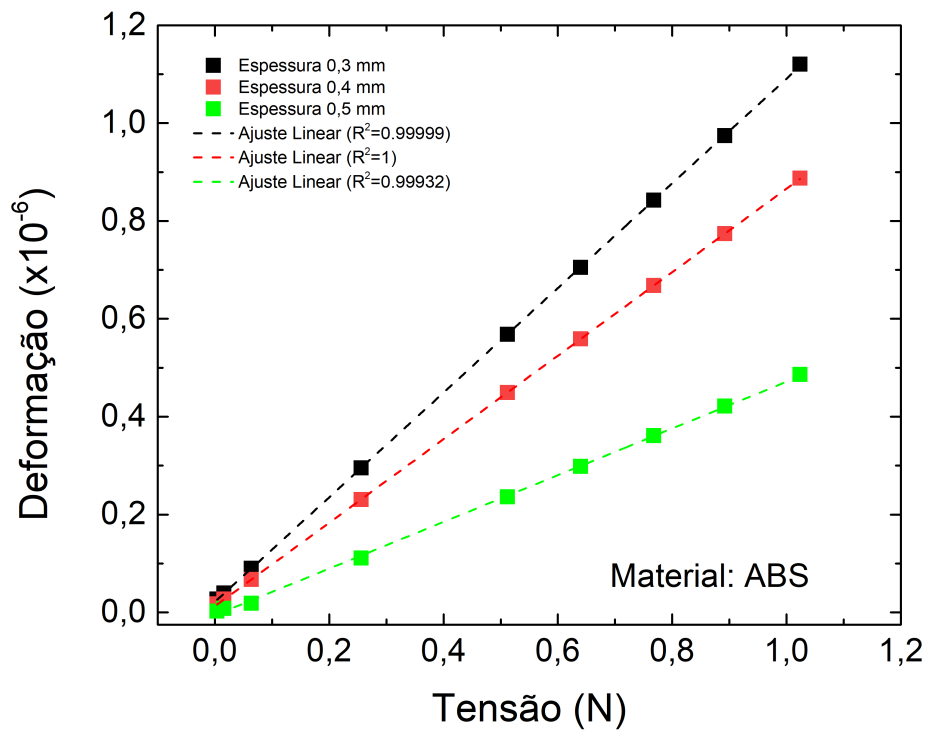


Figura 4.5: Gráfico da deformação frente a tensão aplicada sob a lâmina de plástico ABS.

4.2 Testes Experimentais

Todos os devidos cuidados tomados para a realização de qualquer tipo de calibração ou medição de balança, foram tomados já nos primeiros testes experimentais das células de carga do nosso protótipo, evitando qualquer tipo de fluxo de corrente de ar no ambiente, adotando uma base inerte, e registrando as condições de grandezas de influência que poderiam influenciar nas medidas coletadas, como a temperatura e a umidade relativa do ambiente.

Neste primeiro teste foi utilizado para a célula de carga modelo **B** um disco de chapa de aço galvanizada de aproximadamente 0,45 [mm] de espessura, a mesma utilizada para a confecção de calhas e rufos.

Como nosso objetivo nessa primeira etapa de dimensionamento das células de carga se restringe a etapa mecânica de sensoriamento e condições físicas dos mesmos, procuramos identificar quais células de carga apresentavam um comportamento linear da tensão de saída (V_o) frente a massa aplicada.

Para isso foi utilizado um conjunto de 6 pesos padrões de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 gramas certificados pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) utilizadas para fins de calibração das balanças de precisão do Grupo de Física dos Materiais do Instituto de Física, da Universidade Federal de Goiás, apresentados na Figura 4.6. Para medição das tensões de saída das células de carga foi utilizado um multímetro de alta precisão Fluke modelo 8846A por oferecer uma resolução de até 100 nV. (DATASHEET..., b)



Figura 4.6: Conjunto de pesos padrões de 100, 50, 20, 10, 5, 2 e 2 gramas adotados para fins de calibração.

Para fins de registro e acompanhamento dos resultados, monitoramento das condições do ambiente em tempo real e fonte de energia para as células de carga, foram

utilizados o sensor SHT31 e a placa de desenvolvimento modelo ESP32. Com o simples sistema sendo apresentado na Figura 4.7

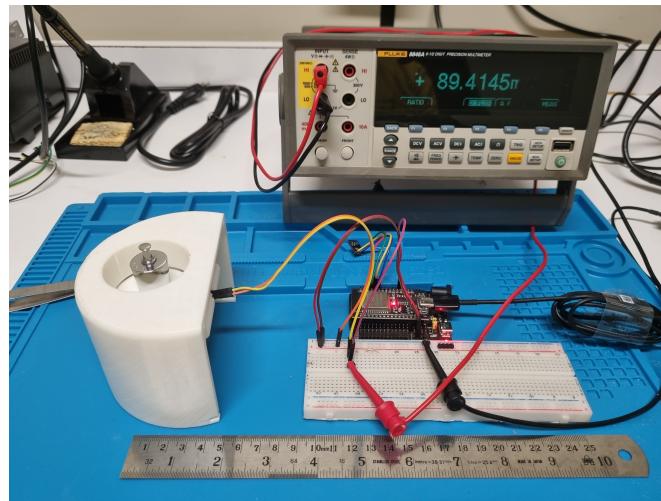


Figura 4.7: Sistema experimental, composto pelo peso padrão a esquerda que está sobre a célula de carga ligada pela *protoboard* ao multímetro e a placa de desenvolvimento ESP32

Durante todo o processo de medição as grandezas de influência temperatura ambiente e umidade relativa, se mantiveram estáveis em 25 °C, com a umidade relativa do ambiente em torno dos 40 %. As três células de carga foram submetidas a três séries de medidas dos pesos padrões, com os resultados sendo apresentados nas tabelas B.1, B.2 e B.3. Cujas representações gráficas em função das médias das séries são apresentados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

Dentre todas as células de carga testadas nesta primeira série de testes experimentais nota-se que a única que apresentou um comportamento linear de variação de tensão de saída (ΔV) em função da massa aplicada, seria a célula de carga modelo A, como pode ser verificado na representação gráfica da Figura 4.8.

Além disso, os resultados obtidos experimentalmente através desta célula de carga estão de acordo com as simulações realizadas por meio do software Fusion 360, algo que se pode constatar dada a proximidade entre as representações gráficas apresentados na Figura 4.8.

Podemos comparar os resultados das simulações realizadas para a célula de carga modelo A com os resultados dos testes experimentais. Seguindo a equação 2-24, ao replicarmos as mesmas condições dos testes experimentais aos resultados obtidos nas simulações, multiplicando as deformações obtidos nas simulações, por uma tensão de entrada de $V_i = 4,7$ [V] e considerando um fator de Gauge $k_G = 2,15$ para ambas os extensômetros.

Seguindo tais adequações, ao tomarmos como exemplo a aplicação de uma força de 0,5 [N], segundo a Tabela A.1, a célula de carga modelo A, sofrerá um deformação

$\epsilon \approx 90$, o que corresponderá a uma tensão $V_o = 0,91$ [mV], um resultado próximo aos resultados experimentais de $0,7$ [mV], mas que representa um erro relativo alto de 30%.

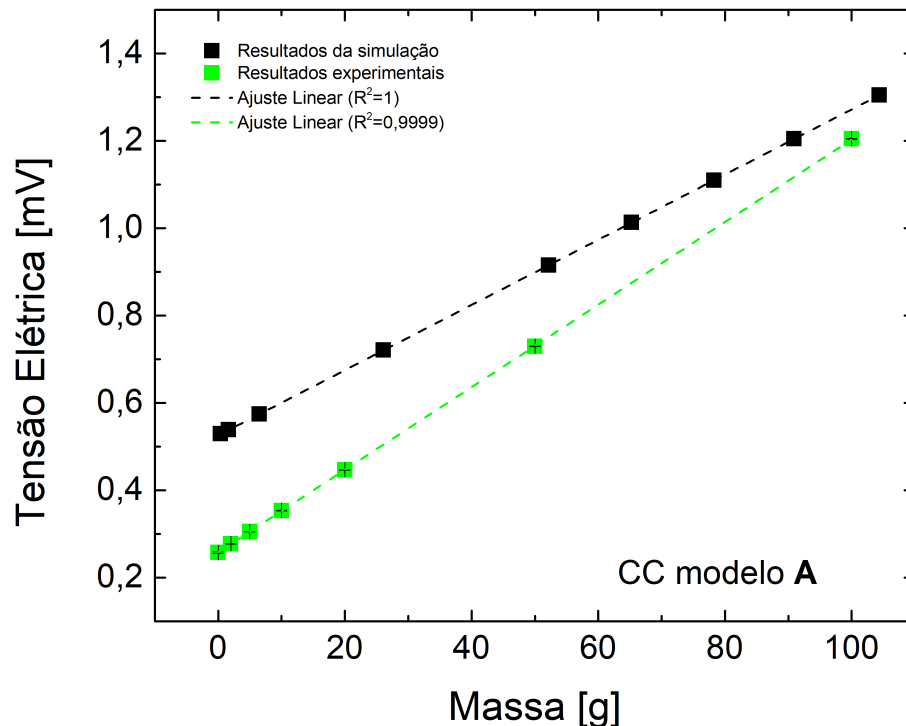


Figura 4.8: Gráfico dos resultados experimentais e da simulação de tensão estática, da Tensão de saída (V_o) da célula de carga *Single Point* em função da massa aplicada.

A diferença existente entre os gráficos dos resultados experimentais e os de simulação na Figura 4.8, podem ser facilmente atribuídos as propriedades genéricas adotadas ao alumínio nas simulações da célula de carga, devido a falta de conhecimento sobre a composição exata da liga metálica que compunha a célula de carga adotada neste experimento.

Infelizmente, as demais células de carga não apresentaram resultados satisfatórios como pode ser notado nos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10. A célula de carga modelo **B** apresentou uma grande oscilação entre as massas de 2 e 10 [g], apresentando um a grande faixa de incerteza, o que comprometeu muito sua exatidão.

Com a célula de carga de FSR só começando a corresponder as massas de teste, a partir da massa de 50 [g]. Algo que de certa forma já era esperado, dada a força de ativação exigida, condição explicitada na tabela de propriedades 3.3, mas que esperava-se que pudesse ser contornado a partir do peso do MVP e do concentrador de pressão. Em ambos os modelos de células de carga nota-se também a falta de precisão entre as séries de medição. Algo que acredita-se estar diretamente relacionado a presença de erros aleatórios que deveram ser identificados e minimizados nos próximos testes.

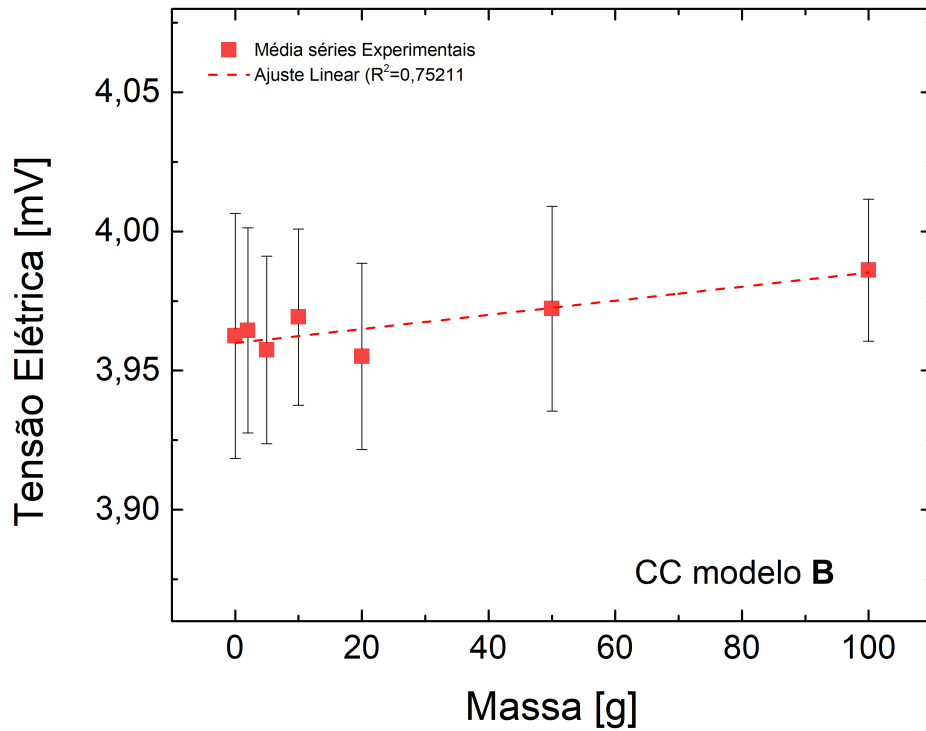


Figura 4.9: Gráfico da Tensão de saída (V_o) da célula de carga proposta em função da massa.

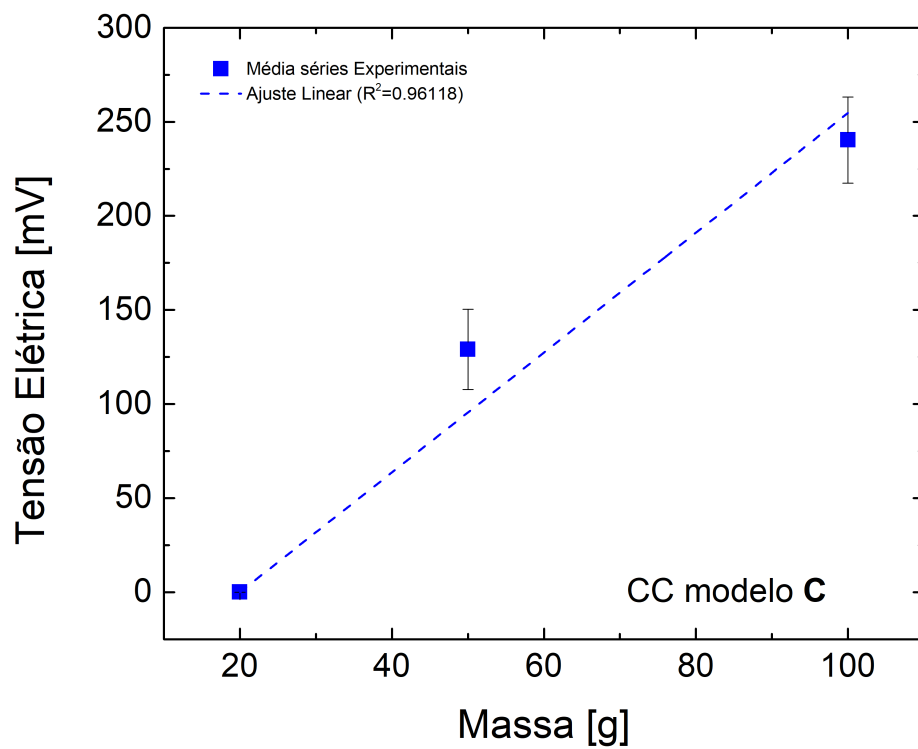


Figura 4.10: Gráfico da Tensão de saída (V_o) da célula de carga que utiliza o sensor FSR em função da massa.

Embora o ajuste linear da célula de carga de FSR apresente um R^2 mais próximo de 1 do que a célula de carga modelo **B**, vale destacar que durante a medição o modelo FSR exigiu um maior tempo de estabilização além de apresentar uma maior flutuação entre as medidas, do que a célula de carga modelo **B**. E quando considerado o mesmo intervalo de medidas para a realização da regressão linear em ambos as células, a discrepância entre os R^2 diminuem significativamente.

Analisando a Tabela orçamentaria 4.1, nota-se que não houve uma diferença significativa entre as células de carga analisadas. Com a CC modelo **A** se destacando por ter o menor custo. Vale destacar que por se tratar de uma célula que esteja em fase de desenvolvimento, seja mais do esperado, que o modelo **B** apresente um valor maior, devido alguns custos adicionais vinculados ao desenvolvimento de peças específicas para este modelo.

Conclusão e Perspectivas Futuras

A partir das simulações de análise tensorial e dos testes experimentais preliminares das células de carga propostas, conseguimos obter uma boa perspectiva quanto a parte de dimensionamento sensorial, conseguindo dimensionar e encontrar no mercado transdutores compatíveis as necessidades do projeto, além de desenvolver todo o layout do dispositivo.

Embora os resultados obtidos com os primeiros testes para a célula de carga modelo **B** não tenham sido tão otimistas quanto os resultados das simulações, devemos replicar experimentalmente os testes simulados para os diferentes materiais afim de verificar os resultados obtidos inicialmente e eliminar possíveis erros aleatórios e sistemáticos provenientes do método de instrumentação proposto.

Tratando-se pela perspectiva geral de melhor custo e benefício, a célula de carga modelo **A** correspondente ao modelo *Single Point*, continua sendo a melhor opção para balanças com nível de precisão desejado. Com os sensores Piezoelétrico e FSR não apresentando resultados condizentes as necessidades do projeto AFAL.

Como perspectivas futuras para este trabalho, daremos início a próxima etapa do projeto AFAL, que se destinará ao dimensionamento e teste dos sensores de umidade, além da finalização da parte eletrônica do protótipo e de análise de dados, para que em posse do sistema completo possamos iniciar a etapa de testes para a determinação da massa absoluta dos grãos de feijão em função de sua umidade relativa.

Referências Bibliográficas

ABNT. *Graus de proteção providos por invólucros (códigos IP): confecção de trabalhos acadêmicos em L^AT_EX segundo as normas ABNT*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://abntex.codigolivre.org.br>>.

AMOROS, R. T. *Avaliação de Tensões Residuais em Chapas de Aço Carbono, Destinadas a Processos de Corte a Laser, Pelo Método de Anisotropia Planar*. Tese (Doutorado) — Lactec, 2008.

AUTODESK. 2023. <<https://www.autodesk.com.br/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>> Acessado em 22/07/2023.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação E Fundamentos de Medidas. Volume 1*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2019.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação E Fundamentos de Medidas. Volume 2*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2019.

BECK, J. C. P. *Projeto, Construção e Análise de Células de Carga de Placa e de Anel*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983.

BEER E. RUSSEL JOHNSTON JR., J. T. D. D. F. M. F. P. *Mecânica dos Materiais*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2011.

DALLY J. W.; RILEY, W. F. *Experimental Stress Analysis*. [S.l.]: Chicago: Mcgraw-hill, 1978.

DALLY JAMES W.; RILEY, W. F. M. K. G. *Instrumentation for Engineering Measurements*. [S.l.]: United States: John Wiley Sons, 1993.

DATASHEET BF350-3EB. <<http://www.htc-sensor.com/uploadfile/download/20172171455151802.pdf>> Acessado em 22/07/2023.

DATASHEET Fluke 884. <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1354655/FLUKE/8846A.html>> Acessado em 22/07/2023.

DATASHEET RP-S40-ST. <http://m.eleparts.co.kr/data/_gextends/good-pdf/201904/good-pdf-7495470-1.pdf> Acessado em 22/07/2023.

FARONI, L. R. A. D. et al. Influência do conteúdo de umidade de colheita e temperatura de secagem na qualidade do feijão. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, Departamento de Engenharia Agrícola - UFCG, v. 10, n. 1, p. 148–154, 2006. ISSN 1415-4366.

FLINTEC. <<https://www.flintec.com/br/sensores-de-peso/celulas-de-carga/como-funciona-uma-c%C3%A9lula-de-carga>> Acessado em 22/07/2023.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. [S.l.]: Pearson, 2009.

INMETRO. *1ª edição luso-brasileira do Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*. [S.l.]: INMETRO, 2012.

KOLHAPURE, R.; SHINDE, V.; KAMBLE, V. Geometrical optimization of strain gauge force transducer using gra method. *Measurement*, v. 101, p. 111–117, 2017. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224117300404>>.

RAJPUROHIT, S. R.; DAVE, H. K. Flexural strength of fused filament fabricated (fff) pla parts on an open-source 3d printer. *Advances in manufacturing*, Shanghai University, Shanghai, v. 6, n. 4, p. 430–441, 2018. ISSN 2095-3127.

RICE, L. Load cell and weigh module handbook. *Rice Lake Weighing System*, p. 1–3, 2010.

SILVA, A. F. Estudo, desenvolvimento e concepção de uma célula de carga. Guaratingueta, 2012.

SILVA J. G. E AIDAR, H. 1999. <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/producao/colheita/perdas-na-colheita>> Acessado em 22/07/2023.

TAYLOR, J. R. *Análise de Erros*. [S.l.]: Bookman, 2012.

THOMAZINI D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. *Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações*. 5. ed. [S.l.]: Editora Érica, 2008.

USP. *Extensômetros Elétricos*. 2015. <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3086/Extensometros_eletricos.pdf> Acessado em 22/07/2023.

VISHAY. *Stress Analysis Strain Gages*. <<http://www.vishay-measurements.ca/stress-analysis-strain-gages.htm>> Acessado em 22/07/2023.

XNQ E. C. <<https://pt.aliexpress.com/store/437150>> Acessado em 22/07/2023.

Resultados da simulação de tensão estática

<i>CC Singe Point</i>	
Força [N]	Deformação (ϵ) ($\times 10^{-6}$)
0,004	52,33
0,016	53,23
0,064	56,84
0,256	71,29
0,512	90,56
0,640	100,2
0,768	109,8
0,892	119,2
1,024	129,1

Tabela A.1: Resultados provenientes da simulação da célula de carga modelo **A**, composta por Alumínio.

Alumínio		Deformação (ϵ) ($\times 10^{-6}$)		
Força [N]	Espes. [mm]	0,3	0,4	0,5
	0,004		0,010	0,006
0,016		0,012	0,008	0,004
0,064		0,026	0,014	0,029
0,256		0,064	0,038	0,078
0,512		0,120	0,070	0,144
0,640		0,148	0,086	0,176
0,768		0,175	0,103	0,209
0,892		0,202	0,118	0,241
1,024		0,231	0,135	0,275

Tabela A.2: Resultados da análise de tensão para a célula de carga de modelo **B**, sob diferentes espessuras, com o disco sendo composto por Alumínio.

Latão		Deformação (ϵ) ($\times 10^{-6}$)		
Espes. [mm]		0,3	0,4	0,5
Força [N]				
0,004		0,014	0,010	0,002
0,016		0,016	0,012	0,004
0,064		0,026	0,017	0,036
0,256		0,065	0,041	0,082
0,512		0,117	0,073	0,143
0,640		0,142	0,089	0,173
0,768		0,168	0,105	0,204
0,892		0,194	0,120	0,233
1,024		0,220	0,136	0,265

Tabela A.3: Resultados da análise de tensão para a célula de carga de modelo **B**, sob diferentes espessuras, com a lâmina sendo composta por Latão.

Plástico ABS		Deformação (ϵ) ($\times 10^{-6}$)		
Espes. [mm]		0,3	0,4	0,5
Força [N]				
0,004		0,027	0,017	0,002
0,016		0,039	0,027	0,008
0,064		0,090	0,067	0,018
0,256		0,295	0,230	0,111
0,512		0,568	0,449	0,236
0,640		0,705	0,559	0,298
0,768		0,842	0,668	0,361
0,892		0,974	0,774	0,421
1,024		1,12	0,887	0,486

Tabela A.4: Resultados da análise de tensão para a célula de carga de modelo **B**, sob diferentes espessuras, com a lâmina sendo composta por plástico ABS.

Resultados experimentais

Massa [g]	Série 1 [mV]	Série 2 [mV]	Série 3 [mV]	Média [mV]	σ_m [mV]	u_{sis} [mV]	u_{tot} [mV]
0	0,2560	0,2612	0,2544	0,2572	0,0013	0,0005	0,0014
2	0,2778	0,2776	0,2762	0,2772	0,0003	0,0005	0,0006
5	0,3056	0,3048	0,3045	0,3050	0,0002	0,0005	0,0005
10	0,3539	0,3525	0,3536	0,3533	0,0003	0,0005	0,0006
20	0,4485	0,4458	0,4452	0,4465	0,0007	0,0005	0,0008
50	0,7302	0,7290	0,7287	0,7293	0,0003	0,0005	0,0006
100	1,2055	1,2019	1,2056	1,2043	0,0008	0,0005	0,0009

Tabela B.1: Resultados experimentais provenientes da célula de carga modelo **A**.

Massa [g]	Série 1 [mV]	Série 2 [mV]	Série 3 [mV]	Média [mV]	σ_m [mV]	u_{sis} [mV]	u_{tot} [mV]
0	4,0935	3,9232	3,8707	3,9625	0,0440	0,0005	0,0440
2	4,0758	3,9224	3,8951	3,9644	0,0368	0,0005	0,0368
5	4,0600	3,9123	3,8999	3,9574	0,0337	0,0005	0,0337
10	4,0595	3,9542	3,8939	3,9692	0,0317	0,0005	0,0317
20	4,0487	3,9438	3,8728	3,9551	0,0334	0,0005	0,0335
50	4,0746	3,9610	3,8811	3,9722	0,0368	0,0005	0,0368
100	4,0529	3,9871	3,9182	3,9861	0,0255	0,0005	0,0255

Tabela B.2: Resultados experimentais provenientes da célula de carga modelo **B**.

Massa [g]	Série 1 [mV]	Série 2 [mV]	Série 3 [mV]	Média [mV]	σ_m [mV]	u_{sis} [mV]	u_{tot} [mV]
20	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0
50	84	193	110	129	21	0,0005	21
100	171	270	281	240	23	0,0005	23

Tabela B.3: Resultados experimentais provenientes da célula de carga modelo **C**.