

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

Modelagem analítica de uma suspensão semielíptica em tandem e análise numérica e experimental das tensões em um chassi de uma usina de asfalto.

por

Fellipe Cros dos Santos

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, dezembro de 2012.

Modelagem analítica de uma suspensão semielíptica em tandem e análise numérica e experimental das tensões em um chassi de usina de asfalto.

por

Fellipe Cros dos Santos

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. Dr. Arnaldo Ruben Gonzales  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Jun Sérgio Ono Fonseca

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 3, dezembro de 2012

## AGRADECIMENTOS

agradeço primeiramente a minha família, por me oferecer totais condições de estudos durante todas as etapas da minha vida, sempre valorizando a educação como maior legado à qual possam me deixar.

ao *Eng. Jefferson Kuchle* pelo grande incentivo e auxílio prestado durante toda a realização deste trabalho.

ao *Msc. Eng. André Franceschini*, pela concessão de espaço, tempo e equipamentos que possibilitaram a realização das atividades necessárias.

aos colegas e amigos pelo companheirismo e estudos em conjunto ao longo de toda a graduação.

“Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso e pessoas fracassadas. O que existe são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles.”

*Augusto Cury*

Cros dos Santos, F.C.S. **Modelagem analítica de uma suspensão semielíptica em tandem e análise numérica e experimental das tensões em um chassi de usina de asfalto.** 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **RESUMO**

Usinas de asfaltos possuem diversos componentes que são aplicados sobre um chassi. Este é suspenso nos rodados por feixe de molas em tandem. A utilização deste tipo de suspensão é realizada com o objetivo de distribuir, da melhor maneira, as reações medidas em cada rodado. A limitação das reações é imposição do sistema de legislação aplicado em cada país na qual há a possibilidade de uma usina ser comercializada. Como forma de validar o método utilizado durante a fase de projeto para prever os possíveis excessos de reações e de tensões agindo na estrutura do chassi, foi desenvolvida uma otimização do modelo numérico para a suspensão, passando da consideração de simples molas para um conjunto de molas e chapas rígidas com rigidezes torcionais previamente calculadas. Ainda, realizou-se uma análise experimental através da aplicação de strain gages em sete regiões de interesse, totalizando quatorze extensômetros aplicados. As reações obtidas com o novo modelo de suspensão apresentaram o mesmo comportamento verificado através uma pesagem realizada com a usina completa, apresentando diferença máxima de 24% e mínima de 4%. Já as tensões medidas na estrutura foram coerentes com o carregamento aplicado, apresentando comportamento de tensão e tração nas mesas inferiores e superiores de modo condizente com o descrito na teoria de transmissão de carregamentos mecânicos. Considerando-se apenas o peso próprio do chassi, obteve-se tensões com diferença mínima de 13%. Quando da consideração da usina carregada com todos sub-sistemas, a região de maior sollicitação na estrutura apresentou uma tensão de 180 MPa, enquanto que o resultado observado numericamente foi de 116,6 MPa, uma diferença de 35%. A diferença observada é decorrente de diversas simplificações realizadas, como; não consideração de alguns componentes, simplificações na geometria do chassi, aproximação das massas e dos centros de gravidades dos sub-sistemas aplicados e o tipo de comportamento entre a massa aplicada e a geometria.

**PALAVRAS-CHAVE:** (suspensão, feixe de molas, análise experimental, elementos finitos)

Cros dos Santos, F.C.S. **Analytical modeling of a semi elliptical suspension in tandem and experimental and numerical analysis of stresses in a chassis asphalt plant.** 2012. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

Asphalt plants have several components that are applied on a chassis. The chassis is suspended by beam spring in tandem. The use of this type of suspension is performed in order to distribute, at its best, reactions measured in each shaft. The limitation of the reactions is enforcement by the law system applied in each country where is possible a plant be sold. In order to validate the method used during the design phase to predict the possible excesses of reactions and stresses acting on the chassis structure, we developed a numerical model for optimization of the suspension, from the consideration of simple springs to a set of springs and plates with rigid torsional stiffness previously calculated. It was also performed experimental analysis by applying strain gages in seven regions of interest, totaling fourteen strain gages applied. The reactions obtained with the new suspension model showed the same behavior observed by weighing performed with the complete plant, with maximum difference of 24% and minimum of 4%. The measured stress in the structure were consistent with the applied load, showing coherent behavior with that described in the theory of transmission of mechanical loading. Considering only the self-weight of the chassis, was obtained stress with minimum difference of 13%. In case of considering the plant of asphalt loaded with all sub-systems, the region of highest stress in the structure presented a value of 180 MPa, whereas the result observed numerically was 116,6 MPa, resulting in a difference of 35%. The difference is due to several simplifications performed, as well as, non-consideration of some components, simplifications in the geometry of the chassis, masses approach and centers of gravities of applied sub-systems and behavior between mass and geometry applied.

**KEYWORDS:** (suspension, leaf springs, experimental analysis, finite elements)

# ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	1
3. SUSPENSÃO SEMIELIPTICA POR FEIXE DE MOLAS .....	1
4. METODOLOGIA.....	2
4.1. Medida das reações por rodado .....	2
4.2. Modelo numérico e analítico para a suspensão em tandem .....	3
4.2.1. Equacionamento.....	4
4.2.2. Rigidezes para o modelo numérico.....	5
4.3. Modelagem do chassi.....	6
4.3.1. Principais componentes estruturais .....	6
4.3.2. Discretização em Elementos finitos .....	6
4.3.3. Propriedades do material.....	7
4.4. Simulação numérica por elementos finitos.....	7
4.4.1. Condições de contorno.....	7
4.4.2. Conexões aplicadas entre componentes .....	8
4.4.3. Resultados da simulação.....	8
4.5. Análise experimental das tensões .....	9
4.5.1. Equipamentos para a medição .....	9
4.5.2. Pontos de aplicação dos sensores .....	10
4.5.3. Resultados da análise experimental .....	11
4.6. Comparação entre resultados numéricos e experimentais .....	13
5. CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
APÊNDICE I.....	16
APÊNDICE II.....	17
APÊNDICE III.....	18
ÂPENDICE IV .....	18
APÊNDICE V .....	19
ANEXO I .....	20
ANEXOII .....	20
ANEXO III.....	20

## 1. INTRODUÇÃO

Usinas de asfalto são máquinas que produzem asfalto através do processamento de agregados e CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) em subsistemas que são montados em um chassi. Tais equipamentos podem ser dispostos em duas ou em uma única mobilidade, como é o caso do chassi da usina que será analisado neste trabalho. Sendo assim, tal chassi é submetido a carregamentos de grande magnitude, fazendo com que as reações em cada rodado sejam elevadas, bem como podendo produzir elevadas tensões ao longo das vigas utilizadas no chassi.

Apesar de tais máquinas operarem paradas em canteiros de obra, precisam se deslocar por estradas em diversos países que possuem diferentes normas e legislações acerca das máximas reações permitidas por rodado. Sendo assim, é de elevada importância possuir uma ferramenta capaz de avaliar, ainda na fase de projeto, se a disposição dos subsistemas ao longo do chassi produz condições favoráveis de forças de reação nos rodados (para garantir que as mesmas se encontram abaixo das máximas permitidas) e de tensões nas vigas do chassi (de forma que as mesmas não ultrapassem a tensão de escoamento). Isto implica diretamente na necessidade de uma correta determinação para um modelo de suspensão que simule da maneira mais próxima possível o comportamento real da suspensão em tandem por feixe de molas e de um modelo em elementos finitos realístico.

## 2. OBJETIVOS

Na tabela A.1 do anexo II, pode-se observar a variação da limitação da massa por eixo para dada configuração de transporte e do PBTC (Peso bruto total combinado) permitido em alguns dos países na qual uma usina de asfalto pode ser comercializada. Estes valores configuram uma limitação que deve ser levada em conta durante a fase de projeto dos componentes da usina, de forma que seja possível obter reações condizentes com o definido para que o equipamento possa rodar dentro das legislações locais destes diferentes países. Portanto, deseja-se neste trabalho, realizar uma validação da metodologia utilizada para a simulação numérica em elementos finitos do chassi utilizado em uma usina de asfalto. Como pré-requisito para esta validação, está a definição de um modelo para a suspensão utilizada no chassi e uma verificação experimental das tensões para o caso do chassi com todos componentes da usina montados sobre o mesmo. Tendo o modelo apresentado resultados coerentes com a análise experimental e com as reações medidas, ter-se-á a possibilidade de usar o mesmo modelo em simulações para o projeto de futuras usinas.

## 3. SUSPENSÃO SEMIELIPTICA POR FEIXE DE MOLAS

Dentre os diversos tipos de suspensão existentes no mercado, o modelo mais usual e econômico para transportar cargas pesadas em eixos sólidos é a que utiliza feixe de molas trapezoidal, Figura 3.1. Tal suspensão apresenta rigidez devido à flexão das lâminas no regime elástico e amortecimento devido ao atrito gerado com o deslocamento relativo entre as mesmas, Peres [2006]. Ainda, segundo Leadsman, 2005, tanto a rigidez como o amortecimento de tal suspensão apresentam um comportamento com presença de histerese quando da aplicação de carga e descarga.

Outra característica importante que define o comportamento deste modelo de suspensão é relativo a variação da rigidez devido a magnitude do carregamento aplicado. Gillespie, 1992, afirma que há um aumento de rigidez de até três vezes a rigidez nominal para o caso de pequenos deslocamentos aplicados a mola trapezoidal. Tal aumento da rigidez ocorre pois, para pequenas deflexões, a suspensão trabalha como sendo um corpo sólido. Este



comportamento é denominado rigidez de condução e é descrito em forma gráfica na Figura A.1 do anexo I.



Figura 3.1 – Modelo de suspensão por feixe de molas trapezoidal.

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a validação da simulação numérica como ferramenta a ser utilizada na fase de projeto passa pelas seguintes etapas:

- Obtenção das reações em cada rodado do chassi;
- Determinação de um modelo numérico e analítico que forneça as reações medidas em uma suspensão semielíptica em tandem;
- Realização de simulações numéricas em elementos finitos para rigidezes obtidas analiticamente.
- Comparação de resultados numéricos com análise experimental realizada através da instrumentação do chassi com strain gages.

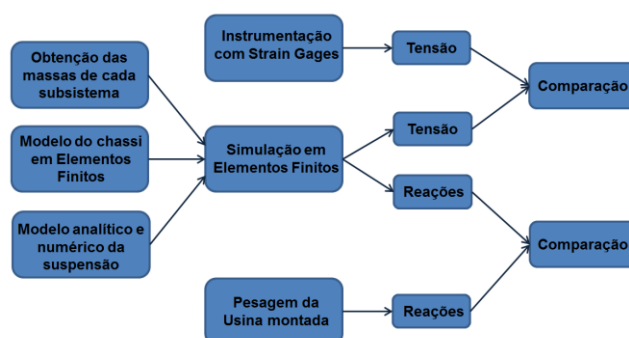


Figura 4.1- Descrição da metodologia adotada para a realização do trabalho.

##### 4.1. Medida das reações por rodado

Como forma de avaliar o peso total da usina com todos seus componentes montados e determinar as reações em cada rodado do chassi, foram realizadas medições na empresa Serra Morena de Porto Alegre- RS. O equipamento utilizado para tanto foi uma balança que consiste de uma estrutura de concreto armado apoiada em 4 células de carga (por ser uma balança comercial, não se pode obter o valor da precisão e da incerteza de medição das células de cargas utilizadas).

Primeiramente apoiou-se sobre a mesma somente o rodado mais traseiro do chassi. Dessa forma obteve-se a reação do último eixo. Em seguida, foram realizadas medições para os dois rodados subsequentes, finalizando as medidas possíveis. Dessa forma obteve-se a reação para cada rodado no chassi da usina. As últimas medições foram realizadas nos rodados do cavalo mecânico utilizado. Para esta medição se utilizou como cavalo um caminhão tipo trucado (três rodados). A Tabela 4.1 contém os valores de reação medidos em Kgf (a escolha desta unidade se dá devido a legislação levar em conta valores em kgf),

bem como a massa total da usina completa. A posição de cada rodado está demonstrada na Figura 4.2.

Nota-se pelos valores obtidos, que a homogeneidade nas reações dos eixos com suspensão em tandem não é obtida, como era esperado pela teoria da própria suspensão. Tal fato deverá ser levado em conta na obtenção do modelo numérico em elementos finitos.

Tabela 4.1 – Valores de reação medidas em cada rodado da usina de asfalto.

	Chassi	Cavalo Mecânico
1° rodado	9480 kgf	6425 kgf
2° rodado	6160 kgf	9085 kgf
3° rodado	8035 kgf	9375 kgf
Peso total	48560 kgf	



Figura 4.2- Nomenclatura atribuída a cada eixo presente na usina de asfalto.

#### 4.2. Modelo numérico e analítico para a suspensão em tandem

A suspensão por feixe de molas em tandem, Figura 4.3, se caracteriza por distribuir as cargas de maneira uniforme em cada rodado do conjunto [Peres, 2006]. Este comportamento existe devido a presença de um componente denominado balancim. Tal componente conecta a extremidade de um feixe a extremidade do adjacente, agindo como um transmissor das forças de reação. O balancim é pinado e transmite compressão de um feixe a outro. Ainda, os feixes de mola trapezoidais possuem seu deslocamento horizontal restringido por um braço tensor, que é uma ligação bi-articulada entre o eixo e um suporte fixo ao chassi.



Figura 4.3 – Representação do conjunto de feixe de molas em tandem.

Tendo em vista o comportamento complexo da suspensão, com transmissão de cargas entre elas, tem-se a necessidade de elaboração de um modelo que seja capaz de propiciar tais transmissões. Ainda, devido ao fato de que o caso na qual será analisado é estático, é desconsiderado o comportamento de rigidez de condução.

Segundo Rill *et al*, 2007, a obtenção de um modelo para a suspensão por feixe de molas pode ser pobre se não considerar as forças de reações como dependentes entre as suspensões do conjunto em tandem. Niklas Philipson, 2006, afirma que o modo convencional para representar uma suspensão por feixe de molas é considerar um conjunto de diversas

molares conectadas através de barras unidas umas nas outras através de juntas com rigidez torcional. Peres, 2006, também utiliza deste argumento e modela a suspensão em tandem como molares unidas por eixos rígidos que agem como balancim. Desta forma, sugeriu-se a utilização do modelo descrito nas Figura 4.4 e Figura 4.5.

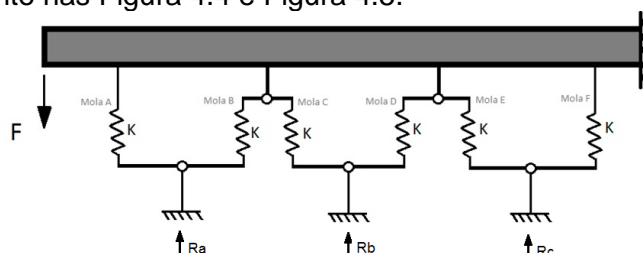


Figura 4.4 – Modelo proposto para representação do comportamento de uma suspensão por feixe de molares em tandem.

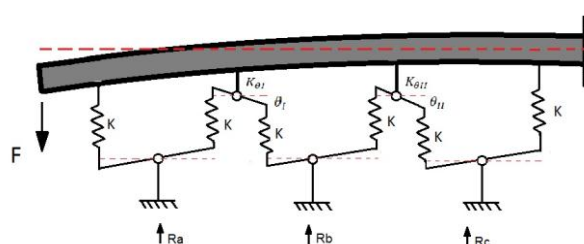


Figura 4.5 – Carregamento aplicado ao modelo e sua respectiva deformação de trabalho.

#### 4.2.1. Equacionamento

Obteve-se equações descritivas do modelo para que, sabendo as reações medidas por rodado ( $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$ ), possa-se obter as rigidezes de cada mola que resultarão em tais valores de reação verificados com a pesagem estática.

Considerando os deslocamentos indicados na Figura 4.5 e rigidezes torcionais nos balancins, obteve-se o conjunto de equações de 4.1 a 4.8. Tais equações foram obtidas através da aplicação da lei de Hooke e da consideração de que cada mola estará absorvendo um quarto da reação medida no eixo. Isto devido ao fato de se ter duas molares para cada reação (dessa forma o valor de força absorvida por cada uma deve ser igual) e devido a uma consideração de simetria entre o conjunto em tandem da esquerda com o da direita.

$$R_a = F_A + F_B \quad (4.1)$$

$$R_b = F_C + F_D \quad (4.2)$$

$$R_c = F_E + F_F \quad (4.3)$$

$$F_A = F_B = K \cdot x_a \quad (4.4)$$

$$F_C = F_D = K \cdot x_b \quad (4.5)$$

$$F_E = F_F = K \cdot x_c \quad (4.6)$$

onde  $R_a$ ,  $R_b$  e  $R_c$  são as reações medidas em cada rodado,  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ ,  $F_D$ ,  $F_E$  e  $F_F$  as forças de reação em cada mola,  $K$  a rigidez de cada mola do modelo da suspensão em tandem e  $x_a$ ,  $x_b$ , e  $x_c$  as deformações de cada conjunto de molas. Os sub-índices são, respectivamente; eixo onde a reação foi medida, indicação da posição da mola e posição da deformação considerada. Todas as variáveis citadas são melhores visualizadas na Figura 4.5.

A consideração da presença de rigidez torcional nos dois balancins é aplicada ao modelo analítico através das equações de 4.7 até 4.8.

$$F_B = F_C + \frac{2 \cdot K_{\theta I} \cdot \theta_I}{l} \quad (4.7)$$

$$F_E = F_D + \frac{2 \cdot K_{\theta II} \cdot \theta_{II}}{l} \quad (4.8)$$

na qual  $l$  é o comprimento do balancim no modelo numérico e  $K_{\theta}$  a rigidez torcional verificada na junta do balancim. Tal rigidez será um dado de entrada aplicado de forma a otimizar o resultado e propiciar as diferentes reações observadas por rodado. Quando está variável vale zero, têm-se o caso da suspensão em tandem descrita na literatura, com homogeneidade nas reações.

#### 4.2.2. Rigidezes para o modelo numérico

Para fins de cálculo através do modelo numérico em elementos finitos, deseja-se obter valores de rigidezes que mais se adequem ao modelo real da suspensão por feixe de molas em tandem. Na Tabela 4.2, têm-se os valores de rigidezes indicados pelo fabricante da suspensão. Entretanto, tais valores foram obtidos através de um ensaio de compressão para a mola em separado, ou seja, desconsiderando-se o efeito do balancim. Segundo Peres, 2006, um ensaio realizado dessa maneira, não leva em conta a complexidade da suspensão ao desconsiderar a influência do balancim na transmissão das cargas. Sendo assim, considera-se a rigidez informada pelo fabricante (cujos valores encontram-se citados na Tabela 4.2) e, obtêm-se analiticamente valores de rigidezes torcionais que forneçam o efeito de transmissão de cargas respeitando, entretanto, as reações obtidas através da pesagem estática realizada para a condição de carregamento da usina completamente montada.

Tabela 4.2 – Valores de rigidezes informados pelo fabricante do feixe de mola.

CT190 FX 11 LÂMINAS UM CONJUNTO SOMENTE		
	Carga	Deflexão
Máxima	8000 Kgf	39 mm
Nominal	4500 Kgf	22 mm
Rigidez	204.0 Kgf/mm	

Utilizando as equações de 4.1 até 4.8 e considerando como incógnitas as variáveis;  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ ,  $F_D$ ,  $F_E$ ,  $F_F$ ,  $K_{\theta I}$ ,  $K_{\theta II}$ , têm-se um sistema linear de oito equações e oito incógnitas, desta forma e com a utilização do software comercial Maple v.13, obtêm-se a solução do problema para as reações  $R_a=9480$  Kgf,  $R_b=6160$  Kgf e  $R_c=4020$  Kgf. Com estas considerações e simplificações, obtiveram-se os seguintes resultados:  $K_{\theta I}= 4,07115 \times 10^5$  [N/mm.rad],  $K_{\theta II}= 4,9233 \times 10^5$  [N/mm.rad],  $F_A= F_B=23249,7$  N,  $F_C=F_D=15107,4$  N,  $F_E=F_F=19705,8$  N.

## 4.3. Modelagem do chassi

### 4.3.1. Principais componentes estruturais

Segundo Marczak, 1995, a perfeita representação da geometria em uma modelagem para o método dos elementos finitos muitas vezes apresenta dificuldades intransponíveis. Sendo assim, simplificações referente à geometria complexas podem ser realizadas e detalhes sem importância estrutural podem ser omitidos sem efeitos prejudiciais a uma análise global, desde que a estrutura simplificada mantenha um comportamento semelhante a real. Para tanto, é necessário a determinação dos componentes com importância significativa na análise. A Figura 4.6 demonstra tais componentes. Já na Figura a.1 do apêndice I, tem-se o perfil de cada componente citado.

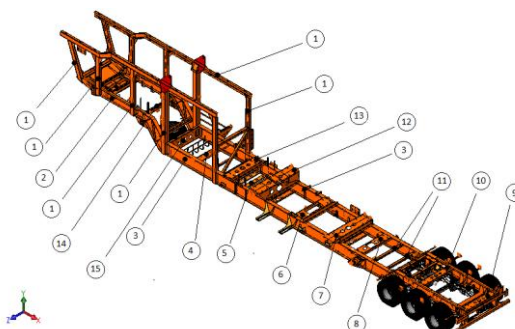


Figura 4.6 – Indicação dos principais componentes do chassi. Numeração referente aos perfis descritos na figura a.1 do apêndice I.

### 4.3.2. Discretização em Elementos finitos

Na modelagem do chassi foram empregados elementos de casca de modo a reduzir o tempo de processamento. Tal escolha se baseia na teoria de cascas, na qual é necessária a presença de duas dimensões muito maiores que a outra para que os resultados possam ser considerados coerentes. Os perfis em 3D foram então alterados para superfícies de casca, através da consideração do plano médio dos mesmos. Toda a alteração foi realizada na plataforma CAD, através do software SolidWorks.

Para a discretização do modelo, foi gerada uma malha com 172267 elementos através da utilização do elemento SHELL181, Figura A.2 do anexo II, que é um elemento de quatro nós, com seis graus de liberdade para cada nó: translação nas direções x,y e z e rotações em torno dos eixos x, y e z. Desta forma, obteve-se a transição de modelo verificada na Figura 4.7. Ainda, na tabela a.2 do apêndice I, têm-se todas as configurações aplicadas para geração da malha.

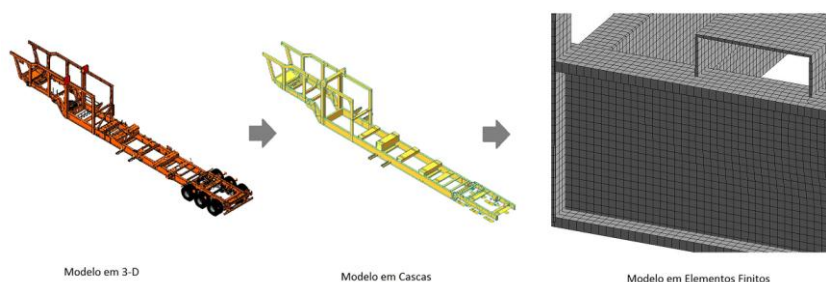


Figura 4.7 – Transição entre modelo sólido, casca e em elementos finitos para o chassi.

### 4.3.3. Propriedades do material

Para uma análise estática, os principais dados de entrada referentes ao material dos componentes são a densidade, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, de modo que qualquer consideração a cerca de deformação térmica ou plástica será negligenciada no presente trabalho. O material utilizado em toda a estrutura do chassi é aço ASTM A36, e suas propriedades estão descritas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36.

PROPRIEDADE	ASTM A-36
Limite de escoamento	250 MPa
Limite de ruptura	450 MPa
Coeficiente de Poisson	0,26
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Densidade	7850 kg/m <sup>3</sup>

## 4.4. Simulação numérica por elementos finitos

### 4.4.1. Condições de contorno

A correta determinação do carregamento e das condições de contorno aplicadas ao chassi representa um fator determinante para que se obtenha valores de deslocamento, deformações e tensões atuantes os mais próximos possíveis dos verificados no modelo real. Como a realização de uma pesagem individual para cada sub-sistema montado em uma usina de asfalto demandaria grande disponibilidade de tempo, optou-se pela utilização dos valores de massa (e coordenadas do Centro de Gravidade) de cada componente observados no modelo completo da usina modelada em 3D no software SolidWorks, tabela a.1 do apêndice I. Para a consideração das restrições de deslocamento, considera-se a determinação da aplicação de engastes nas regiões onde o chassi é apoiado em pés mecânicos, ou seja, determina-se que nestes pontos de apoios, deslocamentos e rotações nos eixos cartesianos x, y e z serão iguais a zero. Tais massas serão adicionadas através do recurso de *Point Mass* (Figura 4.8), e tais pontos serão ligados ao chassi através de elementos MPC184-Link (*Multipoint Constraint Element*), que possui dois nós e três graus de liberdade por nó (UX, UY, UZ), sendo utilizado para transmitir forças e momentos (Ansys 14.0 Help).

Ainda, tem-se que serão aplicadas restrições de apoio pinado nas regiões centrais das barras rígidas utilizadas no modelo representativo da suspensão por feixe de molas em tandem, Figura 4.9.

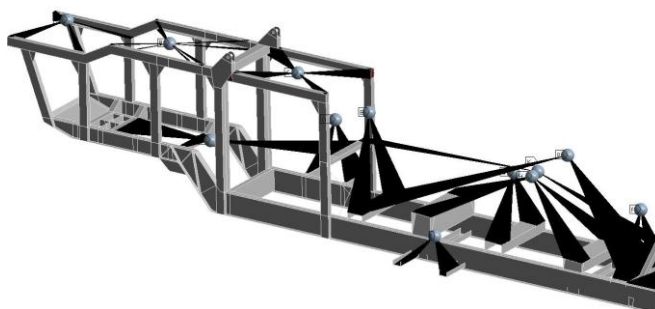


Figura 4.8 – Pontos de massa aplicados ao chassi através do elemento MPC184-Link.

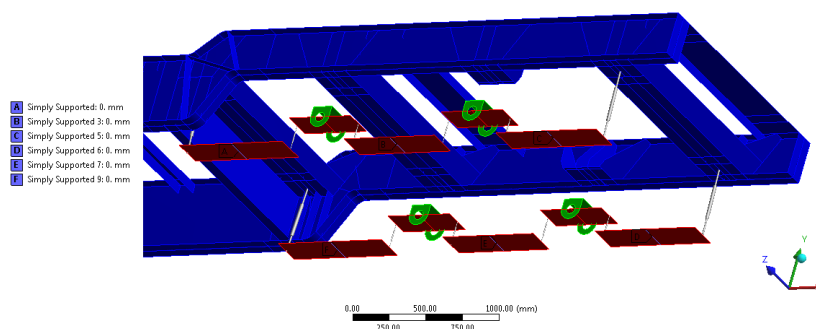


Figura 4.9 – Modelo de suspensão proposto aplicado no software Ansys e indicação das regiões com condição de contorno de simples apoio.

#### 4.4.2. Conexões aplicadas entre componentes

Para o modelo da suspensão foram utilizadas juntas de revolução do tipo *MPC184Cylindrical* com restrição de movimento em UX, UY, UZ, ROTX e ROTY, sendo permitida apenas a rotação em torno do eixo Z do sistema de coordenadas local criado. Na Figura 4.10 tem-se a indicação do sistema de coordenadas local considerado e dos componentes unidos. Em verde tem-se o suporte do balancim e em vermelho a barra que irá rotacionar ao longo do eixo Z local. A fixação do suporte do balancim foi realizada através da utilização de uma junta rígida entre o topo do mesmo e a região do chassi onde a suspensão é apoiada, com as seguintes restrições de movimento; UX, UY, UZ, ROTX, ROTY e ROTZ, ou seja, não irá ocorrer movimento relativo entre estas duas regiões.

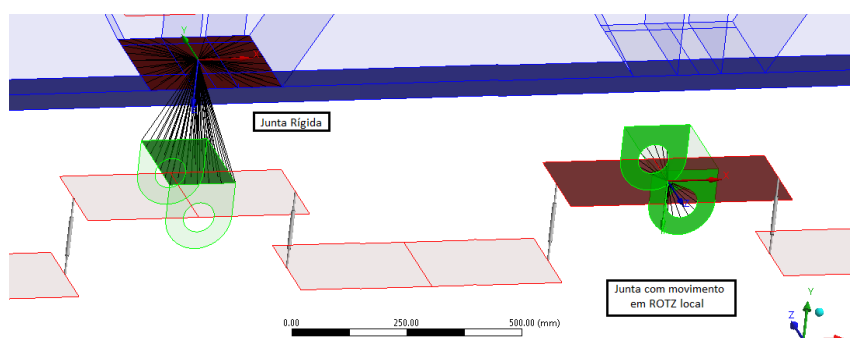


Figura 4.10 – Conexões aplicadas entre o chassi e o suporte do balancim e entre o suporte do balancim e a chapa rígida do modelo da suspensão.

#### 4.4.3. Resultados da simulação

Foram realizadas três simulações em elementos finitos. A primeira considerou somente o peso próprio do chassi e o apoio foi realizado nos pés mecânicos frontais, além do apoio nos rodados. Nas demais simulações, considerou-se a usina completa alterando-se a região onde o apoio frontal foi considerado. Para o primeiro dos casos o apoio foi aplicado nos pés mecânicos frontais e, na simulação posterior, o mesmo foi deslocado para a região onde o pino rei do cavaleiro mecânico é engatado no chassi. A figura a.6 do apêndice IV demonstra a configuração deformada e indeformada para cada caso, bem como as regiões consideradas para os apoios. Como resultados de tensões, têm-se os valores citados na Tabela 4.4 para as regiões demonstradas na Figura 4.12. Os valores das reações obtidas estão descritos na Figura 4.11 e na Tabela 4.5 e apresentam uma boa aproximação, diferindo em apenas 4% para o primeiro rodado.

Tabela 4.4 – Valores de tensão normal (na direção longitudinal do chassi) obtidos com diferentes configurações de carregamento e apoios em pontos de interesse.

Localização do ponto considerado	Configuração da simulação considerada		
	Peso próprio (apoio nos pés mecânicos)	Usina completa (apoio pés mecânicos)	Usina completa (apoio no cavalinho)
Região I - mesa superior	-17.1 MPa	-117.8 MPa	-92.5 MPa
Região I - mesa inferior	17.5 MPa	96.1 MPa	101 MPa
Região II - mesa superior	-17.6 MPa	-117.9 MPa	-85.97 MPa
Região II - mesa inferior	17.8 MPa	106.1 MPa	116.6 MPa
Região III - mesa superior	-16.2 MPa	-114.52 MPa	-76.8 MPa
Região III - mesa inferior	16.2 MPa	104.74 MPa	104.9 MPa
Região IV - mesa superior	-16.2 MPa	-122.3 MPa	-86 MPa
Região IV - mesa inferior	16.4 MPa	11.3 MPa	116 MPa
Região VII - mesa superior	4.5 MPa	-18.6 MPa	-25.5 MPa
Região VII - mesa inferior	-4.7 MPa	18.9 MPa	58.5 MPa
Região VIII - mesa superior	4.8 MPa	-5.08 MPa	13.6 MPa
Região VIII - mesa inferior	-5 MPa	7.2 MPa	45.9 MPa

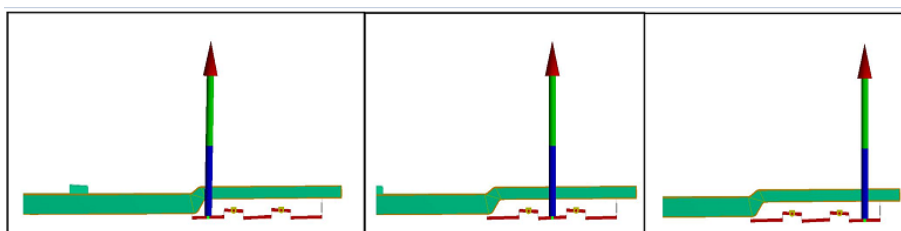


Figura 4.11 – Posição das reações obtidas para cada rodado do modelo para representação numérica da suspensão por feixe de molas em tandem.

Tabela 4.5 – Valores comparativos entre as reações medidas com a pesagem e as reações obtidas com a simulação do modelo proposto para a suspensão em tandem.

	Reação medida	Reação simulação	Diferença %
1° rodado	9480 kgf	9870 kgf	4%
2° rodado	6160 kgf	7085 kgf	15%
3° rodado	8035 kgf	6327 kgf	-21%

## 4.5. Análise experimental das tensões

Através da instrumentação do chassi com sensores do tipo Strain Gages, colados em pontos específicos da estrutura, buscou-se informações referentes às deformações e tensões atuantes. A aplicação dos mesmos baseou-se no manual proposto por Zaro et al., 1982.

### 4.5.1. Equipamentos para a medição

Para a realização da instrumentação do chassi, utilizou-se de sensores strain gages com resistência nominal (informada pelo fabricante) de 350 ohms e Gage Factor de 2,1. Tal sensor foi adquirido junto à empresa Excel Sensores. Além dos extensômetros, utilizou-se o equipamento Data Logger Agilent 34970A, que consiste de um multímetro digital de 6½ dígitos com capacidade para medição simultânea de até 20 canais. O erro associado à medição de resistência é de 0,3% da leitura + 0,6  $\Omega$ , para o fundo de escala de 1 k $\Omega$  (Manual Agilent). Com a utilização deste multímetro em conjunto com o fundo de escala citado, é possível obter medidas de variação de resistências elétricas de até 0,01  $\Omega$ , o que equivale a uma medida de



variação de tensão de até 0,003 MPa (considerando a relação entre resistência elétrica e tensão dada pela equação 4.10).

#### 4.5.2. Pontos de aplicação dos sensores

A região para aplicação dos extensômetros foi definida com base nos resultados obtidos com a simulação numérica. Foram aplicados 14 strain gages em sete regiões de interesse submetidas a elevadas deformações, Figura 4.12. Cada região possui dois extensômetros aplicados, um na mesa superior (referência A na denominação do canal) e outro na mesa inferior da viga I (referência B na denominação do canal). Ainda, foi realizada a aplicação de dois extensômetros em uma das colunas das estruturas verticais laterais presentes no chassi (região V). A Figura 4.13 demonstra um dos extensômetros colados na estrutura.

Para a aplicação dos strain gages, o chassi, sem nenhum subsistema montado, foi apoiado em macacos hidráulicos no ponto médio entre o apoio dos pés mecânicos e dos rodados, de forma a atenuar o efeito do peso próprio nas posteriores medições, Figura 4.14.

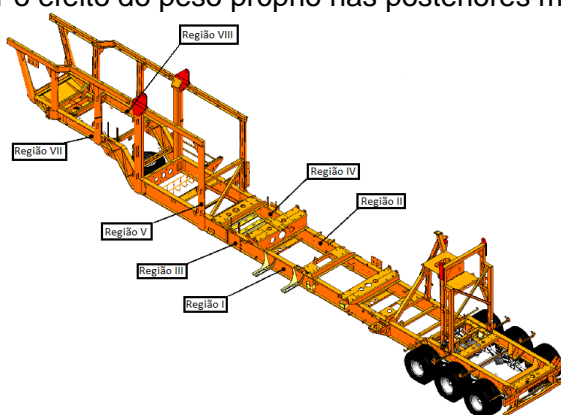


Figura 4.12 – Regiões de aplicação dos strain gages. Cada região possui dois extensômetros aplicados, um de cada lado da viga.



Figura 4.13 – Extensômetro aplicado ao chassi.



Figura 4.14 – Apoio do chassi em macaco hidráulico no centro do chassi. Apoio aplicado no lado direito e esquerdo.

### 4.5.3. Resultados da análise experimental

O ensaio experimental ocorreu na linha de montagem da usina de asfalto. Foram realizadas sete medições com condições de carregamento diferentes para cada medição, de forma que, ao final de todas, obteve-se o histórico das tensões para a aplicação das cargas dos sub-sistemas. Cada medição foi realizada com intervalos de 10 segundos para cada condição de carregamento. Na Tabela 4.6, tem-se a relação da medição com o carregamento aplicado no momento da mesma. Tais condições também estão detalhadas na Figura a.2 do apêndice II

Tabela 4.6 – Medições realizadas ao longo da montagem da usina com seus respectivos componentes adicionados e intervalo de medição.

Medição	Componentes montados	Tempo de scan [s]
01-A	Zero	150 até 250
01-B	Peso próprio	250 até 330
02	Filtros, câmara de combustão, misturador, banco de roletas, cabine, quadro elétrico	330 até 2270
03	Adição do secador e câmara de aspiração	2270 até 3490
04	Adição de silos frios, correia transportadora e anel de RAP	3490 até 8190
05	Adição de dois motoredutores, tubulação e motor do misturador	8190 até 8990
06	Adição do Redler - Usina completa apoiada nos pés mecânicos frontais	9000 até 9990
07	Usina completa apoiada no cavalete mecânico	10000 até 11850

Com a primeira medição realizada (estrutura apoiada no macaco hidráulico), obteve-se o valor de resistência a ser considerado como zero. Tal valor foi obtido através da média das medições e difere, para cada *Strain Gage*, do valor nominal informado pelo fabricante. Os valores obtidos encontram-se na Tabela a.2 do apêndice II.

Para o cálculo das tensões, considerou-se a equivalência entre aumento da resistência elétrica com o aumento da tensão mecânica atuando na superfície, descrito por Zaro et al., 1982, como:

$$GF = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon} \quad (4.9)$$

Onde, GF é o *gage fator* (medida da sensibilidade do material do extensômetro),  $\Delta R$  a diferença entre a resistência medida e nominal,  $R_0$  a resistência nominal do sensor e  $\varepsilon$  a deformação medida na direção longitudinal. Através da consideração da relação entre tensão e deformação pelo módulo de elasticidade, obteve-se a equação que transforma o valor de resistência medido, em ohms, em tensão, em MPa.

$$\sigma_x = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right) \cdot E}{GF} \quad (4.10)$$

Onde  $\sigma_x$  é a tensão normal medida na direção longitudinal do chassi e E o módulo de elasticidade do material.

Desta forma, obtiveram-se os gráficos do apêndice IV, para as regiões onde foram aplicados os *strain gages*.

Pode-se afirmar que o carregamento aplicado ao chassi é complexo, isto devido a seus diferentes pontos de aplicação, ao grande valor de peso e a função estrutural com a qual cada componente atua na estrutura. Desta forma, uma maneira satisfatória para realizar a primeira análise das tensões é através da verificação da influência do peso próprio da viga na estrutura.

Nota-se, através dos gráficos do apêndice III, que, nas regiões em questão, obteve-se o comportamento esperado para a estrutura sem nenhum carregamento, ou seja, obteve-se tensões trativas na mesa superior e tensões compressivas na mesa inferior para os extensômetros aplicados na região central do chassi. Ainda, nota-se que este comportamento inverteu para a região VII. Uma explicação plausível para tanto é o fato de que as regiões consideradas estão localizadas em pontos distintos da estrutura, nos quais nota-se um comportamento de viga bi-apoiada na região central e de viga em balanço na região VII, o que faz com que as tensões tenham o seu comportamento invertido em relação ao local da compressão e da tração (mesa superior ou inferior) na seção.

Analisando o gráfico da Figura 4.15, têm-se uma comparação entre os resultados obtidos para a região central do chassi (compreendida pelas regiões II, III e IV). Nele, é possível observar que as tensões se comportam de modo semelhante no decorrer da montagem dos subsistemas, tanto para a mesa superior da viga como para a inferior. Ainda, pode-se fazer algumas observações referentes ao comportamento da estrutura nesta que é a região mais solicitada do chassi.

Observa-se, primeiramente, que, para o carregamento 02, as tensões são de tração na mesa inferior e de compressão na mesa superior, porém com módulos ligeiramente diferentes. Isto se dá pelo fato de que, a presença do quadro lateral vertical e de diversas travessas ao longo da parte superior age no sentido de deslocar a linha neutra da estrutura composta, fazendo com que as tensões na mesa inferior sejam levemente maiores em módulo. As Figura 4.16 e Figura 4.17 ilustram tal comportamento.

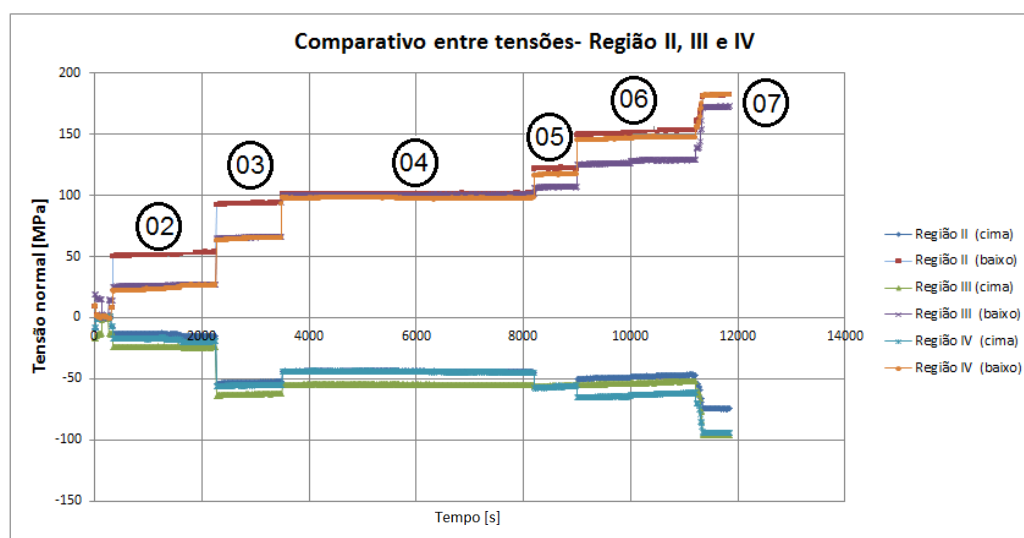


Figura 4.15- Histórico das tensões com os carregamentos aplicados ao chassi durante a montagem. Os números das etapas referenciam os carregamentos da figura a.2 do apêndice II.

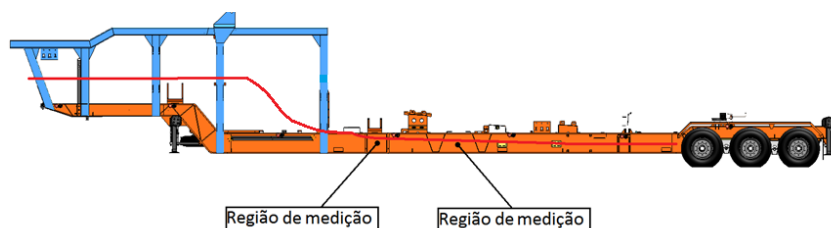


Figura 4.16 – Deslocamento aproximado da linha neutra da estrutura do chassi e quadros laterais verticais. Comportamento de viga composta na região do quadro.

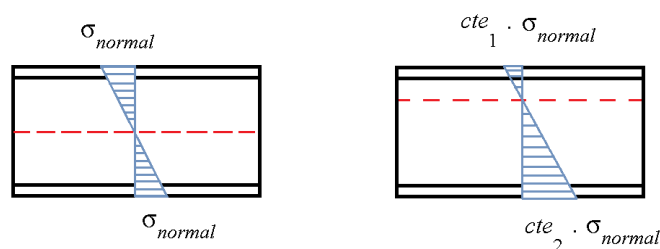


Figura 4.17 – Alteração das tensões na mesa superior e inferior quando da alteração da posição da linha neutra em uma viga.

Para o carregamento 03, no qual é adicionado o secador (componente com maior peso da usina de asfalto), nota-se o mesmo comportamento descrito anteriormente.

Com a adição deste componente, foi adicionada uma região de rigidez elevada ao chassi, que faz com que haja um deslocamento da linha neutra em direção ao centro do secador. Tal comportamento foi observado com as medidas da medição 04, na qual, tanto a mesa inferior como a superior, apresentam um comportamento de tração com a adição das cargas referentes aos silos frios, correia transportadora e anel de RAP. O comportamento de tração observado em ambos os lados também é influência do ponto de aplicação da carga nesta medição. Grande parte do carregamento foi aplicado na parte do chassi onde se tem o comportamento de viga em balanço. Desta forma, o pé mecânico, a viga e as colunas verticais agem como um balanço, fazendo com que o carregamento aplicado tracione a região inferior da viga mais próxima ao centro do chassi (do lado oposto ao pé mecânico e da aplicação da carga). Na medição 05 foram adicionadas a tubulação e dois motoredutores, a localização da aplicação deste carregamento é a central, de forma que não há a ocorrência do comportamento notado na medição anterior, isto pois a carga está sendo apoiada na localidade dos extensômetros analisados, contribuindo então para a tração na mesa inferior e para a compressão na mesa superior. Para o caso da medição 06, têm-se a adição do sub-sistema denominado Redler. Tal componente é fixado por uma união forjada em dois pontos na mesma lateral da estrutura, ambos exteriores a região na qual o secador contribui com a adição de uma rigidez elevada em paralelo a viga. Desta forma, temos que a parte inferior da viga tem menor rigidez associada por componentes ligados a estrutura do que a parte superior, fazendo com que as tensões geradas na mesa inferior sejam muito maiores do que as observadas na mesa superior. Com a medida 07, observamos o aumento das tensões trativas na mesa inferior e a o aumento das tensões compressivas na mesa superior, isto ocorre pois alterou-se a condição de contorno vista até o momento, passando dos apoios no pé mecânico para o apoio no cavalinho. Tal alteração fez com que o peso de todos os componentes passassem a atuar sobre uma viga bi-apoiada, elevando as tensões de forma proporcional.

#### 4.6. Comparação entre resultados numéricos e experimentais

Para a condição de peso próprio e apoio nos pés mecânicos, obteve-se pequenas diferenças percentuais para as regiões I, III e VII, de modo que o comportamento nessas regiões foi bem representado numericamente, tanto em relação ao comportamento de tração ou compressão, como em módulo.

Para as simulações com carregamento, as tensões obtidas diferiram consideravelmente das simuladas. Entretanto, o comportamento de tração ou compressão quando da análise da tensão normal foi obtido para a grande maioria dos casos. Uma comparação entre os valores simulados e obtidos com a instrumentação encontra-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Comparação entre os valores simulados e obtidos com a instrumentação.

Localização do ponto considerado	Configuração da simulação considerada								
	Peso próprio (apoio nos pés mecânicos)			Usina completa (apoio pés mecânicos)			Usina completa (apoio no cavalinho)		
	Simulação	Análise experimental	Diferença percentual	Simulação	Análise experimental	Diferença percentual	Simulação	Análise experimental	Diferença percentual
Região I - mesa superior	-17.1 MPa	-15.19 MPa	-13%	-117.8 MPa	-	-	-92.5 MPa	-	-
Região I- mesa inferior	17.5 MPa	14.28 MPa	-23%	96.1 MPa	-	-	101 MPa	-	-
Região II - mesa superior	-17.6 MPa	-8 MPa	-120%	-117.9 MPa	-47.9 MPa	146%	-85.97 MPa	-75 MPa	15%
Região II- mesa inferior	17.8 MPa	7.7 MPa	-131%	106.1 MPa	152 MPa	-30%	116.6 MPa	180 MPa	-35%
Região III - mesa superior	-16.2 MPa	-13.5 MPa	-20%	-114.52 MPa	-54 MPa	112%	-76.8 MPa	-97 MPa	-21%
Região III- mesa inferior	16.2 MPa	13.9 MPa	-17%	104.74 MPa	128 MPa	-18%	104.9 MPa	171 MPa	-39%
Região IV - mesa superior	-16.2 MPa	-7.6 MPa	-113%	-122.3 MPa	-63 MPa	94%	-86 MPa	-94 MPa	-9%
Região IV- mesa inferior	16.4 MPa	7.4 MPa	-122%	11.3 MPa	146 MPa	-92%	116 MPa	181 MPa	-36%
Região VII - mesa superior	4.5 MPa	1.5 MPa	-200%	-18.6 MPa	9.56 MPa	-295%	-25.5 MPa	-27 MPa	-6%
Região VII- mesa inferior	-4.7 MPa	-1.7 MPa	-176%	18.9 MPa	81.5 MPa	-77%	58.5 MPa	120 MPa	-51%
Região VIII - mesa superior	4.8 MPa	-0.9 MPa	633%	-5.08 MPa	201 MPa	-103%	13.6 MPa	160 MPa	-92%
Região VIII- mesa inferior	-5 MPa	0.5 MPa	1100%	7.2 MPa	80.7 MPa	-91%	45.9 MPa	130 MPa	-65%

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi verificar e validar as condições utilizadas para simular um chassi de uma usina de asfalto. Para tanto, primeiramente, propôs-se um modelo analítico e numérico para a suspensão por feixe de molas em tandem. Tal modelo se mostrou eficiente do ponto de vista da obtenção das reações medidas por rodado. Obteve-se reações com diferenças, entre o real e o simulado de, no máximo, 21%, o que é aceitável dada às simplificações imposta na simulação realizada. Ainda, com o modelo proposto, foi possível obter os diferentes valores de reação por eixo observado com o uso da suspensão em tandem, mesmo que tal comportamento seja diferente do proposto pela teoria.

Com a realização da análise experimental, obtiveram-se dados de grande valor para comparação com a simulação por elementos finitos. Analisando apenas o comportamento para cada adição de carga, foi possível inferir sobre a função estrutural que alguns componentes exercem no chassi; o secador ao ser montado sobre na usina, adiciona rigidez na estrutura, fazendo com que ocorra um deslocamento da linha neutra global. O mesmo comportamento é notado na região onde existem colunas verticais. Nesta região, a estrutura funciona como uma viga composta, tendo a sua linha neutra no centro da coluna. Tal fato é evidenciado pela obtenção de tensões normais trativas tanto na mesa superior como na mesa inferior para a usina completamente montada.

A comparação dos resultados da instrumentação com as simulações numéricas se apresentou satisfatória para as regiões I, III e VII (para o carregamento sendo somente o peso próprio). Nestas regiões, as diferenças chegaram a apenas 13%. Quando a comparação foi realizada para a usina completamente montada, as diferenças aumentaram consideravelmente. Tais erros estão associados principalmente ao valor aproximado das massas aplicado para cada subsistema, ao modo na qual tais cargas estão conectadas à estrutura e ao posicionamento dos centros de gravidade das mesmas. Para minimizar os erros associados às simplificações, é aconselhável a alteração no modo como as massas são aplicadas, passando a utilização das geometrias dos subsistemas em detrimento dos *point mass* unidos à estrutura através de MPC's 184-link. Tais geometrias, sendo consideradas indeformáveis, adicionariam maior tempo para processamento da solução, porém representariam de forma mais realística a transmissão de forças e momentos, bem como a adição de rigidez no comportamento geral da estrutura. Sugere-se ainda a realização de simulações com análise global-local, de forma que um maior número de detalhes possa ser considerado. Também é aconselhável uma realização da análise experimental com maior quantidade de Strain gages aplicados, tanto nas mesmas regiões já instrumentadas, como em regiões não analisadas neste estudo. Tal necessidade é evidenciada para que seja possível descartar quaisquer erros associados a pequenos danos

gerados ao sensor durante a montagem da usina e para que se tenha maiores quantidade de pontos para comparação com a simulação. Ressalta-se ainda que é aconselhada a realização de medições que considerem um intervalo menor entre as aplicações das cargas (maior numero de medições como as citadas na Figura a.2 do apêndice II), propiciando assim maiores informações acerca da influência de cada componente nas deformações e tensões agindo na estrutura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Niklas, P.; “**Leaf Spring Modeling.**” Ideon Science Park-22370 Lund, Sweden, 2006

Rill, G., Kessing, N., Lange, O., Meier, J.; “**Leaf Spring Modelling for Real Time Applications**”; 18<sup>th</sup> LAVSD-Symposium in Atsug, Japan, 2003.

Peres, G., “**Uma metodologia para simulação e análise estrutural de veículos de transporte de carga**”. 2006. Dissertação de mestrado. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Marczak R.J.; “**Elementos Finitos: Curso de introdução ao método**”, Apostila Editada pelo Autor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

Agilent Technologies, “**Agilent 34970A Data Acquisition: Product Overview.**”, <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-5290EN.pdf>. Acessado em 23/09/2012

Zaro, M.A.; Borchardt, I.G., “**Instrumentação: guia de aulas práticas**”, Ed. UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1982.

Ansys Inc, “**Manual Help v.14**”. Ansys Help.

Leadsman, R., Shih, S., “**Heavy and Medium Duty Vehicle Suspension-Related Performance Issues and Effective Analytical Models for System Design Guide**”. Paper, Meritor Automotive, Troy, 2005.

Gillespie, Thomas D.; “**Fundamentals of Vehicle Dynamics**”, SAE, Warrendale, 1992

## APÊNDICE I

### DIMENSÕES DOS PRINCIPAIS PERFIS DO CHASSI E MASSA DOS SUBSISTEMAS

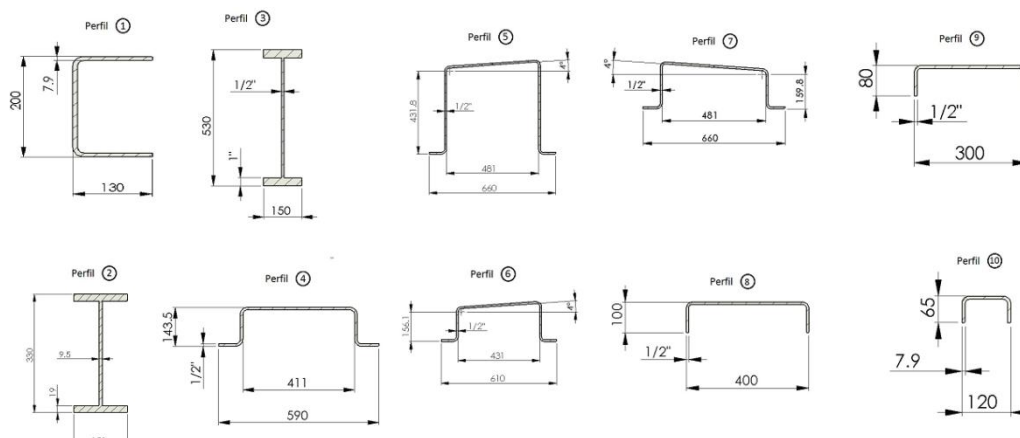


Figura a.1– Principais perfis estruturais do chassi e suas dimensões

Tabela a.1– Valor da massa e posição do centro de gravidade para cada componente montado na usina de asfalto. Valores obtidos aproximadamente através de verificação em software CAD.

Subsistema	Massa Subsistema [kg]	Coordenadas CG [m]		
		X	Y	Z
Silo e dosadora 1	7600	4.86	3.57	0
Silo e dosadora 2	1384	1.95	3.61	0
Silo e dosadora 3	1260	-1	3.31	0
Correia transportadora	1860	-1	1.79	0
Câmara de aspiração	906	3.19	2.93	0.3
Câmara de combustão	750	6.87	2.3	0.25
Anel de RAP	832	13.83	2.26	0.21
Secador	273	10.71	2.47	0.15
Banco de roletes 1	5350	10.75	1.53	0.85
Banco de roletes 2	358	8.29	1.25	0.85
Banco de roletes 3	358	12.18	1.53	-0.54
Banco de roletes 4	358	8.29	1.26	-0.54
Compressor	562	12.18	1.21	1.23
Elevador de arraste	2953	9.55	1.88	-1.27
Exaustor	694	10.19	3.94	-0.38
Soprador	220	15.47	1.73	-0.23
Tubulação	1190	16.32	3.58	1.19
Filtro de mangas	3672	12.41	2.93	0
Cabine	1080	17.68	1.55	-1.45
Misturador	1348	5.78	1.22	0.2
Rodado 1	400	14.76	0.45	0
Rodado 2	400	15.8	0.45	0
Rodado 3	400	17.25	0.45	0
<b>Total</b>	<b>34208</b>	Sistema de coordenadas com origem no pino-rei		

Tabela a.2 – Propriedades aplicadas à malha em elementos finitos do chassi e número total de elementos gerados.

Physics preference	Mechanical
Relevance	60
Advanced Size Function	Curvature
Relevance Center	Medium
Smoothing	Medium
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	30°
Min. Size	5.5
Max Face Size	24.525
Growth Rate	1.5
Número total de elementos	172267

## APÊNDICE II

### CARREGAMENTOS APLICADOS PARA CADA MEDIÇÃO E ZEROS DOS SENSORES

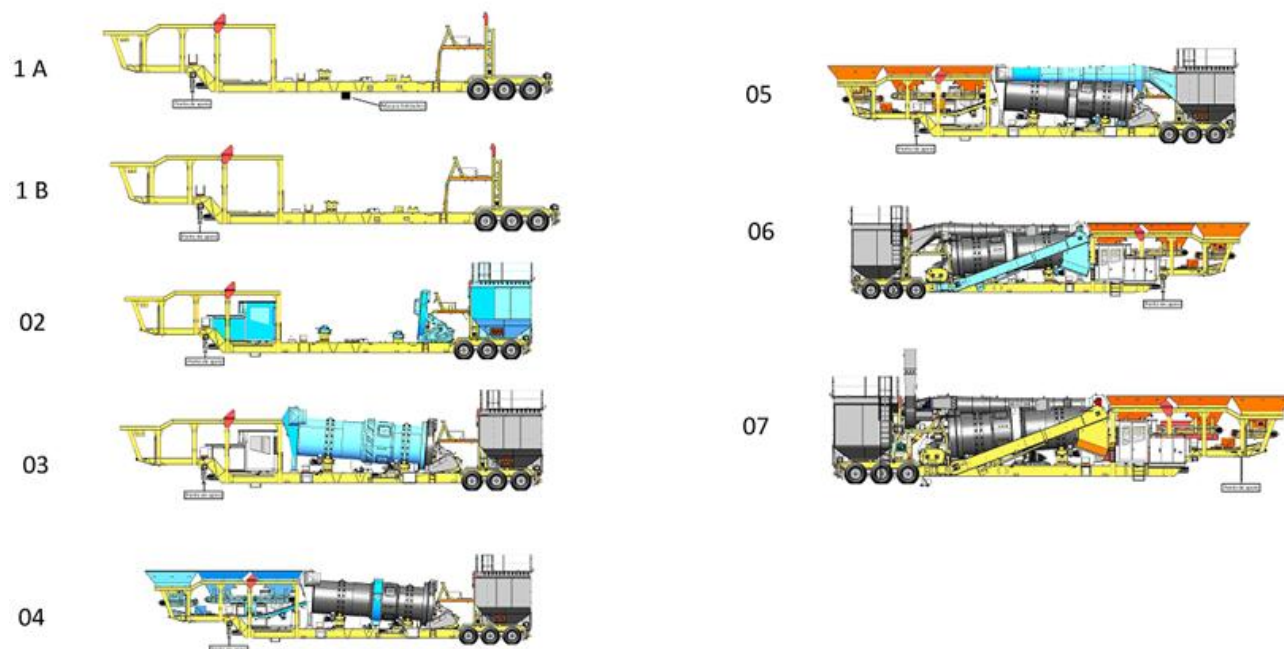


Figura a.2 – Carregamento aplicado em cada medição realizada.

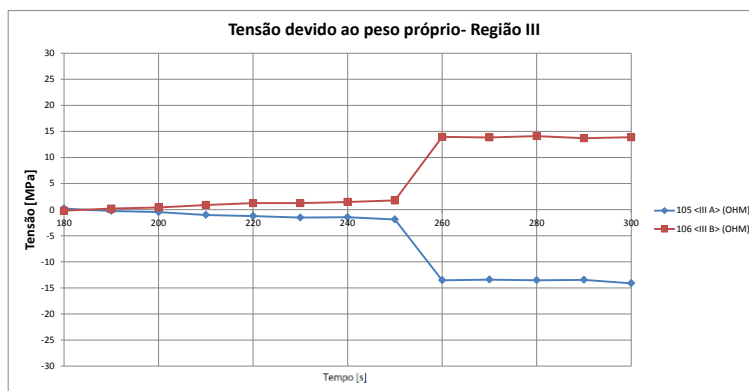
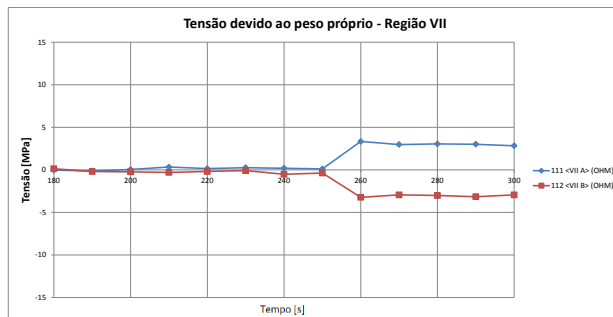
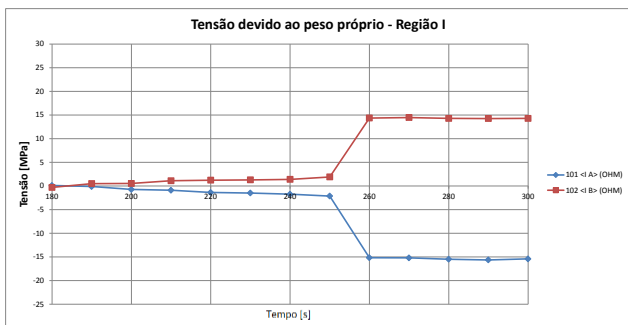
Tabela a.3 – Valores de resistência medidos com a viga sem carregamento e apoiada nos macacos hidráulicos. Valores considerados como “zero” para cálculo das tensões.

Canal	Resistência medida
I-A	349.67 $\Omega$
I-B	348.468 $\Omega$
II-A	347.424 $\Omega$
II-B	348.736 $\Omega$
III-A	37.69673 $\Omega$
III-B	347.563 $\Omega$
IV-A	347.851 $\Omega$
IV-B	348.722 $\Omega$
V-A	348.769 $\Omega$
V-B	348.418 $\Omega$
VII-A	348.361 $\Omega$
VII-B	349.198 $\Omega$
VIII-A	346.809 $\Omega$
VIII-B	349.411 $\Omega$



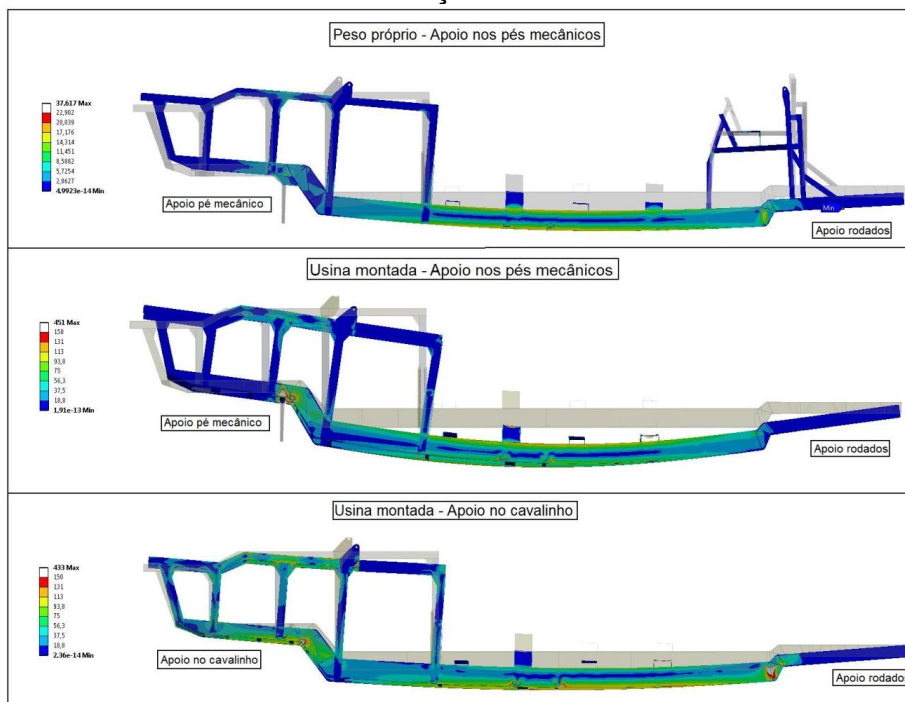
### APÊNDICE III

#### ANÁLISE EXPERIMENTAL: INFLUÊNCIA DO PESO PRÓPRIO DO CHASSI NAS TENSÕES MEDIDAS COM A INSTRUMENTAÇÃO NAS REGIÕES I, III E VII.



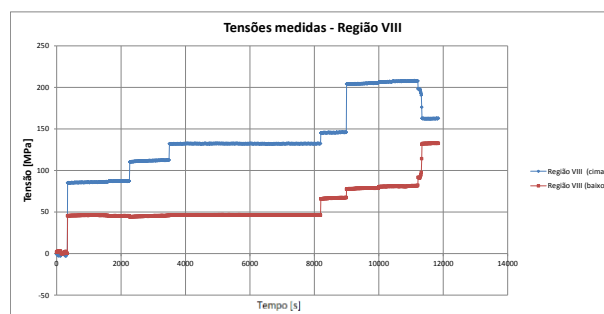
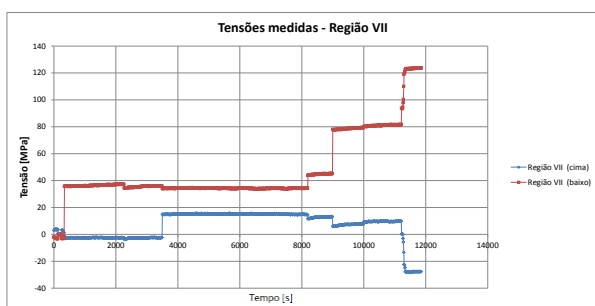
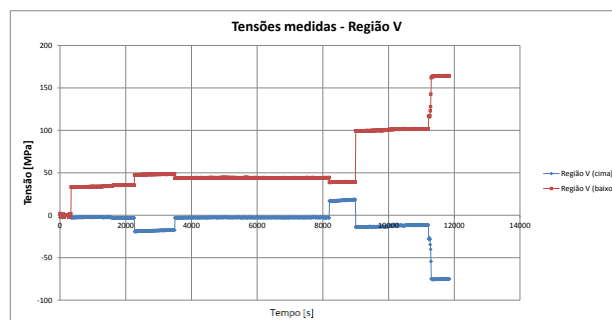
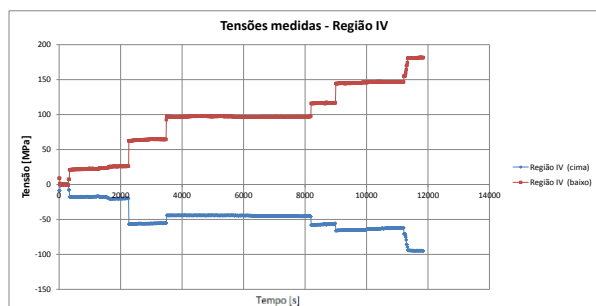
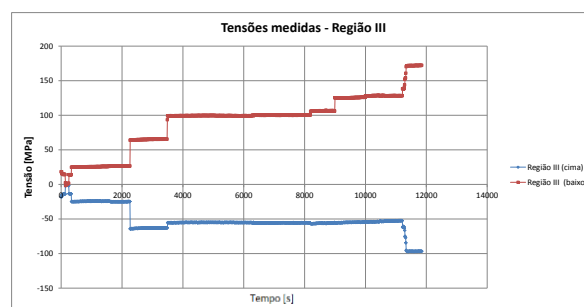
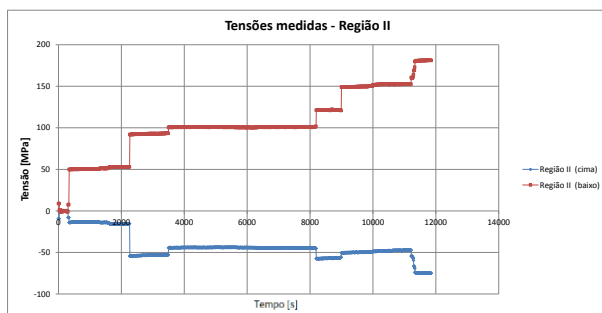
### ÂPENDICE IV

#### SIMULAÇÕES REALIZADAS – CONFIGURAÇÃO DEFORMADA E INDEFORMADA



## APÊNDICE V

### ANÁLISE EXPERIMENTAL: HISTÓRICO DE TENSÕES PARA CADA REGIÃO DE APLICAÇÃO



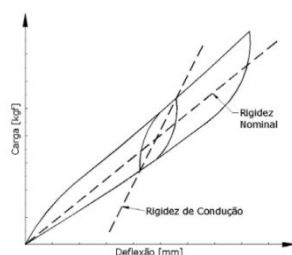
**ANEXO I****CURVA DE RIGIDEZ COM HISTERESE DE UMA SUSPENSÃO COM FEIXE DE MOLAS**

Figura A.1 – Curva de rigidez da suspensão por feixe de mola e indicativo da histerese e do comportamento da rigidez de condução.

**ANEXO II**

Tabela A.1 – Limitação e PBTC de vários países.

País	LIMITAÇÃO DE MASSA				PBTC (Toneladas)
	1 EIXO R. Simples	1 EIXO R. Duplo	2 EIXOS R. Duplo Tandem	3 EIXOS R. Duplo Tandem	
ARGENTINA	6	10.5	18	25.5	45
BOLÍVIA	6	11	18	25	45
BRASIL	6	10	17	25.5	53
CHILE	7	11	18	25	45
PARAGUAI	6	10.5	18	25.5	45
URUGUAI	6	10.5	18	25.5	45
PERU	7	11	18	25	48
VENEZUELA	6	13	20	27	48
EQUADOR	6	12	20	26	48
AFRICA DO SUL	6	9	18	24	45
AUSTRÁLIA	6	9	16.5	20	45

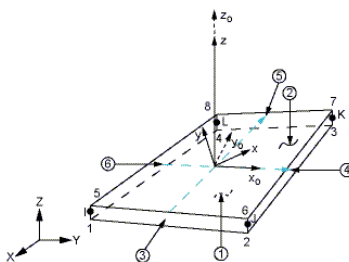
**ANEXO III****ELEMENTOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS**

Figura A.2 – Elemento SHELL 181 utilizado para representar a malha em elementos finitos do chassi.