

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE SEMI-REBOQUES CANAVIEIROS

por

Vagner do Nascimento

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Junho de 2009.

DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE SEMI-REBOQUES CANAVIEIROS

por

Vagner do Nascimento

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Vilson João Batista, Dr. Eng.

Comissão de Avaliação:

Prof. **Joyson Luiz Pacheco**, Dr. Eng.
UFRGS – PROMEC/EE

Prof. **Antônio Lilles Machado Tavares**, Dr. Eng.
UFPeL – FAEM – DER

Prof. **Luiz Carlos Gertz**, Dr. Eng.
ULBRA – Canoas – RS

Prof. **Arnaldo Ruben Gonzalez**, Dr. Eng.
UFRGS – DEMEC/EE

Prof. **Horácio Antônio Vielmo**, Dr. Eng.
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Junho de 2009.

*O conhecimento é o diferencial em
qualquer situação e momento da vida.*

Vagner do Nascimento

*Dedico este trabalho à minha mãe
Elenir e ao meu irmão Sander.*

AGRADECIMENTOS

À empresa Randon Implementos, pela disponibilização de todos os recursos utilizados para execução deste trabalho e especialmente a Gilmar Poletto Neves, pela liberação de todos os dados indispensáveis para o êxito deste trabalho.

Ao meu amigo e colega de mestrado, Vicente Bergamini Puglia, pelas várias ajudas prestadas no final da execução desta dissertação e pelos vários momentos de estudo e descontração durante a execução das cadeiras do mestrado.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, Leonardo Hoss e Tiago Martins Alfonso, pelas dicas e ajuda importantes em muitos momentos.

À minha namorada, Mônica, pela compreensão em todos os momentos de ausência, e pelo incentivo à conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Vilson João Batista, pela orientação e oportunidade.

RESUMO

No presente trabalho apresenta-se um estudo de caso com auxílio de uma metodologia sistemática para aplicação de métodos estruturados ao desenvolvimento de novos produtos em uma indústria do ramo de implementos rodoviários. Considerando os implementos rodoviários como produtos industriais, pretende-se trabalhar as formas e processos de criação e aperfeiçoamento na geração de idéias e busca por soluções até a fase do projeto final de um novo produto. Também, foram considerados os processos de fabricação, modelamento do produto, e análises estruturais numéricas, que são ferramentas de auxílio na otimização do produto final. Paralelamente, foram consideradas as informações dos testes experimentais para auxiliar e validar as análises estruturais numéricas, contribuindo desta forma para o aperfeiçoamento de requisitos na fase do projeto de produto, antes de sua fabricação e lançamento no mercado. Assim, este estudo apresenta como foco o desenvolvimento de um semi-reboque para transporte de cana picada, com o intuito de exemplificar e aplicar de forma prática as ferramentas estudadas e seus respectivos usos no produto em questão. Os testes de campo foram instrumentados com sensores extensométricos resistivos para coleta de dados de níveis de tensão e posterior comparação com as análises numéricas. Os dados do produto, na fase de testes experimentais, foram obtidos em condições reais de trabalho junto a uma usina do setor sucro alcooleiro. Finalmente, considerando-se os resultados de desempenho do produto, semi-reboque rodotrem para transporte de cana picada, pode-se identificar que o uso de uma metodologia de referência para o desenvolvimento de produto, apoiada por ferramentas de análise estrutural, com testes de campo instrumentados, são confiáveis e úteis aos profissionais da engenharia de projeto e manufatura.

Palavras chave: Projeto do Produto, Engenharia da Mobilidade, Implemento Rodoviário, Projeto Conceitual, Análise Estrutural Numérica, Teste Experimental.

ABSTRACT

“Design development of sugar cane crop semi-trailers”

In this paper work, a case study using a systematic methodology is presented to apply structured methods for designing new products in an industry of road implements field. Considering the road implements as industrial products, it is intended to deal with forms and processes of developing ideas and improving the generating of ideas and quest of solutions until the final phase project of a new product. The manufacturing process will also be taken into consideration, besides the modeling of the product and numerical structural analysis which are tools to help optimize the final product. In addition, will be taken in considerations the information of experimental tests to avail and validate the numerical structural analysis, and through it contribute to the improvement of requirements during the design of the product before its manufacture and market launch. This study presents the development of a semi-trailer to transport chopped sugar cane, with the purpose of exemplify and put on practice the tools which are studied and their uses applied in the product concerned. The field tests were instrumented with strain gage sensors to collect data on tension levels for later comparison to numerical analysis. This way, it is expected to have reliable data as the product will operate in a plant following through real work situations during these experimental tests. Finally, considering the results of product performance - road train semi-trailer to transport chopped sugar cane - can be identified in this study that the use of a method of reference to product development, supported by structural analysis tools, and instrumented field tests are reliable and extremely useful to the professional activities of design and manufacturing engineering.

Keywords: Product Project, Mobility Engineering, Road Implements, Conceptual Project, Numerical Structural Analysis, Experimental Test.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral	1
1.2	Objetivo Específico	2
1.3	Justificativa.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Aspectos Básicos do Projeto Conceitual	4
2.2	Procedimento Sistemático para o Desenvolvimento de um Produto	4
2.2.1	Engenharia de Sistemas.....	5
2.2.2	Análise de valores	6
2.2.3	Métodos de Projeto.....	7
2.3	Planejamento do Produto	8
2.3.1	Execução do Planejamento do Produto	8
2.3.2	A Prática do Planejamento do Produto	12
2.4	Métodos de Solução com Ênfase Intuitiva	12
2.5	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	13
3	EXECUÇÃO DO PROJETO	15
3.1	Planejamento do Produto	15
3.1.1	Análise da Situação e Formulação de Estratégias de Busca.....	15
3.1.2	Busca de idéias para o produto.....	15
3.1.3	Seleção de idéias de produto	16
3.1.4	Definição de produtos	16
3.2	Concepção de Produto.....	16
3.2.1	Análise Crítica da Verificação do Projeto	17
3.2.1.1	Cálculo do Volume da Caixa de Carga	17
3.2.1.2	Sistema de descarga.....	18
3.2.2	Desenvolvimento e Montagem de Projeto de Produto.....	20
3.2.2.1	Projeto Preliminar do produto	20
3.2.2.2	Projeto do Chassi do Semi-Reboque.....	22

3.2.2.3	Projeto do Quadro de Giro do Semi-Reboque.....	23
3.2.2.4	Projeto da Caixa de Carga do Semi-Reboque	25
3.2.2.5	Projeto da Mesa do Pino-Rei.....	27
3.2.3	Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).....	31
4	ANÁLISE ESTRUTURAL NUMÉRICA COMPUTACIONAL	33
4.1	1º Caso de Estudo - Simulação de Flexão do Chassi	33
4.2	2º Caso de Estudo - Simulação de Flexão 2 do Chassi	36
4.3	3º Caso de Estudo - Simulação de Torção do Chassi.....	39
4.4	4º Caso de Estudo - Simulação de Torção 2 do Chassi.....	42
4.5	5º Caso de Estudo - Simulação de Basculamento da Caixa de Carga.....	45
5	TESTES EXPERIMENTAIS DE CAMPO.....	54
5.1	Procedimento dos Testes Experimentais.....	55
5.1.1	Veículo Vazio.....	55
5.1.2	Veículo Carregado.....	55
5.2	Informações Gerais.....	55
5.2.1	Instrumentação Utilizada para o Teste	55
5.3	Desenvolvimento do Teste	56
5.3.1	Tipos de Carregamentos utilizados e configurações	56
5.3.2	Pontos Instrumentados	56
5.4	Resultados do Teste Experimental	64
5.4.1	Distribuição e tipo de Carga para o teste.....	64
5.4.2	Gráficos de Tensão.....	65
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	66
6.1	Considerações sobre os Métodos Usados na Execução do Projeto.....	66
6.1.2	Considerações sobre a FMEA	66
6.2	Considerações sobre a Análise Estrutural Numérica Computacional	66
6.3	Considerações sobre os Testes Experimentais de Campo.....	67
6.4	Redução de Massa do Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência.....	68
6.4.1	Semi-Reboque Canavieiro Standard	68
6.4.2	Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência.....	69
6.4.3	Comparativo de Redução de Massa entre os Semi-Reboques	70

7	CONCLUSÕES.....	72
7.1	Sugestões para Futuros Trabalhos	73
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXO A – GRÁFICOS DE TENSÃO	76
A.1	Estático Inicial após zeramento dos canais da Configuração 01	76
A.2	Estático Inicial após zeramento dos canais da Configuração 02	77
A.3	Primeiro Carregamento - Configuração 01	78
A.4	Segundo Carregamento - Configuração 02	80
A.5	Terceiro Carregamento - Configuração 02	82
A.6	Quarto Carregamento - Configuração 01	84
A.7	Quinto Carregamento - Configuração 01	86
A.8	Sexto Carregamento - Configuração 02	88
A.9	Tensões Durante o Carregamento	90
A.10	Tensões Durante o Descarregamento	92
A.11	Desenvolvimento dos arquivos estáticos.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Procedimento geral de análise de valor, segundo a DIN 69910 [PAHL et al., 2005]...	6
Figura 2.2. Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto [PAHL et al., 2005]	7
Figura 2.3. Procedimento no planejamento do projeto [PAHL et al., 2005].....	10
Figura 2.4. Modelo do processo de projeto proposto por Pahl et al. (2005)	11
Figura 3.1. Sólido gerado no Pro/E para cálculo da Capacidade Volumétrica.	17
Figura 3.2. Simulação do basculamento da caixa de carga do semi-reboque	19
Figura 3.3. Desenho do projeto preliminar do produto	21
Figura 3.4. Chassi do Semi-Reboque	23
Figura 3.5. Quadro de Giro do Semi-Reboque.....	24
Figura 3.6. Caixa de Carga do Semi-Reboque	26
Figura 3.7. Detalhes internos da Caixa de Carga	26
Figura 3.8. Vista externa da Mesa do Pino-Rei.....	28
Figura 3.9. Vista interna da Mesa do Pino-Rei	28
Figura 3.10. Semi-Reboque Canavieiro completo	29
Figura 4.1. 1ª condição de carregamentos	34
Figura 4.2. Tensões da 1ª simulação	34
Figura 4.3. Tensões da 1ª simulação na região mais solicitada.....	35
Figura 4.4. Deformação da 1ª simulação.....	36
Figura 4.5. 2ª condição de carregamentos	37
Figura 4.6. Tensões da 2ª simulação	37
Figura 4.7. Tensões da 2ª simulação na região mais solicitada	38
Figura 4.8. Deformação da 2ª simulação.....	39
Figura 4.9. 3ª condição de carregamentos	40
Figura 4.10. Tensões da 3ª simulação.....	40
Figura 4.11. Tensões da 3ª simulação na região mais solicitada	41
Figura 4.12. Deformação da 3ª simulação.....	42
Figura 4.13. 4ª condição de carregamentos	43
Figura 4.14. Tensões da 4ª simulação.....	43
Figura 4.15. Tensões da 4ª simulação na região mais solicitada	44
Figura 4.16. Deformação da 4ª simulação.....	45
Figura 4.17. 5ª condição de carregamentos	46
Figura 4.18. Tensões da 5ª simulação.....	47

Figura 4.19. Tensões na parte dianteira do produto da 5ª simulação	47
Figura 4.20. Tensões na parte traseira do produto da 5ª simulação.....	48
Figura 4.21. Tensões Locais na traseira com tubo modificado da 5ª simulação	49
Figura 4.22. Deformação da 5ª simulação.....	50
Figura 4.23. Deformação da 5ª simulação – vista traseira do produto	51
Figura 5.1. Foto do produto instrumentado para os testes experimentais.....	54
Figura 5.2. Strain Gauge tipo longitudinal modelo LY41-6/120 (a), tipo roseta RY81-3/120 (b)	55
Figura 5.3. Strain Gauges longitudinais instrumentados no perfil inferior da lateral direita da caixa de carga (L1, L2 e L8).....	57
Figura 5.4. Strain Gauge longitudinal instrumentado próximo ao 1º eixo da suspensão na cinta inferior traseira do lado direito (L6)	57
Figura 5.5. Strain Gauge longitudinal instrumentado próximo ao reforço do quadro de giro (L4)	58
Figura 5.6. Strain Gauge longitudinal instrumentado no perfil superior e na lateral direita da caixa de carga (L6 e L9)	58
Figura 5.7. Strain Gauge longitudinal instrumentado próximo à sinaleira lado direito (L11)	58
Figura 5.8. Roseta instrumentada no lado direito da travessa próxima à chapa de atrito do pino rei (R2).....	59
Figura 5.9. Strain Gauge longitudinal instrumentado no perfil acima da sinaleira lado direito (L7)	59
Figura 5.10. Roseta instrumentada na lateral direita da caixa de carga (R3)	60
Figura 5.11. Strain Gauge longitudinal instrumentado na cinta inferior do chassi (L5)	60
Figura 5.12. Strain Gauge longitudinal no perfil superior (L10) e na lateral esquerda da caixa de carga (R7 e L10)	61
Figura 5.13. Strain Gauge longitudinal instrumentado na cinta próxima a chapa de atrito do pino rei – lado direito (L14).....	61
Figura 5.14. Roseta instrumentada na alma dianteira da lateral direita da viga do chassi (R1)....	62
Figura 5.15. Roseta instrumentada na cinta do pescoço na lateral direita da viga do chassi (R8)	62
Figura 5.16. Roseta instrumentada na travessa acima do suporte da suspensão na lateral direita do chassi (R4)	63
Figura 5.17. Rosetas instrumentadas nos cantos superiores esquerdo (R5) e direito (R6) – lado interno traseiro da caixa de carga	63

Figura 5.18. Strain Gauge longitudinal instrumentado no centro do SR – embaixo do assoalho da caixa de carga (L12)	64
Figura 6.1. Participação de Peso por montagens do Semi-Reboque Canavieiro Standard	69
Figura 6.2. Participação de Peso por montagens do Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência	70
Figura A.1. Estático 1 após zeramento – Configuração 01	76
Figura A.2. Estático 2 após zeramento – Configuração 01	76
Figura A.3. Estático após zeramento (1) – Configuração 02	77
Figura A.4. Estático após zeramento (2) – Configuração 02	77
Figura A.5. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h)	78
Figura A.6. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h)	78
Figura A.7. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 01 (vel. 20 a 60 km/h)	79
Figura A.8. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 01 (vel. 20 a 60 km/h)	79
Figura A.9. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 20 a 60 km/h)	80
Figura A.10. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 20 a 60 km/h)	80
Figura A.11. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 40 a 60 km/h) ...	81
Figura A.12. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 40 a 60 km/h) ...	81
Figura A.13. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)	82
Figura A.14. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)	82
Figura A.15. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h) ...	83
Figura A.16. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h) ...	83
Figura A.17. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 01 (40 kmh forçando nas valetas laterais)	84
Figura A.18. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 01 (40 kmh forçando nas valetas laterais)	84
Figura A.19. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 01 (40 kmh forçando nas valetas laterais)	85
Figura A.20. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 01 (40 kmh forçando nas valetas laterais)	85
Figura A.21. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 01 (40 kmh forçando nas valetas laterais)	86
Figura A.22. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 01 (40 kmh forçando nas valetas laterais)	86
Figura A.23. Chão carregado aparecido salto (1) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h).....	87

Figura A.24. Chão carregado aparecido salto (1) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h).....	87
Figura A.25. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)	88
Figura A.26. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)	88
Figura A.27. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 02 (35 a 40 kmh forçando nas valetas laterais).....	89
Figura A.28. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 02 (35 a 40 kmh forçando nas valetas laterais).....	89
Figura A.29. Carregamento (1) – Configuração 01	90
Figura A.30. Carregamento (2) – Configuração 01.....	90
Figura A.31. Carregamento (1) – Configuração 02.....	91
Figura A.32. Carregamento (2) – Configuração 02.....	91
Figura A.33. Descarregamento (1) – Configuração 01 (SR dianteiro).....	92
Figura A.34. Descarregamento (2) – Configuração 01 (SR dianteiro).....	92
Figura A.35. Descarregamento (1) – Configuração 02 (SR dianteiro).....	93
Figura A.36. Descarregamento (2) – Configuração 02 (SR dianteiro).....	93
Figura A.37. SG longitudinais estáticos ao longo de todo o teste.....	94
Figura A.38. SG rosetas estáticos ao longo de todo o teste.....	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. FMEA de Projeto / Processo do chassi do semi-reboque.....	32
Tabela 4.1. Otimização das travessas da suspensão.....	52
Tabela 5.1. Distribuição dos sensores – Configuração 01 (lado esquerdo) e Configuração 02 (lado direito)	56
Tabela 6.1. Comparativo de Redução de Massa entre os Semi-Reboques.....	71
Tabela A.1. Relação do nome dos arquivos estáticos	95

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

3D – Tridimensional

a – Aceleração [m/s^2]

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AR – Alta Resistência

CAD – *Computer Aided Design* (Desenho Auxiliado por Computador)

CN – Canavieiro

CP – Cana Picada

E – Módulo de elasticidade longitudinal [MPa]

FMEA – *Failure mode and effects analysis* (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos)

F – Força aplicada [N]

g – Aceleração da gravidade [$9,81 \text{ m/s}^2$]

L – Litros

LD – Lado Direito

LE – Lado Esquerdo

LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

MEF – Método dos Elementos Finitos

PBT – Peso Bruto Total

PBTC – Peso Bruto Total Combinado

Pro/E – *Pro Engineer*

QFD – *Quality Function Deployment* (Desdobramento da Função Qualidade)

RS – *Reference Stress* (Tensão de Referência)

SG – *Strain Gauge*

SR – Semi-Reboque

t – Toneladas

V – Velocidade [km/h]

V. M. – Tensão de Referência de Von Mises [MPa]

ν – Coeficiente de Poisson

σ – Tensão [MPa]

σ_y – Tensão de escoamento [MPa]

σ_1, σ_2 – Tensões Principais [MPa]

ϕ – Ângulo do plano de tensões (graus) a partir do eixo α da Roseta

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país é fortemente dependente do transporte de cargas para o escoamento de sua produção. Tudo o que é produzido só alcança os consumidores e o mercado interno e externo se existe uma infra-estrutura de transporte disponível. Hougaz, 2005, comenta que um dos alicerces do aumento das relações comerciais entre os países foi possível graças ao grande avanço tecnológico dos meios de transporte.

No Brasil a modalidade de transporte de carga predominante é a rodoviária correspondendo a cerca de 60% do total. Embora outras formas de transporte sejam mais vantajosas, por mimetismo ou falta de visão nacionalista o Brasil optou pela adoção extensiva do transporte rodoviário [Hougaz, 2005].

Até o momento as empresas fabricantes de implementos rodoviários não têm se preocupado com uma metodologia para desenvolvimento estrutural de seus produtos, pois itens tais como peso não são prioridades no projeto desses veículos. O desenvolvimento sempre fora baseado na experiência dos fabricantes, em problemas estruturais anteriores e em testes experimentais. Dessa maneira as estruturas acabam apresentando-se superdimensionadas e com peso muito elevado [Peres, 2006].

Com a acirrada concorrência do mercado consumidor em virtude, principalmente, da globalização, os fabricantes necessitaram rever seus conceitos de projeto. Além de veículos mais leves, o mercado passou a exigir qualidade e durabilidade dos produtos. Os preços passaram a ser ditados pelo mercado, e com isso o percentual de lucro das empresas ficou reduzido.

A aplicação fora-de-estrada é a característica principal do segmento canavieiro, por isso a confiabilidade nos equipamentos, aliado aos baixos custos de manutenção, são fatores muito importantes no momento da compra.

Os produtos para o transporte de cana-de-açúcar necessitam estar adequados às necessidades dos clientes, pois neste segmento cada usina tem suas especificidades operacionais que vão desde o lado e o sistema de descarga, a altura e a largura da mesa onde a cana é descarregada, até o tipo de cana-de-açúcar transportada.

1.1 Objetivo Geral

Estudo do desenvolvimento de um semi-reboque canavieiro com base nos conceitos de engenharia da mobilidade e que auxilie a criação de um produto com soluções inovadoras, diferenciais competitivos, buscando-se maior participação de mercado.

1.2 Objetivo Específico

Desenvolver o projeto de um semi-reboque canavieiro do tipo rodotrem para transporte de cana picada da lavoura até a usina, com a estruturação do projeto em diversas fases, facilitando a criação do produto por meio da utilização de práticas de análise estrutural numérica acompanhadas de testes experimentais e de acordo com a estratégia de pesquisa e desenvolvimento da empresa Randon Implementos S/A.

1.3 Justificativa

A justificativa para o trabalho vem a ser a necessidade de realizar mudanças na maneira como a empresa executa o projeto e desenvolvimento deste tipo de produto, por meio da aplicação de uma metodologia baseada em métodos estruturais numéricos e métodos de estruturação do projeto de produto.

1.4 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o mercado de implementos rodoviários, bem como as técnicas utilizadas na concepção dos projetos de implementos, e porque há uma necessidade de ter-se uma metodologia estruturada para criação de projetos. Além disso, são apresentadas as principais características do produto utilizado no estudo.

O capítulo 2 apresenta a pesquisa bibliográfica, onde se apresenta a metodologia de projeto proposta, com o planejamento e as etapas definidas para desenvolvimento do projeto.

O capítulo 3 traz o desenvolvimento do projeto, aplicado no estudo do Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência. São apresentados todos os estudos de planejamento do produto, assim como a concepção do mesmo, desde a análise crítica da verificação do projeto, até o desenvolvimento detalhado do produto em um software de modelamento 3D.

No capítulo 4 é feita a análise estrutural numérica computacional, pelo método dos elementos finitos, em todas as principais estruturas que formam o Semi-Reboque, buscando-se a otimização do projeto e comparação com dados experimentais.

No capítulo 5 é realizada a análise experimental no produto, na qual utilizou-se sensores para medir tensões e acelerações. Os testes foram realizados numa usina de beneficiamento de cana de açúcar. As medições foram executadas com o produto em diversas condições de trabalho. Além disso, através da análise experimental foi possível validar-se a análise estrutural numérica.

O capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados obtidos, realizando-se considerações sobre os métodos usados na execução do projeto. São apresentadas, também, considerações sobre a análise estrutural numérica. Faz-se uma discussão baseada nos dados experimentais de campo, comparando-os com os resultados da análise estrutural numérica, embasando as conclusões sobre o dimensionamento do produto. São mostrados os ganhos em massa que o uso de um novo material proporcionou, detalhando as massas do produto em estudo, por montagens que compõe o semi-reboque e ainda comparando as reduções de massa obtidas nesse novo modelo em estudo com um modelo Standard.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões sobre a análise das metodologias adotadas para criação e estruturação do projeto do produto e o entendimento do comportamento estrutural do Semi-Reboque Canavieiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos Básicos do Projeto Conceitual

Projetar é um processo de otimização com objetivos predeterminados e condicionantes em partes conflitantes. Os requisitos variam em função do tempo, de modo que uma solução de projeto só pode ser objetivada ou almejada de maneira otimizada, sob as condicionantes existentes na época da solicitação.

Do ponto de vista organizacional, o projeto participa de forma significativa do ciclo de vida de um produto. O ciclo inicia-se por meio de uma demanda do mercado ou por uma vontade, começando pelo planejamento do produto. Esse processo também representa uma geração de valor desde a idéia até o produto, onde o projetista somente consegue desenvolver e finalizar sua tarefa, se trabalhar em estreita colaboração com outras áreas e pessoas de outras especialidades (PAHL et al., 2005).

2.2 Procedimento Sistemático para o Desenvolvimento de um Produto

Em face da grande importância do desenvolvimento de um produto no momento certo e que desperte interesse por parte do mercado, torna-se necessário um procedimento para boas soluções, que seja planejável, flexível, otimizável e verificável. Tal procedimento só é aplicável quando, além do necessário conhecimento especializado, os projetistas souberem trabalhar de modo sistemático auxiliado por medidas organizacionais.

Por metodologia de projeto, entende-se como procedimento planejado com indicações concretas de condutas a serem observadas no desenvolvimento e no projeto de sistemas técnicos, resultantes de conhecimentos na área da ciência de projeto, da psicologia cognitiva e também da experiência com diferentes aplicações. Disto fazem parte os procedimentos para interligação de etapas de trabalho e fases do projeto tanto pelo conteúdo quanto pela organização, que de maneira flexível são adaptados ao respectivo problema. Faz-se necessário a observância dos objetivos gerais, a definição de regras e princípios (estratégias), especialmente para a configuração, bem como de métodos para a solução de problemas de projeto ou subtarefas específicas.

Apesar de toda essa metodologia para elaboração de projetos, não se pode desvalorizar a intuição e experiência do projetista. Essa metodologia complementa a criatividade que o projetista dispõe para execução de projetos bem estruturados.

O projeto metodológico possibilita uma racionalização eficaz do processo de projeto e produção. Nos projetos novos, os procedimentos coordenados e progressivos, inclusive em níveis parcialmente mais abstratos, possibilitam a geração de documentação, reaproveitável, das soluções. A estruturação dos problemas e das tarefas facilita a percepção das possibilidades de emprego de soluções consolidadas provenientes de desenvolvimentos anteriores e a utilização de catálogos de soluções. A progressiva concretização dos princípios de solução possibilita a seleção precoce e a otimização com menor volume de trabalho. Para o departamento de projeto, sobretudo para o processo de produção, as séries construtivas e a metodologia modular representam um importante passo de racionalização.

Uma metodologia de projeto deverá:

- Possibilitar um procedimento orientado por problemas, ou seja, ser aplicada, em qualquer atividade de projeto, independentemente da especialidade;
- Incentivar invenções e conhecimentos, isto é, facilitar a busca por soluções ótimas;
- Ser compatível com conceitos, métodos e conhecimentos de outras disciplinas;
- Não gerar soluções somente por acaso;
- Permitir uma fácil transferência das soluções de tarefas semelhantes;
- Adequada para ser usada no computador;
- Possível de ser ensinada e aprendida;
- Estar em conformidade com os conhecimentos da psicologia cognitiva e da ergonomia, ou seja, facilitar o trabalho, economizar tempo, evitar decisões erradas e arregimentar colaboradores ativos e interessados;
- Facilitar o planejamento e o controle do trabalho em equipe num processo integrado e multidisciplinar de geração de um produto e
- Ser orientação e diretriz para os gerentes de projeto de equipes de desenvolvimentos (PAHL et al., 2005).

2.2.1 Engenharia de Sistemas

Procedimentos e métodos da engenharia de sistemas têm adquirido crescente relevância em processos sócio-econômicos. No mínimo de forma implícita, ela é fundamental para o procedimento metódico. Como ciência interdisciplinar, a engenharia de sistemas disponibiliza métodos, processos e ferramentas para análise, planejamento, seleção e configuração otimizada de sistemas complexos.

Partindo do fato de que criações técnicas representam sistemas, é natural verificar se os métodos de engenharia de sistemas são aplicáveis ao processo de projeto, uma vez que os objetivos da engenharia de sistemas correspondem amplamente aos requisitos relativos a um método de projeto. O procedimento da engenharia de sistemas baseia-se na percepção geral de que problemas complexos são adequadamente solucionados em determinadas etapas de trabalho. Essas etapas de trabalho deverão ser orientadas pelas mesmas etapas de qualquer atividade de desenvolvimento, pela análise e pela síntese (PAHL et al., 2005).

2.2.2 Análise de valores

O método de análise de valores conforme DIN 69910 tem como objetivo principal a redução dos custos. Porém para esse objetivo é proposto um procedimento que corresponde a um procedimento metódico global, especialmente para desenvolvimentos subseqüentes. A fig. 2.1 mostra as principais etapas de trabalho da análise de valores que, via de regra, parte de uma construção exigente e efetuando uma análise com relação às funções e aos custos a serem satisfeitos para, em seguida, com novas metas de custos, buscar idéias de soluções voltadas para a função.

<i>Preparar o projeto</i>	<i>Desenvolver idéias de solução</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Escalar a equipe • Análise de valor - Delimitar o escopo • Definir a organização e o seqüenciamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Coletar as idéias existentes • Buscar novas idéias
<i>Análise do objeto (situação atual)</i>	<i>Definir soluções</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Identificar funções • Determinar o custo das funções 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar as idéias das soluções • Detalhar as soluções das idéias de soluções selecionadas • Avaliar e decidir com relação às soluções
<i>Definir situação-alvo</i>	<i>Materializar soluções</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Definir as funções-alvo • Determinar os demais requisitos • Relacionar metas de custo com as funções-alvo 	<ul style="list-style-type: none"> • Detalhar as soluções selecionadas • Planejar a concretização

Figura 2.1. Procedimento geral de análise de valor, segundo a DIN 69910 [PAHL et al., 2005]

Para a apuração e avaliação dos custos aplicam-se diversos métodos. O trabalho em equipe é imprescindível, ou seja, a comunicação entre os especialistas de lógica, compra, projeto, produção e orçamento (equipe de análise de valores) assegura a consideração integrada dos requisitos, do material, da configuração, dos processos de produção, do controle de estoque, da normalização e das realidades da distribuição.

Ultimamente, registra-se um empenho no sentido de que uma análise de valores não seja efetuada somente posterior à apresentação dos desenhos de anteprojeto ou de desenhos de

componentes específicos, mas já durante o desenvolvimento de conceito, no sentido de que uma configuração de valor torne ativos os aspectos mencionados. Com isso, a análise de valores se aproxima dos objetivos de uma metodologia geral de projeto (PAHL et al., 2005).

2.2.3 Métodos de Projeto

A fig. 2.2 representa uma linha mestra, a qual podem ser correlacionadas etapas de trabalho mais específicas. Também é dada uma ênfase especial ao caráter interativo do procedimento, isto é, a execução das etapas de trabalho não deve ser vista de forma rígida, mas ocorre normalmente pulando etapas de trabalho específicas e/ou retornando etapas anteriores.

Essa flexibilidade está em sintonia com a prática de projeto, sendo de grande importância para a aplicação destes planos de procedimentos.

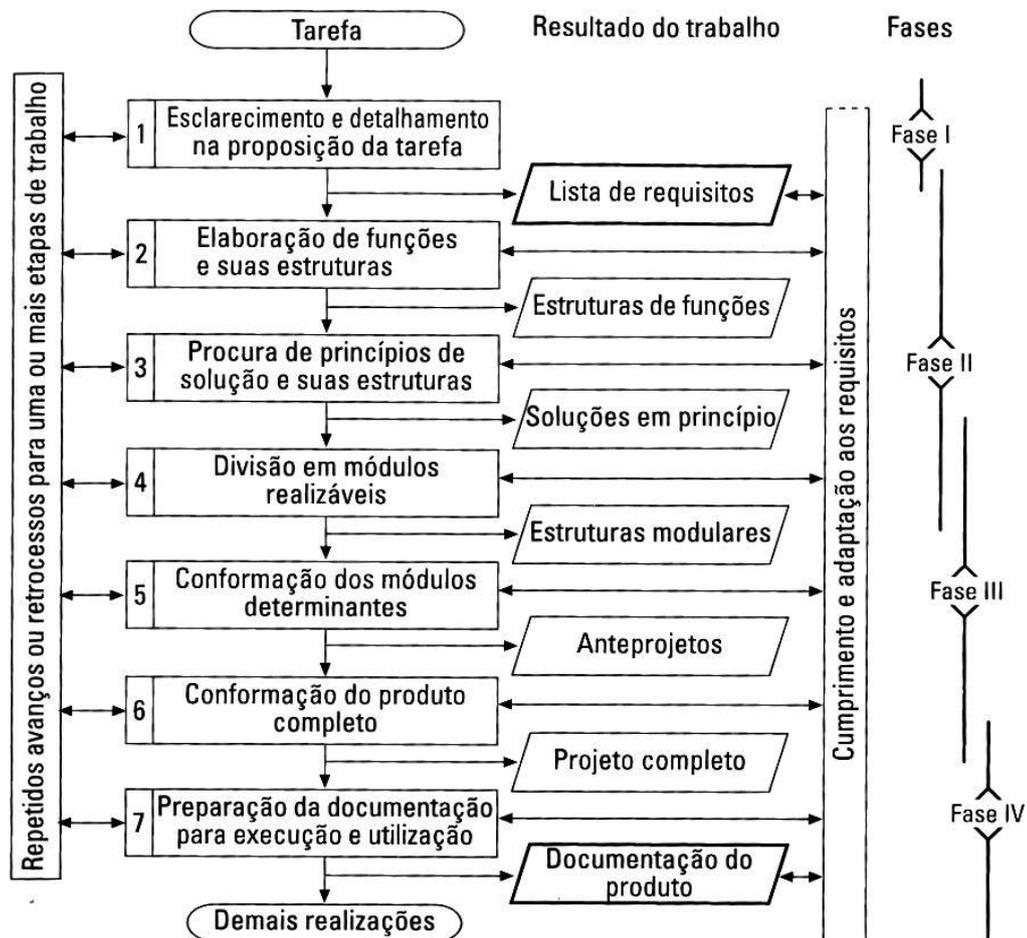


Figura 2.2. Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto [PAHL et al., 2005]

2.3 Planejamento do Produto

Os métodos para o planejamento e busca de soluções podem ser aplicados em diferentes fases do processo de projeto. Assim, por exemplo, um método de busca como o “*brainstorming*” ou método da galeria pode ser útil tanto na procura de um princípio de solução durante a fase de planejamento do produto, como também de concepção na busca de soluções auxiliares durante o processo de anteprojecto.

Nos projetos novos, o processo de projeto se inicia pela etapa de concepção, com base na lista de requisitos. Se, esta lista, geralmente na forma de uma lista preliminar, for resultado de um planejamento precedente, será importante para o projetista conhecer os critérios básicos e as etapas de planejamento do produto, a fim de melhor compreender e eventualmente complementar a formação do leque de requisitos. Se pelo contrário, não houver ocorrido um planejamento formal precedente, o próprio projetista, com seus conhecimentos de planejamento, poderá gerenciar a execução das respectivas etapas ou ele próprio executá-las empregando um procedimento simplificado.

As tarefas de um engenheiro de desenvolvimento ou projetista apresentam graus diferenciados de inovação. A maioria dos projetos é constituída por um projeto adaptativo ou alternativo. Este tipo de projeto não deve ser equiparado a projetos que não exijam muito do projetista. No contexto do planejamento do produto, uma diferenciação em relação à inovação é interessante:

- **Projeto inovador:** novas tarefas ou problemas são atendidos por novos princípios de solução ou uma nova combinação de princípios de soluções familiares.
- **Projeto adaptativo:** o princípio de solução é preservado e somente a configuração é adaptada às novas condições periféricas.
- **Projeto alternativo:** dentro de limites preestabelecidos é variado o tamanho e/ou arranjo dos componentes ou subconjuntos, o que é típico de séries construtivas e/ou sistemas modulares (PAHL et al., 2005).

2.3.1 Execução do Planejamento do Produto

Atualmente, as grandes empresas tentam, cada vez mais encontrar novos produtos por meio da abordagem metódica. Um aspecto importante do procedimento metódico é a possibilidade de melhor gerenciar os custos e o tempo para o planejamento e desenvolvimento de um produto. Entre outros poderiam ser os departamentos de *marketing* ou de gerência do produto que fariam esse trabalho preliminar.

Correspondentemente, em grande número de empresas também se transfere organizacionalmente, para o departamento de planejamento, o acompanhamento do produto (continuação do controle e avaliação da fabricação do produto) e o monitoramento do produto (análise do comportamento do preço e do sucesso no mercado, bem como a adoção de medidas corretivas) (PAHL et al., 2005).

A variável mais importante para a busca de novas idéias de um produto é o foco no cliente. Como método interessante para identificação das vontades do cliente e sua conversão em requisitos do produto foi introduzido o método QFD (*Quality Function Deployment*).

Há diversas propostas para o planejamento metódico de um produto que são regidas pelo procedimento conforme apresentado na fig. 2.3.

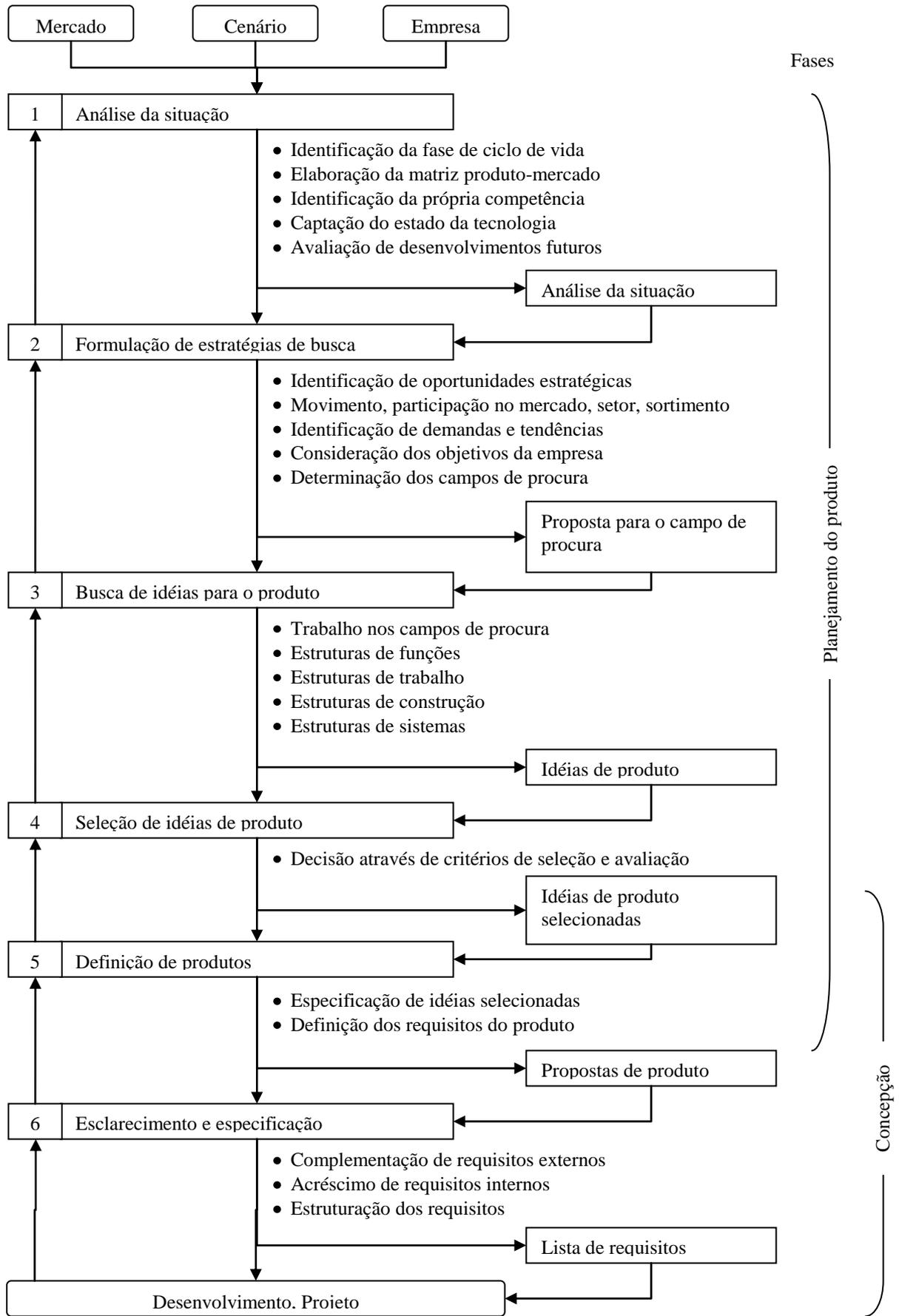


Figura 2.3. Procedimento no planejamento do projeto [PAHL et al., 2005]

Nas formas de organização orientada pelo produto, a responsabilidade central pelo desenvolvimento e subsequente produção de um grupo de produtos compete a diferentes setores da empresa, como engenharia do produto, engenharia de processos e engenharia de compras. Este último realizando desenvolvimentos em conjunto com fornecedores.

Projetos para novas formulações de tarefas e problemas são realizados utilizando novos princípios de solução. Tais princípios poderão resultar de uma seleção e combinação de princípios e tecnologias conhecidas. Inclusive nos casos em que colocações de tarefas conhecidas ou ligeiramente modificadas são solucionadas com o emprego de novos princípios de solução. Tais projetos requerem a passagem por todas as fases de um projeto, envolvimento de princípios físicos e de engenharia de processos, assim como uma abrangente elucidação técnica e econômica do problema.

Tarefas para produções em série e especialmente produções em massa requerem execução conscienciosa, com auxílio de modelos de construção e de protótipos, principalmente quanto à adequada durabilidade e também com relação aos aspectos econômicos. Para tanto, em parte, são necessárias várias etapas de desenvolvimento, assim como apresentado no modelo de processo da figura 2.4.

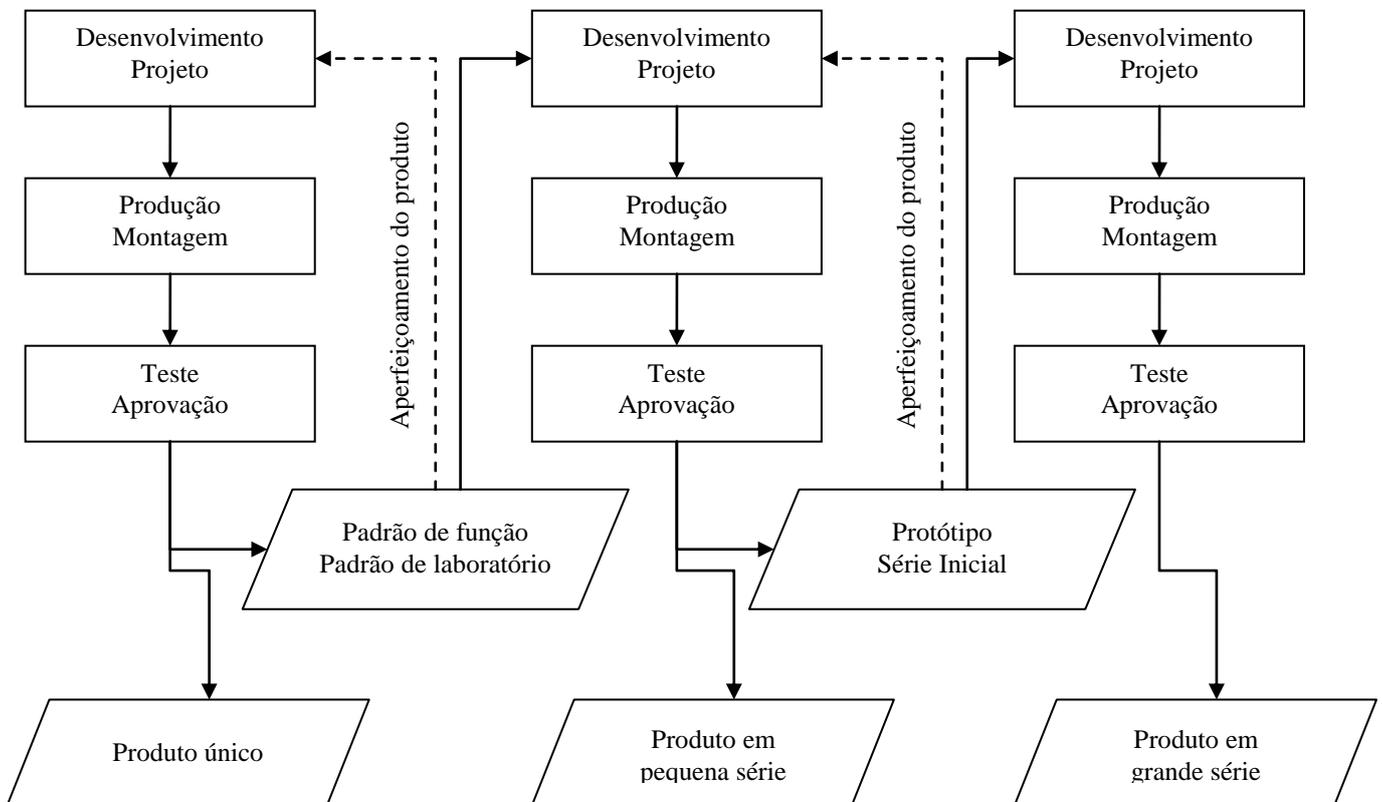


Figura 2.4. Modelo do processo de projeto proposto por Pahl et al. (2005)

2.3.2 A Prática do Planejamento do Produto

Devido à forte pressão da concorrência, os produtos novos precisam atender prioritariamente às necessidades do mercado, sendo produzidos a custos competitivos e utilizáveis com baixos custos operacionais. Acrescentam-se a isto as exigências cada vez maiores quanto à facilidade para o descarte final e para a reciclagem, como quanto aos menores impactos ambientais durante a fabricação e uso do produto. Produtos com requisitos tão complexos deveriam ser planejados metódicamente, a fim de atender adequadamente estas diversas condicionantes. Confiar em meras inspirações ou evoluções de desenvolvimentos, em geral, não atende estes requisitos. O planejamento metódico utiliza frequentemente os mesmos instrumentos que o desenvolvimento conceitual, ou seja, pessoal apropriadamente treinado pode ser intercambiado (PAHL et al., 2005).

2.4 Métodos de Solução com Ênfase Intuitiva

Existem muitos métodos que tem como objetivo impulsionar a intuição e estimular novos caminhos para a busca da solução por meio da associação de idéias. O mais simples e o mais praticado são conversas e discussões críticas com colegas, das quais nascem estímulos, melhorias e novas soluções. Se essas discussões forem conduzidas sem dar ensejo a divagações e, simultaneamente, se observarem os métodos de aplicação geral, do questionamento objetivo, da negação, da nova concepção, do avanço, etc, elas poderão ser muito eficazes e estimulantes.

Métodos com ênfase intuitiva como o *brainstorming*, sinética, método da galeria, método 635 e outros, tiram partido dos efeitos da dinâmica de grupo, tais como estímulos dados por associações que tem sua origem nas manifestações descontraídas dos participantes.

A maioria desses procedimentos havia sido sugerida para problemas não técnicos. No entanto, podem ser aplicados em qualquer área para gerar idéias novas, não convencionais e, por essa razão, também são aplicados na área de projeto.

Brainstorming pode ser melhor rotulado como clarão no pensamento, tempestade de pensamentos ou enxurrada de idéias. As sugestões para este procedimento objetivam criar os pressupostos para que um grupo de indivíduos receptivos, provenientes das mais diferentes especialidades, produza idéias imparciais que, por sua vez, poderão levar os demais participantes a novas idéias. Este método produz idéias imparciais e especula amplamente acerca de associações, ou seja, recordações e combinações de pensamentos até o presente ainda não percebidas no contexto atual ou, simplesmente despercebidas pelo pensamento consciente.

Este método também é adequado para a busca de soluções dos subproblemas que apareçam em sistemas existentes ou conhecidos. Além disso, o *brainstorming* tem um efeito colateral útil: todos os participantes recebem novas informações ou, no mínimo, novos estímulos sobre possíveis processos, aplicações, materiais, combinações, etc. Este grupo de constituição multidisciplinar dispõe de um espectro bastante amplo de especializações (por exemplo, projetista, engenheiro de montagem, engenheiro de produção, especialista de materiais, compras, entre outras). É surpreendente a grande quantidade de variedade e a extensão das idéias que um grupo desses é capaz de produzir. Em outras oportunidades, o projetista irá recordar as idéias expostas numa seção anterior. O *brainstorming* desencadeia novos impulsos, desperta o interesse em desenvolvimentos e representa uma quebra da rotina.

Sob o ponto de vista crítico, deve-se enfatizar que não se devem esperar grandes surpresas ou milagres de uma sessão de *brainstorming*. A maioria das propostas não é exequível do ponto de vista técnico ou econômico ou caso o sejam, freqüentemente já são conhecidas dos especialistas. O *brainstorming* pretende antes de tudo desencadear novas idéias, porém não fornece soluções acabadas. Em geral, os problemas são por demais complexos e difíceis para que possam ser resolvidos apenas por meio de idéias espontâneas. Porém, se a sessão produzir uma ou duas idéias novas e úteis, em cujo desenvolvimento valha à pena prosseguir ou, com as quais se consiga obter um pré-esclarecimento das possíveis direções em busca da solução, já se conseguiu bastante (PAHL et al., 2005).

2.5 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

O FMEA surgiu de estudos realizados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em 1963 e posteriormente foi utilizado na indústria automobilística. Serviu para identificar, quantificar e ordenar os possíveis defeitos potenciais de falha na fase de desenvolvimento de produtos, evitando que estas falhas não fossem passadas para o cliente (PUENTE et al., 2002).

O FMEA é um método para a análise de produtos e processos, em que se procura descobrir e antecipar os modos potenciais de falha, para evitar a sua ocorrência ou recorrência. O problema é focado a partir da causa, passando pelo modo e culminando no efeito. Causa é definida como o evento que pode provocar, gerar ou induzir a falha. O modo de falha é definido como a maneira que a falha se manifesta. E o efeito é a forma como o modo de falha afeta o sistema.

O FMEA tem por objetivo gerar um plano de ação que visa evitar falha no projeto ou processo do produto, avaliando a sua importância relativa. Por meio deste, são propostas ações

de melhoria para o produto buscando a solução para a falha identificada. Nesta análise são considerados separadamente os tipos de falha e os seus efeitos sobre o consumidor. Sua aplicação visa detectar as falhas antes da produção do protótipo, aumentando assim a confiabilidade do produto. Inicialmente o FMEA foi desenvolvido para o projeto de novos produtos ou processo. Devido a sua utilidade, o mesmo passou a ser aplicado de outras maneiras. Atualmente, também é utilizado para diminuir as falhas de produtos e processos existentes (ROZENFELD et al., 2006; BAXTER, 2000).

Para auxiliar na definição de prioridades de falha no FMEA, são utilizados três fatores: ocorrência, detecção e severidade. A ocorrência define a frequência da falha; a severidade corresponde à gravidade do efeito da falha; enquanto a detecção é a habilidade para detectar a falha antes que ela atinja o cliente. Através destes fatores, é realizada uma hierarquização de acordo com o risco potencial de cada falha, representado no FMEA e calculado através do RPN (*Risk Priority Number*) (FORD MOTOR COMPANY (1988) APUD LEAL et al., 2006).

O risco potencial de cada falha (R) é calculado para que a equipe de trabalho priorize as ações de trabalho aos itens de maior risco calculado. O cálculo do risco leva em conta a severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D). A equação utilizada é: $R = S \times O \times D$. As ações de trabalho devem visar a redução do efeito de severidade, a probabilidade de ocorrência ou a probabilidade de não detecção. Alterações de projeto podem reduzir a severidade ou a ocorrência do modo de falha. Ações dirigidas às etapas de validação de projeto podem reduzir a probabilidade de não detecção do modo. Como exemplos de ações podem ser utilizados a revisão do desenho de parte do projeto, revisão de especificação de materiais, investimento em novos equipamentos, revisão de planos de teste.

Para a diminuição dos riscos de falhas, o grupo de trabalho, utilizando conhecimentos, criatividade e outras técnicas, deve listar ações. Estas ações devem conter medidas com funções de limitar, dificultar, prevenir parcialmente ou totalmente a ocorrência dos riscos de falha. As medidas devem ser analisadas em relação a sua viabilidade e então definidas as que serão implantadas (ROZENFELD et al., 2006).

O FMEA é uma ferramenta que proporciona à empresa, através da catalogação das falhas dos produtos, que ações de melhoria no projeto baseadas em dados sejam monitoradas (melhoria contínua), que ocorra a diminuição de custos devido à prevenção da ocorrência de falhas e principalmente que os funcionários incorporem uma atitude de prevenção de falhas, de cooperação e de trabalho em equipe, tendo como foco a satisfação do cliente (ROZENFELD et al., 2006).

3 EXECUÇÃO DO PROJETO

Considerando o tema em questão, e para aumentar a probabilidade de sucesso do presente projeto, formalizou-se um conjunto de fases com descritivos que são as atividades responsáveis pelos recursos disponíveis e informações necessárias e/ou geradas durante o desenvolvimento. Esta formalização, também é denominada por metodologia de projeto, que de acordo com Pahl et al. (2005) descreve a mesma como um procedimento planejado com indicações concretas de condutas a serem observadas durante um desenvolvimento e no projeto de sistemas técnicos.

3.1 Planejamento do Produto

Dentro das atividades consideradas como de planejamento de produto descritas por Pahl et al. (2005), se podem citar:

- Análise da situação e formulação de estratégias de busca;
- Busca de idéias para o produto;
- Seleção de idéias de produto;
- Definição de produtos.

3.1.1 Análise da Situação e Formulação de Estratégias de Busca

Com a explosão da indústria Sucro Alcooeira no Brasil, um novo grande mercado de semi-reboques começou a ser desenvolvido. Este mercado foi o de semi-reboques canavieiros. Como característica, eles tem uma aplicação bastante severa e necessitam de um projeto reforçado gerando um produto pesado. Dessa forma, através de várias pesquisas no mercado brasileiro de semi-reboques para transporte de cana, constatou-se a necessidade de se contar com um novo produto que fosse mais leve, buscando assim maior capacidade de carga.

3.1.2 Busca de idéias para o produto

Com a busca de um produto mais leve, neste momento, começa-se a criar um interesse na utilização do aço de alta resistência para a fabricação de um semi-reboque canavieiro com diferencial competitivo. Estes semi-reboques têm a possibilidade de oferecer várias vantagens ao proprietário, como:

- Aumento de capacidade de carga em função do produto ter uma tara menor;
- Redução no consumo de combustível;
- Redução no consumo de pneus.

O cliente também será beneficiado quando necessitar rodar em rodovias que possuam balança, pois fará um menor número de viagens em função do produto apresenta uma capacidade de carga maior.

3.1.3 Seleção de idéias de produto

Através do brainstorming foi possível selecionar as melhores idéias para fabricação do produto de maneira a atender as necessidades elegidas na análise da situação.

A seleção das principais idéias são listadas a seguir:

- Implementar o uso do aço em alta resistência;
- Melhorar a estabilidade com uso de dispositivo anti-rolagem;
- Pé de apoio com ajuste de altura automático através de sistema hidro-pneumático em substituição ao de comando hidráulico;
- Redução de Tara.

3.1.4 Definição de produtos

Com base no estudo da seleção de idéias, verificou-se que um semi-reboque canavieiro constituído por aço de alta resistência que não será informada as especificações por questões de sigilo industrial, seria a melhor alternativa para a busca dos quesitos levantados na etapa anterior.

O produto a ser projetado terá as seguintes características:

- Nome do produto: Semi-Reboque Canavieiro Cana Picada Alta Resistência 12,5m;
- Comprimento de 12,5m, altura de 4,4m e largura de 2,6m;
- Basculamento lateral através de um sistema de quadro de giro e uma caixa de carga basculante sendo a caixa de carga puxada por correntes;
- Suspensão mecânica com feixes de mola duplo estágio;
- Quadro de giro com 4 mancais de giro;
- Material: Aço de alta resistência (chassi, caixa de carga e quadro de giro);
- Capacidade volumétrica de 90m³;
- Sistema Elétrico LED;
- Furos de amostragem padrão Usina Alta Mogiana.

3.2 Concepção de Produto

Dentro das atividades consideradas como de concepção de produto tem-se as seguintes fases:

- a) Análise Crítica da Verificação do Projeto;
- b) Desenvolvimento e Montagem de Projeto de Produto;
- c) Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).

3.2.1 Análise Crítica da Verificação do Projeto

Para o projeto do Semi-Reboque Canavieiro em chapa de alta resistência, foram realizadas as seguintes verificações:

- Cálculo do volume da caixa de carga;
- Sistema de descarga.

3.2.1.1 Cálculo do Volume da Caixa de Carga

O volume da caixa de carga foi encontrado através do software Pro ENGINEER modelando-se um sólido com as dimensões internas da caixa de carga. O Pro/E foi utilizado, pois fornece o volume com facilidade, já que a caixa foi modificada várias vezes durante o desenvolvimento do projeto.

Segue a figura 3.1 do sólido gerado no Pro/E e os dados correspondentes obtidos.

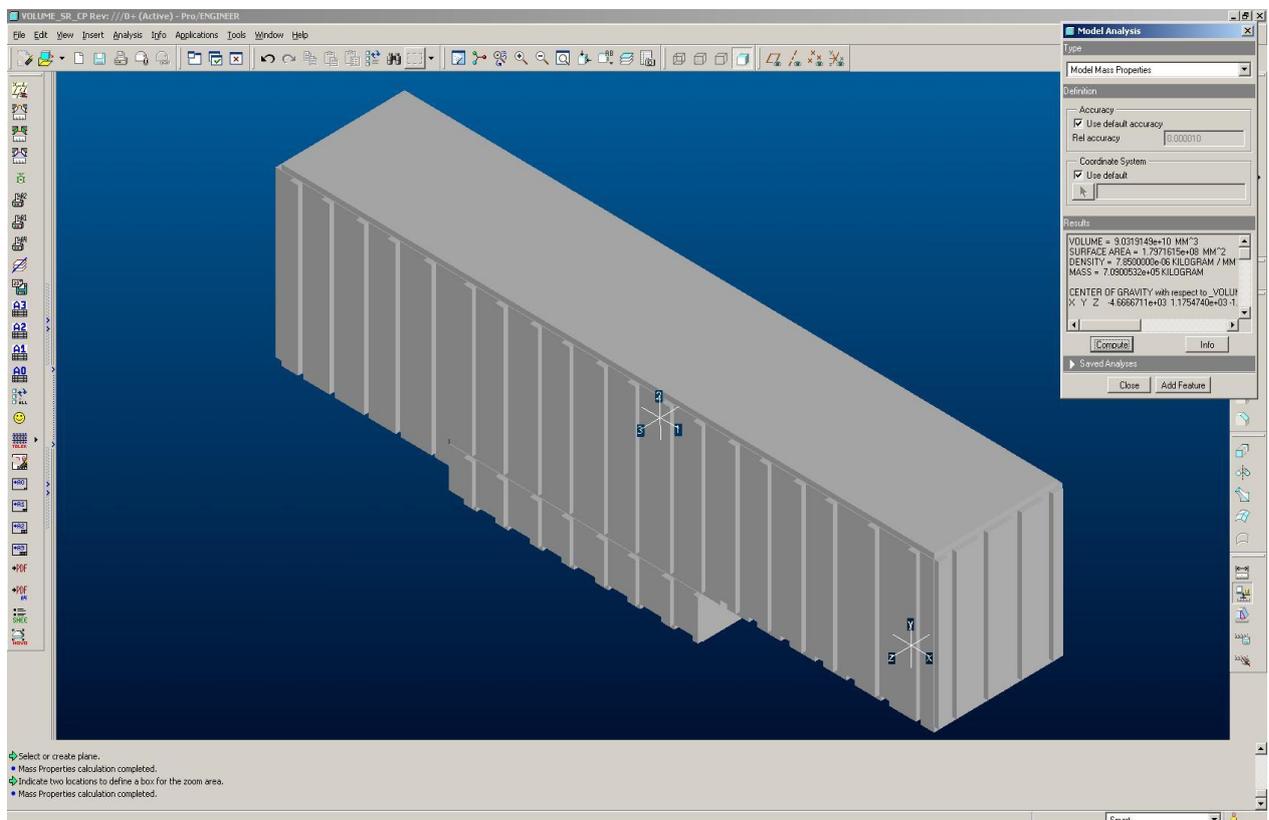


Figura 3.1. Sólido gerado no Pro/E para cálculo da Capacidade Volumétrica.

O volume do sólido que corresponde à capacidade volumétrica de carga do produto calculado corresponde a um valor de 90,032 m³.

3.2.1.2 Sistema de descarga

Nesta fase, fez-se um estudo para simular a operação de basculamento da caixa de carga na usina. No local onde o produto vai operar, esta operação é feita para descarregar a cana em uma moenda. O basculamento acontece devido a um sistema que funciona como se fosse um guincho que ergue a caixa de carga do semi-reboque canavieiro, fazendo o produto escoar para a moenda. Nas usinas este guincho é chamado de “hilo”.

A verificação feita com base no desenho enviado pela Usina Alta Mogiana, simulando o giro da caixa de carga, através do sistema CAD, demonstrou que existe uma folga de 200 mm entre o hilo e o produto, atendendo assim o processo de descarga utilizado pela usina.

O desenho da simulação de basculamento da caixa de carga do semi-reboque canavieiro baseado no sistema de hilo da usina mostra-se na figura 3.2.

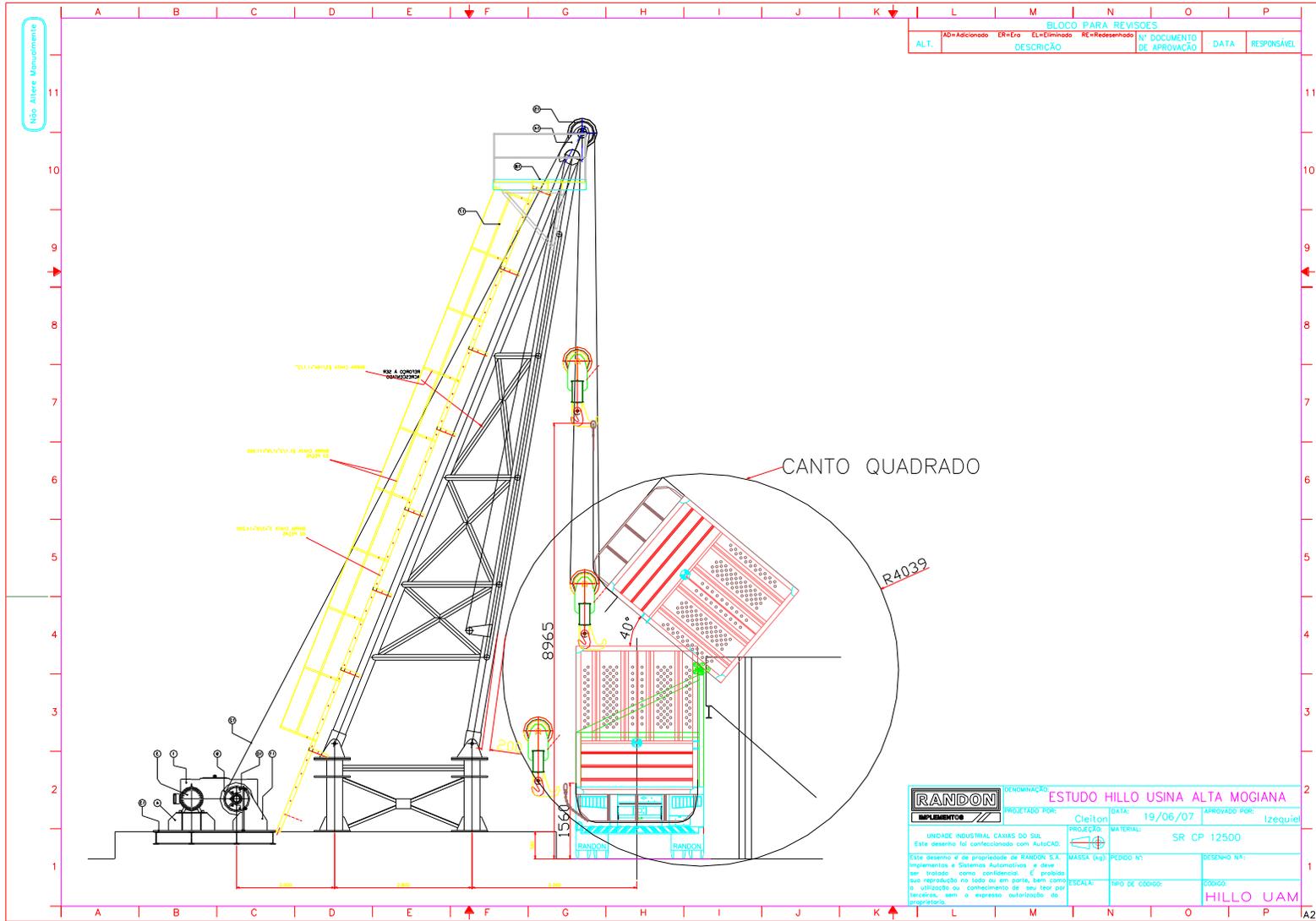


Figura 3.2. Simulação do basculamento da caixa de carga do semi-reboque

3.2.2 Desenvolvimento e Montagem de Projeto de Produto

Nesta fase do detalhamento do projeto, foram especificadas as dimensões gerais do produto final, bem como dos conjuntos e peças. Também executou-se o modelamento de todas as peças e conjuntos por meio da utilização do software Pro ENGINEER. Com o modelamento 3D é possível ter-se um grande diferencial, visto que a criação e estudos iniciais ocorrem em um modelo que se aproxima ao máximo do produto real. Dessa forma, podem ser realizados estudos de interferências e folgas, no momento da criação das peças e conjuntos, além de ter os recursos de massa, centro de gravidade e momento de inércia que o *software* fornece no desenvolvimento da peça ou produto. Esses recursos podem ser fundamentais para criação de produtos otimizados, ganhando-se em peso, estética e funcionalidade, sendo também de extrema utilidade para a fabricação e montagem de um produto.

Para o detalhamento deste projeto, elaboraram-se as descrições sobre as disposições dos elementos, formas, medidas e materiais para a construção do semi-reboque; foram também criados os documentos do projeto detalhado, na forma de desenhos técnicos e instruções que possibilitassem a sua manufatura. Toda a documentação foi compilada e registrada para atender suficientemente a fabricação e montagem do produto [Cristal, 2008].

3.2.2.1 Projeto Preliminar do produto

Primeiramente executou-se um projeto preliminar com as dimensões gerais conforme solicitado pelo cliente que testará o produto. As dimensões gerais são: comprimento de 12,5m, altura de 4,4m e largura de 2,6m.

O desenho do projeto preliminar (figura 3.3) mostra o produto por inteiro, com suas principais dimensões e geometria.

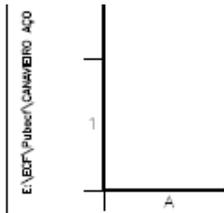


Figura 3.3. Desenho do projeto preliminar do produto

No projeto preliminar assim como no projeto final do produto, foi considerada a Norma de intercambiabilidade ABNT NBR ISO NM 1726, que especifica características dimensionais no sentido de garantir intercambiabilidade entre um caminhão trator e um semi-reboque acoplado ambos constituindo um veículo articulado. São especificadas certas dimensões incluindo aquelas de contorno da transição do pescoço assim como dimensões operacionais relativas a valores de ângulos. O projeto aqui estabelecido segue rigorosamente essa norma. Assim, o mesmo semi-reboque pode ser tracionado por um caminhão trator que possua dois ou três eixos.

3.2.2.2 Projeto do Chassi do Semi-Reboque

A principal estrutura a ser projetada em um semi-reboque é o chassi, que vem a ser a estrutura a qual vai servir de base para a montagem de todos os subconjuntos pertencentes ao semi-reboque, logo este deve ser a parte mais planejada de todo o semi-reboque. Além disso, também é a parte mais solicitada, já que praticamente todas as cargas e esforços passam por ele.

O chassi do semi-reboque canavieiro foi projetado com vigas perfil I, já que este tem uma resistência à torção e flexão condizente com a solicitação aplicada. Esse perfil é amplamente usado na fabricação de chassis estando consagrado como o melhor perfil a ser adotado na fabricação um chassi com viga central. A configuração do projeto além de contar com 2 vigas I longitudinais, possui também travessas transversais de perfil C e também tubos transversais que deixam o produto com uma configuração robusta e otimizada ao mesmo tempo.

Uma das regiões onde se tem maior incidência de quebras em chassi é a região da curva do pescoço na parte dianteira do produto. Isso se deve ao fato dessa região ser de transição da seção da viga sendo também a parte do meio entre os pontos de apoio do chassi, (que são na suspensão traseira e no pino-rei). Dessa maneira, a região do pescoço deve ser bem projetada para não surgir futuras quebras. Nessa região desenhou-se um perfil da viga, com curvas mais suaves, aumentando o coeficiente de segurança.

Outro recurso usado foi a utilização de reforços verticais soldados na alma do perfil I, popularmente chamados de “costelas”, que aumentam a resistência do chassi quando este é solicitado à torção.

Todas as peças inseridas no chassi são soldadas, por ser um processo que utiliza os recursos disponíveis na empresa, e pelo custo menor de fabricação em relação a uma união parafusada.

Após a finalização do projeto do chassi, realizou-se uma análise estrutural numérica computacional, pelo método dos elementos finitos, usando o software de simulação estrutural NASTRAN, para analisar o comportamento do mesmo quanto à torção e flexão, por meio da

simulação das piores condições de operação. Por meio desta análise foi possível a visualização dos valores de tensões por região do chassi, conhecendo os coeficientes de segurança por região. Dessa forma foi possível a otimização das espessuras e geometrias, reduzindo-se o peso do chassi e melhorando-se a resistência estrutural. Assim, foi possível o aperfeiçoamento do projeto do chassi, antes dele ser fabricado. A seguir é mostrada, mais detalhadamente, a análise estrutural realizada no chassi.

O chassi modelado no software Pro/E, com todos os componentes soldados é mostrado na figura 3.4.

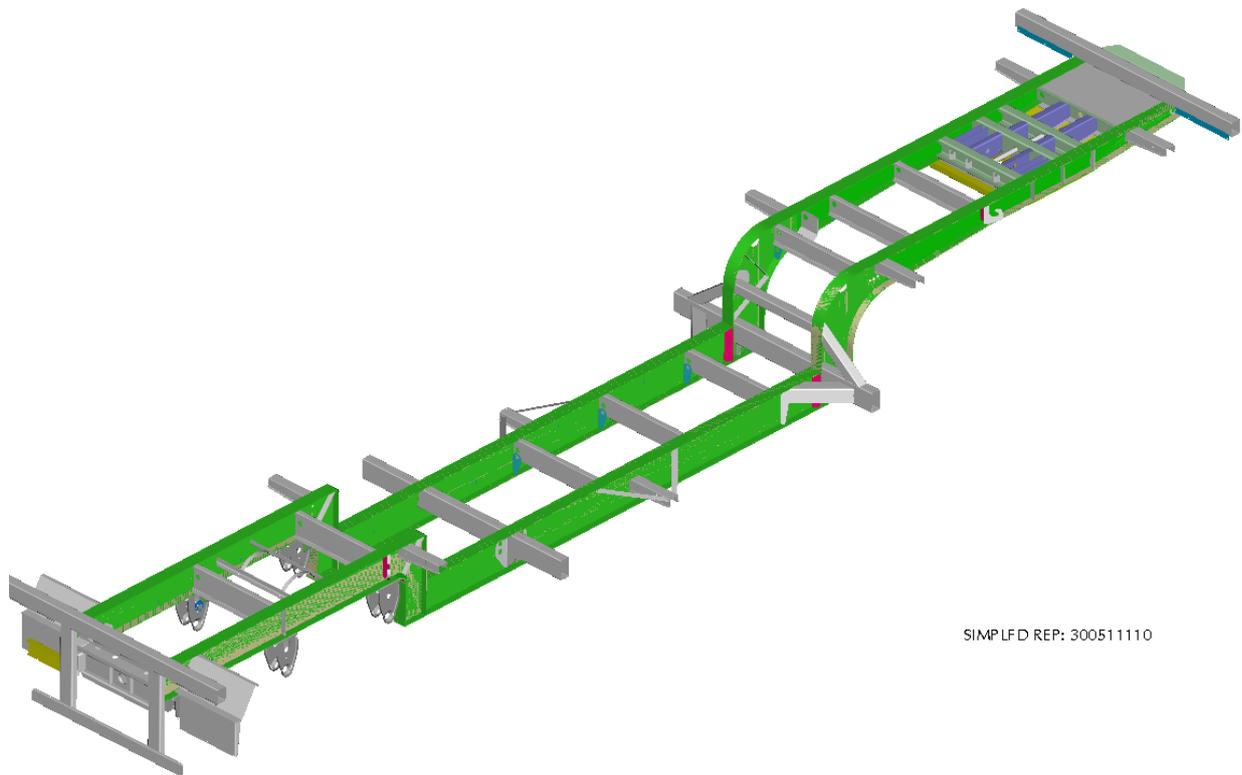


Figura 3.4. Chassi do Semi-Reboque

3.2.2.3 Projeto do Quadro de Giro do Semi-Reboque

Este conjunto faz a união do chassi com a caixa de carga do produto. Neste projeto optou-se por um quadro de giro com 4 mancais pelo fato do produto ter um comprimento de 12,5m, além da altura dos mancais em relação ao solo que foi definido pelo cliente como 3,9m em função da mesa de descarga que ele possui.

O quadro de giro é soldado ao chassi por meio de reforços, o que garante uma rigidez maior ao chassi, mas principalmente ao próprio quadro de giro. Dessa forma, pode-se perceber que este conjunto auxilia na resistência estrutural do chassi quanto à torção, que é o pior caso de solicitação sofrido pelo chassi.

Na execução do projeto do quadro de giro, os tubos foram dispostos em forma de triângulos, garantindo uma rigidez maior no conjunto, evitando deslocamentos e flexões excessivas.

Todo o quadro de giro é composto por tubos unidos por reforços, os quais são unidos por meio de soldas tampão, o que garante maior resistência à ocorrência de trincas.

O quadro de giro é suportado por tubos fixados ao chassi, que garantem uma distribuição uniforme da carga aplicada pelo movimento do basculamento da caixa de carga.

O quadro de giro sofre os maiores esforços quando o semi-reboque está parado fazendo a descarga da cana de açúcar no hilo da usina por meio do basculamento da caixa de carga. Quando o produto executa o basculamento, todo o peso da caixa de carga é transferido ao quadro de giro, que por sua vez o transfere ao chassi. Por este motivo, foi necessária a execução da análise estrutural pelo método dos elementos finitos, simulando o basculamento da caixa verificando-se as tensões e deformações encontradas no quadro de giro e também no chassi.

Na figura 3.5 tem-se o quadro de giro modelado sobre o chassi.

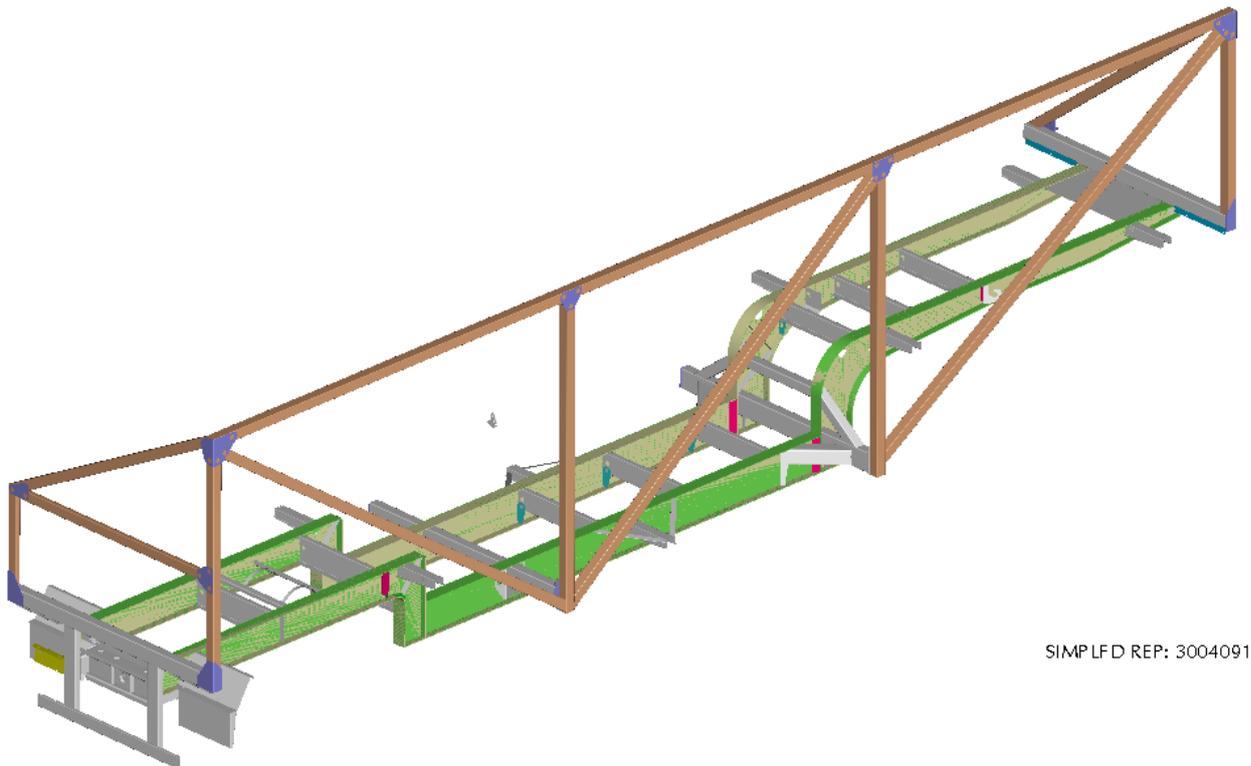


Figura 3.5. Quadro de Giro do Semi-Reboque

3.2.2.4 Projeto da Caixa de Carga do Semi-Reboque

A estrutura da caixa de carga é composta por tubos externos, unidos por reforços soldados, além dos revestimentos em chapas que formam a estrutura externa.

A caixa de carga do semi-reboque foi projetada com revestimentos em chapas de aço de alta resistência, com furos estampados em todas as laterais, exceto na lateral de descarga, evitando-se assim a queda de pedaços de cana nas mangueiras da instalação pneumática e hidráulica, o que poderia provocar avarias em algum desses sistemas, e também para evitar a queda de sujeira na mesa do pino-rei e na suspensão quando da descarga da cana de açúcar.

Os furos estampados nos revestimentos das laterais da caixa de carga deixam a chapa com uma resistência mecânica maior, e isso auxilia muito já que essas chapas são de espessuras pequenas, na ordem de 1,50 mm. Além dos furos, as chapas da lateral possuem canaletas, que também são estampadas, agregando resistência à lateral da caixa de carga, quando são exercidas forças normais aplicadas na lateral, como, por exemplo, no basculamento da caixa de carga, que a cana de açúcar exerce uma força proporcional ao seu peso em toda a lateral da caixa de carga até sair completamente do compartimento da caixa.

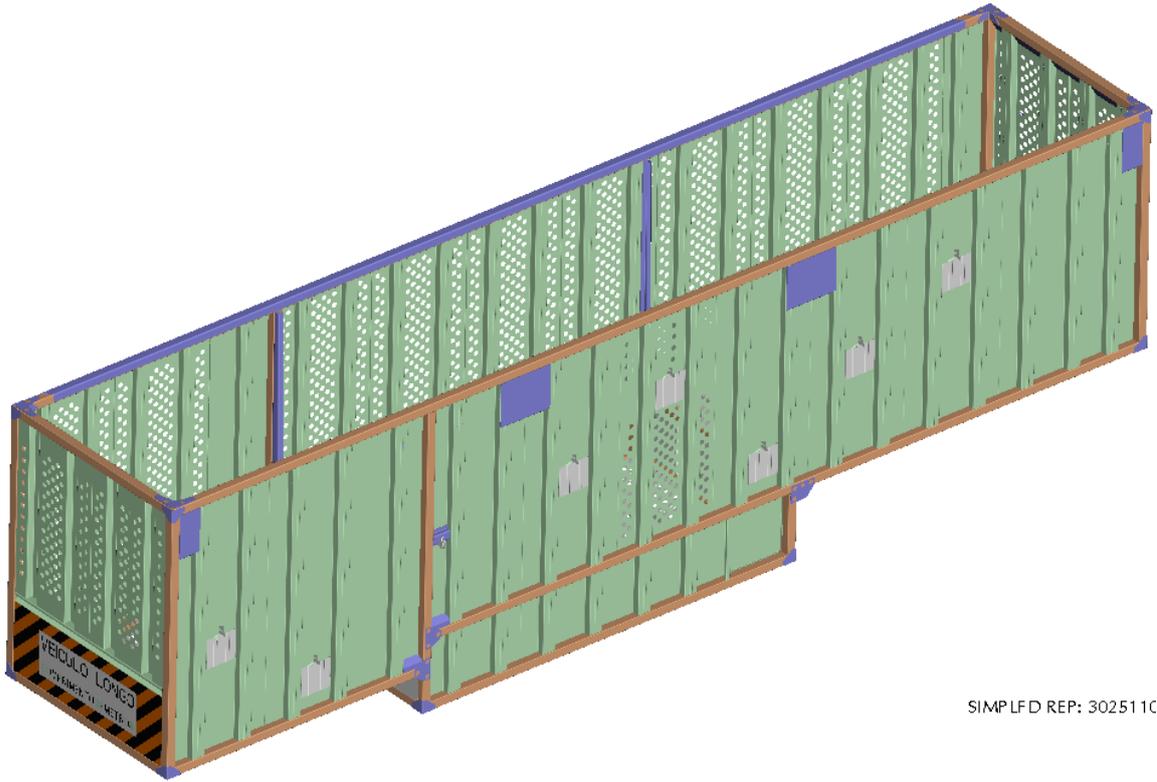
A caixa ainda conta com chapas soldadas na parte superior da lateral de descarga, que servem de apoio para os mancais, que são soldados nessas chapas e no quadro de giro.

Para as usinas fazerem a coleta de amostras da cana de açúcar por carga, as laterais possuem furos estampados de 365 mm com tampas, seguindo um padrão de disposição exigido por cada usina. Nesse produto foi solicitado 7 furos ascendentes.

A lateral de descarga possui cunhas soldadas por dentro da caixa de carga em cada uma das canaletas estampadas, na parte superior, entre o revestimento e os tubos, que auxiliam na descarga da cana de açúcar, impedindo que esta tranque nos cantos dos tubos quando a caixa é basculada e a cana desliza sobre a lateral de descarga.

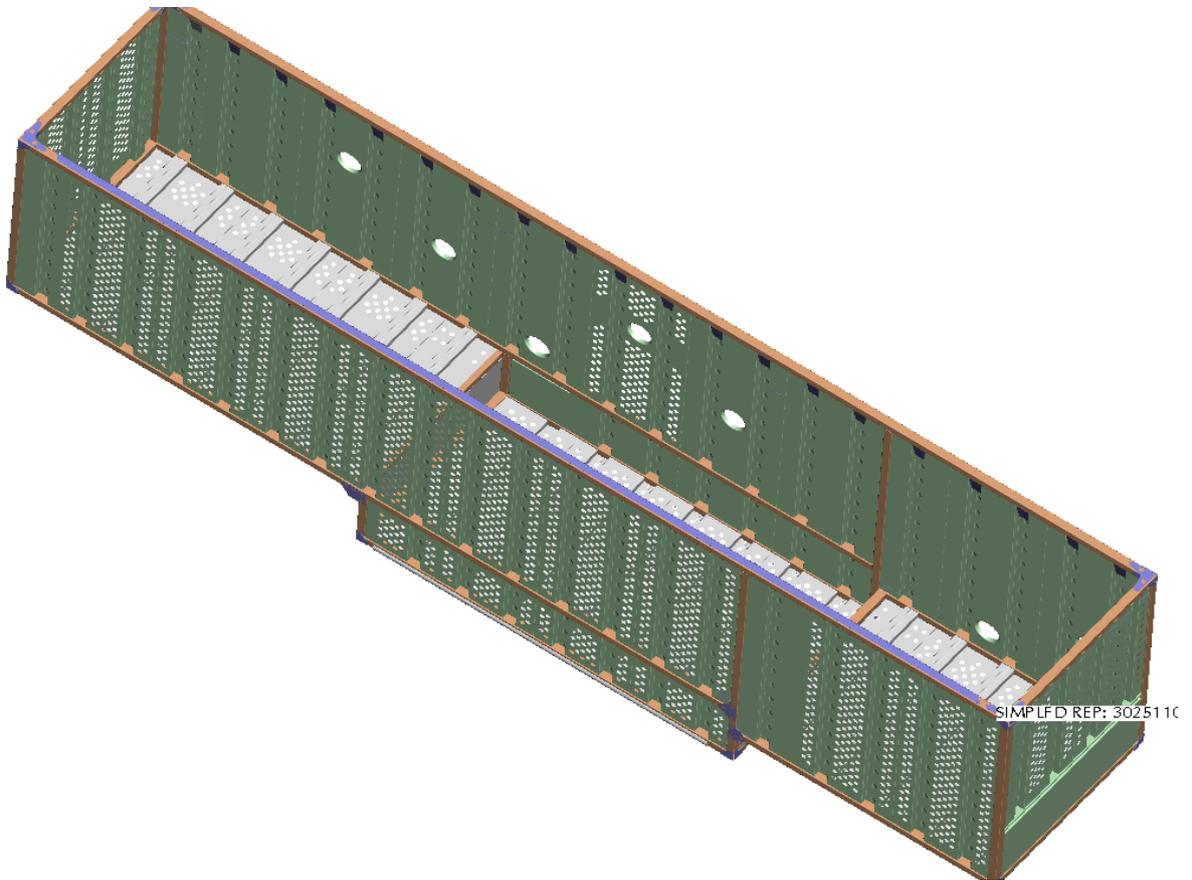
Por fim, a caixa de carga conta com perfis laterais em forma de U, que são soldados verticalmente do piso da caixa até a parte mais alta, auxiliando a resistência e impedindo a flexão excessiva da lateral quando esta é basculada.

Na figura 3.6, é mostrada a parte externa da caixa de carga e na figura 3.7 tem-se os detalhes internos da caixa de carga do semi-reboque canavieiro.



SIMPLFD REP: 302511C

Figura 3.6. Caixa de Carga do Semi-Reboque



SIMPLFD REP: 302511C

Figura 3.7. Detalhes internos da Caixa de Carga

3.2.2.5 Projeto da Mesa do Pino-Rei

A mesa do pino-rei é a estrutura que serve de base para a fixação da chapa do pino-rei, que por sua vez é parafusado nela. Esta chapa é soldada na estrutura da mesa que conta com travessas em perfis C e U soldadas entre si e soldadas na alma do chassi.

Esta estrutura é de fundamental importância no semi-reboque visto que é quem transmite toda a força do semi-reboque ao cavalo trator, sendo assim é uma região que gera tensões muito altas devido à transmissão de forças pelo pino rei as quais se agravam quando o produto sofre torção. Portanto essa região, geralmente, é super dimensionada, a fim de evitar futuras quebras. Toda a região da mesa é soldada, garantido uma integridade estrutural maior. Algumas travessas na região da mesa recebem reforços internos soldados nas travessas para garantir maior rigidez evitando deformações permanentes nessa região. Além disso, algumas travessas possuem uma espessura maior, por serem mais solicitadas; geralmente essas são as soldadas diretamente na chapa de fixação do pino-rei, sofrendo maior esforço.

Na parte externa inferior da mesa do pino-rei foram inseridas chapas de atrito, cuja função é servir de base para o cavalo trator acoplar-se e desacoplar-se ao semi-reboque. Existem duas chapas de atrito, uma fixa, que é soldada nas vigas do chassi posicionando-se na parte dianteira e a chapa de atrito móvel que é parafusada nas vigas do chassi, localizando-se na região do pino-rei. Essas chapas são de espessura 9,5 mm, visto que sofrem grandes esforços, pois esses semi-reboques canavieiros são acoplados e desacoplados várias vezes por dia.

Na figura 3.8 é mostrada a mesa do pino-rei com as chapas de atrito fixa e móvel em amarelo e na figura 3.9 é mostrada a parte interna da mesa do pino-rei.

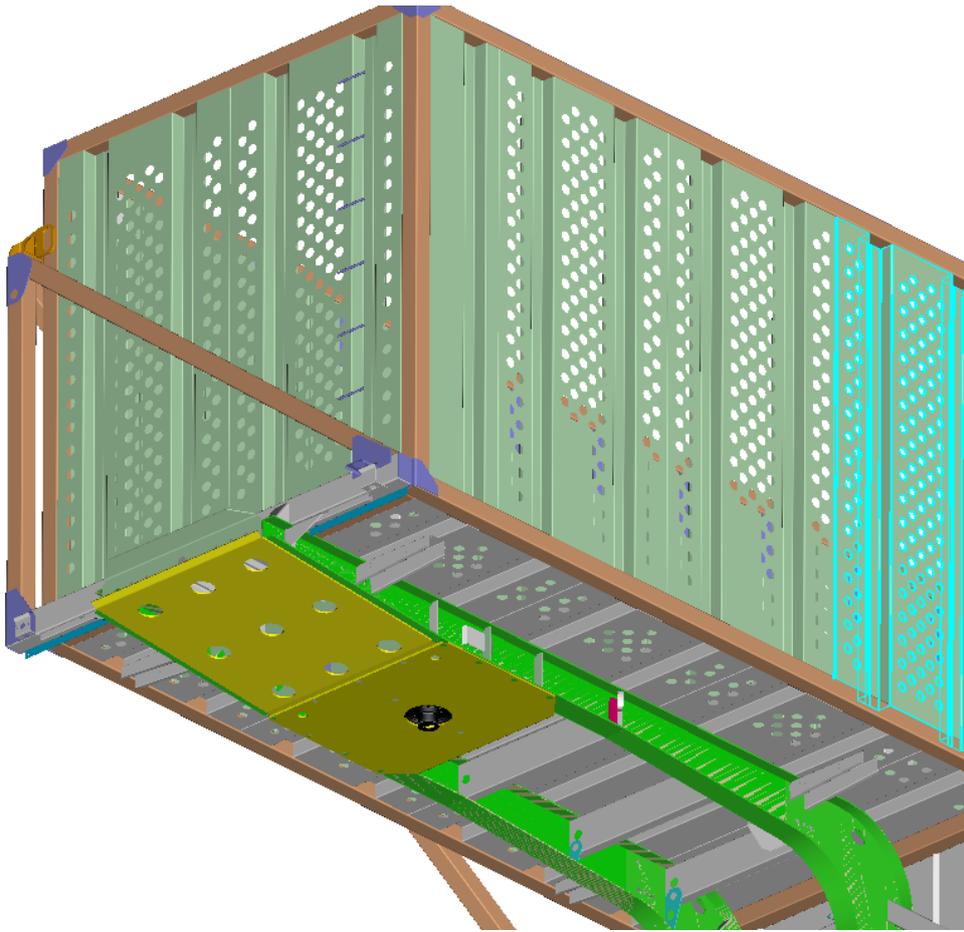


Figura 3.8. Vista externa da Mesa do Pino-Rei

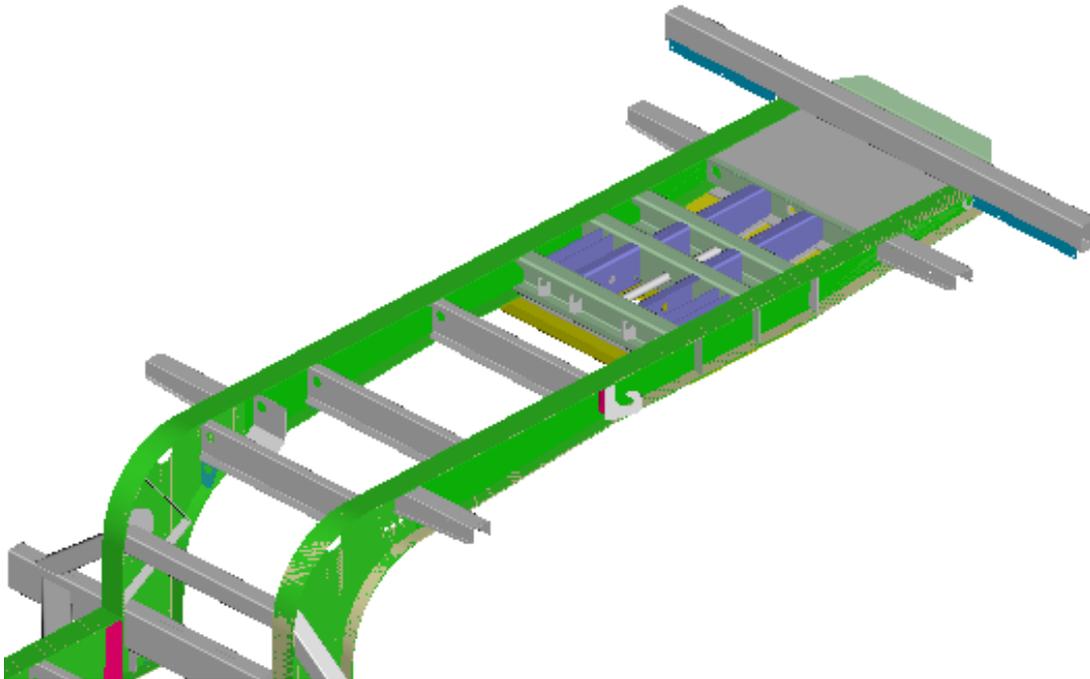


Figura 3.9. Vista interna da Mesa do Pino-Rei

Podem-se visualizar as travessas da mesa em verde e os reforços em azul.

A seguir, na figura 3.10, segue o produto completo modelado no *software* Pro/E, com todos os subconjuntos apresentados e ainda com eixos, rodas, pneus e suspensão.

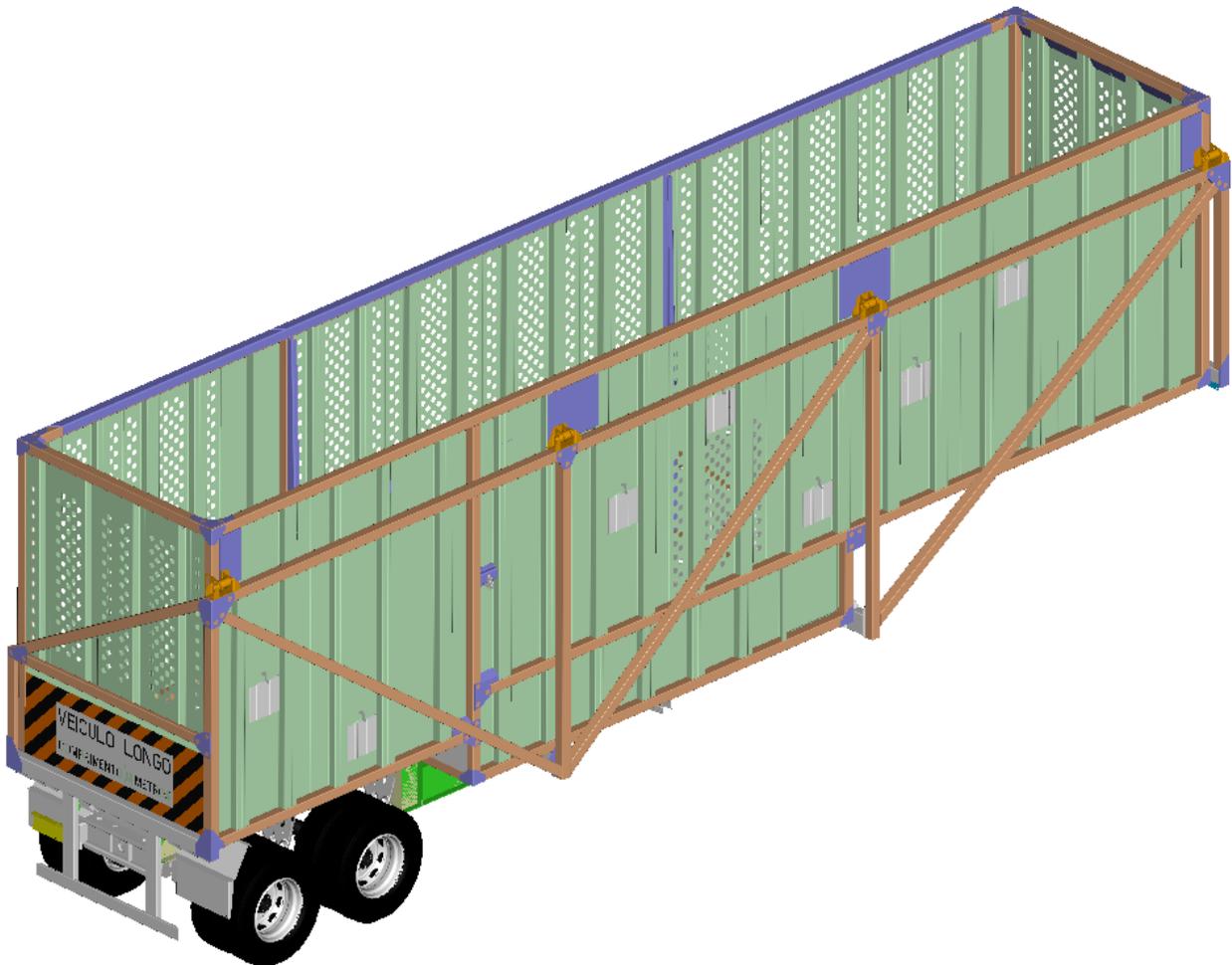


Figura 3.10. Semi-Reboque Canavieiro completo

No projeto do semi-reboque canavieiro foram colocados pára-lamas traseiros conforme a Norma ABNT NBR 11409, que especifica uma distância vertical de no máximo 150 mm do solo até o pára-lama e de no mínimo 100 mm do pneu até o pára-lama na horizontal.

Foi colocado também no projeto do Semi-Reboque pára-choque traseiro fixo conforme a Resolução do Contran 152/03, que estabelece requisitos técnicos de fabricação e instalação de pára-choque traseiro para veículos de carga.

A suspensão usada no projeto do semi-reboque canavieiro de alta resistência foi do tipo balancim de duplo estágio, atendendo perfeitamente as condições em que o produto irá operar, tanto carregado quanto vazio, já que a maioria das estradas dentro das usinas não tem pavimentação, e geralmente o solo é bastante irregular. Essa suspensão trabalha da seguinte

maneira, enquanto o produto está vazio, ela trabalha no primeiro estágio, com o objetivo de deixar a suspensão mais macia e dessa forma evitar a excessiva vibração no semi-reboque que aconteceria com uma suspensão balancim convencional, quando o produto for carregado o segundo estágio passa a atuar, deixando a suspensão mais firme e robusta.

No projeto do semi-reboque, também se pensou na colocação do engate automático traseiro, que é usado quando se pretende operar com dois semi-reboques (rodotrem) puxados por um mesmo cavalo trator, assim projetou-se uma estrutura traseira mais reforçada para colocação do engate automático da marca Jost.

Para se possibilitar a inspeção da caixa de carga internamente, optou-se por colocar na parte dianteira da caixa de carga, uma escada com os degraus soldados nos revestimentos desta a fim de facilitar as inspeções internas. Além disso, projetou-se uma porta de acesso à parte interna da caixa de carga, para inspeções mais detalhadas.

O sistema pneumático do semi-reboque conta com um reservatório de 110 litros posicionado entre os dois eixos traseiros do semi-reboque, que alimenta as câmaras de freios e os cilindros pneumáticos que acionam os pés de apoios do equipamento.

A parte de freios do semi-reboque conta com 4 câmaras *spring-break* de acionamento pneumático, duas por eixo. As câmaras da marca Master contam com sistema de serviço e emergência. A câmara opera a parte de serviço pneumaticamente, e quando algum problema ocorre no sistema pneumático do semi-reboque, o sistema de emergência entra em operação com uma mola de emergência atuando nas lonas de freios e fazendo com que o semi-reboque pare o mais rápido possível.

O semi-reboque conta com pés de apoio que são utilizados quando ele está desacoplado do cavalo trator. Esses pés de apoio são chamados de patolas, e são acionados por meio de cabos de aços puxados por cilindros pneumáticos. Os cilindros são acionados quando se quer erguer as patolas; após o erguimento destas, são colocados pinos em cada uma livrando-se assim o sistema pneumático. Para baixar as patolas, a gravidade se encarrega de acionar todo o sistema, já que as mesmas possuem uma massa bastante elevada.

O sistema elétrico do semi-reboque foi projetado com um chicote central alimentando todas as sinaleiras laterais e as sinaleiras traseiras. O sistema elétrico do semi-reboque é 24 V, e as sinaleiras traseiras são com sistema LED, mais atual que as tradicionais lâmpadas tendo também uma melhor aparência visual.

As sinaleiras laterais foram projetadas conforme a Resolução do Contran 227/07, que estabelece requisitos referentes aos sistemas de iluminação e sinalização de veículos e orienta a colocação de uma sinaleira lateral a cada 3 metros.

A descarga do produto é feita com o sistema de basculamento da caixa de carga, que é puxada por cinco correntes pelo hilo da usina, conforme já foi mostrado no desenho de simulação do basculamento da caixa de carga na figura 3.2. Essas correntes são unidas a ganchos soldados na estrutura da caixa de carga envolvendo-a para permitir o giro de 130° para a descarga completa.

3.2.3 Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)

De acordo com Pahl et al (2005), a FMEA é um método amplamente formalizado para determinação sistemática de possíveis falhas e avaliação dos riscos a elas associados (efeitos). O principal objetivo é a redução ou eliminação dos riscos. A FMEA baseia-se na análise direta de uma falha e suas conseqüências, bem como suas causas. Portanto, ela só permite uma única interligação direta entre causas e conseqüências de uma falha. Este método é basicamente utilizado em novos desenvolvimentos.

A tabela 3.1, a seguir, mostra a estrutura da FMEA de produto e processo integrados, aplicada no chassi do semi-reboque, que é o item mais importante por ser a espinha dorsal do produto e o item mais solicitado quando de sua utilização.

Para execução do FMEA, são necessários alguns procedimentos que serão descritos abaixo.

Primeiramente, foram identificados os itens que compõe o produto que podem ser problemáticos em algum estágio da fabricação ou montagem do produto.

Em segundo lugar, foram identificados os modos potenciais de falha, seus efeitos e suas causas na fabricação ou montagem dos itens já levantados.

Em terceiro lugar, identificaram-se para cada efeito de modo de falha a sua respectiva severidade.

Em quarto lugar, foram pontuadas as probabilidades de ocorrência das causas identificadas para cada modo potencial de falha.

Em quinto, foram identificados os controles atuais preventivos existentes no processo e a probabilidade de detecção da falha.

Em sexto, calculou-se o potencial de risco de cada modo de falha e definiram-se medidas para sua eliminação ou redução. Isto é obtido através de um plano de ações que aumenta a probabilidade de detecção ou reduzam a probabilidade de ocorrência da falha.

Tabela 3.1. FMEA de Projeto / Processo do chassi do semi-reboque

			® Possibilidade de falhas e análise de efeitos (FMEA de Projeto/Processo)						Denominação do componente: Chassi						
			Setor: Engenharia do Produto						Elaborado por: Cleiton						
Item Função	Modo de Falha Potencial	Efeito Potencial da Falha	Severidade	Causa(s) Potencial Mecanismo(s) de Falha	Ocorrência	Controles Preventivos Existentes no Processo	Detecção	N. P. R.	Ações Preventivas Recomendadas	Responsabilidade pela ação recomendada & Data da Conclusão	Resultado das Ações				
											Ações Tomadas	Severidade	Ocorrência	Detecção	N. P. R.
											Data efetiva				
1 - Almas das vigas	Evitar emenda nas almas	Poderá gerar trinca na cinta	4	Trinca da viga	2	Controle visual	1	8	Fazer almas inteiras, diminuindo a quantidade de emendas	Cleiton	17/7/2007	4	1	1	4
2 - Cintas das vigas	Evitar solda transversal nas cintas	Trinca nas cintas	4	Trinca nas cintas	2	Controle visual	1	8	Fazer chanfro nas travessas	Cleiton	17/7/2007	4	1	1	4
3 - Cintas das vigas	Induzir trincas na cinta	Trincas no produto	7	Pontos de solda feitos na montagem das travessas.	4	Instrução de solda.	4	112	Especificar no desenho a não indicação de pontos de solda na cinta.	Cleiton	17/7/2007	6	1	5	30
4 - Travessas e reforços do chassi	Dimensional das travessas e reforços não conforme o especificado em projeto.	Não conformidade no Dimensional do conjunto.	6	Falta especificação e tolerâncias nos desenhos de processo.	5	Especificação das dimensões e tolerâncias pela engenharia.	4	120	Especificar no desenho de processo as tolerâncias e cotas necessárias para montagem.	Cleiton	17/7/2007	6	1	5	30
Coluna Severidade: (efeitos sobre o cliente)					Coluna Ocorrência: (falha pode ocorrer)			Coluna Detecção: (probabilidade da descoberta antes da entrega ao cliente)			Coluna N.P.R. (risco)				
efeitos quase imperceptíveis = 1 falha insignificante = 2 - 3 falha moderadamente grave = 4 - 6 falha grave(aborrecimento do cliente) = 7 - 8 falha extremamente grave = 9 - 10					impossível = 1 muito pequena = 2 - 3 pequena = 4 - 6 moderada = 7 - 8 alta = 9 - 10			elevada = 1 moderada = 2 - 5 diminuta = 6 - 8 muito pequena = 9 improvável = 10			alto = 1000 médio = 125 nenhum = 1				

4 ANÁLISE ESTRUTURAL NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Esta análise foi realizada pelo método dos elementos finitos, usando o *software* de simulação estrutural NASTRAN versão 2007.

O objetivo da análise estrutural do chassi e quadro de giro do semi-reboque foi o de verificar o comportamento da estrutura quanto à flexão e torção, aplicando-se condições de contorno conhecidas da operação do produto, e obtendo-se resultados de tensões e deslocamentos da estrutura do chassi e quadro de giro. Os resultados de tensões podem ser analisados por região, assim pode-se saber qual local requer um coeficiente de segurança maior, a fim de se otimizar o peso e confiabilidade do produto. Dessa forma, a análise estrutural numérica computacional é uma ferramenta poderosa de auxílio ao projeto final do produto, contribuindo para otimização das geometrias da estrutura e, principalmente, das espessuras das peças do produto.

Na realização deste trabalho foram executados cinco casos de simulação, os quais são descritos a seguir.

4.1 1º Caso de Estudo - Simulação de Flexão do Chassi

Condições de Contorno:

Restrições: pino-rei e suspensão traseira.

Carregamentos: carga de 20 t nas regiões dianteira e traseira das vigas do chassi e carga de 10 t na região central do chassi conforme figura 4.1. Essa condição de contorno foi escolhida em função do carregamento máximo que pode ser utilizado em uma caixa de carga do tamanho da aqui projetada.

Nessas condições de contorno, foi considerado que a caixa de carga encostará na parte central do chassi, condição esta que é evitada visto ser essa região central aquela onde se tem a maior deformação e conseqüentemente as maiores tensões geradas quando este é submetido à flexão. A caixa de carga é projetada com uma folga entre ela e o chassi na região central para que não se tenha transmissão de cargas, mas quando o produto é carregado no limite máximo de volume possível, a região do centro da caixa de carga inevitavelmente encosta no chassi, por isso utilizou-se o carregamento de 10 t nessa região do chassi. A seguir mostra-se a figura 4.1 com os carregamentos citados.

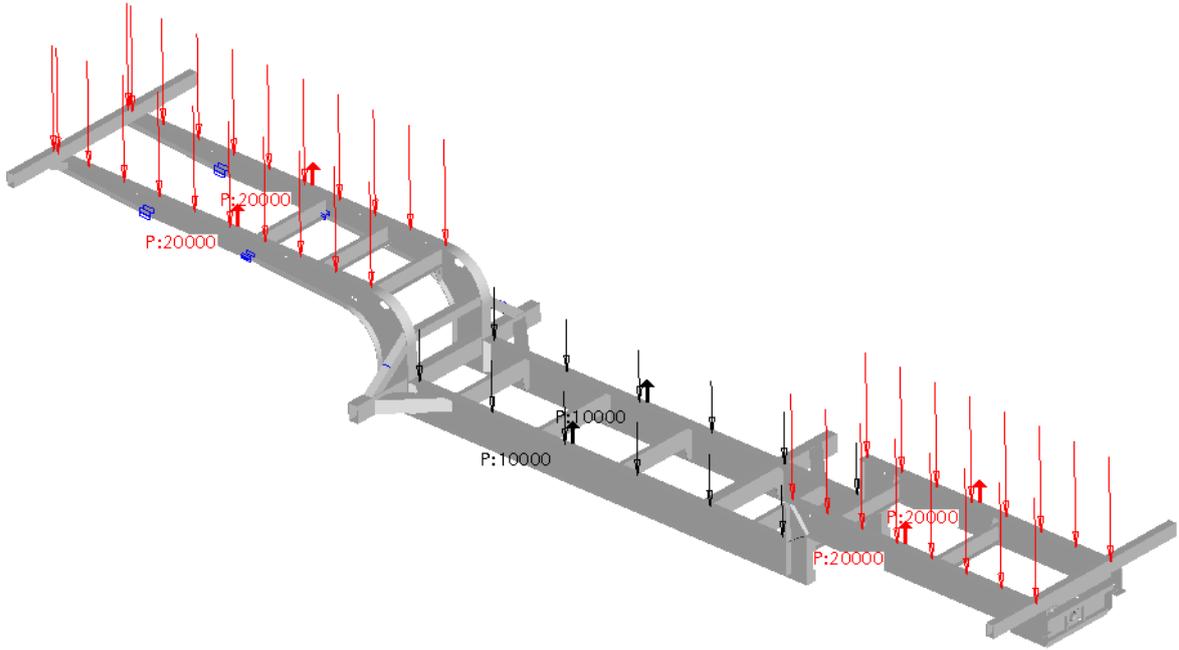


Figura 4.1. 1ª condição de carregamentos

Resultados da 1ª simulação:

Os resultados de tensão utilizando o conceito de Von Mises, em MPa, da 1ª simulação, seguem nas figuras 4.2 mostrando todo o chassi e na figura 4.3 mostrando a região mais solicitada nessa análise.

MSC FEA 2007 r1 04-Jun-09 13:32:33

Fringe: FLEXAO_10REAL, A3:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 3 layers (Maximum)

Deform: FLEXAO_10REAL, A3:Non-linear: 100. % of Load, Constraint Forces, Translational.

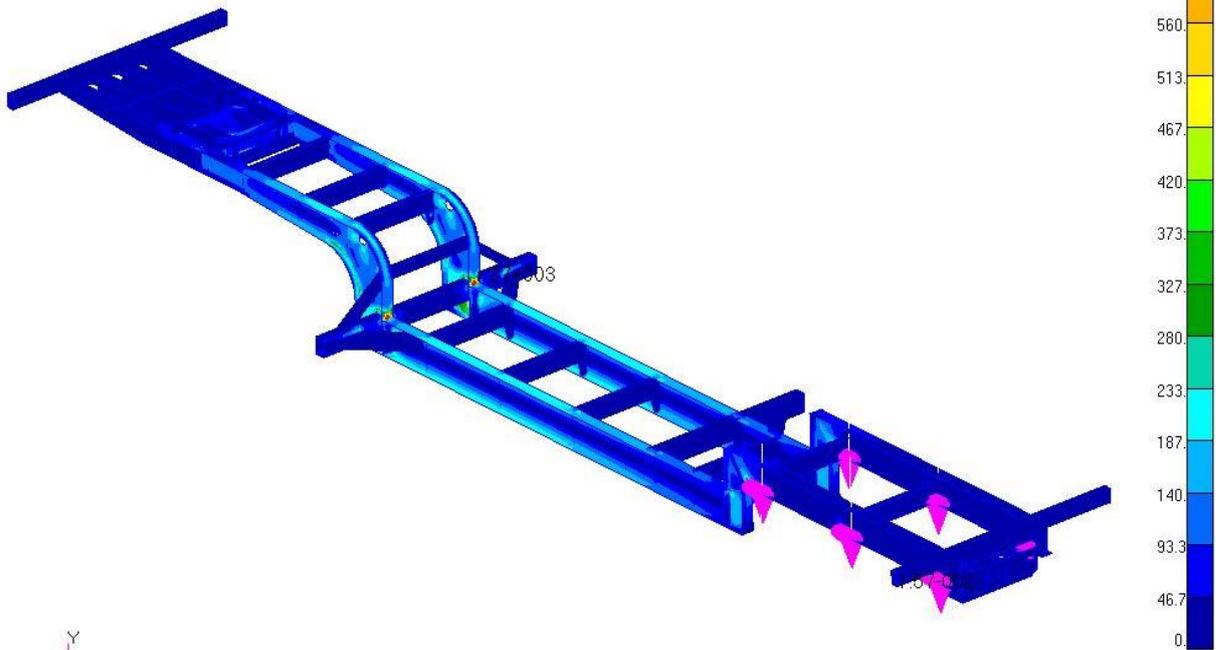


Figura 4.2. Tensões da 1ª simulação

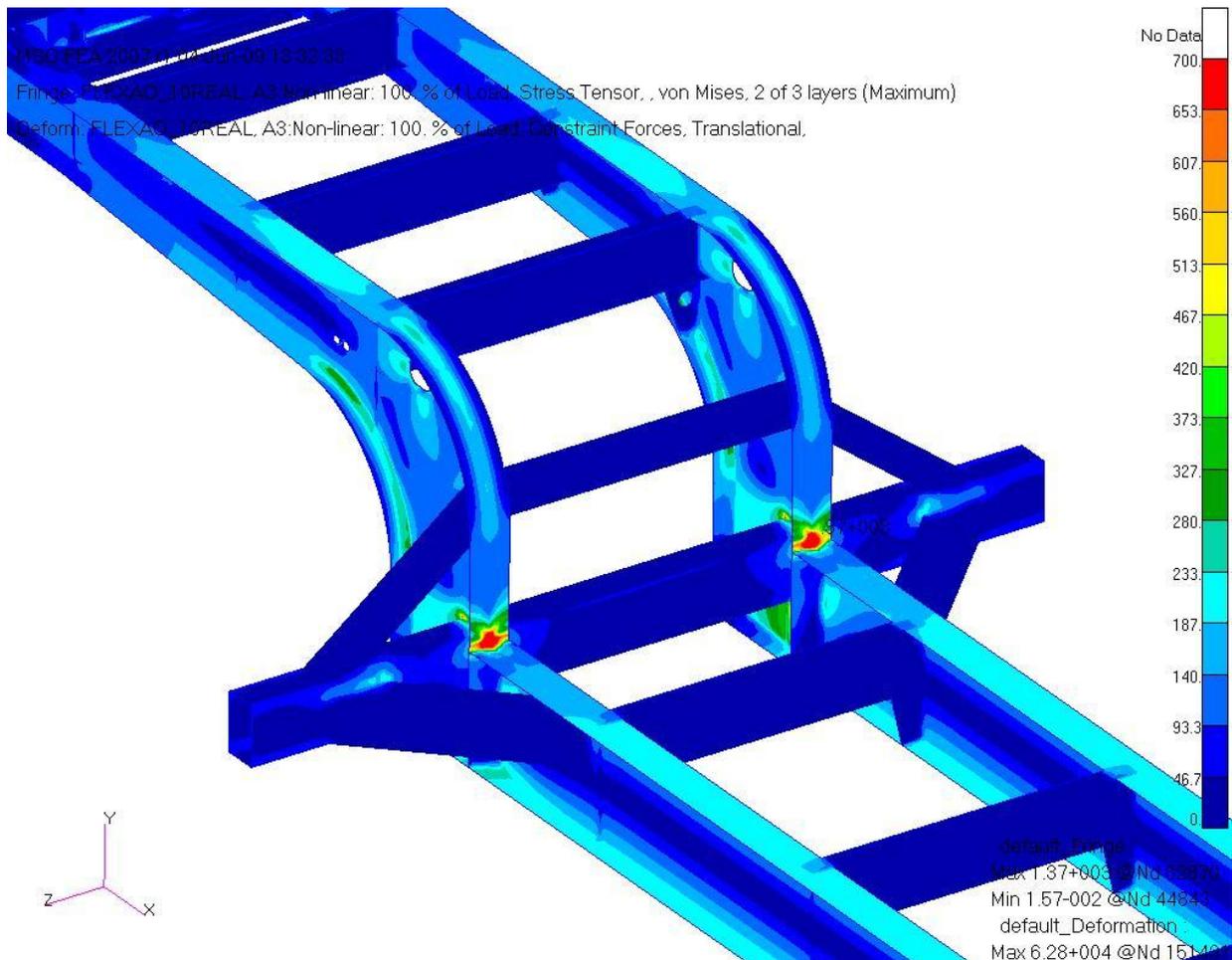


Figura 4.3. Tensões da 1ª simulação na região mais solicitada

Pode-se verificar uma concentração de tensões no canto da viga, que é difícil mudar o projeto, pelo fato da caixa de carga apresentar os cantos quadrados nessa região, a fim de se ganhar volume e principalmente pela facilitação do processo de fabricação das vigas do chassi, que com essa geometria garante facilidade de montagem da viga. A geometria não pode ser mudada, portanto estudou-se a colocação de reforços nessa região no sentido de minimizar esta concentração de tensões.

Os resultados de deformação, em milímetros, são mostrados na figura 4.4, tendo-se uma noção da estrutura tanto deformada quanto indeformada, para possibilitar a observação do comportamento do chassi quando aplicadas às cargas descritas anteriormente.

MSC FEA 2007 r1 04-Jun-09 13:35:22

Fringe: FLEXAQ_10REAL, A3:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: FLEXAQ_10REAL, A3:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational,

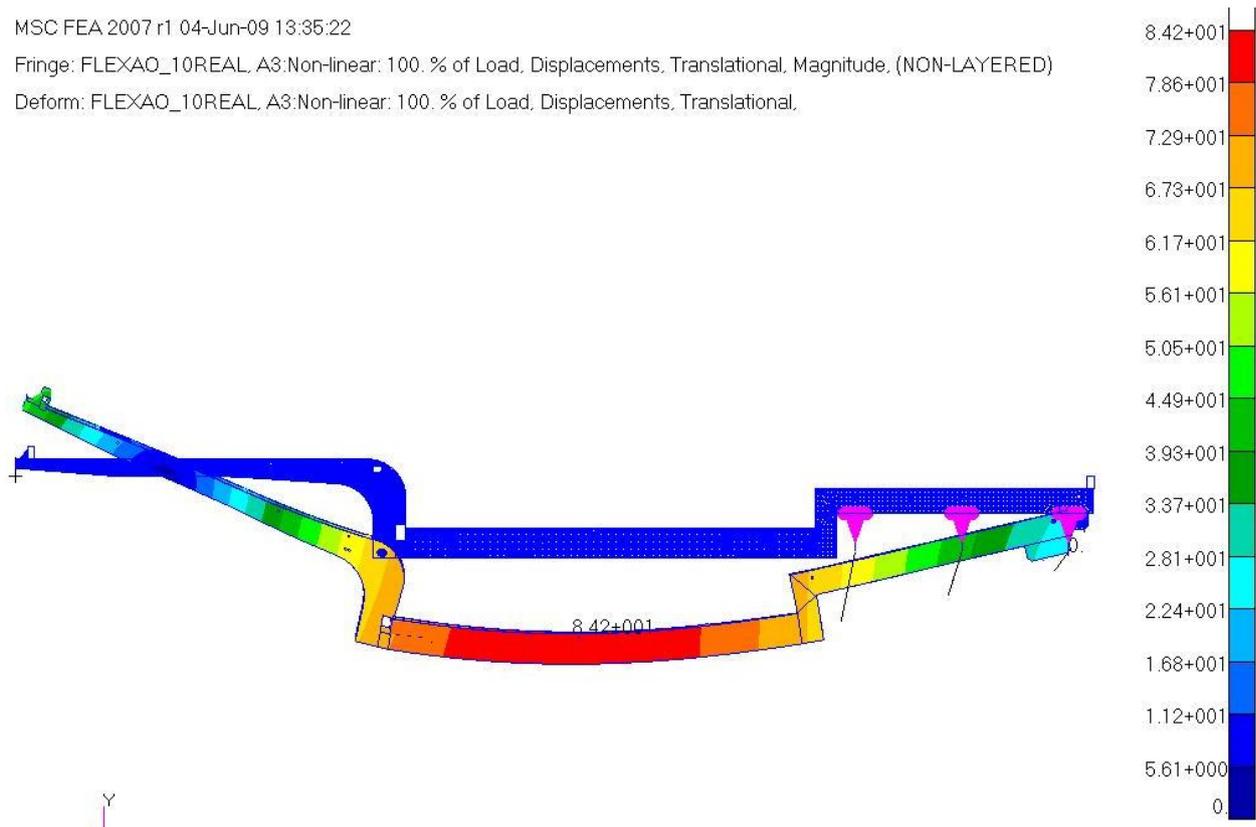


Figura 4.4. Deformação da 1ª simulação

Percebe-se um comportamento normal do chassi quanto à flexão, visualizando que a região do rebaixo, é a que mais sofre deformações por estar exatamente no meio dos pontos de apoio que são o pino-rei na parte frontal e a suspensão na parte traseira do chassi.

4.2 2º Caso de Estudo - Simulação de Flexão 2 do Chassi

Condições de Contorno:

Restrições: pino-rei e suspensão traseira.

Carregamentos: carga de 25 t nas regiões dianteira e traseira das vigas do chassi conforme figura 4.5. Essa condição de contorno simula o carregamento máximo que o semi-reboque poderá sofrer que é de 50 t, devido ao volume da caixa.

Nessa simulação considerou-se que a caixa de carga não encostará na região central do rebaixo quando for carregada em sua máxima capacidade. Tal análise é comparativa com a anterior para analisar a influência da caixa de carga, quando carregada e não encostando na região do rebaixo central. A figura 4.5 ilustra os carregamentos citados.

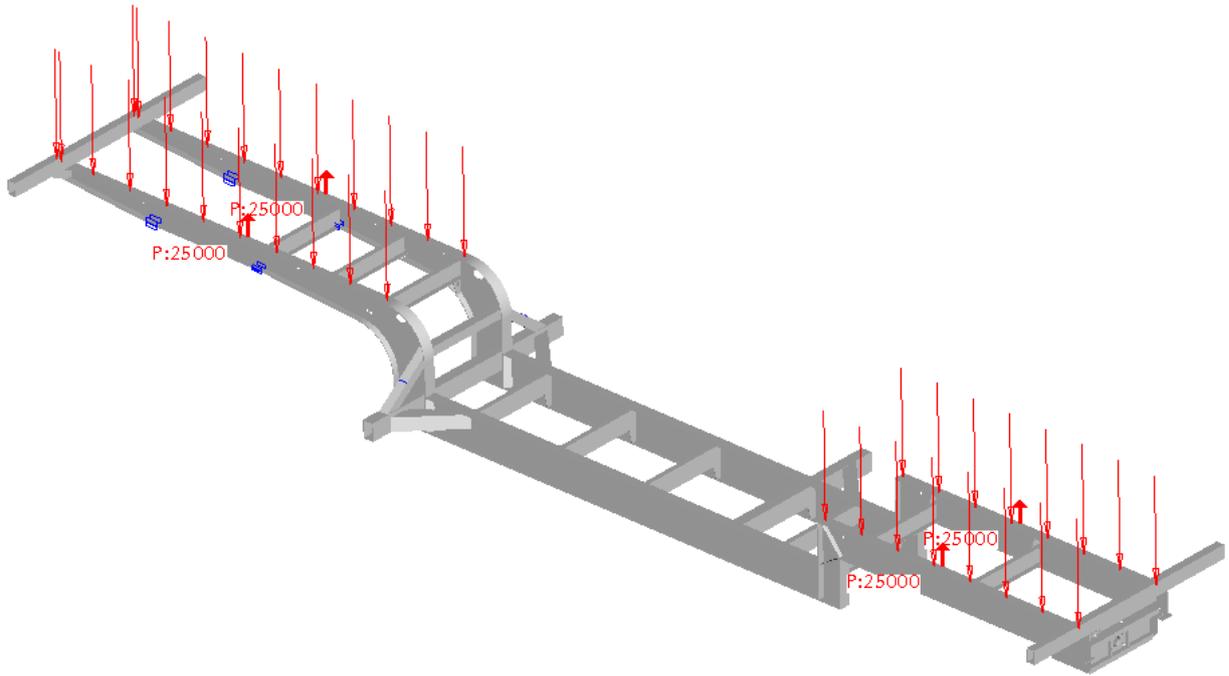


Figura 4.5. 2ª condição de carregamentos

Resultados da 2ª simulação:

Os resultados de tensão, em MPa, da 2ª simulação, são apresentados na figura 4.6 onde se tem todo o chassi e na figura 4.7 onde visualiza-se a região mais solicitada do chassi.

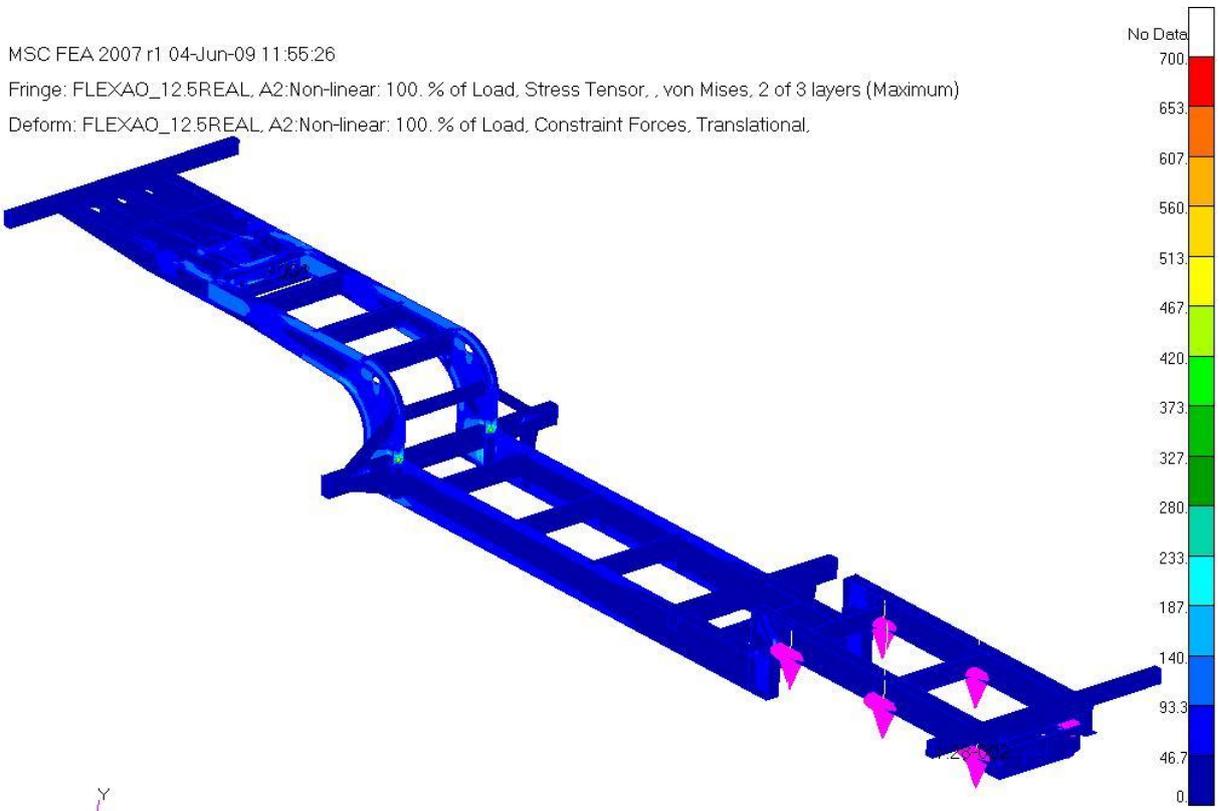


Figura 4.6. Tensões da 2ª simulação

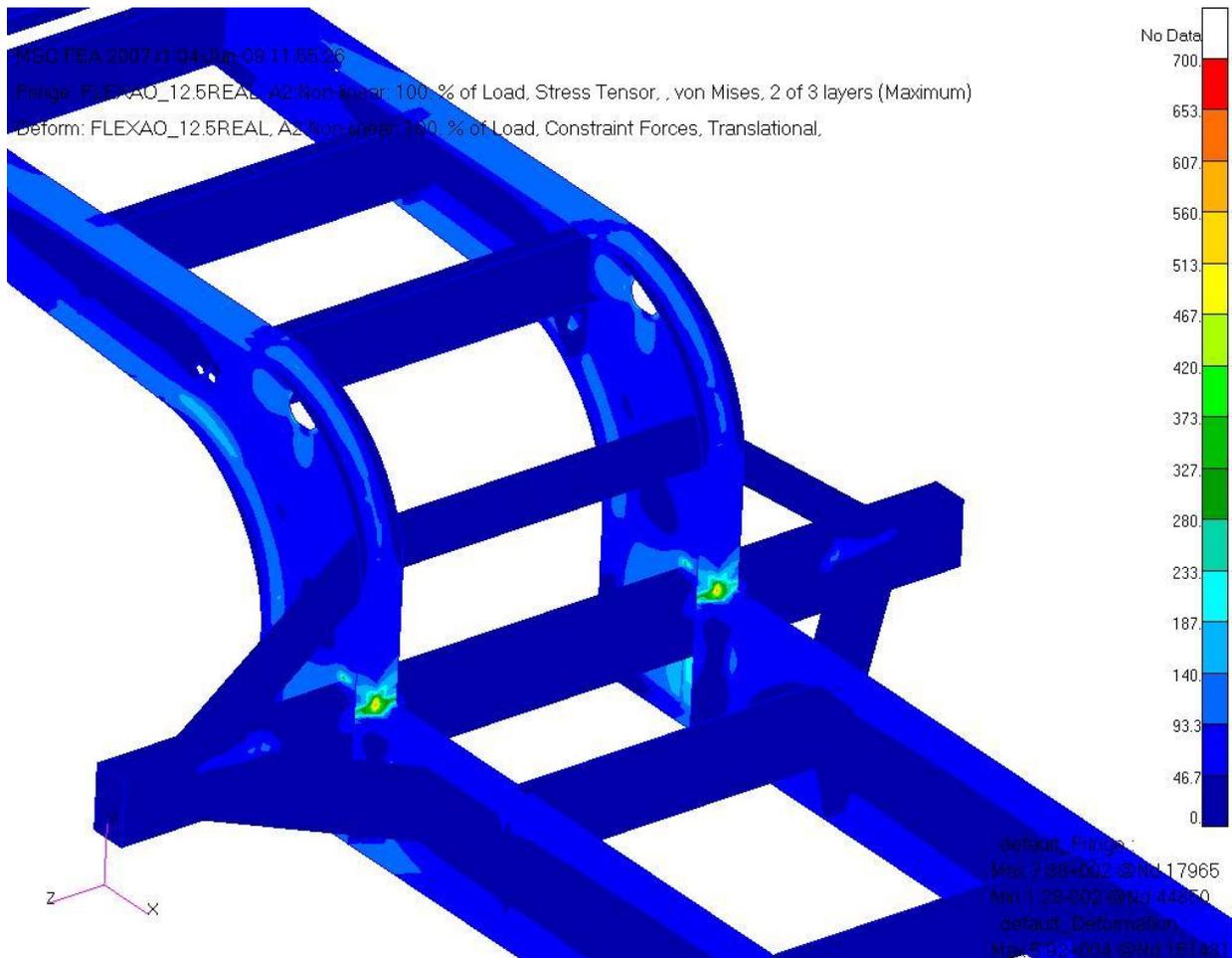


Figura 4.7. Tensões da 2ª simulação na região mais solicitada

Por meio das ilustrações acima verifica-se a influência da caixa de carga ao não encostar na região do rebaixo central da viga, concluindo-se que a melhor solução de projeto será ter-se uma folga considerável entre a caixa de carga e a viga, para não haver transmissão de cargas nessa região que é uma das mais solicitadas quanto à flexão.

Observa-se também que ocorre a diminuição de tensões nas vigas do chassi, mesmo no canto do rebaixo central que é um local de concentração das tensões.

Na figura 4.8, tem-se a deformação, em milímetros, do chassi nessa 2ª simulação, podendo-se ver seu comportamento quando aplicados os carregamentos citados. Pode-se fazer uma análise visual do comportamento da estrutura quando esta sofre carregamento, tendo-se a mesma deformada (colorida) e indeformada (azul).

MSC FEA 2007 r1 04-Jun-09 11:59:23

Fringe: FLEXAO_12.5REAL, A2:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: FLEXAO_12.5REAL, A2:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational,

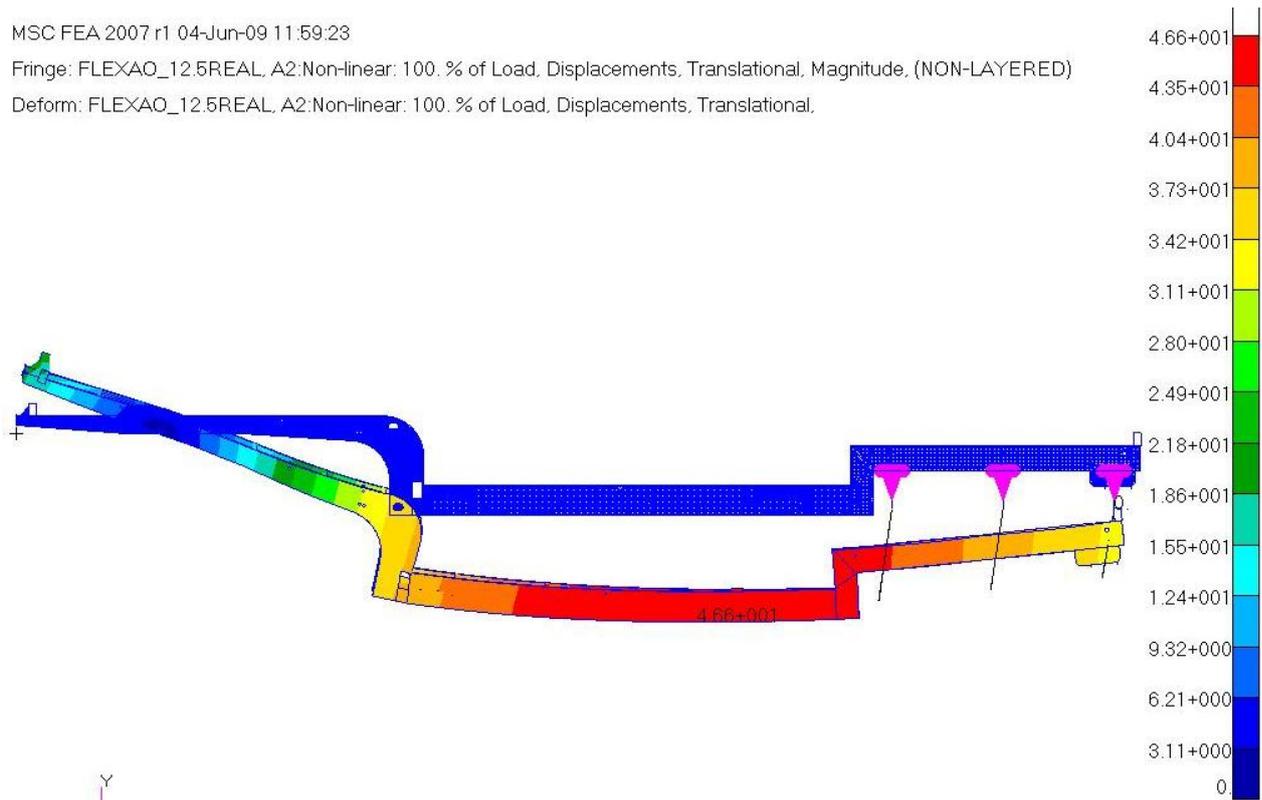


Figura 4.8. Deformação da 2ª simulação

Verifica-se que ocorre a transferência de posição da região com maior deformação que é a traseira do rebaixo central, devido aos carregamentos diferentes da 1ª simulação. Percebeu-se ainda, que os deslocamentos foram bem menores nessa simulação que a anterior, na faixa de 46 mm para a deformação máxima, enquanto que no caso anterior foi de aproximadamente 84. Dessa forma, concretiza-se que a melhor solução de projeto seria de não encostar a caixa de carga na região do rebaixo central quando a mesma fosse carregada.

4.3 3º Caso de Estudo - Simulação de Torção do Chassi

Condições de Contorno:

Restrições: pino-rei restringido, suspensão restringida em um lado e com um deslocamento prescrito de 50 mm no lado oposto ao quadro de giro.

Carregamentos: carga de 20 t nas regiões dianteira e traseira das vigas do chassi e 10 t na região do rebaixo central das vigas conforme figura 4.9.

Essa condição de contorno, diferente da anterior que simulava uma flexão no chassi, simula uma torção devido às restrições aplicadas no chassi, por deixar a suspensão traseira com um deslocamento prescrito para simular um buraco ou desnível na estrada.

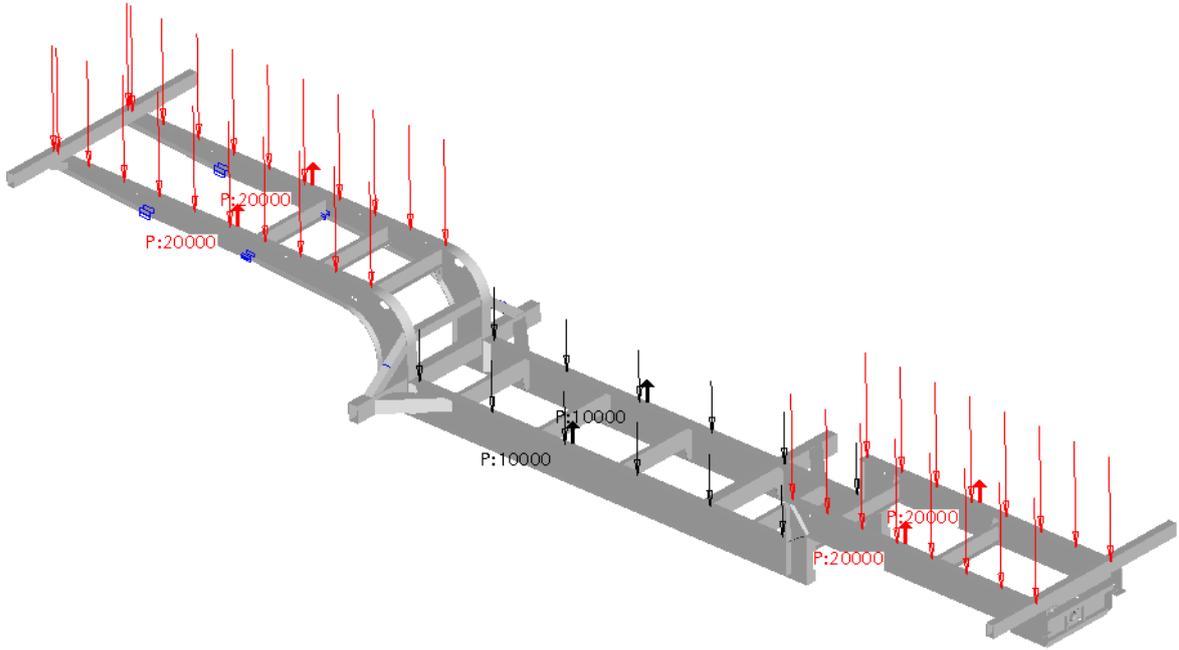


Figura 4.9. 3ª condição de carregamentos

Resultados da 3ª simulação:

Os resultados de tensão em MPa da 3ª simulação encontram-se na figura 4.10 onde se tem todo o chassi e na figura 4.11 apresentando somente a região mais solicitada do chassi.

Patran 2007 r1b 04-Jun-09 15:22:24

Fringe: TORCAO_REAL, A11:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 3 layers (Maximum)

Deform: TORCAO_REAL, A11:Static Subcase, Constraint Forces, Translational,

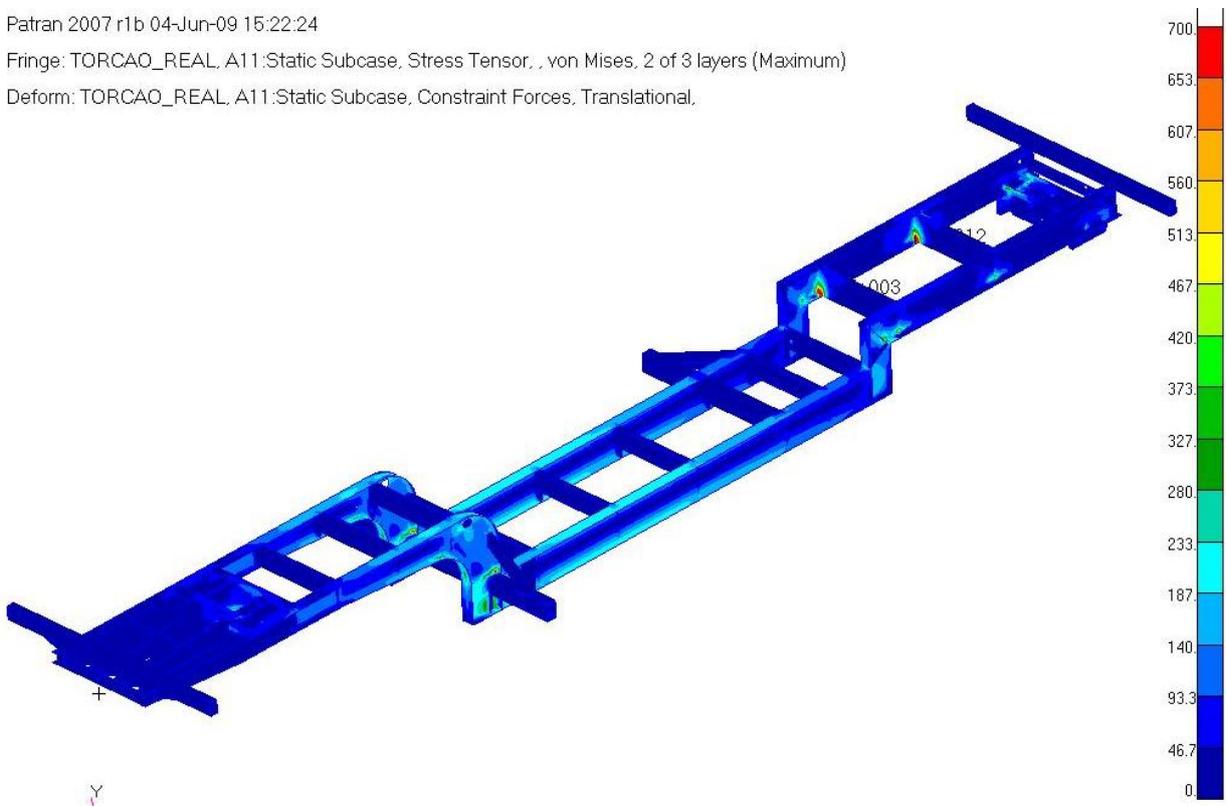


Figura 4.10. Tensões da 3ª simulação

Patran 2007 r1b 04-Jun-09 15:22:24

Fringe: TORCAO_REAL, A11:Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, 2 of 3 layers (Maximum)

Deform: TORCAO_REAL, A11:Static Subcase, Constraint Forces, Translational.

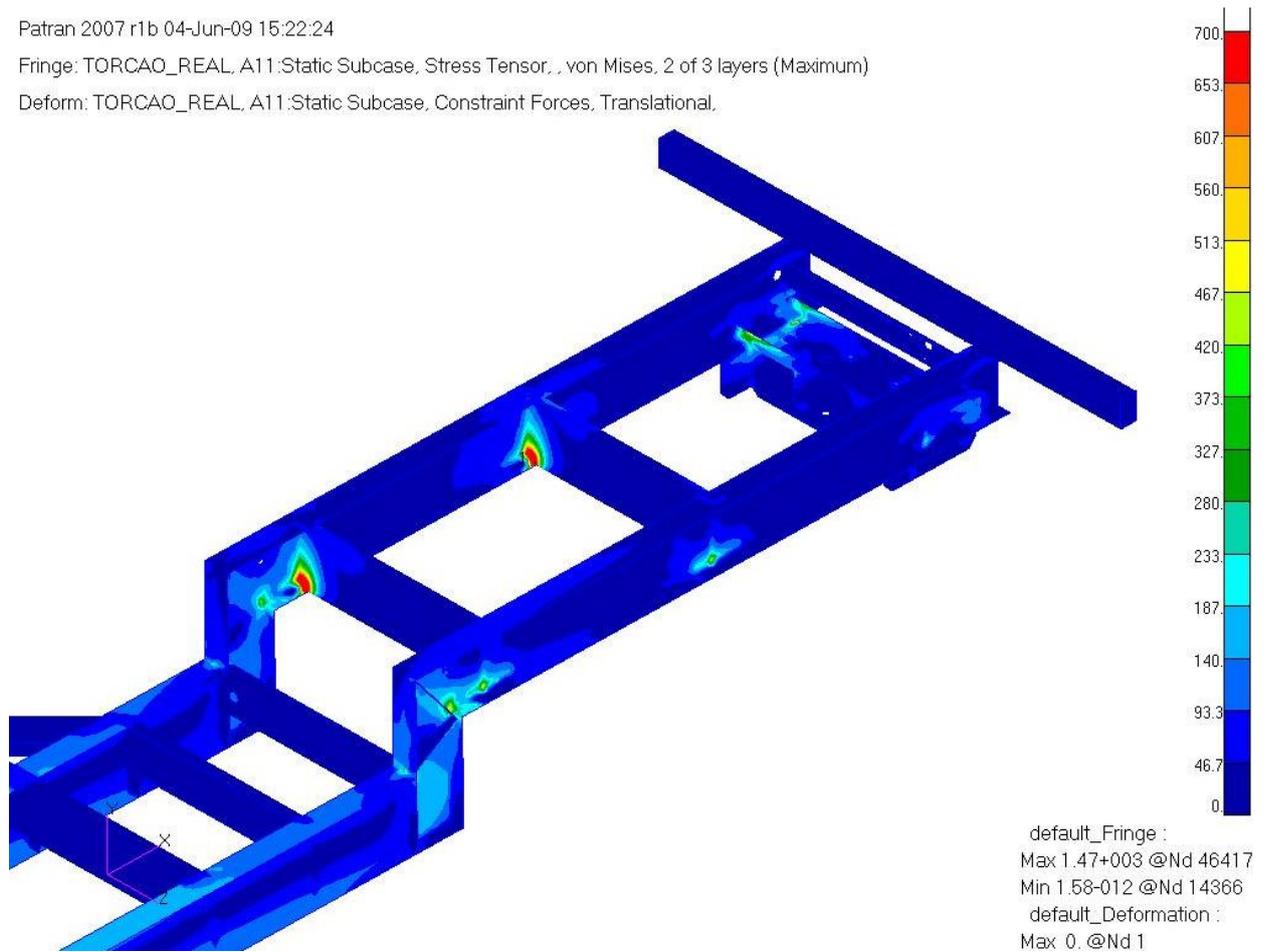


Figura 4.11. Tensões da 3ª simulação na região mais solicitada

Notou-se que as travessas traseiras do chassi são as mais solicitadas quando o produto é simulado à torção, isso se explica pelo fato da suspensão estar bem abaixo dessas travessas, sendo a primeira região a ser solicitada quando a suspensão trabalha. Por isso, essa região merece uma atenção especial no desenvolvimento do projeto, no sentido de se evitar futuras quebras por fadiga ou tensões elevadas.

Na figura 4.12, tem-se a deformação, em mm, do chassi na 3ª simulação, podendo-se observar seu comportamento quando aplicados os carregamentos e restrições. Nota-se duas situações, uma deformada (colorida) e outra indeformada (azul), o que permite uma comparação visual do comportamento da estrutura quando simulada à torção.

Patran 2007 r1b 04-Jun-09 15:24:48

Fringe: TORCAO_REAL, A11:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: TORCAO_REAL, A11:Static Subcase, Displacements, Translational.

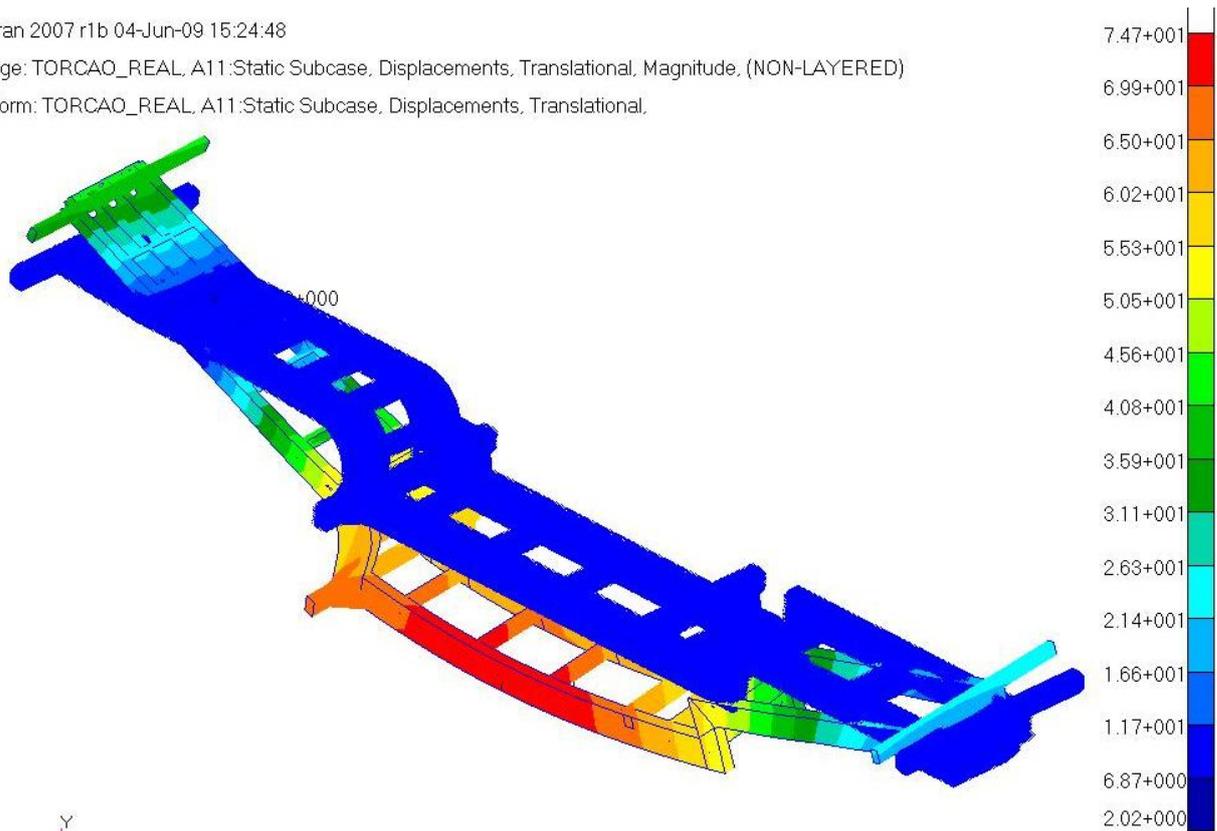


Figura 4.12. Deformação da 3ª simulação

Verifica-se que a região sujeita a maior deformação continua sendo aquela do rebaixo central da viga por ser a região mais crítica do chassi.

4.4 4º Caso de Estudo - Simulação de Torção 2 do Chassi

Condições de Contorno:

Restrições: pino-rei restringido, suspensão restringida em um dos lados e no outro um deslocamento de 100 mm localizado de forma oposta ao quadro de giro.

Carregamentos: carga de 20 t nas regiões dianteira e traseira das vigas do chassi e 10 t na região do rebaixo central das vigas, conforme figura 4.13.

Essa condição de contorno faz com que a suspensão tenha um deslocamento de 100 mm em um dos lados, simulando uma torção maior no chassi, simulando uma situação extrema de torção no chassi.

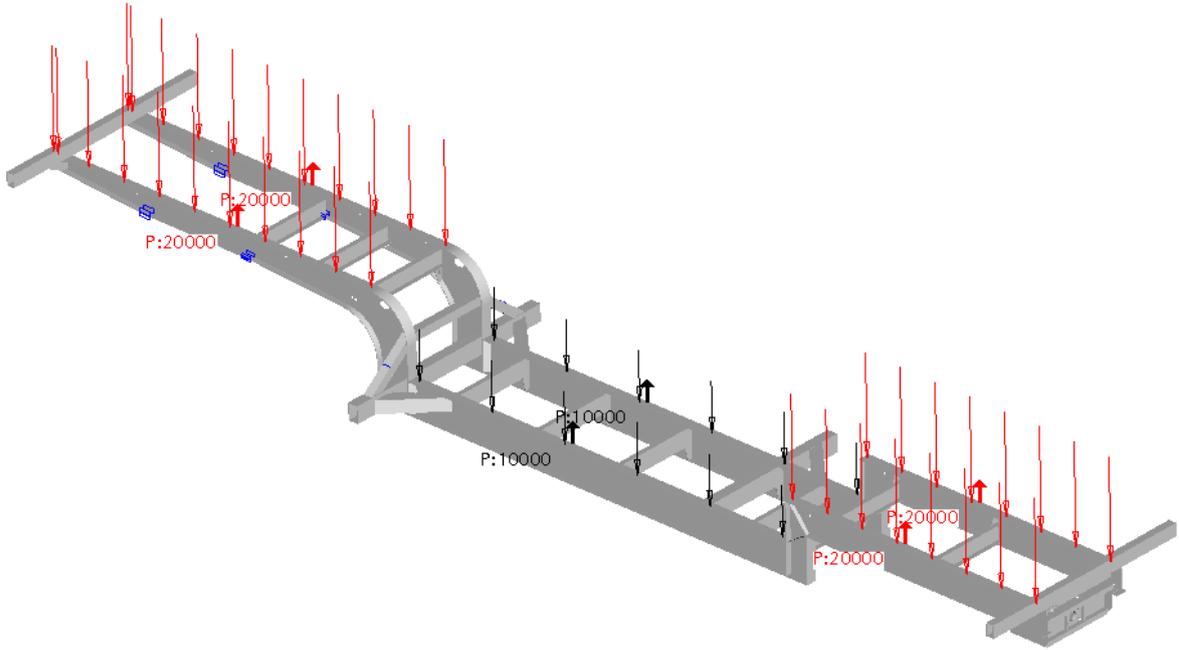


Figura 4.13. 4ª condição de carregamentos

Resultados da 4ª simulação:

Os resultados de tensão em MPa da 4ª simulação seguem na figura 4.14 mostrando todo o chassi e na figura 4.15 onde se tem a região mais solicitada do mesmo.

Patran 2007 r1b 04-Jun-09 15:44:07

Fringe: TORCAO_REAL100, A12:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 3 layers (Maximum)

Deform: TORCAO_REAL100, A12:Static Subcase, Constraint Forces, Translational.

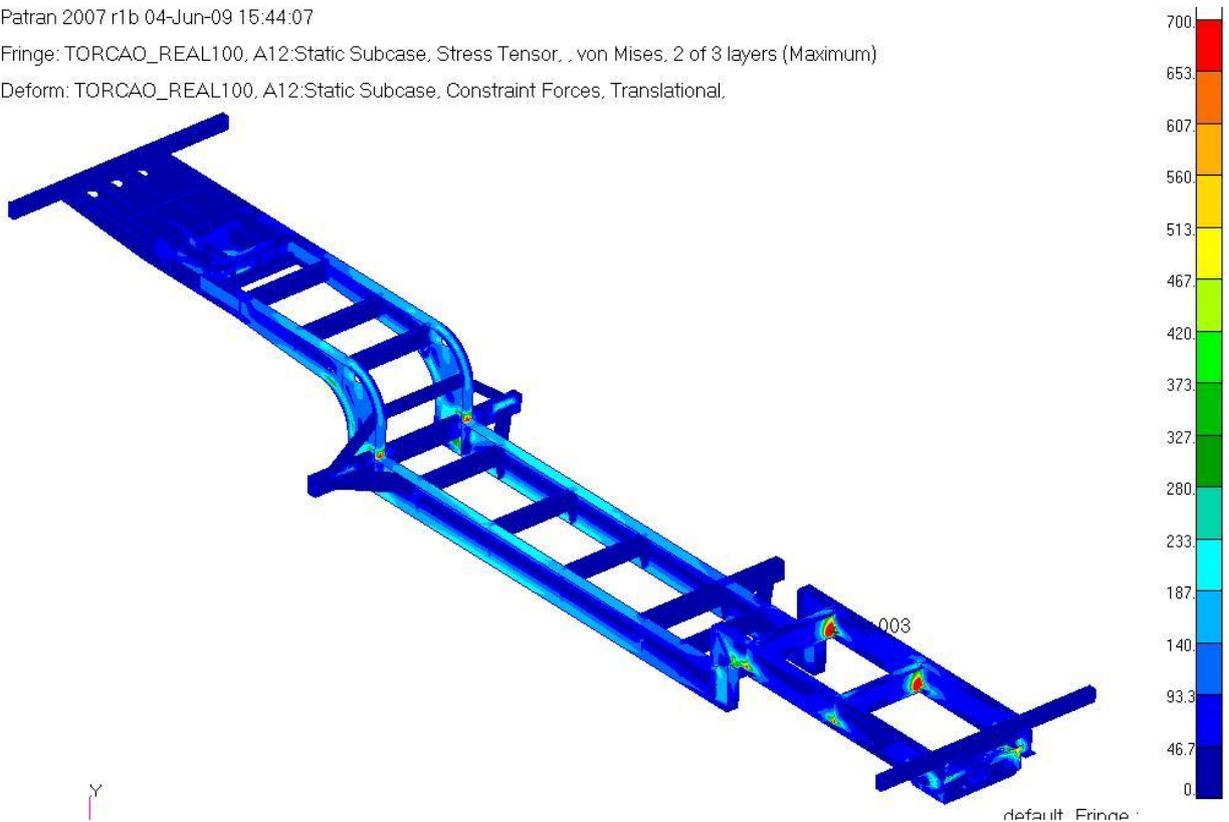


Figura 4.14. Tensões da 4ª simulação

Patran 2007 r1b 04-Jun-09 15:44:07

Fringe: TORCAO_REAL100, A12:Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 3 layers (Maximum)

Deform: TORCAO_REAL100, A12:Static Subcase, Constraint Forces, Translational,

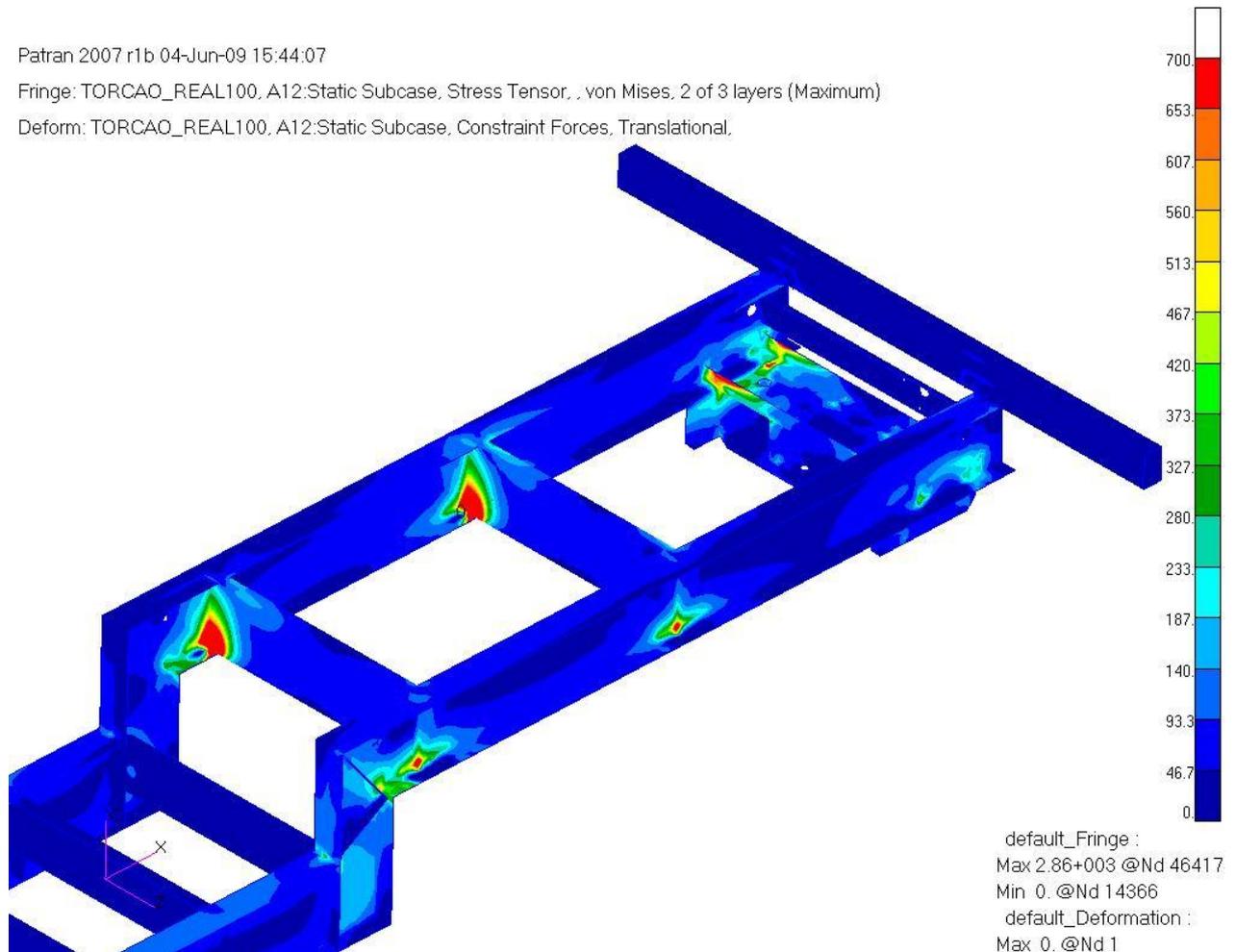


Figura 4.15. Tensões da 4ª simulação na região mais solicitada

Verifica-se novamente que a região mais solicitada vem a ser a das travessas traseiras. Estas tensões podem ser explicadas pelas condições de contorno adotadas, que forçam a suspensão a descer 100 mm somente de um dos lados, levando a uma torção elevada no chassi, condição extrema de operação do semi-reboque a qual não é impossível de acontecer. Posteriormente serão feitas análises em várias travessas traseiras no sentido de se otimizar essa condição de operação do produto.

A seguir, na figura 4.16, é apresentada a deformação, em milímetros, do chassi na 4ª simulação, podendo-se ver o comportamento do chassi quando aplicados os carregamentos e restrições. A fim de permitir uma comparação visual do comportamento da estrutura quando simulada à torção, tem-se a estrutura indeformada, em azul, e deformada em colorido.

Patran 2007 r1b 04-Jun-09 15:47:10

Fringe: TORCAO_REAL100, A12:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: TORCAO_REAL100, A12:Static Subcase, Displacements, Translational,

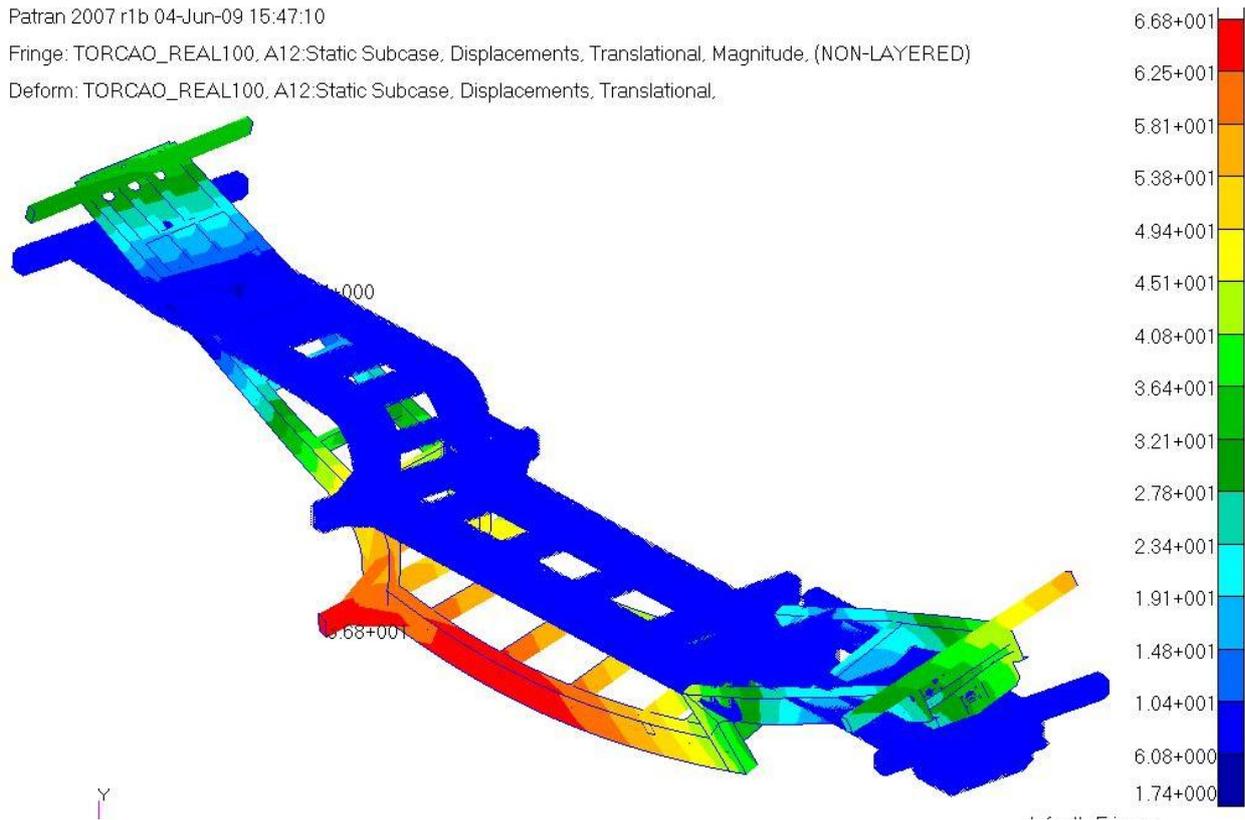


Figura 4.16. Deformação da 4ª simulação

Observa-se novamente, que a região central vem a ser a que está sujeita a maior deformação durante a simulação estrutural, confirmando que esse é um local ao qual deve ser dada atenção especial durante o dimensionamento do produto.

4.5 5º Caso de Estudo - Simulação de Basculamento da Caixa de Carga

Condições de Contorno:

Restrições: pino-rei e suspensão.

Carregamentos: carga de 25 t distribuídas em quatro regiões do quadro de giro, que seriam as regiões onde a caixa de carga fica apoiada sobre o quadro de giro por meio dos mancais, que são soldados na caixa e no quadro. A figura 4.17 ilustra os pontos de carregamento.

A carga de 25 t diz respeito à metade da carga total que a caixa pode suportar devido ao seu volume, visto que o restante do carregamento é distribuído no guincho, que puxa a caixa para cima quando do seu basculamento.

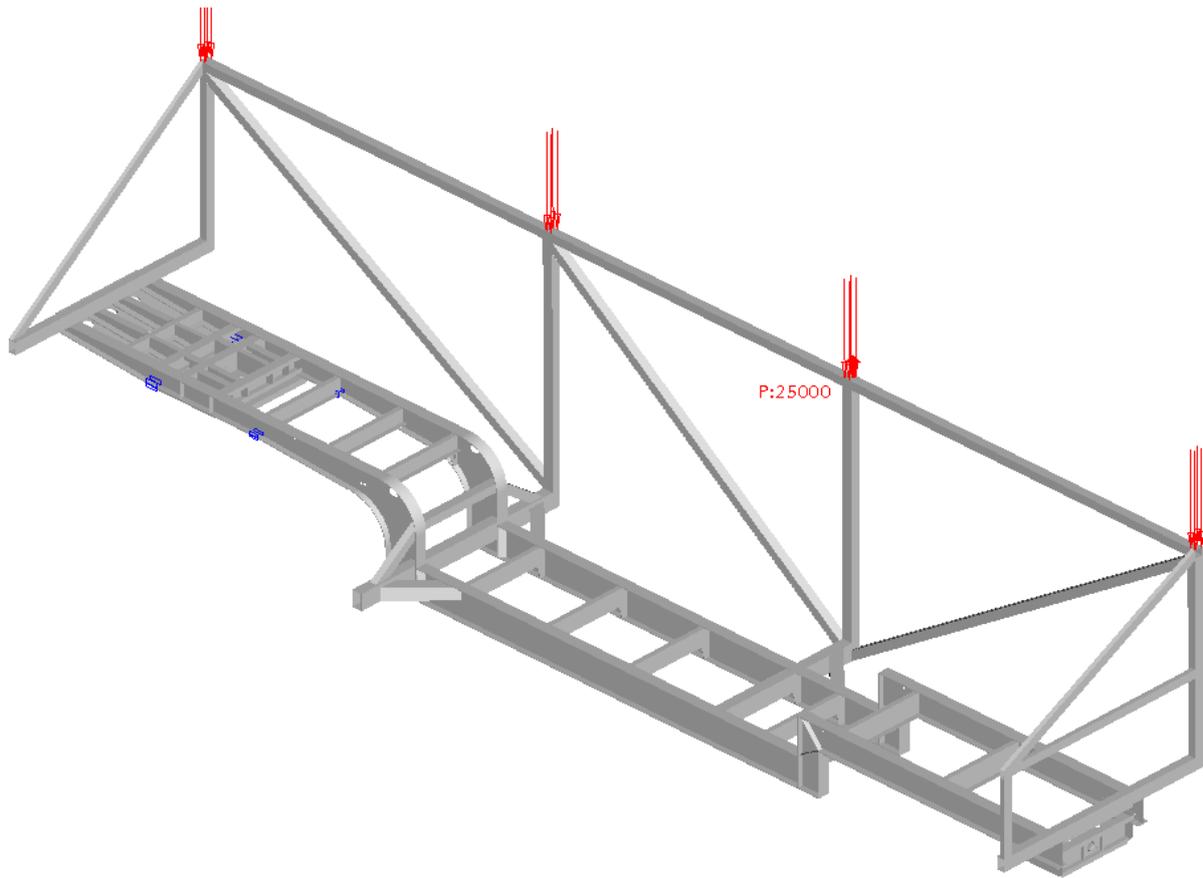


Figura 4.17. 5ª condição de carregamentos

Resultados da 5ª simulação:

Os resultados de tensão em MPa da 5ª simulação encontram-se na figura 4.18, onde é mostrando todo o quadro de giro, e nas figuras 4.19 e 4.20 as regiões mais solicitadas.

MSC FEA 2007 r1 04-Jun-09 18:43:45

Fringe: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 3 layers (Maximum)

Deform: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Constraint Forces, Translational.

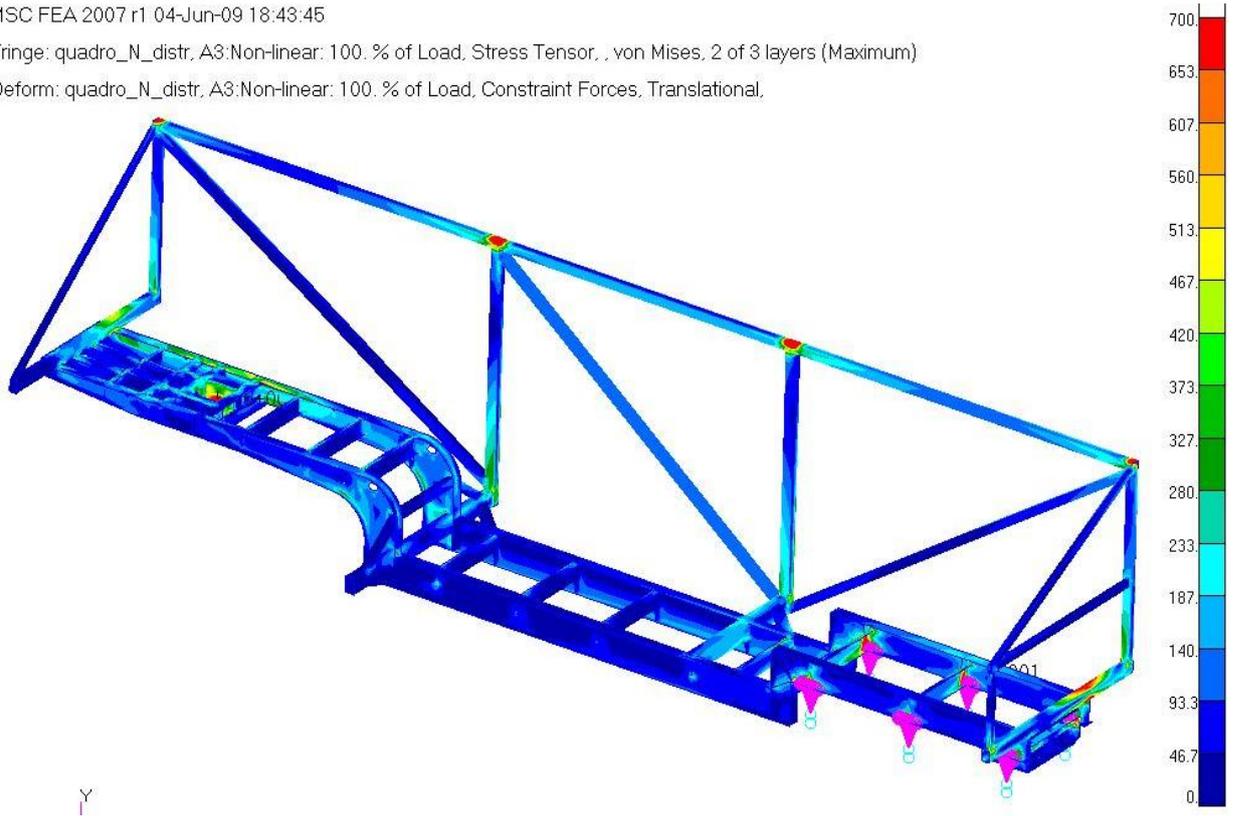


Figura 4.18. Tensões da 5ª simulação

MSC FEA 2007 r1 04-Jun-09 18:43:45

Fringe: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Stress Tensor, , von Mises, 2 of 3 layers (Maximum)

Deform: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Constraint Forces, Translational.

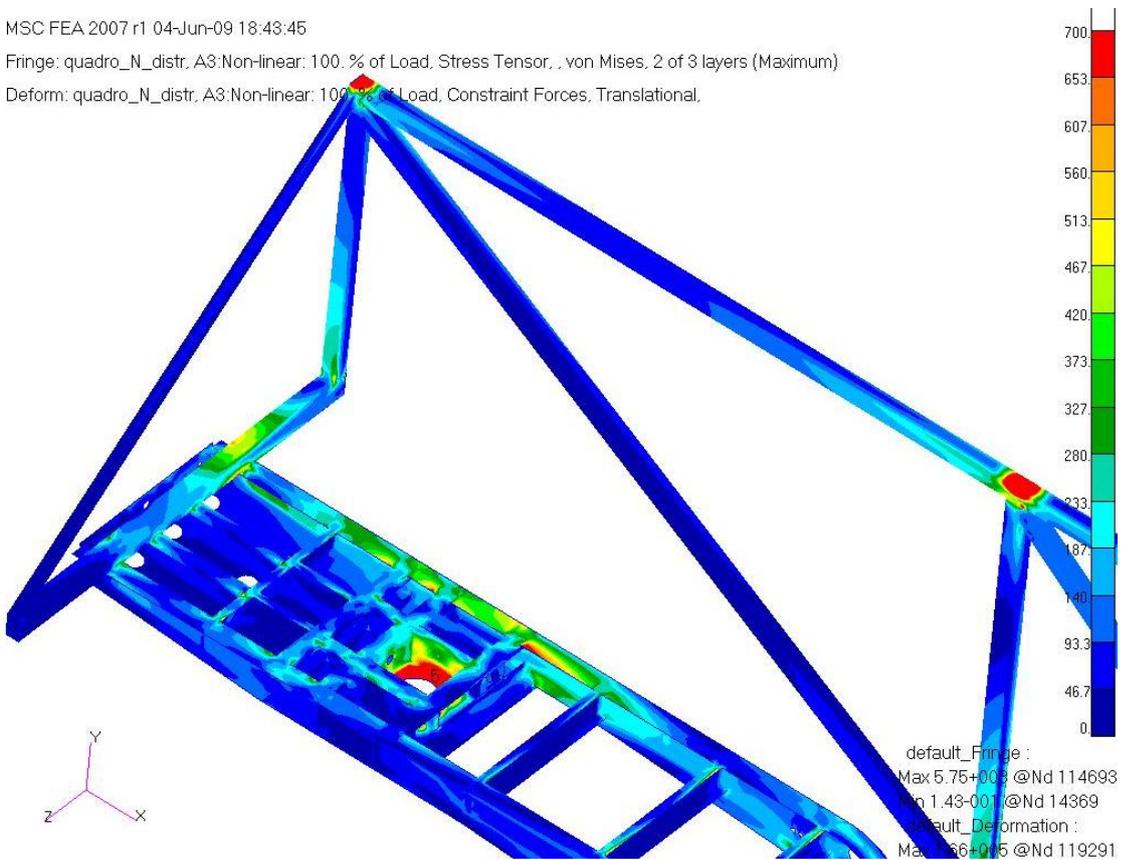


Figura 4.19. Tensões na parte dianteira do produto da 5ª simulação

Observa-se que as regiões mais solicitadas são aquelas onde foram aplicadas as cargas, regiões dos mancais, e local onde o quadro de giro é apoiado sobre a viga do chassi na parte dianteira. Essas regiões não apresentam histórico de quebras, devido a isto serão mantidas as configurações iniciais de projeto.

Outro local bastante solicitado vem a ser a chapa aonde o pino-rei é fixado, comprovando o que realmente ocorre. Devido a estas condições severas, a mesa do pino-rei é uma região onde se tem um número maior de travessas, a fim de garantir uma distribuição mais uniforme das tensões.

Apresenta-se a seguir a região traseira do quadro de giro local que se mostrou bastante solicitado no basculamento da caixa de carga. A figura 4.20 mostra os resultados locais da 5ª simulação na parte traseira do produto.

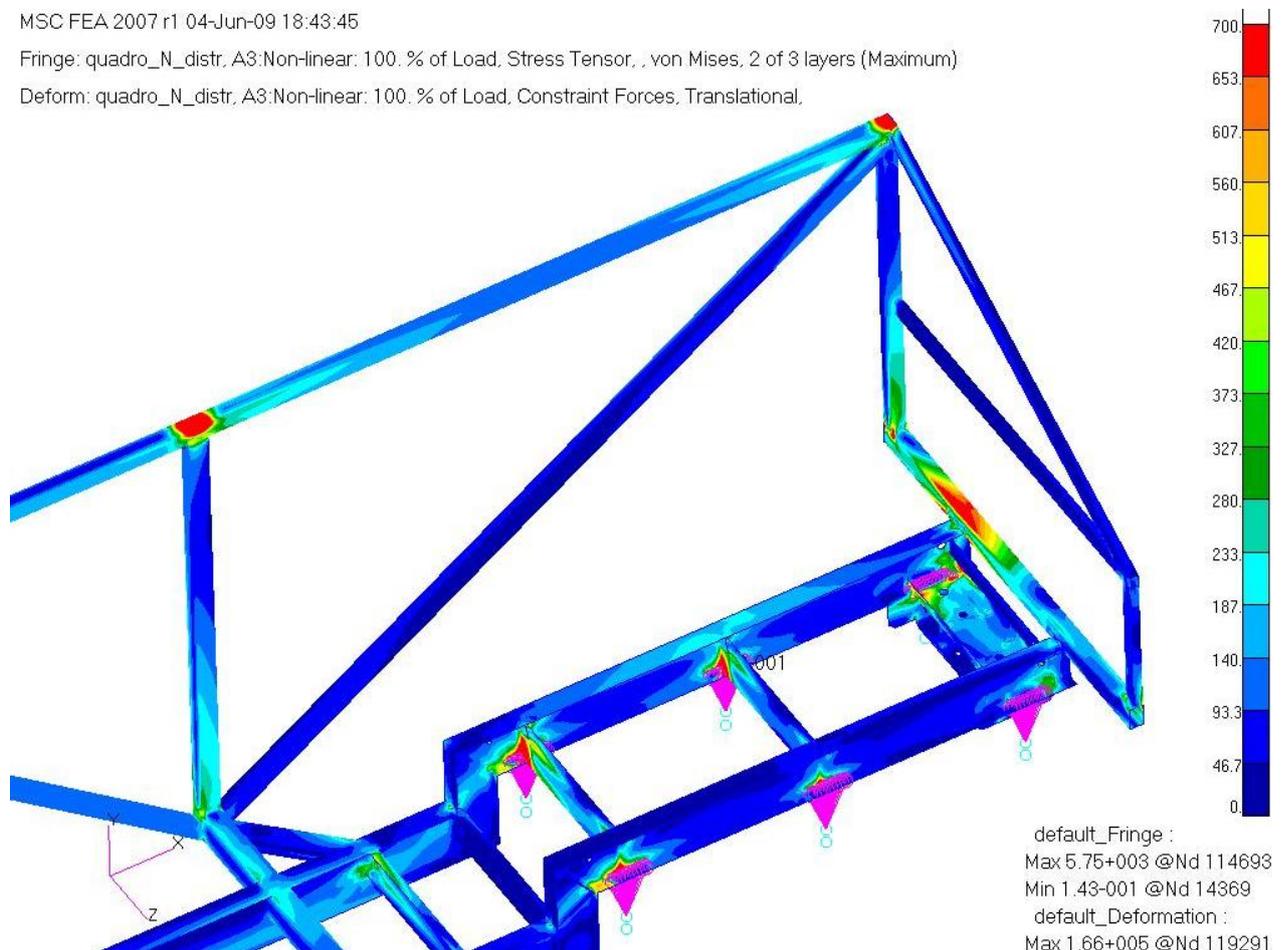


Figura 4.20. Tensões na parte traseira do produto da 5ª simulação

Verificou-se a ocorrência de uma região com tensões bastante elevadas, próximas da tensão de escoamento do material (700 MPa), na região de apoio do quadro de giro sobre a viga do chassi. Dessa forma, optou-se pela execução de uma nova análise, onde aumentou-se a espessura do tubo, que se mostrou mais solicitado, de 3 mm para 4,75 mm. Na figura 4.21 tem-se o novo

resultado da mesma simulação, com as condições de contorno exatamente iguais, somente aumentando-se a espessura do tubo em estudo.

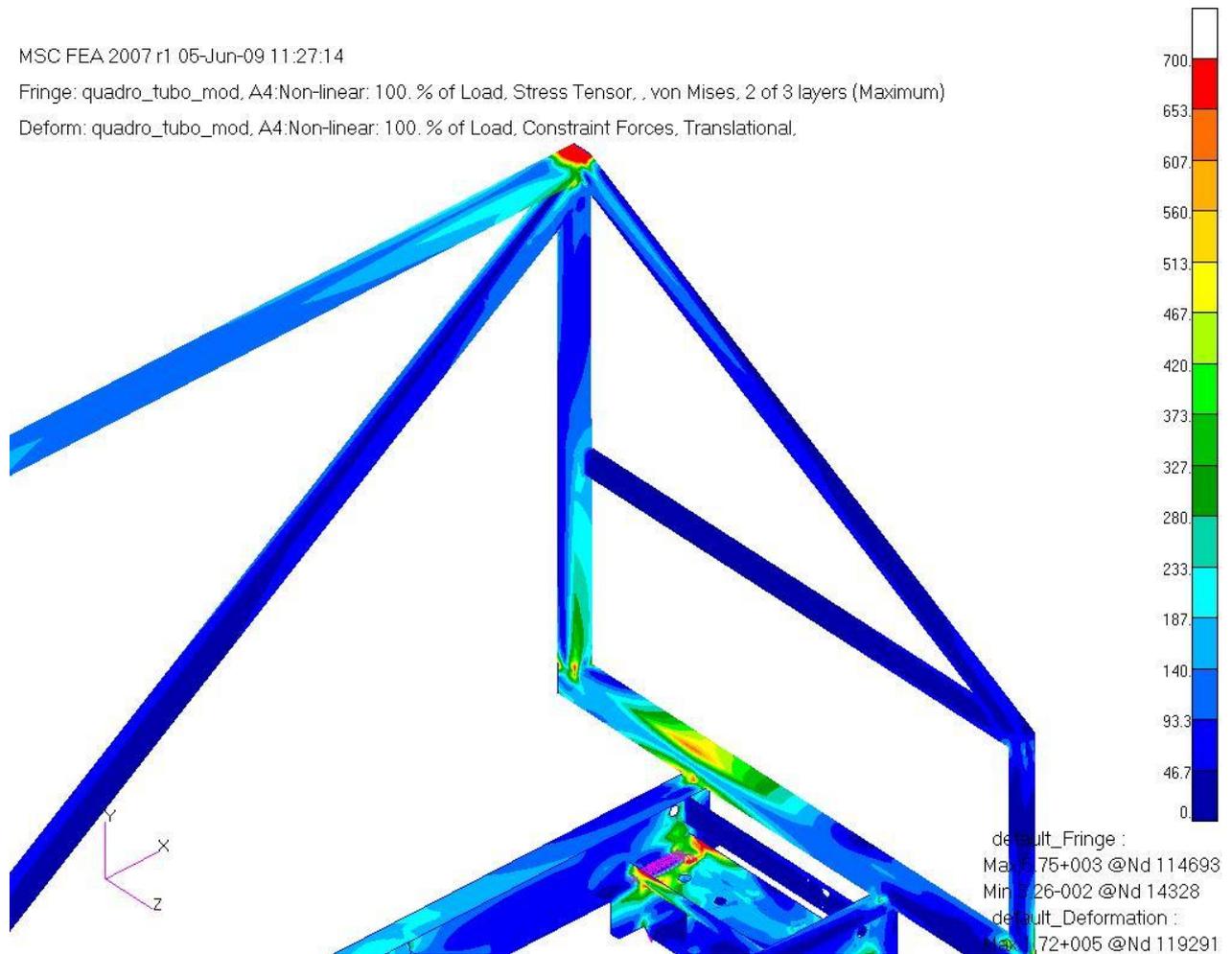


Figura 4.21. Tensões Locais na traseira com tubo modificado da 5ª simulação

Através da figura 4.21 visualiza-se a melhoria obtida por meio da modificação na espessura do tubo. A tensão baixou de aproximadamente 700 MPa, para aproximadamente 470 MPa, ou seja, houve uma redução de 33% no valor de tensão da região mais solicitada.

O estudo acima comprova uma das principais vantagens de se realizar a análise estrutural de um produto em desenvolvimento, pois é possível a visualização virtual do comportamento da estrutura, obtendo ao mesmo tempo os valores de tensões e deformações. Com base nesses dados, é possível o aperfeiçoamento do projeto, antes mesmo da construção dos protótipos para testes em campo. Assim se ganha em tempo e custo, além de serem minimizados os riscos, quando não se possui tempo de testar um protótipo em todas as condições de operação.

Na figura 4.22, são apresentados os resultados de deformação do quadro de giro, quando simulado o basculamento da caixa de carga.

MSC FEA 2007 r1 04-Jun-09 18:57:34

Fringe: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational.

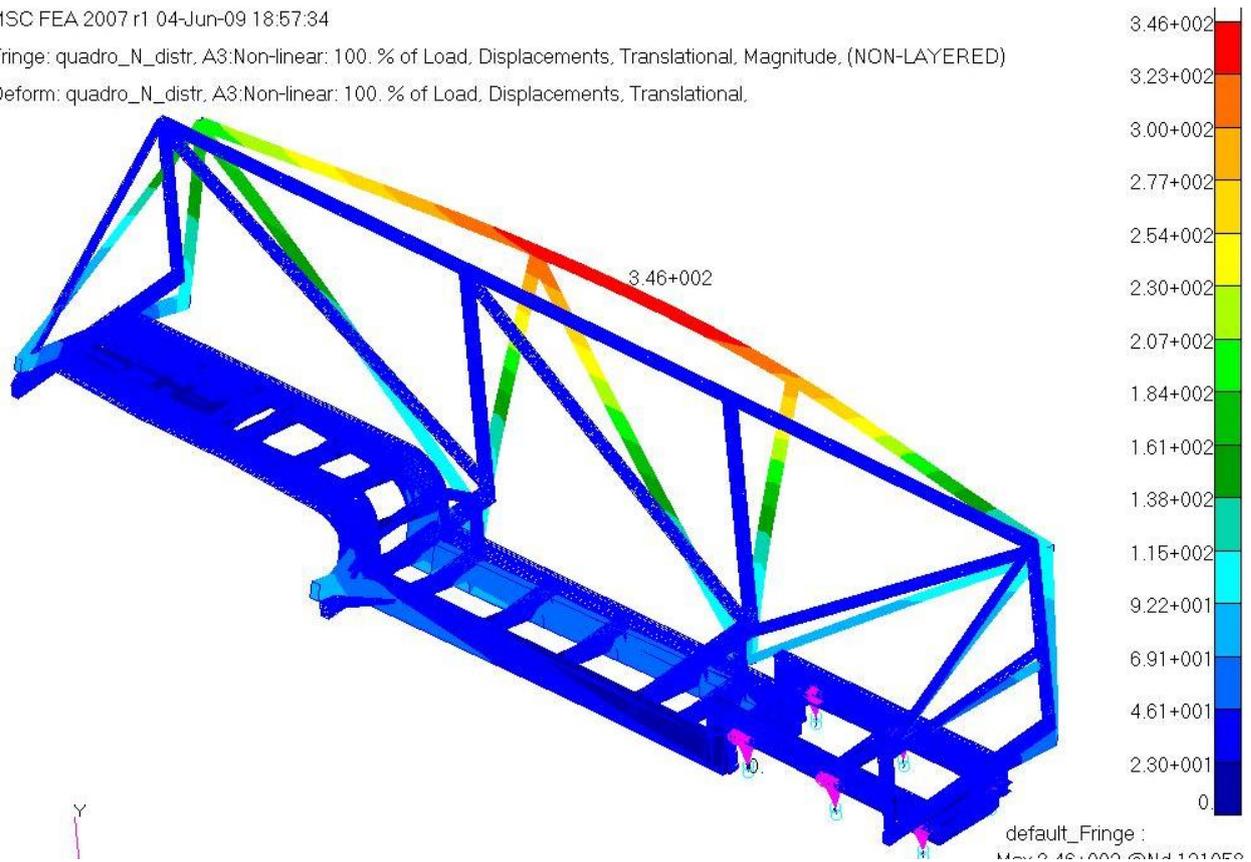


Figura 4.22. Deformação da 5ª simulação

Nota-se um deslocamento superior na parte central do quadro de giro, condição que se explica por ser a região mais afastada das estruturas dianteira e traseira, que formam os triângulos de estruturação, local que poderá ter um deslocamento maior. Porém, em condições reais de operação, essa região é ancorada pela mesa onde o SR faz a descarga, limitando esse deslocamento, e garantido uma deformação na casa de 100 a 200 mm, a qual é uma faixa aceitável de deformação para essa região.

A seguir, mostra-se a figura 4.23, vista traseira da 5ª simulação, podendo-se ver o deslocamento lateral do quadro de giro do chassi, quando o produto executa o basculamento da caixa de carga.

MSC FEA 2007 r1 04-Jun-09 19:06:16

Fringe: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: quadro_N_distr, A3:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational.

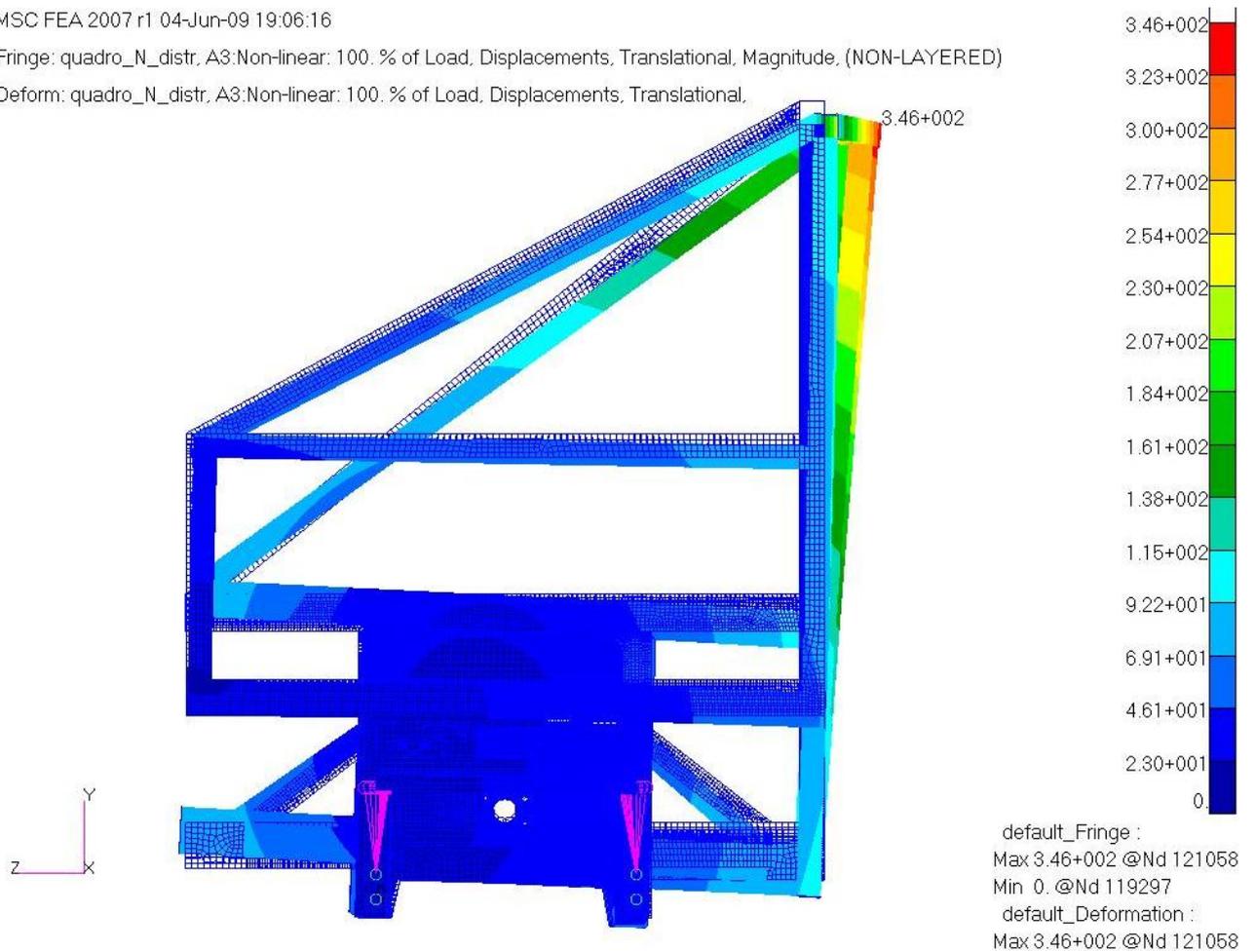
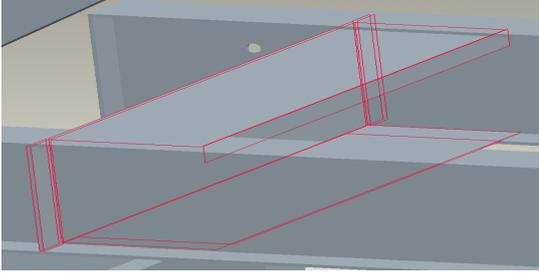
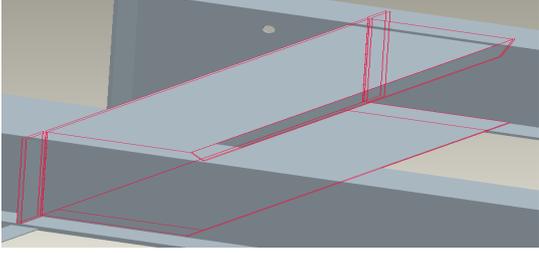
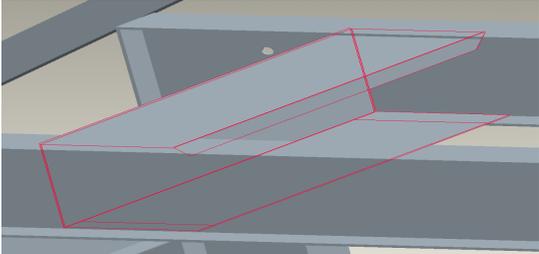
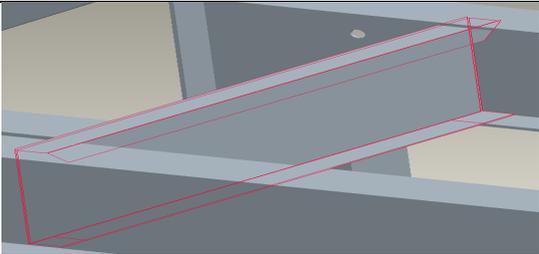
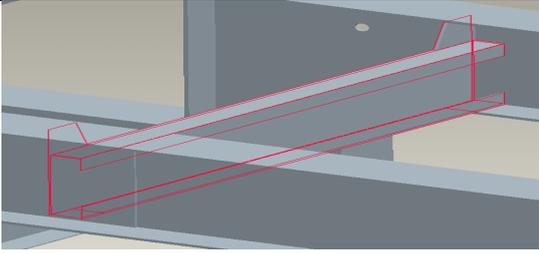
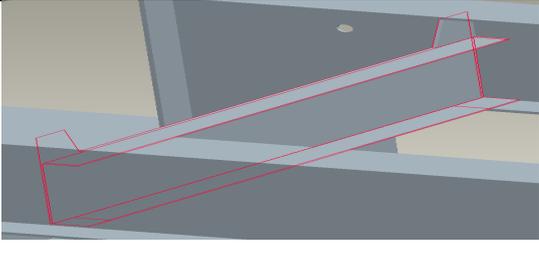


Figura 4.23. Deformação da 5ª simulação – vista traseira do produto

A deformação lateral do quadro de giro não ocorre visto que quando do basculamento a estrutura fica travada pela mesa que pertence à moenda. A moenda é a estrutura que recebe a cana de açúcar quando o semi-reboque canavieiro executa a operação para despejar a cana de açúcar. Essa deformação não ocorre, porque quando o motorista vai estacionar para descarregar a cana de açúcar, ele praticamente encosta na mesa de descarregamento. Esse deslocamento lateral também é em grande parte absorvido pela suspensão do semi-reboque, que no momento do basculamento trabalha (desloca) bastante.

Como em todas as simulações, os valores máximos de tensão localizavam-se na mesma região, travessas traseiras, foi necessária a execução de outras simulações, com as mesmas condições de contorno da 5ª simulação, alterando-se apenas a configuração geométrica das travessas. Os modelos das travessas analisadas, bem como os resultados comparativos das análises, são mostrados na tabela 4.1, em função do valor de referência, onde foram identificados os menores valores de tensão e deformação.

Tabela 4.1. Otimização das travessas da suspensão

Configuração	Modelo da Travessa	Tensão máx.	Deformação máx.
Travessa 1 Altura = Largura Com costela		Referência	Referência
Travessa 2 Altura = Largura Com costela e chanfro		Sem variação	Sem variação
Travessa 3 Altura = Largura Com chanfro		+ 32%	+ 14,2%
Travessa 4 Altura = Espaçamento entre cintas		+ 43%	+ 15,7%
Travessa 5 Perfil C enrijecido		+ 31%	+ 22,8%
Travessa 6 Perfil C		+ 50%	+ 27,1%

As costelas citadas na tabela 4.1 referem-se a reforços verticais, que são soldados por fora da viga, alinhados com as travessas, para auxiliar na resistência do chassi quando submetido à torção. O chanfro, também citado na tabela 4.1, refere-se aquele que é feito em uma das abas da travessa, para evitar que esta seja soldada no processo de fabricação do chassi, auxiliando na não geração de trincas.

Verificou-se nesta última análise que a travessa mais adequada para ser usada é a número 1, por ter melhor comportamento estrutural quando comparada aos outros modelos analisados. Será feita uma análise de viabilidade, para ver qual travessa é a mais apropriada, considerando-se fatores como, integridade estrutural, custo, facilidade de fabricação e montagem.

5 TESTES EXPERIMENTAIS DE CAMPO

Neste tópico são apresentados os testes experimentais executados no produto em estudo, a metodologia adotada no procedimento do teste, os locais instrumentados e os resultados obtidos no teste.

Os testes experimentais foram executados pela Engenharia Experimental da Randon Implementos em conjunto com a Engenharia do Produto de Canavieiros.

O produto testado foi um Rodotrem para transporte de cana picada e cana cortada. Este semi-reboque é capaz de transportar cana em duas configurações, sendo possível na situação de cana picada que ocorra a compactação da cana dentro da caixa de carga através da própria máquina de carregamento (retro-escavadeira). O teste foi realizado na Usina Alta Mogiana S/A, zona rural de São Joaquim da Barra, interior de São Paulo. O semi-reboque em teste circulou no interior das fazendas produtoras de cana onde foi carregado e transportado até a usina. As estradas de rodagem foram em sua totalidade de chão, tendo sido constantemente patroladas, mantendo-se em boas condições para o tráfego. Para aprimoramento do teste foi necessário forçar condições de rodagem próximas as laterais da pista, local com maiores imperfeições, saliências formadas pela patrolagem, a fim de garantir níveis de tensões elevados causados em função de uma situação extrema de operação.

O teste visou confirmar tensões e acelerações, geradas do produto em função dos locais em que os mesmos trafegam.

Na figura 5.1, mostra-se a foto do produto instrumentado para realização dos testes experimentais.



Figura 5.1. Foto do produto instrumentado para os testes experimentais

5.1 Procedimento dos Testes Experimentais

Foram realizadas medições de sinais de tensão e de aceleração com uma frequência de amostragem de 50 Hz em pontos especificados conforme item 5.3.2. Transitar em estradas de chão localizadas próximas a usina simulando situação real de tráfego com SR vazio ou carregado, conforme procedimentos descritos nos itens 5.1.1 e 5.1.2. Devido ao número de pontos instrumentados, o teste foi dividido em duas configurações, conforme tabela 5.1, sendo que na configuração 01 têm-se todos os SG longitudinais e as rosetas de 1 a 4, e na configuração 02 têm-se todos os SG longitudinais e as rosetas de 5 a 8.

5.1.1 Veículo Vazio

Estrada não pavimentada (terra).

Local: o circuito normal de tráfego com veículo vazio, na qual segue o seguinte trajeto: Usina – Estradão da Usina – Aparecido Salto – Retiro da Mata – Carregamento.

Velocidade: a velocidade limite foi de 60 km/h.

5.1.2 Veículo Carregado

Estrada não pavimentada (terra).

Local: o circuito normal de tráfego com veículo carregado, na qual segue o seguinte trajeto: Carregamento – Retiro da Mata – Aparecido Salto – Estradão da Usina – Usina.

Velocidade: a velocidade limite era de 60 km/h.

5.2 Informações Gerais

Veículo Trator: Scânia 6X4 P 420.

Semi-Reboque: Rodotrem Canavieiro Randon 12,5 x 4,4m Alta Resistência.

5.2.1 Instrumentação Utilizada para o Teste

Software de Aquisição e Análise de Dados CATMAN v 3.1;

Sistema de Aquisição de Dados HBM (modelo Spider 8, nº 01, 02, 03 e 04);

Sensores *Strain Gauge* marca HBM (Figura 5.2).



(a)



(b)

Figura 5.2. Strain Gauge tipo longitudinal modelo LY41-6/120 (a), tipo roseta RY81-3/120 (b)

5.3 Desenvolvimento do Teste

5.3.1 Tipos de Carregamentos utilizados e configurações

Tara do Produto (SR dianteiro + SR traseiro + Veículo Trator) = 30.100 kg

1º Carregamento - Configuração 01: Cana Picada queimada – Compactada

2º Carregamento - Configuração 02: Cana Picada com palha – Compactada

3º Carregamento - Configuração 02: Cana Picada com palha – Compactada

4º Carregamento - Configuração 01: Cana Picada com palha – Compactada

5º Carregamento - Configuração 01: Cana Picada com palha – Compactada

6º Carregamento - Configuração 02: Cana Picada com palha – Compactada

5.3.2 Pontos Instrumentados

Na tabela 5.1 tem-se a distribuição dos sensores dentro das duas configurações em que foi dividido o teste.

Tabela 5.1. Distribuição dos sensores – Configuração 01 (lado esquerdo) e Configuração 02 (lado direito)

1	→	Time Canavieiro_SSAB	⊗	Time		s	1	→	Time Canavieiro_SSAB	⊗	Time		s
2	→	Acel. 01 - 5a Roda	✔	Canavieiro_SSAB_CH 0		g	2	→	Acel. 01 - 5a Roda	✔	Canavieiro_SSAB_CH 0		g
3	→	Acel. 02 - Suspensão	✔	Canavieiro_SSAB_CH 1		g	3	→	Acel. 02 - Suspensão	✔	Canavieiro_SSAB_CH 1		g
4	→	L1	✔	Canavieiro_SSAB_CH 2		um/m	4	→	L1	✔	Canavieiro_SSAB_CH 2		um/m
5	→	L2	✔	Canavieiro_SSAB_CH 3		um/m	5	→	L2	✔	Canavieiro_SSAB_CH 3		um/m
6	→	L3	✔	Canavieiro_SSAB_CH 4		um/m	6	→	L3	✔	Canavieiro_SSAB_CH 4		um/m
7	→	L4	✔	Canavieiro_SSAB_CH 5		um/m	7	→	L4	✔	Canavieiro_SSAB_CH 5		um/m
8	→	L5	✔	Canavieiro_SSAB_CH 6		um/m	8	→	L5	✔	Canavieiro_SSAB_CH 6		um/m
9	→	L6	✔	Canavieiro_SSAB_CH 7		um/m	9	→	L6	✔	Canavieiro_SSAB_CH 7		um/m
10	→	L7	✔	Canavieiro_SSAB_CH 10		um/m	10	→	L7	✔	Canavieiro_SSAB_CH 10		um/m
11	→	L8	✔	Canavieiro_SSAB_CH 11		um/m	11	→	L8	✔	Canavieiro_SSAB_CH 11		um/m
12	→	L9	✔	Canavieiro_SSAB_CH 12		um/m	12	→	L9	✔	Canavieiro_SSAB_CH 12		um/m
13	→	L10	✔	Canavieiro_SSAB_CH 13		um/m	13	→	L10	✔	Canavieiro_SSAB_CH 13		um/m
14	→	L11	✔	Canavieiro_SSAB_CH 14		um/m	14	→	L11	✔	Canavieiro_SSAB_CH 14		um/m
15	→	L12	✔	Canavieiro_SSAB_CH 15		um/m	15	→	L12	✔	Canavieiro_SSAB_CH 15		um/m
16	→	L13	✔	Canavieiro_SSAB_CH 16		um/m	16	→	L13	✔	Canavieiro_SSAB_CH 16		um/m
17	→	L14	✔	Canavieiro_SSAB_CH 17		um/m	17	→	L14	✔	Canavieiro_SSAB_CH 17		um/m
18	→	R1 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 20		um/m	18	→	R5 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 20		um/m
19	→	R1 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 21		um/m	19	→	R5 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 21		um/m
20	→	R1 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 22		um/m	20	→	R5 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 22		um/m
21	→	R2 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 23		um/m	21	→	R6 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 23		um/m
22	→	R2 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 24		um/m	22	→	R6 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 24		um/m
23	→	R2 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 25		um/m	23	→	R6 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 25		um/m
24	→	R3 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 26		um/m	24	→	R7 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 26		um/m
25	→	R3 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 27		um/m	25	→	R7 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 27		um/m
26	→	R3 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 30		um/m	26	→	R7 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 30		um/m
27	→	R4 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 31		um/m	27	→	R8 - a	✔	Canavieiro_SSAB_CH 31		um/m
28	→	R4 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 32		um/m	28	→	R8 - b	✔	Canavieiro_SSAB_CH 32		um/m
29	→	R4 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 33		um/m	29	→	R8 - c	✔	Canavieiro_SSAB_CH 33		um/m

Nas figuras de 5.3 a 5.20 tem-se a posição onde os sensores foram instrumentados conforme instrução da Engenharia do Produto de Canavieiros.

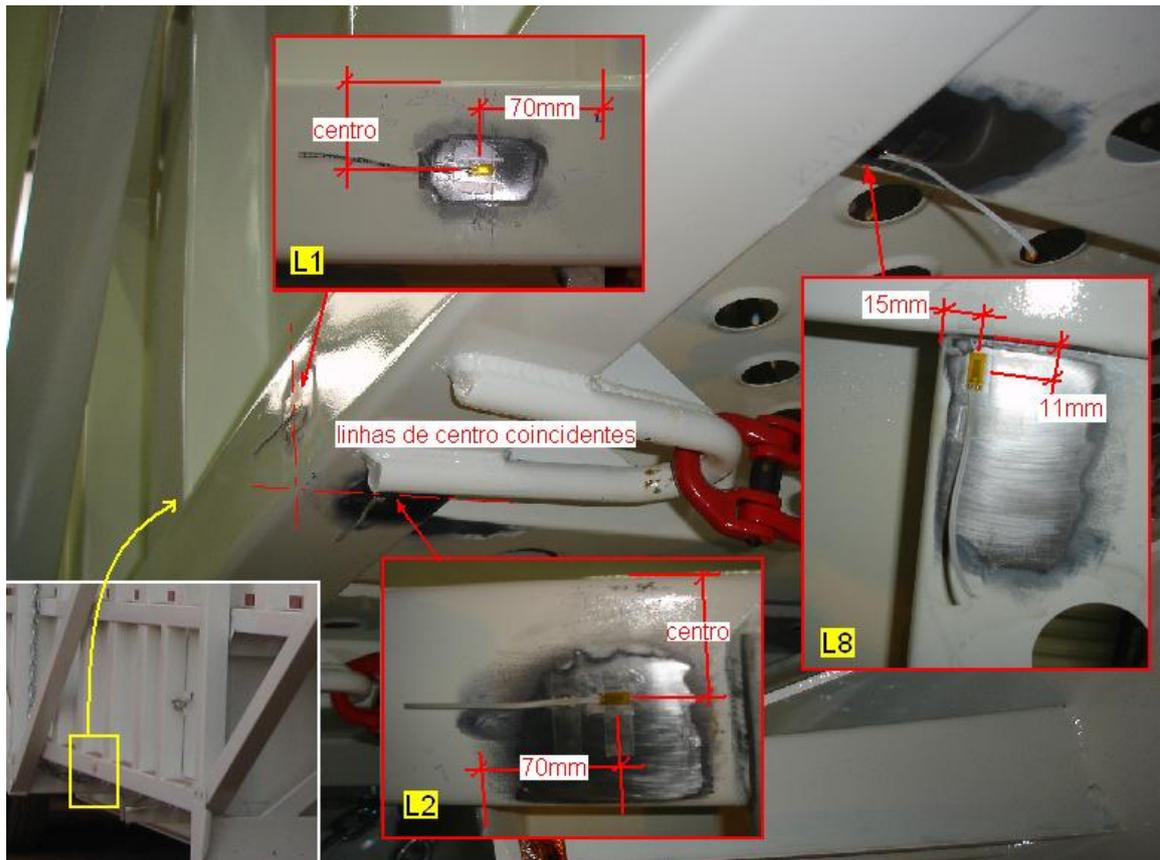


Figura 5.3. Strain Gauges longitudinais instrumentados no perfil inferior da lateral direita da caixa de carga (L1, L2 e L8)

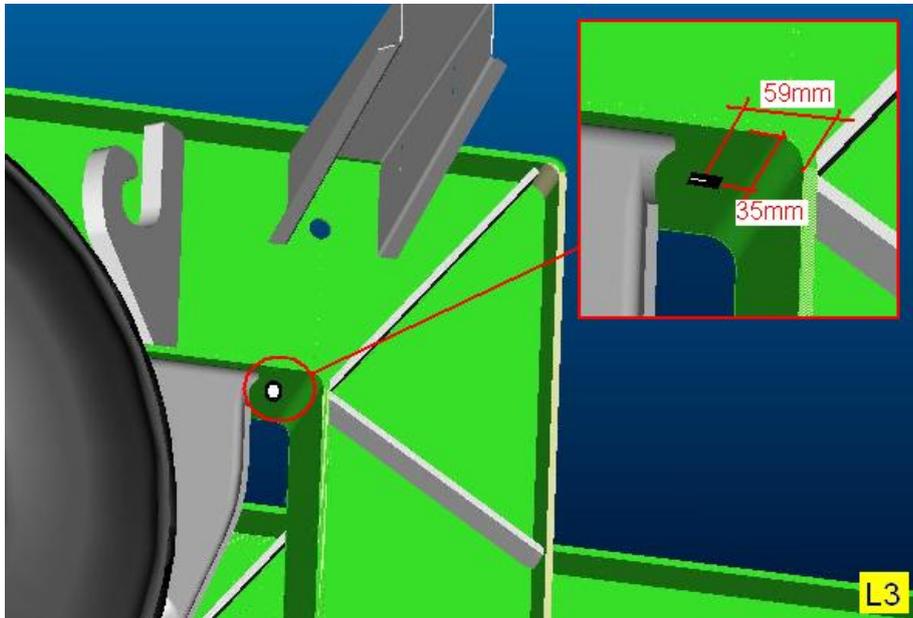


Figura 5.4. Strain Gauge longitudinal instrumentado próximo ao 1° eixo da suspensão na cinta inferior traseira do lado direito (L3)

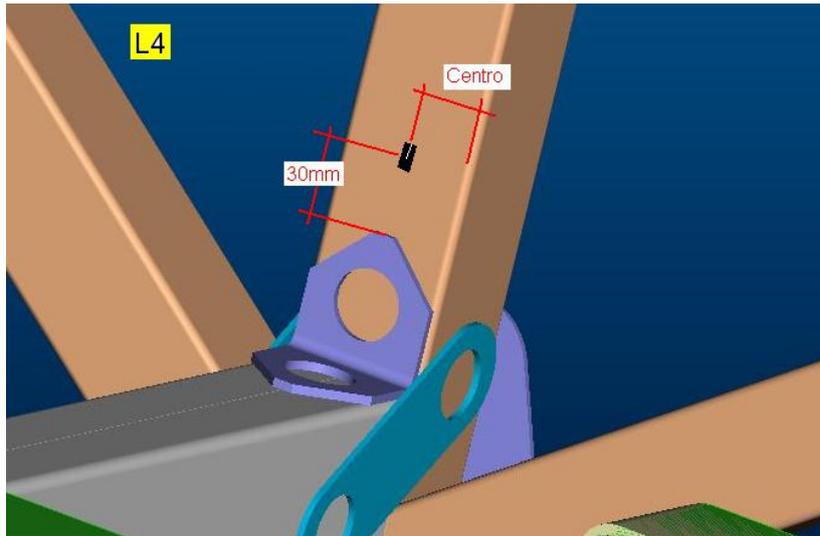


Figura 5.5. Strain Gauge longitudinal instrumentado próximo ao reforço do quadro de giro (L4)

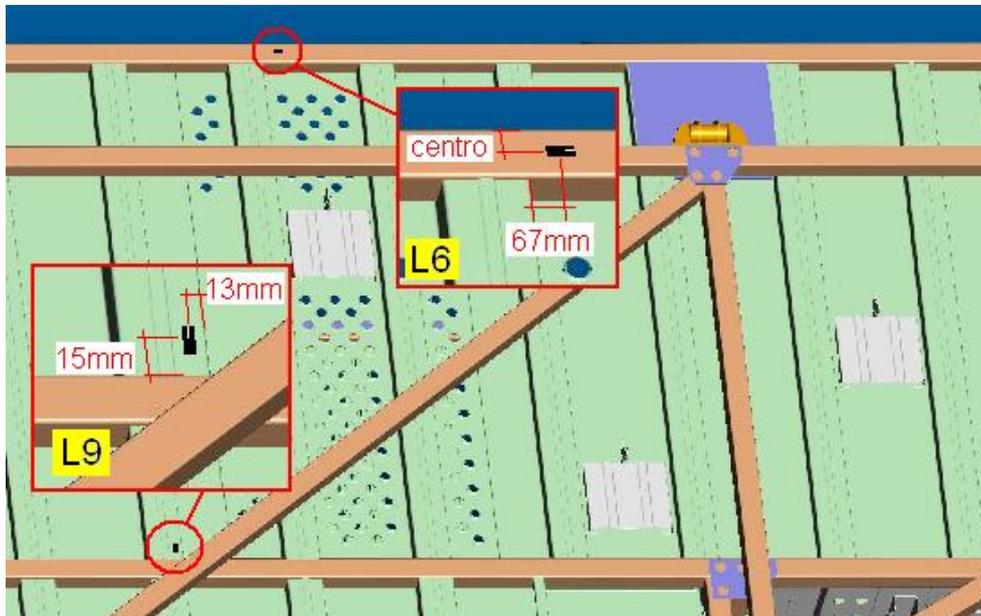


Figura 5.6. Strain Gauge longitudinal instrumentado no perfil superior e na lateral direita da caixa de carga (L6 e L9)

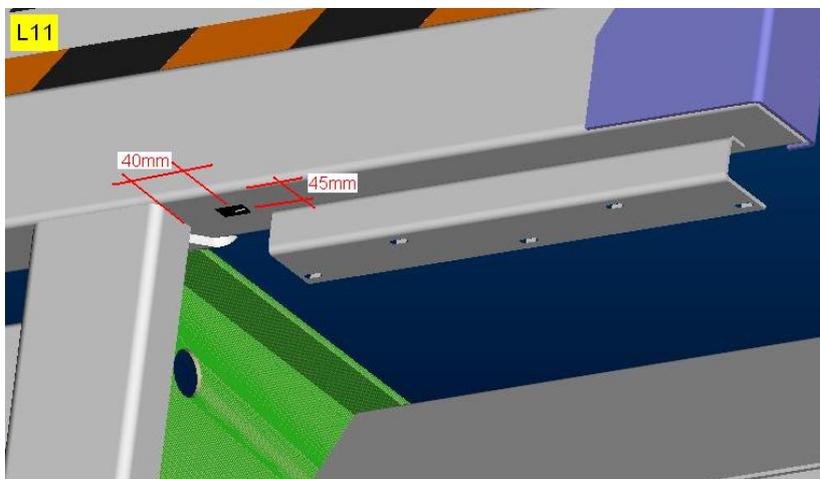


Figura 5.7. Strain Gauge longitudinal instrumentado próximo à sinaleira lado direito (L11)

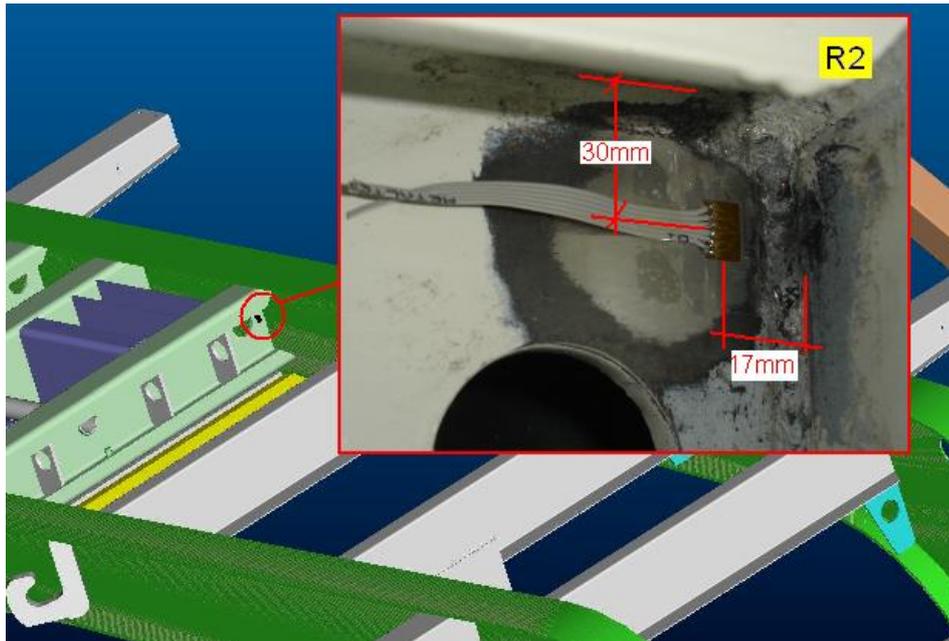


Figura 5.8. Roseta instrumentada no lado direito da travessa próxima à chapa de atrito do pino rei (R2)

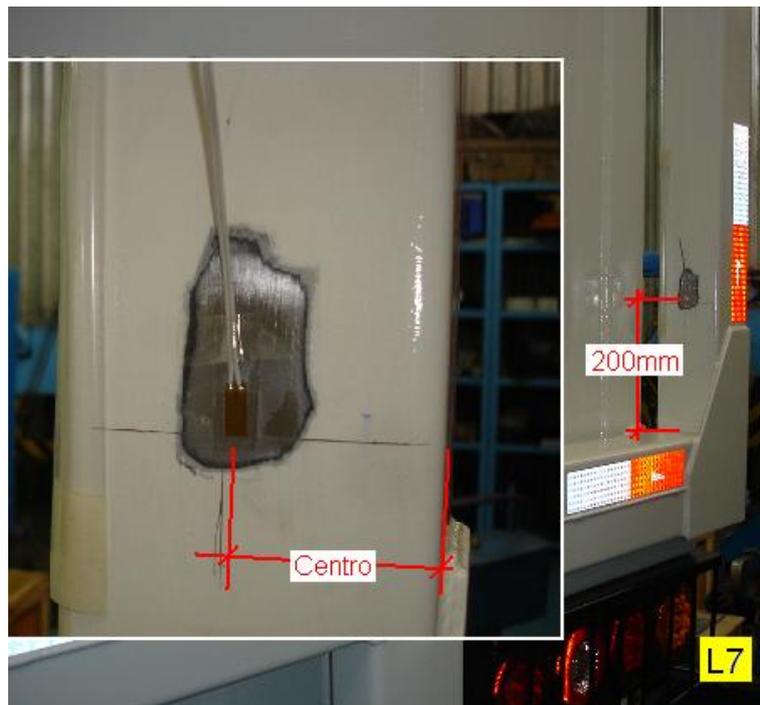


Figura 5.9. Strain Gauge longitudinal instrumentado no perfil acima da sinaleira lado direito (L7)

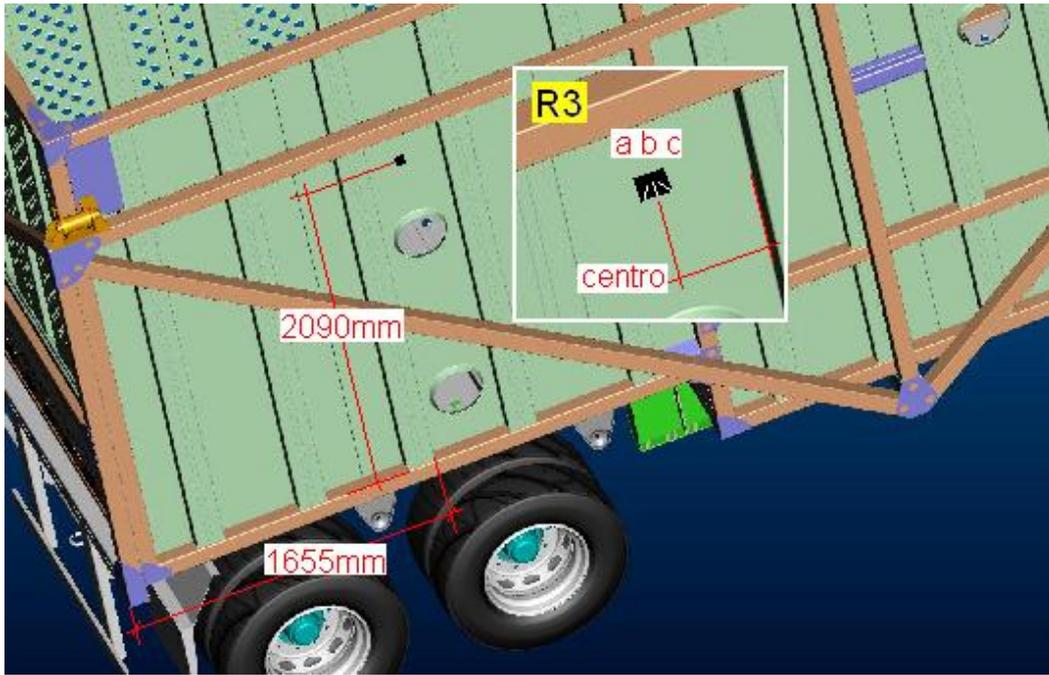


Figura 5.10. Roseta instrumentada na lateral direita da caixa de carga (R3)

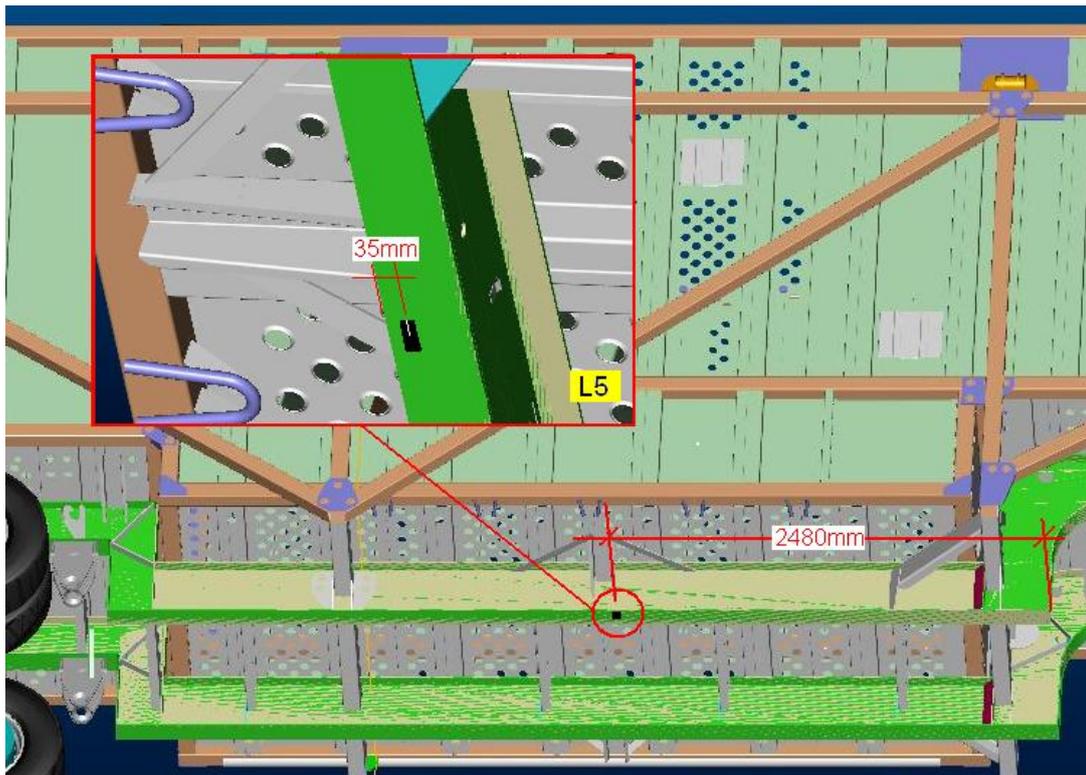


Figura 5.11. Strain Gauge longitudinal instrumentado na cinta inferior do chassi (L5)

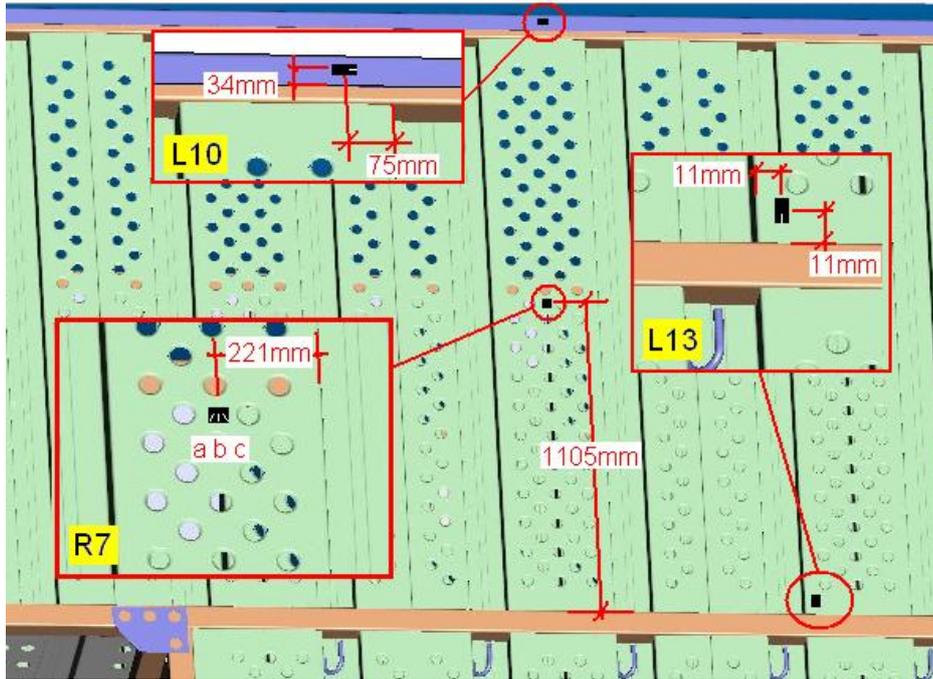


Figura 5.12. Strain Gauge longitudinal no perfil superior e na lateral esquerda da caixa de carga (R7, L10 e L13)

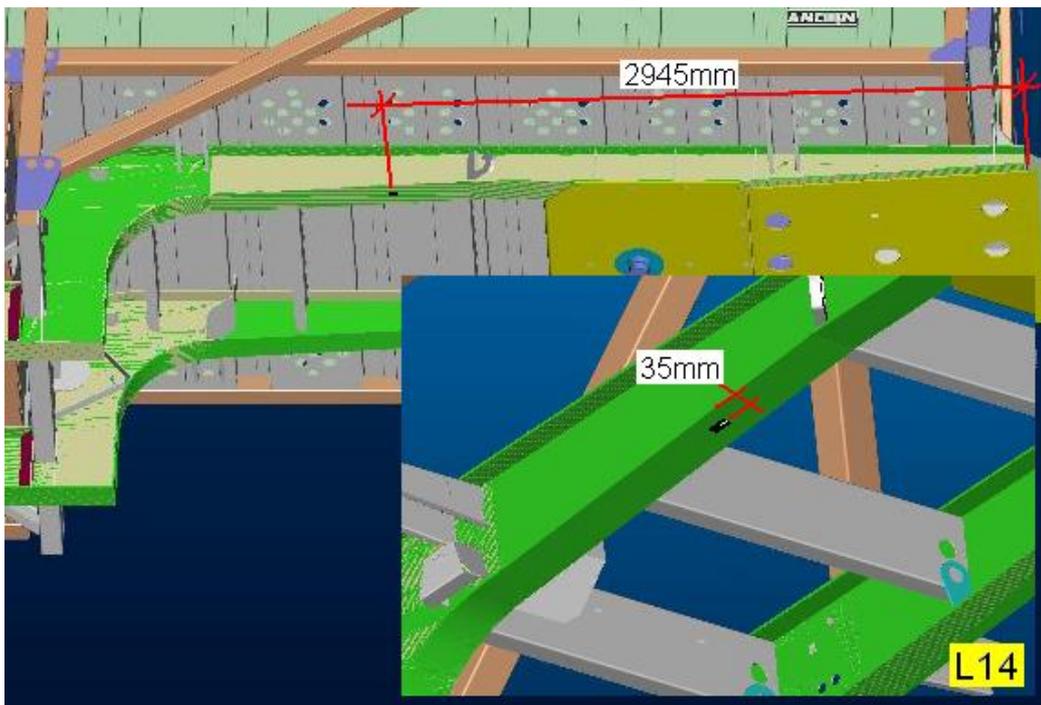


Figura 5.13. Strain Gauge longitudinal instrumentado na cinta próxima a chapa de atrito do pino rei – lado direito (L14)

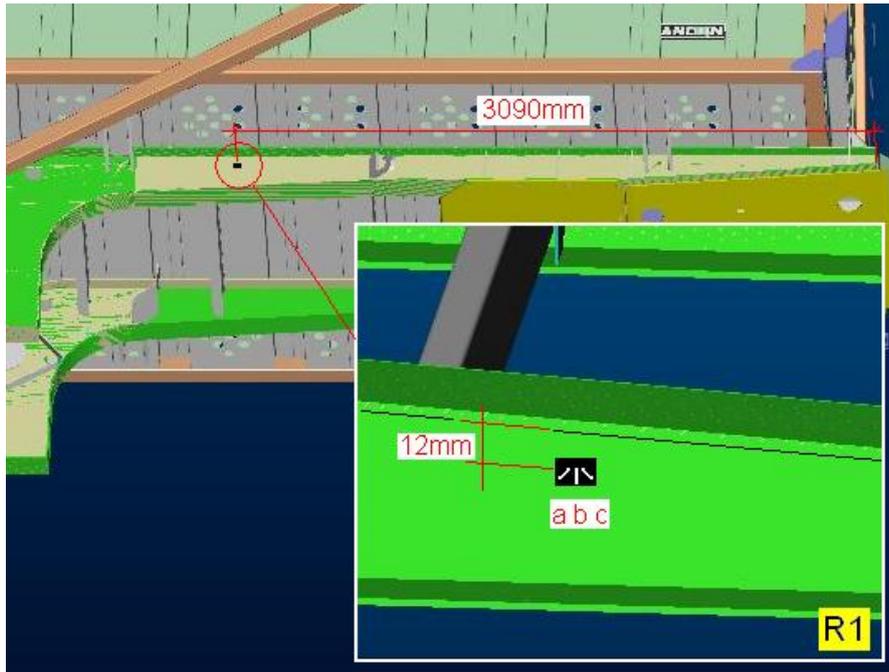


Figura 5.14. Roseta instrumentada na alma dianteira da lateral direita da viga do chassi (R1)

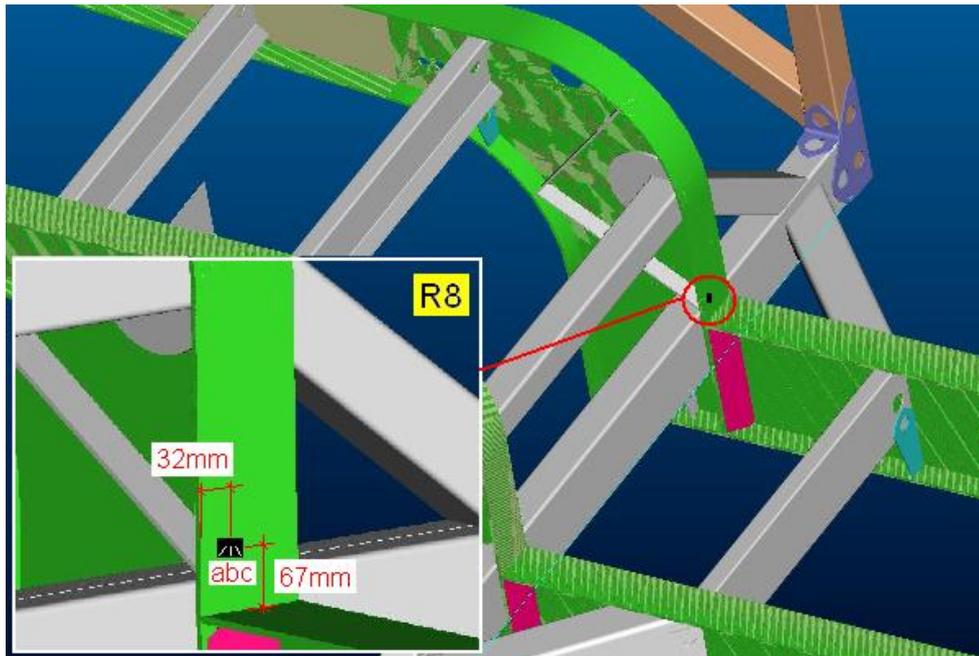


Figura 5.15. Roseta instrumentada na cinta do pescoço na lateral direita da viga do chassi (R8)

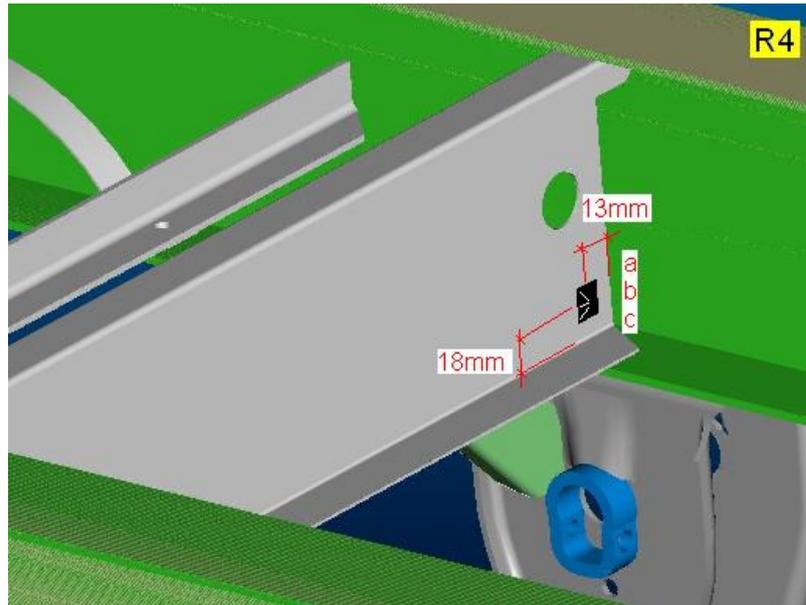


Figura 5.16. Roseta instrumentada na travessa acima do suporte da suspensão na lateral direita do chassi (R4)

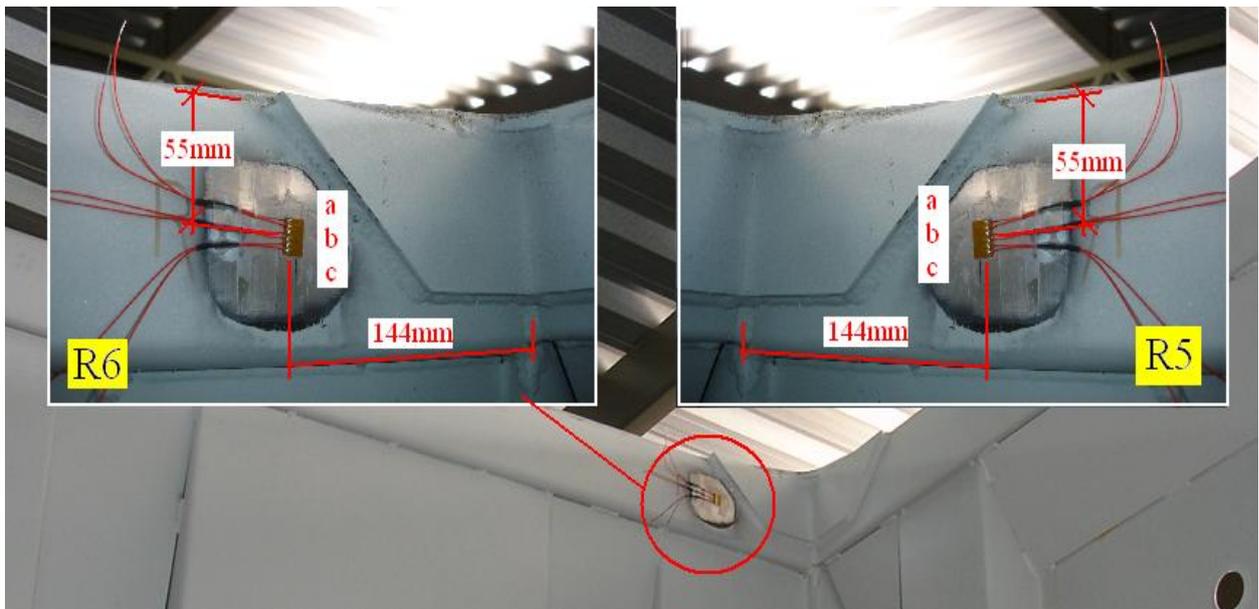


Figura 5.17. Rosetas instrumentadas nos cantos superiores esquerdo (R5) e direito (R6) – lado interno traseiro da caixa de carga

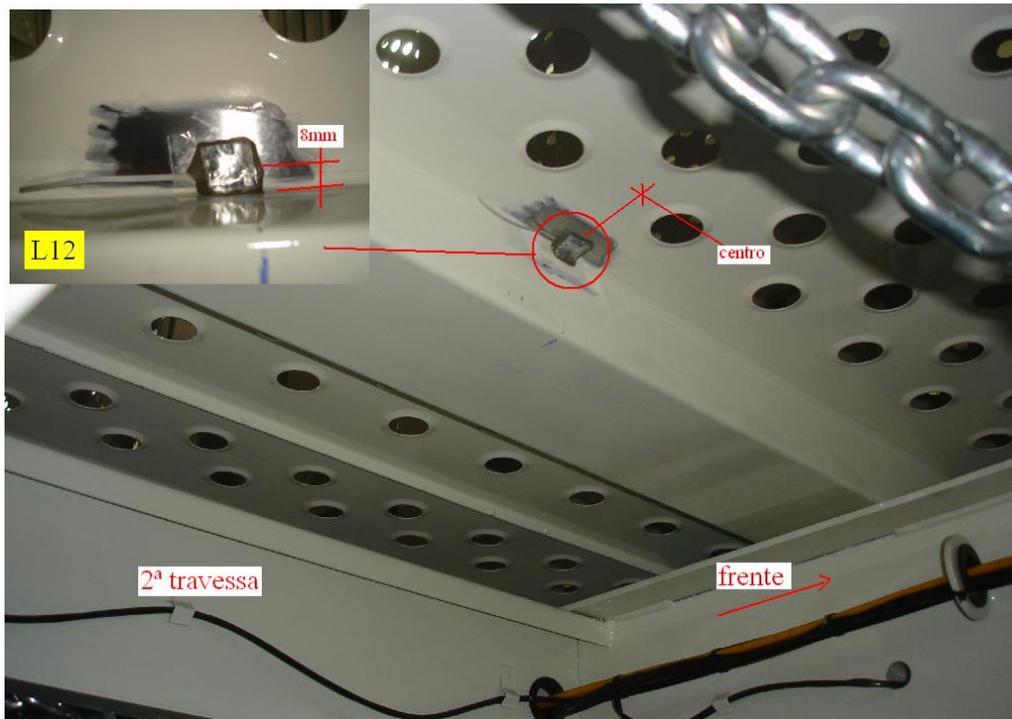


Figura 5.18. Strain Gauge longitudinal instrumentado no centro do SR – embaixo do assoalho da caixa de carga (L12)

5.4 Resultados do Teste Experimental

5.4.1 Distribuição e tipo de Carga para o teste

Tara do Produto (SR dianteiro + SR traseiro + Veículo Trator) = 30.100 kg

1º Carregamento: Cana Picada queimada - Compactada

PBTC = 118.380 kg

Líquido = 88.280 kg

2º Carregamento: Cana Picada com palha - Compactada

PBTC = 113.220 kg

Líquido = 83.120 kg

3º Carregamento: Cana Picada com palha - Compactada

PBTC = 122.720 kg

Líquido = 92.620 kg

4º Carregamento: Cana Picada com palha - Compactada

PBTC = 122.400 kg

Líquido = 92.300 kg

5º Carregamento: Cana Picada com palha - Compactada

PBTC = 119.500 kg

Líquido = 89.400 kg

6º Carregamento: Cana Picada com palha - Compactada

PBTC = 119.700 kg

Líquido = 89.600 kg

5.4.2 Gráficos de Tensão

Os gráficos de tensão estão no anexo A.

Na tabela 5.2, segue todas as informações coletadas a partir dos sensores das figuras A.5 e A.6. Nesta tabela são apresentados os valores de tensão máximos e mínimos em MPa. Como são muitos dados que os sensores fornecem, optou-se por mostrar somente os gráficos de tensões, que estão contidos no anexo A, e a tabela 5.2 para se ter uma noção de todos os valores que são fornecidos durante os testes experimentais.

Tabela 5.2. Tensões a partir das figuras A.5 e A.6

SG tipo Roseta (N/mm ²)		Chão vazio no estradão da usina - 50 a 60 km/h. Configuração 01			
		ϕ (°)	σ_1	σ_2	V. M.
Roseta 01	Máx	0-180	23,80	0,64	28,27
	Mín		-2,87	-15,10	0,12
	\bar{x}		1,75	-2,64	4,19
Roseta 02	Máx	50	13,26	-1,07	21,25
	Mín		-1,9	-11,25	0,95
	\bar{x}		0,47	-2,81	3,15
Roseta 03	Máx	100	5,19	0,29	6,38
	Mín		-3,47	-7,21	1,16
	\bar{x}		0,19	-3,15	3,42
Roseta 04	Máx	0-180	34,10	11,69	39,38
	Mín		-15,48	-44,60	0,11
	\bar{x}		0,82	-2,98	4,76
SG longitudinal (N/mm ²)		min.	máx.	\bar{x}	
L1		-17,87	29,17	5,31	
L2		-37,15	36,38	-0,79	
L3		-4,63	18,55	3,85	
L4		-11,44	8,18	-0,1	
L5		-4,29	1,7	-1,33	
L6		-10,57	-3,51	-7,72	
L7		-49,52	26,83	5,19	
L8		-7,89	13,73	2,76	
L9		-16,70	32,72	7,88	
L10		-23,42	22,76	-1,24	
L11		-0,73	2,29	0,92	
L12		-34,87	19,14	-4,37	
L13		-14,8	17,82	-0,15	
L14		-30,05	22,35	-4,33	

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Considerações sobre os Métodos Usados na Execução do Projeto

Percebe-se a grande importância de criar diretrizes definidas para uma estruturação mais organizada, como as citadas na análise da situação e formulação de estratégias de busca, assim como é de grande importância a busca e seleção de idéias para o produto, e principalmente a definição do mesmo, deixando o projeto alinhado com as demandas do mercado e tendo assim um desenvolvimento do produto estruturado e ainda condizente com as demandas que o mercado necessita.

Pode ser visto a facilidade de criação de um produto novo com o auxílio de ferramentas computacionais como o *software* de modelamento 3D *Pro/ENGINEER*, podendo-se na hora do modelamento já perceber possíveis interferências, além do produto ficar mais “otimizado” para fabricação, ou seja, na hora de fabricar ou montar o produto a chance de ter futuros problemas com montagens de componentes, ou até com a fabricação dos conjuntos de peças, reduz-se significativamente.

6.1.2 Considerações sobre a FMEA

Pode-se perceber que a FMEA (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos) ajudou a otimizar o processo de fabricação das vigas e do chassi, diminuindo o número de ocorrências das falhas levantadas pelos especialistas do produto e evitando os efeitos que essas falhas poderiam causar na produção ou no cliente. O objetivo principal da FMEA que era a redução ou eliminação dos riscos, foi atingido como pode-se ver na tabela 3.1.

6.2 Considerações sobre a Análise Estrutural Numérica Computacional

A partir dos casos estudados e das condições fornecidas o estudo apresentou pontos que merecem uma melhor atenção no que diz respeito à tensão. Em virtude deste estudo não ter um histórico e por se tratar da aplicação de um material novo sugere-se o ensaio experimental para validação desta análise.

Pode-se comprovar pelas análises que o chassi tem um bom comportamento mediante operação, este podendo ser reforçado em alguns pontos para condições de torção e basculamento, mas salienta-se que ambas as situações são difíceis de prever nesse tipo de estudo necessitando validação experimental para se ter confiabilidade dos dados adquiridos.

6.3 Considerações sobre os Testes Experimentais de Campo

Para uma análise inicial mais detalhada, podem-se selecionar alguns pontos da estrutura do SR os quais são mais solicitados.

O primeiro ponto a ser analisado vem a ser o da figura 5.4 (SG longitudinal instrumentado próximo ao 1° eixo da suspensão, na cinta inferior traseira do lado direito (L3)). Neste caso a tensão máxima obtida foi de aproximadamente 85 MPa.

O segundo ponto a ser analisado é o da figura 5.8 (roseta instrumentada no lado direito da travessa próxima à chapa de atrito do pino rei (R2)), através dos gráficos de tensão observou-se que a tensão máxima obtida em todos os percursos, em que o SR rodou, foi de aproximadamente 110 MPa.

O terceiro ponto analisado foi da figura 5.13 (SG longitudinal instrumentado na cinta da viga próxima a chapa de atrito do pino rei do lado direito (L14)), com base nos gráficos observa-se que a tensão máxima, nesse ponto, foi de aproximadamente -100 MPa.

O quarto ponto analisado foi da figura 5.14, (roseta instrumentada na alma dianteira da lateral direita da viga do chassi (R1)), neste caso o valor de tensão máxima foi de aproximadamente 100 MPa.

O quinto ponto analisado foi da figura 5.15 (roseta instrumentada na cinta do pescoço na lateral direita da viga do chassi), este vem a ser um dos principais pontos do chassi. Neste local foram encontradas tensões elevadas nas análises estruturais numéricas. O valor de tensão máxima, conforme os gráficos de tensão, foi de aproximadamente 120 MPa.

O sexto ponto a ser analisado foi o da figura 5.16 (roseta 4 instrumentada na travessa acima do suporte da suspensão na lateral direita do chassi (R4)), onde por meio da análise dos gráficos de tensão foi obtido o valor de tensão máxima de aproximadamente 90 MPa.

Pode-se verificar que os valores de tensões foram baixos (abaixo de 120 MPa), a justificativa para estes valores é que o produto rodou por estradas sem muitas imperfeições, dessa forma, ele não operou em condições tão críticas quanto as que se aplicou na análise estrutural numérica.

Outra colocação importante é o fato de que quando foi executada a análise estrutural numérica, o modelo foi simplificado, por se tratar de uma análise grande, que envolve um modelo com elevado número de elementos e nós, dessa forma quando se faz uma análise desse porte, o tempo gasto para preparar o modelo e rodar a análise é elevado, precisando-se, na maioria das vezes, fazer a simplificação do modelo a fim de deixar a análise mais leve e com um custo mais coerente em função do tempo gasto para realizá-la.

Quanto ao experimento, os dados coletados foram suficientes para a análise precisa do comportamento do SR canavieiro durante o carregamento e descarregamento, no entanto devido ao fato das estradas de chão se encontrar em ótimas condições de uso, foi necessário trafegar em alguns trechos com o veículo em canaletas laterais, simulando torções em todo conjunto. Os resultados das tensões coletadas apresentaram amplitudes baixas em alguns pontos e em outros, amplitudes maiores, conforme gráficos vistos no anexo A.

Com base nos valores obtidos nos testes experimentais pode-se observar que a estrutura do SR apresentou um comportamento equilibrado e normal para as diversas condições de operação. Ainda pode-se verificar que as tensões obtidas apresentam valores baixos, em todos os locais instrumentados. Tal fato permite inferir que o projeto do produto encontra-se bem equilibrado, com um dimensionamento correto tanto do chassi, quanto da caixa de carga, com coeficientes de segurança coerentes para as condições normais de operação.

6.4 Redução de Massa do Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência

Após a validação do dimensionamento do projeto do Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência por meio das análises estruturais numéricas e posteriormente pelos testes experimentais, observou-se redução na massa do equipamento por meio da utilização de um novo material na fabricação do SR, comparando com o modelo *Standard*, fabricado pela mesma indústria, o qual utiliza aço comum.

Nesta comparação são apresentadas as diferenças de massa, assim como as porcentagens de ganho do SR CN Alta Resistência em relação ao *Standard*, com a apresentação separadas por montagens que formam o SR.

6.4.1 Semi-Reboque Canavieiro Standard

Na figura 6.1, verifica-se as porcentagens de massa separadas por cada uma das montagens que formam o SR CN *Standard*.

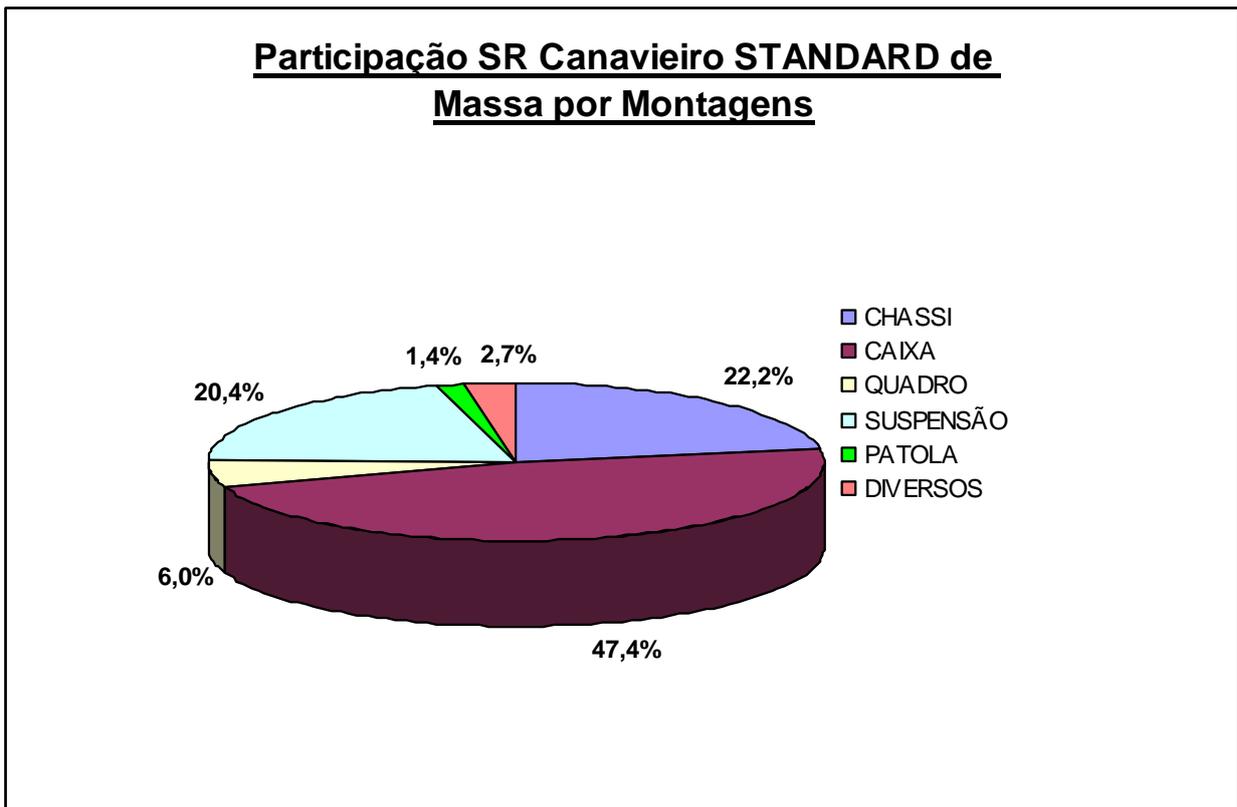


Figura 6.1. Participação de Peso por montagens do Semi-Reboque Canavieiro Standard

Pode-se perceber que as montagens que mais agregam massa a estrutura são a caixa de carga e o chassi sendo responsáveis por 69,9% da massa total do SR Canavieiro. Isso explica-se pelo fato da caixa de carga ser a maior montagem que o SR possui. Já o chassi é a segunda montagem com maior massa do SR pelo fato de usar cintas e almas com espessuras elevadas, devido às solicitações que essa estrutura é submetida.

6.4.2 Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência

Na figura 6.2, é apresentado o gráfico com as massas de cada uma das montagens que formam o SR CN Alta Resistência, podendo-se comparar com o da figura 6.1 a diferença percentual de massa que é agregada a cada montagem que compõe os semi-reboques.

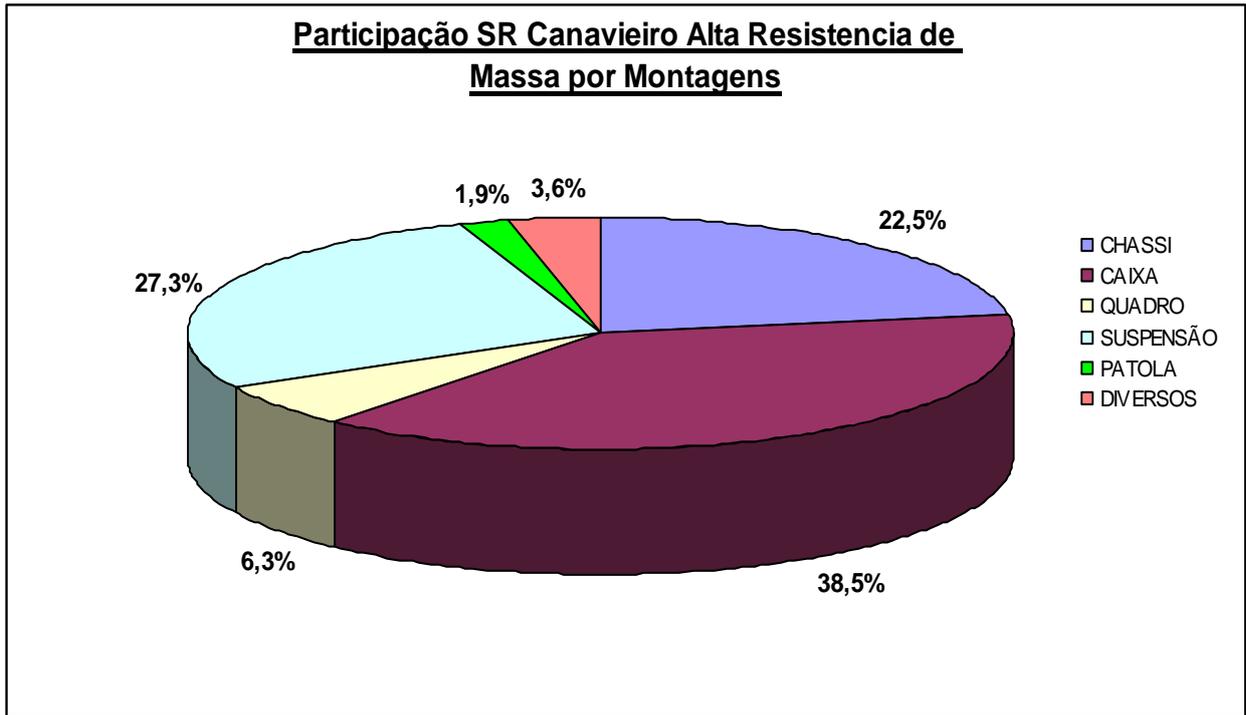


Figura 6.2. Participação de Peso por montagens do Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência

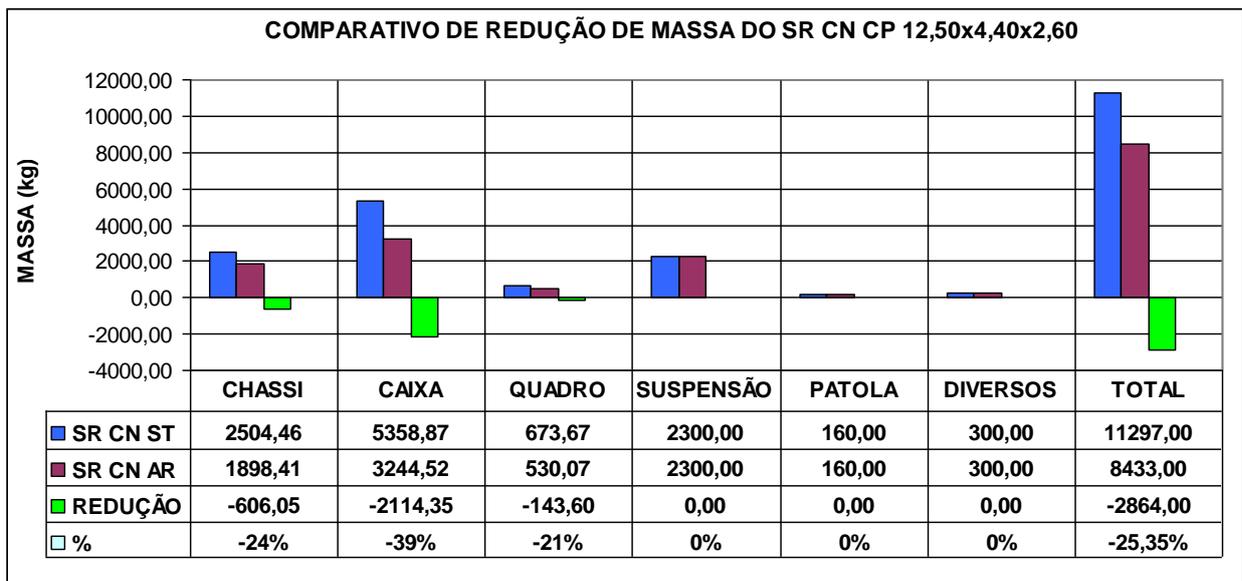
Percebe-se que nesta montagem ocorre uma melhor distribuição de massa apresentando um percentual de massa da caixa de carga e chassi, de 61% menor do que a versão *Standard*.

Pode-se perceber ainda que neste caso as montagens que mais se destacaram em relação à massa, foram por ordem a caixa de carga, suspensão e chassi. Essa mudança pode ser explicada pelo fato de que, nesta estrutura, as únicas montagens que foram fabricadas com aço de alta resistência foram a caixa de carga, chassi e quadro de giro, desta forma essas três montagens diminuíram significativamente sua massa em relação as demais.

6.4.3 Comparativo de Redução de Massa entre os Semi-Reboques

Na tabela 6.1, é apresentado um comparativo com relação à redução da massa em kg, de cada uma das montagens que compõe os semi-reboques.

Tabela 6.1. Comparativo de Redução de Massa entre os Semi-Reboques



Pode-se perceber a elevada redução na massa do SR CN Alta Resistência em relação ao *Standard*. A redução de massa nas montagens foi de, 606,05 kg no chassi, com um percentual de redução de 24%, 2.114,35 kg, na caixa de carga, maior redução entre todas as montagens, apresentando um percentual de redução de 39%, e por último o quadro de giro teve uma redução na massa de 143,6 kg, com o percentual de redução de 21% em relação ao modelo anterior.

Com relação à massa total do SR CN Alta Resistência, proporcionou uma **redução de 2.864 kg** em relação ao SR CN *Standard*. O **percentual de redução** na massa total do SR foi de **25,35%**.

Com essa redução na massa do produto, concretizam-se os benefícios oferecidos aos clientes, elegidos no item 3.1.2 (**busca de idéias para o produto**) que foram: ganho de capacidade de carga em função do produto ter menor tara, redução no consumo de combustível e redução no consumo de pneus.

7 CONCLUSÕES

Verificou-se que os modelos de referência utilizados como metodologias de auxílio no desenvolvimento do projeto foram de grande valia, sobretudo a clássica metodologia de projeto proposta por PAHL et al. (2005), auxiliou na estruturação desde o começo até a conclusão do projeto do Semi-Reboque Canavieiro, com uma sistemática clara e organizada para a execução de cada uma das etapas da criação do produto.

As ferramentas de modelamento do produto auxiliaram de forma significativa a execução das idéias que estavam somente no papel ou na mente dos engenheiros, já que estes conseguem visualizar e trabalhar com um produto que simula adequadamente as condições reais de trabalho.

Quanto à análise estrutural numérica computacional, percebe-se que a mesma vem a ser imprescindível na criação de produtos novos, em função dos benefícios que a mesma traz ao produto final. No caso presente a análise estrutural numérica conseguiu representar adequadamente o comportamento da estrutura, em condições extremas de operação, permitindo a identificação dos pontos que necessitam ser redimensionados, tendo assim um produto mais confiável e robusto, ganhando-se em custo e massa. Além disso, a análise estrutural numérica serviu de base para instrumentar o produto quando da realização dos testes experimentais, a partir da identificação dos pontos que apresentaram uma solicitação maior.

A análise experimental serviu para validar a análise estrutural numérica, que mesmo apresentando valores de menor intensidade, permitiu a observação de correlação entre os valores das duas análises. A diferença nos valores se deu basicamente com relação as condições de contorno, ou condições de operação, que na análise estrutural numérica foram mais extremos. A partir dos dados dos testes experimentais, pode-se perceber que a estrutura do SR Canavieiro estava bem dimensionada, baseada nos valores que foram coletados de tensão, durante a operação do produto no campo. Todos os valores de tensão coletados nesses testes foram abaixo da tensão de escoamento do material (700 MPa), validando o produto para uma fase posterior de fabricação de protótipos em testes de longa duração. Com os resultados obtidos nestes testes será feita uma revisão nos projetos, propondo alterações no sentido de encerrar o processo de desenvolvimento do produto e começar a produção em larga escala.

Com o uso do aço de alta resistência, percebeu-se um ganho expressivo com relação à massa do produto quando comparado ao modelo *Standard*. A uma redução total na massa do semi-reboque canavieiro alta resistência foi de 2.864 kg representando uma redução percentual na massa total do produto de 25,35%, atingindo-se desta forma o principal requisito definido na busca de idéias para o produto, que era a redução de massa.

7.1 Sugestões para Futuros Trabalhos

Para futuros trabalhos sugere-se o acompanhamento dos testes de longa duração, que já estão sendo executados no Semi-Reboque Canavieiro Alta Resistência, com o intuito de analisar o comportamento desse novo material nas diversas condições de trabalho, que este produto é submetido e dessa forma, agregar mais informações ao projeto final tendo-se a possibilidade de melhor avaliação do dimensionamento de todas as partes do produto de forma real e precisa.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 1726: Veículos rodoviários – Acoplamento mecânico entre caminhão trator e semi-reboque - Intercambiabilidade.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11409: Instalação de pára-bara em reboques e semi-reboques.** Rio de Janeiro, 1990.

BAXTER, MIKE R., **Projeto de Produto: Guia Prático para o design de novos produtos.** Ed. Edgard Blücher. 2º ed., São Paulo, 2000. Bras

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. RESOLUÇÃO 152/03: **Estabelece os requisitos técnicos de fabricação e instalação de pára-choque traseiro para veículos de carga.** Brasília, 2003.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. RESOLUÇÃO 227/07: **Estabelece requisitos referentes aos sistemas de iluminação e sinalização de veículos.** Brasília, 2007.

CRISTAL, EDUARDO DE O., **Projeto e Fabricação de Veículo Triciclo para Transporte Urbano de Cargas e Passageiros.** Dissertação de Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, 2008.

FORD MOTOR COMPANY. **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA),** Reference Manual, 1988.

LEAL, F.; PINHO, A.F.de; ALMEIDA, D.A., **Análise de Falhas Através da Aplicação do FMEA e da Teoria Grey.** Congresso Brasileiro de Energia, 10. Revista Gestão Industrial, v.02, n. 01, 2006.

HOUGAZ, Augusto B., **Análise Probabilística de Durabilidade Aplicada a Veículos de Transporte de Carga Rodoviária,** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. **Projeto na Engenharia - Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos. Métodos e Aplicações.** São Paulo: Editora Edgar Blucher, 2005. Tradução da 6ª edição alemã.

PERES, GUSTAVO, **Uma Metodologia para Simulação e Análise Estrutural de Veículos de Transporte de Carga**, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

Pro Engineer® User Guide, 2004 Version Wildfire 2.

PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P. & LA FUENTE, D. de., **A decision support system for applying failure mode and effects analysis**. International Journal of Quality & Reliability Management, n.2, v. 19, 2002.

Quick Reference Guide of **MSC.Nastran®** Version 2005.

ROZENFELD, H; FORCELLINI, F. AMARAL, D.C; TOLEDO, J; ALLIPRANDINI, D. SILVA, S. L. e SCALICE, R. **Gestão de Desenvolvimento de Produto: Uma referência para Melhoria do Processo**. Editora Saraiva, 2006.

ANEXO A – GRÁFICOS DE TENSÃO

Os Gráficos de tensão fornecem a tensão de Von Mises no eixo Y e a quantidade de pontos coletados no eixo X.

A.1 Estático Inicial após zeramento dos canais da Configuração 01

Nas Figuras A.1 e A.2 têm-se os gráficos estáticos iniciais logo após o zeramento dos equipamentos, antes do 1º carregamento com a configuração 01.

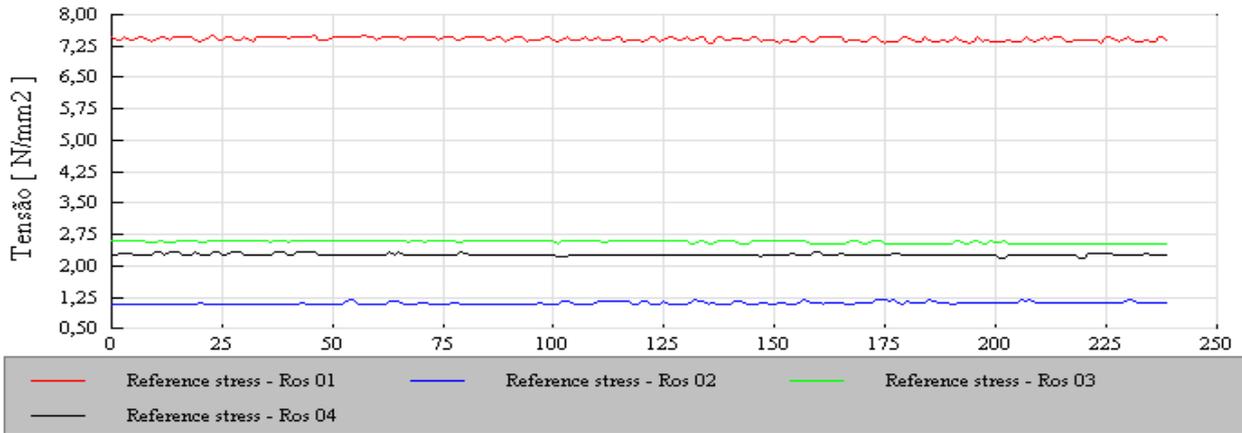


Figura A.1. Estático 1 após zeramento – Configuração 01

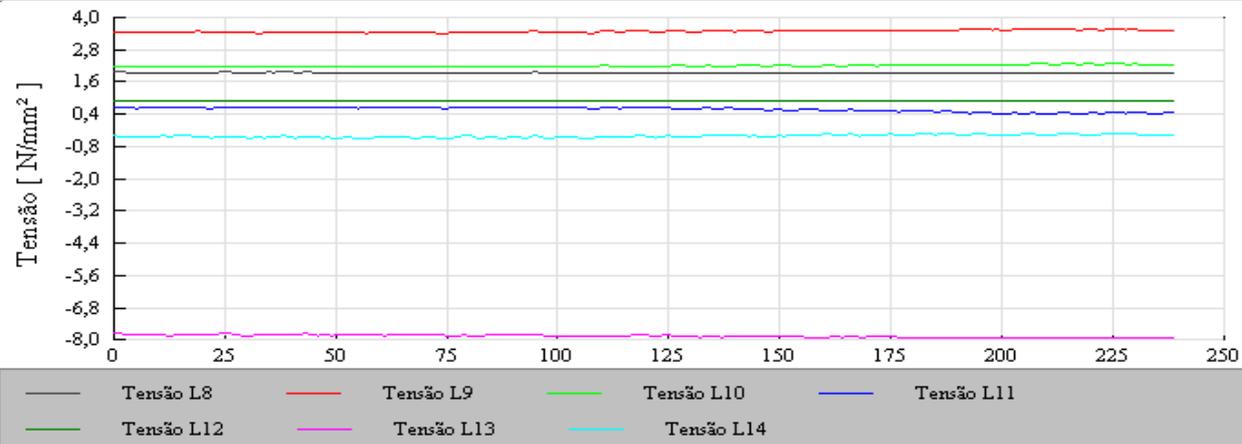
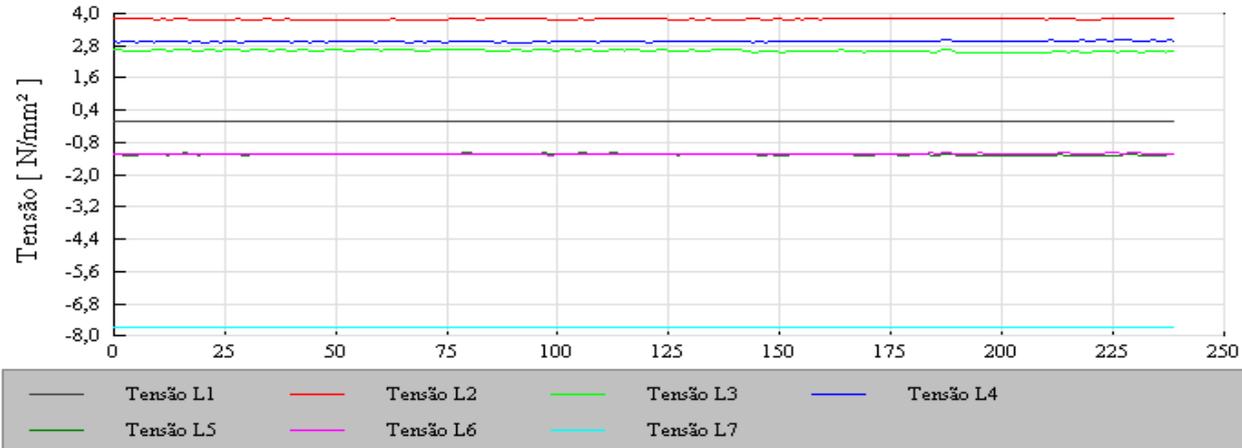


Figura A.2. Estático 2 após zeramento – Configuração 01

A.2 Estático Inicial após zeramento dos canais da Configuração 02

Nas Figuras A.3 e A.4 têm-se os gráficos estáticos iniciais logo após o zeramento dos equipamentos, antes do 2º carregamento com a configuração 02.

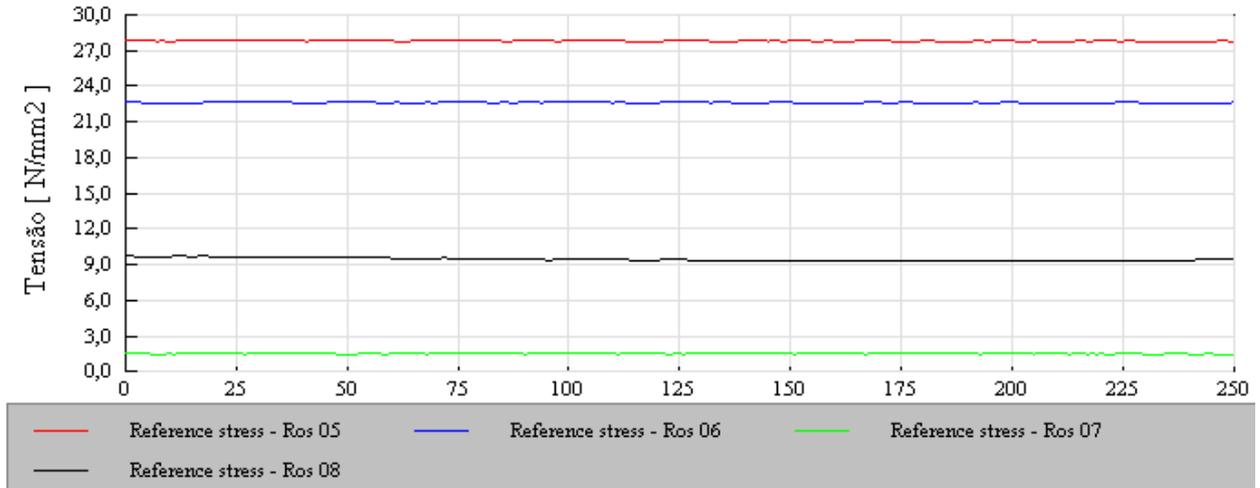


Figura A.3. Estático após zeramento (1) – Configuração 02

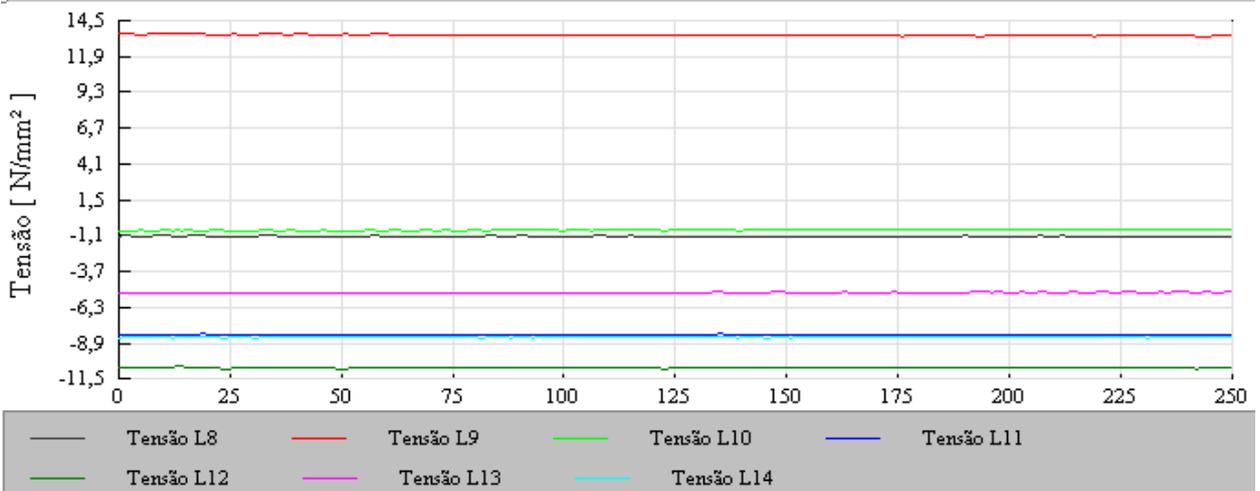
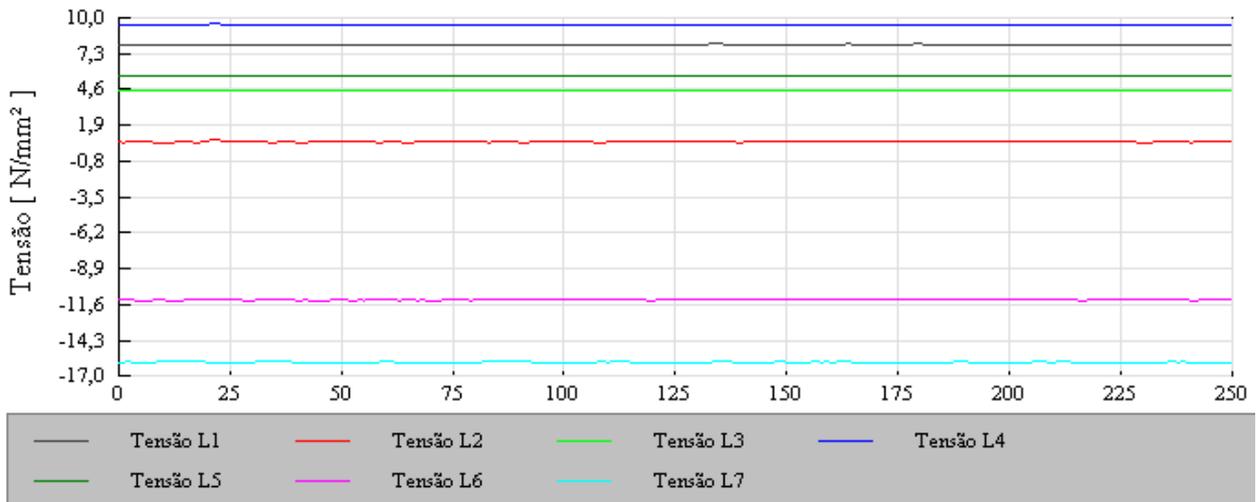


Figura A.4. Estático após zeramento (2) – Configuração 02

A.3 Primeiro Carregamento - Configuração 01

Veículo Vazio:

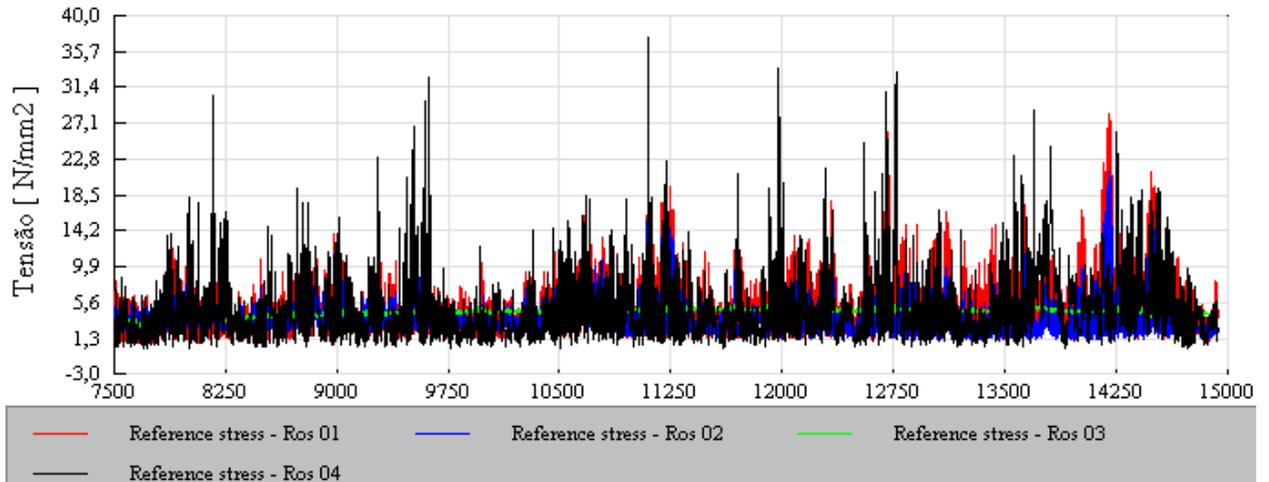


Figura A.5. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h)

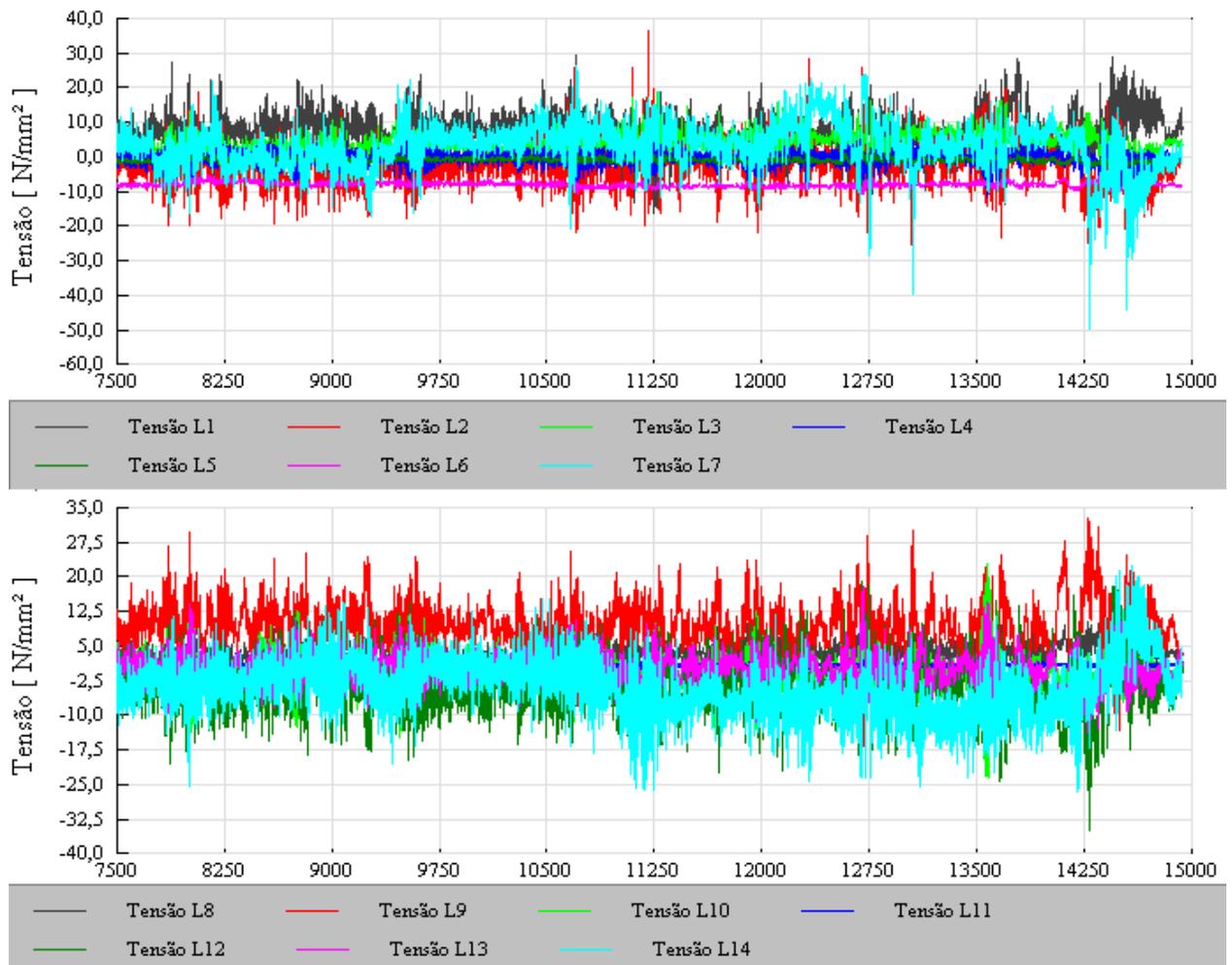


Figura A.6. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h)

Veículo Carregado:

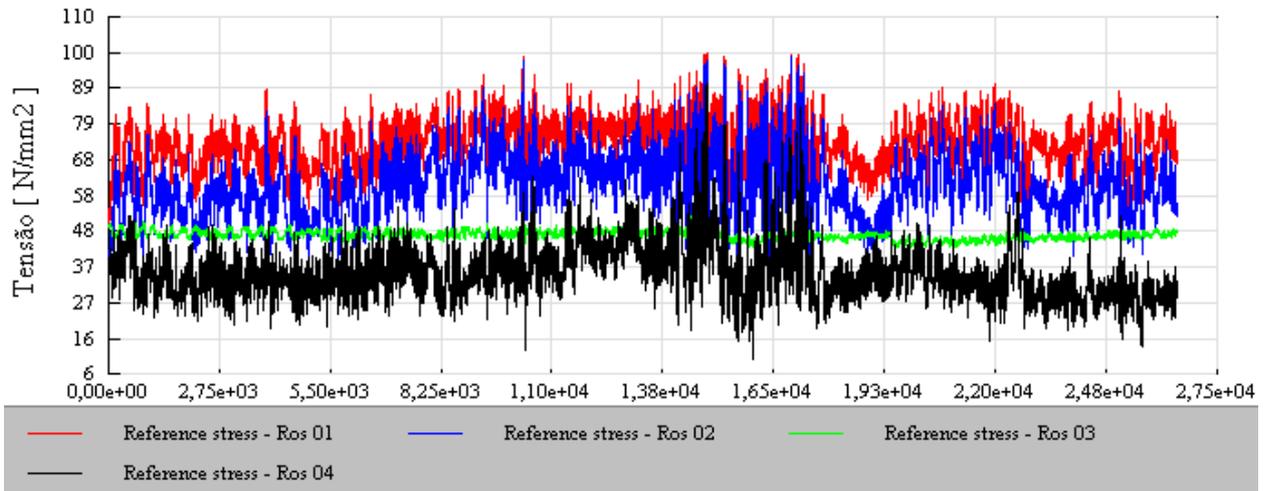


Figura A.7. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 01 (vel. 20 a 60 km/h)

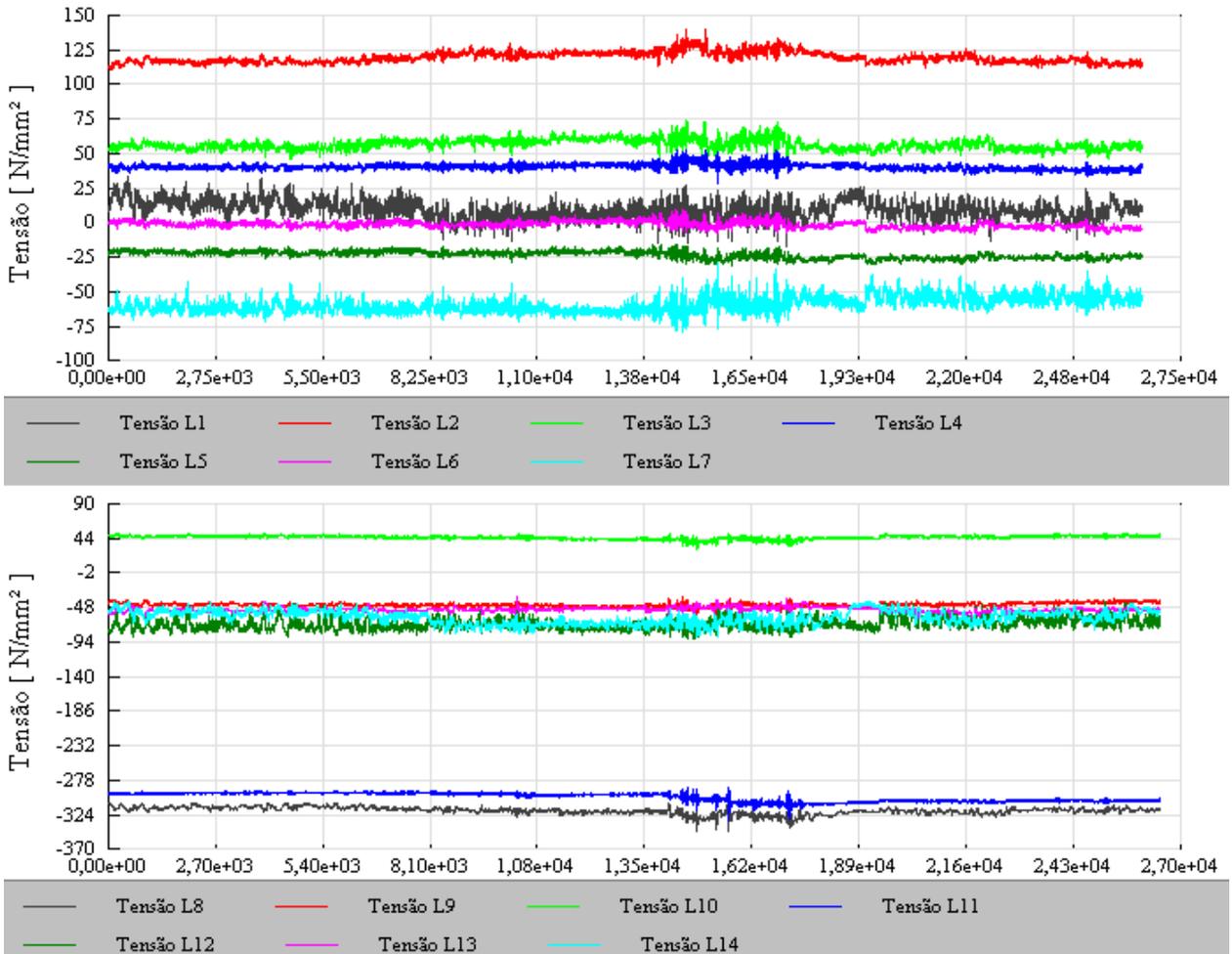


Figura A.8. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 01 (vel. 20 a 60 km/h)

A.4 Segundo Carregamento - Configuração 02

Veículo Vazio:

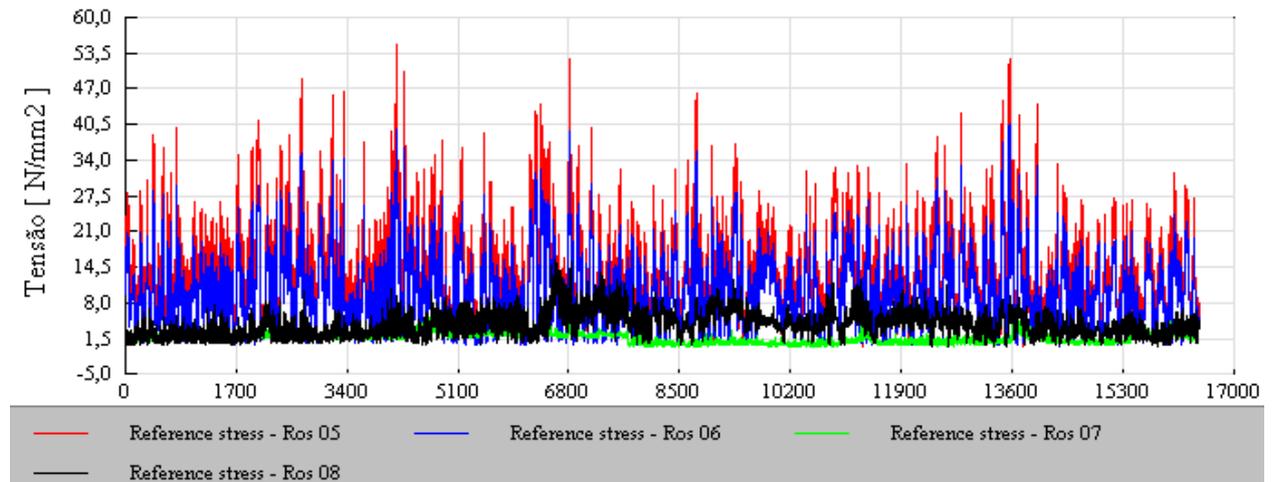


Figura A.9. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 20 a 60 km/h)

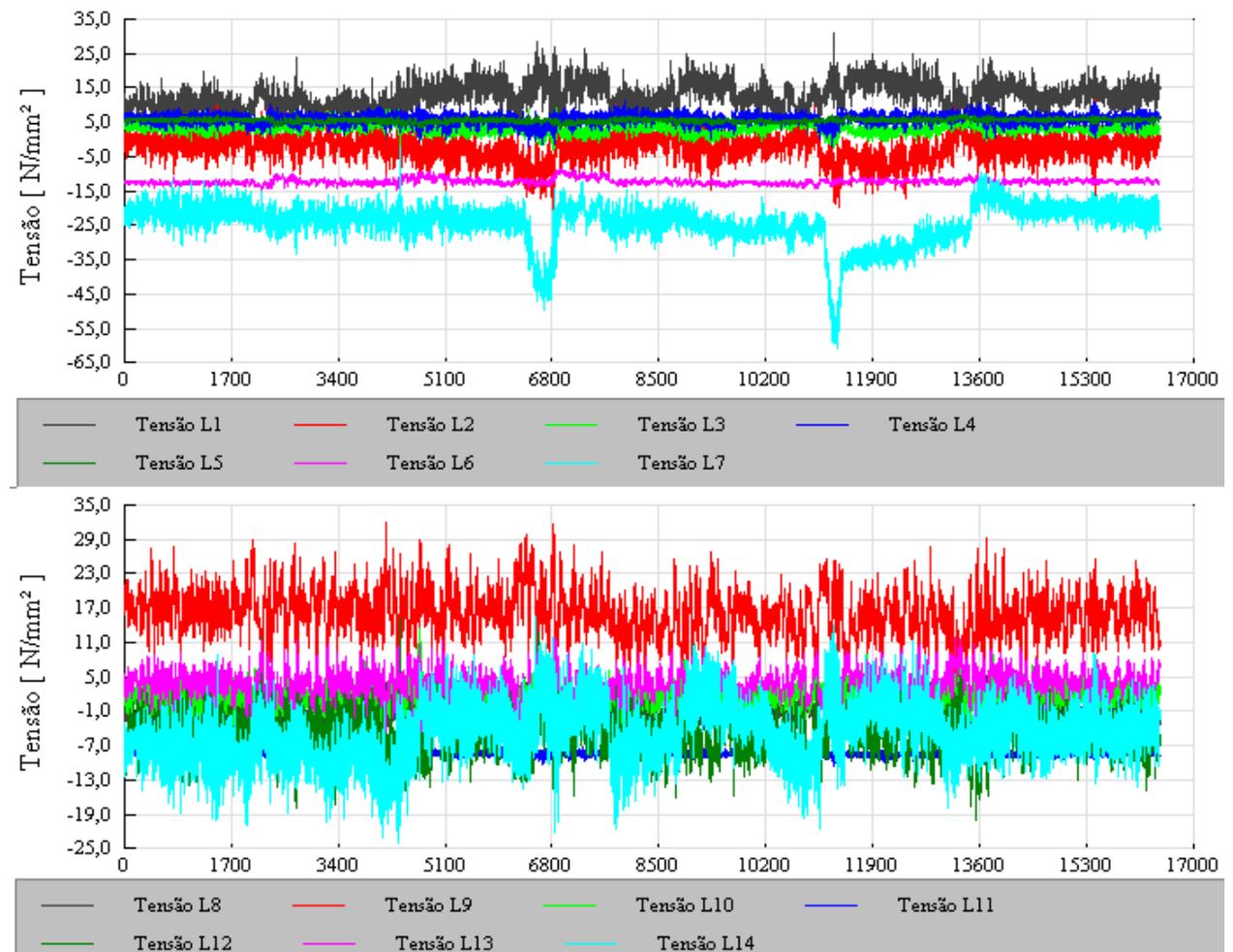


Figura A.10. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 20 a 60 km/h)

Veículo Carregado:

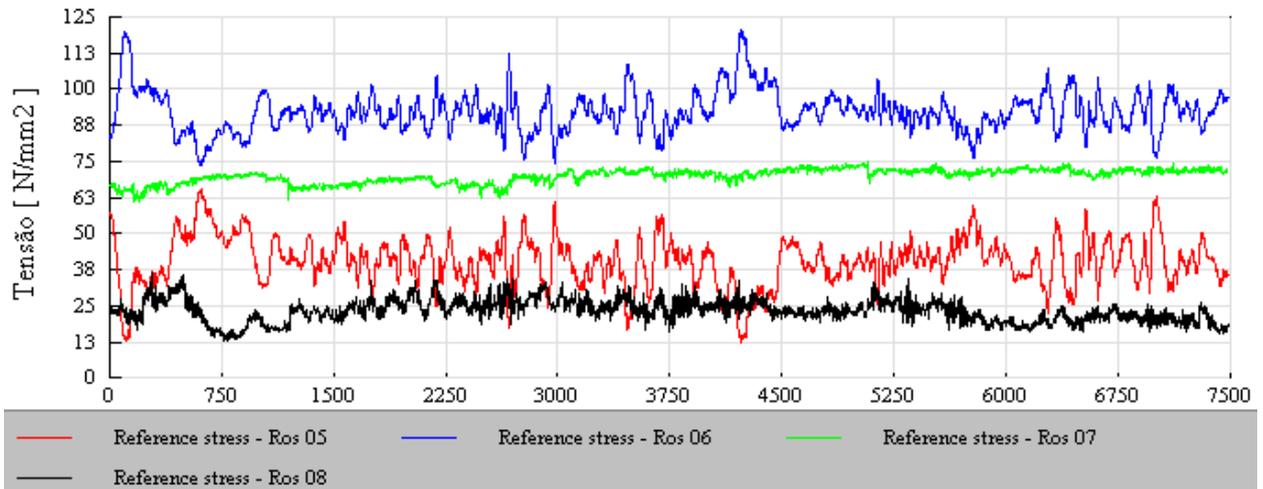


Figura A.11. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 40 a 60 km/h)

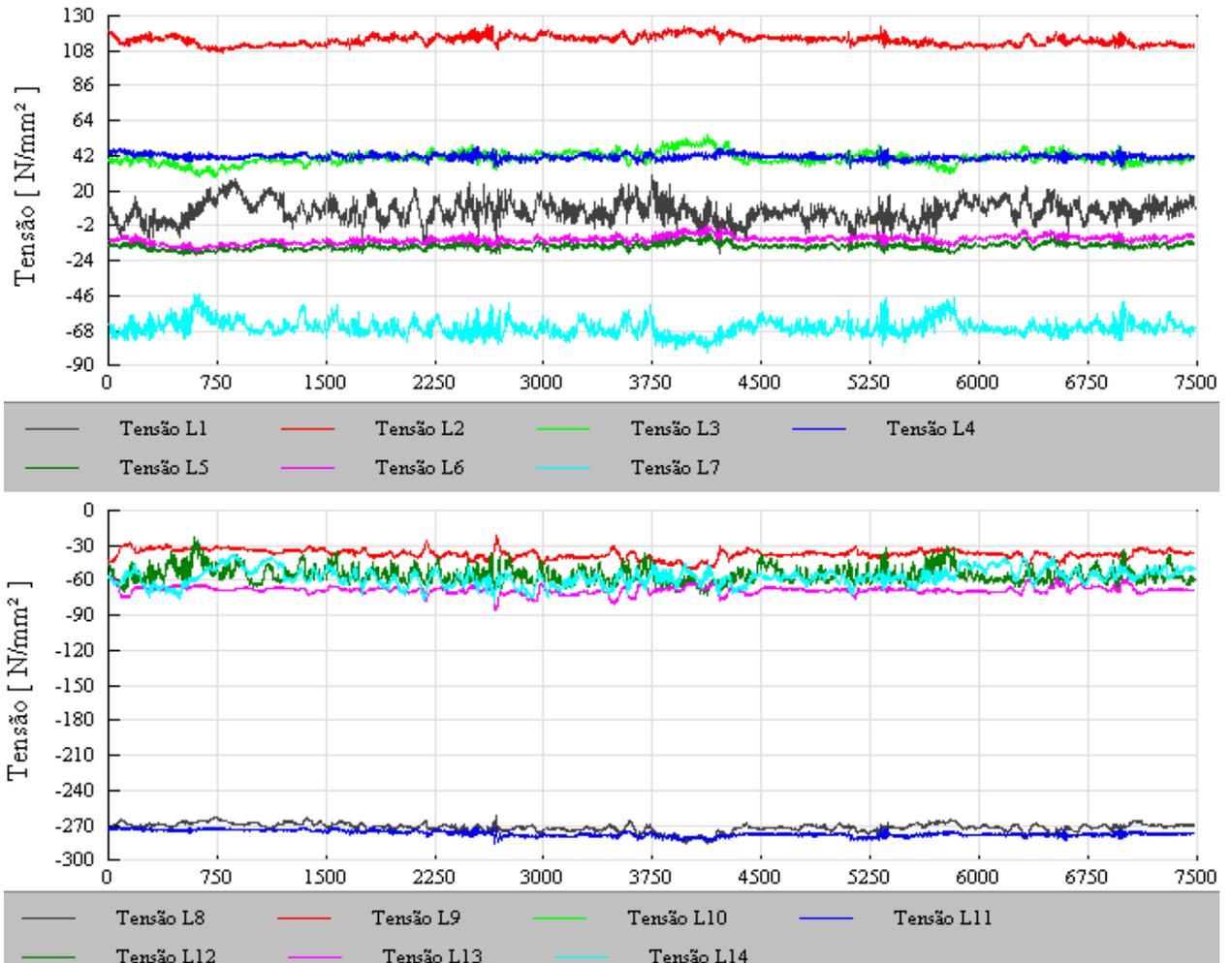


Figura A.12. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 40 a 60 km/h)

A.5 Terceiro Carregamento - Configuração 02

Veículo Vazio:

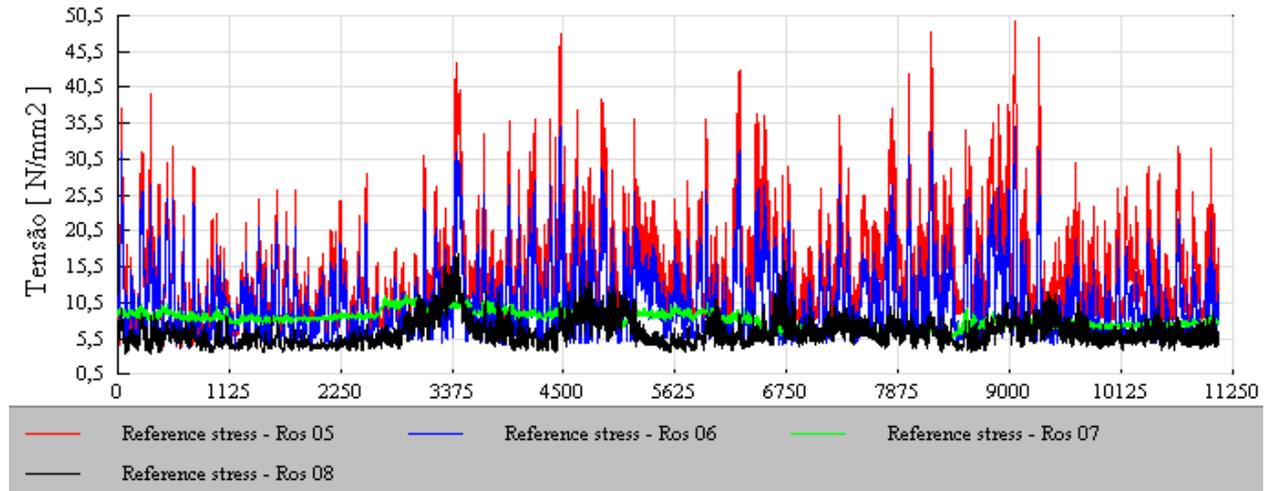


Figura A.13. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)

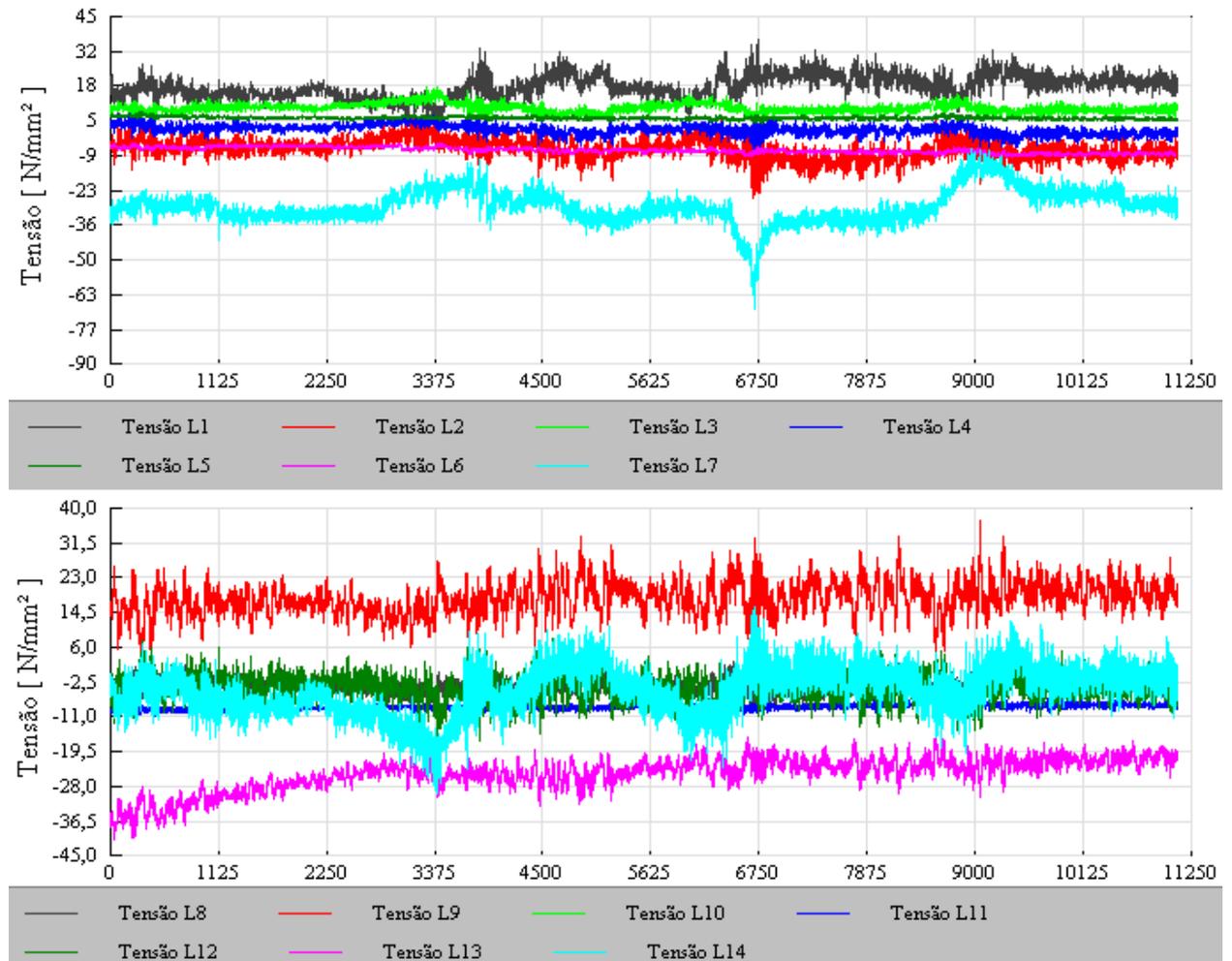


Figura A.14. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)

Veículo Carregado:

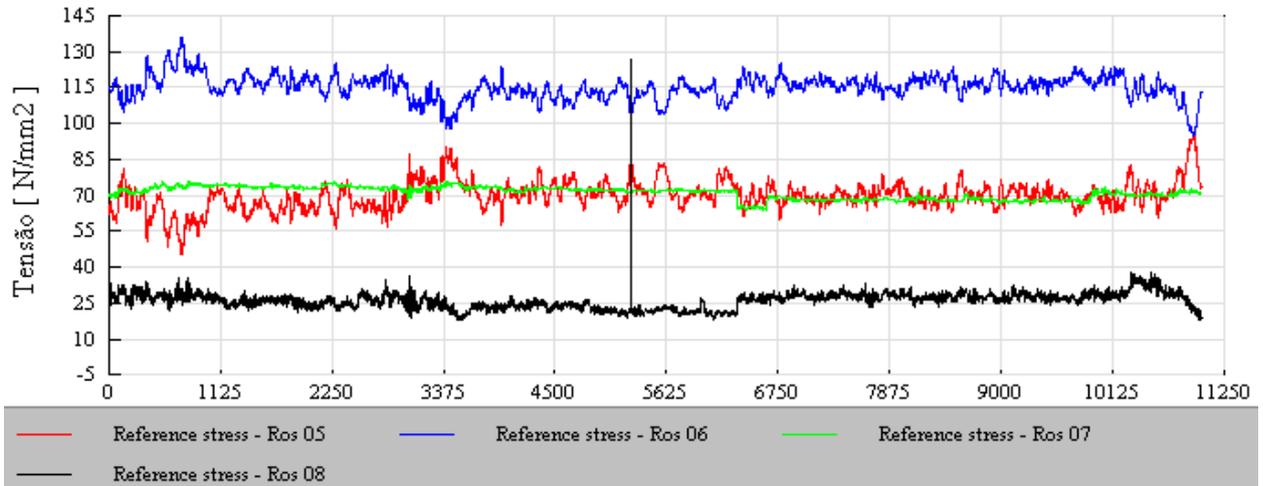


Figura A.15. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)

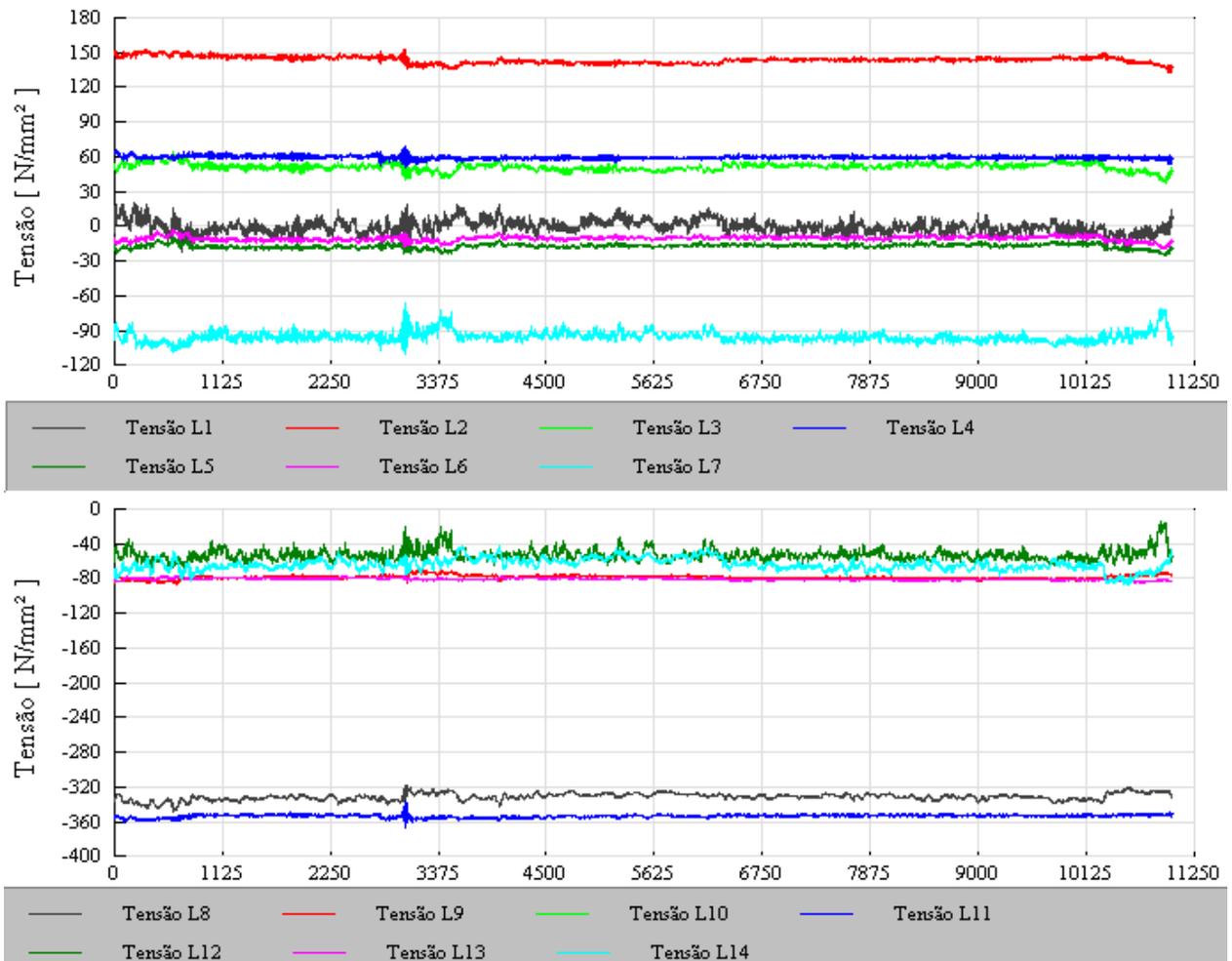


Figura A.16. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)

A.6 Quarto Carregamento - Configuração 01

Veículo Vazio:

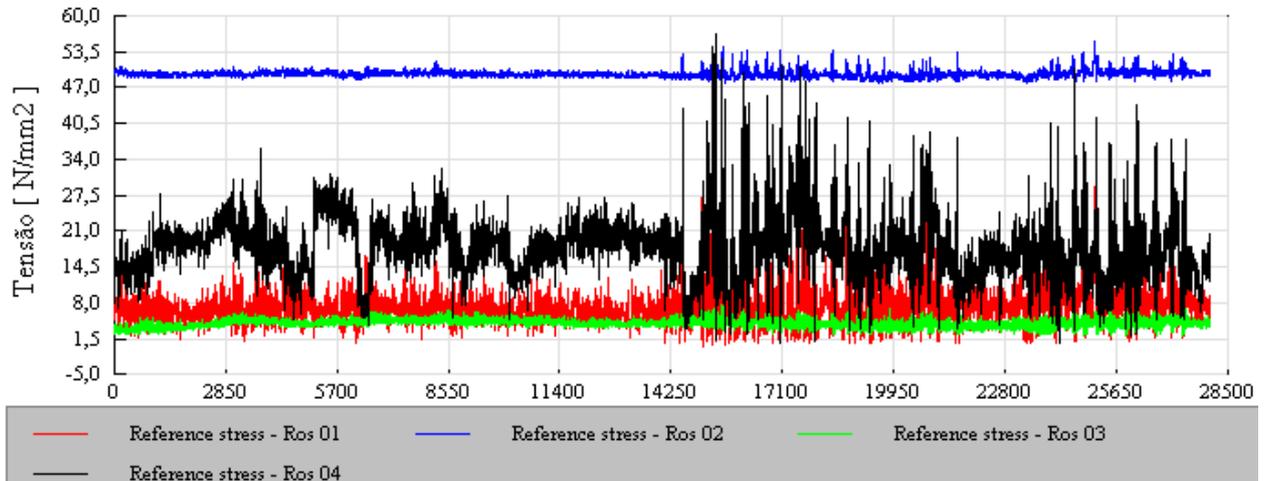


Figura A.17. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 01 (40 km/h forçando nas valetas laterais)

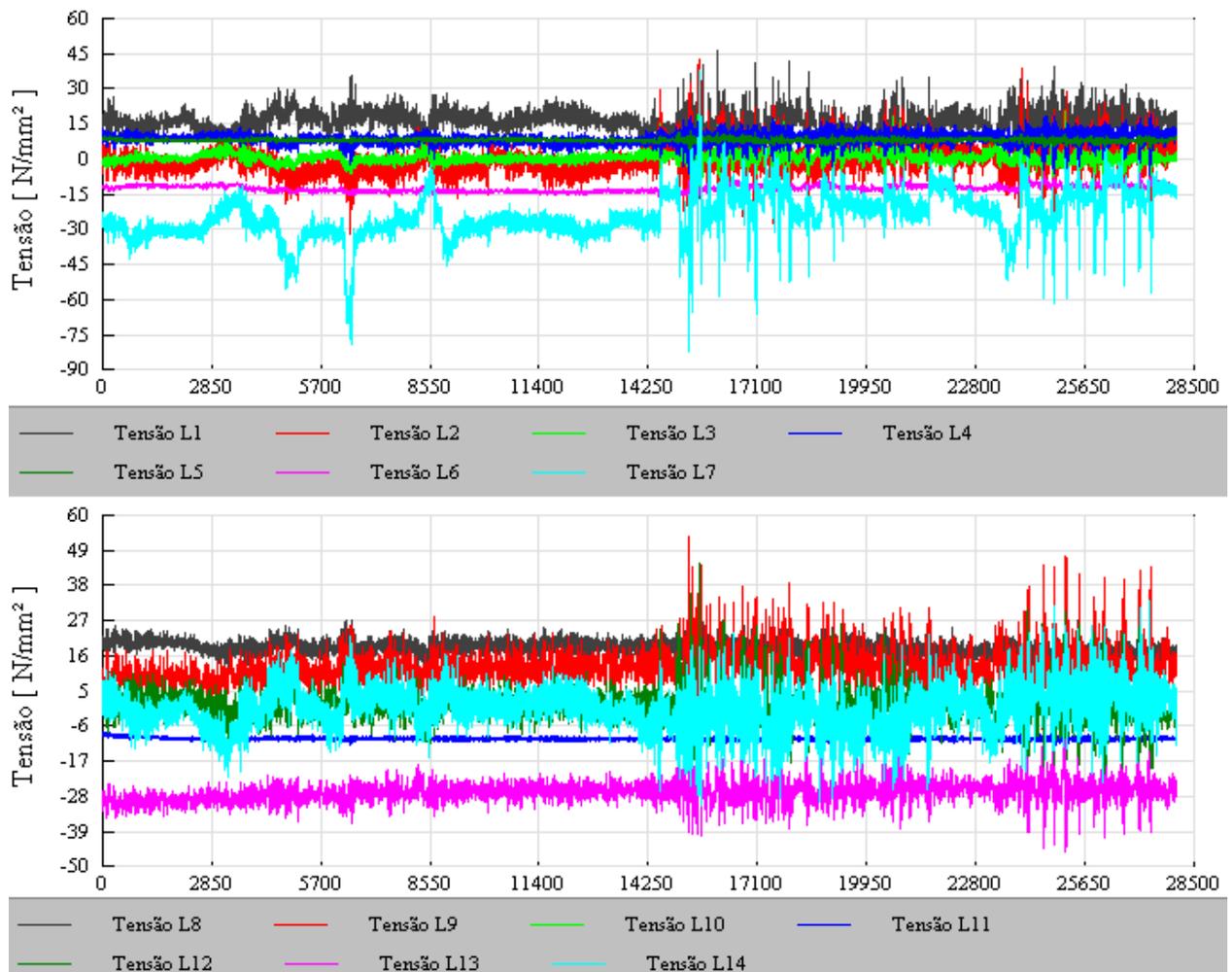


Figura A.18. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 01 (40 km/h forçando nas valetas laterais)

Veículo Carregado:

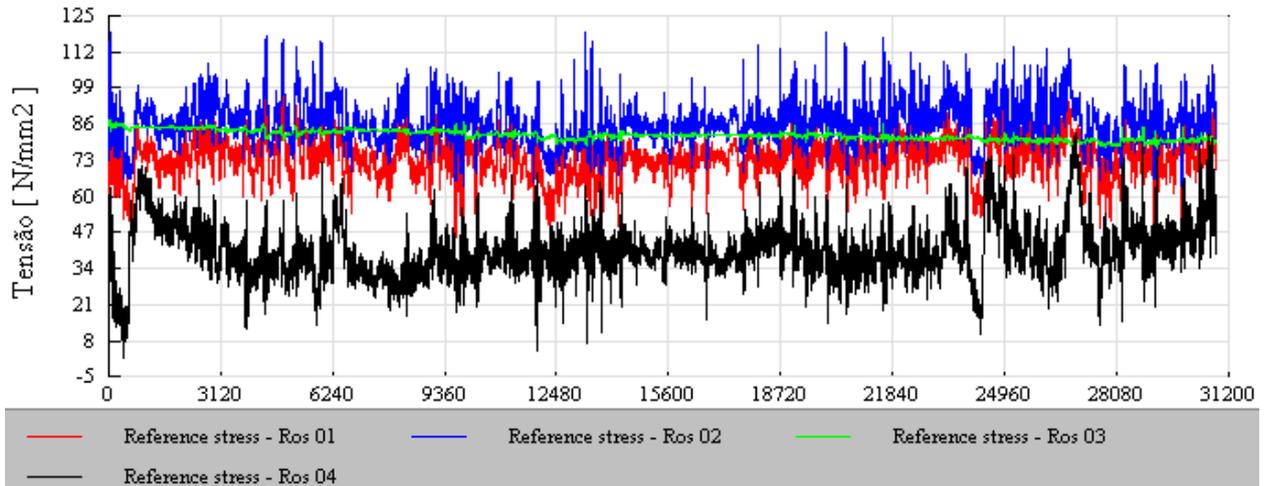


Figura A.19. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 01 (40 km/h forçando nas valetas laterais)

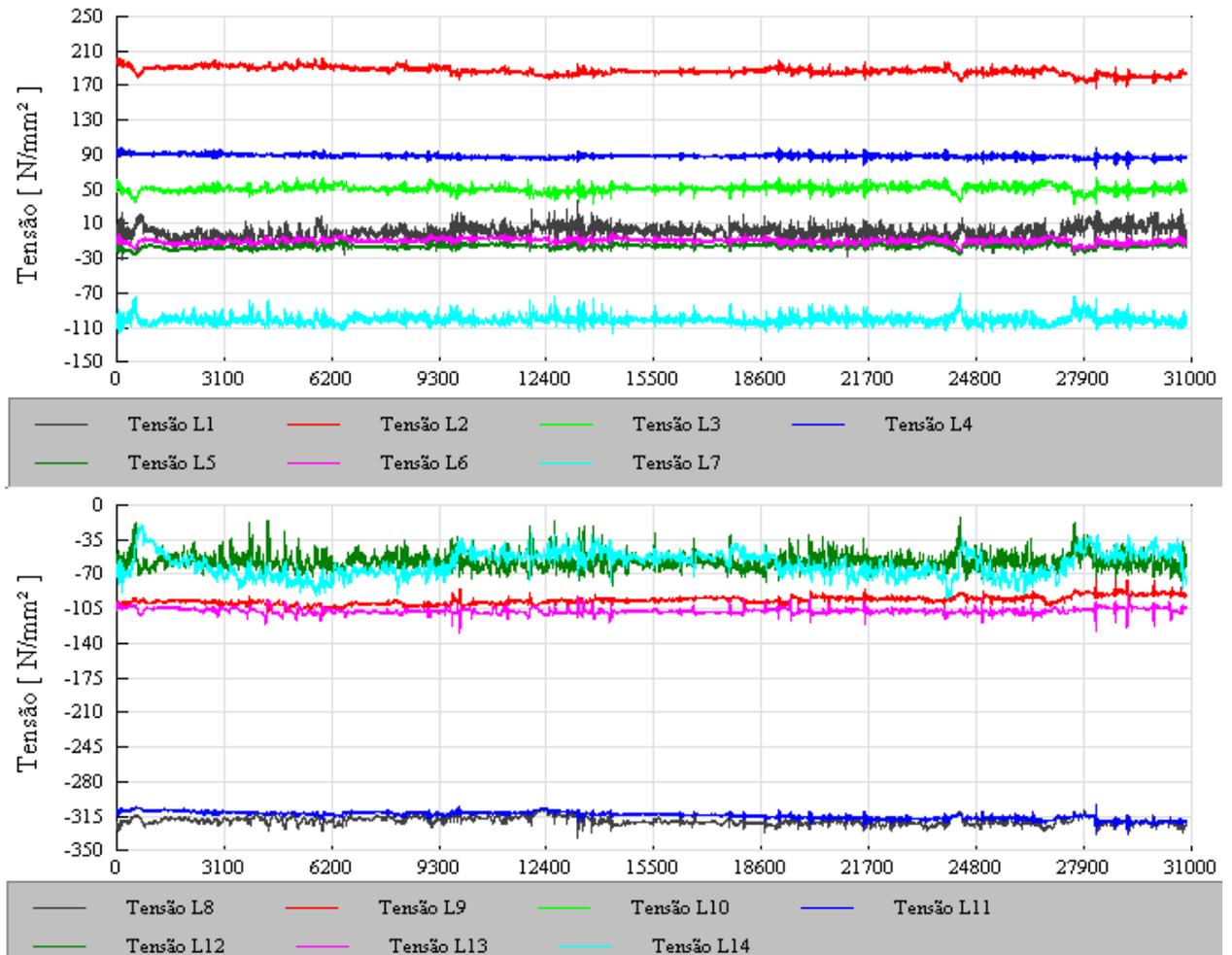


Figura A.20. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 01 (40 km/h forçando nas valetas laterais)

A.7 Quinto Carregamento - Configuração 01

Veículo Vazio:

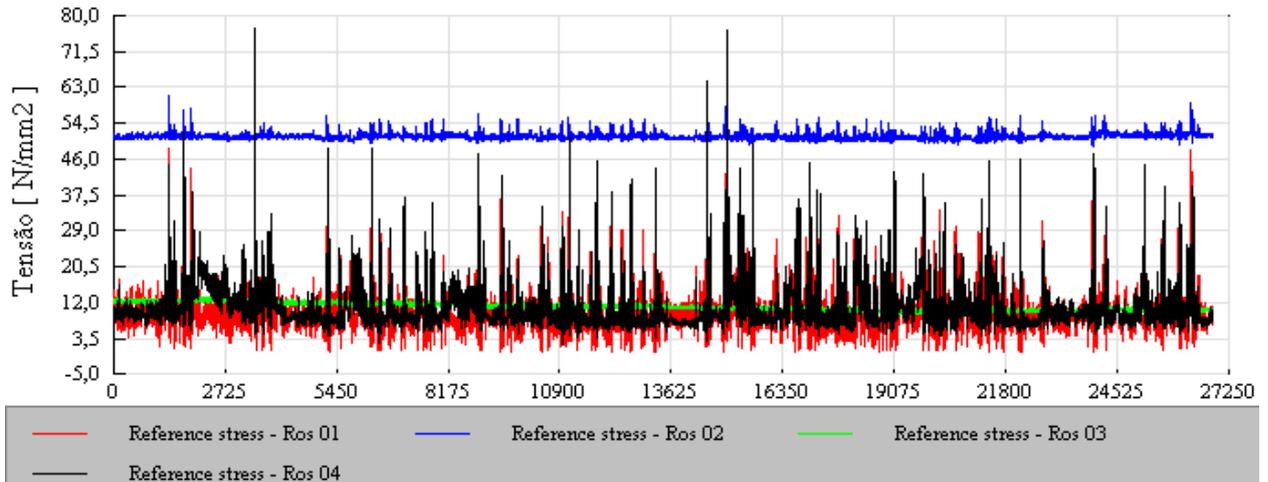


Figura A.21. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 01 (40 km/h forçando nas valetas laterais)

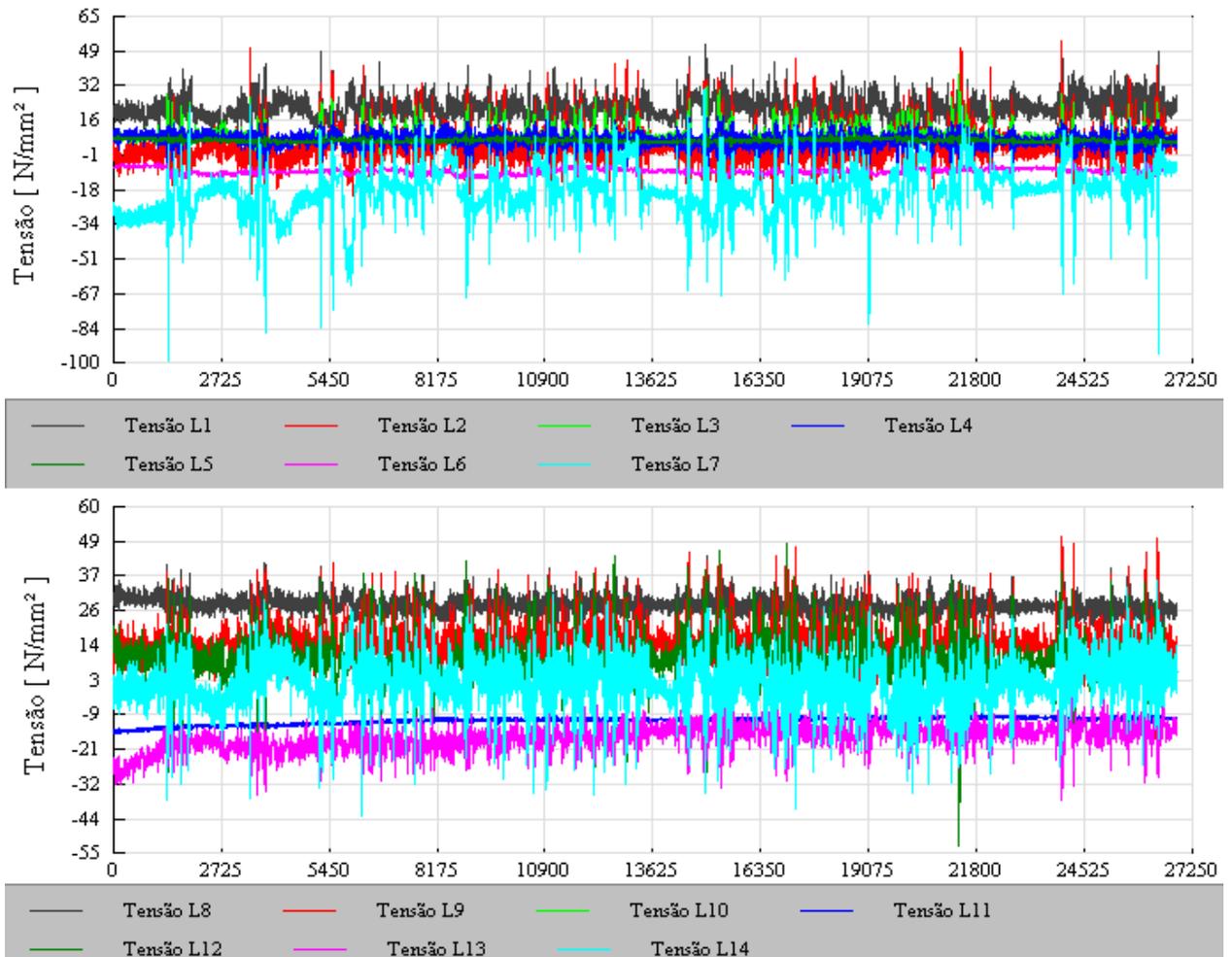


Figura A.22. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 01 (40 km/h forçando nas valetas laterais)

Veículo Carregado:

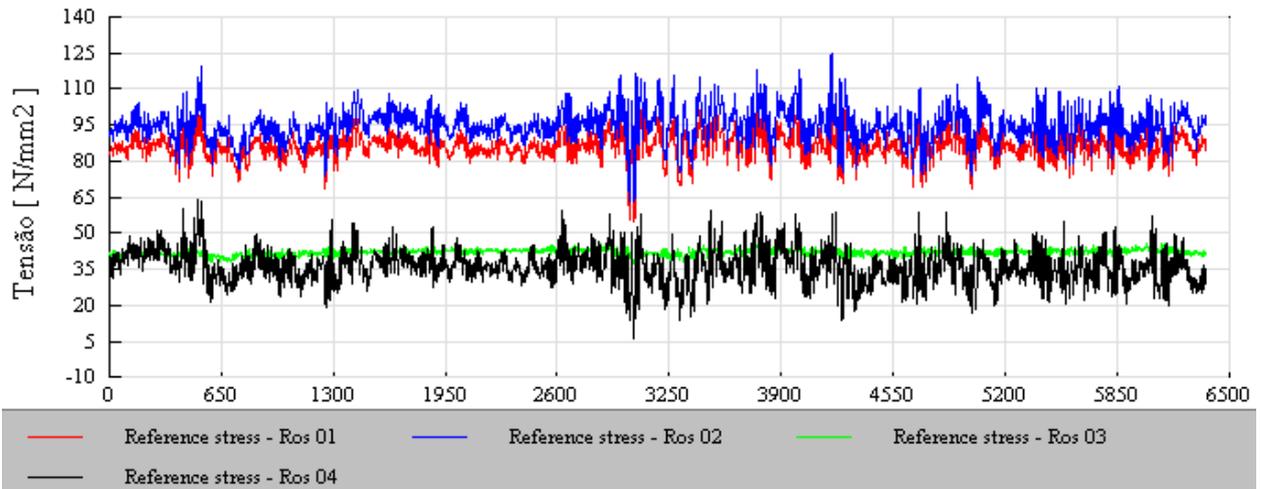


Figura A.23. Chão carregado aparecido salto (1) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h)

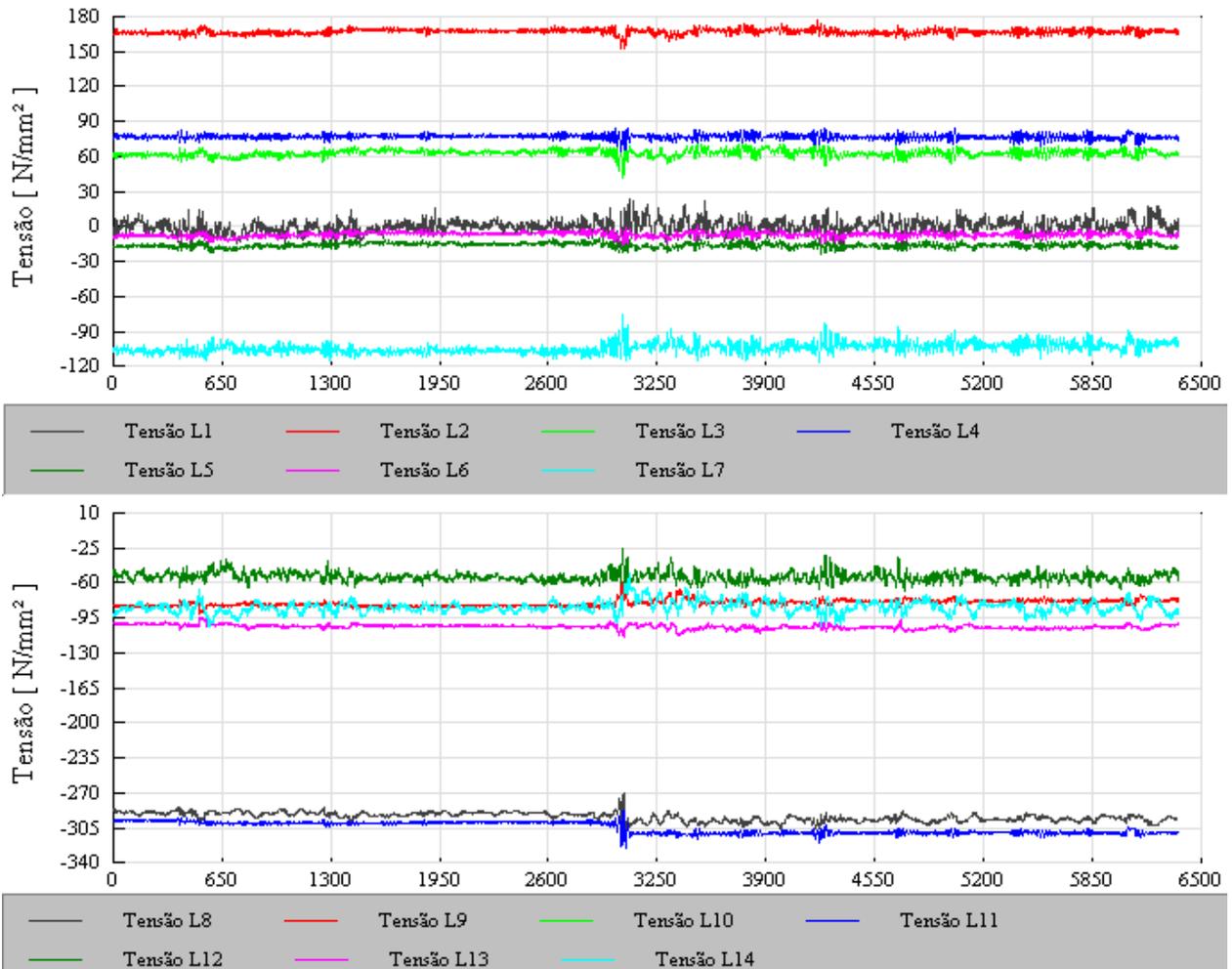


Figura A.24. Chão carregado aparecido salto (1) – Configuração 01 (vel. 50 a 60 km/h)

A.8 Sexto Carregamento - Configuração 02

Veículo Vazio:

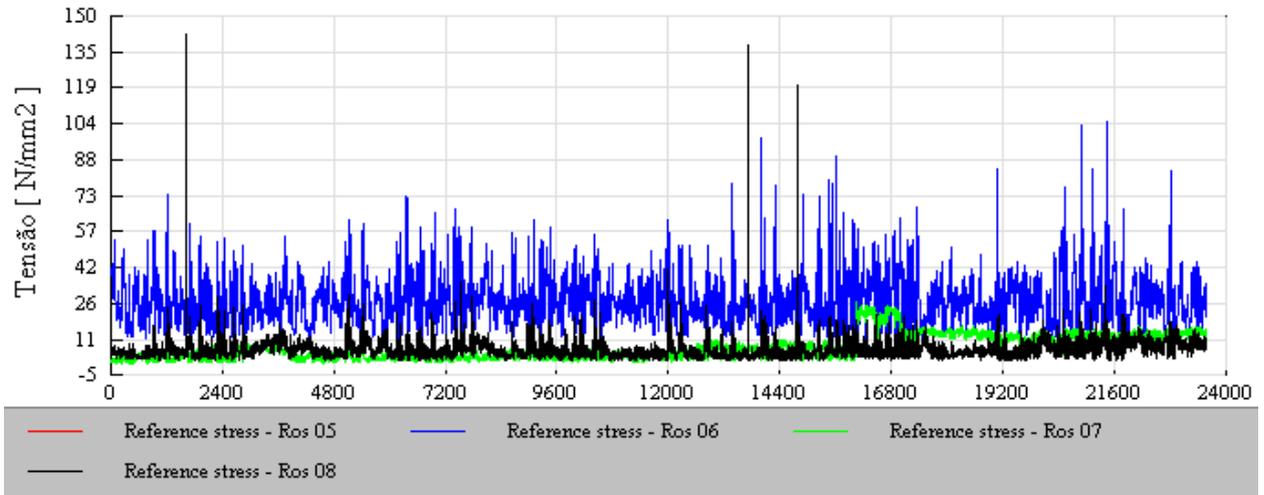


Figura A.25. Chão vazio no estradão da usina (1) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)

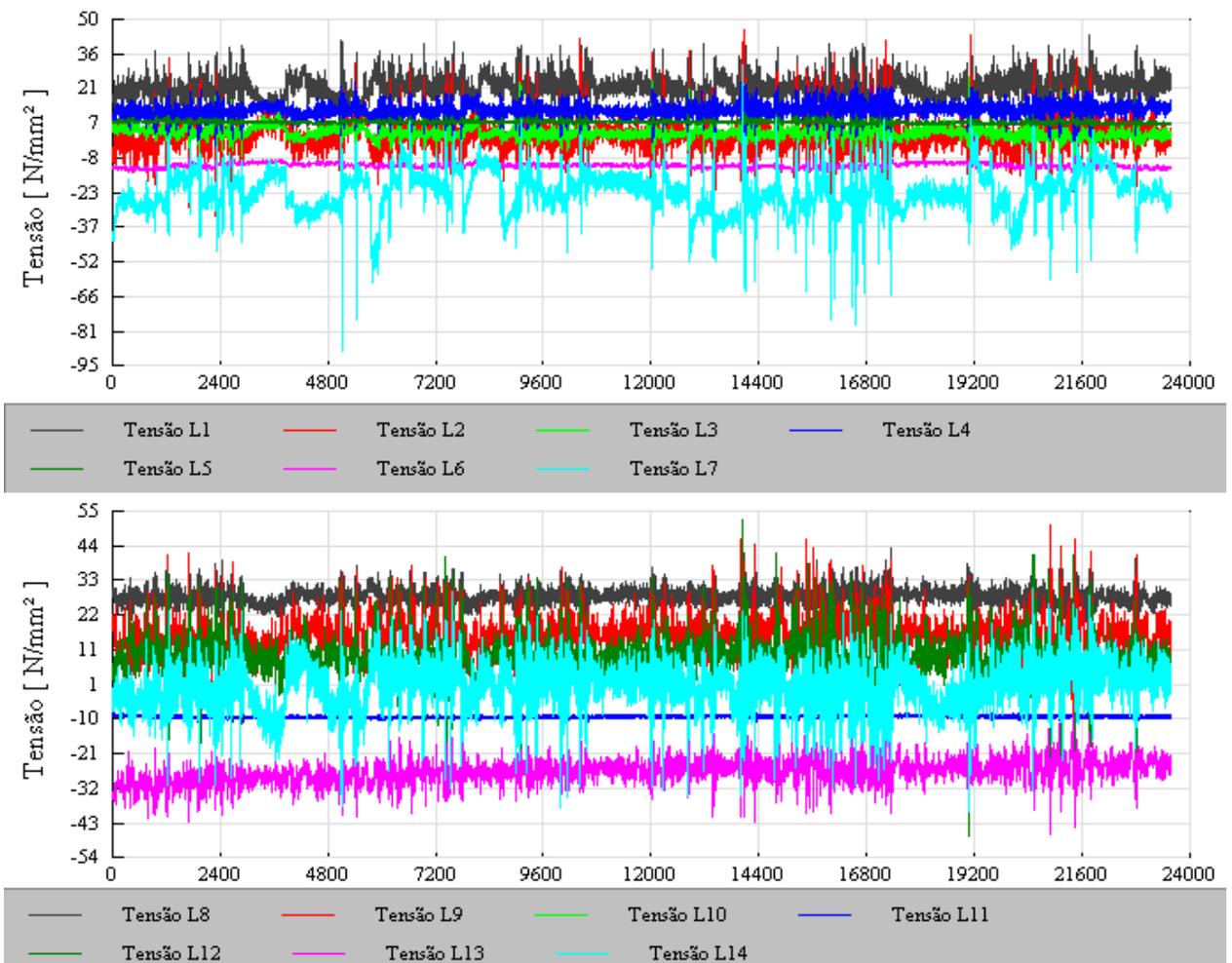


Figura A.26. Chão vazio no estradão da usina (2) – Configuração 02 (vel. 50 a 60 km/h)

Veículo Carregado:

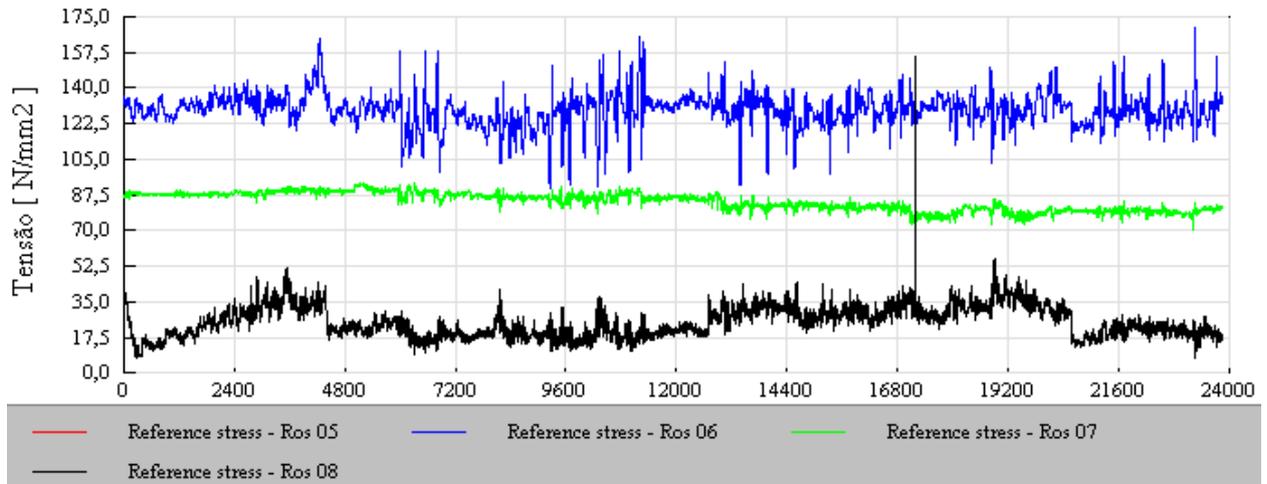


Figura A.27. Chão carregado no estradão da usina (1) – Configuração 02 (35 a 40 km/h forçando nas valetas laterais)

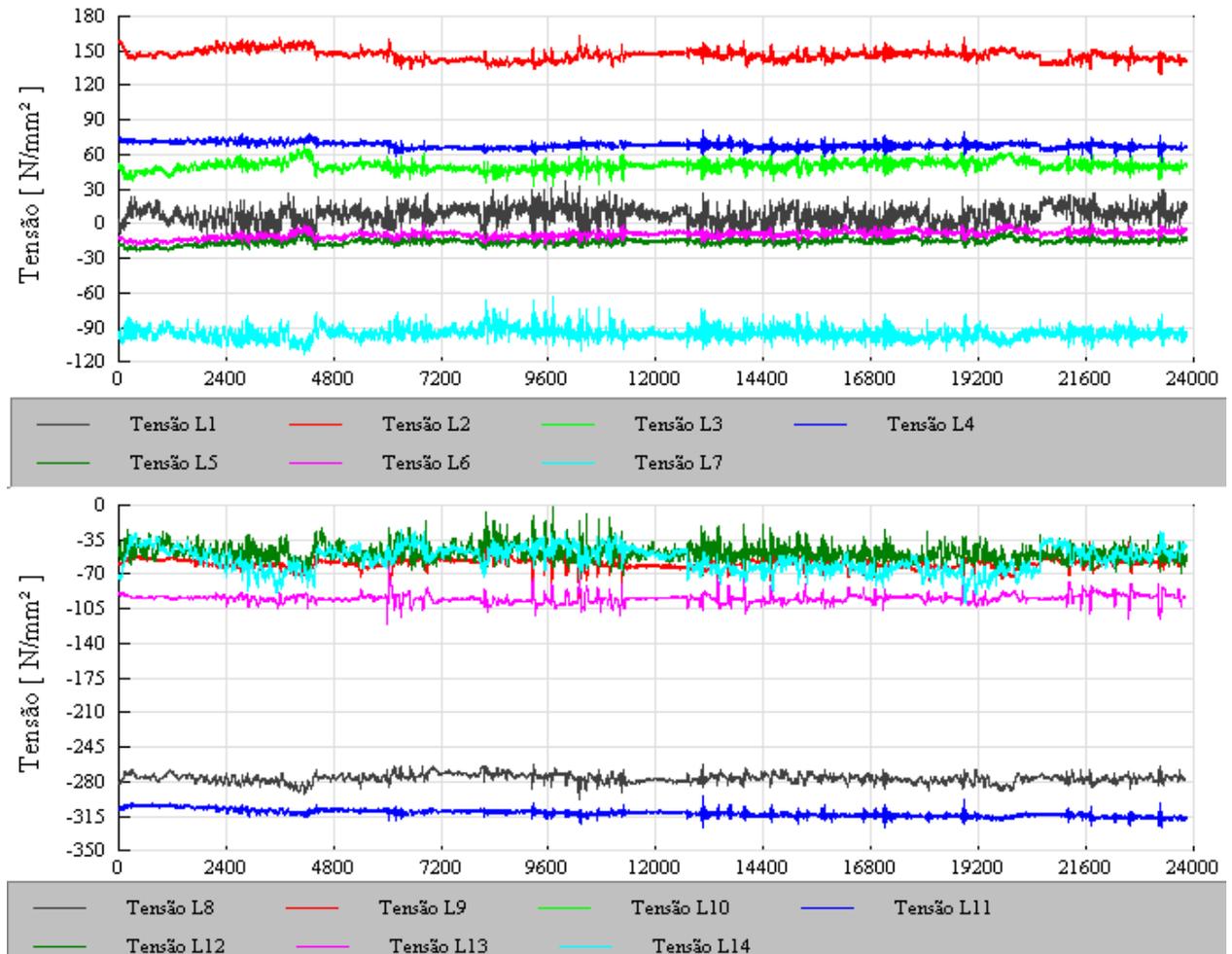


Figura A.28. Chão carregado no estradão da usina (2) – Configuração 02 (35 a 40 km/h forçando nas valetas laterais)

A.9 Tensões Durante o Carregamento

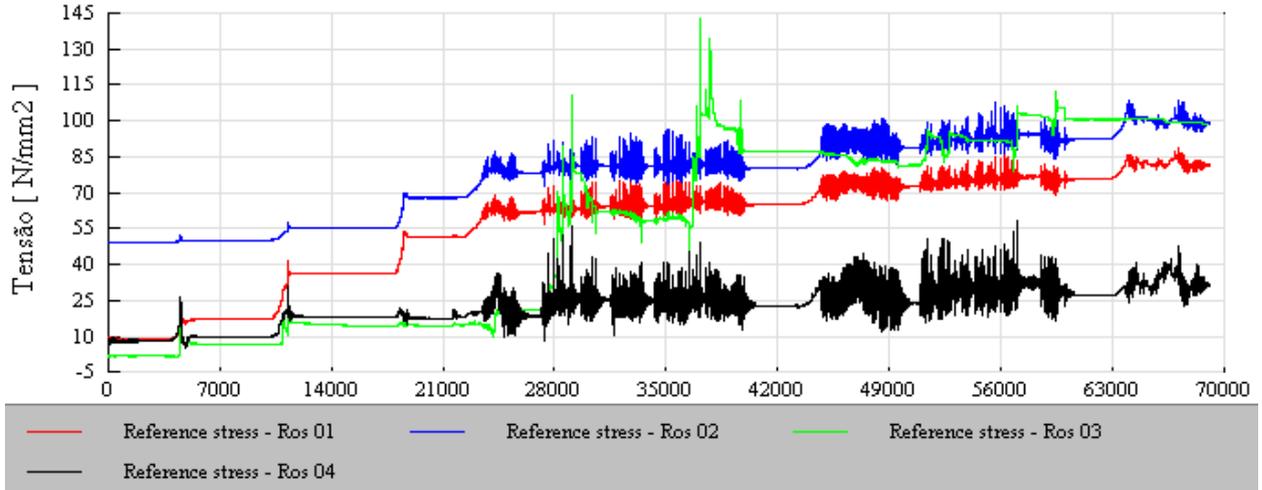


Figura A.29. Carregamento (1) – Configuração 01

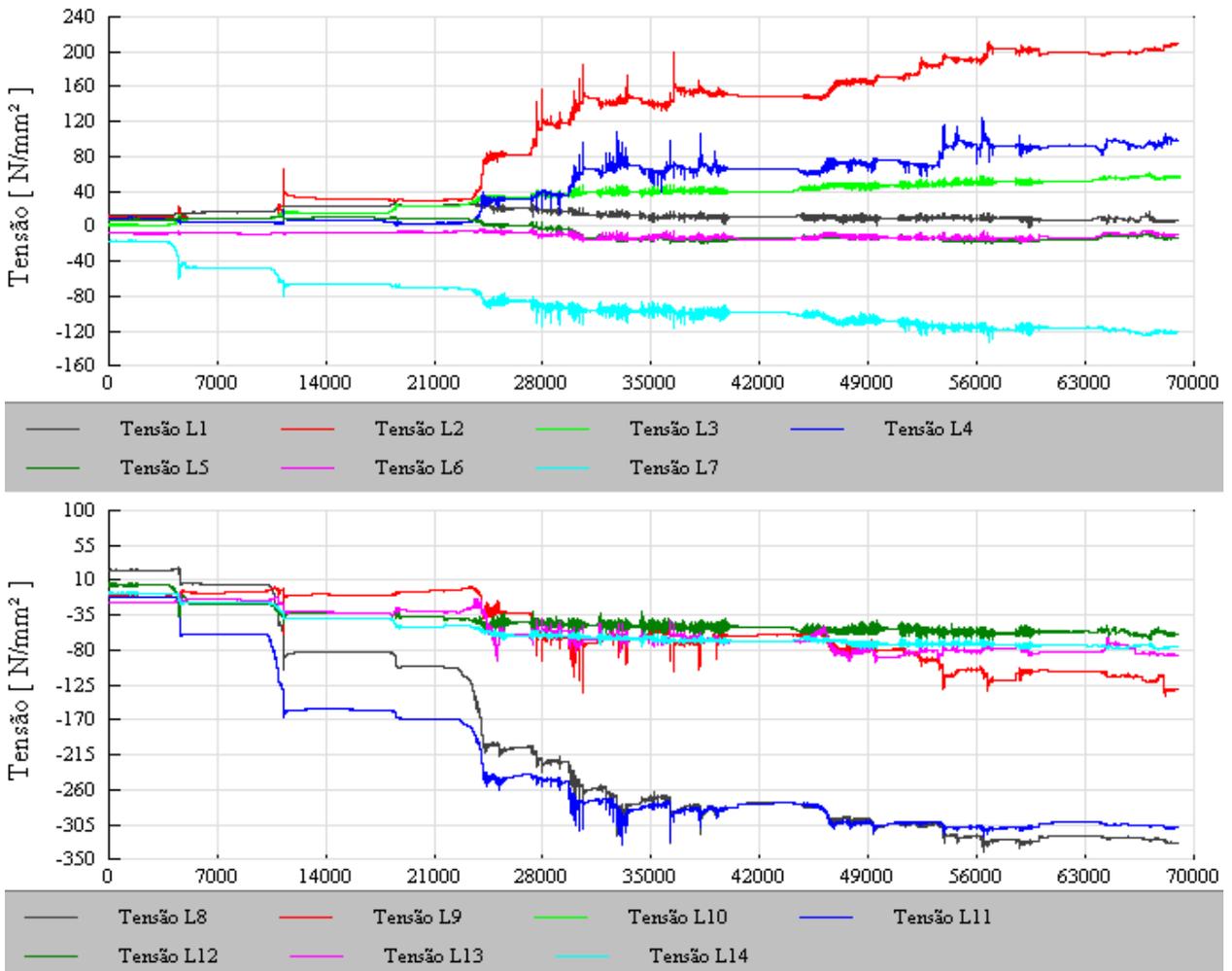


Figura A.30. Carregamento (2) – Configuração 01

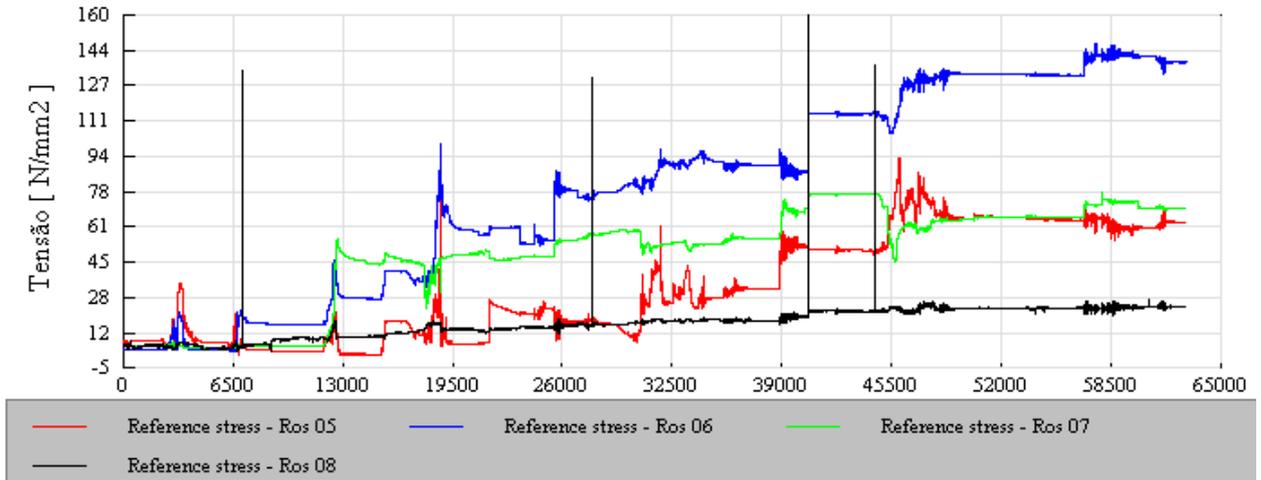


Figura A.31. Carregamento (1) – Configuração 02

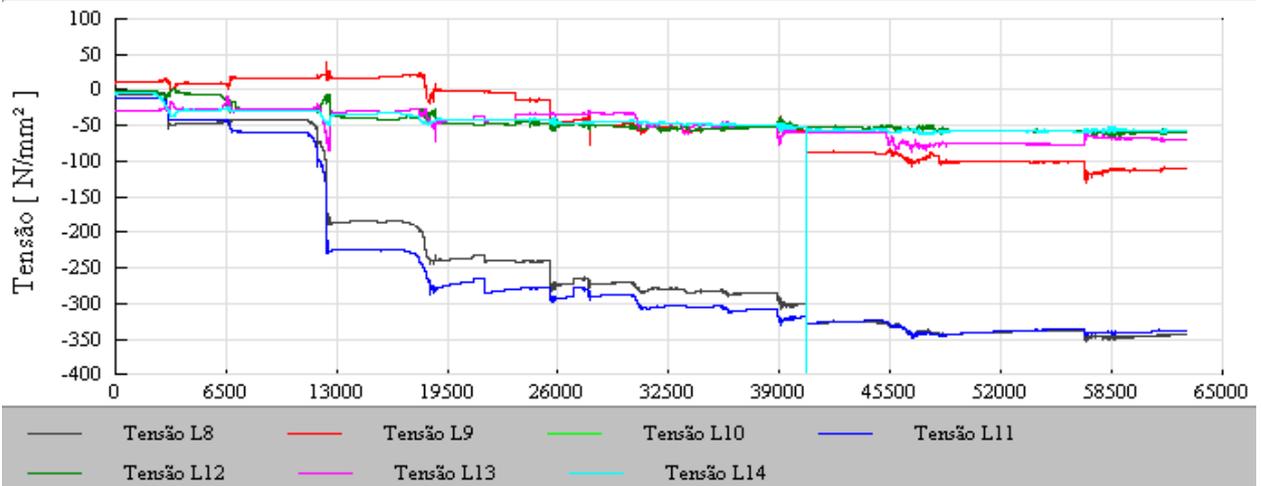
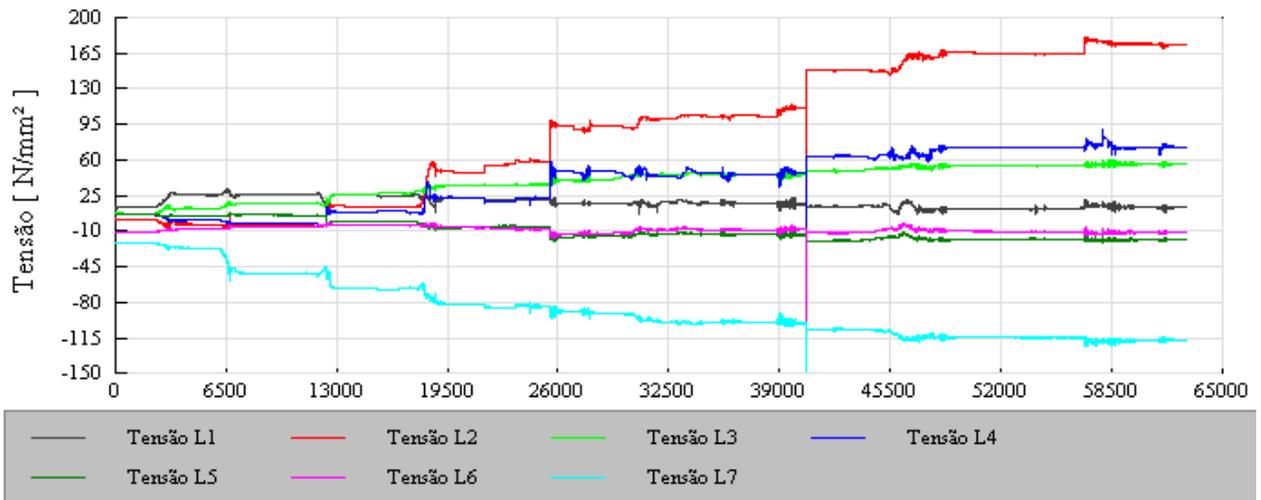


Figura A.32. Carregamento (2) – Configuração 02

A.10 Tensões Durante o Descarregamento

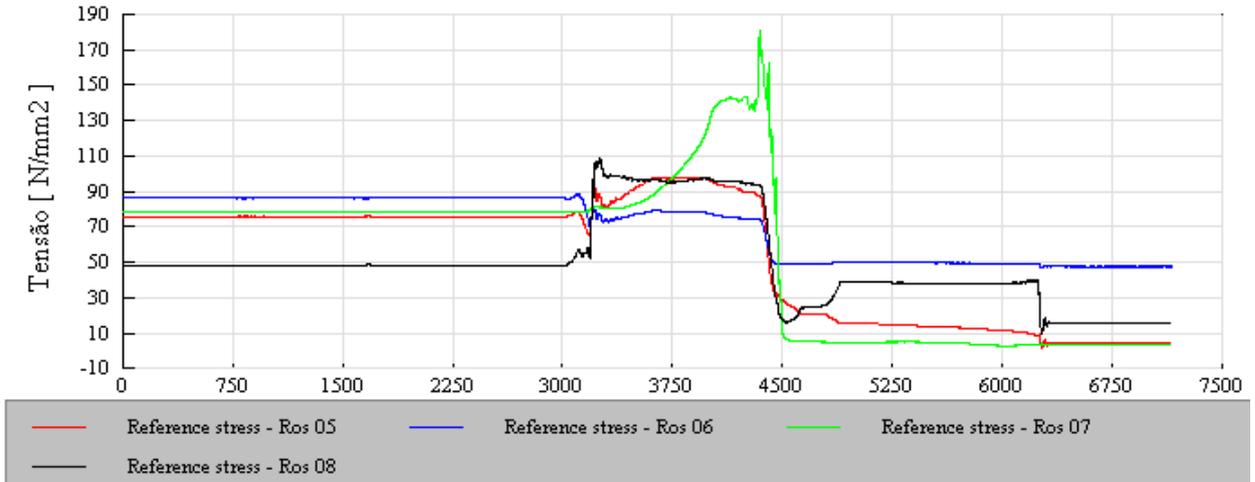


Figura A.33. Descarregamento (1) – Configuração 01 (SR dianteiro)

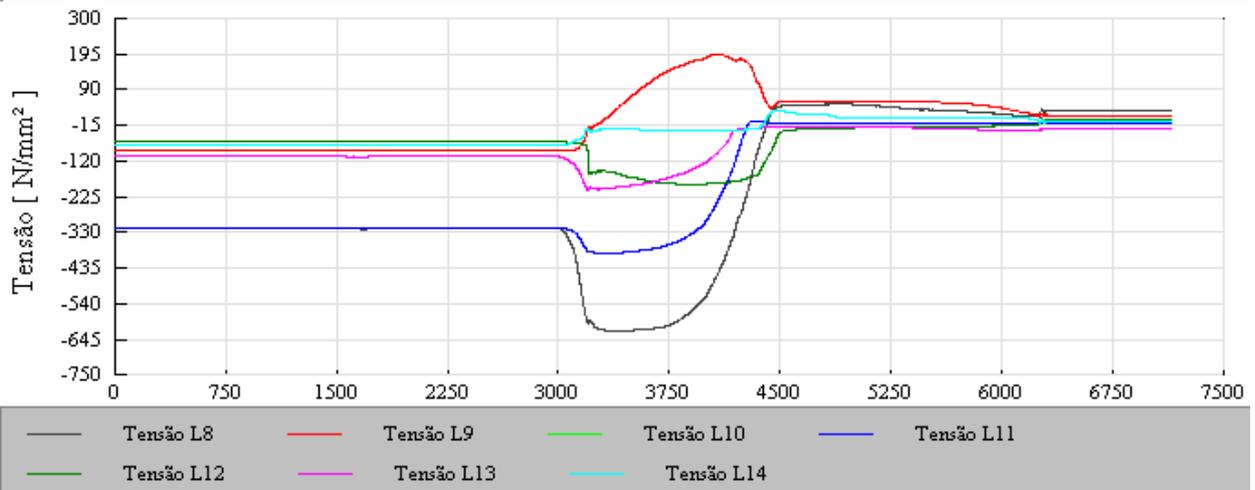
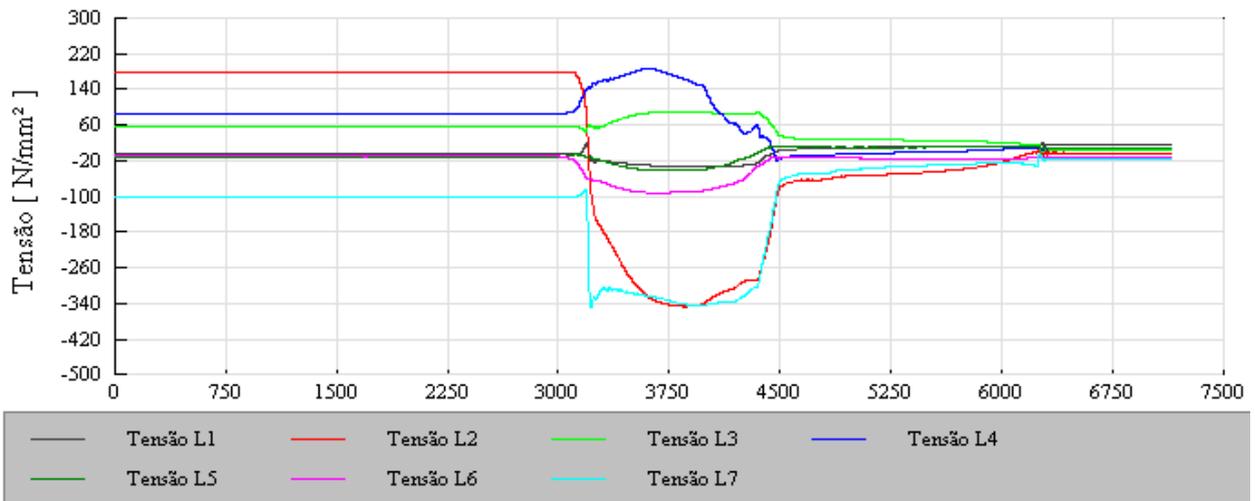


Figura A.34. Descarregamento (2) – Configuração 01 (SR dianteiro)

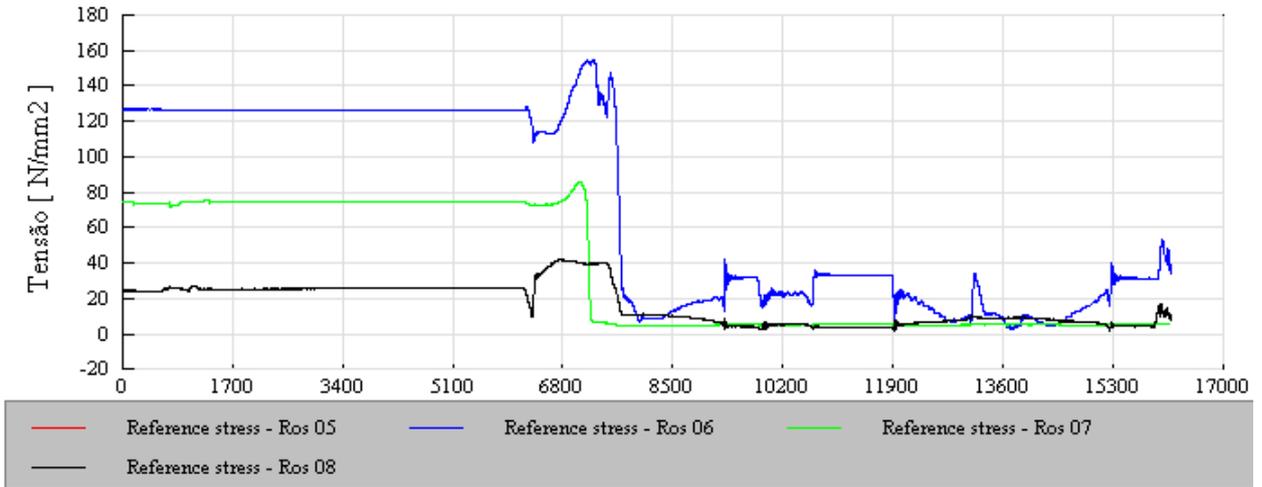


Figura A.35. Descarregamento (1) – Configuração 02 (SR dianteiro)

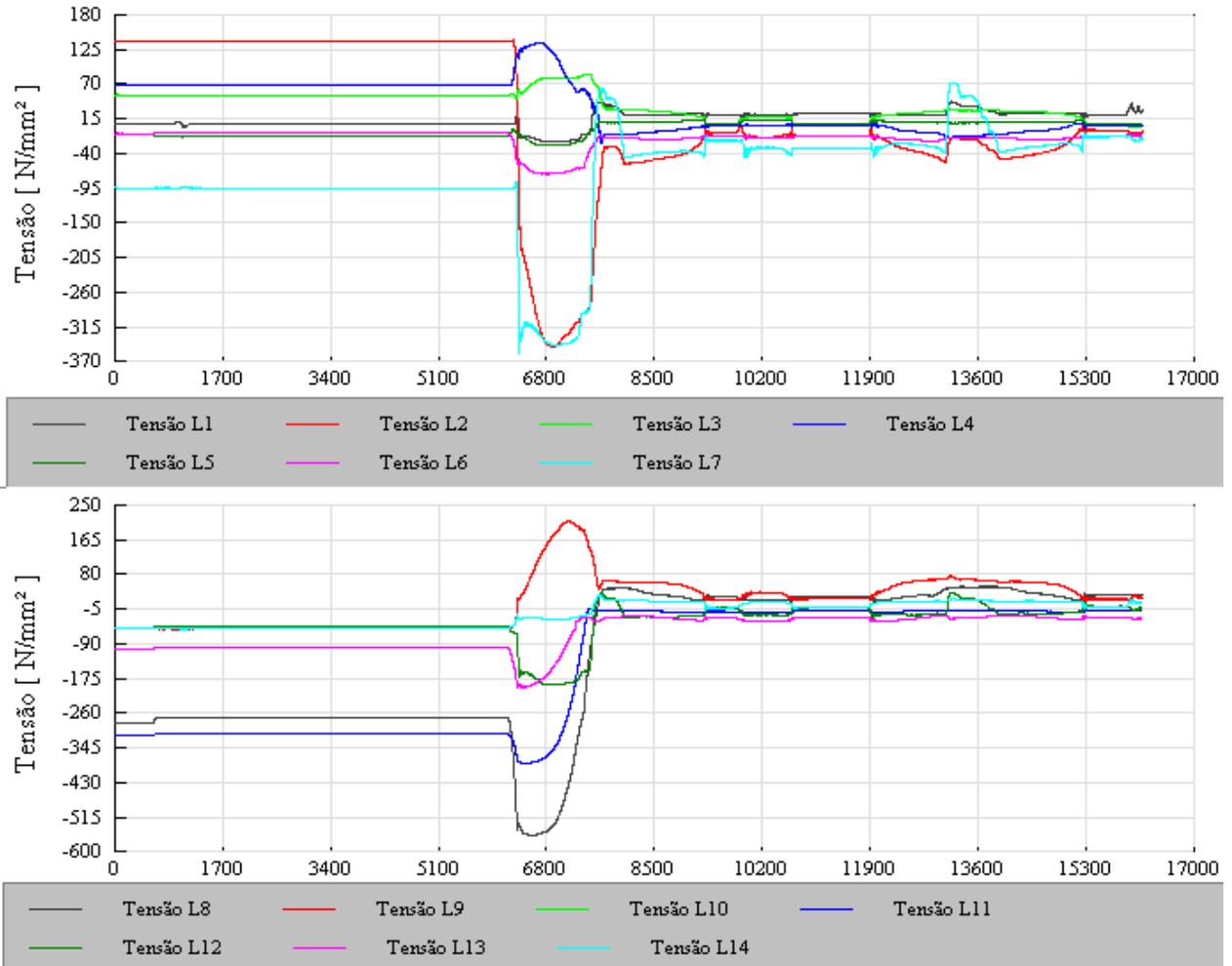


Figura A.36. Descarregamento (2) – Configuração 02 (SR dianteiro)

A.11 Desenvolvimento dos arquivos estáticos

Nas Figuras A.37 e A.38 têm-se os gráficos estáticos ao longo de todo o teste. Na Tabela A.1 tem-se a relação dos nomes dos arquivos estáticos, assim como a situação e configuração em que ele foi coletado.

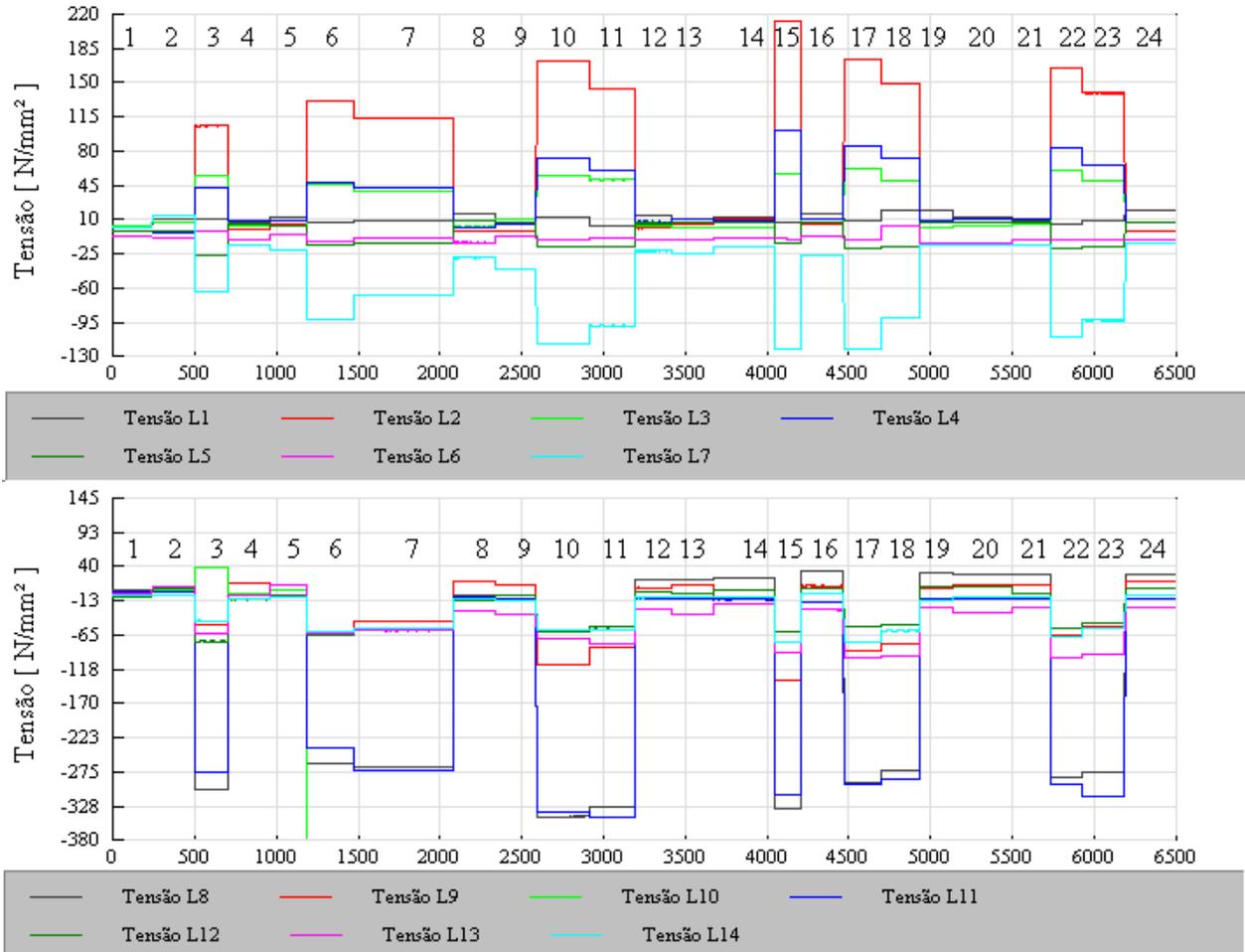


Figura A.37. SG longitudinais estáticos ao longo de todo o teste

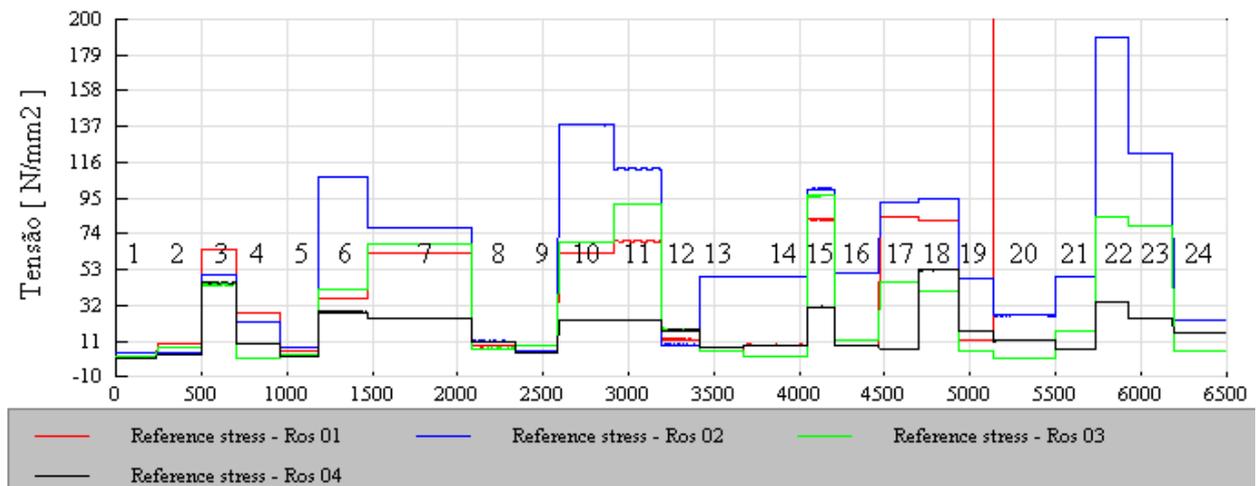


Figura A.38. SG rosetas estáticos ao longo de todo o teste

Tabela A.1. Relação do nome dos arquivos estáticos

Basculamento	Intervalo	Arquivo	Configuração das Rosetas
1º Basculamento	1	estático inicial configuração 01	1
	2	estático antes do carregamento inclinado	
	3	estático antes descarregamento	
2º Basculamento	4	estático inicial configuração 02	2
	5	estático antes do carregamento inclinado vazio	
	6	estático após carregamento inclinado	
	7	estático antes descarregamento	
3º Basculamento	8	estático após descarregamento	2
	9	estático inicial configuração 02	
	10	estático após carregamento inclinado	
	11	estático antes descarregamento	
4º Basculamento	12	estático após descarregamento	1
	13	estático inicial configuração 01	
	14	estático antes do carregamento inclinado vazio	
5º Basculamento	15	estático após carregamento inclinado	1
	16	estático inicial configuração 01	
	17	estático após carregamento inclinado	
	18	estático antes descarregamento	
6º Basculamento	19	estático após descarregamento	2
	20	estático inicial configuração 02	
	21	estático antes carregamento	
	22	estático após carregamento	
	23	estático antes descarregamento	
	24	estático após descarregamento	