

AQUISIÇÃO DE DADOS DINÂMICOS ATRAVÉS DE EXTENSÔMETROS RESISTIVOS (STRAIN GAGES) E POTENCIÔMETRO LINEAR EM UM PROTÓTIPO TIPO BAJA

Dynamic Data Acquisition Through Strain Gages and Linear Potentiometer on BAJA Prototype

Pablo M. M. Pires ^{1*}, Gabriel Z. B. L. Bueno¹ e Maurício M. Nelton¹

¹ Universidade Federal de São João del Rei

*Autor correspondente: pabllomiguel_26@hotmail.com

RESUMO

Toda máquina ou componente estrutural sofrem uma determinada deformação elástica quando expostos a algum tipo de carga ou força [8]. Ademais, quando se trata de projeto e validação de componentes, uma análise estrutural tem um papel fundamental, haja vista a necessidade de garantir a integridade das peças projetadas. Para isso, é eminente a imprescindibilidade de dados confiáveis para que todo o processo seja realizado de maneira coerente, pautada em critérios de engenharia [4,11]. Com isso, o presente estudo busca, através de extensômetros elétrico-resistivos (strain gages) e de potenciômetro linear, a aquisição de carregamentos dinâmicos, as quais estão presente de maneira crítica em sistemas de suspensão de protótipos tipo BAJA, sendo este o local onde contempla os principais componentes absorvedores do impacto primário pneu-solo desse tipo de veículo. Todo o trabalho foi realizado no protótipo tipo BAJA da equipe de competição KomiKeto Baja – UFSJ, tendo resultados satisfatórios quando realizadas correlações entre métodos virtuais e físicos-reais de captação de dados, além de categórica utilização destes aplicados às condições de contorno em simulações numéricas.

Palavras-chave: Aquisição de dados, Protótipo tipo baja, Condição de Contorno.

ABSTRACT

Every machine or structural component undergoes a certain elastic deformation when exposed to some type of load or force [8]. Furthermore, when it comes to the design and validation of components, a structural analysis plays a fundamental role, given the need to guarantee the integrity of the designed parts. To achieve this, reliable data is essential so that the entire process can be carried out in a coherent manner, based on engineering criteria [4, 11]. Therefore, the present study seeks to acquire dynamic loads and forces, which are present in a critical way in suspension systems of BAJA type prototypes, this being the place where the main absorbing components of the primary tire-ground impact of this type of vehicle are considered. All work was carried out on the BAJA type prototype of the KomiKeto Baja – UFSJ competition team, with satisfactory results when correlations were carried out between virtual and physical-real data acquisition methods, in addition to satisfactory results when using these applied to boundary conditions in simulations. numeric.

Keywords: Data Acquisition, Baja Prototype, Boundary Conditions.

1. Introdução

A obtenção de dados de carregamentos em componentes mecânicos na área automotiva vem sendo explorada e valorizada cada dia mais a fim de realizar projetos com condições de contorno cada vez mais fiéis ao comportamento físico-mecânico desses componentes, quando expostos em pleno funcionamento, e, assim, tornar possível a otimização e aumento da confiabilidade estrutural do projeto como um todo [4].

Nesse viés, visando compreender os esforços atuantes e o comportamento dinâmico dos componentes do protótipo KB09 da Equipe KomiKeto Baja UFSJ - equipe de competição BAJA SAE -, através do setor de cálculo estrutural, objetiva-se no presente trabalho apresentar técnicas utilizadas para a aquisição de dados (cargas) por meio de *strain gages* e dados de esforços e carregamentos obtidos em testes e ensaios realizados por membros da equipe, os quais são/serão utilizados para simulações numéricas pelo método de elementos finitos para validar e/ou projetar componentes do veículo. Além disso, visa-se, principalmente, mostrar os resultados obtidos, os desafios encontrados e cooperar para que novos trabalhos sejam realizados por outras equipes de competição do mesmo ramo, haja vista a escassez de materiais públicos voltados para o tema.

1.1. Strain Gages

Strain gages, ou extensômetros elétrico-resistivos, são dispositivos resistivos elétricos capazes de avaliar de maneira experimental a carga ou deformação que um determinado material está sofrendo através de correlações elétricas com mecânicas [9].

Tomando um corpo cilíndrico qualquer, a resistência (R) experimentada pelo mesmo depende de maneira direta do material e da geometria no qual este é feito. Junto disso, a resistividade (ρ) do material pode ser expressa como a resistência por unidade de comprimento (L) x área da secção transversal (Equação 1); aumentando com o comprimento e diminuindo com a área da secção (Figura 1).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

Analogamente, o comportamento elástico-linear de materiais metálicos (Figura 1), como o aço,

pode ser descrito pela variação de comprimento (L) após experimentar uma carga externa, resultando em uma deformação (ε), conforme ilustrado pela fórmula abaixo.

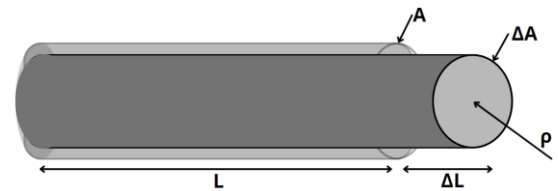


Figura 1. Ilustração de um fio deformado e suas devidas relações físicas experimentadas.

Fonte: Autor (2024).

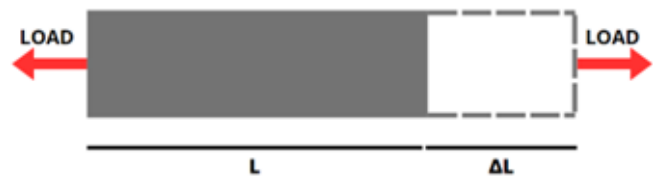


Figura 2. Deformação mecânica experimentada por materiais metálicos. Fonte: Autor (2024).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Correlaciona-se a deformação experimentada pelos fios os quais compõem o *strain gage* com a deformação linear-mecânica dos componentes por meio da variável Gage Factor (GF), a qual relaciona a proporcionalidade entre a variação de resistência elétrica (ΔR) e a variação de deformação do material (ΔL) em um corpo deformado.

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} ; \varepsilon \propto \frac{\Delta R}{R} \quad (3)$$

1.1.1 Pontes de Wheatstone

Pontes de wheatstone são dispositivos formados por um arranjo elétrico utilizados para identificar a mudança mínima da resistência elétrica fornecida pelos *strain gages* através da variação da tensão elétrica do circuito.

Sabe-se que a tensão de entrada será diferente da tensão de saída se houver uma variação em qualquer uma das resistências elétricas do circuito (antes todas iguais) causada pela deformação experimentada pelo *strain gage*. Assim, temos:

$$V' = \left[\frac{R_1}{(R_1 + R_2)} - \frac{R_4}{(R_4 + R_3)} \right] V \quad (4)$$

onde R_1 representa a resistência do extensômetro; R_2 , R_3 e R_4 são os resistores conhecidos; V é a tensão de entrada e V' a tensão de saída (resposta em mmV/V dada pelo módulo de aquisição de dados). Se R_1 tem uma variação ΔR oriunda da deformação material-extensômetro, tem-se:

$$V' = \left[\frac{(R_1 + \Delta R)}{(R_1 + \Delta R) + R_2} - \frac{R_4}{(R_4 + R_3)} \right] V \quad (5)$$

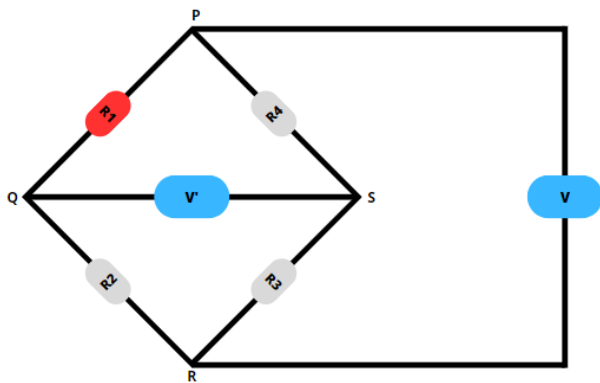


Figura 3. Representação ilustrativa de um circuito ponte de wheatstone. Fonte: Autor (2024).

Sabendo que $R_2 = R_3 = R_4 = R_1$ (Resistência do Strain Gage) tem os mesmos valores de resistência, logo;

$$V' = \left[\frac{R + \Delta R}{(R + \Delta R) + R} - \frac{R}{2R} \right] V \quad (6)$$

uma vez que R será significativamente maior que ΔR , então;

$$V' = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} V \quad (7)$$

e assim, relacionando com a equação (3), temos finalmente que:

$$V' = \frac{GF\epsilon V}{4} \quad (8)$$

Sendo assim, pode-se concluir que a tensão de saída é diretamente proporcional ao fator de sensibilidade do extensômetro (GF), a deformação elástica experimentada (ϵ) e a tensão de entrada (V); e

assim é possível determinar tal tensão de saída (V') e relacionar o comportamento material-extensômetro para adquirir as tensões, deformações ou cargas atuantes nos componentes por meio de regressão linear e formulações [9]. Vale ressaltar que todo esse sistema de pontes, os quais se aplicam para cada extensômetro utilizado, é feito de maneira automática pelo módulo de aquisição de dados utilizado (LYNX ADS 2500). O presente trabalho utilizou-se somente da configuração $\frac{1}{4}$ de ponte por facilidade de instrumentação e por atender todos os objetivos propostos.

1.2. Potenciômetro Linear

Utilizado essencialmente para medir deslocamento, o potenciômetro linear pode ser aplicado em diversos componentes que possuem movimento relativo axial entre si. Seu princípio de funcionamento consiste em relacionar a variação da resistência, consequentemente a variação na tensão de saída, com o curso medido pelo seu deslocamento axial, alterando o sinal recebido pelo receptor (módulo) onde este é conectado.



Figura 4. Potenciômetro linear elétrico. Fonte: Autor (2024).

2. Metodologia

2.1. Condicionamento de Instalação

O processo de preparação para instrumentação por extensômetros de componentes é de extrema importância e deve ser seguido rigorosamente a fim de obter um resultado preciso [7]. Sendo assim, conforme manuais e databooks disponibilizados pelas empresas HBK, Micro-Measurements – VPG e National Instruments, além de um relatório [1], todo o processo de instalação dos extensômetros nos

componentes foi padronizado através de uma sequência elaborada pelos membros da equipe, seguindo as referências citadas, na seguinte ordem:

1. Desmontagem do componente
2. Limpeza superficial do excesso de resíduos
3. Lixamento (180 – 240 – 320 respectivamente)
4. Limpeza com álcool isopropílico e gases
5. Limpeza final com hastes flexíveis
6. Marcação da localidade de colagem dos extensômetros
7. Posicionamento em bancada dos sensores com fita transparente
8. Posicionamento da fita com extensômetro na peça que o mesmo será colado e alinhamento final
9. Aplicação do adesivo
10. Pressão com o polegar por 2 min para a colagem.
11. Tempo de cura de 30 min
12. Retirada da fita transparente
13. Aplicação de silicone transparente para proteção de cada sensor
14. Instalação e soldagem dos fios nos terminais dos sensores

Baseando-se na norma brasileira NBR ISO 7500-1 e na norma europeia BS EN ISO 9513:2012, todo o processo de calibração foi feito de maneira a obter uma regressão linear da relação entre a deformação do extensômetro, a variação da voltagem lida pelo módulo de aquisição de dados e o valor correlato dos pesos conhecidos utilizados.

2.2. Arranjo Experimental

Para a aquisição de todos os dados do presente trabalho, seja quase-estático (drop-test) ou dinâmico (rodagem em pista de testes), baseando-se em [12], utilizou-se um arranjo instrumental (Figura 3) com os seguintes equipamentos:

- Bateria automotiva 12V 60Ah
- Nobreak APC Back-UPS 600
- Módulo de Aquisição LYNX ADS2500
- Potenciômetro de deslocamento linear
- Extensômetros ligados em $\frac{1}{4}$ de ponte (*strain gages*)
- Cabo Manga AWG 4x26
- Cabo Elétrico Flexível 2.5mm

Assim, o sistema de alimentação de energia foi alocado no assoalho do protótipo, como mostra a Figura 4 (c), e o laptop com o Módulo LYNX ADS2500 em uma mochila, que por sua vez foi colocada no peito do piloto.

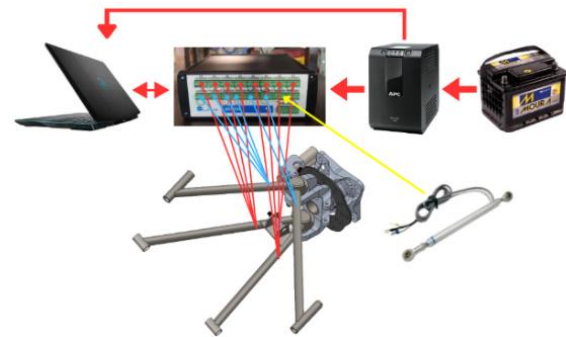


Figura 5. Arranjo instrumental utilizado para a captação dinâmica. Fonte: Autor (2024).



Figura 6. Arranjo do módulo e laptop em mochila (a), configurando gravação dos dados no software LYNX SignalVista (b). Fonte: Autor (2024).

2.3. Aplicação na suspensão dianteira

Para as bandejas da suspensão dianteira, realizou-se engaste das mesmas em uma morsa com auxílio de metalões, tendo como base uma simulação numérica genérica por elementos finitos, com uma força arbitraria qualquer, para identificação da região com maior gradiente de concentrador de deformação e, assim, inseridos uma série de pesos (anilhas) conhecidos (5kg - 5kg - 10kg respectivamente) a fim de traçar uma regressão linear (Imagem 8) que parametrizasse a equação da qual seria descrito os esforços (N) posteriormente em ensaios dinâmicos, uma vez que a caracterização estática da calibração é realizada para interpretação da aplicação dos *strain gages* e seus devidos outputs físicos de variação de propriedades elétricas (tensão elétrica) devido a variação das propriedades mecânicas (deformação linear). Além disso, para garantir todo o processo de colagem dos extensômetros e obter resultados finais mais fidedignos [8, 13], foi realizado uma análise de histerese em cada um dos extensômetros, conforme ilustra a aplicação de um caso na figura 9.

Por fim, foi realizado a instrumentação do curso de amortecimento com o auxílio de um potenciômetro linear (Imagem 7-e), onde o mesmo foi fixado através de extensões rotulares, garantindo um funcionamento preciso e obtendo o deslocamento real do amortecedor pneumático utilizado na equipe a fim de entender os esforços absorvidos pelo componente [7] e utiliza-los como parâmetro de comparação com os dados dinâmicos de carregamento obtido pelos *gages*.

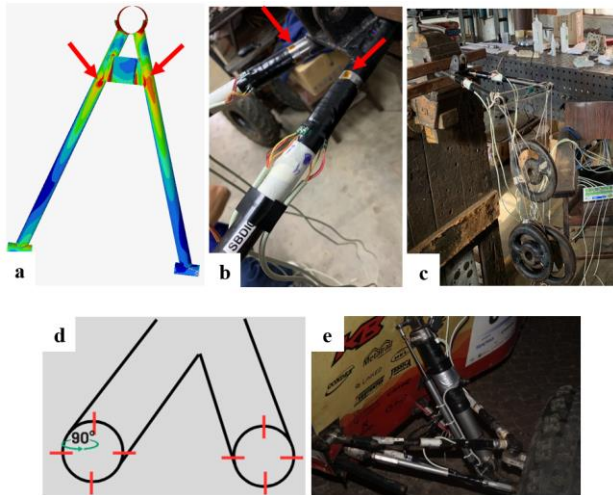


Figura 7. simulação de elementos finitos (HyperWorks) (a); fixação dos *strain gages* (b); calibração da bandeja com os pesos conhecidos (c); seção transversal dos tubos da bandeja e a posicionamento dos sensores em modelo ¼ de ponte (d); potenciômetro linear instalado no amortecedor dianteiro (e). Fonte: Autor (2023).

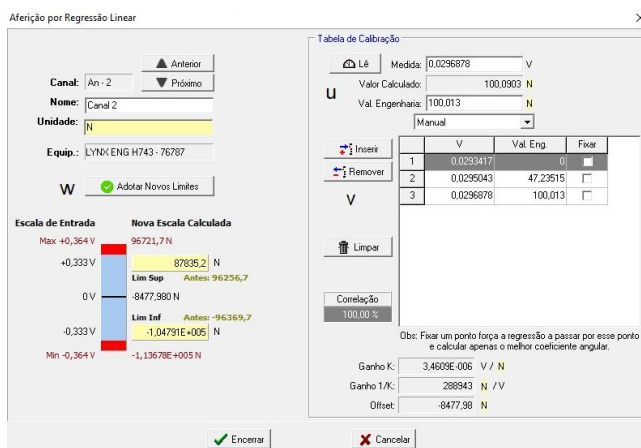


Figura 8. Regressão linear aplicada na calibração dos *strain gages*. Fonte: Autor (2023).

Baseando-se nos conceitos de [3], pode-se realizar cálculos a fim de extrair o esforço no qual a

seção (tubular no caso do presente trabalho) está sendo submetida. A configuração de *strain gages* colados em ¼ de ponte quando somado os sinais dos sensores colados em faces opostas entregam o resultado da força axial presente no corpo em análise; já quando subtraído os sinais, tem-se o resultado de forças cortantes (Figura 9).

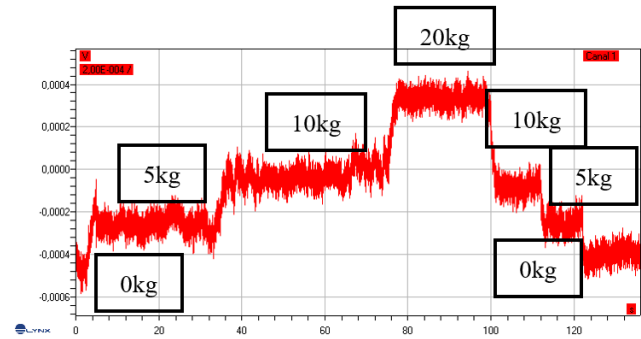


Figura 9. Análise de histerese dos *strain gages*.
Fonte: Autor (2023).

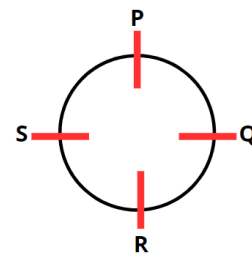


Figura 10. Ilustração da posição de colagem dos *strain gages* na seção transversal (tubo). Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, pela imagem acima, considerando que as letras P, Q, R e S são *gages* uniaxiais colados em ¼ de ponte, então:

$$N_{axial} = (P + R)/2 = (Q + S)/2 ; \quad (9)$$

Uma vez que quando submetida a flexão, a seção anulará as cargas cortantes visto que o sinal obtido pelos *gages* terá valor oposto em função do critério de flexão dos materiais, e as cargas axiais se somaram, logo devem ser divididas por dois para que se obtenha o valor correto. Já as cargas cortantes verticais serão dadas por:

$$V_{vertical} = (P - R)/2 \quad (10)$$

Visto que as cargas normais agora se anularão e as cortantes de sinais opostos irão se somar;

similarmente, as cargas cortantes horizontais serão tais que:

$$V_{\text{horizontal}} = (S - Q)/2 \quad (11)$$

2.4. Pista de Testes

A fim de obter sinais de durabilidade que represente a condição crítica de trabalho do protótipo, conforme citado por [4] em 2019, foi realizado um percurso de durabilidade na pista de testes oficial da Equipe Komiketo Baja – UFSJ, onde a mesma representa de maneira fidedigna as condições de pistas de competições nacionais e regionais, as quais o carro é exposto de maneira extrema e crítica à obstáculos variados.

Diferentemente de carros de linha de produção, protótipos tipo baja não são permitidos circular em por rodovias ou circuitos urbanos, logo, percursos de rua, percursos de mal uso e percursos de dirigibilidade devem ser adaptados para o presente estudo [4]. Sendo assim, considera-se um único percurso de uso contínuo, representando o traçado de enduro de competições (Imagem 10), onde será analisado as condições das quais o protótipo é exposto de maneira exclusiva e crítica, isto é, um traçado em terreno de terra com obstáculos acentuados, rampas e valas.

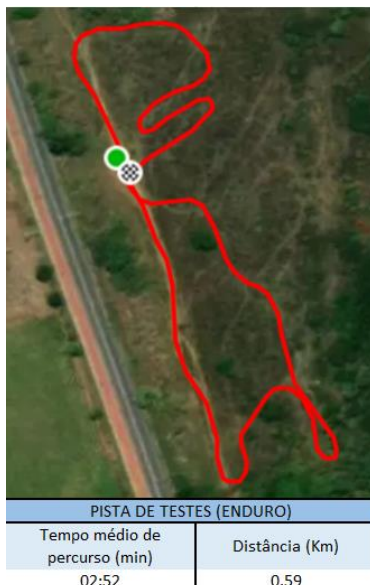


Figura 11. Traçado de uso contínuo (enduro) mapeado em GPS. Fonte: Autor (2023).

A obtenção de carregamentos dinâmicos por meio de sinais ou blocos de durabilidade faz-se

fundamental para o projeto de componentes confiáveis e otimizados [14].

3. Resultados

3.1. Dados de Pista

Após a aquisição dos dados dinâmicos retirados em pista de testes e a obtenção de um bloco de carregamentos (N) específico para o traçado feito (Figura 11), foi feito o tratamento dos sinais com auxílio do software MatLab, onde foi filtrado os sinais e retirados os gráficos (newton x segundos) de cada canal (representados pelas letras C1, C2, Cn) do módulo de maneira individual (Figura 12). Visando garantir a confiabilidade da colagem e comportamento do sensor, todas as relações de deformações em sentidos opostos, geram consequentemente esforços em sentidos opostos, os quais podem ser vistos nas imagens abaixo de maneira conjunta, isto é, canais 1-3; 2-4; 5-7; 6-8; 9-11; 10-12; 14-16; possuem mesma relação de deformação, porém em sentidos opostos, e assim sucessivamente, haja vista a colagem dos *gages* (¼ da ponte de wheatstone).

Além disso, foi criada uma tabela no software Excel a fim de realizar a combinação dos sensores em eixos, a soma dos esforços captados pelos *gages* e a relação entre os mesmos, conforme ilustra a Figura 13.

Além disso, com o carregamento obtido por meio do potenciômetro linear (Figura 6e) instalado nos amortecedores do protótipo, foi possível estimar a carga de reação do amortecedor no tempo por meio da equação de força elástica (Lei de Hooke). A obtenção do coeficiente de rigidez (K) do amortecedor utilizado no protótipo foi retirado de ensaio laboratorial e será omitido do presente trabalho por questões de confidencialidade; porém vale ressaltar que devido ao tipo de amortecedor pneumático utilizado, tal coeficiente varia de maneira não-linear, sendo mais complexo do que o normal para considerar o mesmo como uma mola convencional, o que foge da temática do presente trabalho. Além disso, a instrumentação dos amortecedores tem intuito de obter o deslocamento da suspensão para posterior análise de fadiga em futuros trabalhos.

$$F = K * x \quad (12)$$

Onde:

F: força de absorção de energia do amortecedor (N)

K: constante elástica da mola (N/m)

x: deslocamento do curso do amortecedor (m)

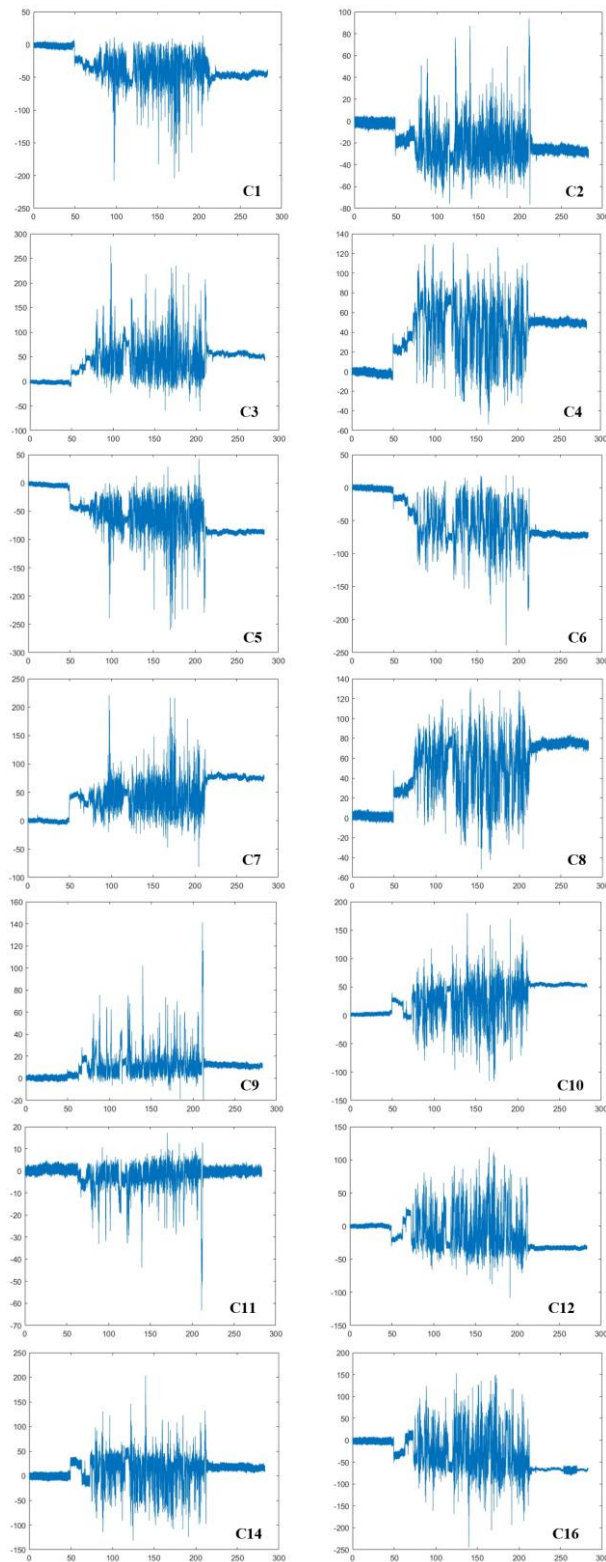


Figura 12. Sinais de cargas dinâmicas captadas por cada extensômetro colado nas bandejas de suspensão na pista de enduro. Fonte: Autor (2024).

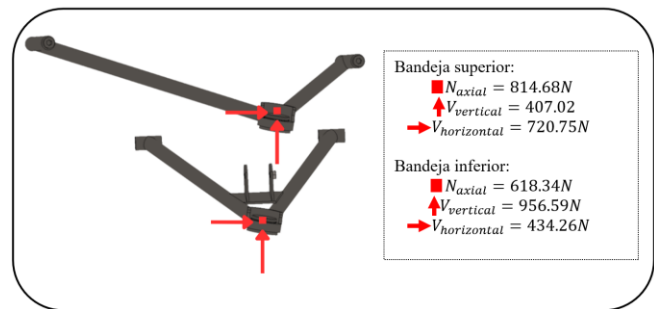


Figura 13. Combinação dos dados de força captados por cada sensor. Fonte: Autor (2024).

Dessa forma, tem-se os resultados de carregamento (N) pelo tempo (s) da carga absorvida pelo amortecedor, durante a passagem do protótipo em pista de testes, ilustrado pela Figura 14a seguir. A máxima força absorvida pelo amortecedor nessas condições, obtida por essa relação, foi de 1055.86N.

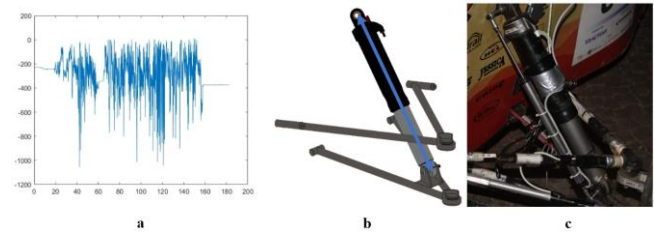


Figura 14. Sinais de carga (N) pelo tempo (s) obtidas pelo potenciômetro linear (a); CAD ilustrativo das bandejas e o local de aplicação do potenciômetro indicado por uma seta (b); Montagem física para testes do sistema (c). Fonte: Autor (2024).

3.2. Dados de Drop Test

De maneira a comparar a precisão dos dados físicos dinâmicos captados em pista de teste, tem-se a seguir a comparação entre um drop-test feito à 1.5m de altura no software Adams View com o drop-test real realizado na Universidade.

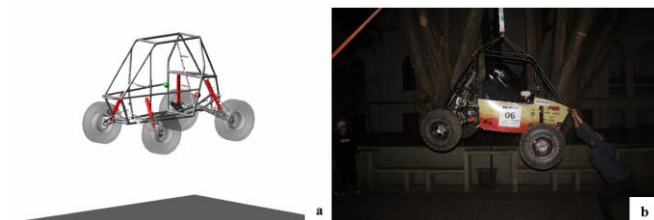


Figura 15. Protótipo à 1.5m no software Adams View para drop test virtual (a); Protótipo sendo levantado à 1.5m para o drop test físico na Universidade. Fonte: Autor (2023)

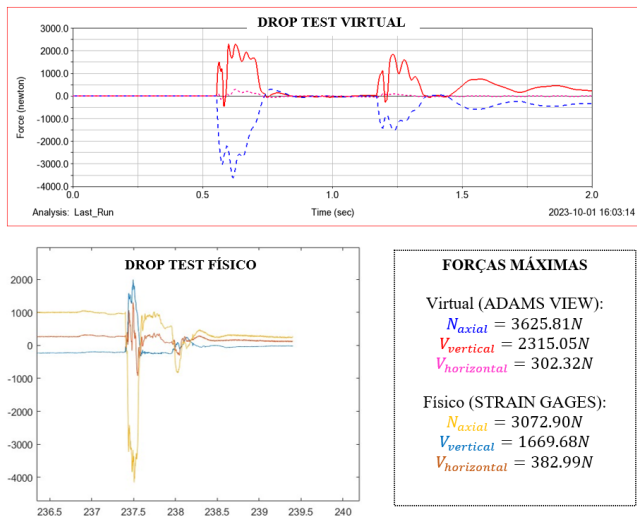


Figura 16. Ilustração e comparação entre resultados obtidos no drop test virtual e real. Fonte: Autor (2023).

Exposto na Figura 16 pelo drop test físico realizado com os *gages*, quando o protótipo estava pendurado, há uma tensão inicial, principalmente na força axial, que ocorreu devido à não consideração do peso próprio do protótipo e piloto antes de zerar os sensores com o carro em deflexão estática, isto é, parado em piso plano; o mesmo acontece com as outras componentes de maneira menos significativa. Além disso, o eixo horizontal possui valores altos de tempo (s) devido ao tempo transcorrido de guardar o laptop e o módulo dentro de uma mochila pendurada no peito do piloto, erguer o veículo à 1.5m e segura-lo livre ao ar até o equilíbrio deste. Entretanto, os dados de interesse são obtidos em menos de 1 segundo que é o tempo de queda do protótipo conforme ilustrado pelos picos de forças na referida figura.

Dessa forma, se compararmos os resultados obtidos entre o drop test virtual pelo software ADAMS VIEW e o drop test físico realizado pelos membros do setor de cálculo estrutural da equipe, tem-se uma estimativa de acerto de aproximadamente 82%, valor aceitável segundo trabalhos já realizados nessa área, tal como [5, 13].

4. Conclusão

- *Strain Gages* são sensores de alta sensibilidade e precisão, possibilitando a obtenção de resultados de qualidade, haja vista a proximidade dos valores quando se compara o drop test real com o virtual.
- Os resultados dos esforços registrados têm demonstrado satisfatoriedade, o que é corroborado

por experimentos anteriores realizados em outros trabalhos, conforme mencionado no texto.

- Devido à complexidade geométrica dos componentes da parte traseira do protótipo, a aplicação de extensômetros (*strain gages*) em seções tubulares, conforme descrito no presente estudo, não permitiu a obtenção de dados da suspensão traseira por *strain gages*, porém foi possível captar dados de amortecimento pelo potenciômetro linear.
- Sugere-se como trabalho futuro a utilização de extensômetros para análise de regiões soldadas, haja vista sua importância em protótipos tipo *baja*.

5. Agradecimentos

Discorre-se por meio deste trabalho os mais sinceros agradecimentos à empresa brasileira LYNX TECNOLOGIA, a qual permitiu que todo o estudo e desenvolvimento de tal temática se tornasse possível por meio do fornecimento de equipamentos e suporte técnico.

À Equipe KomiKeto Baja pela oportunidade de desenvolver tal trabalho.

À Universidade Federal de São João del Rei.

Referências

- [1] Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi. (n.d.). Strain Measure by Using Strain Gages. www.aybu.edu.tr. https://www.aybu.edu.tr/bolumroot/contents/muhendislik_makina/files/STRAIN%20MEASUREMENT%20BY%20USING%20STRAIN%20GAUGE.pdf
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM-ISO 7500-1:2004: Materiais metálicos – Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial – Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão – Calibração do sistema de medição da força. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [3] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., & Lienhard, J. H. (1993). Mechanical Measurements. Prentice Hall.
- [4] Carneiro, G. C. (2019). Desenvolvimento de metodologia para otimização dinâmica e estrutural de suspensão veicular traseira do tipo eixo de torção. Repositorio.ufmg.br. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/34906>
- [5] Cunningham, M. (2019). Finite Element Model Validation and Testing of an Off-Road Vehicle under Dynamic Loading Conditions. Doctoral Dissertations and Master's Theses. <https://commons.erau.edu/edt/444/>
- [6] English, & Hoffmann, K. (n.d.). HBM Publication Practical Hints for the Installation of Strain Gages. <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s1421.pdf>

- [7] Gillespie, T. D. (2021). Fundamentals of vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers.
- [] Hibbeler, R. C. (2010). Resistência dos materiais. Pearson Education Do Brasil.
- [8] HOFFMANN, K. (n.d.). https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/files/books/hoffmann-book/HBM_Karl-Hoffmann_An-Introduction-to-Stress-Analysis-using-Strain-Gauges.pdf
- [9] Lee, Y.-L., Pan, J., Hathaway, R., & Barkey, M. (2011). *Fatigue Testing and Analysis*. Elsevier.
- [10] Lynx Tecnologia. (n.d.). [Www.lynxtec.com.br/](https://www.lynxtec.com.br/)
- [11] Norton, R. L. (2011). Machine design: an integrated approach. Prentice Hall.
- [12] PEREIRA, Luiz Felipe Moraes. Aplicação de extensometria a suspensão de protótipo de fórmula SAE com auxílio de análise por elementos finitos. 2019. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- [13] Roy, N., Scheiblegger, C., Darling, J., & Pfeffer, P. (2017). Durability Loads Prediction of Body-on-Frame Vehicles using Full Vehicle Simulations. SAE International Journal of Passenger Cars. Mechanical Systems, 10(1), 13–24. <https://doi.org/10.4271/2017-01-9675>
- [14] Spinelli, M. (2012). Full Vehicle Durability Simulation: Load prediction of a complete durability schedule. Vehicle Dynamics Expo, Stuttgart.