

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIR TENSÕES MECÂNICAS DE UM VEÍCULO BAJA EM TEMPO REAL*

Vitor Martini¹
Newton Valadão Junior²
Otávio Lube dos Santos³
Allan Cypriano Doelinger Assad⁴
Pablo Altoé Amorim⁵

Resumo

Esse artigo tem o objetivo de desenvolver um dispositivo, para mensurar esforços mecânicos de partes estruturais de um veículo Baja, para estimar o seu valor instantâneo, com a utilização de: extensômetros; um hardware para tratamento de dados; um sistema embarcado para aquisição e manipulação de dados; e uma interface homem-máquina para analisar os resultados.

Palavras-chave: Extensômetro; Amplificador de instrumentação; aquisição de dados.

DEVELOPMENT OF AN DEVICE TO MEASURE MECHANICAL TENSIONS OF AN OFF-ROAD VEHICLE IN REAL TIME

Abstract

This paper aims to develop a device to measure mechanical stresses of structural parts of a Baja vehicle to estimate its instantaneous value with the use of: Strain gages; a hardware for data processing; an embedded system for data acquisition and manipulation; and a human-machine interface to analyze the results.

Keywords: Strain gage; Instrumental amplifier; Data acquisition.

¹ Engenharia de Controle e Automação/FAESA, Analista Desenvolvedor Junior, Industrial Enterprise Architect - Vale EA Office, Tata Consultancy Service na Vale S.A., Vitória, Espírito Santo - Brasil.

² Engenharia Mecânica/UFES, Pós-graduado em Engenharia da Manutenção/UFES, pós-graduado em Gestão Empresarial/FGV, mestre em Ciências Contábeis/FUCAPE, Professor, Engenharia Mecânica, Universidade Vila Velha-UVV - Vila Velha - ES - Brasil.

³ Mestre em Engenharia da computação, Professor, Unidade de Engenharia e Computação, FAESA Centro Universitário, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

⁴ Engenharia Mecânica/FAESA, Mestrando em Engenharia Mecânica/UFSC, Pós-graduando em Análise Numérica Estrutural /iESSS, Engenheiro Mecânico/Projetista/Bolsista, Laboratório de Engenharia BioMecânica-LEBm/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

⁵ Engenheiro Mecânico, Mestre, Professor, Unidade de Engenharia e Computação, FAESA Centro Universitário, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O projeto Baja, regulamentado pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), tem como objetivo projetar e construir um veículo protótipo, fora de estrada (off-road), monoposto, robusto, visando comercialização ao público entusiasta e não profissional. Esse veículo é chamado de baja.

Durante a concepção dos componentes mecânicos que fazem parte do conjunto estrutural do veículo Baja, previu-se a necessidade de comprovar os valores obtidos pelos cálculos e simulações de tensões mecânica sobre as regiões críticas ao longo de todo o veículo. O problema é medir as tensões mecânicas do veículo Baja em tempo real, sendo assim, o objetivo desse artigo é apresentar uma solução para satisfazer o problema.

A hipótese é que aplicando um sensor *strain gage* (extensômetro) em um ponto que deseja saber a tensão mecânica é possível medir a deformação e assim estimar a tensão instantânea, em tempo real. Para isso, o objetivo geral é desenvolver um dispositivo para efetuar a medição da tensão estimada através da deformação adquirida com um extensômetro. Sendo assim, esse artigo tem o objetivo específico de desenvolver: um hardware do dispositivo, disposto de um extensômetro; um software para aquisição de dados; uma interface homem máquina; e medições para analisar o mesmo.

O artigo em questão, apresenta um dispositivo que irá fornecer cargas axiais de perfis tubulares. Cargas axiais irão descrever a deformação de elementos axiais e desenvolver um método para encontrar as reações nos apoios quando tais reações não podem ser determinadas estritamente pelas equações de equilíbrio [1]

Usando a lei de Hooke e as definições de tensão e deformação desenvolve uma equação que pode ser usada para determinar a deformação elástica de um elemento submetido a cargas axiais. Para generalizar o desenvolvimento, considere a barra mostrada na Figura 1, cuja área de seção transversal varia gradativamente ao longo de seu comprimento L . A barra está sujeita a cargas concentradas em suas extremidades e a uma carga externa variável distribuída ao longo de seu comprimento. Essa carga distribuída poderia, por exemplo, representar o peso de uma barra vertical ou forças de atrito que agem sobre a superfície da barra [1].

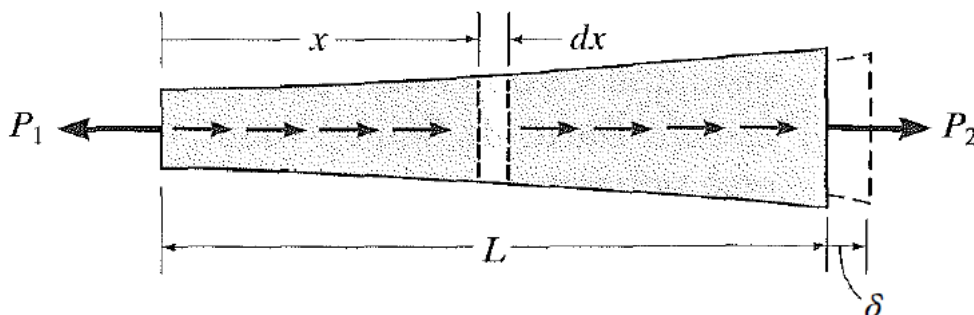


Figura 1. Deformação por tração [1].

Usando o método das seções, isola um elemento diferencial da barra de comprimento dx e área de seção transversal $A(x)$ em uma posição arbitrária x . O diagrama de corpo livre desse elemento é mostrado na Figura 2. A força axial

interna resultante é representada por $P(x)$, já que o carregamento externo fará com que ela varie ao longo do comprimento da barra. Essa carga, $P(x)$, deformará o elemento até a forma indicada pela linha tracejada e, portanto, o deslocamento de uma das extremidades do elemento em relação à outra extremidade será $d\delta$. A tensão e a deformação no elemento são [1]:

$$\sigma = \frac{P(x)}{A(x)} \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{d\delta}{dx} \quad (4)$$

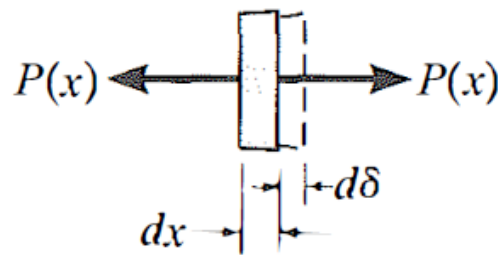


Figura 2. Deformação por tração focalizada na deformação [1].

A leitura feita nos perfis, é através de um sensor extensômetro que, o mesmo, é baseado no fato de que os metais mudam sua resistência elétrica quando sofrem uma deformação. Observando a Figura (Figura 3), a linha contínua mostra parte de um fio metálico, como usado nos extensômetros, onde l é o comprimento original antes da deformação, e este apresenta uma resistência elétrica, R . A linha pontilhada apresenta o fio metálico alongado, seu comprimento agora igual a $l + \Delta l$ e resistência igual a $R + \Delta R$. A resistência elétrica R é dada por [2]:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5)$$

Onde:

A : área da seção transversal do fio;

ρ : resistividade do material do fio.

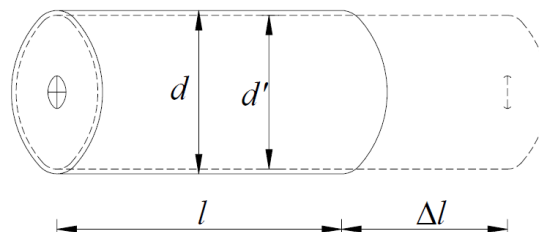


Figura 3. Deformação de um fio sobre tração [2].

Para obter uma mudança relativa na resistência, os logaritmos para todos os membros da equação devem ser diferenciados. Primeiramente tira-se o logaritmo, e então, faz-se a derivada [2].

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad (6)$$

A função principal do extensômetro é produzir uma mudança de resistência elétrica proporcional à deformação mecânica (ϵ) do corpo de prova ao qual ele é montado. O fator de proporcionalidade da calibração, comumente chamado de fator de calibração (GF), que faz as duas Equações 7 e 8 equivalentes, é definido na Equação 10. Os extensômetros mais comuns têm um fator de calibração nominal de 2, embora extensômetros especiais estejam disponíveis com maiores fatores de calibração [3].

$$\epsilon = \text{Deformação} = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

$$\epsilon \propto \frac{\Delta R}{R} \quad (8)$$

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (9)$$

$$\Delta R = GF * \epsilon * R \quad (10)$$

A variação da resistência que ocorre em um extensômetro típico é muito pequena. Como a mudança de resistência não é facilmente medida, a mudança de tensão como resultado de uma mudança de resistência é sempre preferida. Uma ponte de *Wheatstone* é usada para fornecer a saída de tensão devido a uma mudança de resistência no extensômetro [3].

A ponte de extensômetro usa a tensão diferencial medida entre os pontos A e C, na Figura (Figura 4), para determinar a saída da ponte resultante de qualquer desequilíbrio (Equação 11) e, entre pontos B e D, há um tensão de excitação (E_{ex}) [3].

$$e_0 = E_{ex} \left[\frac{R_4}{R_1+R_4} - \frac{R_3}{R_2+R_3} \right] \quad (11)$$

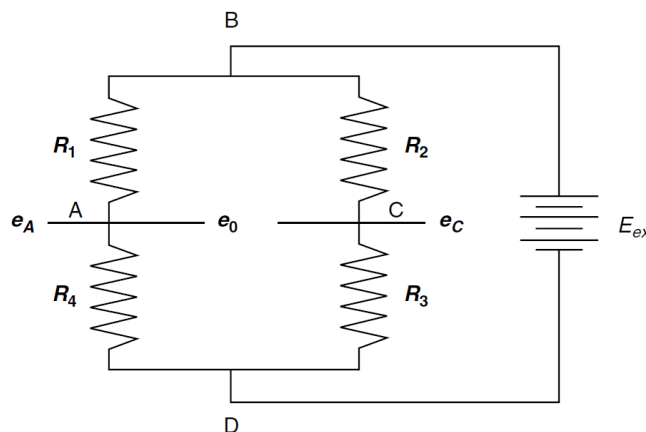


Figura 4. A ponte de Wheatstone como um circuito divisor de tensão [3].

Dependendo da configuração, um extensômetro (chamado de um quarto de ponte); dois extensômetros (chamados de meia ponte); ou quatro extensômetros (chamados uma ponte cheia), podem ser usados. Em um quarto de ponte, um dos resistores é substituído por um extensômetro, enquanto os outros três braços empregam resistências de alta precisão com um valor nominal igual ao do extensômetro [3]

A ponte com um extensômetro (Figura 5) substituindo uma das resistências de ponte (R_4) é referida como uma ponte de um quarto onde apenas um braço foi equipado com um dispositivo extensômetro. Prever a saída da ponte é importante, porque a maior parte da saída é digitalizada através de um processo de conversão A-D (analógico-digital) e depois analisada por um computador. Combinando as Equações 11 e 12 e admitindo $R_1 = R_2 = R_3 = R_{Sensor} = R$ resultando na Equação 13 [3]

$$\frac{e_0}{E_{ex}} = \left[\frac{(R_4 + \Delta R)}{R_1 + (R_4 + \Delta R)} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right] \quad (12)$$

$$\frac{e_0}{E_{ex}} \approx \frac{GF * \epsilon}{4} \quad (13)$$

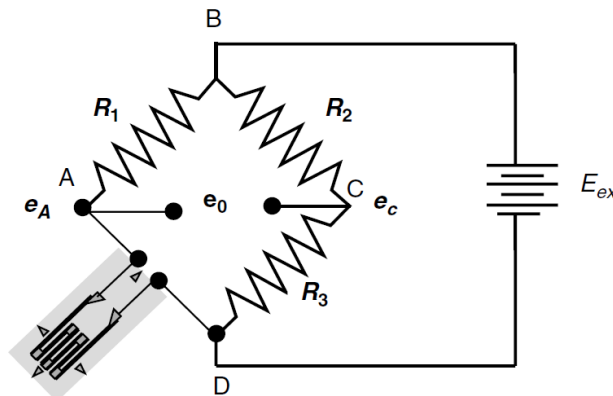


Figura 5. Um circuito de quarto-ponte de tensão constante [3].

As etapas modificadoras de interesse incluem amplificação, filtragem, atenuação, digitalização e outras técnicas de modificação de sinal. O sinal de saída dos transdutores na medição de deformação, é geralmente pequena, sendo assim, há necessidade de amplificação do mesmo e, posteriormente, a conversão do sinal analógico em digital (conversor A-D). A Figura 6 apresenta uma disposição comum para amplificação de sinal de impedância de alta entrada [3].

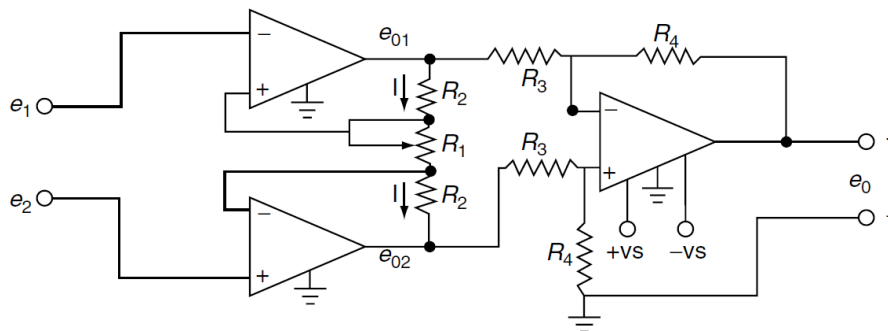


Figura 6. Um amplificador de instrumentação típico [3].

Amplificadores desse tipo, onde há uma entrada diferencial e uma elevadíssima impedância, são chamados de amplificador de instrumentação. Um amplificador de instrumentação é aquele que é usado em instrumentos eletrônicos de medição ou em sistemas eletrônicos nos quais a maior precisão é necessária [4].

Aquisição de dados é um sistema que permite que os dados sejam retirados de uma experiência e alimentados a uma tela ou a um sistema para manipulação ou armazenamento. O sinal gerado pelo transdutor de deformação, ou tensão, deve ser medido para determinar a deformação ou a carga. O sistema de aquisição de dados recebe os sinais dos extensômetro, células de carga e sensores de temperatura e os converte em uma forma que o sistema de instrumentação pode processar. Um sistema de aquisição de dados básico consiste em um condicionador de sinal, filtros analógicos, conversor A-D, filtros digitais, mídia de armazenamento e software para interfacear todos os módulos juntos. Após os dados estarem em formato digital, eles podem ser processados usando técnicas de processamento de sinal digital comuns (DSP) [3].

Nesse tipo de sistema, pode-se usar um arranjo composto por dois subsistemas: um para aquisição de dados e outro para armazenamento e análise. No projeto de tais subsistemas de aquisição de dados, microprocessadores, DSP's e principalmente microcontroladores ainda são usados [5].

Estágio final é qualquer componente auxiliando o engenheiro na análise de dados experimentais, incluindo indicação digitalizada, gravadores, sinais digitalizados para análise de dados de computador, displays gráficos e possivelmente quaisquer dispositivos de controle [3].

2 DESENVOLVIMENTO

Para a construção do dispositivo, é necessário um corpo de prova com dimensões conhecidas, um sensor extensômetro, um *hardware* para manipular as informações do sensor, um *software* para aquisição de dados e um supervisor para indicar os resultados. Para a validação desse dispositivo, o mesmo foi calibrado numa máquina de ensaio devidamente calibrada. A implementação desse dispositivo permitiu medir tempo real a tensão normal que um tubo de aço sofre.

2.1 Construção do dispositivo

Para escolher o sensor do dispositivo, foi necessário definir o local de aplicação. O perfil medido, é um tubo de aço SAE 1020 laminado de uma polegada de diâmetro e dois milímetros de espessura. Sendo que, esse corpo de prova, foi usado como referência de fator de calibração para ser usado em outros tubos de aço SAE 1020 de mesma área transversal.

Preparando para a colagem do sensor ao tubo de aço, primeiramente foi soldado nos terminais do extensômetro fios condutores. Foi colado no tubo de aço, um extensômetro (Figura 7), utilizando o adesivo instantâneo para esse feito. Após feito o tratamento adequando envelhecimento do material colado, os fios condutores ligados ao sensor foi conectado com a ponte de *Wheatstone*.

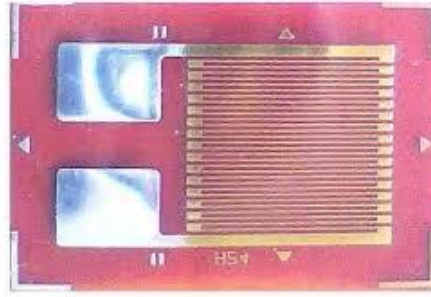


Figura 7. Extensômetro utilizado.

O amplificador de instrumentação (Figura 8) que, por sua vez, diferencia os sinais de saída da ponte e, posteriormente, amplifica. A tensão de saída do amplificador, fora ligada ao conversor A/D, com 10 bits de resolução, do microcontrolador. O Microcontrolador, transmuda os bits em valores reais decimais e converte-os para chegar aos resultados desejados, como tensão mecânica.

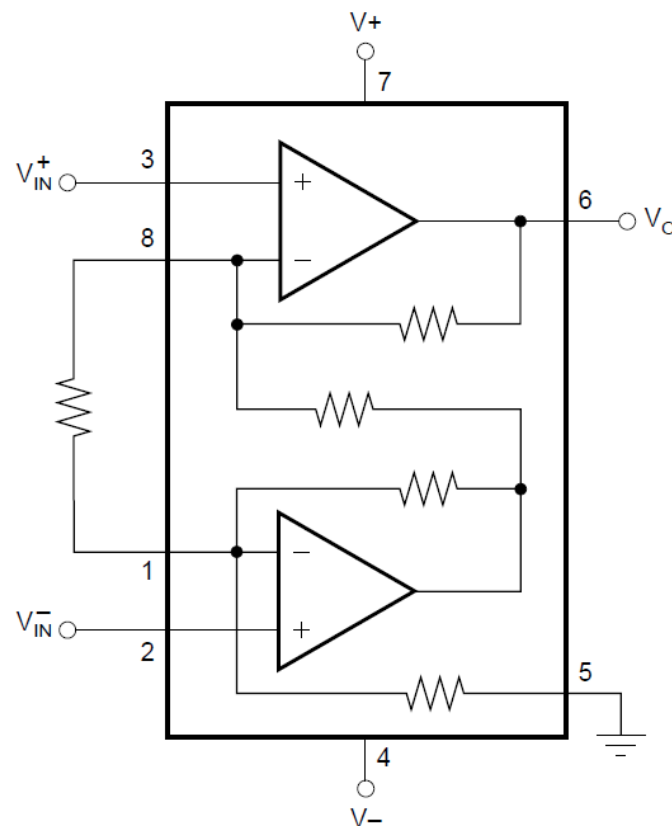


Figura 8. Amplificador de instrumentação.

Os testes foram limitados em 10230 N, tanto para tração e para compressão, trabalhando com o fator de segurança 3, em relação ao limite de escoamento do aço SAE 1200, que é de 32,2kN [6]. Com isso a resolução do medidor é de 10 N, devido a relação entre 10230 N e 10 bits (valor máximo da aquisição de dados). O valor de 1023 bits corresponde a 5v que o amplificador instrumentação fornece (V_o). E para que ele forneça 5v, foi necessário um ganho de, aproximadamente, 4010 para o amplificador.

Com a programação apropriada nesse controlador é possível calibrar os valores de entrada para que a variação da resistência elétrica do extensômetro resulte em tensão mecânica. O controlador é ligado a um computador via USB, utilizando o protocolo UART, para que nesse computador indique os valores de entrada em um supervisor, para que tenha uma melhor interação com os resultados obtidos pelo controlador e, posteriormente, salvar os dados em arquivos de texto.

Após o sinal analógica do sensor ser processado pelo todo dispositivo (Figura 9), o supervisor fornece, em média, um intervalo de tempo entre cada amostra de 1,2 milissegundos.

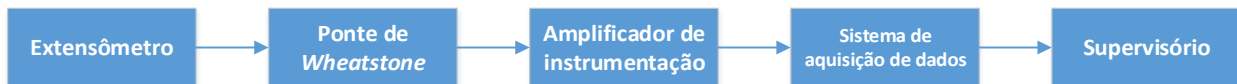


Figura 9. Diagrama completo do sistema.

Para a calibração do dispositivo, utilizou-se a máquina universal de ensaio servo controlada da Panantec, modelo PHA-300, calibrada na data de 08/04/2016, configurado para tracionar o tubo até estabilizar uma força de 5000 N por um período de tempo, ajustando o fator de calibração durante o ensaio para 50 vezes o valor de saída do microcontrolador para que o valor do dispositivo seja o mesmo da máquina (Figura 10).



Figura 10. Amostra na máquina de ensaio.

Esse fator de calibração, foi usado para compensar a incerteza de todas as resistências elétrica da ponte de *Wheatstone*, exceto o extensômetro. A figura abaixo (Figura 11), descreve uma parte de interessa da curva do tubo ensaiado, fornecido pela máquina de ensaio.

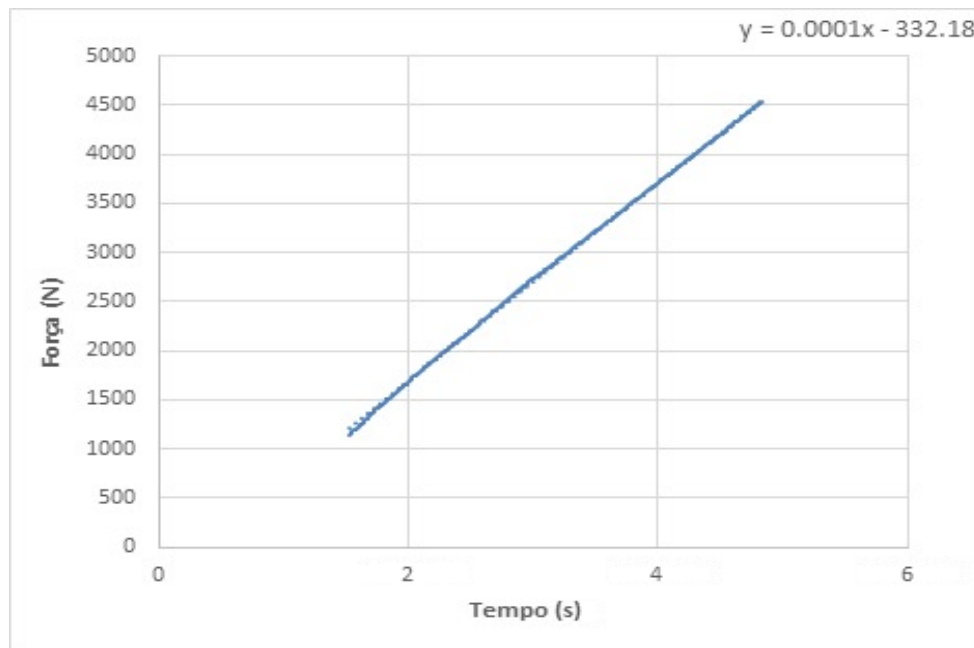


Figura 11. Dados da máquina de ensaio

Apesar dos ruídos e um *offset* na tensão de aproximadamente -1540 N, indicado na figura abaixo (Figura 12), pode-se calibrar o dispositivo para corpos de prova aço SAE 1020 laminado de uma polegada de diâmetro e dois milímetros de espessura, necessariamente, pois o coeficiente angular da reta gerada pela máquina de ensaio é igual ao coeficiente fornecido dispositivo.

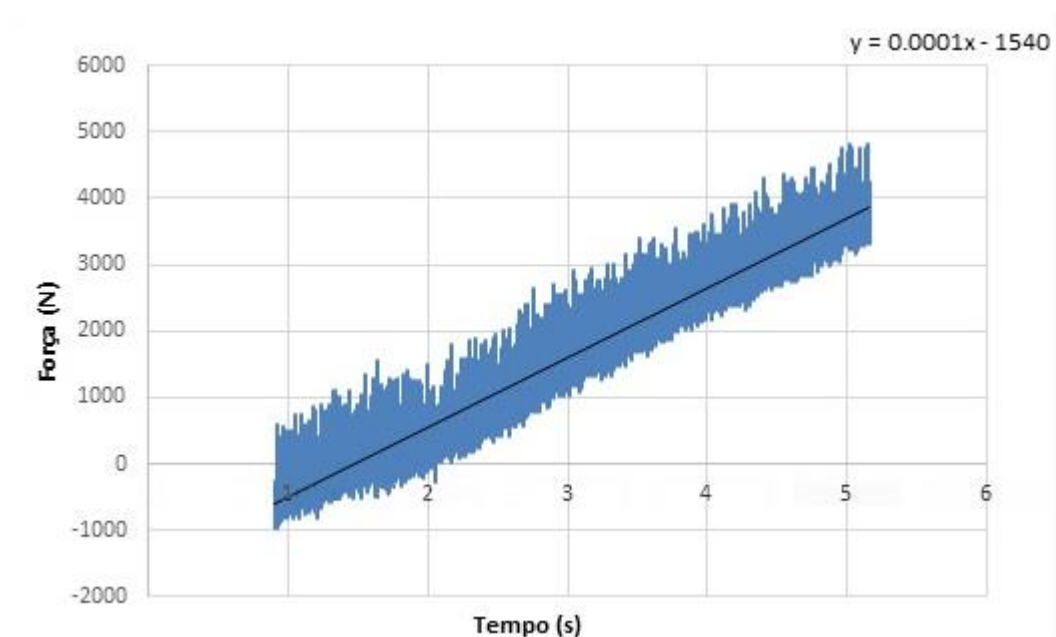


Figura 12. Dados do dispositivo durante o ensaio.

Calibrado o dispositivo, foi posto em prática no veículo Baja. O corpo de prova dessa vez é um tubo de aço SAE 1020 que faz parte de um braço de suspensão, conforme a Figura (Figura 13).



Figura 13. Foto do braço de suspensão dianteira direita inferior.

Para analisar a repetitividade do dispositivo, foi feito um ensaio no carro onde elevou-se até 20 cm acima do chão a parte dianteira do mesmo, contendo em uma parte da sua estrutura um extensômetro, sendo que essa pesa atualmente 79 kg (sem piloto) e considerando que não será significativo a alteração da resultante do peso no eixo dianteiro após inclinação, e soltar para queda livre. A partir de algumas amostragens, resultou a figura abaixo (Figura 14), que demonstra uma certa repetitividade.

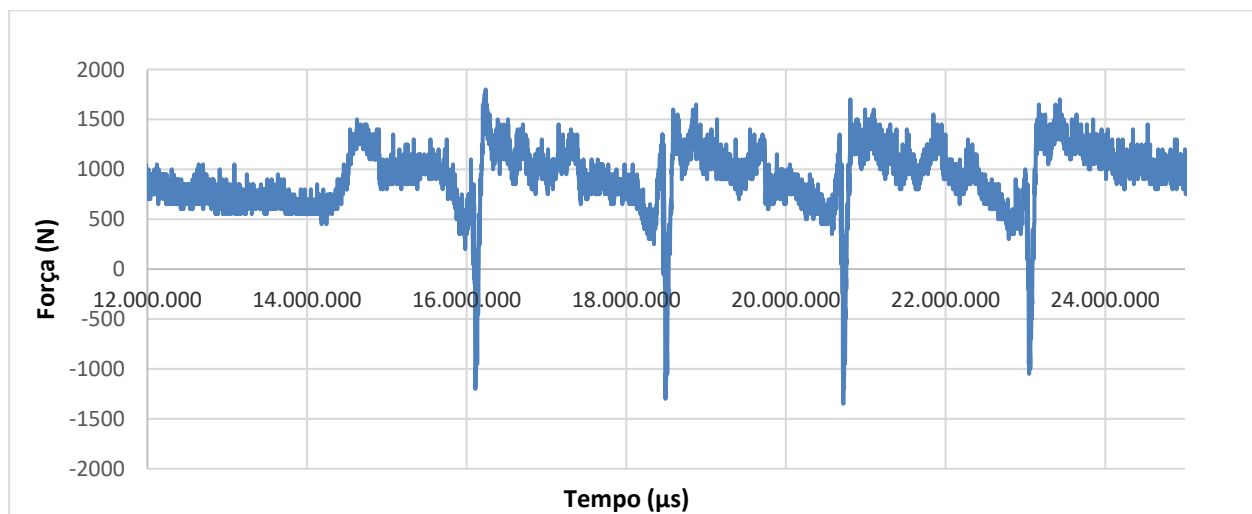


Figura 14. Ensaio de queda livre.

3 CONCLUSÃO

O presente artigo atingiu o seu objetivo geral de desenvolver um dispositivo para efetuar a medição da tensão estimada, em tempo real, através da deformação adquirida com um extensômetro e confirmou que a hipótese de estimar a tensão através da medição por deformação com extensômetro é possível dentro de um intervalo de confiança que necessita ser melhor estudado, devido às incertezas obtidas, podendo desta forma resolver o problema desse artigo que é estimar as tensões do veículo baja de forma dinâmica.

Faz-se necessário, melhor análise dos resultados alcançados com análises estatísticas e comparações com possíveis resultados adquiridos em outros trabalhos científicos de aplicações semelhantes.

Agradecimentos

Agradeço pela a oportunidade de desenvolver esse trabalho na Equipa Faesa Baja e de proporcionar o objeto de estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Hibbeler RC. Resistência dos materiais. 7ª, São Paulo: Pearson; 2010.
- 2 Andolfato RP, Camacho JS, De Brito GA. Extensometria básica. 2004 [acesso em 01 jul. 2019]. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>.
- 3 Lee Y. et al. Fatigue testing and analysis: Theory and practice. Burlington: Elsevier Ltd, 2005.
- 4 Ren MY, Zhang CX, Sun DS. Design of CMOS Instrumentation Amplifier. 2011 [acesso em 01 jul. 2019]. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581200625X>.
- 5 De França JA. Sistemas de aquisição de dados baseados em microcontrolador. 1997 [acesso em 01 jul. 2019]. Disponível em: <http://www.uel.br/pessoal/josealexandre/stuff/mestrado/>.
- 6 Callister WD. Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução. 7ª, Rio de Janeiro: LTC; 2008.