

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA E MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DE TENSÃO MECÂNICA EM
CHASSI DE VEÍCULO EM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

por

Juliano Bozzetto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

SIMULAÇÃO NUMÉRICA E MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DE TENSÃO MECÂNICA EM
CHASSI DE VEÍCULO EM CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

por

Juliano Bozzetto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Herbert Gomes Martins

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Dr^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 16 de novembro de 2016

DEDICATÓRIA

À todos aqueles que têm esperança e acreditam neste país.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de tomar as minhas decisões.

aos meus pais Cláudio e Odete por me orientarem no caminho do conhecimento e à fundamental base familiar que me proporcionaram nesta jornada.

aos meus irmãos Cassiano e Tatiana e seus pares Helen e Rodrigo, respectivamente, por fazerem parte da minha formação.

à minha namorada Gisele pelo companheirismo.

ao meu professor orientador Herbert por me apoiar neste trabalho.

aos senhores engenheiros Felipe Luckow, Felipe Iglesias e Emerson Dewes, integrantes da Bomag Marini, por terem permitido as ações de medição na usina de asfalto.

*“Quando te perguntarem se consegue fazer algo.
Diga que sim mesmo que não saiba.
Aprenda, dê o seu melhor, que dará certo”*

Juliano Bozzetto

BOZZETTO, J. “**Simulação numérica e medição experimental de tensão mecânica em chassi de veículo em condições de operação**”. 2016 . 15 folhas. Monografia (trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

Os equipamentos utilizados para pavimentação de rodovias e estradas são constituídos por diversos modelos de veículos ou implementos desde rolos compactadores, vibro acabadoras, usinas misturadoras a frio, fresadoras, tanques, aspersoras, tratores, usinas de asfalto entre outros. Estas últimas, as usinas de asfalto, fabricadas na empresa Bomag Marini Equipamentos Ltda, com todos os componentes da usina montados sobre um chassi com vigas estruturais, para rodar em rodovias nacionais e internacionais até o cliente, sendo então estacionada, e alterada as condições de apoio para entrar em operação adotando outra condição de contorno, ou seja, o chassi é rebocado com o auxílio de um cavalo trator e para entrar em operação de fabricação de asfalto são adicionados apoios adicionais devido o incremento de carga. Com o objetivo de validar modificações no projeto estrutural feitas no chassi, este trabalho implementa a instrumentação com extensômetros de resistência elétrica *strain gages* a fim de avaliar tensões e deformações em pontos críticos do chassi, tanto numa condição estática, com o incremento dos componentes da usina no chassi, quanto numa condição dinâmica em que o sistema se encontra em trânsito. Os resultados das medições estáticas são comparados com um modelo numérico em elementos finitos, o qual é usado para estimativas futuras do comportamento quanto à fadiga nas condições de deslocamento em grandes distâncias. Nas medições dinâmicas pode-se observar modos de vibração do chassi, sendo possível comparar com a simulação numérica a exatidão das informações obtidas pelo sistema de medição, bem como a variação de tensão, para um determinado percurso, ao longo do tempo. A instrumentação baseou-se na plataforma aberta Arduino a qual possibilitou a medição de deformações com o uso dos extensômetros de forma simples, portátil e independente. O trabalho indica como o sistema foi construído, seus componentes e suas características, bem como a incerteza associada. Medições ao longo do tempo de deformações em um ponto crítico, e por conseguinte tensão mecânica, do chassi da usina de asfalto é analisado e comentado assim como a correlação com o modelo de elementos finitos no caso estático. Conclui-se que a instrumentação atendeu aos requisitos mínimos para um sistema que pretenda monitorar tensões mecânicas estando as tensões medidas em ordens de grandezas consideradas seguras para o equipamento.

PALAVRAS-CHAVE: chassi, tensões mecânicas, extensômetro, Arduino, elementos finitos.

BOZZETTO, J. “**Numerical simulations and experimental measurements of mechanical stress on chassis in operating conditions**”. 2016. 15 folhas. Monografia (trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

Equipment used for paving highways and roads are varied consisting of many vehicles or implements from rollers, pavers, mixing plants cold, cold planers, tanks, sprinkler, bulldozers, asphalt plants among others. The latter, asphalt plants the manufactured the Bomag Marini Equipment Ltda, with all plant components mounted on a chassis with structural beams, to run in national and international highways to the customer, and then parked and amended conditions support to start operations by adopting another boundary condition. In order to validate changes in structural design made to the chassis, this work implements the instrumentation with strain gages of electrical strain gages resistance to evaluate stress and strain at critical points of the chassis, both in a static condition, with the increase of plant components the chassis, as a dynamic condition in which the system is in transit. The results of static measurements are compared with a numerical finite element model, which is used to estimate the future behavior and fatigue conditions in displacement over large distances. In the dynamic measurements, one could notice chassis vibration modes, such that it was possible to compare numerical simulation accuracy of the information obtained by the measurement system, as well as stress variation, for a given route, along time. The instrumentation was based on the Arduino open platform which enabled the measurement of deformations with the use of strain gages of simple, portable and independently. The work shows how the system was built, its components and its characteristics as well as the associated uncertainty. Measurements over time of deformation, thus the mechanical stress, at a critical point of the asphalt plant chassis is analyzed and discussed as well as the correlation with the finite element models in the static case. It is concluded that the instrumentation has met the minimum requirements for a system that proposes to monitor mechanical stresses, being the magnitude of the measured stress considered safe for the equipment.

KEYWORDS: chassis, mechanical stress, strain gage, Arduino, finite element.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de medição utilizado e posicionamento no chassi da usina de asfalto (a) parte externa e (b) parte interna.	3
Figura 2- (a) Ponte de Wheatstone simples e (b) com resistor de Shunt.	5
Figura 3 - (a) Deformação experimental medida para resistor de shunt e (b) deformação experimental para carga de 5,3kgf.	7
Figura 4 – Posição de colagem do <i>strain gage</i>	8
Figura 5 – (a) Chassi em fase de montagem e (b) lastros para ensaios dinâmicos.	9
Figura 6 – Adequação do modelo em elementos finitos: (a) original, (b) simplificado.	10
Figura 7 – Detalhe do modelo discretizado.	11
Figura 8 – Comparativo de tensões experimentais e numéricas.	12
Figura 9 – Histórico de tensões e PSD para situação saindo para carregar com lastros.	13
Figura 10 – Histórico de tensões e PSD para deslocamento da usina até o autódromo.	13
Figura 11 – Histórico de tensões e PSD para deslocamento do autódromo até o local de descarregamento dos lastros.	14
Figura A1 – Especificações técnicas do módulo HX711(Ponte de Wheatstone).....	16
Figura A2 – Especificações técnicas do Arduino UNO (Nussey, 2013).	16
Figura A3 – Elemento finito Shell 181 do Ansys (adequado a placas finas a moderadamente espessas, 6GDL por nó).....	17
Figura A4 –Tensões no ponto de interesse em cada estágio de montagem da Usina. (a) Simulação 1, (b) Simulação 2, (c) Simulação 3.	18
Figura A5 – Célula de carga uniaxial com Ponte de Wheatstone e ensaio com carga aplicada para validação da deformação medida e sistema HX711.	18
Figura A6 – Primeira frequência natural do chassi obtida numericamente (Modo de flexão vertical).	19
Figura A7 – Visualização do chassi da usina em estudo.	19
Figura A8 – Campo de tensões normais na direção longitudinal (direção x, carregamento estático).	19
Figura A9 – Condições de contorno adotadas no modelo.	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de resistência de <i>shunt</i> de calibração para SG de 120 Ω e 350 Ω para deformações virtuais equivalentes desejadas.	7
Tabela 2 – Sequência de carregamentos	8
Tabela 3 – Valores de tensão normal longitudinal medidas numericamente.....	9
Tabela 4 – Propriedades dos materiais.	11

ÍNDICE	Pág.
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
ÍNDICE	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. METODOLOGIA	3
3.1 Equipamento utilizado	3
3.2 O micro controlador Arduino	3
3.3 Módulo gravador de dados e relógio em tempo real	4
3.4 O módulo HX711 (Ponte de Wheatstone)	4
4. EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA	4
4.1 Elemento sensor <i>strain gage</i>	4
4.2 Ponte de Wheatstone	5
4.3 Calibração	6
4.3.1 Instalação dos sensores no Chassi	7
4.3.2 Avaliação dos resultados numéricos estáticos	8
5. ESTRUTURA DO CHASSI	9
5.1 Componentes da usina	9
5.2 Análise por elementos finitos	10
5.2.1 Projeto e detalhamento do chassi	10
5.2.2 Material utilizado e processo envolvido	10
5.2.3 Modelo discretizado	11
5.2.4 Condições de contorno	11
6. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	12
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
ANEXOS	16
APÊNDICES	18

1. INTRODUÇÃO

O objeto de estudo deste trabalho são as estruturas metálicas constituintes das usinas de asfalto. Estas usinas de asfalto são equipamentos montados sobre vigas estruturais com a função de serem deslocadas até o local de operação. Esta estrutura deve atender a legislação brasileira de trânsito e de outros países para trafegar legalmente nas estradas.

A análise estrutural destes equipamentos é fundamental para manter a integridade estrutural nas condições de transporte e operação, pois em ambas haverá diferentes condições de contorno alterando o campo de tensões e deformações na estrutura. O estudo realizado para a fabricação destes equipamentos evidencia valores para as condições de contorno em operação e montagem, entretanto os carregamentos a que a estrutura está sujeita na condição de transporte geralmente não é verificada com o auxílio de softwares de análise numérica.

Para efetuar as medidas de deformação, foi utilizado a plataforma aberta Arduino (Nussey, 2013) para obtenção das medições com *strain gages* colados à estrutura em local crítico por análise prévia em elementos finitos. As informações provenientes das simulações numéricas e também das medições foram comparadas para verificar a conformidade das simulações e tomadas de decisão que se baseiam nos resultados do método utilizado para avaliar os carregamentos e a estrutura em condição estática. Outras medições foram efetuadas para avaliar o comportamento da estrutura para o caso de transporte onde às condições de contorno tornam-se diferentes, submetendo o equipamento a variadas condições afetadas por diversas variáveis como irregularidades na pista, curvas, frenagens e acelerações, rigidez de suspensão, processo de fabricação e danos à estrutura devido a montagem. Estas variáveis contribuem para gerar variações no campo de tensões mecânicas gerando informações para estudos futuros de fadiga na condição do implemento rodoviário trafegar por longas distâncias.

1.1 Motivação

A instrumentação de chassi de veículos exige equipamentos de custo elevado e na maioria das vezes não são portáteis. A verificação e comparação de reprojatos feitos nos chassis de veículos é importante para assegurar que as hipóteses assumidas estão em acordo com o que é obtido experimentalmente. O monitoramento das tensões principais e deformações principais possibilita a análise quanto à fadiga das peças instrumentadas.

1.2 Objetivos

Neste trabalho a análise estrutural das usinas de asfalto faz-se com o auxílio do software comercial *Ansys Mechanical* (Ansys, 2016), assim, muitas decisões de alterar a estrutura bem como modificar as condições de contorno foram tomadas sem a validação experimental do modelo numérico. Com isso, um método que permita a leitura de tensão mecânica por meio de *strain gages* colados à estrutura e realizando leituras com o auxílio da plataforma aberta Arduino (micro controlador) (Nussey, 2013) será verificado quanto à sua adequabilidade nas medições. O projeto, assim como avaliação de suas características referentes às incertezas associadas, é parte dos objetivos pois o sistema deverá fornecer informações que sejam relevantes e válidas para comparações.

As medições das tensões no chassi da usina de asfalto são realizadas em duas ocasiões: com o equipamento em montagem na fábrica e com o equipamento em deslocamento da fábrica até o local onde será instalado. Ambas possuem condições de contorno distintas e foram necessárias para avaliar o comportamento da estrutura quando comparada às simulações de caráter estático.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de aparentemente trabalhosa e dispendiosa, a instrumentação de peças e equipamentos rodoviários é uma atividade bastante comum na indústria. O principal objetivo é de sempre comprovar dados obtidos com modelos numéricos sobre o comportamento

estrutural de uma peça ou parte do veículo assim como em outros casos de verificar informações sobre tensões e deformações principais em peças e equipamentos que retornam com algum defeito ou falha sobre condição de uso e que não foi previsto com um modelo de elementos finitos. Quando da criação de protótipos e modificações de projetos antigos, a instrumentação com *strain gages* assim como acelerômetro também são empregados com o objetivo de assegurar que os projetos continuarão com o mesmo ou até melhor desempenho que os projetos antigos (Kurdi e Rahman, 2007; Dubey e Dwivedi, 1993).

Em geral essa instrumentação é feita por pessoas qualificadas que necessitam conhecer os sensores, modos de operação, além de requerer, geralmente, equipamentos caros que necessitam de treinamento para a sua correta operação e obtenção de resultados fidedignos (Ali, 2008; Agrawal e Razik, 2013).

No trabalho de Karaoglu e Kuralay, 2002, os autores reportam que com auxílio de software de simulação numérica, conseguiram identificar os pontos críticos de um chassi de caminhão e desta forma instrumentar e medir tensões e deformações. Puderam assim propor uma melhor distribuição de tensões com o aumento localizado da espessura de chapas estruturais do veículo. Os resultados foram satisfatórios visto que uma grande economia de material e melhoria da vida em fadiga da estrutura foi obtida.

Asker *et al.*, 2012, propuseram uma análise experimental estática e uma análise dinâmica de uma estrutura de um chassi. Foram realizados dois diferentes testes com um veículo de forma que realizaram movimentos de zig-zag passando uma roda no primeiro teste e no segundo as duas por sobre obstáculos em desnível de pista. Com estas análises foram observadas as condições mais críticas num estudo de torção. Os resultados das medições do trabalho foram comparados com a análise dinâmica em elementos finitos utilizando parâmetros e condições de contorno semelhantes ao efetuado no experimento e com as análises pode-se observar que a pior condição obtida foi a de apenas uma roda com desnível de pista, a qual causou o maior deformações e torções na estrutura.

Moaz *et al.*, 2014, revisaram um estudo, utilizando elementos finitos, para obter os pontos críticos da estrutura de um chassi e avaliar a vida em fadiga do componente de forma semelhante a que fez Patil *et al.*, 2013. Neste artigo foram citados três métodos para comparar o campo de tensões, sendo eles a Tensão Principal, a Máxima tensão de cisalhamento e a tensão de von Mises.

Bocciolone *et al.*, 2005, propõem um sistema de ensaios para avaliar tanto estaticamente quanto dinamicamente chassis de quadros de motocicletas. Ensaio dinâmico para avaliar modos de vibração, amortecimento, frequências naturais e funções de resposta em frequência são realizados assim como testes estáticos nos quais avaliam-se as rigidezes e tensões presentes em diversas configurações de carregamento. Os resultados de medição são comparados e validados com um modelo de elementos finitos utilizando elementos tetraédricos, entretanto diferenças significativas são observadas nas frequências naturais medidas e aquelas previstas.

Uma análise experimental de tensões em barras de um manipulador 3-PRR foi feita por Chaitanya *et al.*, 2014, onde as tensões principais biaxiais e tensão máxima de cisalhamento são avaliadas. Rosetas de *strain gages* são instaladas nas barras do manipulador e condicionadores de sinais de instrumentação simples e de baixo custo (INA125U) são utilizados para montar as Pontes de Wheatstone. As aquisições de dados são feitas com um Arduino Uno (Nusse, 2013). Critérios de instalação assim como amplificação dos sinais dos *strain gages* baseados em normas são usados para assegurar a acurácia dos resultados e o critério de von Mises é tomado como critério para a falha. Boa correlação entre as tensões experimentais para uma carga de 12 kg aplicada ao manipulador e aquelas obtidas com simulação usando o software Ansys (Ansys, 2016) indicam que a instrumentação é válida e fornece resultados confiáveis.

3. METODOLOGIA

O chassi de usina é o equipamento completo, montado com todos os equipamentos necessários para o funcionamento da usina que processa asfalto funcionar adequadamente. Estudos numéricos analisando a integridade estrutural do chassi foram realizados para garantir que as mudanças na estrutura fossem realizadas com responsabilidade.

As tensões no chassi de usina foram obtidas através do método de elementos finitos com o auxílio do software Ansys Mechanical (Ansys, 2016). Para a verificação das tensões, o chassi foi instrumentado com *strain-gages* em um ponto de interesse e avaliado o campo de tensões durante a montagem (inserção dos componentes nas vigas estruturais) e na condição de transporte. A técnica utilizada para a obtenção das medições foi com o auxílio do micro controlador Arduino, que é uma plataforma aberta de prototipagem de sistemas micro controlados.

3.1 Equipamento utilizado

Os equipamentos necessários para a medição de tensão mecânica no chassi de usina foram ajustados e modificados para este fim por meio da modificação da programação e da posterior calibração (antes dos testes) para a confirmação das leituras obtidas nas medições. Na linha de comando da programação do micro controlador foram ajustadas algumas particularidades como a frequência de amostragem de dados, o registro no tempo das medições em memória flash assim como a marcação da data e hora em que as sessões de medição foram feitas.

Para isto a utilização dos componentes gerou um planejamento logístico para que fosse possível deslocar a estrutura e medir as tensões mecânicas sem ocorrer danos materiais aos equipamentos e não comprometer as informações obtidas. O Arduino foi programado com o auxílio de um computador pessoal e após isto operou independentemente com o auxílio de baterias.

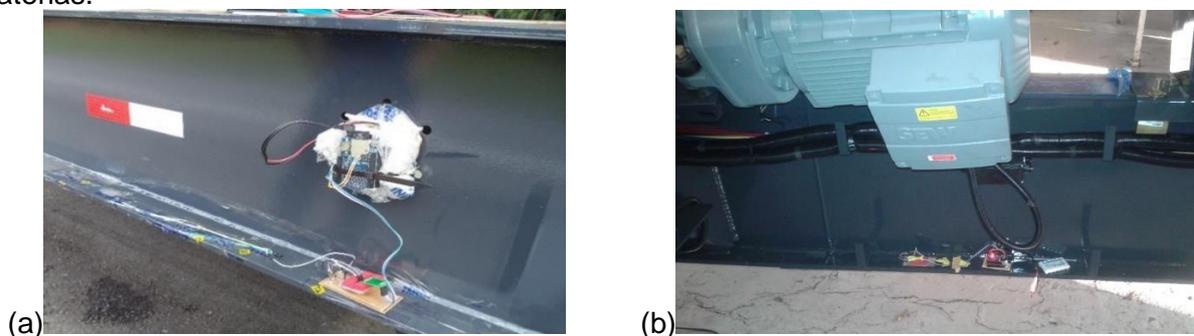


Figura 1 – Sistema de medição utilizado e posicionamento no chassi da usina de asfalto (a) parte externa e (b) parte interna.

3.2 O micro controlador Arduino

O Arduino pode ser definido como uma placa para criação de protótipos eletrônicos independentes do computador, podendo ser ligados a uma fonte externa e servindo como um micro controlador com suporte de entrada e saída e uma linguagem de programação padrão a qual tem origem em Wiring (C/C++). A plataforma de desenvolvimento do Arduino é composta de dois componentes principais, hardware e software. O hardware é a plataforma e o software é executado no computador para inserção de códigos a serem executados.

No desenvolvimento do projeto o Arduino pode ser conectado diretamente a um computador, para ser compilado o código de execução, entretanto, é desnecessário a utilização deste para a manutenção e utilização da placa de Arduino o qual pode ser alimentado com uma fonte externa para a sua utilização. Neste trabalho foi utilizado o Arduino modelo UNO que possui características de conversor de 12 bits para entradas de 0-5V, microprocessador ATmega328P de 16 MHz. Ele dispõe de 14 pinos digitais de entrada/saída

(dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, a conexão USB, um *plug* de entrada de energia (7-12V) e um botão de reset. Seu peso é de aproximadamente 25 g. Seu custo é muito baixo e sua plataforma é em código aberto o que o torna extremamente atraente quando em comparação com sistemas conversores A/D comerciais equivalentes.

3.3 Módulo gravador de dados e relógio em tempo real

Para que fosse possível fazer um comparativo das medições foi necessário armazenar as informações provenientes das medições, com isso foi utilizada uma placa para armazenamento de dados anexada à placa do Arduino contando com uma memória flash de 4GB de espaço para a gravação. Todas as medições eram gravadas em arquivo texto para posterior gerenciamento em planilha Excel. O módulo usado é baseado no chip DS1307, que possui um controle preciso de tempo, podendo funcionar como relógio e calendário. A grande vantagem de usar esse RTC para controlar o tempo é que se precisa configurar a data/hora atual apenas uma vez, e para medições posteriores ele controlará automaticamente o incremento dos segundos, minutos, horas, dias, meses e ano. O módulo também possui uma bateria CR2032 que permite que o DS1307 continue funcionando por anos mesmo quando for cortada a fonte de alimentação primária. A placa possui um slot para cartões SD (memória *flash*).

3.4 O módulo HX711 (Ponte de Wheatstone)

O módulo conversor e amplificador utilizado é o HX711 de 24 bits que é utilizado para amplificar sinais de dispositivos como células de carga baseados em *strain gages*, fazendo a interligação entre essas células e sensores com o micro controlador. Este módulo é bastante utilizado em células de cargas e balanças, mas aqui será utilizado como Ponte de Wheatstone amplificada. Neste trabalho usou-se a alimentação da ponte Wheatstone em 5V. Os limites de operação em temperatura do módulo são entre -20°C a 85°C, estando, portanto, adequado para os limites que estará exposto quando instalado no chassi. O ganho selecionável do módulo é de 32,64 e 128 vezes, sendo este último ganho o utilizado no projeto. As tensões de entrada do conversor A/D interno ao módulo são de ± 20 mV no caso de ganho de 128 vezes. A taxa máxima de envio de dados (conversão A/D) do módulo pode ser de 10 Hz ou 80Hz selecionável pelo pino #15 que neste trabalho foi selecionado para 80 Hz (nível alto no pino 15). Neste sentido cabe ressaltar que em operações em veículos os níveis de variação das tensões usualmente não passam da ordem de 30 Hz, estando, portanto, a taxa de 80 Hz adequada, segundo o critério de Nyquist, para a correta aquisição dos dados.

4. EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A técnica utilizada na análise experimental da estrutura do chassi de usina é chamada de extensometria caracterizada por verificar deformações em estruturas por meio de sensores. Estes sensores elétricos são instalados na estrutura sem que haja a destruição da mesma na região de análise. Alguns fatores devem ser relevantes na análise da estrutura como o tipo de sensor, a posição de montagem, a diferença de temperatura entre os sensores e a estrutura que está sendo medida.

4.1 Elemento sensor *strain gage*

Os extensômetros elétricos de resistência elétrica são transdutores resistivos os quais variam sua resistência linearmente com a deformação a que são submetidos por estarem colados a elementos que sofrem deformações mecânicas. Fisicamente os *strain gage* são sensores que contêm um resistor composto de uma finíssima camada de material condutor. As variações de dimensões da estrutura são transmitidas mecanicamente ao *strain gage*, que transforma essas variações em variações equivalentes de sua resistência elétrica, sendo assim definidos como transdutores. Eles são usados para medir variações de diversos componentes

e tipos como pressão, tensão, compressão. Assim, para a seleção devem ser observados alguns pontos como: material da grade metálica, material da superfície que está sendo ensaiado, material do adesivo. Quanto à sua forma, ele tem funções e características diferentes tais como: fator de medição, resistividade, entre outros. A sensibilidade à temperatura é um fator que também deve ser levado em conta visto que deformações diferidas podem atrapalhar as medições assim como circuitos que compensem eventuais deformações por dilatação das peças analisadas. A equação geral que relaciona a deformação sofrida pelo *strain gage* com sua sensibilidade elétrica e variação de resistência vem dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R / R}{k} \quad (4.1)$$

onde ε é a deformação na direção da grade do *strain gage*, ΔR é a variação de resistência em função da deformação, R a resistência elétrica inicial e k a sensibilidade (em geral próximo a 2,0) função do material de que é feito o *strain gage*.

4.2 Ponte de Wheatstone

Segundo Beckwith *et al.*, 2006, a ponte de Wheatstone é um dos primeiros circuitos empregados para medir a variação de resistência em um *strain gage* baseando-se no “princípio nulo” de instrumentação usado para medir grandezas. Pelo fato das deformações medidas serem pequenas é possível identificar de maneira mais fácil a deformação através da ligação conhecida como uma ponte de Wheatstone, na qual uma tensão elétrica de excitação é fornecida a um sistema de ponte e o desbalanceamento elétrico de saída da mesma lido. Como pode ser observada na Figura 2(a), a ponte de Wheatstone é composta de uma fonte elétrica de excitação (V), dois braços com duas resistências elétricas cada e pontos de medição de desbalanceamento elétrico de saída (E). O circuito básico da ponte de Wheatstone contém quatro *strain gages*, uma fonte de alimentação DC e um leitor de tensões elétricas como mostra a Figura 2(a). Esta ponte é alimentada pelos pontos C e D pela tensão V e o sinal de saída E é obtido nos terminais A e B.

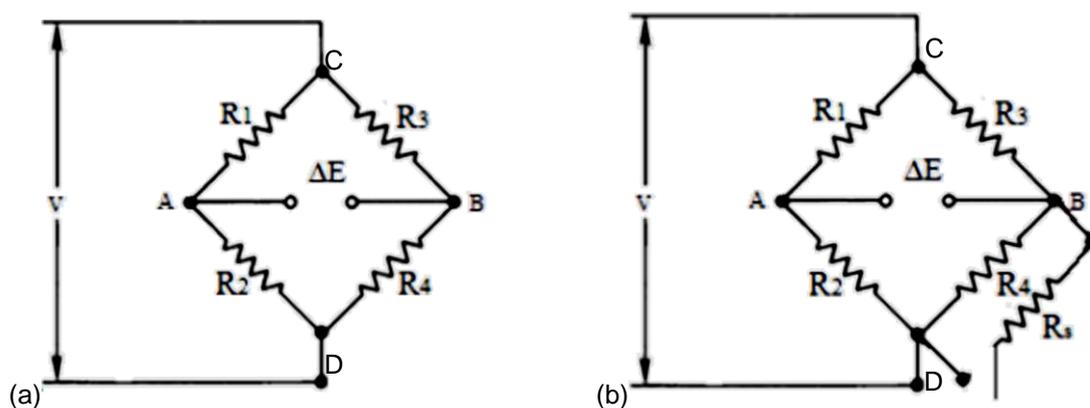


Figura 2- (a) Ponte de Wheatstone simples e (b) com resistor de Shunt.

A ponte de Wheatstone funciona com uma diferença de potencial (ddp) V_i aplicada entre dois pontos A e B da Figura 2(a), a ddp é dividida para os dois braços R_1, R_4 e R_2, R_3 . A resistência de cada braço da ponte contribui para o equilíbrio da ponte, e uma ddp pode ser medida entre os pontos A e B do circuito. Assim medidas da ddp na entrada e saída da ponte se relacionam pela equação de equilíbrio. A leitura entre os pontos A e B então será:

$$E = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V \quad (4.2)$$

Se $E = 0$, então, $R_1 R_4 - R_2 R_3 = 0$. Ou seja, nesta condição dos valores das resistências dos *strain gages* a leitura de diferença de tensão lida será zero. Nesta situação, $E = 0$, diz-se que a ponte de Wheatstone está balanceada. Supondo variações diferentes em cada um dos resistores da ponte e usando a equação anterior, chega-se a uma equação do tipo:

$$E + \Delta E = \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) (1+\eta)V \quad (4.3)$$

onde $R_1 / R_2 = R_3 / R_4 = 1/r$ e $\eta = 1 / \{1 + [1+r] / [\Delta R_1 / R_1 + \Delta R_3 / R_3 + r(\Delta R_2 / R_2 + \Delta R_4 / R_4)]\}$.

A equação anterior é altamente não linear, entretanto valor de E pode se tornar não linear e requer o cálculo de diferenças. O valor de E pode se tornar nulo se for balanceada de início. Assumindo $r=1$, ou seja, *strain gages* nominalmente idênticos e os termos de ordem quadrática na equação anterior forem desprezados, chega-se à equação:

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (4.4)$$

onde ΔE é a medida de desbalanceamento elétrico da Ponte de Wheatstone, ε_i $i=1,2,3,4$ é a deformação sofrida por cada uma dos *strain gages* respectivamente. Nesta linearização, assumiu-se $\Delta R_i / R_i \ll 1$ (para pequenas deformações), o que geram erros negligenciáveis inferiores 0,5%. Na instrumentação do chassi foi utilizado um quarto de ponte ativo. Nesta configuração, 3 resistores têm valores fixos de resistência e apenas 1 deles está ativo sofrendo deformações. O sinal nesta configuração será menor que aquele em outras configurações (Ponte completa), porém poderá medir deformações independentes no caso de regiões onde não se sabe qual o campo de deformações (Salink, 2016).

4.3 Calibração

A necessidade de calibração surge frequentemente com o uso da instrumentação com *strain gages*. Há dois métodos para calibração: direto e indireto. Na calibração direta, a peça em que está colado o *strain gage* é submetida a uma deformação conhecida e a leitura é verificada e aferida. No Segundo caso, uma deformação virtual é aplicada ao *strain gage* de forma que se gere um valor de deformação conhecido, entretanto que é "virtual". Seja a ponte de Wheatstone mostrada na Figura 2(b). A equação genérica para a Ponte de Wheatstone vem dada por:

$$\Delta E = \left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_4+R_3} \right) V \quad (4.5)$$

Para pequenas variações em cada um dos resistores a correspondentes deformações pode ser avaliada por:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta R_i / R_i}{k} \quad \text{com } i = 1,2,3,4 \quad (4.6)$$

Assumindo pequenas variações de resistência individuais na equação (1), chega-se à seguinte equação genérica da Ponte de Wheatstone:

$$\Delta E = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) V \quad (4.7)$$

Na Hipótese de que se coloque um resistor de *shunt* em paralelo a um dos 4 *strain gages*, Figura 2(b), o valor de sua resistência diminuirá, gerando uma variação e resistência que resultará numa deformação virtual (Figura 2(b)). Assim:

$$\Delta E = \frac{k}{4} (\varepsilon_4) V \quad (4.8)$$

onde $\varepsilon_4 = \frac{\Delta R_4 / R_4}{k}$ e $\Delta R_4 = \frac{R_4 R_s}{R_4 + R_s} - R_4$.

Desta forma, supondo resistores de 120Ω , $k=2,0$ e uma deformação da ordem de $1000 \mu\text{m/m}$ (*microstrains*), o resistor de *shunt* equivalente será de:

$$R_S = \frac{R_4}{k\varepsilon_4} - R_4 = 59880\Omega \quad (4.9)$$

Com a formulação anterior, pode-se mostrar a Tabela 1 com os resistores de *shunt* para cada deformação virtual desejada.

Tabela 1 – Valores de resistência de *shunt* de calibração para SG de 120Ω e 350Ω para deformações virtuais equivalentes desejadas.

ε [$\mu\text{m}/\text{m}$]	500	1000	2000	3000	4000	5000	10000
SG de 120 Ω	119880	59880	29880	19880	14880	11880	5880
SG de 350 Ω	349650	174650	87150	57983	43400	34650	17150

Para a deformação padrão de 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$, supondo um material do tipo aço estrutural com $E=210$ GPa, a tensão mecânica padrão esperada com o resistor de *shunt* é de 210 MPa.

Para validação da instrumentação, construiu-se uma célula de carga em ponte completa (Stefanescu, 2011), com tubo de aço de diâmetro 25,4 mm, altura 40mm e espessura de 1 mm em aço com $E=186$ GPa e Poisson de 0,29, como indicado abaixo e procedeu-se ao cálculo teórico de deformação para a aplicação de uma carga de 5,30kg (51,94N) (Figura A.5). Pela teoria da resistência dos materiais a deformação teórica deve ser de ($\varepsilon_{\text{teórico}}=3,9$ $\mu\text{m}/\text{m}$, Figura 3(b)). Também para um resistor de shunt de 59880Ω, a deformação virtual teórica esperada e a medida experimentalmente foram praticamente iguais ($\varepsilon_{\text{teórico}}=1000$ $\mu\text{m}/\text{m}$), Figura 3(a).

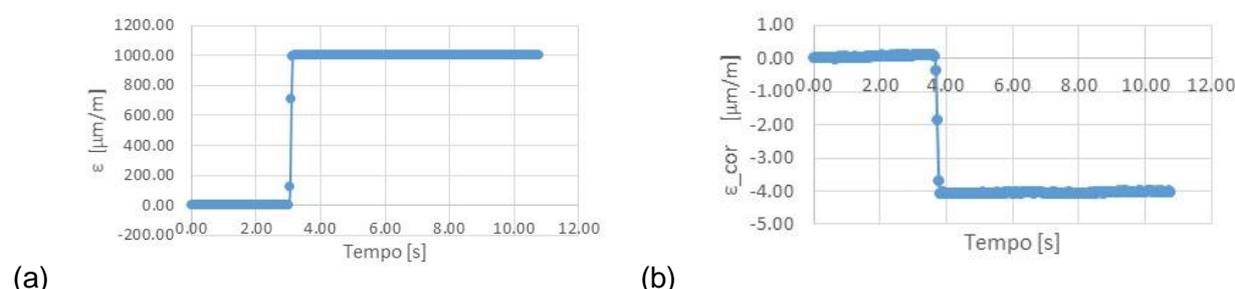


Figura 3 - (a) Deformação experimental medida para resistor de shunt e (b) deformação experimental para carga de 5,3kgf.

Procedendo ao cálculo do desvio padrão obtido na deformação, por exemplo, na colocação da carga de 5,3kgf (51,94N), chega-se ao valor de incerteza de 0,45 MPa (1σ , desvio padrão). Flutuações nos valores de deformação e tensão foram também verificadas nos testes estáticos experimentais e assume-se que possam ser devido a interferências eletromagnéticas ou mesmo sensibilidade à temperatura.

4.3.1 Instalação dos sensores no Chassi

A instrumentação contou com sensores do tipo *strain gages* e resistores comerciais, com resistência elétrica de 120 Ohms (PA-06-125AA-120-LEN, Excel sensores). A variabilidade (ou erro associado) do extensômetro é de $\pm 0,5\%$ e dos resistores é $\pm 1\%$, em termos de medições a incerteza não afetará as medições, desde que o sistema seja balanceado. A análise realizada no chassi foi relacionada ao ponto zero, ou seja, o sensor foi instalado na estrutura indeformada (chassi vazio apenas com o peso próprio).

Os fatores a serem observados na instrumentação do equipamento estão diretamente ligados à incerteza incluída na geração dos resultados das medições como, temperatura, umidade, preparação da região de análise, raio de curvatura, escolha do tamanho do *strain gage* e suas influências com pequenas áreas de medição, cuidados com a posição do sensor na estrutura, tempo de medição para o fato de haver o efeito de resíduo elástico. Frente a estes fatores, incertezas nos valores medidos podem ser somadas se não estiverem sendo

corrigidas ou amenizadas. As medições de ponto zero, em que há incremento de carga, são características por manterem o sensor colado à estrutura por um certo tempo, aumentando as chances de sofrer influências climáticas, mesmo com os cuidados tomados para a proteção do sensor. A umidade do ambiente pode causar o inchaço do *strain gage* ocasionando um shunt da resistência às conexões do sensor, gerando assim, instabilidade nas medições, outro agente causador de incertezas nas medições são os efeitos que a temperatura causa com a expansão diferente para os materiais da grade e do material instrumentado.

Para a compensação da temperatura teriam que ser colados ao menos 2 *strain gages* (preferencialmente 4) de forma que cada um deles estivesse disposto na viga do chassi em tração e compressão, de mesma magnitude, para que fosse possível anular o efeito de temperatura e duplicar o sinal da Ponte, porém, na região de análise da estrutura não é possível assegurar esta simetria de deformações devido à quantidade de carregamentos localizados na viga principal e a distribuição das forças no modelo que podem causar uma certa torção no perfil metálico, dificultando assim as leituras. Sendo assim, apenas 1 *strain gage* ficou ativo com uma configuração de $\frac{1}{4}$ de Ponte de Wheatstone (Beckwith, 2006). As medições, tanto em testes dinâmicos quanto estáticos no chassi foram efetuadas em tempos curtos (menos de 1 hora). Na Figura 4 pode ser observada a posição de colagem do extensômetro na estrutura.

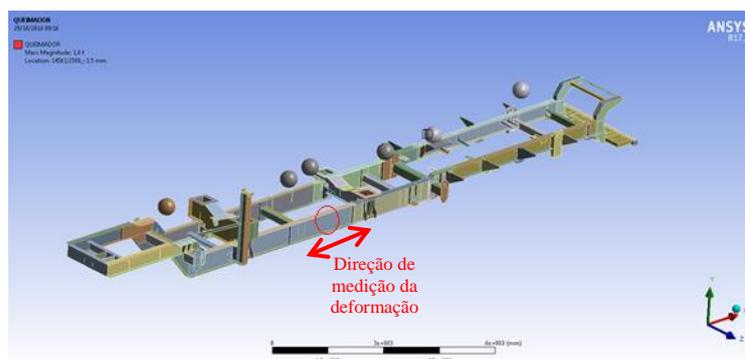


Figura 4 – Posição de colagem do *strain gage*.

4.3.2 Avaliação dos resultados numéricos estáticos

Para o estudo foram realizadas quatro simulações numéricas sem modificar as condições de apoio da estrutura. O primeiro modelo simulado foi do equipamento sem carregamento apenas suportando o peso próprio e utilizada para avaliar o incremento de tensões para os carregamentos subsequentes. Assim o carregamento 1 é o primeiro com incremento de carga com aproximadamente 2800 kgf como mostra a Figura A.4 do apêndice, onde também se verifica a posição de cada componente. Estes procedimentos seguem para o segundo e terceiro carregamento. Na Tabela 2 os valores aproximados de carga dos componentes podem ser observados.

Tabela 2 – Sequência de carregamentos

Simulação 1	Câmara de aspiração + câmara de combustão parcial + Banco de roletes	2800 kgf
Simulação 2	Secador + Banco de roletes + câmara de combustão parcial + câmara de aspiração	12300 kgf
Simulação 3	Secador + Banco de roletes + câmara de combustão + filtro de mangas + elevador	21300 kgf

A tensão mecânica normal, na direção longitudinal da estrutura do chassi, foi monitorada e registrada na análise estática de acordo com o incremento de carga como consequência da montagem do equipamento. Na Tabela 3 podem ser observados os valores de tensão normal

na direção longitudinal final mostrando um comparativo de tensão em relação à situação do chassi descarregada (pequenas tensões devido ao peso próprio do chassi apenas). Pode-se perceber que o coeficiente de segurança para a simulação 3 é de aproximadamente 3,42.

Tabela 3 – Valores de tensão normal longitudinal medidas numericamente.

Carregamento 1	7,6 MPa
Carregamento 2	22,1 MPa
Carregamento 3	73,0 MPa

Desta forma, a aquisição de dados utilizando a plataforma aberta Arduino com sensores *strain gages* satisfazem o modelo simulado em elementos finitos, entretanto muito ruído nas medições pode estar relacionado ao método de aquisição de dados e a forma de conectar os sensores ao sistema de aquisição de dados.

5. ESTRUTURA DO CHASSI

O chassi é o componente estrutural principal da usina pois este é responsável por transportar o equipamento montado, ao qual é intitulado como usina de asfalto, até o local de funcionamento. Este deslocamento é realizado em grande parte por vias terrestres, estando sujeito a variações e irregularidade presentes no tipo de pista ao qual estarão submetidos na condição do equipamento montado.

A estrutura do chassi deve ser dimensionada para restringir grandes deslocamentos do equipamento uma vez que os componentes que constituem a usina de asfalto já estão montados sobre o chassi. Estes deslocamentos devem ser restritos devido ao conceito de funcionalidade do equipamento exigir tolerâncias dimensionais para não restringir o movimento rotativo do componente que realiza a secagem do agregado para assim realizar a mistura com o cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Com isto, alguns cuidados nos estudos utilizando elementos finitos para analisar e modificar a estrutura devem obedecer certas restrições de deslocamento para não afetar a funcionalidade do equipamento em condição de operação em campo.

5.1 Componentes da usina

A usina é composta por elementos que vão sendo inseridos à estrutura durante a operação de montagem, desta forma as condições de carregamento vão alterando visto que os componentes não estão distribuídos uniformemente pela estrutura. Os valores de carga dos componentes diferem entre si de acordo com o tipo de equipamento, sendo que existem diferentes modelos de usinas de acordo com as características técnicas de produção. A sequência de carregamentos, conforme medições, pode ser observada no Apêndice A1, A2, A3. Na Figura 5(a) é possível verificar etapas da operação de montagem do equipamento e na Figura 5(b) os lastros inseridos à estrutura para os testes dinâmicos.

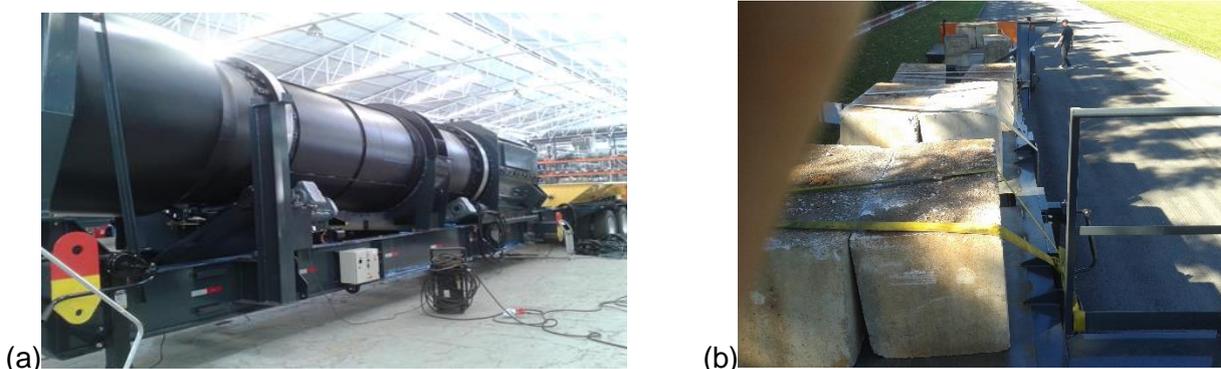


Figura 5 – (a) Chassi em fase de montagem e (b) lastros para ensaios dinâmicos.

5.2 Análise por elementos finitos

A análise numérica das tensões mecânicas foi feita usando o método dos elementos finitos e o software comercial Ansys (Ansys, 2016). Este é o método numérico em que o meio contínuo é dividido em um certo número de elementos os quais passam a representar o domínio contínuo do problema, podendo estes elementos serem triangulares quadriláteros ou tetraédricos. O método propõe que o número infinito de variáveis do sistema contínuo seja substituído por um número limitado de elementos. A conexão entre elementos é chamada de pontos nodais. Em geral, uma boa discretização e quantidade destas conexões e elementos, garante uma melhor aproximação de resultados teóricos analíticos (quando possíveis) para sistemas lineares elásticos bem definidos. Na etapa de pré-processamento do equipamento são observados aspectos relativos a geometria, materiais, condições de contorno e geração da malha (convergência dos resultados para valores estáveis, com o aumento do refino da malha).

5.2.1 Projeto e detalhamento do chassi

A fase de detalhamento da estrutura da usina é realizada pelo software comercial *Inventor* onde são geradas as superfícies em 3D (três dimensões) para fins de verificação de montagem dos componentes e indicação de detalhes de fabricação. O equipamento completo é analisado para observar o posicionamento global dos componentes na estrutura, assim é possível identificar com o sistema de coordenadas a localização do centro de gravidade destes componentes e assim ter uma estimativa da carga que exercem sobre a estrutura.

A análise é feita apenas com o chassi da usina, assim, a preparação deste é realizada de forma a retirar todos os tipos de imperfeições geométricas como indicação de soldas, cantos suavizados e furações que não estejam em locais de análise de tensão. Esta adequação modifica as características originais da estrutura deixando estas regiões com uma rigidez diferente do original. Este efeito está diretamente relacionado com a forma de solução do modelo em elementos finitos onde a matriz de rigidez fornece informações da quantidade de material na estrutura.

Com o auxílio do software comercial *Spaceclaim* do Ansys (Ansys, 2016) foram obtidas as superfícies médias da estrutura, adotando esta forma de analisar a estrutura, o tempo de processamento diminui em função da quantidade de elementos gerados e do tipo de elemento utilizado (Figura 6).

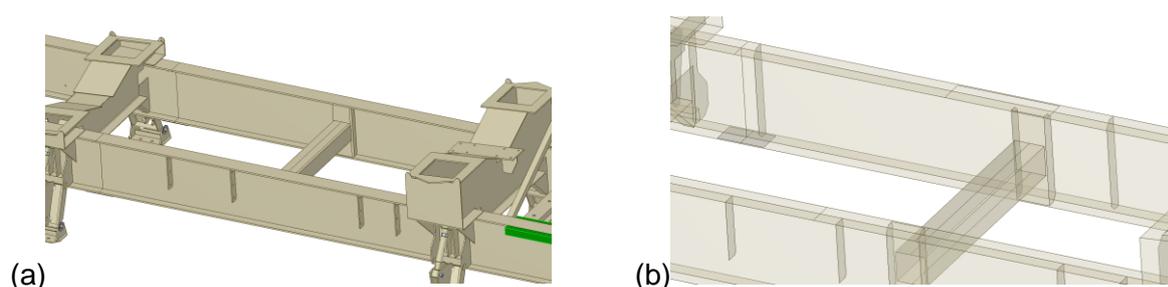


Figura 6 – Adequação do modelo em elementos finitos: (a) original, (b) simplificado.

5.2.2 Material utilizado e processo envolvido

A estrutura do chassi em sua totalidade é construída com aço estrutural e os processos envolvidos para a montagem e fabricação são: Corte de chaparia, dobra e soldagem por arco elétrico. O perfil utilizado na fabricação das vigas estruturais envolve corte e solda, assim há uma certa flexibilidade na modificação das dimensões geométricas e propriedades dos materiais assim como incerteza devido a estes processos de fabricação envolvido. As alterações nas propriedades geralmente não são levadas em conta podendo ser uma fonte de incerteza no comportamento estrutural e, por conseguinte na avaliação das tensões na região

de interesse da viga. Assim, os valores adotados das propriedades do material são os descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades dos materiais.

Módulo de elasticidade	200 GPa
Tensão de escoamento	250 MPa
Tensão limite de ruptura	350 MPa
Coefficiente de Poisson)	0,30 adm

5.2.3 Modelo discretizado

Para a discretização em elementos finitos do equipamento utilizou um modelo de cascas SHELL 181 (elemento para cascas moderadamente espessas, com quatro nós, com seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações) que assume esforços tanto fora do plano quanto no plano médio das peças (Figura A.3). A escolha se baseou no fato das peças terem duas dimensões bem maiores que a terceira (espessura) e ser possível serem solicitadas tanto no plano médio quanto fora dele além do mais o esforço computacional, comparada com um modelo que use elementos tridimensionais fica reduzido. Para uma boa aproximação do modelo foi verificado que a discretização contou com uma quantidade de 195487 nós e 191705 elementos, estes índices são altos e o custo computacional associado pode ser desvantajoso, assim, outras formas de convergência de malha devem ser adotadas como a utilização do sub-modelo para analisar somente a região de interesse.

O software utilizado possui como padrão de contatos pré-estabelecidos sendo utilizados para esta análise o tipo CONTA177 e CONTA175. Este elemento de contato de superfície deformável com segmentos de linhas, assim o contato ocorre quando há tendência à penetração da superfície associada. Outro elemento utilizado para a discretização foi o TARGE170, sendo utilizado para regiões de corpos rígidos. Quando aplicados contatos manuais ao modelo, estes foram do tipo “BONDED” em que todos os movimentos estão restritos.

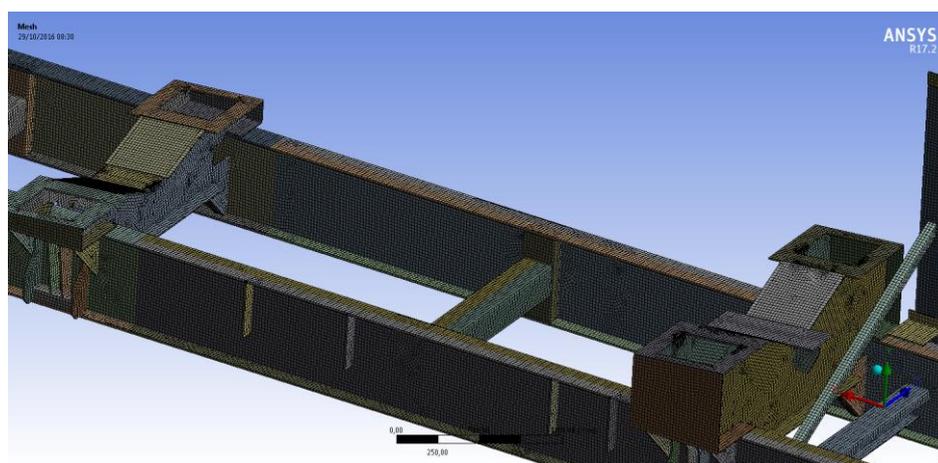


Figura 7 – Detalhe do modelo discretizado.

5.2.4 Condições de contorno

As análises contaram com duas diferentes condições de contorno, a condição estática e dinâmica. Ambas condições estão, na parte traseira do chassi, apoiadas pelo sistema de suspensão, tendo livre a rotação em torno do eixo longitudinal e na direção vertical em que as molas atuam para reduzir a vibração do conjunto. Na condição estática, de operação de montagem do chassi, a restrição do apoio dianteiro foi considerada como um engaste tendo as restrições de rotação e deslocamento. Nesta condição foram obtidas as medições de tensão do

equipamento gradualmente na medida que foram sendo adicionados ao chassi os seus componentes.

A condição dos testes dinâmicos conta com o apoio na região de conexão com o cavalo trator para o deslocamento do equipamento em que estão restritos os movimentos de translação nas três direções e em duas rotações (U_x , U_y , U_z , Rot_x , Rot_z), ficando livre a rotação em torno do eixo y (Rot_y).

6. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Na Figura 8 estão mostrados os comparativos entre tensões estáticas obtidas pelo modelo numérico e as tensões medidas experimentalmente, onde percebe-se que a diferença entre os valores está em torno de 24% para o carregamento 1, em torno de 10% para o carregamento 2 e em torno de 11% para o carregamento 3. Estas diferenças podem estar relacionadas às aproximações de volume das peças, que foram modificadas para facilitar as funções de pré-processamento em Elementos finitos, como a geração de malha, em função do tempo de processamento. Outro aspecto importante a ser salientado é que os valores relativos aos componentes que constituem a usina montada são uma aproximação proveniente do *Software* de detalhamento de projeto.

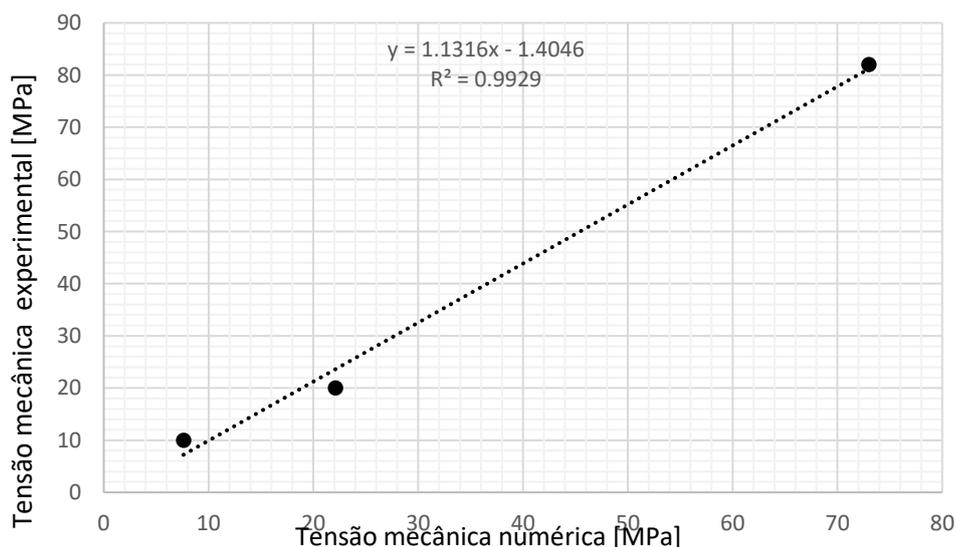


Figura 8 – Comparativo de tensões experimentais e numéricas.

Na Figura 9 se apresenta o histórico de tensões para o ponto no chassi que foi instrumentado para a condição em que a usina se desloca da região do autódromo até o local de carregamento dos lastros de concreto. Estes simulam o peso de alguns componentes do chassi para fins de verificação do sistema de freio ABS. A FFT do sinal de tensão mecânica pode ser calculada e utilizada para avaliar a frequência média existente. Neste trabalho a Densidade Espectral de Potência (PSD) foi utilizada por ser mais adequada para avaliar o conteúdo de frequência do sinal e identificar eventuais modos de vibração. A PSD foi calculada usando o Excel a partir de $PSD[\sigma(t)] = S(\omega)S^*(\omega)$ onde $S(\omega) = \mathcal{F}(\sigma(t))$ e S^* é o correspondente conjugado complexo (Rao, 2009) e está no gráfico da direita da Figura 9.

Percebem-se picos na PSD em torno de 0,4 Hz, 0,5 Hz e 0,7 Hz. As tensões no ponto de medição oscilam de +230MPa a valores negativos de -20MPa. De acordo com o gráfico do anexo (Figura A.6), o primeiro modo de vibração (flexão) obtido com o software é de 0,459 Hz. Deve-se ressaltar que o software simulou o chassi apoiado sem suspensão e os dados experimentais medidos são obtidos com o chassi montado com suspensão e em campo.

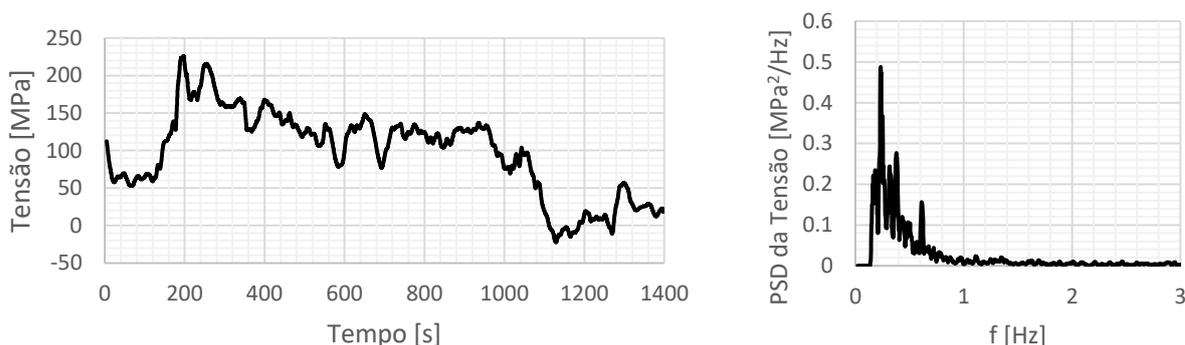


Figura 9 – Histórico de tensões e PSD para situação saindo para carregar com lastros.

Na Figura 10, mostra-se o histórico de tensões no ponto instrumentado para a condição de deslocamento da usina até o autódromo. Ao lado está a Densidade Espectral de Potência (PSD) das tensões medidas. Percebem-se um único pico principal em torno de 0,4 Hz. As tensões indicam valores abaixo de 250MPa sempre positivas.

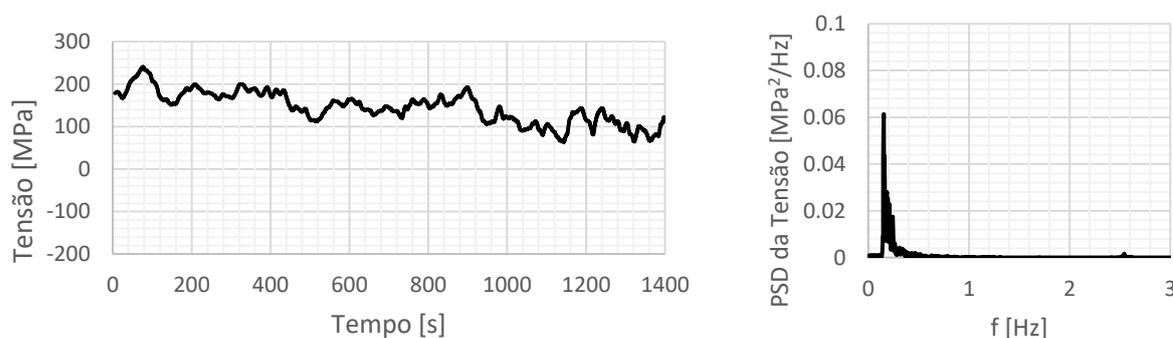


Figura 10 – Histórico de tensões e PSD para deslocamento da usina até o autódromo.

Na Figura 11, mostra-se o histórico de tensões no ponto instrumentado para a condição de deslocamento da usina até o local de descarregamento dos lastros de concreto. Ao lado está a Densidade Espectral de Potência (PSD) destas tensões medidas. Percebem-se dois picos principais em torno de 0,4 Hz e 0,5 Hz. No histórico de tempo há um instante em que a tensão no ponto medido diminui a níveis negativos com inversão de sinais de deformação. Em geral, as tensões não excedem 300MPa. Como verificou-se experimentalmente que não houve plastificação do aço no ponto medido, imagina-se que este valor possua uma certa incerteza relacionada à ruído ou mesmo componentes de temperatura atuando, uma vez que a condição de deslocamento, até o local de descarga dos lastros de concreto, do equipamento, foi imediatamente após inúmeras excitações da estrutura do chassi, na pista do autódromo, em função do teste de freio. De qualquer forma, isto indica que este é de fato um ponto crítico da região do chassi e deve receber maior atenção referente à fadiga.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs a instrumentação de um chassi utilizando um sistema de baixo custo para avaliar deformações e tensões mecânicas. A instrumentação foi previamente validada com testes simples em uma célula de carga construída indicando leituras corretas e compatíveis de deformação para o caso de cargas aplicadas e para o uso dos resistores de shunt. Percebeu-se que o sistema se mostrou adequado para medições a um custo dezenas de vezes inferior a um sistema comercial.

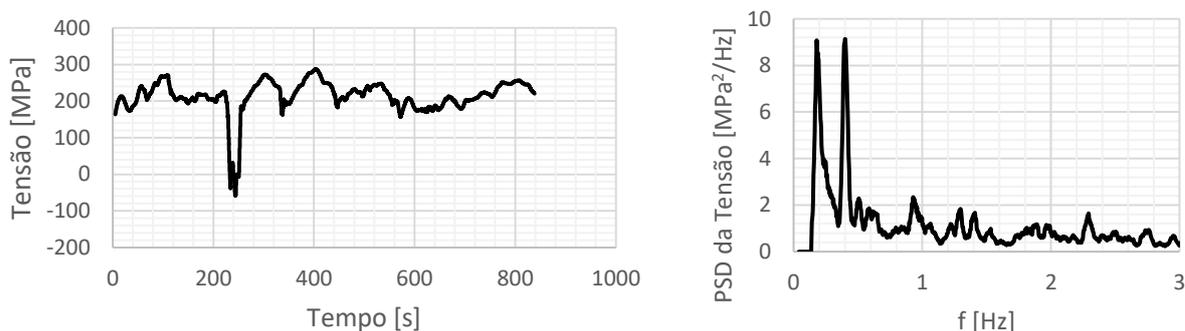


Figura 11 – Histórico de tensões e PSD para deslocamento do autódromo até o local de descarregamento dos lastros.

A estrutura em estudo é simulada numericamente (sua montagem estática em incrementos de cargas à medida que os componentes são instalados) e os dados de deformação e tensão mecânica medidas experimentalmente numa região previamente indicada como crítica do chassi. Comparando os resultados experimentais com os numéricos verificou-se uma tendência na curva apresentada na Figura 8 próximas a uma relação linear de 45° em que os valores de tensão mecânica se aproximam dos dados medidos experimentalmente. Diferenças existentes entre os resultados experimentais e numéricos podem ser atribuídas a questões relacionadas em parte à incerteza de medição e questões de aproximação dos valores de massa provenientes dos softwares de CAD.

Conforme mostram os gráficos da figura 9, 10 e 11 foram realizados testes dinâmicos com o chassi montado (usina) na condição de deslocamento até o autódromo internacional de Guaporé com vistas a verificar os limites de tensão em situação de movimento da usina até o local de trabalho uma vez que o equipamento estava carregado simulando a usina montada. Nestes deslocamentos o equipamento esteve exposto a diferentes tipos de pista com irregularidades causando níveis de tensão na ordem de 250 MPa como mostra a figura 10. Na condição estática o coeficiente de segurança, com o equipamento montado (usina), está em torno de 3(três), porém o nível de tensão verificando em movimento leva a estrutura a ter um coeficiente de segurança em torno de 1(um), evidenciando que o ponto de análise, verificado na análise numérica, de fato é um ponto crítico da estrutura, para esta condição da simulação do equipamento com lastros de concreto.

A proposta aqui apresentada pode ser aprimorada para a inclusão de mais pontos de medição, com o objetivo de avaliar tensões e deformações principais. De acordo com os gráficos apresentados de histórico de tensões ao longo do tempo, os mesmos indicam que estudos para tempo de vida em fadiga podem ser norteados baseados nestes dados experimentais. Como mostrado pelas Figuras 9, 10 e 11, a taxa de aquisição dos dados do sistema HX711 (80Hz) foi suficiente para capturar vibrações do chassi. Com esta possibilidade estudos para analisar o comportamento espectral tanto experimentais quanto numéricos podem ser referenciados para melhor adequar as modificações estruturais mantendo coeficientes de segurança aceitáveis bem como deformações que não danifiquem o comportamento estrutural e funcionalidade do equipamento.

Conclui-se que a proposta inicial do presente trabalho mostra que a instrumentação atendeu aos requisitos mínimos para um sistema que pretende monitorar tensões mecânicas, tendo sido verificado que estas tensões medidas estão em ordem de grandeza consideradas seguras para o equipamento. Estes valores de tensão mecânica obtidos experimentalmente, na condição estática, e comparados com o modelo numérico satisfazem a validação do modelo numérico e as hipóteses adotadas para pré-processamento e pós-processamento. Tendo em vista a validade do modelo numérico através da instrumentação proposta, as informações de

tensões mecânicas obtidas com as medições da estrutura em movimento são observadas de forma a monitorar o comportamento futuro do equipamento (usina) quando terá que se deslocar até o local de operação. As medições das tensões mecânicas feitas são importantes para análise das corretas hipóteses adotadas nas simulações numéricas assim como validação dos modelos numéricos propostos. Elas também permitem nortear estudos de fadiga e da variação do coeficiente de segurança do chassi em virtude de seus deslocados para diferentes locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, M.S., Razik, Md. **“A Review on study of analysis of chassis”**, Vol. 3, Issue 2, March-April, pp.1135-1138, 2013.

Ali, L. **“Impact on bus superstructure due to rollover”**, Universyiti Teknologi Malaysia, 2008.

ANSYS: **ANSYS Workbench – Users guide R 17.2: Static structural Analysis: 1st Ed.:** 2016.

Asker, H. K., Dawood, T. S. **“Stress analysis of standard truck chassis during ramping on block using finite element method”**, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, V. 7 No. 6, 2012.

Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., Lienhard, J. H. **“Mechanical measurements”**, Person Ed., 6th Edition, 2006.

Bocciolone, M., Cheli, F., Pezzola, M., Viganò, R. **“Static and dynamic properties of a motorcycle frame: experimental and numerical approach”**, Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, V. 41, 2005.

Chaitanya, M.S.R.K., Gokula Krishna, K. S., Dash, A. K., Rao, M. V. **“Experimental stress analysis on non-planar links of 3-PRR manipulator”**, International Journal of Engineering Research & Technology, IJERT, V.3, No.6, June, 2014.

Dubey, A., Dwivedi, V. **“Vehicle chassis analysis: load cases & boundary conditions for stress analysis”**, Engineering Principles, V. 11, 1993.

Karaoglu, C., Karalay, N. S. **“Stress analysis of a truck chassis with riveted joints”**, Finite Elements in Analysis and Design, V.38, No.12, pp.1115-1130, 2002.

Kurdi, O., Rahman, A.-R. **“Stress analysis of heavy duty truck chassis using finite element method”**, Internal Report, Faculty of Mechanical Engineering, 2007.

Moaaaz, A. O., Ghazaly, N. M., Suef, B. **“Finite element stress analysis of truck chassis using ansys: review”**, International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2014.

Nussey, J., **“Arduino for dummies”**, For Dummies Ed., Ed.1, 438p. 2013.

Patil, H. B., Kachave, S. D., Deore, E. R. **“Stress analysis of automotive chassis with various thicknesses”**, V. 6, No. 1, 2013.

Rao, S. **“Vibrações Mecânicas”**, 4^a Edição, 2009, Pearson, 448p.

Salink, M. A., Gaur, A. V. **“Stress analysis of bulk lever using FEA and experimental approach”**, International Research Journal of Engineering and Technology, V.3, No. 4, 2016.

Stefanescu, D. M. **“Handbook of force transducers”**, Springer, 2^a Ed., 2011.

ANEXOS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	$V(\text{inp})-V(\text{inn})$	$\pm 0.5(\text{AVDD}/\text{GAIN})$			V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0		10		Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD		80		
	Crystal or external clock, RATE = 0		$f_{\text{clk}}/1,105,920$		
	Crystal or external clock, RATE = DVDD		$f_{\text{clk}}/138,240$		
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFF	HEX
Output settling time ⁽¹⁾	RATE = 0		400		ms
	RATE = DVDD		50		
Input offset drift	Gain = 128		0.2		mV
	Gain = 64		0.4		
Input noise	Gain = 128, RATE = 0		50		nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD		90		
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)		± 6		nV/°C
	Gain (Gain = 128)		± 5		
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Power supply rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Reference bypass (V_{BG})			1.25		V
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD, VSUP	2.6		5.5	
Analog supply current (including regulator)	Normal		1400		μA
	Power down		0.3		
Digital supply current	Normal		100		μA
	Power down		0.2		

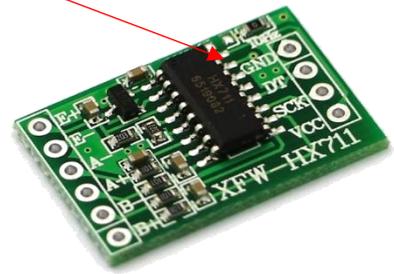


Figura A1 – Especificações técnicas do módulo HX711(Ponte de Wheatstone).

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

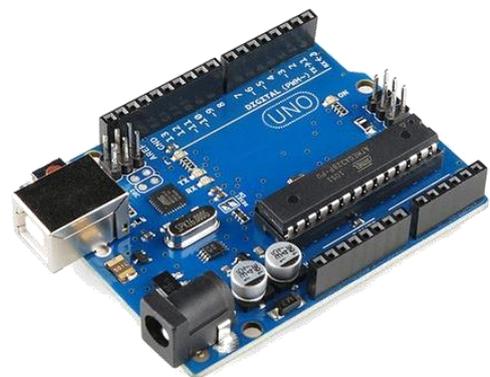


Figura A2 – Especificações técnicas do Arduino UNO (Nussey, 2013).

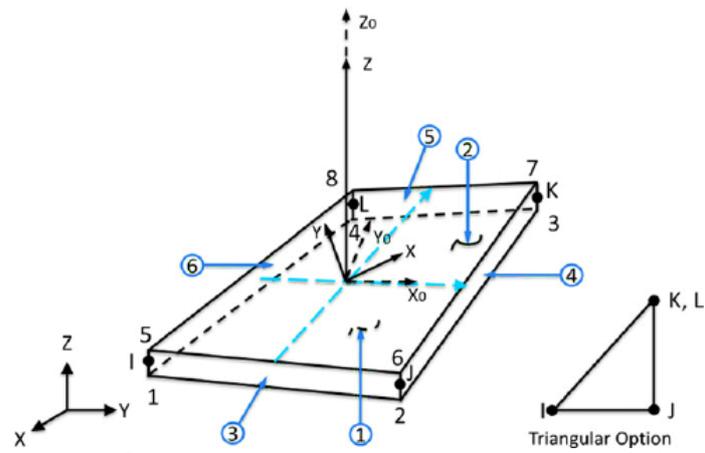


Figura A3 – Elemento finito Shell 181 do Ansys (adequado a cascas finas a moderadamente espessas, 6GDL por nó).

APÊNDICES

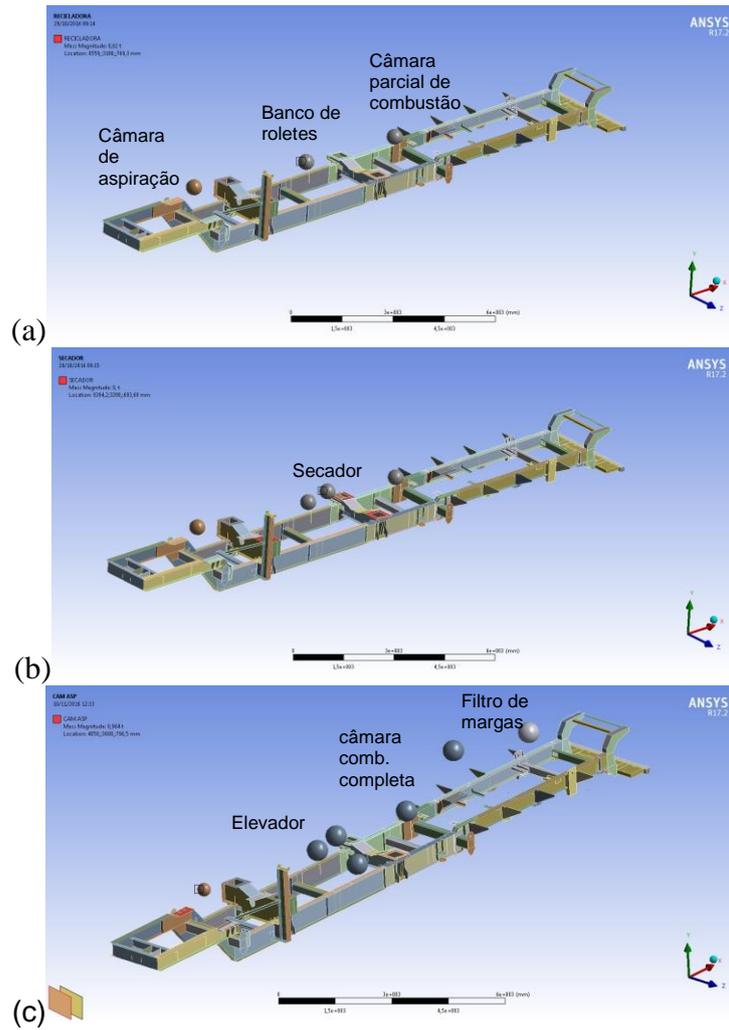


Figura A4 – Tensões no ponto de interesse em cada estágio de montagem da Usina. (a) Simulação 1, (b) Simulação 2, (c) Simulação 3.

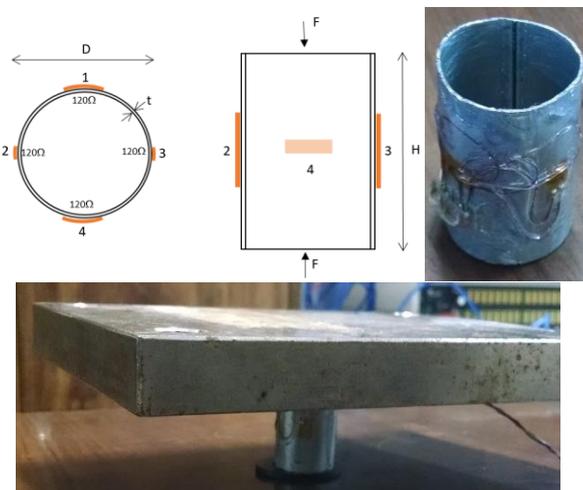


Figura A5 – Célula de carga uniaxial com Ponte de Wheatstone e ensaio com carga aplicada para validação da deformação medida e sistema HX711.

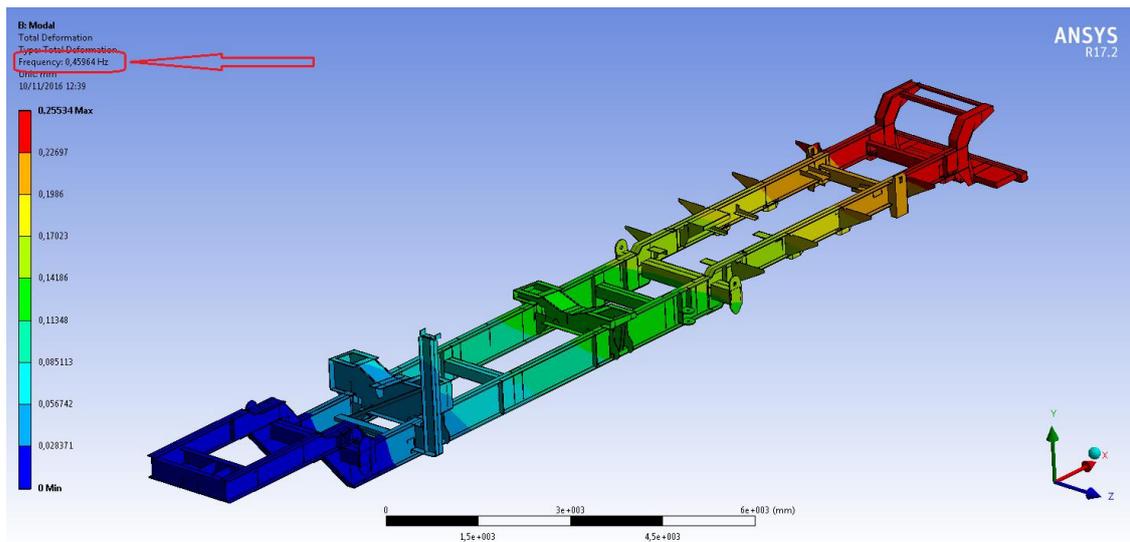


Figura A6 – Primeira frequência natural do chassi obtida numericamente (Modo de flexão vertical).

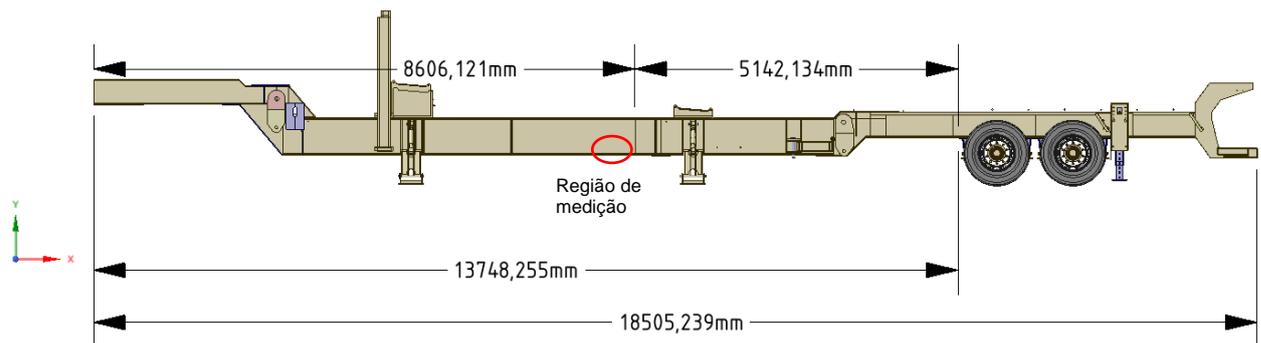


Figura A7 – Visualização do chassi da usina em estudo.

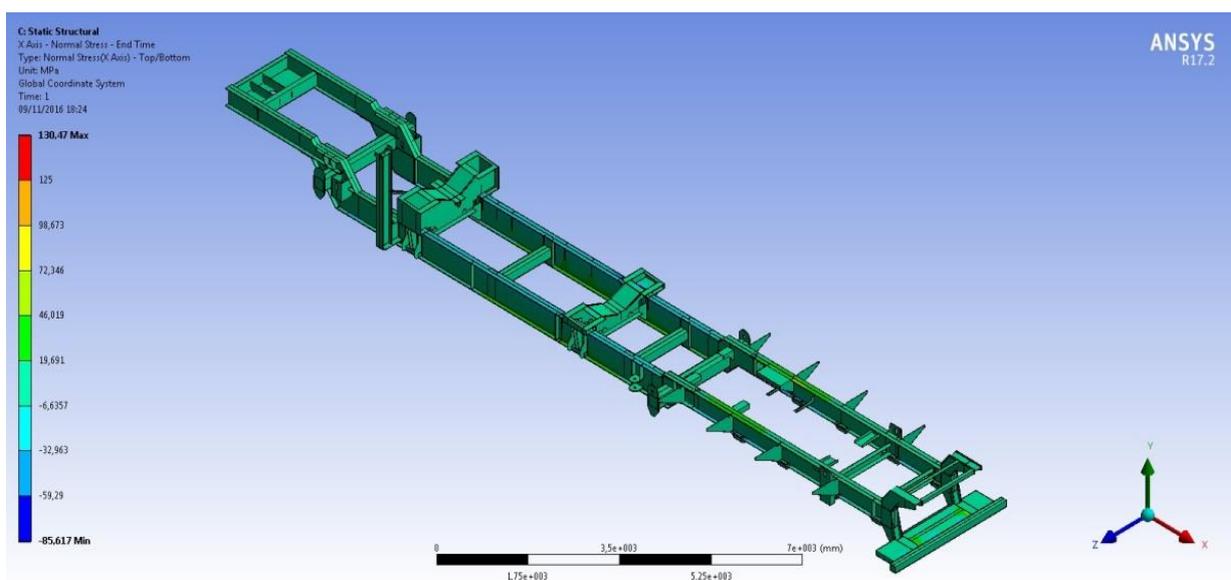


Figura A8 – Campo de tensões normais na direção longitudinal (direção x, carregamento estático).

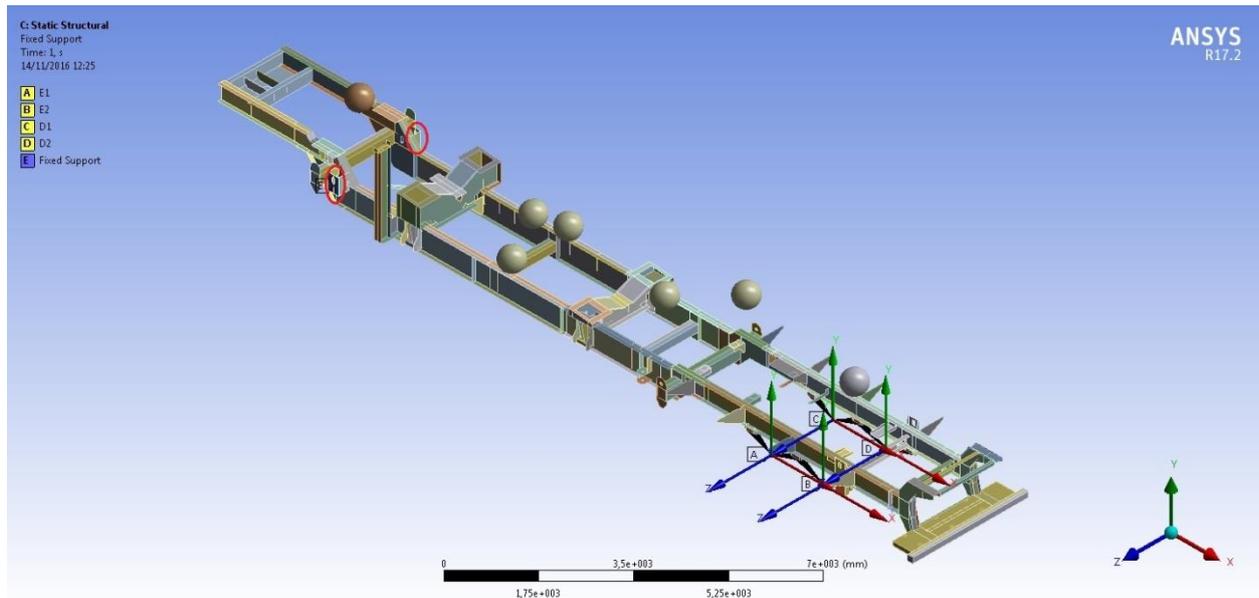


Figura A9 – Condições de contorno adotadas no modelo.