



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**Desenvolvimento e utilização da extensometria para
validação de simulação computacional.**

**Autor: Lucas Matheus Castro de Oliveira
Orientador: Evandro Leonardo Silva Teixeira
Co-Orientador: Carla Tatiana Mota Anflor**

**Brasília, DF
2017**



LUCAS MATHEUS CASTRO DE OLIVEIRA

Desenvolvimento e utilização da extensometria para validação de simulação computacional.

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Evandro Leonardo Silva Teixeira, DSc.

Co-Orientador: Carla Tatiana Mota Anflor

**Brasília, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

<p>Sobrenome do Autor, Nome Autor.</p> <p>Título da Monografia: Subtítulo / Nome do Autor (em ordem normal). Brasília: UnB, 2013. 103 p. : il. ; 29,5 cm.</p> <p>Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2013. Orientação: Nome do Orientador.</p> <p>1. Palavra Chave. 2. Palavra chave. 3. Palavra chave3 I. Sobrenome do orientador, Nome do orientador. II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU Classificação</p>
--

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



Desenvolvimento e utilização da extensometria para validação de simulação computacional.

Lucas Matheus Castro de Oliveira

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação dd/mm/aa) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr: Evandro Leonardo S. Teixeira, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr. Carla Tatiana Mota Anflor, UnB/ FGA
Co-Orientadora

Prof. UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2017

Esse trabalho é dedicado à minha família, amigos e quem sempre estiveram ao meu lado durante essa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial minha mãe Alexandra Silva de Castro, minha amada avó Maria do Espírito Santo de Castro, minha namorada Jullia Maria Bezerra. Agradeço também ao grupo de estudo que me acolheu e que me incentivou fortemente GMEC (Grupo de Mecânica Experimental e Computacional) encabeçado pelos Professores Carla Anflor e Jhon Goulart. Agradeço também ao meu orientador Professor Evandro Leonardo que sempre esteve presente e tirando todas as dúvidas pertinentes sobre o projeto.

Agradeço também as minhas maravilhosas amigas, que entenderam a necessidade de apoiar nesse momento tão crucial para a formação acadêmica de um estudante, em especial à Bruno Baldini, Fábio Antônio, Breno Henrique, pessoal do Fakebrothers e Jacksons, sem esse apoio talvez não teria condições para entregar um trabalho de excelência.

Chuva e sol
Poeira e carvão
Longe de casa
Sigo o roteiro
Mais uma estação
E a alegria no coração
(Luiz Gonzaga)

RESUMO

Este trabalho trás a utilização conjugada de análises numéricas e experimentais, uma prática muito utilizada na indústria automotiva. Neste projeto foi modelado um dispositivo para medição de deformações com carregamento estático para obtenção dos campos de deformação desejados, assim com estes valores é possível verificar e identificar se os parâmetros utilizados para análise numérica são condizentes com a realidade. Deste modo, será feito todo o estudo sobre os conceitos e componentes necessários para o perfeito entendimento da técnica, em seguida será feita simulações analíticas (quando for viável), simulação numérica com a plataforma ANSYS® e por fim a utilização do sensor para medir deformação.

Palavras-chave: *Strain Gage*, Deformação, Simulação numérica, análise experimental.

ABSTRACT

This paperwork brings the combined use of numerical and experimental analyzes, a practice widely used in the automotive industry. In this project a device was used to measure the deformation with static loading to obtain the desired deformation fields, so with these values it is possible to verify and identify if the parameters used for numerical analysis are consistent with reality. In this way, the entire study will be done on the concepts and components necessary for the perfect understanding of the technique, followed by analytical simulations (when feasible), numerical simulation with the ANSYS platform and finally the use of the sensor to measure deformation.

Keywords: Strain Gage, Strain, Numerical Simulation, Experimental analysis.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	16
RESUMO	19
ABSTRACT	20
SUMÁRIO	21
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.2 ESTRUTURA DO TEXTO.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 A IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA MECÂNICA PARA A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	25
2.2 COMO É FEITO O ESTUDOS DE DEFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.	28
2.2.1 Deformações para Cargas estáticas.	28
2.2.2 Deformações para cargas dinâmicas.....	32
2.3 A IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA O ESTUDO DE DE DEFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA	34
2.4 A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE INSTRUMENTAL PARA O ESTUDO DE DEFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.	35
2.4.1 Técnica da Extensometria.....	36
2.4.2 Ponte de <i>Wheatstone</i>	37
2.4.3 <i>Strain Gage</i>	40
2.4.4 Extensometria na Indústria Automotiva.	41
3 Metodologia	43
3.1 Primeiro Passo - Revisão Bibliográfica	43
3.2 SEGUNDO PASSO - DEFINIÇÃO DO TRABALHO	43
3.3 TERCEIRO PASSO - DESENVOLVIMENTO DO APARATO.....	43
3.4 QUARTO PASSO - VALIDAÇÃO DO ESTUDO	44
4 Projeto	45
4.1 Fonte de Tensão.....	45
4.2 Placa de Amplificação.....	46
4.3 Ponte de <i>Wheatstone</i>	49
4.4 Manufatura.....	49
5 ESTUDO DE CASO	54
5.1 Benchmarking 1 – Viga Engastada.....	54
5.1.1 Solução analítica.....	54
5.1.2 Modelagem ANSYS	57
5.1.3 MODELAGEM EXPERIMENTAL	60
6 CRONOGRAMA DE ATIVIDADE	63
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA	64

1 INTRODUÇÃO

Com a necessidade de continuar inovando, a indústria automotiva, segundo Carvalho (2008), vem se empenhando para desenvolver novas tecnologias automotivas. Estas inovações partem do início do projeto, seja na parte de desenvolvimento do produto ao desenvolver um desenho técnico ou nos processos de fabricação utilizados para a fabricação de um componente(Zoufori,2004). Como os engenheiros que desenvolvem estes projetos possuem um grande leque de escolha relacionado a material, processo de fabricação, modelagem 3D entre outras ferramentas, o estudo precisa ser ainda maior para que não seja gasto um valor que desnecessário.

Com o incentivo em R&D (Pesquisa e Desenvolvimento) os engenheiros buscam encontrar saídas para que assuntos de proporção mundial sejam mitigados como mortes em acidentes automotivos e emissões de CO₂ . Para isso os engenheiros investem seu tempo em pesquisa de novos materiais, novos métodos de fabricação, diferentes geometrias para tentar diminuir consumo de combustível e aumentar o índice de colisões sem vítimas. Segundo Uenishi et al. (2003) no Japão o estudo de *Crashworthiness* (capacidade de um veículo colidir e não ferir os passageiros) surgiram otimizações nos chassis, em aços de alta resistência ao choque e redução de peso que diminuiu diretamente o número de gases que saíam do escapamento.

A utilização de técnicas computacionais é bastante rentável para o ambiente automotivo, tendo em vista a facilidade de diminuir o tempo de ciclo para finalizar o projeto, atendendo a possibilidade de não precisar gastar recursos e tempo com o desenvolvimento de protótipos(Konyha,2013). Porém a falta de um auxílio de um protótipo físico capaz de ser analisado experimentalmente abre brechas para possíveis erros que não podem ser vistos pelos parâmetros não escolhidos durante a análise numérica.

Desta maneira mostra a necessidade de qualquer investidor no ramo automotivo utilizar as análises experimentais para capacitar os pesquisadores e engenheiros o perfeito projeto do produto. Por isso, Lima *et al.* (2013) cita que quanto mais se investe em ensaios

experimentais para fazer aquisição de condições de contorno eleva o potencial de redução de custo, além de diminuir o tempo devido a necessidade de repetir diversas vezes os protótipos.

Um dos pontos que a indústria tem investido na área de pesquisa e desenvolvimento é a área de deformações, pelo fato de através deste parâmetro ser possível identificar o comportamento do material de forma estática e dinâmica, possibilidade de caracterizar um material desconhecido além da possibilidade de validar ensaios numéricos feitos em ambiente computacional levando confiabilidade aos resultados.

1.1 OBJETIVOS

Desenvolvimento de um aparato experimental que entregue ao usuário a possibilidade de identificar parâmetros em reais que possam ser utilizados em âmbito computacional, fazendo com que a análise numérica se torne o mais próximo da realidade. Para isso será feito um estudo sobre deformação e sobre os *Strain Gages*, para ser possível a manufatura de um dispositivo que faça medições, e com ele possa medir deformações e inserir em um *software* CAE.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

O presente trabalho dispõe da seguinte estrutura para melhor indicar ao leitor os pontos do projeto.

1 Introdução : A introdução tem como objetivo instigar a leitura do projeto, e mostrando a problemática escolhida no projeto.

2 Revisão Bibliográfica : Explicando ao leitor a intenção e quais conceitos fundamentais do projeto seriam abrangidos no caso o estudo de deformação no âmbito automotivo e o estudo sobre o sensor de deformação, *Strain Gage* .

3 Metodologia : Indica ao leitor como será feito o processo para evidenciar e solucionar o problema.

4 Estudo de Caso : Leitor será imerso no problema escolhido pelo autor, e como será encontrada as soluções.

5 Cronograma : Evidencia ao leitor como foi dividido as atividades e em quais tempos foram terminadas.

6 Bibliografia : Trabalhos que foram tomados como base para a escrita desse projeto, como Trabalhos de Conclusão de Curso, Dissertações, Teses, Artigos Científicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA MECÂNICA PARA A INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

O setor automotivo atual teve grandes mudanças durante os quase 60 anos em que desembarcou no Brasil. Em 1957, ano em que foi iniciada a atividade automotiva brasileira, a indústria automotiva empregava 9,8 mil funcionários, gerava 140 mil empregos diretos e indiretos. Já em 2016, é possível ver o crescimento astronômico comparado a 1957, atualmente a indústria automotiva possui 130 mil empregados, e gera 1,5 milhão de empregos na cadeia de produção. O crescimento não ocorreu só no chão de fábrica, com o investimento em P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) a engenharia automotiva brasileira produziu inovações, como é o caso do carro movido à etanol. Esta mudança trouxe grandes mudanças na economia pelo fato do Brasil ser grande produtor de Cana-de-Açúcar, matéria prima do álcool. Após isso, em 2003 os engenheiros brasileiros avançaram mais uma vez com a implementação de um motor *flex*, onde era possível abastecer o automóvel tanto com gasolina como com álcool. E a expectativa continua crescendo, com a criação do Programa Inovar-Auto, a tendência é aumentar ainda mais o número de inovações na engenharia nacional com o incentivo de quase R\$ 80 bilhões, sendo R\$ 14 bilhões na área de P&D.(ANFAVEA,2016)

Segundo os dados fornecidos por *Global R&D Funding Forecast 2016* (Previsão de financiamento global em Pesquisa e Desenvolvimento) alguns dos maiores investidores em pesquisa e desenvolvimento são provenientes do ramo automotivo encabeçado pela Volkswagen (VW). A Volkswagen investiu um valor total de 80 bilhões de dólares no ano de 2014 com correção de produtos, multas por falsificar dados de emissões de gases e com ações judiciais. Outros motivos levaram as indústrias automotivas à alavancar os gastos com P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) como a possível difusão dos carros elétricos, surgimento de carros autônomos, e quem mais investiu foi a Tesla, que atualmente possui o veículo mais avançado tecnologicamente. Os valores gastos mundialmente de 2014 até 2016 é dado no gráfico a seguir.

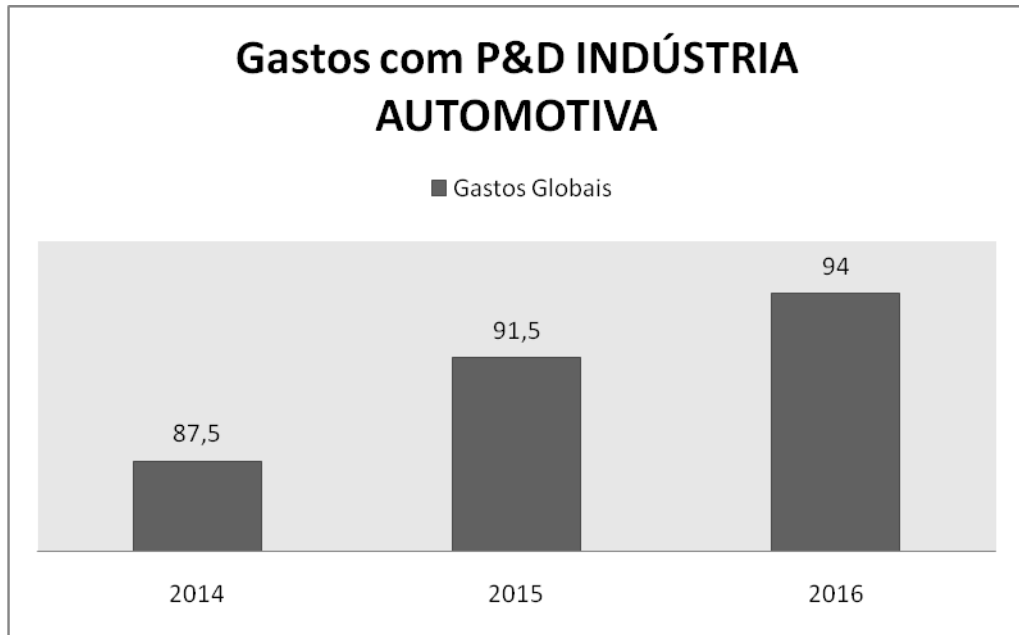


Figura 1: Gráfico dos gastos mundiais em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).
 FONTE: R&DMAGAZINE,2016.

Porém, segundo Wyman (2015) nos próximos dez anos os investimentos em P&D serão de 800 bilhões de euros, sendo que 40% deste valor será investido de maneira equivocada. Desta forma, é necessário que as empresas tenham entendimento completo do que é possível implementar no veículo de maneira eficaz, para melhorar os custos de engenharia, uniformidade de processos, redução de complexidade ou até desenvolver veículos de baixo custo. Assim segundo Wyman, auxiliará as indústrias a controlar os custos produzidos.

No Brasil os investimentos em P&D também aconteceram, as montadoras tiveram que incentivar o estudo para não perder espaço no país e muito menos perder clientes do exterior. Os valores injetados em P&D de 2000 a 2005 aumentaram 250% (de R\$ 549 milhões em 2000 para R\$ 1,9 bilhões em 2005), mostrando que chegava ao patamar de investimento em P&D de países como Japão, Estados Unidos da América e países europeus(Quadros e Consoni,2009). Segundo *Global R&D Funding Forecast 2016* pelo fato da crise instaurada no país, houve um crescimento discreto de P&D de apenas 1% em 2016, porém o país ainda é o líder em investimento em P&D na América do Sul com investimento de 37,18 Bilhões de dólares como mostra a tabela a seguir.

	PAÍS LIDER	INVESTIMENTO 2016 em P&D(em Bilhões)	PORCENTAGEM NA REGIÃO	RANK GLOBAL
América do Norte	Canadá	29,46	71,3%	11
América do Sul	Brasil	37,18	73,9%	10
Oriente Médio	Irã	11,78	23,4%	21
África	Africa do Sul	6,76	30,3%	33
Rússia/CEI	Rússia	50,95	95,2%	8

Tabela 1: Países líderes em P&D por região. FONTE: *R&D MAGAZINE, 2016*.

É fácil ver que países com grande potencial econômico como Estados Unidos, países europeus e a China não foram levados em consideração, pelo fato de possuírem valores muito maiores do que os citados, no total foram negligenciado 56 países da Ásia, Estados Unidos e Europa.

Por se tratar de uma indústria média-alta intensidade tecnológica segundo Carvalho (2008), existe um grande estudo para desenvolver tecnologias consideradas avançadas como acontece na telecomunicação, eletrônica, manufatura integrada por computadores e a parte de *design* de materiais. Atualmente estudos na área da engenharia buscam encontrar um meio termo entre agradar o cliente e diminuir os gastos com a fabricação dos automóveis e de seus componentes(Alvino,2012).

Com o grande investimento em P&D, a indústria automotiva permite desenvolver projetos com um leque grande de possibilidades na escolha de ferramentas, materiais entre outros parâmetros. Os estudos no ramo automotivo tem suas diretrizes, como encontrar materiais mais leves, aumentar a eficiência dos veículos, diminuição de testes e aumentar o nível de confiabilidade, assim é possível chegar ao componente ótimo. Com o grande investimento, o ponto ótimo é o único aceitável pelos empresários e para chegar neste ponto tem alguns

aspectos como a otimização de geometria, busca de materiais alternativos e modificação no processo de fabricação(Zoroufi,2004).

2.2 COMO É FEITO O ESTUDOS DE DEFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.

A indústria automotiva possui elevada quantidade de gastos, isto faz necessário investir em componentes mais leves, mais baratos, mais eficientes e que apresentam dimensões mais precisas(Zoufori,2004). Para encontrar valores que auxiliem nas escolhas de um projeto é preciso ter claro no escopo do projeto como será o funcionamento do produto, assim é necessário saber se o componente estará sujeito a uma carga estática ou uma carga dinâmica.

2.2.1 Deformações para Cargas estáticas.

Uma análise estática é submetida quando existe a aplicação de uma carga estática, ou seja, carregamentos constantes durante todo o tempo de ensaio que muitas vezes é conhecida, onde é desprezado amortecimento e forças inerciais(Furtado,2013). O resultado desta análise, segundo Rao (2015), entrega ao usuário deslocamentos, tensões, deformações advindas da carga aplicada.

Segundo Wannenburg(2007) qualquer projeto que se deseja produzir, é necessário levar em consideração um modelo matemático que simule o comportamento do projeto em termos do que se deseja. A equação a seguir demonstra como é considerado este modelo matemático.

$$[deformação, tensão, energia, etc.] = f(geometria, propriedades do material, carregamento, etc.) \quad (1.1)$$

Esta equação demonstra claramente o que Rao (2015) cita, que através de carregamentos, propriedades dos materiais entre outras condições é, possível quantificar parâmetros para estudo como deformação e tensão.

Para identificar quanto de deformação há em um componente, é necessário conhecer alguns fatores de engenharia como: módulo de Young do material do componente excitado(E), tensão que é aplicada no componente(σ), assim podemos encontrar através da Lei de Hooke a deformação.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (1.2)$$

Onde o σ é a tensão, o E é o módulo de Young e o ϵ é a deformação ou o alongamento realizado com a excitação da tensão inserida.

Com a variação destes parâmetros e considerando constante o módulo de Young, é possível identificar um gráfico que é muito conhecido na engenharia pelo nome de Gráfico tensão-deformação, este gráfico é mostrado a seguir.

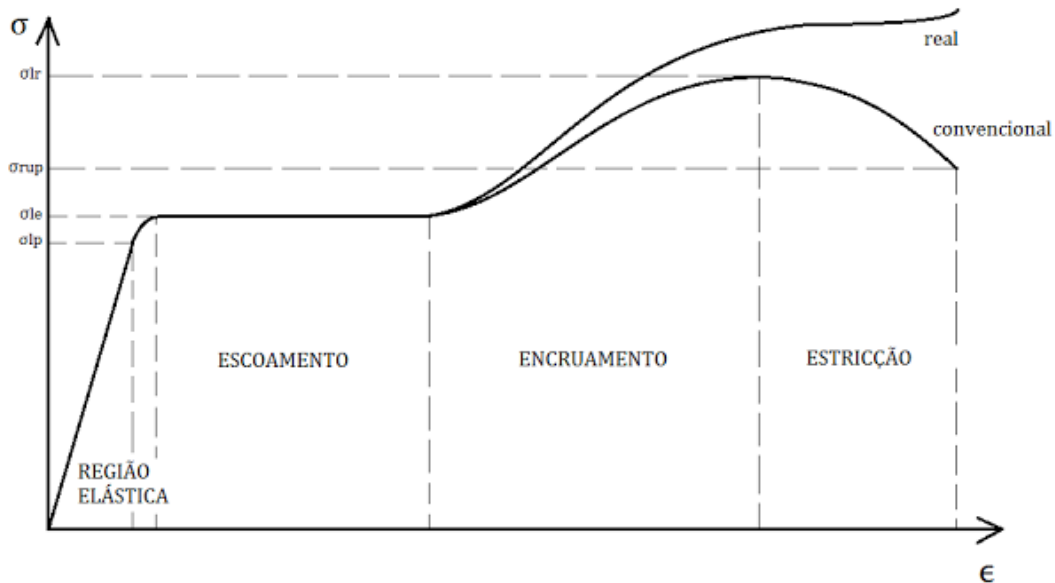


Figura 2: Gráfico Tensão Deformação Fonte: Disponível em :<http://o-portico.blogspot.com.br/2015/10/diagrama-tensao-deformacao-ductilidade.html> Acesso : 03/05/2017

Este gráfico é muito utilizado na engenharia como ficha técnica de um material, podendo identificar se o material é dúctil ou frágil, tensões que fazem o material ter diferentes tipos de comportamento e qual é a tensão última do material ensaiado(Shigley,2005).

Normalmente diversos componentes automotivos possuem geometria rebuscada muitas vezes para atender requisitos estéticos porém de difícil reprodução, componentes estes como: Pára choque, Portas automotivas, Capô automotivo entre outros. Como não é possível evitar o surgimento da trinca em um concentrador de tensão, é necessário estudos no local para acompanhar o estado de vida do componente. Um dos parâmetros que se pode ser utilizado para este estudo é a deformação, pelo fato de ser possível descobrir através do critério de Von Mises as tensões equivalentes nos pontos de possíveis trincas(Petracconi,2009).

Atualmente a indústria automotiva existem diversos tipos de critérios para tomada de decisão sobre qual tipo de material utilizar para incorporar o projeto do chassi, de uma suspensão, de um banco automotivo ou qualquer tipo de componente. O uso da deformação para este fim é dada pela identificação se o material possui as características mecânicas que um gráfico tensão-deformação demonstra, se o material possui as mesmas características em qualquer condição de trabalho etc. Segundo Echeverri (2017) a indústria está investindo bastante no estudo de novos aços estruturais para compor o chassi que tenham tanto confiabilidade na área de segurança como leveza para melhorar a eficiência e o desempenho. Já Diaz et al.(2014) demonstra que não basta apenas escolher um material que entregue desempenho e segurança ao desenvolvedor, é necessário encontrar as melhores formas para usinagem e conformação do projeto. Em outro ponto, o autor mostra que o chassi em alumínio tem uma aceitação boa para a utilização que lhe cabe, porém a baixa usinabilidade do alumínio descarta esta utilização. A escolha dos materiais que serão utilizados em um automóvel talvez seja o ponto mais complexo do projeto, segundo Mayyas (2012) quando o veículo está apenas composto do chassi - BIW (Body-in-White) - o corpo do veículo já possui 40% do seu peso final.

Na concepção de um motor, parte da fabricação de três componentes, são eles: Bloco do motor, cabeçote do cilindro e coletor de escape. Para esta fabricação é necessário materiais que possuam capacidade de suportar altíssimas tensões, possibilidade de ser fundido e baixo custo com matéria prima(Motalbo,2010).

Porém não é só apenas o peso do veículo que é levado em consideração para escolher um material a ser utilizado no protótipo, é levado em consideração alguns pontos de forma que para um engenheiro a escolha não seja baseada apenas em uma, como mostra a figura 1.

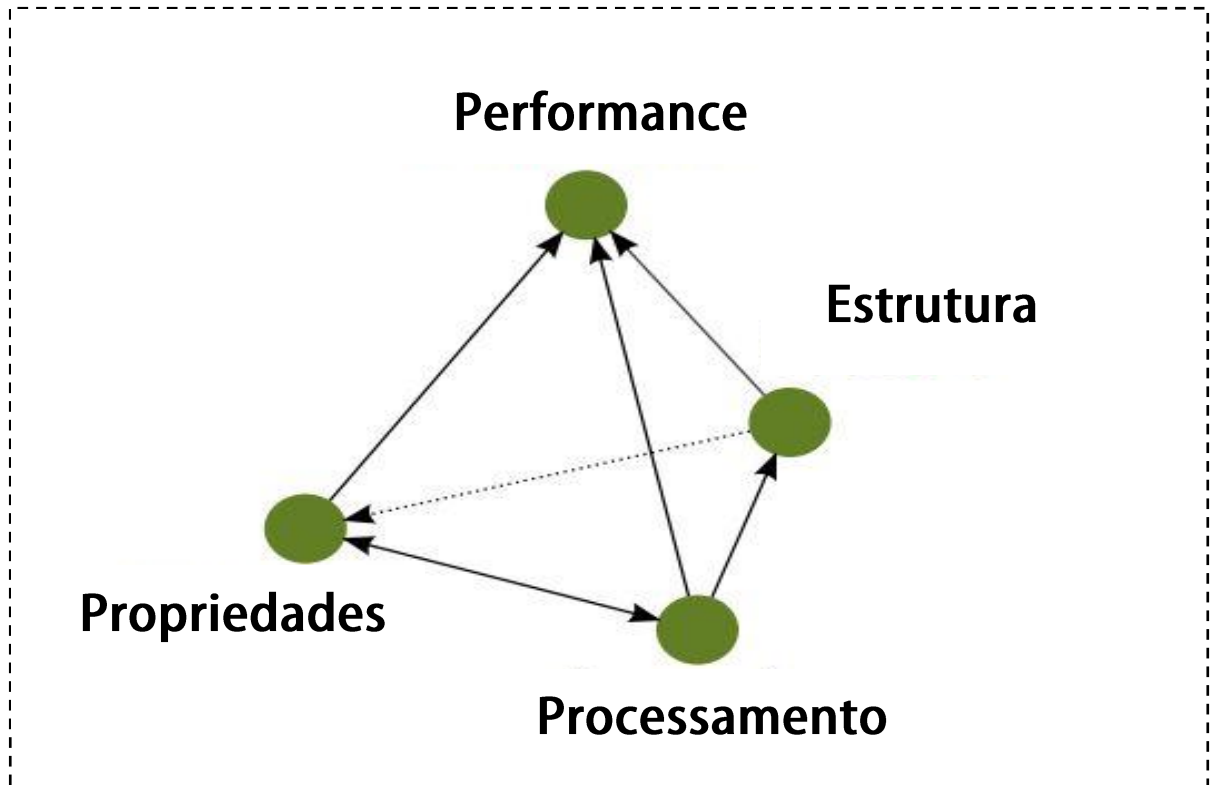


Figura 3: Interrelação entre parâmetros para escolha de um material (Montalbo,2010)

Assim, para qualquer engenheiro ter uma tomada de decisão correta em relação à escolha do material é necessário possuir um escopo de projeto bem definido, onde ele saiba o custo máximo para a concepção do projeto, assim podendo identificar valores para o processamento da matéria prima, logística da matéria entre outros pontos(Zoufori,2004).

Outro ponto em que o estudo da deformação auxilia fortemente os engenheiros, é o estudo da caracterização dos materiais. Este estudo cresce quando é levado em consideração a manutenção corretiva, ou seja, quando o material experimenta a falha há a necessidade de substituição, a identificando do material utilizado é de suma importância, tendo em vista a possibilidade de realizar a reposição sem retirar o produto de seu escopo original(Mousquer,2014). Para esta caracterização são utilizados o que é chamado no ramo da engenharia mecânica como ensaios mecânicos, estes ensaios podem ser tanto destrutivos como não destrutivos. O ensaio mais utilizado para esta caracterização seria o ensaio de tração, pelo fato de com o auxílio de uma célula de carga haver a possibilidade de identificação das tensões de escoamento, última e de ruptura. Nestes ensaios são possíveis identificar componentes químicos, como adição de elementos para mudar a rigidez ou o módulo de Young, tratamentos térmicos para melhorar alguma característica que o material

não possua anteriormente, entre outros pontos que podem ser perceptivos durante estes ensaios(Callister,2002).

Porém, não é sempre que o componente estudado está sujeito a carregamento estático, assim a indústria automotiva também investe pesado nas pesquisas relacionadas ao conhecimento do comportamento do material em movimento, ou seja, excitado por uma carga dinâmica.

2.2.2 Deformações para cargas dinâmicas

Para entender o comportamento de um chassi em movimento não é suficiente considerar uma força monotônica e ductilidade do material utilizado para obter resultados seguros e confiáveis(Zoufori,2004). Existem diferentes tipos de esforços dinâmicos são eles: o esforço cíclico e o esforço de impacto. O cíclico é mais utilizado no estudo da fadiga, onde deseja identificar o tempo de funcionamento da peça sem chegar a falha. Já o estudo do impacto tem como característica entender como o material reage a aplicação de uma força abrupta e repentina(Magalhães,2011)

Existem diversas classificações para o ensaio de impacto, ele pode ser de baixa velocidade ou quasi-estático (abaixo de 10 m/s) e dinâmico de alta velocidade (acima de 10 m/s). Para auxiliar a classificação do impacto, uma outra grandeza pode ser utilizada, como é o caso da taxa de deformação (*strain rate*). A taxa de deformação é a variação de deformação no tempo, assim com esses valores é possível identificar se o impacto é quasi-estático, impacto de dinâmica baixa, impacto de dinâmica alta e impacto de alta velocidade. A sensibilidade à taxa de deformação é uma característica do material escolhido, assim dependendo da velocidade inserida no ensaio o material pode ter diversos comportamentos. A influência da taxa de deformação nas propriedades do material é conhecida como viscoplasticidade (Mishra,2014). Uma tabela demonstra alguns testes e qual a taxa de deformação é submetida ao componente durante o teste.

MÉTODOS DE TESTE COMUNS	TAXA DE DEFORMAÇÃO
ALTA VELOCIDADE DE IMPACTO	10^7
–Explosivos	10^6
–Impacto de placa normal	10^5
–Laser pulsado	
–Chapa explodindo	
DINÂMICA ALTA	10^4
–Teste de Taylor	10^3
–Barra de Hopkinson	
–Anel de Expansão	
DINÂMICA BAIXA	10^2
–Máquinas hidráulica ou pneumática de alta velocidade	10^1
QUASE ESTÁTICO	10^0
–Máquinas hidráulicas, servo-hidráulicas ou de parafuso	10^{-1}
	10^{-2}
	10^{-3}
	10^{-4}
FLUÊNCIA E RELAXAMENTO DE TENSÕES	10^{-5}
–Máquinas convencionais de teste	10^{-6}
–Testes de fluência	10^{-7}
	10^{-8}
	10^{-9}

Figura 4: Testes utilizados no âmbito da engenharia de acordo com a taxa de deformação.

Um dos ensaios de impacto mais conhecidos quando se trata de estudo de deformação automotiva é o *Crash Test*. Segundo Alves (2009) o *Crash Test* é um ensaio que visa identificar e quantificar o nível de energia que o veículo armazena sem que os passageiros do mesmo sofram consequências no interior do habitáculo. Este ensaio tem como principal

objetivo identificar o comportamento dos passageiros durante uma colisão, tanto frontal quanto lateral. A eficiência da absorção da energia do impacto relativo ao ensaio de *Crash test* depende do tipo de material que será utilizado, modo de carregamento (axial, transversal, combinado etc.), taxa de deformação entre outros pontos. Desta forma, os projetistas levam em consideração e esperam que durante o impacto haja a deformação para dissipar o máximo de energia, e deixar o usuário em segurança. Segundo Uenishi *et al.* (2003) para melhorar o comportamento de um corpo durante um ensaio de impacto, é necessário aumentar a taxa de deformação, assim aumentando o que na indústria automotiva é chamada de *Crashworthiness*, que seria a capacidade de proteger os passageiros do automóvel que colidiu.

Para diminuir os gastos, que são relativamente alto para na concepção de um projeto, é necessário optar pela utilização técnicas que sejam mais rentáveis e de grande confiabilidade, uma saída viável é a utilização de simulação numérica (Faghihi, 2011).

2.3 A IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA O ESTUDO DE DEFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Segundo Magalhães (2011), a utilização da simulação numérica é essencial na concepção veicular, pelo fato de ser possível prevenir possíveis erros durante o processo de manufatura e falhas durante os ensaios. Além disso, a simulação numérica auxilia também na possibilidade de modificar a geometria da estrutura durante o processo de modelagem em CAD (Desenho assistido por Computador). Pelo elevado custo de diferentes ensaios automotivos fica explícito a necessidade de utilizar a simulação numérica para reduzir os custos de desenvolvimento (Bugelli, 2010). Pela grande complexidade de geometrias utilizadas na indústria automotiva, e pelo fato de a maioria dos *softwares* utilizarem uma teoria de elevado custo computacional (teoria dos elementos finitos), é de grande valia a utilização de ferramentas computacionais para estudos de comportamos mecânicos. (Faghini, 2011)

Na engenharia a simulação é peça chave para qualquer tipo de processo, seja ele de desenvolvimento, de validação ou demonstração de comportamento de algum produto ou processo. Para desenvolvimento de um projeto automotivo existem alguns passos iniciais como é mostrado a seguir. Segundo Magalhães (2011) os passos para o desenvolvimento de um veículo inicia-se com desenvolvimento de um desenho técnico do automóvel, em seguida uma modelagem em argila em escala um pra um. Após isso com a utilização de um equipamento *scanner* transfere o protótipo para ambiente computacional, assim sendo

possível utilizar as ferramentas computacionais para fazer modificações. Dependendo do *software* CAD utilizado, é possível fazer nesta mesma plataforma a inserção de materiais no protótipo, ensaios preliminares como análise estática. A partir do CAD é possível fazer diversas análises, como análise modal, análise de fadiga, análise dinâmica, análise de impacto (*Crash test*) entre outras análises. Após a escolha de uma geometria, um material e tendo o projeto finalizado, ainda pode ser utilizados plataformas que otimizam geometrias, retirando pontos que não são essenciais para o projeto assim podendo diminuir peso e talvez custo com a manufatura.

A simulação também é muito utilizada para conhecer e verificar o comportamento dos equipamentos durante o funcionamento ou excitado por algum tipo de carregamento. Segundo Echeverri (2017) utilizando a simulação é possível avaliar transformações mecânicas e transformações de fase e pode prever interações entre as propriedades dos materiais após a conformação, além da possibilidade de prever tensões e deformações que auxiliam na otimização entre material/processo/desempenho.

Pelo elevado nível da tecnologia computacional atual, existe diversos estudantes, engenheiros entre outros usuários de ferramentas computacionais que realizam estudos onde obtém valores que nem sempre estão certos. Para elevar a segurança e confiabilidade dos resultados, é necessário a utilização de métodos para calibrar os valores dados nos ensaios analíticos e computacionais. O método mais conhecido e utilizado para a calibração dos resultados é a análise experimental do ensaio computacional realizado(Schnakovszky et al.,2008). Os valores obtidos na análise experimental precisam ser confiáveis, de forma que quando inseridos na simulação não haja a repetição dos ensaios experimentais, desta forma diminuindo os valores com testes para validação do modelo numérico.Segundo Alves (2009), as análises computacionais não substituem os testes experimentais, elas auxiliam no projeto em desenvolvimento dando uma prévia das respostas que o componente dará quando sujeito a algum carregamento, que são comprovados com os ensaios reais.

2.4 A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE INSTRUMENTAL PARA O ESTUDO DE DEFORMAÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.

Para realizar a análise experimental de qualquer tipo de componente ou projeto, é necessário que o projetista tenha em mente o que é desejado obter, qual grandeza é esperada

medir(Afonso,2010). A grandeza em estudo neste projeto é a deformação, e para ser possível mensurar os campos de deformação é necessário conhecer a extensometria.

2.4.1 Técnica da Extensometria

A extensometria é uma técnica que utiliza *StrainGages* para identificar e quantificar a deformação em estruturas que sofram qualquer tipo de esforço. Os *StrainGages* tem a função básica de através de uma variação nas dimensões, transformá-las em um pulso elétrico que seja equivalente a uma resistência elétrica. A extensometria tem diversos tipos de métodos e técnicas para mensurar a deformação em diferentes materiais, alguns dos tipos de medidores são: relógio comparador, detector eletrônico de deslocamento, por camada frágil, por fotoelasticidade e por *StrainGages*. Nesse projeto os esforços estarão concentrados em desenvolver um aparato de medição usando *StrainGages*, pelo fato de ser mais versátil para a medição de geometrias complexas e de difícil acesso(Afonso,2010).

Considerando um corpo de prova sob a ação de esforços internos, as pequenas deformações resultantes serão medidas através do *Strain Gage* previamente colado. Tais deformações causam uma variação no comprimento do fio ou na área da seção transversal do *Strain Gage*. A Resistência do fio condutor do *Strain Gage* pode ser determinada a partir da segunda Lei de Ohm, apresentada de acordo com a eq. (1).

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{1.3}$$

Onde o R é a resistência do fio condutor, o ρ é a resistividade do material, o L é o comprimento do fio e o A é a área da seção transversal.

Então, sabendo que quando uma peça é submetida a um esforço, o fio terá variações tanto no comprimento do fio quanto a área da seção transversal resultando em uma variação da resistência. Esta variação pode não ser perceptível, sendo assim, necessário o uso de equipamentos mais sensíveis capazes de constatar pequenas variações, como por exemplo, um multímetro de alta precisão A Ponte de Wheatstone é outro tipo de circuito elétrico para amplificação de sinal composto por diversas configurações de circuito, sendo muito consagrado para medições de deformações. Esse circuito com o auxílio de *Strain Gage* pode verificar, por meio de variações no comprimento do fio ou na área da seção transversal do fio

de resistência do *Strain Gage*, a resistência equivalente à variação da deformação no corpo de prova por meio de um sinal de tensão.

2.4.2 Ponte de *Wheatstone*

A ponte de Wheastone é uma técnica para encontrar o valor de uma resistência desconhecida utilizando 4 resistores. A utilização desse método se dá quando existe uma resistência de valor desconhecido. Normalmente em um circuito de duas malhas, sendo a malha um circuito fechado onde tenha diferença de potencial (Dorf, 2003). De acordo com a Lei de Kirchoff (Souza e Souza, 2015), vai existir uma divisão da corrente emitida por uma fonte real onde emite uma corrente i que ao chegar em uma ramificação se dividirá formando i_1 e i_4 , conforme ilustrado na fig. 2(a). Onde o ε é uma fonte de tensão real.

Quando existe uma resistência diferente das demais, não se sabe como será a divisão da corrente que passará para os resistores. Assim segundo Hoffman(1989) é entregue uma variação de tensão muito baixa, que em algumas situações não são verificadas pelo uso de um multímetro. Isto justifica a utilização deste método, que também é conhecido como Balança de Wheatstone, conforme apresentado na fig. 2(b). Este método consiste em utilizar um multímetro para identificar se há diferença de potencial entre os pontos J e L. De acordo com Barbosa et al. (2009), caso o galvanômetro não identifique tensão nos pontos, a ponte de Wheatstone é dita balanceada

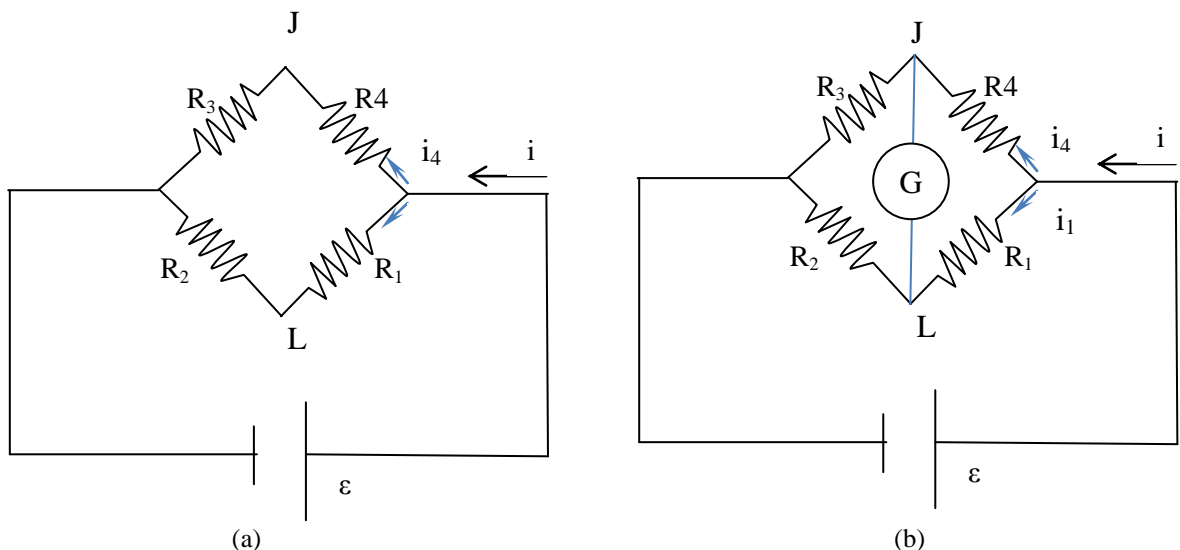


Figura 5 – Configuração de uma ponte de Wheatstone. (a) não balanceada (b) balanceada

Quando inserido, o galvanômetro irá trabalhar no circuito como um amperímetro, ou seja, irá ser colocado em série no circuito. Então o percurso normal seria a corrente i_4 chegasse no nó J a corrente se dividisse em duas novamente, uma sendo i_3 e outra sendo i_G , a mesma situação ocorreria no nó L. Para isso acontecer a ponte teria que estar desequilibrada, ou seja, existiria uma diferença de potencial entre os dois nós J e L. Para se ter uma ponte de Wheatstone balanceada é preciso que haja alterações no potenciômetro. Quando o galvanômetro marcar a diferença de potencial nos pontos J e L sendo 0, a ponte estará balanceada, ou seja, o valor do i_G será nulo. Quando esse conjunto de fatores for conseguido será possível utilizar uma equação que nos faz encontrar o valor da resistência desconhecida.

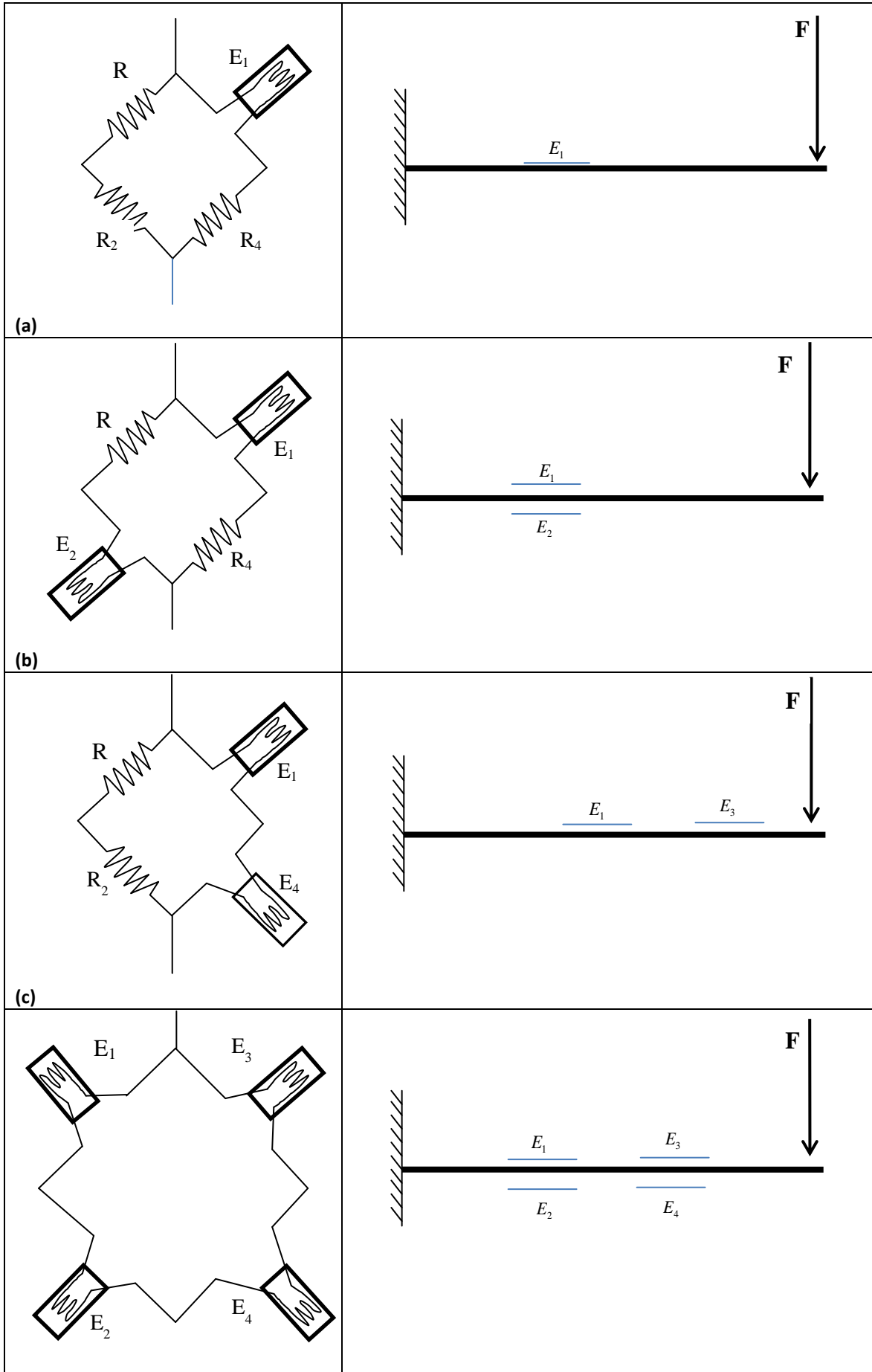
$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (1)$$

No âmbito da engenharia, a ponte de Wheatstone é utilizada em diversos ramos entre eles para extensometria. A ponte de Wheatstone para extensometria precisa de alguns dispositivos em especial o *Strain Gage*. Para um estudo em resistência de materiais usando *Strain Gage* podemos utilizar diferentes tipos de ponte de Wheatstone, onde diferentes tipos de saída e configurações serão escolhidas de acordo com a necessidade do projeto. As configurações são conhecidas como $\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ de ponte e ponte completa. (Richards,1993)

O *Strain Gage* é o substituto da resistência que quando submetido a algum esforço haverá variação no comprimento do fio do *Strain Gage* e da seção transversal resultando assim na variação da tensão na ponte de *Wheatstone*. Como a variação das dimensões do *Strain Gage* são muito pequenas torna o uso da ponte de *Wheatstone* quase que obrigatório (Hoffman,1989).

A Fig. 6 apresenta todos os tipos de configuração da ponte de *Wheatstone* e como serão fixados os *Strain Gage* em um caso de simples validação.

CIRCUITO MONTADO	BARRA ENGASTADA COM CARREGAMENTO PONTUAL
-------------------------	---



(d)	
-----	--

Figura 6. Tipos de circuito da ponte: (a) $\frac{1}{4}$ de ponte, (b) $\frac{1}{2}$ ponte de resposta oposta, (c) $\frac{1}{2}$ ponte de resposta idêntica, (d) ponte completa.

2.4.3 Strain Gage

O *Strain Gage* (também conhecido como extensômetro) é um sensor constituído por fios condutores com dimensões de diâmetro de seção transversal e comprimento muito pequenos que ao ser inserido na superfície do material a ser estudado indicam variações de comprimento, assim variando a resistência do *Strain Gage* (Alves, 2009). Existem diversos tamanhos para *Strain Gages*, porém um fator importante a ser considerado é o tamanho do *Strain Gage* em relação ao corpo de prova, para que se consiga encontrar os campos de deformações de forma pontual.

Para escolher qual *Strain Gage* utilizar, é preciso fazer um estudo de que tipo de medição será feita, para isso existe um procedimento lógico segundo Hoffman (1989), primeiro é o perfeito conhecimento das condições de contorno que se deseja utilizar o sensor e o segundo é preciso ter o completo estudo do *Strain Gage* utilizado. Existem algumas configurações de *Strain Gage* que são utilizadas em estudos pontuais, onde depende do material da superfície e do carregamento que será aplicado ao componente em estudo. A figura x mostra alguns tipos de *Strain Gage*.

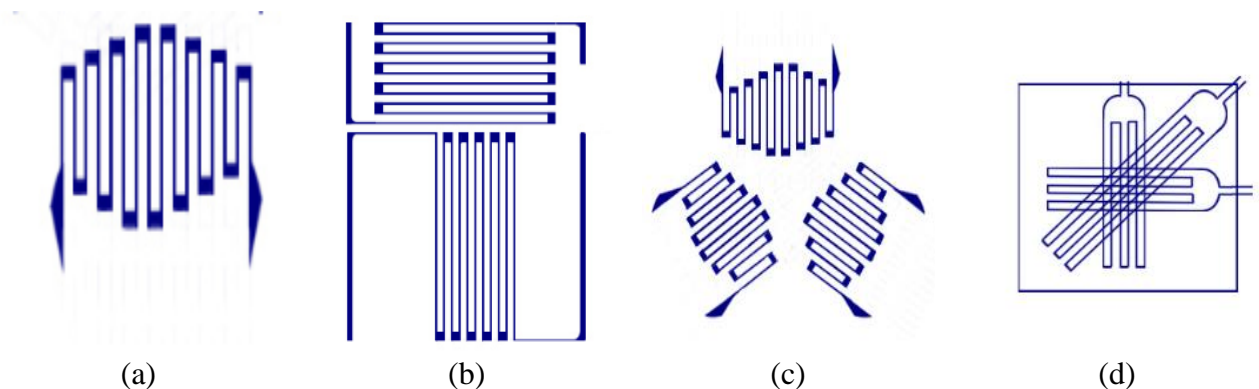


Figura 7: Formas de disposição dos *StrainGages*(a) Uniaxial , (b) Roseta tipo T , (c) Roseta Delta e (d) Roseta retangular.

Para obtenção das tensões em um sólido existem diversas disposições que podem ser feitas com *StrainGages*, como por exemplo, uniaxial e em forma de rosetas. A uniaxial é aplicada quando o esforço exercido no corpo de prova é de natureza axial, como uma força normal. Já as rosetas são de caráter biaxial ou triaxial, como um esforço de torção, ou mesmo

um esforço composto como flexo-torção. Caso seja adotado um Strain Gage uniaxial para um carregamento conjugado, não será possível determinar com confiabilidade o esforço com que o componente está sendo ensaiado(Hoffman,1989).

2.4.4 Extensometria na Indústria Automotiva.

Segundo Wannenburg (2007) a maioria dos projetos defeituosos são causados por falta de conhecimento dos dados de entrada, como carregamento inserido no projeto, propriedades do componente modelado, ao invés de acreditar que o teste foi feito de maneira errada. Desta forma é necessário fazer ensaio que espelhe o comportamento real e consiga adquirir dados para serem utilizados em análises numéricas.

Uma maneira de adquirir dados de deformação para aplicá-los em ensaios computacionais é utilizando os extensômetros. Para isso é necessário escolher qual tipo de ensaio se deseja ser feito, e que tipo de parâmetros é desejável captar. Alves (2009) cita que os carregamentos dinâmicos ou estáticos diferem bastante na inserção do extensômetro no corpo de prova, pelo fato do comportamento da estrutura se tornar complexo quando submetida a um carregamento dinâmico.

Para um ensaio estático, segundo Petracconi (2008), é necessário que o corpo instrumentado posicionado de forma estar no plano de repouso, para que não haja nenhum tipo de mascaramento de resultados. Já Borsutzki *et al.* (2005) apresenta em seu texto que para ensaios estáticos ou quasi-estáticos a célula de carga deforma de maneira homogênea, ou seja, a força que é medida pelo *Strain Gage* é captada de forma correta. Quando existe um aumento da taxa de deformação, isto é, considerando um ensaio dinâmico o tempo para o *Strain Gage* atingir a homogeneidade da deformação elástica é o mesmo do tempo do teste, assim leva a necessidade de considerar a propagação da onda dentro do sensor. A figura x apresentada anteriormente apresenta diversos tipos de taxa de deformação e quais tipos de ensaios entrega ao usuário estes valores, assim caso a taxa de deformação seja superior a 10 /s, o sinal recebido pelo sensor é muito perturbado pelas passagens de ondas refletidas dentro do sensor. Assim para ensaios dinâmicos é necessário obter um *Strain Gage* que tenha entre 3 mm e 6 mm de grade(Hoffman,1989).

Na indústria automotiva a utilização do *Strain Gage* são as mais variadas, como a utilização do sensor para identificar os campos de deformações em peças estáticas, como o

comportamento de um chassi com apenas o carregamento estático inserido(Furtado,2013).

Outra atividade que utiliza o *Strain Gage* é a identificação da taxa de deformação de materiais em ensaios dinâmicos para escolher materiais que deixem o veículo mais leve e com uma boa resistência ao choque(Alves,2009). Outra forma de utilizar o sensor é na caracterização dos materiais utilizados na indústria, obtendo o gráfico tensão deformação e obtendo as tensões para melhor escolher os materiais(Kowalik,2014).

3 Metodologia

Este tópico irá mostrar a organização do projeto escolhido pelo autor para realizar o que foi proposto no objetivo, detalhando cada ponto. O presente trabalho foi dividido em 4 partes sendo elas: Revisão Bibliográfica, definição do escopo do trabalho, desenvolvimento do aparato para extensometria e validação do estudo.

3.1 Primeiro Passo - Revisão Bibliográfica

Esta passo consiste na parte primordial do projeto, tendo em vista que todas as informações necessárias para o entendimento do projeto precisa ser explicitada neste passo. Desta forma foi feito todo um estudo que serve de base para todo o processo de desenvolvimento do projeto, para isso foi exibido diversos conceitos para embasamento que justificariam a utilização da extensometria, seja ela para caracterização de um material, aquisição de dados para taxa de deformação e deformação ou para validação de uma análise numérica.

Também neste ponto foi explicado todo os passos para a manufatura dos aparatos para mensurar os dados relevantes para o projeto, afirmando o motivo para utilizar cada *Strain Gage*, a utilização de um ganho e como será a tensão de saída do projeto.

3.2 SEGUNDO PASSO - DEFINIÇÃO DO TRABALHO

Neste ponto do trabalho foi explicitado os motivos e objetivos que se espera alcançar durante o presente trabalho, mostrando pontos importantes que serão respondidas através do uso da análise numérica conjuntamente com a análise experimental. Com a perfeita utilização das técnicas será possível confirmar ao usuário se os parâmetros utilizados no processo computacional são coerentes com o ensaio real.

3.3 TERCEIRO PASSO - DESENVOLVIMENTO DO APARATO

Neste passo, foi utilizado todo o apoio dado pelo referencial bibliográfico para ser concluída, esta parte tem como principais passos a montagem das placas, estudo do ganho para amplificar o sinal e a análise numérica e analítica do projeto.

3.4 QUARTO PASSO - VALIDAÇÃO DO ESTUDO

A etapa de validação tem como principal função a entrega dos valores dados na simulação numérica e experimental e fazer uma análise de ambos, onde após a aquisição de dos dados foi feita a comparação e identificou se as condições de contorno inseridas na análise numérica são coerentes com a da análise experimental, ou seja, os dados afirmaram se as análises estão correlacionadas. Com este passo concluído foi possível fazer análises experimentais que mostraram parâmetros reais que ao ser inseridos em âmbito computacional são entregues valores extremamente confiáveis.

4 Projeto

Neste projeto, foi desenvolvido todo o aparato para medições de deformações em condições de carregamento estático. Foram desenvolvidos três equipamentos: Fonte de tensão, placa de amplificação e a ponte de *Wheatstone*. O projeto foi iniciado desde a modelagem dos circuitos eletrônicos, passando pela manufatura de todas as placas necessárias, soldagem dos componentes.

4.1 Fonte de Tensão

A fonte de tensão é necessária para alimentar a placa de amplificação, além de possibilitar que o ensaio seja feito em qualquer lugar com uma tensão necessária para a placa de amplificação. A mesma foi modelada pelo Software Multisim e Ultiboard, onde foi concluída as trilhas e ilhas da placa de alimentação. Alguns componentes como Transformador de +15V -15V, capacitores, resistores, dissipador de calor entre outros componentes. As figuras a seguir mostram o esquemático do projeto da fonte de tensão modelada no Multisim e já montada no Ultiboard.

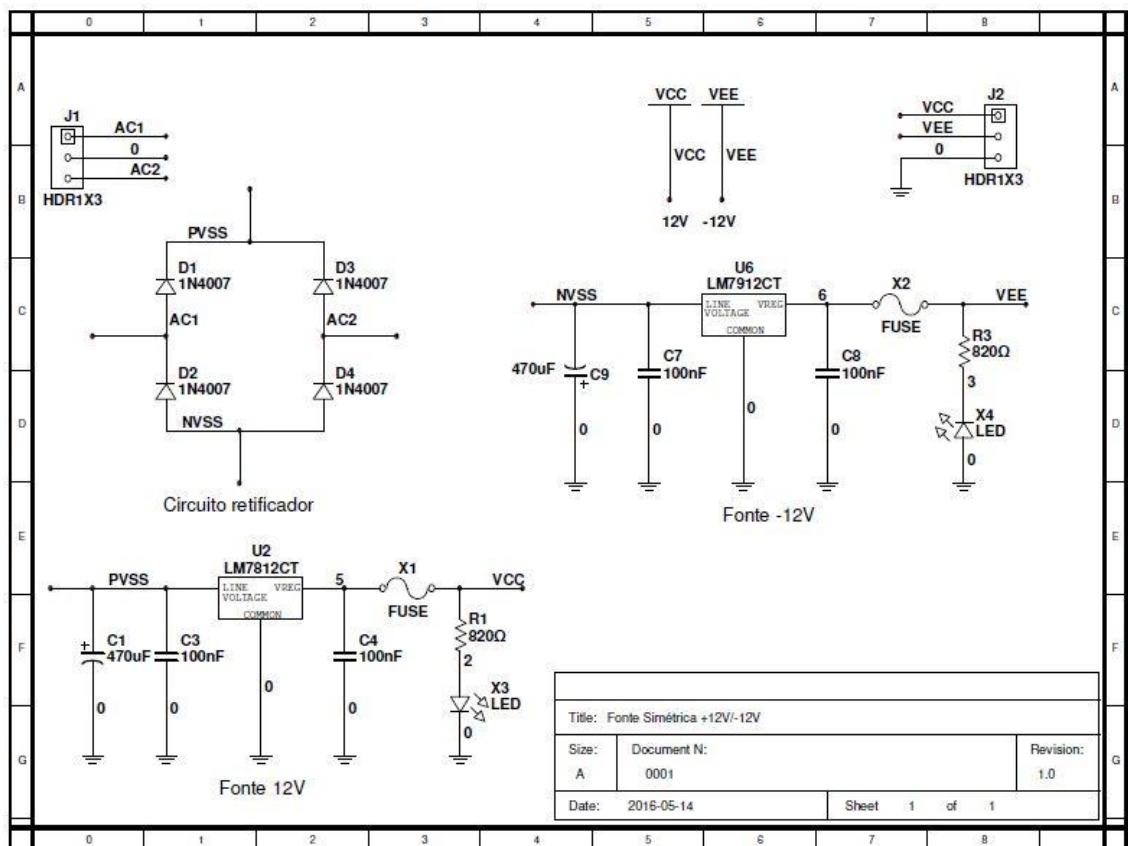


Figura 8- Esquemático Fonte de Tensão no Software Multisim.

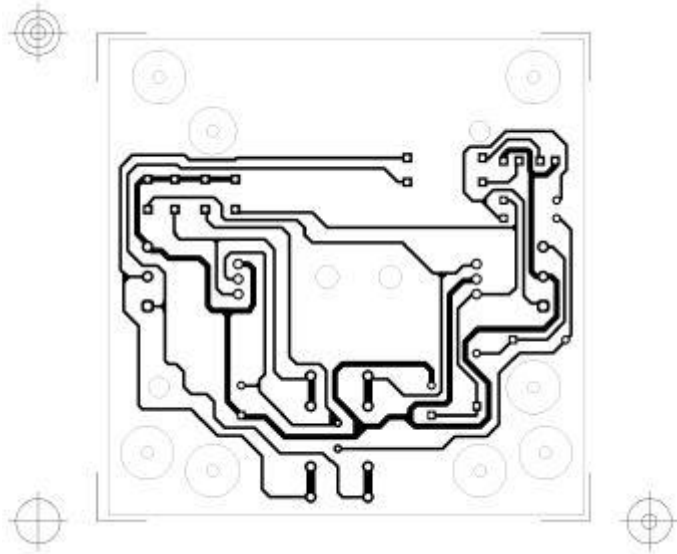


Figura 9- Modelo final da Fonte de Tensão exportada pelo Ultiboard.

4.2 Placa de Amplificação

Pelo fato de ser esperado valores muito pequenos na saída da ponte de *Wheatstone*, é necessário elevar os valores dados para que sejam perceptíveis utilizando um equipamento simples para leitura da tensão de saída, no caso utilizaremos o multímetro. Quando se tem um sensor qualquer, ele possui diversas características que podem ser dinâmicas ou estáticas. Uma das mais importantes para projetar uma placa de amplificação é a sensibilidade estática.

A sensibilidade estática, segundo Doebelin(1990) pode ser considerada a angulação do gráfico de calibração. No caso da extensometria, as grandezas que serão utilizadas para identificação da força e coincidentemente a deflexão serão tensão (mV) e massa-força (Kgf). Como a sensibilidade estática é calculada pela razão entre a variação máxima entre a tensão de alimentação do sistema pela máxima carga que o sistema pode suportar. No caso a tensão de alimentação é de 5V e a sensibilidade da ponte de *Wheatstone* é dada por 2mV/V, temos que a máxima tensão que será dada na saída da ponte de *Wheatstone* é dada por 10mV. Já a carga máxima é escolhida arbitrariamente, e para este projeto, a carga máxima é dada por 100Kgf.

Para o cálculo da sensibilidade do sistema temos que:

$$Sen = \frac{5mV}{100Kgf} = 0,05mV/Kgf \quad (4)$$

Assim, esta sensibilidade mostra que, caso seja aplicado uma força ao sistema de 10 Kgf, a saída da ponte de *Wheatstone* entrega 0,5mV.

Porém, alguns equipamentos não conseguem captar estas variações, e como o peso dado em Kgf pode ter valores com várias casas decimais, existe então uma grande possibilidade de haver valores pequenos e que para identificar a variação precise de um ganho. Para realizar este ganho é preciso utilizar um tipo de amplificador operacional, neste projeto, o amplificador operacional escolhido foi o INA125.



Figura 10: Amplificador Operacional INA125.

Para este componente, o ganho é dado pela equação a seguir:

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G} \quad (5)$$

Onde o R_G é a resistência equivalente que será utilizada para alcançar o ganho necessário.

Para calcular o ganho, é necessário escolher qual tipo de método será utilizado para identificar os valores de saída da ponte de *Wheatstone*, ou por um Arduino ou mesmo pelo Multímetro. Para início de projeto será utilizado o multímetro, e posteriormente poderá ser utilizado o arduino para poder comportar os valores dados. Como um multímetro possui resolução de 0,1mV poderíamos utilizar os valores sem o ganho, porém caso fosse utilizar outro dispositivo não seria possível. Para ter valores em um campo confortável, foi escolhido um ganho de 240. Então os resistores foram inseridos em paralelo, no caso de 510Ω. Assim, quando o valor de 0,05mV for dado na saída da ponte, será multiplicado por 240, assim dando um valor mínimo de 12mV para 1 Kgf e para 100Kgf o valor seria 1,2V, isso caso a ponte esteja balanceada.

O layout da placa de amplificação modelado com o auxílio do Multisim e do Ultiboard são os mostrados na figura abaixo.

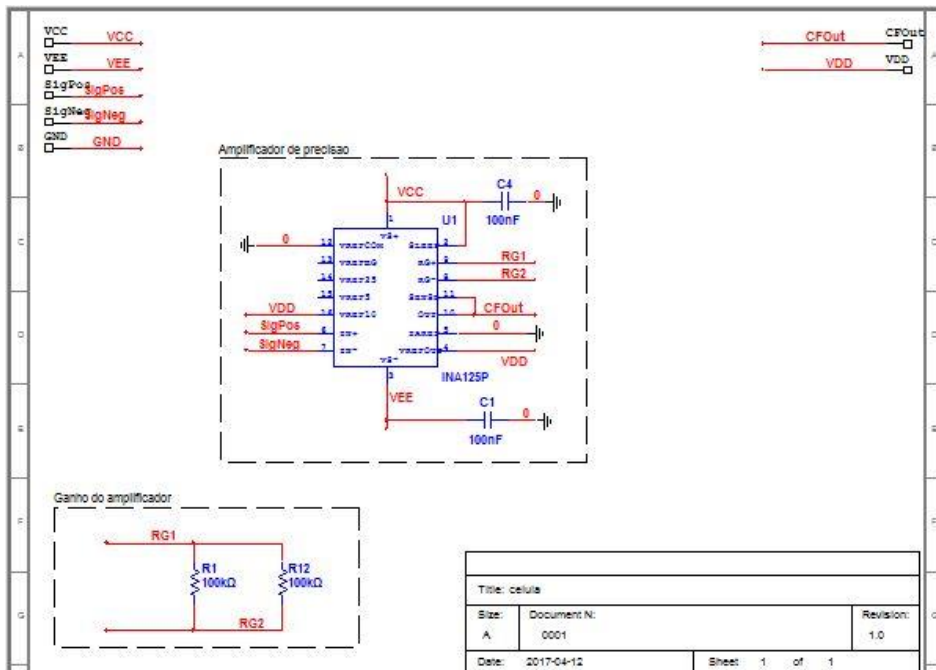


Figura 11– Esquemático de um canal para placa de amplificação do sinal.

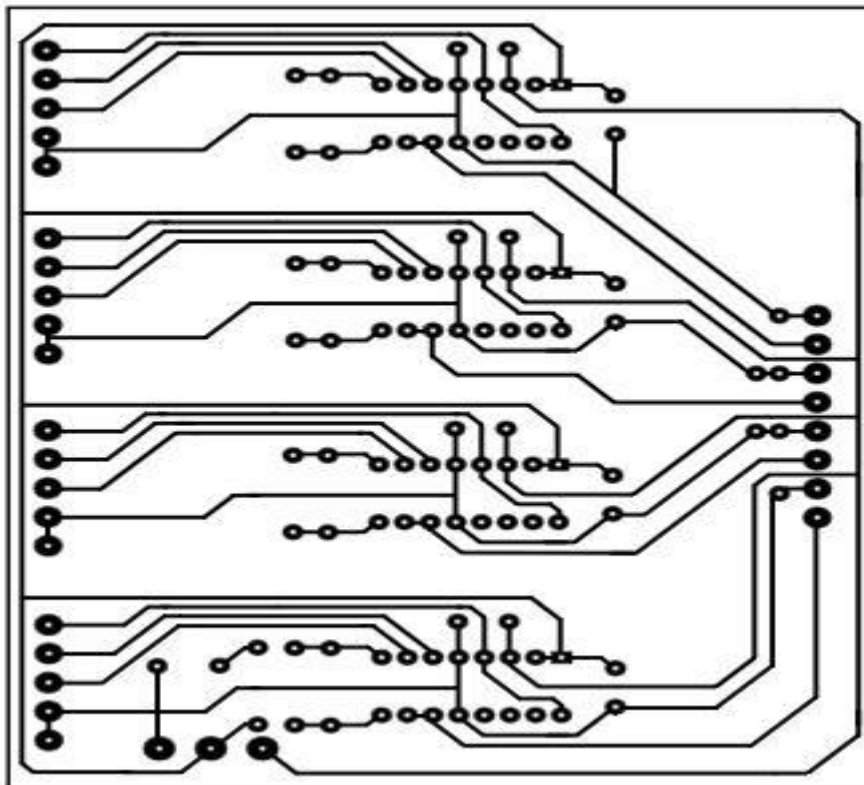


Figura 12 – Layout da Placa de Amplificação com os 4 canais.

4.3 Ponte de *Wheatstone*

Por fim foi modelada a ponte de *Wheatstone*, essa que tem como maior objetivo a identificação da variação da resistência do *StrainGauge*. Quando existe uma força de excitação no corpo que está em prova, tanto em caso de compressão como em tração, existe a variação da bitola do fio do extensômetro, desta forma existe uma variação da resistência, mesmo que essa seja mínima, por isso a necessidade da inserção da Ponte de *Wheatstone*. A Ponte foi modelada no *Software* Multisim e Ultiboard, como mostram as figuras abaixo.

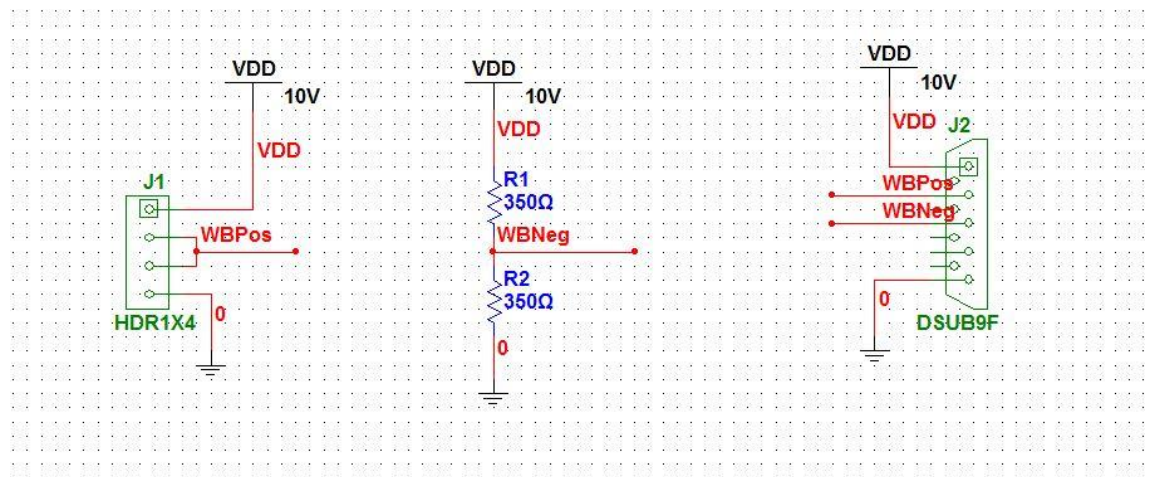


Figura 13 : Esquemático da Ponte de *Wheatstone*.

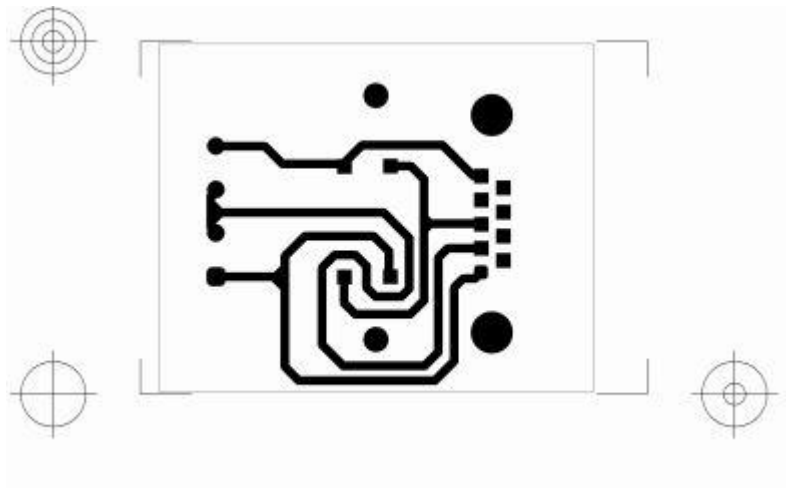


Figura 14: Layout da Placa da Ponte de *Wheatstone*.

4.4 Manufatura

A manufatura de todas as placas foram feitas da mesma maneira, utilizando um método parecido com a serigrafia. Para isso foi utilizado uma placa de Fenolite, Percloroeto de Ferro, impressão dos circuitos em *GlossyPaper* e um Ferro de Passar roupa.

O processo começa com a impressão do layout da placa em papel de foto (*GlossyPaper*), esta impressão necessita que seja feita em impressora que utiliza toner, para ser possível transferir o mesmo para a placa de Fenolite. Após a impressão é fixado o papel na placa de fenolite com o toner em contato com o fenolite, para que o toner seja transferido para a mesma. Para fazer a transferência foi utilizado um ferro de passar, por ser um modo mais simples de produzir placas de circuito impresso. Para não haver defeito, foi utilizado outro papel para não possuir contato direto entre o *GlossyPaper* e o ferro de passar. Após alguns minutos passando constantemente o ferro de passar no papel, é necessário averiguar se a transferência foi feita da maneira correta, caso sim partiremos para o próximo passo, caso não necessitará de repetir todo o procedimento de impressão e transferência térmica com o ferro de passar. Com o toner todo depositado na placa de fenolite é imerso em Percloroeto de Ferro, para iniciar o processo de corrosão da placa, assim retirando toda a fenolite da mesma, deixando apenas as trilhas feitas pela transferência do toner para a placa. O processo varia, ou pela temperatura do ambiente onde o processo está sendo realizado, ou pelo número de vezes em que o percloroeto de ferro foi utilizado, e por fim o tamanho da placa de fenolite também é um ponto a ser levado em consideração. Ulteriormente existe a usinagem da placa, para ser inserida em suas respectivas caixas para ser melhor utilizada, e fazer a furação para iniciar as soldagens dos componentes eletrônicos.

A usinagem da placa foi feita de duas maneiras distintas: Com uma microrefítica e com um furador de placa de fenolite, o resultado obtido foi praticamente o mesmo, desta forma não elegendo um método melhor. Posteriormente a usinagem, foi feita a soldagem de todos os componentes, da fonte de tensão, da placa de amplificação e da ponte de *Wheatstone*. Assim obtendo os resultados mostrado pelas figuras a seguir.

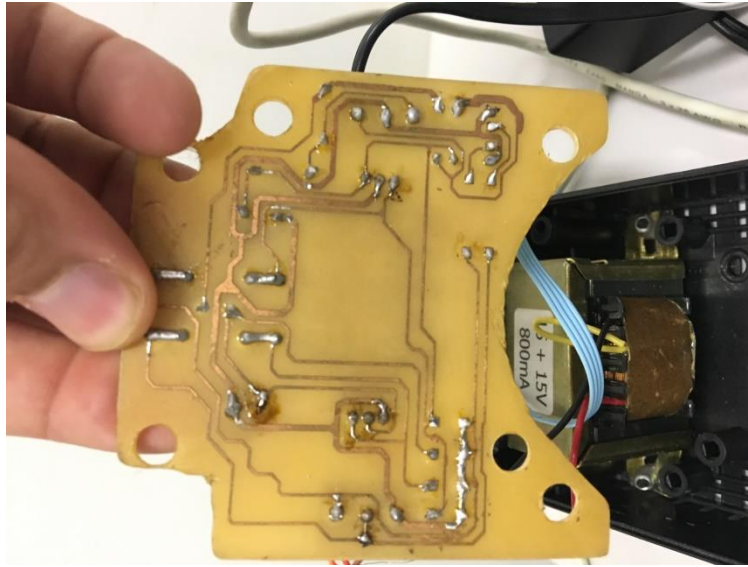


Figura 15: Trilhas da Fonte de tensão.

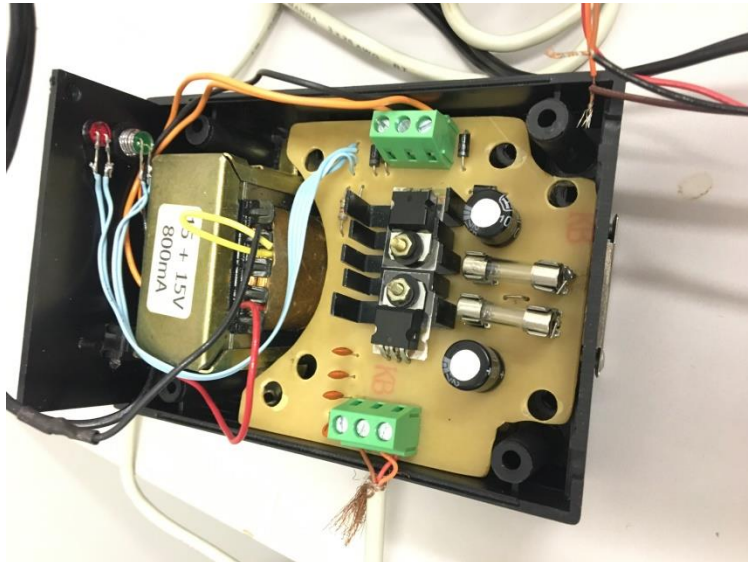


Figura 16: Vista superior da Fonte de tensão.

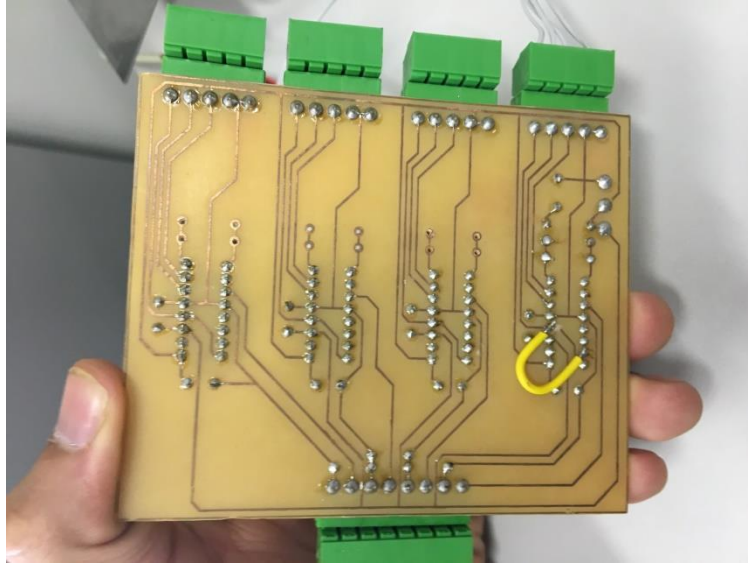


Figura 17: Trilhas da Placa de Amplificação.

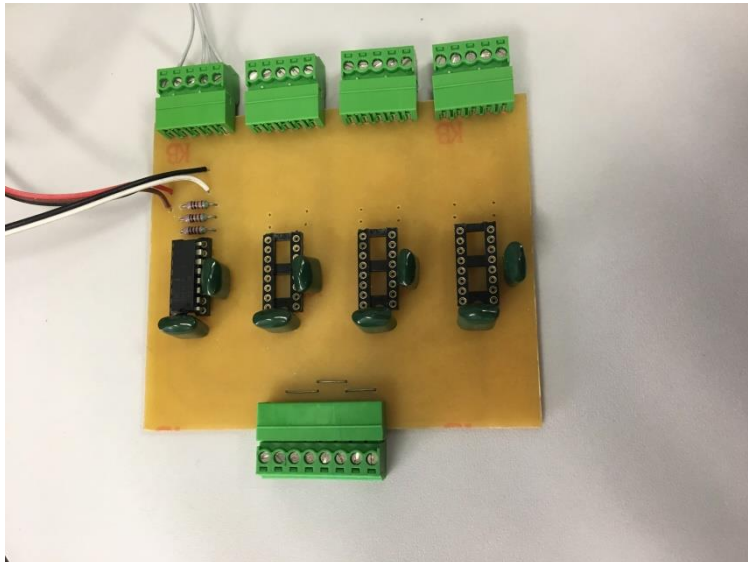


Figura 18: Vista superior da Placa de Amplificação

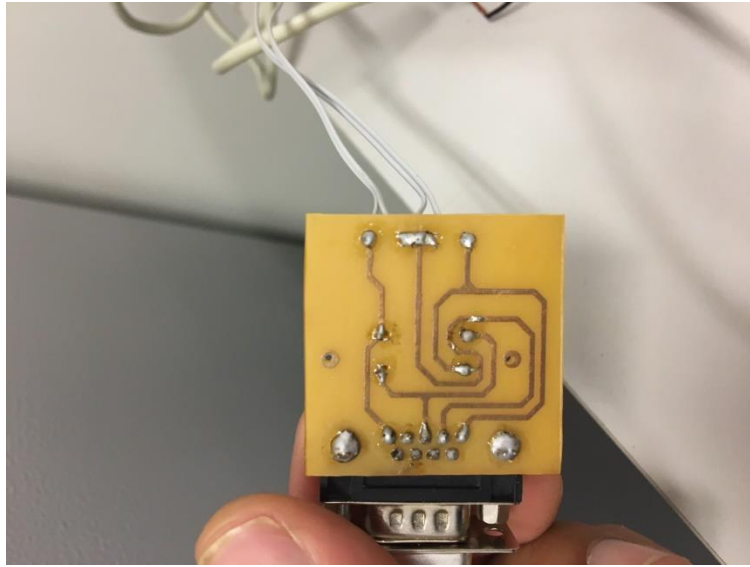


Figura 19: Trilhas da Ponte de *Wheatstone*.

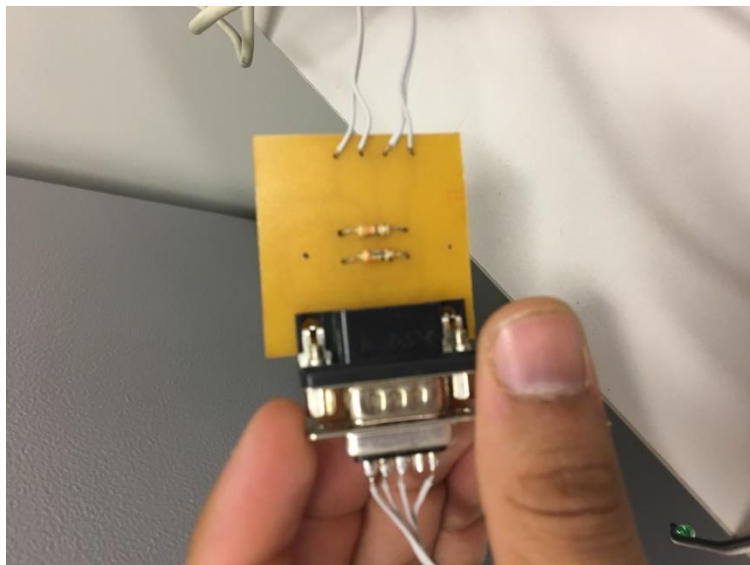


Figura 20: Vista superior da Ponte de *Wheatstone*.

5 ESTUDO DE CASO

Para fazer a validação do projeto de extensometria, vai ser realizado alguns experimentos, tanto experimental quanto computacional, e caso tenha uma solução viável, será feita também a solução analítica. Os valores dados em todos os âmbitos precisam ser no mínimo próximos para que os dados obtidos sejam coerente entre si.

5.1 Benchmarking 1 – Viga Engastada

Em primeiro momento será feita uma análise em uma estrutura simples, que seria uma régua de aço inox, pelo fato de possuir parâmetros conhecidos como: Módulo de Elasticidade, Densidade, Tensão de Escoamento, Área da seção transversal, Comprimento da régua. Por existir uma solução analítica factível, neste benchmarking será feita a solução analítica, será gerado também em qualquer análise a análise experimental e análise computacional.

5.1.1 Solução analítica

Para uma régua de aço inox, será feita um ensaio com a régua engastada em uma das extremidades, e na outra extremidade uma carga conhecida excitará a régua pelo fato desta análise ser de fácil cálculo. Um esquemático mostrará o experimento a seguir.

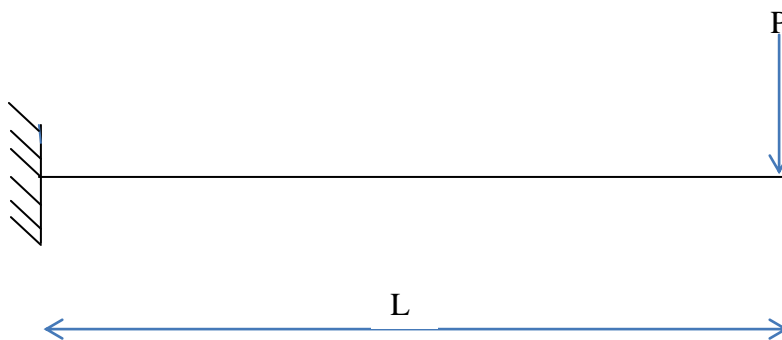


Figura 21: Régua engastada com uma carga pontual conhecida na extremidade

Para fazer os cálculos será utilizada a teoria da Linha Elástica, para encontrar o valor da deformação que ocorre com a inserção da carga pontual. No problema dado na figura 13, a comprimento L é dado por 100 mm, a momento de inércia de $8,33\text{mm}^4$, e a força é dada por 1,4715N.

Como consideraremos uma viga engastada, fazendo um corte e olhando a viga para o lado direito temos as seguintes condições para encontrarmos os esforços.

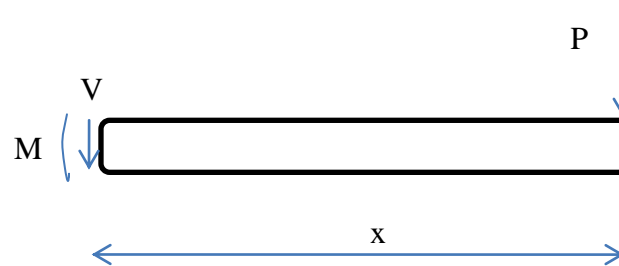


Figura 22: Seção escolhida para encontrar os esforços.

Segundo a teoria demonstrada no livro do Beer (1989) Hibbeler(2010) e Shigley(2006), quando utilizamos uma viga onde não varia sua seção transversal ou material utilizado na viga, temos que EI que é dado como rigidez flexional é constante. Para encontrar a equação que rege a linha elástica que nos apresenta a deflexão temos:

$$EI \frac{\partial^2 y}{dx^2} = M(x) \quad (6)$$

Como o momento é dado por $M = -Px$ temos que:

$$EI \frac{\partial^2 y}{dx^2} = -Px \quad (7)$$

Integrando a equação 4 duas vezes encontramos a declividade e o deslocamento que ocorre na viga em estudo.

$$EI \frac{\partial y}{dx} = -\frac{Px^2}{2} + C_1 \quad (8)$$

$$EI \cdot y = -\frac{Px^3}{6} + xC_1 + C_2 \quad (9)$$

A declividade $\frac{\partial y}{dx}$ é também conhecida como $\theta(x)$ pelo fato de representar o ângulo que a tangente à curva elástica em um ponto dado, que se forma com a horizontal.

Para encontrar os valores das constantes das equações diferenciais, temos que utilizar as condições de contorno. Sabendo que temos uma viga engastada temos que quando o x é 0,

a deflexão no engaste também é 0. E quando temos uma viga engastada, o valor de θ é 0 na extremidade engastada temos que $x=L$ por ser a distância entre a carga pontual e o engaste.

Com estas condições podemos encontrar os valores de C_1 e C_2 que são dados por:

$$C_1 = \frac{-PL^2}{2} \quad (10)$$

Substituindo na equação 6 temos que :

$$EI.y = \frac{-Px^3}{6} + \frac{PL^2}{2}x + C_2 \quad (11)$$

Quando o $x=L$, o valor de y é 0 pelo fato de possuir uma viga engastada para estudo, ou seja, a deflexão é 0 no engaste. Assim encontramos o valor de C_2 .

$$C_2 = \frac{-PL^3}{6} \quad (12)$$

Assim, montando a equação da linha elástica temos que:

$$y = \frac{P}{6EI}(-x^3 + 3L^2x - 2L^3) \quad (13)$$

Assim é possível encontrar a deflexão que ocorre na régua de aço inox que será solucionada. Para isto temos que encontrar os valores das condições de contorno.

A régua utilizada será uma régua de aço inox que possui módulo de rigidez $E=187$ GPa, seu comprimento L é igual a 100mm, tem altura de 1mm. A carga pontual utilizada será de 150g. Encontrando primeiramente o valor do momento de inércia dado por I_x .

$$I_x = \frac{b.h^3}{12} \quad (14)$$

Onde b é o comprimento L , e o h é a altura, sendo assim o valor de I_x é $8,33\text{mm}^4$.

Como a força P aplicada é apenas o peso do temos que $P = mg$, considerando a gravidade como $9,81 \text{ m/s}^2$ temos que $P = 1,4715 \text{ N}$.

Fazendo algumas simplificações temos que onde $x=0$ temos que:

$$y = \frac{P}{6EI}(-2L^3) \quad (15)$$

Assim, o valor de y é 0,314mm que é um valor pouco visível a olho nu.

5.1.2 Modelagem ANSYS

Para ser possível modelar uma régua, foi escolhido o uso de um software para desenvolvimento de desenho computacional (CAD), no projeto foi adotado o CATIA V5. Para a simulação o software escolhido foi o *Ansys* para iniciar as simulações computacionais, por se tratar de um software de fácil utilização para ensaios em diversas vertentes.

No *Ansys* foi utilizado o Workbench 14.0, nesta interface é possível manusear de maneira bem simples qualquer tipo de simulação estática, modal entre outros tipos de simulações. Para iniciar os estudos é necessário abrir a aba de "*StaticStructural*" onde será mostrada uma janela como mostrada na figura abaixo.



Figura 23: Aba de manuseio do projeto.

Neste ambiente é possível escolher o material utilizado no ensaio, importar a geometria, escolher as forças, inserir apoios de diversos gêneros e receber as soluções do projeto. Em "*Engineering Data*" é possível fazer a mudança do material, o *default* do *Ansys* material utilizado é o aço estrutural, que possui tensão de escoamento para tensão e compressão de 260MPa e tensão última de 460MPa. No nosso caso será utilizado um aço inox 316, que tem tensão de escoamento de 300MPa, e tensão última de 620MPa (Shigley,2005).

Em "*Geometry*" é possível importar o sólido desenvolvido em CAD para o software CAE, como foi utilizado o *CATIA V5* é necessário salvar o arquivo em .igs.

Após isso, no espaço "*Model*" são inseridas as condições de contorno consideradas para o desenvolvimento do experimento. Neste ponto são colocados no projeto o engaste na régua, as forças que desejamos aplicar, e que critérios o *Ansys* utilizará para solucionar o problema.

No projeto foi utilizado um engaste em uma das extremidades da régua para simular a régua engastada, como é visto na figura 18.

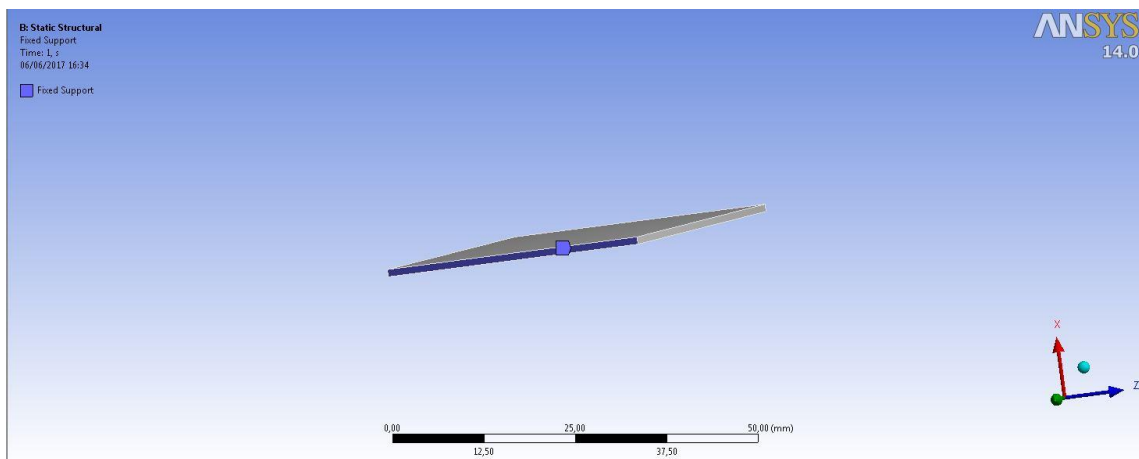


Figura 24: Engaste inserido no sólido em estudo.

Após isso foram feitos dois estudos, pelo fato do *Ansys* possuir dois tipos de inserção de força na estrutura, por vetor e por coordenadas. Desta forma foi feita duas análises, para verificar qual se aproximaria mais da solução analítica e da solução experimental. Na figura abaixo será mostrada a aplicação da força por vetor, onde é possível escolher um ponto onde se deseja aplicar a força.

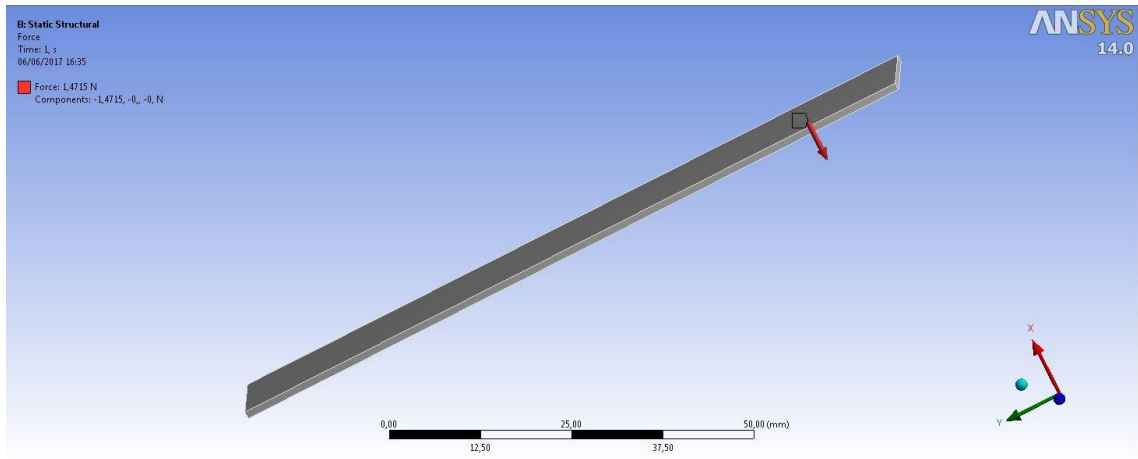


Figura 25: Força aplicada em um ponto da régua.

Como é possível ver na imagem, foi inserido o valor da força igual ao utilizado na solução analítica esperando valores próximos. Já utilizando a força pelas coordenadas temos que inserir a força de três possibilidades: no vértice, na linha ou na face. Como no estudo analítico temos uma carga pontual na extremidade, foi utilizado uma carga na linha como é possível ver abaixo.

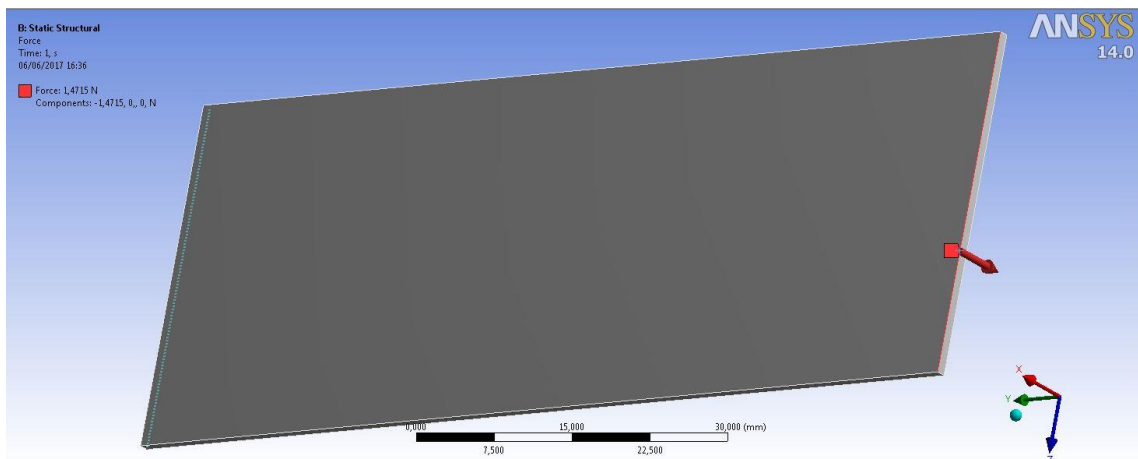


Figura 26: Força aplicada em uma linha da régua.

Para iniciar a solução do problema estabelecido, foi escolhido um critério para identificar a deformação causada pela força inserida anteriormente. No *Ansys* é utilizado na solução a deformação total, para saber os campos de deformação que são excitados na régua. A primeira análise de deformação para a força aplicada com vetor como mostra na figura 21 e a segunda análise com a força nas coordenadas ilustrada na figura 22.

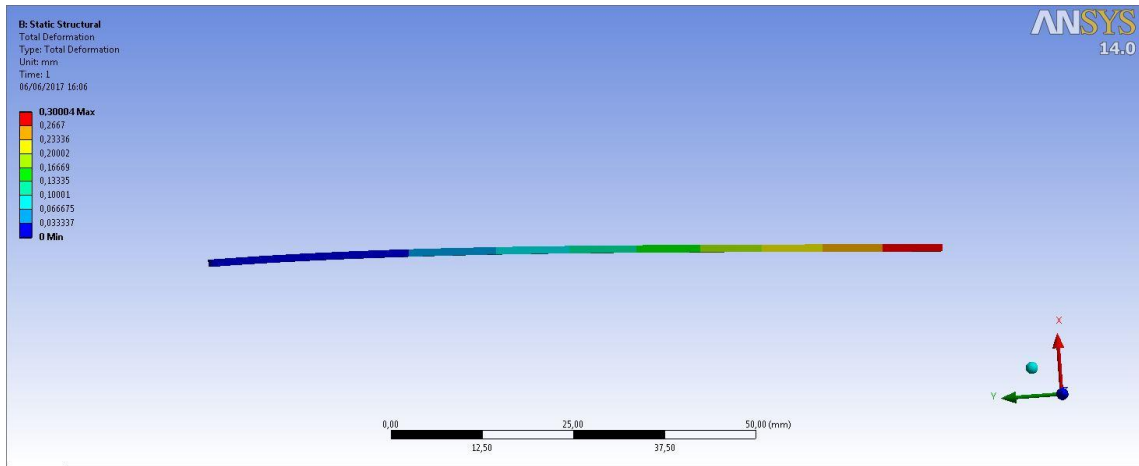


Figura 27: Campo de deformação causado pela força vetor.

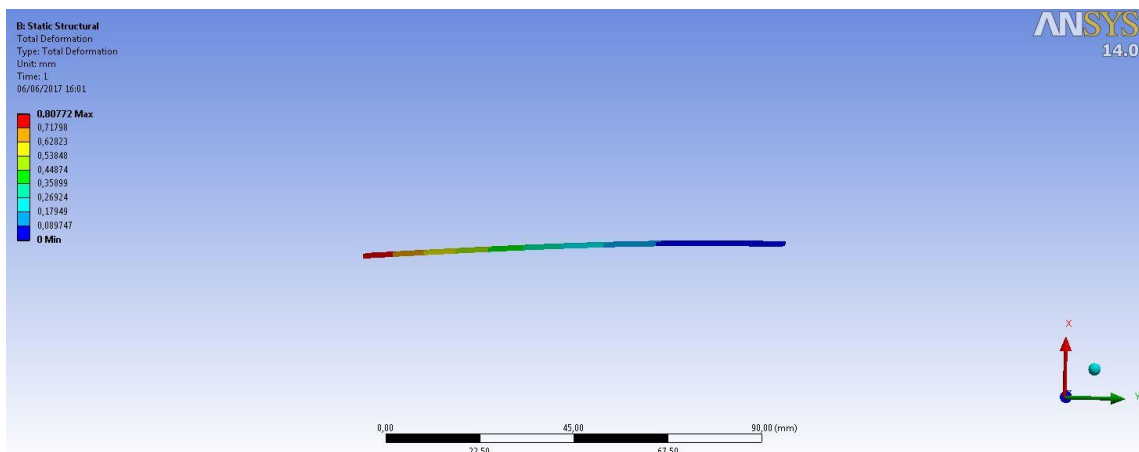


Figura 28: Campo de deformação causado pela força na coordenada X.

Comparando os valores obtidos nas análises, é fácil ver que o valor mais próximo é o valor dado pela força excitada pelo vetor, obtendo um resultado de deformação de 0,3mm de flexa máxima.

5.1.3 MODELAGEM EXPERIMENTAL

Os primeiros testes feitos com o protótipo da extensometria foi feito utilizando uma régua de aço inox 304 cujo módulo de elasticidade (E) é 187 GPa. Para a engastar a régua foi utilizado um cabeçote de motor que estava disponível no Laboratório Termofluidos na Universidade de Brasília Campus Gama. Como não foi possível a usinagem da régua para conseguir inserir uma carga pontual, foi utilizado um celular que possui massa de 173g, e foi feito o cálculo analítico para verificar qual era o valor esperado. A colagem dos *Strain Gage*

foi feita utilizando *superbonder* que seria uma maneira eficaz de fazer o dispositivo ficar bem fixado à régua. O aparato em funcionamento é mostrado na figura a seguir.

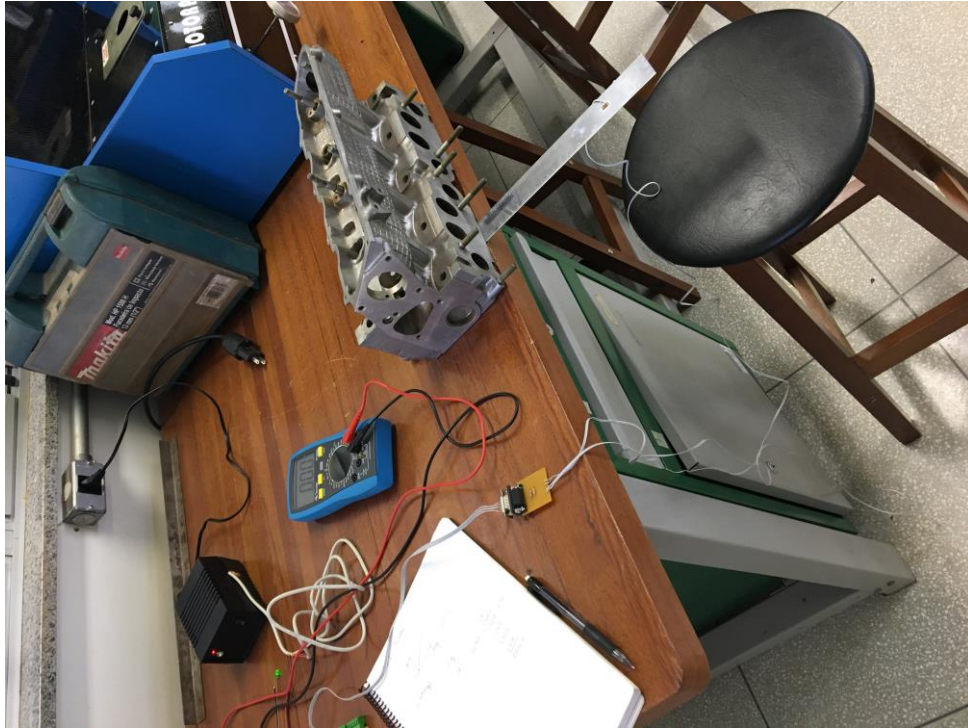


Figura 29: Dispositivo para medição em montagem.

Com o ganho de 240 inseridos na placa de amplificação, o *Offset* da ponte de *Wheatstone* sem nenhum carregamento estava em torno de 1,074V medidos por um multímetro. Este *offset* existe pelo fato da ponte de *Wheatstone* não estar balanceada, ou seja, algum dos resistores não estão com a mesma resistência em repouso. Sabendo que para 1kg a variação da ponte de *Wheatstone* deveria ser 12mV, o valor dado para ser compatível ao da simulação analítica e simulação numérica.

Foi feito algumas tomadas de valores no dia 5 de junho, foi inserido o celular sobre a extremidade da régua, e foi dado alguns valores de tensão. Como mostra a tabela a seguir.

Tabela 2: Valores mensurados com o dispositivo.

HORÁRIO	VALORES OFFSET (V)	VALORES MENSURADOS (V)	CÁLCULO DA MASSA (kgf)
16:05	1,014	1,019	0,208kgf
16:10	1,002	1,020	0,750kgf
16:13	1,009	1,023	0,583kgf

16:30	1,044	1,048	0,166kgf
-------	-------	-------	----------

Como é visto na tabela x, o valor de *offset* varia bastante com o tempo, e muito mais por conta das medições anteriores. Para isso podem haver algumas explicações que serão listadas a seguir.

- Utilização de resistores com alta tolerância - Para a ponte de *Wheatstone* e placa de amplificação, assim fazendo a resistência dos resistores flutuarem e não entregar ao circuito um valor esperado pelo projeto.
- Utilização de uma régua com baixo grau de ductilidade - Quando era inserido o peso na extremidade da régua, a mesma deformava plasticamente, o que talvez pudesse causar histerese no sensor.
- Utilização do celular como carregamento - Como o celular tem dimensão relativamente grande a uma régua com 10cm de comprimento, o celular poderia não ser considerado uma carga pontual, assim como foi considerado nas análises um carregamento pontual e na simulação experimental um carregamento distribuído, é esperado diferenciação de valores.
- Aumento da temperatura com a passagem de corrente no *Strain Gage* - Pelos valores aumentarem após o início das medições (de 5 em 5 minutos), e quando foi utilizado com um descanso de 17 minutos o valor foi diferente, a corrente pode estar esquentando o sensor e assim dilatando a grelha do *Strain Gage*.

6 CRONOGRAMA DE ATIVIDADE

TABELA DE ATIVIDADES - TCC 1				
	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	X			
2. EXTENSOMETRIA	X			
2.1 PROJETO	X			
2.2 MANUFATURA	X			
3. VALIDAÇÃO/ENSAIO EXPERIMENTAL			X	
3.1. BENCHMARKING 1 - VIGA ENGASTADA			X	
3.1.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA	X			
3.1.2 MODELAGEM ANSYS	X			
3.1.3 VALOR DADO EXTENSOMETRIA		X		
3.2 FINALIZAÇÃO DO TCC				X

Figura 30: Cronograma de atividades TCC1.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

Afonso,J.D.R., **Projecto e avaliação operacional de uma estrutura.** Dissertação. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa,2010.

Alves,G.T., **Avaliação de absorção de energia de impacto uma abordagem baseada em testes com estruturas similares.** Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2009.

Alvino,G., **Innovative composite materials application in the design of seats and interior parts.** University of Windsor. Theses. 2012.

Anfavea - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Disponível em:<<http://www.anfavea.com.br/>>. Acesso em: 08 de maio 2017

Borsutzki,M., Cornette,D., Kuriyama,Y.,Uenishi,A., Yan,B., Opbroek,E., **Recommendations for dynamic tensile testing of sheet steels.** International Iron and Steel Stitute. August,2005

Bugelli,E.B., **Modelos de falha em análise numérica de estrutura veicular submetida a impacto de baixa velocidade.** Universidade de São Paulo. Dissertação. São Paulo,2010.

Callister, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** John Wiley & Sons, Inc., 2002.

Carvalho,G.E., **"Inovação tecnológica na indústria automobilística:características e evolução recente.** " Economia e sociedade, Campinas, v. 17, n.3 (34), p.429-461, Dezembro 2008

Diaz,A., Fernandez,O., Gonzalez,R., Ramos,C., **FSAE 2015 Chassis and suspension final report.** Florida International University. Thesis. Florida 2014.

Doebelin, E. O. *Measurement systems: application and design*. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, c1990. 960p. (Schaum's outline series in mechanical and industrial engineering)

Echeverri,E.A.A., **Análise numérica e experimental de um aço trip submetido aos processos de estampagem a quente e têmpera e partição (Q&P)**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo 2017.

Faghini,H., **Experimental and FE analysis of exterior plastic components of cars under static and dynamic loading conditions**. Thesis of Master of Science in Mechanical Engineering. Blekinge Institute of Technology. Karlskrona, Sweden. 2011

Furtado,D.C., **Análise estrutural de chassi de veículos automotivos**. Monografia. Universidade de Brasília- Campus Gama. Brasília 2013.

Hoffman,K., **An introduction to measurements using strain gages**. Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989.

Konyha,Z., **Interactive Visual Analysis in Automotive Engineering Design** . Dissertação (Doutorado).Faculty of Informatics.Technische Universität Wien, 2012

Kowalik,M., **Full analysis of suspension geometry and chassis performance of formula student racing car**. Thesis. Instituto Superior de Engenharia do Porto.Porto,2014.

Lima,W.A.S., Nunes,L.E.N.P., Correa, V.A., **CNEBCA: Comparação numérica x experimental de borracha para coxins automotivos**. X SEGeT. Outubro 2013.

Mayyas, Ahmad, **Expert system based approach for material selection of automobile body-inwhite structural panels using numerical ranking and sustainability indices**. (2012). *All Dissertations*. Paper 886.

Magalhães, R.R., **Simulação numérica para predição de falhas em componentes automotivos usando dados de testes cíclicos de bancada e de durabilidade veicular**. Universidade Federal da Bahia. Tese. Salvador, Setembro 2011.

Mishra,A.K., **Deformation Behaviour of C-Mn440 Automobile Steel under varying strain rates**. Thesis. National Institute of Technology Rourkela. Maio 2014.

Motalbo,T.M., **Learning-Derived cost evolution in materials selection.** Massachusetts Institute of Technology. Theses. Junho 2010.

Mousquer,A.C., Veit,H.M., **Caracterização dos materiais presentes em catalisadores automotivos.** Banner. UFRGS. 2014.

Petracconi,C., **Análise comparativa do comportamento de fadiga do gancho reboque posterior de um veículo automototor.** Dissertação. PUC Minas. Belo Horizonte 2009.

Quadros, R.,Consoni,F., **Innovation capabilities in the Brazilian automobile industry: a study of vehicle assemblers' technological strategies and policy recommendations.** Universidade de Campinas (UNICAMP). 2009. Int. J. Technological Learning, Innovation and Development, Vol. 2, Nos. 1/2.

Rao,G.G., Suresh,M., **Design, static and dynamic analysis of automobile chassis.** International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology. Dezembro, 2015.

R&D 2016. **Global R&D Funding Forecast.** R&D Magazine 2016

Schnakovszky,C., Ganea,B.,Raveica,C., Herghelegiu,E., **Reverse engineering for automotive industry.** Annals of the Oradea University. 2008

Richard, W.L., **Strain gage measurement erros in the transiente heating of structural components.**NASA Dryden Flight Research Facility. Edwards, California. 1993

Shigley, Joseph E., Mischke, C. R. e Budynas, R. G., **Projeto de Engenharia Mecânica,** Bookman, Porto Alegre, 2005.

Souza,M.A.V.F.;Souza,S.F., **O potencial da ponte de Wheatstone para a produção de conhecimentos em sistemas lineares: Uma situação didática.** Revista de Ensino de Engenharia, v.34, n.2 , p.61-69, 2015.

Svoboda, J.; Dorf, R.. **Introdução aos Circuitos Elétricos.** 5ª. Edição, LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

Uenishi,A., Kuriyama,Y., Yoshida,H., Takahashi,M., **Material Characterization at High Strain Rates for Optimizing Car Body Structures for Crash Events**. Nippon Steel Technical Report No. 88 . Julho 2003.

Wannenburg,J., **A study of fatigue loading on automotive and transport structures**. Thesis (PhD in Mechanical Engineering). University of Pretoria. Agosto 2007.

Wyman,O., **2015 Car innovation: A comprehensive study on innovation in the automotive industry**. Marsh Mercer Kroll Guy Carpenter. 2015

Zoroufi, Mehrdad, "**Manufacturing process effects on fatigue design and optimization of automotive components : an analytical and experimental study**" (2004).*Theses and dissertations*. 1558.