



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**MHILEIZER ARIELYS TOLEDO ARENAS SILVA**

**ANÁLISE DAS TENSÕES NO PATIM DO TRILHO NA  
VIA FÉRREA CARREGADA**

**Campinas - SP**

**2016**

**MHILEIZER ARIELYS TOLEDO ARENAS SILVA**

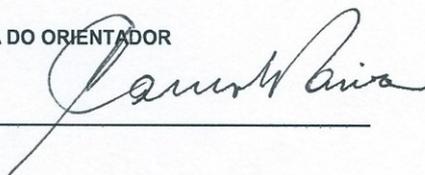
**ANÁLISE DAS TENSÕES NO PATIM DO TRILHO NA  
VIA FÉRREA CARREGADA**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil, na área de Transportes.

**Orientador: Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva.**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA MHILEIZER ARIELYS TOLEDO ARENAS SILVA E ORIENTADA PELO PROF. DR. CASSIO EDUARDO LIMA DE PAIVA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR



---

**Campinas – SP**

**2016**

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CAPES, 01-P-03428-2014

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Si38a Silva, Mhileizer Arielys Toledo Arenas, 1985-  
Análise das Tensões no patim do trilho na via férrea carregada / Mhileizer  
Arielys Toledo Arenas Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Cassio Eduardo Lima de Paiva.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade  
de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Tensão. 2. Software. 3. Dormentes de ferrovias. I. Paiva, Cassio Eduardo  
Lima de, 1953-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Analysis of tensions in the foot of the rail in the loaded railway

**Palavras-chave em inglês:**

Strain

Software

Railway sleepers

**Área de concentração:** Transportes

**Titulação:** Mestra em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Cassio Eduardo Lima de Paiva [Orientador]

Jorge Luiz Alves Trabanco

Luiz Antônio Lopes

**Data de defesa:** 01-12-2016

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**ANÁLISE DAS TENSÕES NO PATIM DO TRILHO NA VIA  
FÉRREA CARREGADA.**

**Mhileizer Arielys Toledo Arenas Silva**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva.  
**Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**

Prof. Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco  
**Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)**

Prof. Dr. Luiz Antônio Silveira Lopes  
**Instituto Militar de Engenharia (IME)**

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 01 de Dezembro de 2016

Con cada experiencia vivida una enseñanza aprendida.

**(Mhileizer Toledo)**

“Vale a pena? Tudo vale a pena

Se a alma não é pequena!”

Trecho do poema “Mar Português”

**(Fernando Pessoa)**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de uma forma direta ou indiretamente, colaboraram para que eu pudesse ampliar meus conhecimentos.

À minha família, que sempre me apoia em quaisquer desafios e sonhos que busco, pelo amor incondicional e por ser meu porto seguro, e especialmente à meu esposo, Marcus Vinicius, por estar sempre presente, me apoiando e dando força para nunca desistir das coisas, pela motivação e disponibilidade sempre presentes ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva, orientador dessa dissertação, pela ajuda incondicional, paciência, conhecimentos transmitidos ao longo do mestrado, e pelas exigências impostas, que fizeram com que eu me esforçasse cada dia mais. Pelas sugestões de melhorias no trabalho e por aceitar o desafio de assumir a orientação desta tese. Serei sempre grata pela oportunidade.

Aos Profs. Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco e Dra. Maria Teresa Françoso, pelo tempo dedicado à análise dessa dissertação, pela contribuição prestada no exame de qualificação e conhecimentos transmitidos durante as disciplinas cursadas no programa de mestrado.

Ao Prof. Pablo Siqueira Meirelles, por autorizar a realização dos ensaios no Laboratório de Ensaios Mecânicos da FEM. A todos os colaboradores do Labedim, Laboratório de Ensaios Mecânicos da FEM, os Engenheiros Edson de Oliveira e Ricardo Vivan, que forneceram todo suporte técnico para a execução dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Isaías Vizotto, do Departamento de Estruturas da FEC, pela paciência, ajuda e orientações sobre o Software LISA. Foram de muita ajuda.

Ao Prof. Dr. Auteliano Antunes, de Engenharia Mecânica, pelas orientações e recomendações que fizeram possível concluir a minha dissertação.

À Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), pela oportunidade de estudar em tão renomada instituição.

À CAPES pelo financiamento e apoio para realização desta pesquisa.

Aos amigos e colegas de mestrado Sonia Rosero, Sindy Vargas, Juliano Lopes, Plínio Piccin e Amaro Joaquin pela amizade, pelos momentos compartilhados, conhecimentos transmitidos, companhia, por me suportar em todo momento ao longo do mestrado, camaradagem e partilha de aspirações e expectativas.

## RESUMO

O sistema ferroviário é um importante modal no Brasil, principalmente para o transporte de cargas de minério. Segundo estimativas da Associação Nacional de Transportadores Ferroviários (ANTF), o ano 2015 finalizou com um total de 485 milhões de toneladas transportadas, e 2016 com 510 milhões (aumento de 5,1%). No Brasil existem muitas ferrovias antigas, que nunca passaram por nenhum tipo de modificação ou reconstrução, com emprego de modernas técnicas construtivas. Portanto, estas vias não possuem a camada de sub-lastro, expondo muitos trechos à drenagem deficiente, trazendo como consequência a saturação da plataforma e a cravação do lastro, deixando de existir nessa interface (dormente-lastro) o pleno contato entre elas, fenômeno conhecido pelo nome “GAP”. Este fenômeno compromete a capacidade de suporte dos elementos da via, afetando seu fator de segurança por permitir o livre deslocamento vertical do dormente quando carregado. Neste trabalho foi incorporada a utilização do programa de análise LISA com os dados obtidos em campo e fazer a simulação de uma via férrea carregada, para determinar tanto as deformações no patim dos trilhos quanto as tensões ocorrentes nos mesmos quando ficam sujeitos ao aumento de uma carga. Com base nos resultados computacionais e de laboratório, esta pesquisa permitiu realizar um estudo de situações específicas, como a determinação das tensões no patim do trilho na presença de um, três e cinco dormentes laqueados, para calibrar um modelo que permite representar e prever o comportamento do trilho a flexão.

**Palavras-chave:** Trilho, dormente laqueado, tensão, software, bacia de deflexão.

## ABSTRACT

ARENAS, M. A. T. S. ANALYSIS OF TENSIONS IN THE FOOT OF THE RAIL IN THE LOADED RAILWAY. Thesis (Master of Science) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2016, 122p. (Master of Science) - Faculdade de Engenharia Civil.

The rail system is an important modal in the country, specially for the transport of ore loads. According to the National Association of Railway Transport (ANTF) estimations, 2015 will end with a total of 485 million tons transported, and therefore 2016 will present an increase of 5.1% by closing the year with 510 million tons transported. In Brazil there are many aged railways, which have never suffered any modification or reconstruction with the use of modern building techniques. Consequently, these roads do not possess the subballast layer, exposing many road sections with poor drainage, bringing as a result the platform saturation and the crimping of the ballast. When this occurs, the ballast is crimped and the full contact between the sleeper-ballast cease to exist, appearing the phenomenon called "*GAP*" between the two surfaces. The effects are shown at the moment of the loading of this sleeper due to a free vertical displacement of the dormant until it reaches its support in the ballast, which compromises the capacity of the permanent way elements and affects the safety factor of the railroad. The specification of deformation parameters is usually made through the analysis of the deformation influence lines, usually called deflection basin of the rails, which allows to model and to predict the track behavior. This study is a set of knowledge that allows to model and to predict the behavior of the permanent way. This research allowed to conduct a study of specific situations, such as the determination of the tensions at the foot on the rail in presence of one, three and five lacquered sleepers.

**Keywords:** rail, lacquered sleeper, strain, software, basin deflection.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 (a) Seção típica de via férrea convencional e (b) Seção de via sobre laje de concreto.....	26
Figura 2 Bitola larga. ....	28
Figura 3 Representação da Distribuição de tensões verticais em vias permanentes. ....	30
Figura 4 Representação dos esforços nos trilhos na iminência do descarrilamento- Desenho esquemático do contato roda x trilho. ....	31
Figura 5 Ordem de grandeza das tensões médias em cada interface do conjunto da via férrea. ....	31
Figura 6 Contato de 1 ou 2 pontos entre o friso e a roda. ....	33
Figura 7 Seção Transversal trilho TR57.....	34
Figura 8 Representação esquemática da distribuição das células de carga na via. .	35
Figura 9 Medições das tensões de contato entre dormente de concreto e o lastro. .	36
Figura 10 Simplificação da distribuição de tensões entre o dormente e o lastro.....	37
Figura 11 Diagrama de Goodman Modificado.....	43
Figura 12 Modelo de ZIMMERMANN para via em viga com apoios contínuos. ....	46
Figura 13 Resultados de ZIMMERMANN. a) linha de influência dos deslocamentos do trilho; b) linha de influência dos momentos fletores no trilho. ....	46
Figura 14 Vazios no lastro - Dormente Laqueado.....	48
Figura 15 Desnívelamento Longitudinal da Via. ....	49
Figura 16 Desnívelamento Transversal em Tangente da Via.....	49
Figura 17 Desenho do Trilho TR57 em Autocad. a) em seção transversal, b) segmento do 2050mm do trilho.....	55
Figura 18 Deflexão (mm) vs Posição do dormente na Bacia de deflexão no local do teste, Locomotiva GE U-20C. Locomotiva U20 ; Velocidade = 18 kmh; Local de teste 2-1; Faixa #1. ....	59
Figura 19 Deflexão (mm) vs Posição do dormente na Bacia de deflexão no local do teste. Locomotiva GE U-23C. Locomotiva U23 ; Velocidade = 19 kmh; Local de teste 2-1; Faixa # 1 .....	59
Figura 20 Aplicador de Carga.....	61
Figura 21 Roletes para aplicador de Carga.....	61

Figura 22 Controlador utilizado no ensaio do primeiro Trilho. Spectra ST 7000/ Gerador de sinal Goldstar. ....	62
Figura 23 Controlador utilizado no ensaio do segundo Trilho. MTS FT 40. ....	62
Figura 24 Medição da posição inicial do trilho TR57 (sem deformação) com o Relógio Comparador. ....	64
Figura 25 Início do ensaio. a) Aplicação das cargas, b) Registro das deformações .	65
Figura 26 Deslocamento vs Força. Ensaio no laboratório. ....	68
Figura 27 Deformação vs. nº de ciclos do Trilho TR57, sob ação das cargas 36.43kN e 160.31kN. Ensaio no laboratório. ....	69
Figura 28 Deslocamento vs. nº de ciclos do trilho TR57, sob ação das cargas 36.43kN e 160.31kN. Ensaio no laboratório ....	69
Figura 29 Deformação vs. nº de ciclos do trilho TR57, sob ação das cargas 40kN e 180kN. Ensaio no laboratório ....	70
Figura 30 Deslocamento vs. nº de ciclos do trilho TR57, sob ação das cargas 40kN e 180kN. Ensaio no laboratório. ....	70
Figura 31 Tela correspondente aos dados de entrada Software LISA, Tipo de Análise. ....	72
Figura 32 Tela correspondente aos dados de entrada do Software LISA. Tipo de Material, Trilho.....	72
Figura 33 Tela correspondente à primeira simulação no Software LISA, Carga 36.43kN.....	73
Figura 34 Tela do Software LISA, Trilho no plano YX. ....	73
Figura 35 Tela do Software LISA, trilho no plano YZ. ....	74
Figura 36 Tela do Software LISA, trilho no plano ZX. ....	74
Figura 37 Tela do Software LISA, trilho no plano 3D XYZ. ....	75
Figura 38 Tela do software LISA. Deslocamento máximo de 1.414mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 36.43kN. ....	76
Figura 39 Tela do software LISA. Deslocamento máximo de 1.552mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 40kN. ....	76
Figura 40 Tela do software LISA. Deslocamento máximo de 6.221mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 160kN. ....	77
Figura 41 Software LISA, Deslocamento máximo de 6.985mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 180kN.....	77

Figura 42 Gráfico comparativo dos resultados de Deslocamento vs Força, obtidos no laboratório e no software LISA. ....	78
Figura 43 Tela do Software LISA. Tensão máxima a tração de 0.058kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 36.43kN. ....	79
Figura 44 Tela do software LISA, Tensão máxima a tração de 0.066kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 40kN. ....	80
Figura 45 Tela do software LISA, Tensão máxima a tração de 0.0242 kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 160.31kN. ....	80
Figura 46 Tela do software LISA, Tensão máxima a tração de 0.269 kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 180kN. ....	81
Figura 47 Tela do software LISA da simulação do Trilho TR57, com molas representando aos dormentes apoiados sobre o lastro. Força aplicada 100kN/roda (Visão da Malha). ....	82
Figura 48 Tela do software LISA da simulação do Trilho TR57, com molas representando aos dormentes apoiados sobre o lastro. Força aplicada 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C (Visão da Superfície). ....	83
Figura 49 Tela do Software LISA referente à distribuição da numeração dos dormentes .....	85
Figura 50 Tela do Software LISA apresentando apresentando os resultados de deslocamento da primeira simulação do ensaio com o LDD aplicando a carga de 200kN/eixo. Locomotiva GE U - 20C.....	85
Figura 51 Tela do Software LISA apresentando os resultados da tensão da primeira simulação do ensaio com o LDD aplicando a carga de 200kN/eixo. Locomotiva GEU-20C.....	86
Figura 52 Tela do Software Lisa apresentando os resultados de deslocamento da segunda simulação do ensaio com o LDD aplicando a carga de 300kN/eixo. Locomotiva GE U – 23C. Fonte: elaborado pelo autor.....	89
Figura 53 Resultados de tensão da segunda simulação do ensaio com o LDD aplicando a força de 300kN/eixo. Locomotiva GE U-23C. ....	90
Figura 54 Deslocamento vs. Coeficiente da Mola (k). Força 200kN/eixo .....	92
Figura 55 Tensão vs. Coeficiente da Mola (k). Força 200kN/eixo .....	92
Figura 56 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k=7.59$ kN/mm.....	93

Figura 57 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k=7.59\text{kN/mm}$ . Fonte: elaborado pelo autor .....	94
Figura 58 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k=6\text{ kN/mm}$ .....	94
Figura 59 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k =6\text{ kN/mm}$ .....	95
Figura 60 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k=4\text{ kN/mm}$ .....	95
Figura 61 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k =4\text{ kN/mm}$ .....	96
Figura 62 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k=2\text{ kN/mm}$ .....	96
Figura 63 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k = 2\text{ kN/mm}$ .....	97
Figura 64 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k=1\text{ kN/mm}$ .....	97
Figura 65 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k =1\text{ kN/mm}$ .....	98
Figura 66 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de três dormentes laqueados aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k = 0\text{kN/mm}$ .....	98
Figura 67 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de três dormentes laqueados aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k=0\text{kN/mm}$ .....	99

Figura 68 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de cinco dormentes laqueados aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k = 0$ kN/mm.....	99
Figura 69 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de cinco dormentes laqueados aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C. $k = 0$ kN/mm.....	100
Figura 70 Deslocamento vs. Coeficiente da Mola (k). Força 300kN/eixo. ....	101
Figura 71 Tensão vs. Coeficiente da Mola (k). Força 300kN/eixo. ....	101
Figura 72 Diagrama de Goodman. Avaliação de fadiga do trilho TR57 submetido à carga de 200kN/eixo. ....	104
Figura 73 Diagrama de Goodman. Avaliação de fadiga do trilho TR57 submetido à carga de 300kN/eixo. ....	104
Figura 74 Passos Diagrama Goodman .....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Distribuição do transporte de cargas por modal no Brasil .....	21
Tabela 2 Parâmetros para o fator de modificação de superfície de Marin .....	39
Tabela 3 Efeito da Temperatura de operação na resistência à tração do aço .....	40
Tabela 4 Fatores de confiabilidade $K_e$ correspondentes a 8% de desvio padrão do limite de endurance.....	40
Tabela 5 Fator de segurança, $t$ .....	42
Tabela 6 LDD – Deslocamentos Verticais (mm). Locomotiva GE U-20C.....	58
Tabela 7 LDD – Deslocamentos Verticais (mm). Locomotiva GE U23-C.....	58
Tabela 8 Tabela com ciclos, cargas, deformações e deslocamentos verticais implementado no primeiro Trilho TR57. Ensaio no Laboratório .....	67
Tabela 9 Tabela com ciclos, cargas, deformações e deslocamentos verticais implementado no segundo Trilho TR57. Ensaio no Laboratório.....	67
Tabela 10 Deslocamento vs Forças, correspondente ao ensaio no laboratório.....	68
Tabela 11 Tabela comparativa dos resultados do Deslocamento ( $Y$ , mm) obtidos no laboratório e o Software LISA.....	78
Tabela 12 Tabela comparativa, tensão obtida no laboratório com os do software LISA. ....	81
Tabela 13 Parte da tabela utilizada das medidas de deflexão do trilho por meio do LDD .....	83
Tabela 14 Cálculo da constante da mola ( $k$ ). Trilho submetido a uma carga de 100kN/roda.....	84
Tabela 15 Valores efetivos da constante de cada mola, utilizados na simulação do ensaio no Software LISA 8.0.0, com a carga de 100kN/roda .....	84
Tabela 16 Determinação do $\mu$ , para obter o efeito das outras rodas no sistema. ....	87
Tabela 17 Comparação da tensão por meio do Método Zimmermann e os Resultados do LISA 8.0.0. Para a carga de 200kN/eixo. ....	87
Tabela 18 Cálculo da constante da mola ( $k$ ). Trilho submetido a uma carga de 150kN/roda.....	88
Tabela 19 Valores efetivos da constante de cada mola, utilizados na Simulação do ensaio no software LISA 8.0.0 com a carga de 150kN/roda.....	89
Tabela 20 Comparação da tensão por meio do Método Zimmermann e os Resultados do LISA 8.0.0. Para a carga de 300kN/eixo. ....	90

Tabela 21 Tabela comparativa das Tensões (kN/mm <sup>2</sup> ) e Deslocamento Vertical (mm) de um Trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados. Força de 200kN/eixo. Considerando a constante da mola (k).....	91
Tabela 22 Tabela comparativa das Tensões (N/mm <sup>2</sup> ) e Deslocamento Vertical (mm) de um trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados. Força de 200kN/eixo. Considerando a constante da mola (k).....	91
Tabela 23 Tabela comparativa das Tensões (kN/mm <sup>2</sup> ) e Deslocamentos (mm) de um Trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados. Força de 300kN/eixo. Considerando a constante da mola (k).....	100
Tabela 24 Dados para o Diagrama de Goodman. Trilho submetido à carga 200kN/eixo .....	103
Tabela 25 Dados para o Diagrama de Goodman. Trilho submetido à carga 300kN/eixo .....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ANTF</b>	Associação Nacional de Transportadores Ferroviários
<b>AREMA</b>	<i>American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association</i> – Associação Americana da Engenharia Ferroviária e de Manutenção de via.
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>BOEF</b>	<i>Beam on an elastic foundation</i> – Viga em fundação elástica
<b>CNT</b>	Confederação Nacional do Transporte
<b>DNIT</b>	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
<b>FEM</b>	Faculdade de Engenharia Mecânica
<b>FEC</b>	Faculdade de Engenharia Civil
<b>ILOS</b>	Instituto de Logística e Supply Chain
<b>IPEA</b>	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
<b>LabEDin</b>	Laboratório de Ensaios Dinâmicos
<b>LLD</b>	<i>Laser Dynamic Deflectometer</i>
<b>TKU</b>	Toneladas Transportadas por Quilômetro Útil

## LISTA DE SÍMBOLOS

- A** altura do trilho
- B** base do trilho
- C** módulo de fundação
- c** coeficiente do lastro
- D** alma do trilho
- E** módulo de elasticidade do trilho
- I** momento de inércia do trilho
- L** largura efetiva do trilho
- N** número de ciclos
- P** carga por roda no trilho
- P** patim do trilho
- Q** carga por roda aplicada no trilho
- W** módulo de resistência do patim do trilho
- w** deslocamento local
- x** distância entre o ponto de aplicação da carga **Q** e o ponto considerado
- y** deflexão da via
- $\sigma$  máxima tensão à tração no patim do trilho

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	20
1.1	Considerações Iniciais .....	20
1.2	Objetivo .....	22
1.3	Justificativa .....	22
1.4	Metodologia .....	23
1.5	Organização do Trabalho .....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	Via Férrea - Definição.....	26
2.2	Superestrutura e Subestrutura Ferroviária. ....	27
2.3	Carregamento da via férrea .....	29
2.4	Fadiga.....	37
2.4.1	Fatores modificadores do limite de resistência.....	38
2.4.2	Diagrama de Goodman Modificado .....	42
2.5	Método da análise da via férrea .....	43
2.6	Dormente laqueado .....	47
2.7	Software LISA.....	49
2.8	Considerações Finais .....	51
3	PROPOSTA DO EXPERIMENTO .....	54
3.1	Estudo a ser desenvolvido.....	54
3.1.1	Outros dados considerados neste estudo .....	56
3.2	Ensaio de Laboratório.....	60
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	66
4.1	Simulação do ensaio flexo-tração em laboratório por meio do Software LISA 8.0.0.....	66
4.2	Simulação da via férrea com carga de 20 ton/eixo por meio do Software LISA 8.0.0.....	82

4.3 Simulação da via férrea com carga de 30 ton/eixo por meio do Software LISA 8.0.0.....	88
4.4 Simulação de um trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados por meio do software LISA 8.0.0., submetido a uma carga de 20t/eixo. ....	90
4.5 Simulação de um trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados por meio do software LISA 8.0.0., submetido a uma carga de 30t/eixo. ....	100
4.6 Avaliação do trilho nas condições da ocorrência de um, três e cinco dormentes Laqueados .....	102
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	110
ANEXOS .....	116
Anexo I - Passos realizados na simulação do Ensaio no Laboratório com o Software LISA.....	117
Anexo II – Passos para a realização do Diagrama de Goodman Modificado. ..	119
Anexo III – Artigo Submetido - The International Journal of Railway Technology (IJRT).....	122
Anexo IV – Artigo Submetido - Canadian Journal of Civil Engineering (CJCE)	123

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A melhoria dos sistemas de transportes terrestres tem se revelado de uma importância crucial a nível mundial. O setor ferroviário tem sofrido algumas alterações, evoluindo no sentido de um sistema integrado, cujo expoente máximo se traduz nas atuais redes de alta velocidade ferroviária.

O sistema ferroviário é um importante modal no país, no transporte de cargas de granéis sólidos, especialmente nas exportações de minério. Economicamente interessante para as ferrovias, seria ter tempos de viagem mais curtos, além de maior capacidade de cargas a transportar, aumentando a competitividade do sistema. Segundo o IPEA (2010), “o consumo de combustível por tonelada transportada em uma ferrovia moderna é de cerca de 20% do consumo em uma rodovia também moderna”. Trens de carga emitem 70% menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e 66% menos monóxido de carbono (CO) do que os caminhões.

O Brasil é um dos países com destacado desenvolvimento no cenário global nas últimas décadas; mas vem apresentando sérios problemas de infraestrutura na área de transportes, devido à sua distribuição desequilibrada, como, por exemplo, alta concentração no modal rodoviário, aeroportos e rodovias operando acima da capacidade satisfatória, além das limitadas alternativas de transporte. O ILOS - Instituto de Logística e Supply Chain - apresentou dados apurados em 2014 que demonstram esta concentração do transporte de cargas no Brasil. Estes dados apontam que o modal rodoviário, no qual é movimentado cerca de 2/3 do que é transportado no país, está no topo da lista – seguido, respectivamente, pelos modais: ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo (ILOS, 2014).

A matriz de transporte de carga no Brasil é marcada pela predominância do modal rodoviário, que em abril de 2015 representava cerca de 61,10% do transporte de carga no país. O segundo modal mais utilizado é o ferroviário (20,70%), seguido por aquaviário (13,60%), dutoviário (4,20%) e por fim, o aéreo (0,40%) (CNT,

2015a). A distribuição por modais estão expressas em %TKU (toneladas transportadas por quilômetro útil) e compõem o cenário apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 Distribuição do transporte de cargas por modal no Brasil

Brasil 2015	
Modal	% TKU
Rodoviário	61,10%
Ferrovário	20,70%
Aquaviário	13,60%
Dutoviário	4,20%
Aéreo	0,40%

Fonte: CNT (2015 a).

Estimativas da Associação Nacional de Transportadores Ferroviários (ANTF, 2014), realizadas em 2015 previam um total de 485 milhões de toneladas transportadas. Desta forma, o ano 2016 apresentaria um incremento de 5,1%, ou seja, 510 milhões de toneladas transportadas, o que mostra o potencial que pode ser transportado pelas ferrovias. Para a ANTF, uma das razões que explicam o crescimento da carga é o preço do frete ferroviário, em torno de 15% a 20% abaixo do rodoviário em muitos trechos. Mas, em períodos de economia aquecida, a tendência dos empresários é privilegiar o menor tempo de entrega das mercadorias e optar pelos caminhões.

O aumento da carga movimentada na malha ferroviária gera certas dúvidas, quanto maior a quantidade transportada, maior a solicitação da via permanente e menor o tempo disponível para sua manutenção. Em consequência, aumenta a importância do gerenciamento da manutenção da via permanente. A implantação de redes integradas estruturadas pelo transporte sobre trilhos é a única solução possível para superar os problemas de capacidade e eficiência no transporte de cargas.

No Brasil, existem programas úteis para o dimensionamento normal de uma via férrea, como o software FERROVIA 1.0 (RODRIGUES, 1994), mas que não analisam situações críticas específicas de uma via degradada, como por exemplo de dormentes laqueados. Por outro lado, o programa LISA 8.0.0 é um programa de

elementos finitos que representa muito bem as condições de suportes, permitindo assim realizar estudos específicos como a análise das tensões de tração no patim do trilho em presença de dormentes laqueados<sup>1</sup>.

É importante conhecer e aprender sobre os diferentes programas e avanços tecnológicos que podem ajudar no correto desenvolvimento desta área. Dentro da área ferroviária são importantes todos os aspectos, desde a concepção do projeto, passando pela parte geométrica, subestrutura, superestrutura, construção, sinalização, manutenção e segurança na operação, para o qual devem ser seguidas diferentes atividades que levam ao bom desempenho do projeto (ROSETO, S.J.M *et al*, 2016).

Neste trabalho desenvolveu-se um estudo inovador de determinações das tensões no patim do trilho empregando o programa computacional LISA.

## **1.2 Objetivo**

Esta dissertação tem por objetivo principal determinar a tensão no patim do trilho em presença de um ou mais dormentes laqueados, quando a via está carregada por eixo ferroviário. O estudo busca propiciar um melhor entendimento do comportamento do trilho em presença de um ou mais dormentes laqueados por meio de ensaios de laboratório, e posteriormente fazer a simulação no software LISA e a sua calibração.

## **1.3 Justificativa**

Grande parte das ferrovias brasileiras foram construídas no século XVIII e ainda se mantêm em operação. Naquela época não se empregava a camada do sublastro e, portanto, estas vias apresentam a camada do lastro diretamente sobre o

---

<sup>1</sup> Via laqueada - aquela que aparentando nivelamento correto, desnivela-se com a passagens do trem, em consequência de falso apoio do dormente e volta em seguida à posição anterior. Glossário de termos ferroviários DNIT, 2016.

subleito natural. A interpenetração das partículas finas dos solos do subleito no inferior da camada do lastro é um problema muito comum neste tipo de via.

Em locais onde o lastro está contaminado existem problemas de drenagem superficial, e pode vir a ocorrer o dormente laqueado, portanto o trilho está sujeito à alta concentração de esforços, devido ao amplo movimento vertical a que está submetido, sem o adequado suporte de contato do lastro. Por isso, deve-se fazer as determinações dos parâmetros de deformação, as quais geralmente são feitas através da retroanálise das linhas de influência de deformação, permitindo modelar e prever o comportamento da via permanente.

O estudo do estado de tensão dos trilhos durante sua exposição ao tráfego sempre precisa ser cuidadoso, pois a sua ruptura causa acidentes graves. Para trens que operam em velocidade até 160km/h os modelos clássicos de determinação das tensões de vigas sobre apoio elástico (BOEF), como os propostos por Zimmermann e Talbot, ainda são válidos e utilizados (ESVELD, 2001). A determinação das tensões por medição direta já foi realizada e apresentada em outro trabalho anterior, mas naquela oportunidade a determinação da tensão no patim exigiu que o veículo estivesse parado sobre o ponto de medição (PAIVA et al, 2013). Neste trabalho, procurou-se adaptar situações reais estudadas em trilhos em um modelo computacional semelhante aos modelos clássicos, com fundação elástica, utilizando o programa LISA 8.0.0 - principalmente para a determinação das tensões ocorrentes no patim do trilho carregado. A partir da calibração do modelo computacional com as medições consideradas, busca-se considerar as tensões ocorrentes no patim do trilho na situação de um ou mais dormentes laqueados.

#### **1.4 Metodologia**

Esta pesquisa pretende dar continuidade ao trabalho anterior, de Paiva, Aguiar e Silva (2007), titulado *Evaluation of Track/Ballast Behavior Under Increased Axle Load: Measuring Deflections on Track*, onde foram analisados os efeitos que causam o aumento de uma carga de 20t/eixo até 30t/eixo sobre a infraestrutura da via permanente. Nesse trabalho se utilizou um dispositivo inovador (LLD - *Laser Dynamic*

*Deflectometer*), que usa emissão do laser para medir os deslocamentos verticais dos dormentes e do lastro (resposta da faixa na bacia de deflexão), sobre cargas reais em velocidades de até 50 km/h. Essa nova ferramenta permitiu aos pesquisadores avaliar a superestrutura e subestrutura da via com a carga por eixo de 20 e 30 toneladas.

Agora, nesta dissertação, as tensões nos trilhos foram avaliadas através de ensaio de laboratório em que foram submetidas amostras do trilho TR57 a ensaios repetidos de cargas verticais no meio de vão biapoiado. Para a simulação deste ensaio no software LISA, foram utilizados dados coletados em laboratório, e através do ensaio de flexão, foi analisada a deflexão vertical, deformação horizontal e tensão no patim do trilho, com a finalidade de calibrar um modelo computacional que permitisse obter o comportamento do trilho a flexão.

Para atingir o objetivo, algumas etapas de pesquisa foram realizadas:

- ✓ Desenho em Autocad do trilho TR57.
- ✓ Estudar o Software LISA.
- ✓ Análise experimental para investigar o comportamento tensão-deformação do trilho, sobre diferentes ciclos de carregamento e níveis de tensão (ensaios de carga no laboratório).

## **1.5 Organização do Trabalho**

O presente texto encontra-se estruturado em cinco capítulos.

Este primeiro é a INTRODUÇÃO do trabalho, onde são estabelecidas as considerações iniciais, os objetivos, a justificativa, metodologia e a organização do trabalho.

O segundo capítulo aborda a REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, abrangendo definições desde via férrea, seus componentes e estrutura ferroviária, além da via férrea carregada, que aborda detalhes específicos do trilho e seu carregamento, solicitações da via férrea, deslocamento vertical e a análise estrutural, o estudo de análise de fadiga do trilho, assim como também os métodos da análise da via férrea,

dormente laqueado, e o software LISA; terminando com as considerações finais desse capítulo.

O capítulo três, PROPOSTA DO EXPERIMENTO, relata a sequência de procedimentos adotados para a realização dos ensaios do estudo a ser desenvolvido, desde os valores a serem adotados a partir da bacia de deformação disponível da pesquisa anterior, como tipo do trilho; dormente de madeira; tipo de fixação; cargas adotadas, passando pelo detalhes dos ensaios desta dissertação realizados no laboratório, estabelecendo carga aplicada; tipo de trilho a ser avaliado; números de ciclos a ser submetido, estabelecendo início, local e instrumentação utilizada no ensaio.

Em sequência, o capítulo quatro, refere-se a APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS, correspondente às simulações realizadas no laboratório e o software LISA.

A seguir, o capítulo cinco apresenta a CONCLUSÃO e SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS que poderão complementar ou expandir os resultados aqui obtidos.

Estão inclusas as REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS que fizeram possível esta pesquisa.

No final desta dissertação estão os ANEXOS, onde se encontram os passos que foram seguidos na utilização do software LISA e o Diagrama de Goodman, além de artigos complementares a este trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Via Férrea - Definição.

O transporte ferroviário desempenha um papel estratégico para o desenvolvimento econômico do país, especialmente por participar do fluxo de exportação de diversos produtos. Uma via férrea tem como função base prover fundação para a movimentação de um trem, garantindo-lhe as condições mínimas para que esta se efetue com segurança, economia e conforto. O desempenho das vias férreas resulta de uma complexa interação dos diversos elementos e camadas do sistema, em resposta às solicitações impostas pelo trem. O objetivo da estrutura ferroviária é fornecer estabilidade, segurança e uma base eficiente para que os trens funcionem de uma forma eficaz durante todo o trajeto. Para atingir estes objetivos, a geometria da via deve ser mantida, e cada componente da estrutura deve desempenhar suas funções de forma satisfatória, sob diferentes condições ambientais e operacionais (INDRARATNA; SALIM e RUJIKIATKAMJORN, 2011).

Segundo Esveld (2001), são dois os tipos de estruturas ferroviárias comumente utilizadas: as vias convencionais que utilizam lastro como suporte flexível e as vias apoiadas sobre placas de concreto Figura 1 (a) e (b). O modelo ferroviário convencional é amplamente adotado, embora ultimamente vias não apoiadas sobre lastro vem sendo utilizadas em alguns países da Europa, dependendo das características de carga de deformação do subleito.

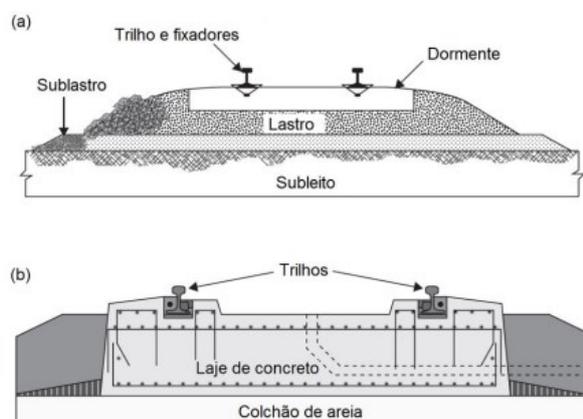


Figura 1 (a) Seção típica de via férrea convencional e (b) Seção de via sobre laje de concreto.

Fonte : INDRARATNA; SALIM e RUJIKIATKAMJORN (2011).

## 2.2 Superestrutura e Subestrutura Ferroviária.

O sistema ferroviário nasce da interação entre a Via Permanente (infra e superestrutura) e Material Rodante (locomotivas e vagões), necessários ao transporte. A via férrea é composta pela subestrutura, plataforma e o maciço subjacente, e pela superestrutura viária, a qual será tratada a seguir. Segundo Selig e Waters (1994) e Indraratna e Salim (2005), a superestrutura foi o item que recebeu maior atenção no passado sendo exaustivamente analisada e estudada. Diversas pesquisas foram fomentadas na Europa e nos Estados Unidos para o desenvolvimento de trilhos, dormentes e fixações (ESVELD, 2001). Basicamente a superestrutura da via férrea é constituída pelos trilhos, dormentes, fixações, lastro e sublastro, enquanto que a subestrutura da via é composta pela plataforma e pelo subleito. Nas vias férreas antigas não existiam as camadas de sublastro e nem a plataforma tratada, estando o lastro diretamente disposto sobre o subleito natural.

A superestrutura ferroviária é um conjunto de quatro elementos heterogêneos que se interagem para suprir as condições adequadas de suporte, pista de rolamento e guia para o material rodante que por ela trafega. Os elementos são: trilhos, dormentes, fixação e lastro. Além destes quatro elementos, alguns autores (ESVELD, 2001; PAIVA, 2016) incluem o sublastro como o quinto componente da superestrutura.

Os trilhos, segundo Porto (2004), são elementos da via permanente que guiam o veículo no trajeto e dão sustentação ao mesmo. Funcionam como viga contínua e transferem as solicitações das rodas para os dormentes. Assim, os trilhos devem ter rigidez suficiente para distribuir as cargas de rodas sobre os dormentes e limitar a deflexão entre os mesmos. Os trilhos de uma via férrea são entre todos os componentes o mais importante da superestrutura. É tecnicamente considerado o principal elemento de suporte e guia dos veículos ferroviários, e economicamente detém o maior custo. Para realizar suas funções, os trilhos devem ser de aço e ter dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão.

Segundo definição de Schramm (1977), a bitola é a distância entre os dois trilhos da linha, medida de 14 a 16 mm abaixo da superfície de rolamento do boleto (Figura 2).

Varia conforme o país, sendo que, no Brasil, são adotadas as seguintes bitolas: 1,00 m; 1,435m, 1,60m e bitolas mistas, sendo preponderante a bitola métrica ou estreita, com 1,00 m. Para Lima (1998), a bitola da via é o parâmetro de maior importância na definição das características geométricas da via, exatamente por definir a base do rolamento dos veículos da uma ferrovia.

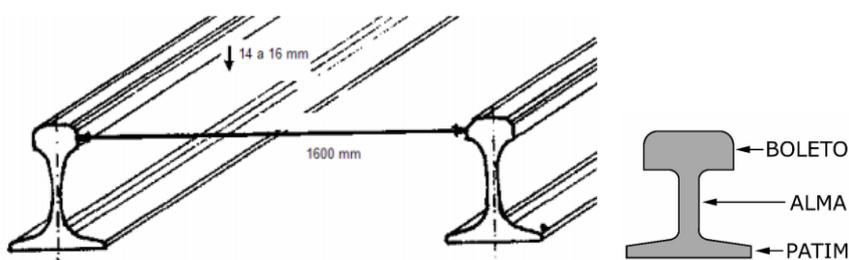


Figura 2 Bitola larga.  
Fonte: RODRIGUES (2001).

Por sua vez, o dormente é o elemento da superestrutura ferroviária que tem por função receber e transmitir ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, servindo de suporte dos trilhos, permitindo a sua fixação e mantendo invariável a distância entre eles (bitola da linha). As principais funções dos dormentes são a distribuição das cargas de roda transferidas pelos trilhos e sistema de fixação para a camada de lastro, e a restrição do movimento do trilho pela ancoragem da superestrutura no lastro. Já o sistema de fixação mantém os trilhos atrelados aos dormentes mantendo a bitola da via. Oferecem resistência ao deslocamento longitudinal e horizontal do trilho, provocado por variação de temperatura ou frenagem dos veículos. Elas devem permitir a substituição do trilho sem afrouxar seus embutimentos nos dormentes (ESVELD, 2001).

O lastro é um material granular densificado e colocado sob os dormentes, envolvendo, até certa parte, os dormentes. Dentre suas funções mais importantes destacam-se: resistir aos esforços verticais, laterais e longitudinais aplicados pelo trem aos trilhos, fixações, e dormentes, além de possuir resiliência adequada, que permita a absorção da carga procedente do contato roda-trilho. Os vazios existentes no lastro permitem drenagem necessária da água na via (SELIG e WATERS, 1994).

O sublastro é o elemento que está ligado à subestrutura da via. Segundo Paiva (1999), é empregado para evitar a penetração do lastro no solo e a

contaminação do lastro por material fino decorrente do leito. A maior impermeabilidade do sublastro, em relação ao solo, melhora a drenagem, evitando a erosão e a penetração da água no solo. Também proporciona relativa elasticidade ao apoio do lastro, evitando rigidez excessiva da via permanente (CARVALHO, 2013). Paiva, Aguiar e Silva (2007) também estudaram o efeito do sublastro em relação à deformação da via em linhas do trem metropolitano de São Paulo. Nesse trabalho também observaram o bom desempenho da via frente à deformação pela presença dessa camada e o efeito de proteção que ela exerce em relação ao lastro contra à subida de finos da plataforma.

O subleito é a base para a estrutura da via. Ele pode ser formado apenas por solo natural compactado, quando de boa qualidade, caso contrário é aconselhável seu tratamento ou adoção de camada tratada com material de melhor qualidade (PROFILLIDIS, 2006). A função principal do subleito é proporcionar uma fundação estável para a estrutura da via. Segundo pesquisas de Selig e Waters (1994), o tráfego de trens de carga induzem tensões que podem se estender a mais de cinco metros de profundidade da base do dormente, ou seja, extrapolando-se as extensões das camadas de lastro e sublastro. Por isso, o subleito possui uma grande importância e influência no desempenho e manutenção da via.

### **2.3 Carregamento da via férrea**

As cargas dos veículos solicitantes originadas pelo peso total dos veículos são conhecidas são estáticas quando estes estão parados sobre a via. Com o movimento deles, essas cargas passam a ser dinâmicas, e a diferença entre as cargas estática e a dinâmica é significativa e não deve ser desprezada. Os trilhos cumprem duas funções principais: constituem a superfície de rolamento pelo qual trafegam os veículos ferroviários, servindo como guia e transmitem os esforços decorrentes do movimento do veículo (carga dos eixos, esforços de aceleração e frenagem e esforços devido à variação de temperatura) para a subestrutura viária (TOGNO, 1973).

Os trilhos são os componentes ferroviários mais suscetíveis à falha, devido a vários fatores, entre eles: alta pressão de contato das rodas em regime de

carregamento cíclico, e existência de tensões residuais, causadas pela deformação plástica superficial, pelo processo de soldagem, pela variação térmica na linha e pela tensão de projeto, necessária para manter os trilhos alinhados (BRINA, 1979; SILVA, 1995).

**Forças atuantes:** o conjunto de elementos que constituem a via permanente possibilita a transferência das cargas verticais provenientes da passagem dos veículos para a fundação (Figura 3). Cada um dos elementos absorve parte das tensões que nele chegam, transmitindo tensões menores para a camada seguinte (ESVELD, 2001).

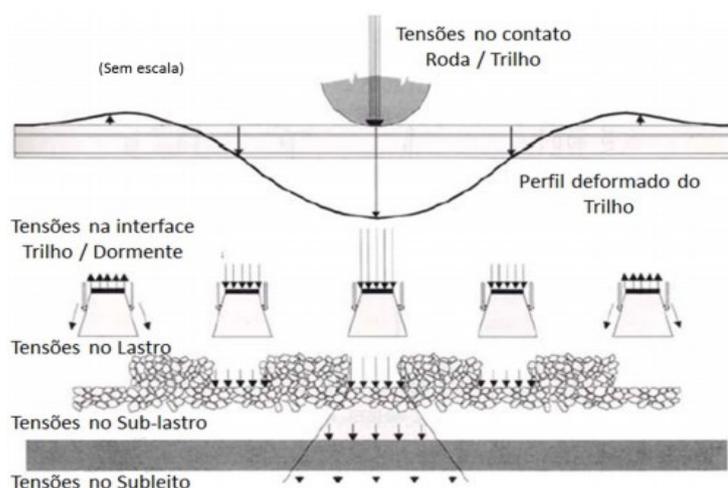


Figura 3 Representação da Distribuição de tensões verticais em vias permanentes.  
Fonte: SELIG e WATERS, 1994; KLINCEVICIUS (2011)

Os requisitos para a capacidade de carga da estrutura e a qualidade da via permanente dependem, em grande parte, da carga vertical por eixo, quantidade de passagens de cargas por eixo e velocidade de circulação. A tonelagem acumulada determina a deterioração do sistema e indica quando os ciclos de manutenção e renovação são necessários (INDRARATNA; SALIM e RUJIKIATKAMJORN, 2011).

Para compreender as tensões que atuam na camada do lastro é necessário conhecer os esforços que atuam na via permanente e a maneira como ocorre a transmissão de tensões de um elemento para outro. Os esforços originados pela passagem de veículos podem ser classificados segundo sua direção de atuação: longitudinal, vertical e transversal (Figura 4).

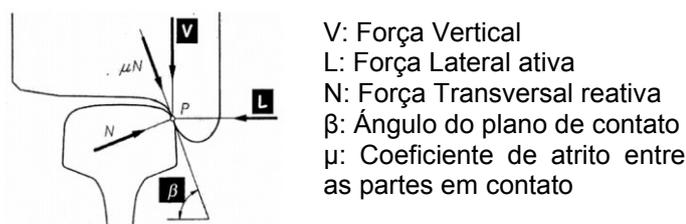


Figura 4 Representação dos esforços nos trilhos na iminência do descarrilamento- Desenho esquemático do contato roda x trilho.  
Fonte: NADAL (1896).

Forças nas direções vertical, lateral e longitudinal agem sobre a estrutura da via. Esveld (2001), fornece a ordem da grandeza dessas tensões em cada camada para uma carga de 200 kN por roda (Figura 5), típica de trens de passageiros europeus. Entre a roda e o trilho ocorrem as maiores tensões, da ordem de 30.000 N/cm<sup>2</sup>. Na interface placa de apoio e dormente, como a área de contato é maior, as tensões serão menores com valores de aproximadamente 120 N/cm<sup>2</sup>. Entre os dormentes e o lastro, a tensão cai para 30 N/cm<sup>2</sup>. E, finalmente, na fundação chegam tensões da ordem de 6 N/cm<sup>2</sup>.

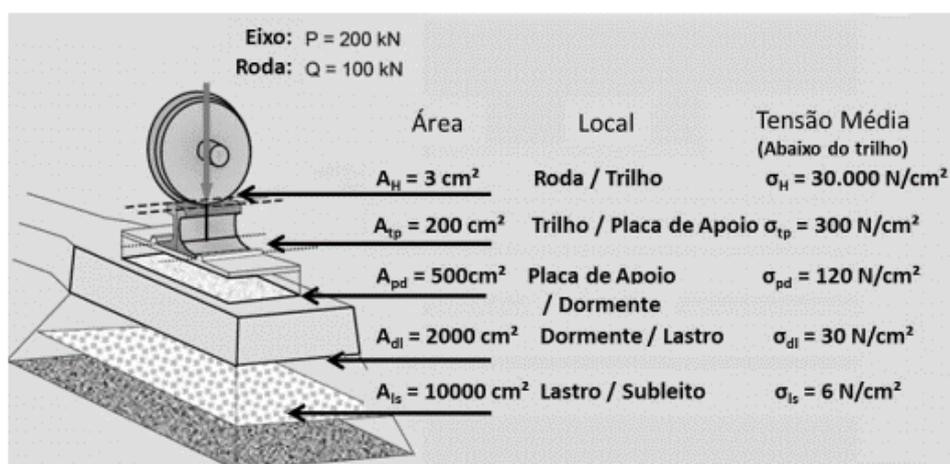


Figura 5 Ordem de grandeza das tensões médias em cada interface do conjunto da via férrea.  
Fonte: adaptado de ESVELD (2001).

Atualmente, no Brasil, os sistemas ferroviários têm operado com intensidades de tráfego e cargas por eixo crescentes, o que tem provocado uma rápida degradação das condições operacionais da via permanente, sendo influenciado pelas características físicas e mecânicas das camadas do lastro, sublastro e subleito. Estas características se alteram devido às condições de carregamento, das condições de drenagem existentes na via e fatores ligados à manutenção. A simulação dinâmica da

interação entre veículo e via ferroviária fornece estimativas realistas para os valores da força de contato, bem como outros parâmetros relevantes (deformação devida ao cisalhamento dos trilhos, deflexões de trilhos e dormentes). Entretanto, devido às condições precárias das ferrovias brasileiras que operam a baixas velocidades em comparação às principais ferrovias do mundo desenvolvido, a modelagem computacional da via férrea no Brasil é extremamente útil. (GUIMARÃES,1999).

O conjunto de elementos que constituem a via permanente possibilita a transferência das cargas provenientes da passagem dos veículos para a fundação. Cada um dos elementos absorve parte das tensões que nele chegam, transmitindo tensões menores para a camada seguinte. O comportamento dinâmico de via férrea lastreada é influenciado tanto pelas características da via como pelo tipo de solicitação (carga e frequência) a que está sujeita. Relativamente à solicitação, necessita-se distinguir a componente quase-estática, resultado da ação do peso do eixo, e a componente dinâmica devido à excitação paramétrica e a irregularidades da via e da roda.

A passagem repetida de tráfego ferroviário provoca deformações permanentes e gradualmente crescentes das camadas de lastro. O assentamento devido à passagem de cargas rolantes é composto por uma componente elástica, parcela recuperada após descarga e por uma componente residual que representa o assentamento permanente, acumulado ao longo do tempo de carregamento da via. O assentamento total da via é obtido através do assentamento das diferentes camadas que constituem a via: a camada de lastro, a camada de sublastro e a fundação. Estudos desenvolvidos por Selig e Waters (1994) mostram que a camada responsável por grande parte do assentamento total é a camada de lastro.

Na evolução do assentamento permanente da via, existem duas fases distintas: a primeira fase ocorre durante o período de compactação dos materiais e tem uma evolução elevada e rápida; a segunda fase do assentamento dá-se durante a exploração da via e tem uma evolução mais lenta. Uma vez que o assentamento da camada de lastro representa a parcela mais significativa do assentamento global da via, neste estudo, a previsão da evolução do assentamento permanente da via considera apenas a contribuição desta camada.

Nas ferrovias, segundo Rives, Pita e Puente (1977), o contato roda-trilho gera solicitações em ambos elementos. Esse contato converte-se em uma elipse quando a roda atua comprimindo o trilho com uma força igual à carga que suporta.

A roda possui um perfil tronco-cônico, que propicia o auto direcionamento do rodeiro (conjunto ou jogo de duas rodas presas a seu eixo), e um friso que limita os deslocamentos laterais máximos, tocando, em um único ponto, a face lateral do boleto do trilho. O contato duplo se dá quando o rodeiro se aproxima da extremidade da folga lateral e o friso encosta no flanco lateral do trilho, conforme Figura 6. No caso de contato em um único ponto, a carga  $Q$  e a força lateral  $Y$  atuam no mesmo ponto. No caso de dois pontos de contato, os pontos de aplicação das forças não coincidem (Figura 6) (ESVELD, 1989).

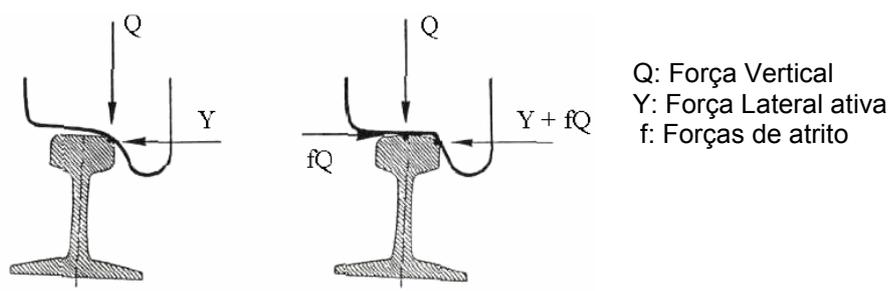


Figura 6 Contato de 1 ou 2 pontos entre o friso e a roda.  
Fonte: ESVELD (1989).

Para Barbosa (1995), a força vertical ( $Q$ ) resulta do peso do veículo que trafega sobre as irregularidades da via, ou seja, da interação veículo-via. Este valor é majorado por coeficientes dinâmicos. A inscrição do veículo em curva e seu próprio movimento produzem esforços laterais ( $Y$ ). A relação entre estes esforços ( $Y/Q$ ) determina a tendência para a roda descarrilar. Este, é portanto, um indicador de segurança da via e do tráfego.

A via convencional deforma vertical e lateralmente sobre cargas cíclicas do tráfego, causando desvio da geometria de projeto. Embora estes desvios sejam aparentemente pequenos, eles causam irregularidades que aumentam a deterioração da via e elevam a carga dinâmica que, por sua vez, prejudica ainda mais o nivelamento

e a qualidade do sistema. As determinações dos parâmetros de deformação são geralmente feitas através da retroanálise das linhas de influência de deformação, comumente denominada bacia de deflexão dos trilhos calculada conforme o método de Zimmermann e seus aperfeiçoamentos, o que permite modelar e prever-se o comportamento da via férrea (RIVES; PITA E PUENTE 1977).

Para suportar grandes esforços de flexão, um trilho ferroviário possui uma seção transversal no formato de um “I” (Figura 7). O boleto, (B) situado na parte superior do maciço, apresenta uma grande concentração de massa por ser uma região que sofre desgaste contínuo por atrito com a roda. O patim ou base (P) é largo, de forma a oferecer um bom apoio e maximizar seu momento de inércia. Trilhos são fabricados para apresentar elevada resistência mecânica e à abrasão.

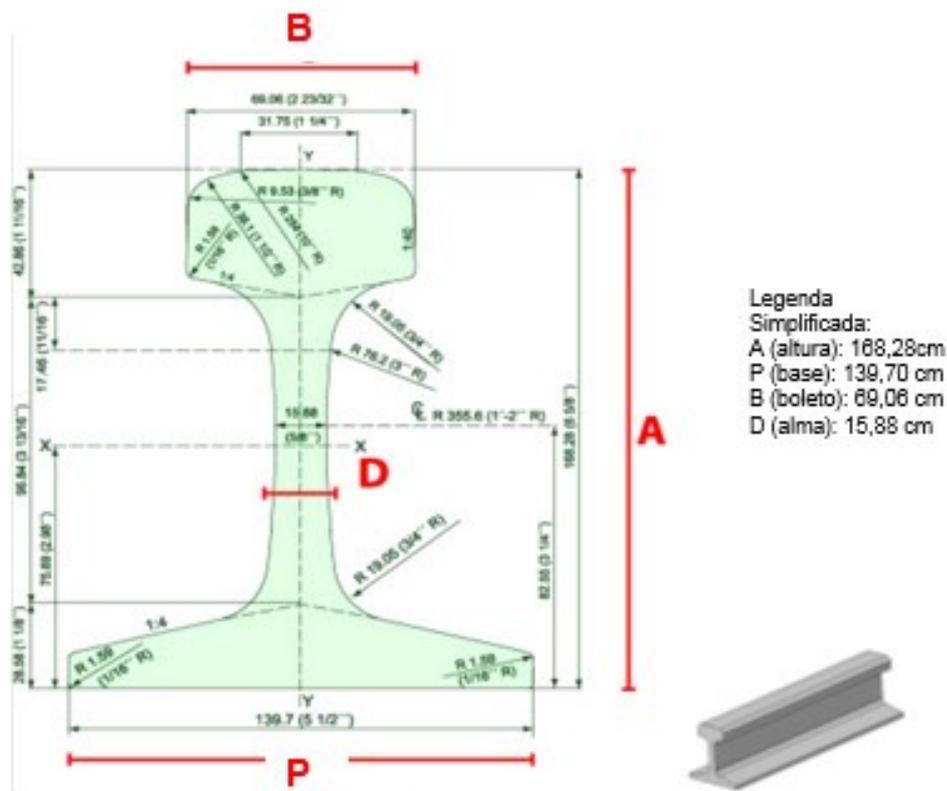


Figura 7 Seção Transversal trilho TR57.  
Fonte: Adaptado DNIT (2015)

Indraratna et al. (2010a) monitoraram um trecho de 60 m de uma ferrovia em Bulli, na Austrália, com o objetivo de entender a dissipação de tensões ao longo das camadas da subestrutura, na qual o material de lastro era composto por agregados britados de basalto e lastro reciclado. A espessura média de lastro era de

300 mm e a do reforço de subleito era de 150 mm. Detalhes da instrumentação utilizada e estrutura da via estão mostrados na Figura 8, como células de cargas para medidas verticais e horizontais.

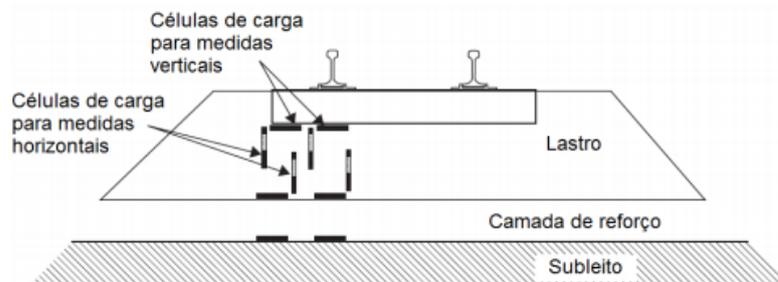


Figura 8 Representação esquemática da distribuição das células de carga na via.  
Fonte: INDRARATNA et al., 2010a; INDRARATNA; THAKUR e VINOD (2010b).

As leituras foram realizadas em intervalos programados que totalizaram um período de 17 meses, perfazendo um total de 90 milhões de toneladas brutas transportadas. As medidas foram realizadas na direção dos eixos dos trilhos e na borda de dormentes, para diferentes períodos. Para o mesmo estudo, medições das tensões verticais, sob o eixo do trilho, ao longo do tempo, para um trem de carga de 100t, as tensões cíclicas possuem valores em torno de 230 kPa, porém um pico de 415 kPa foi medido. Tal diferença foi descoberta posteriormente como um problema em uma das rodas do trem, exemplificando, desta forma, grandes impactos gerados por imperfeições no contato roda-trilho. Nesta mesma pesquisa, também relataram medições para estas tensões horizontais, evidenciando a sua variação de acordo com o carregamento. Para um trem de passageiros (20.5 t/eixo), a tensão horizontal é apenas a metade quando comparada com a passagem de um trem de carga (25 t/eixo). As medições foram realizadas no eixo do trilho, em períodos próximos, garantindo que a via estava nas mesmas condições quando a passagem dos dois tipos de trem ocorreu. Os resultados mostraram que a deformação e a degradação permanente do lastro aumentaram com a frequência da carga e número de ciclos. Muito da quebra das partículas ocorreu durante o ciclo inicial; principalmente devido à tensão de tração desenvolvida durante a carga cíclica e está localizada principalmente na direção do movimento de partículas de lastro. Também, verificou-se que o lastro reciclado pode ser reutilizado eficazmente se reforçado com um geocomposto. Constatou-se também que geocomposto pode efetivamente reduzir tensões verticais e laterais, trazendo uma melhor estabilidade da pista, reduzindo custos de manutenção da mesma. (INDRARATNA et al., 2010a, 2010b).

**Transmissão de tensões:** segundo Profillidis (2006), existe uma variedade de métodos que caracterizam a transmissão dos esforços ao longo da estrutura ferroviária. Desde métodos antigos, baseados na análise de um sistema de multicamadas com comportamento elástico, até métodos mais modernos que adotam análise por elementos finitos, os quais permitem considerar no cálculo a geometria da estrutura e a relação tensão deformação dos materiais. Porém, problemas relativos às condições de contorno, principalmente na interface entre materiais diferentes (trilho-dormente e dormente-lastro) são encontrados.

**Esforços nas camadas:** além do contato entre dormente e lastro se alterar com o tempo, a maneira como ocorre a transmissão de tensões entre estes elementos não é completamente compreendida. Shenton (1975) analisou em campo a distribuição da pressão de contato entre o dormente e o lastro. Este estudo foi realizado em camadas de lastro com agregados entre 25 e 50 mm e dormentes com largura de 250 mm. A pesquisa mostrou que o número de agregados envolvidos diretamente no suporte do dormente era relativamente reduzido. Ele estimou a existência de 100 até 200 pontos de contato entre a interface dormente-lastro, evidenciando assim a dificuldade para a correta estimativa de tensão entre estes materiais.

A Figura 9 mostra as medições realizadas por Shenton nas ferrovias inglesas. A distribuição da pressão de contato entre o dormente de concreto e o lastro é muito instável e varia de teste para teste. No entanto, estas medidas de campo fornecem uma indicação da pressão máxima exercida pelo dormente no lastro, sob uma carga por eixo de 200 kN (SHENTON, 1975).

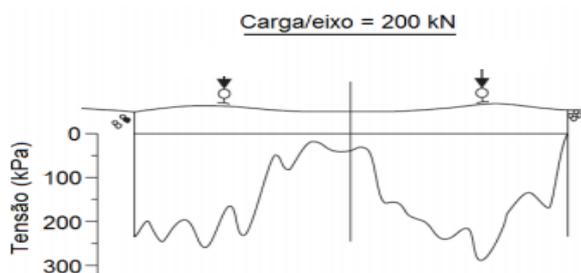


Figura 9 Medições das tensões de contato entre dormente de concreto e o lastro.  
Fonte: SHENTON (1975).

Jeffs e Tew (1991) exemplificam um modelo da distribuição de tensões do dormente ao lastro. Segundo estes autores, as tensões se concentram em  $2/3$  do dormente, conforme representado na Figura 10, o que se aproxima muito das medidas realizadas por Shenton (1975). Isto se aplica só para dormentes de madeira e de aço.

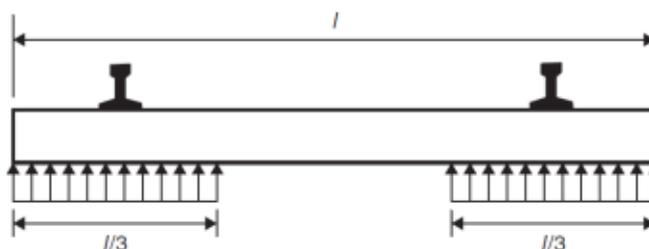


Figura 10 Simplificação da distribuição de tensões entre o dormente e o lastro.  
Fonte: JEFFS;TEW (1991).

## 2.4 Fadiga

No âmbito da engenharia, o termo fadiga é amplamente utilizado para se referir a dano ou falha de materiais sobre carregamento cíclico (SURESH,1998). Os primeiros ensaios envolvendo a falha de um metal através da aplicação de esforços cíclicos foram feitos por um funcionário alemão das minas de Clausthal, na Alemanha, chamado W. A. J. Albert, por volta de 1828. De acordo com Shutz (1996), Albert estava tentando estudar as correntes dos transportadores da mina que quebravam com frequência. Assim, construiu uma máquina de ensaio para o estudo da vida em fadiga dos componentes da corrente. Mas o termo “fadiga” foi utilizado pela primeira vez, mais de dez anos depois de Albert, por J. V. Poncelet, em 1839, na França. Segundo a norma ASTM (2012), a fadiga é um processo de alteração permanente, progressivo e localizado que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões e deformações num ponto ou em vários pontos e que pode culminar em trincas ou em fratura completa do componente após um número suficiente de ciclos de solicitações.

As tensões no interior do trilho, decorrentes do contato sob carga vertical, são tensões de flexão e tensões adicionais de contato. Segundo Griffin (1992), as cargas de tráfego atingem elevados valores, de onde resultará o escoamento do material que se deforma plasticamente na camada superficial do boleto e a região logo

abaixo permanece no regime elástico. Essa região elástica atua como uma mola sobre a superfície plastificada tentando fazer a camada superior retornar à sua forma inicial gerando tensões compressivas na superfície. Entretanto, como o equilíbrio deve ser mantido, existirão tensões residuais trativas no restante do boleto. Ramakrishnan e Lokvik (1992) afirmam que o conhecimento da relação entre o número de ciclos para ruptura e tensões aplicadas é essencial.

Frequentemente se descobre que membros de aço falharam sobre a ação de tensões repetidas ou flutuantes, todavia a análise mais cuidadosa revela que as tensões reais máximas estavam bem abaixo da resistência máxima do Material, e muito frequentemente até abaixo da resistência do escoamento. A característica mais distinguível dessas falhas é que as tensões foram repetidas um número muito grande de vezes. Daí a falha ser chamada de falha por fadiga (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

#### 2.4.1 Fatores modificadores do limite de resistência

Não é pertinente esperar que o limite de resistência à fadiga ( $S_e$ ) de um elemento mecânico ou estrutural se iguale aos valores obtidos no laboratório. Há uma grande quantidade de fatores a serem considerados, mesmo para cargas bem simples. Marin (1962), identificou fatores que quantificaram os efeitos da condição de superfície, do tamanho, do carregamento, da temperatura e de itens variados. A questão de ajustar o limite da resistência à fadiga por correções subtrativas ou multiplicativas foi resolvida por uma análise estatística extensiva de um aço 4340 (forno elétrico, qualidade aeronáutica), na qual um coeficiente de correlação de 0,85 foi encontrado para uma forma multiplicativa e 0,40 para a forma aditiva (BUDYNAS E NISBETT, 2011). A equação 1 de Marin é assim escrita:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_e' \quad (1)$$

Onde:

$k_a$ : fator de modificação de condição de superfície

$k_b$ : fator de modificação de tamanho

$k_c$ : fator de modificação de carga

$k_d$ : fator de modificação de temperatura

ke: fator de confiabilidade

kf: fator de modificação por efeitos variados

S'e: limite de resistência à fadiga de corpo de prova do teste

Se: limite de resistência à fadiga no local crítico de uma peça mecânica na geometria e condição de uso.

Quando ensaios de fadiga de peças não estão disponíveis, são feitas estimativas aplicando-se os fatores de Marin. A continuação explica-se de uma forma resumida como se obtém cada uns destes valores:

### **Fator de Superfície ka**

O fator de modificação de superfície depende da qualidade do acabamento da superfície da peça verdadeira e da resistência à tração da peça, como se mostra na equação 2:

$$ka = aSut^b \quad (2)$$

Onde: Sut: resistência de tração do aço;

a e b são encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros para o fator de modificação de superfície de Marin

<b>Acabamento Superficial</b>	<b>Fator a (Sut Mpa)</b>	<b>Expoente b</b>
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-9,995

Fonte: BUDYNAS E NISBETT (2011).

### **Fator de Tamanho kb**

Os resultados para flexão e torção podem ser expressos como a equação

3:

$$kb = \begin{cases} \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51\text{mm} \\ 1,5d^{-0,157} & 51 < d < 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

Carregamento axial não há efeito de tamanho, então  $kb = 1$

### **Fator de Carregamento kc**

Apresenta-se valores médios do fator de carregamento:

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{Flexão} \\ 0,85 & \text{Axial} \\ 0,59 & \text{Torção} \end{cases}$$

### Fator de Temperatura $k_d$

O efeito da temperatura de operação na resistência à tração de aço é mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 Efeito da Temperatura de operação na resistência à tração do aço

Temperatura, C°	$S_T/S_{RT}$
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

Fonte: BRANDES (1983).

$S_T$ : resistência à tração na temperatura de operação

$S_{RT}$ : resistência à tração na temperatura ambiente

### Fator de Confiabilidade $k_e$

O fator modificador de confiabilidade pode ser escrito como a equação 4:

$$k_e = 1 - 0,8z_a \quad (4)$$

Tabela 4 Fatores de confiabilidade  $K_e$  correspondentes a 8% de desvio padrão do limite de endurance.

Confiabilidade %	Variante de Transformação $z_a$	Fator de confiabilidade $k_e$
50	0	1
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

Fonte: BUDYNAS E NISBETT (2011).

### **Fator de Efeitos Diversos $k_f$**

Ele é realmente proposto como um lembrete dos efeitos que devem ser levados em conta, como: corrosão, chapeamento eletrolítico, pulverização do metal, frequência cíclica, corrosão de piezo-ciclo fricção, porque os valores de  $k_f$  não estão sempre disponíveis.

### **Limite de Endurança $S'_e$**

Calcula-se com a seguinte equação 5:

$$S'_e = \begin{cases} 0,50S_{ut} & S_{ut} \leq 1400\text{Mpa} \\ 700 \text{ Mpa} & S_{ut} > 1400\text{Mpa} \end{cases} \quad (5)$$

Winkler (1867) desenvolveu equações diferenciais as quais possibilitaram um grande desenvolvimento da análise da via apoiada sobre uma base elástica. Engenheiros ferroviários americanos foram os primeiros a abordarem o modelo de viga apoiada sobre uma base elástica, principalmente por Talbot, tendo ainda hoje suas equações utilizadas na prática corrente americana. Eisenmann (1981) desenvolveu posteriormente, baseado no trabalho de Zimmermann, estudos que contemplam a análise da via sobre dormentes longitudinais que evoluiu para análise de dormentes discretos e é o método predominante na engenharia ferroviária europeia (GUIMARÃES, 1999).

Conforme Eisenmann (1981), para o dimensionamento do perfil do trilho, há uma certeza estatística de 99,7% para o fator de risco, ou seja,  $t = 3$ , é a mais recomendada visando à segurança de operação. Para o cálculo das tensões no lastro pode-se partir de um fator entre 68,3% e 99,7%, portanto,  $t$  entre 1 e 3, dependendo da qualidade requerida pela via. Avaliando as tensões no subleito, utilizar um fator de 68,3%,  $t = 1$  é adequado em vista da superposição de efeitos dos dormentes adjacentes. O fator de segurança  $t$ , depende do risco  $R_1$ , conforme a Tabela 5, baseada na distribuição normal de Gauss.

Tabela 5 Fator de segurança,  $t$

$R_1$ (%)	0	68,3	80	90	95	95,5	98	99,7
T	0	1	1,2	1,65	1,96	2	2,33	3

Fonte: EISENMANN (1981).

Cabe destacar que Eisenmann (1981) utilizou esta metodologia para avaliar a fadiga dos trilhos, verificando os comportamentos dos mesmos quando ficam submetidos a uma carga.

#### 2.4.2 Diagrama de Goodman Modificado

Em 1899, Goodman propôs a utilização da teoria dinâmica para determinar qual deveria ser a carga máxima admissível em uma estrutura. Esta teoria supõe que as cargas variantes são equivalentes às aplicadas repentinamente e, conseqüentemente, uma peça de material irá romper com cargas repetidas se a tensão dinâmica equivalente exceder a resistência estática do material (SILVA, 2009).

O diagrama de Goodman Modificado (Figura 11) tem a tensão média traçada ao longo da abscissa e todas as outras componentes de tensão traçadas na ordenada, com tração na direção positiva. Limite de Endurança, resistência à fadiga ou resistência de vida infinita, qualquer que se aplique, é traçada na ordenada acima e abaixo da origem. A linha de tensão média é uma linha de  $45^\circ$  da origem até a resistência à tração da peça. O diagrama de Goodman modificado consiste nas linhas construídas para o limite de resistência à fadiga  $S_e$  (ou a tensão mínima de escoamento  $S_y$ ) acima e abaixo da origem. Note que a resistência ao escoamento

também é traçada em ambos os eixos, porque o escoamento seria crítico de falha se  $\sigma_{\max}$  excedesse  $S_y$  (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

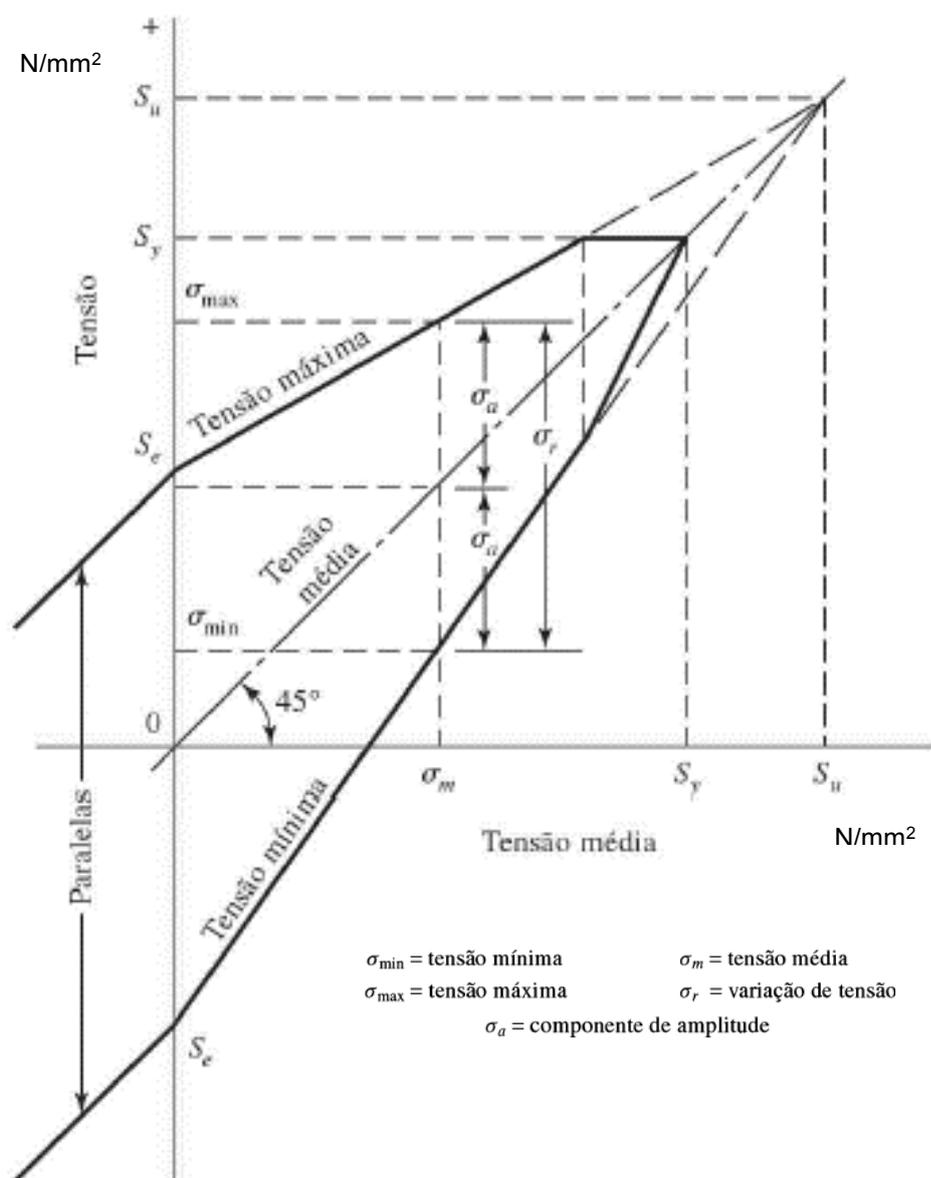


Figura 11 Diagrama de Goodman Modificado  
Fonte: BUDYNAS E NISBETT (2011).

## 2.5 Método da análise da via férrea

Atualmente, o chamado Modelo Mecanístico vem fazer a inter-relação dos componentes que constituem a via (trilhos, dormentes, fixação, lastro, sublastro e subleito), procurando representar de maneira mais próxima à realidade a forma como o sistema se comporta frente às tensões e deformações induzidas pelo efeito do carregamento por complexas interações (NETO, 2010).

Para projeto e dimensionamento dos elementos que compõem a superestrutura e a subestrutura das ferrovias, é muito importante o conhecimento do comportamento mecânico da via ferroviária frente às ações introduzidas pelos veículos em movimento. No dimensionamento de via férreas dois aspectos são relevantes: o dimensionamento do trilho, pois este deve resistir às cargas provenientes das rodas dos veículos ferroviários, e a capacidade da plataforma de resistir à pressão das camadas superiores sobre a sua superfície, de modo a minimizar as deformações permanentes (PAIVA, 2012).

Para um dimensionamento adequado dos trilhos é necessário o conhecimento da resposta mecânica da via férrea às ações do tráfego. O estudo teórico da deformação de uma via é de grande complexidade, pois envolve muitas variáveis, as quais fazem com que as ações do tráfego tenham um caráter aleatório e repetitivo, não permitindo uma representação matemática em forma simples. Algumas destas variáveis são a espessura, a disposição e natureza do lastro, a natureza da plataforma, as diferentes dimensões, a rigidez dos e a variação das características resistentes dos elementos envolvidos. A resposta da via à passagem dos veículos é uma flexão do trilho e dos dormentes, e uma compressão vertical no sistema lastro-plataforma (RIVES; PITA PUENTE, 1977).

As tensões transmitidas pelos trilhos aos dormentes são comumente estimadas por meio de soluções de uma viga com apoio contínuo elástico, baseadas nas análises de Winkler (1867). Segundo Rives; Pita e Puente (1977), o dimensionamento da via férrea levando-se em conta o comportamento mecânico da via em relação às cargas atuantes do tráfego possui a seguinte teoria:

### **Modelo da viga sobre apoio elástico**

Neste trabalho os cálculos estruturais foram feitos pelo método de *Beam on an elastic foundation* (BOEF), que considera a via como uma viga contínua sobre apoios elásticos. De acordo com Esveld (2001), o modelo de suporte proposto por Winkler (1867) considera duas vigas contínuas e paralelas (trilhos), que são fixadas em intervalos regulares sobre os dormentes os quais são suportados pelo lastro, que

por sua vez, apoia-se na plataforma que não deve ser deformável. Essa hipótese considera que cada ponto que sofre compressão é proporcional à compressão local, sendo isso descrito pela equação 7:

$$\sigma = cw \quad (7)$$

Onde:

$\sigma$  : tensão de compressão no local do apoio

$w$ : deslocamento local; e

$c$ : coeficiente de Winkler.

No método de Winkler, a hipótese foi a de que o trilho era uma viga contínua sobre apoios rígidos. Esta situação não tem aplicação prática, segundo Brina (1979), a não ser em algumas obras de concreto ou em pontes sem estrado contínuo. Posteriormente, Winkler propôs uma expressão considerando a proporcionalidade entre pressões e recalques que seria utilizada no método de Zimmermann. Assim, os métodos baseados na hipótese de apoio contínuo e uniforme do trilho, considerando os dormentes como apoios elásticos, são os que mais se aproximam da realidade, pois consideram a elasticidade do lastro e da plataforma.

Hetényi (1979), na teoria de vigas em fundação elástica, encontrou sua primeira aplicação no cálculo de tensões e deflexões na via ferroviária. O autor definiu que os dormentes são continuamente suportados pelo leito da ferrovia, enquanto os trilhos que se apoiam nos dormentes trabalham sobre suporte elástico pelo fato do espaçamento entre os dormentes ser considerado mínimo, fazendo com que esta estrutura apresente um desempenho similar ao de uma sapata corrida (apoio contínuo).

Ao se considerar a via férrea conforme o modelo de Zimmermann (1988) o trilho como uma viga continuamente apoiada sobre molas, representando os dormentes, o lastro e a plataforma com uma força concentrada isolada  $Q$  (Figura 12). Este método permite considerar a influência na deformação da via de qualquer esquema de cargas, utilizando o princípio da superposição, que representa as condições reais de tráfego, de modo satisfatório.

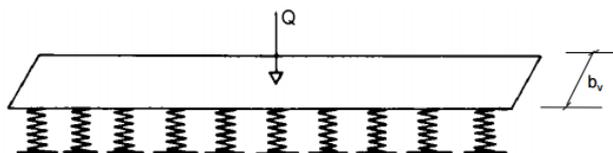


Figura 12 Modelo de ZIMMERMANN para via em viga com apoios contínuos.  
Fonte: RIVES; PITA e PUENTE (1977).

A Figura 13 ilustra os resultados obtidos por Zimmermann (1888). Pode-se observar que os valores máximos do deslocamento e do momento fletor ocorrem no ponto de aplicação da força  $Q$ .

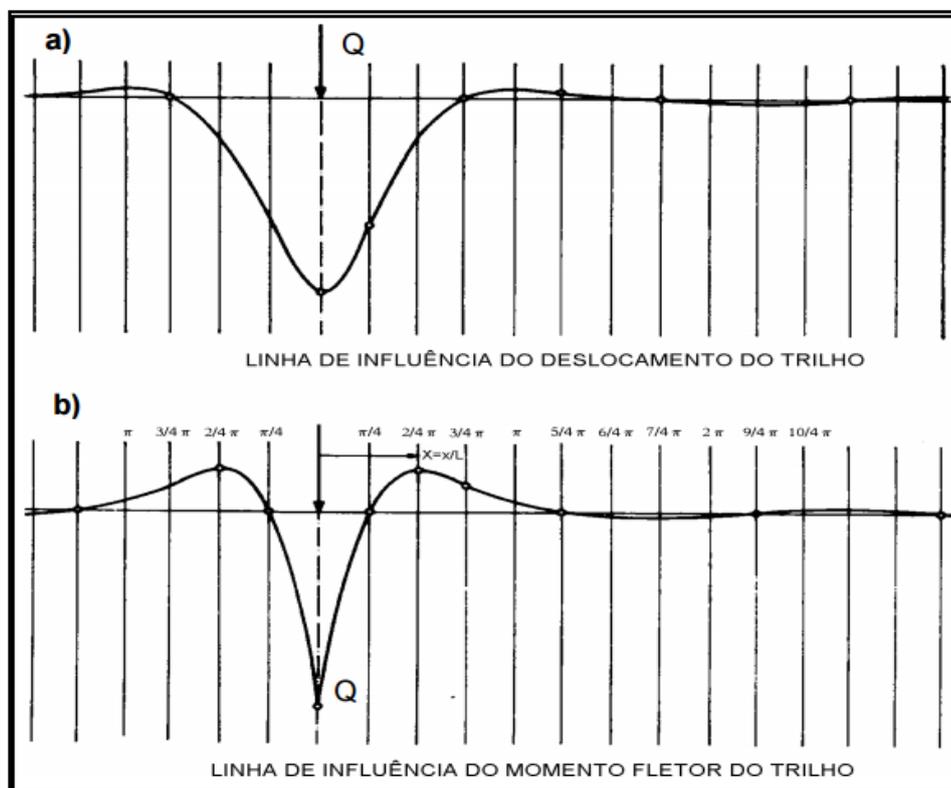


Figura 13 Resultados de ZIMMERMANN. a) linha de influência dos deslocamentos do trilho;  
b) linha de influência dos momentos fletores no trilho.  
Fonte: RIVES; PITA e PUENTE (1977).

Por outro lado, Clarke (1957) afirma que “nenhum cálculo de tensões ou deformações na via pode ser considerado como exatos. As variáveis envolvidas são numerosas, mas um tratamento analítico utilizável é de grande valor para a comparação com dados experimentais e para a determinação de prováveis tensões na via produzidas por qualquer novo projeto de veículo”. Assim, o projeto baseia-se sobre solicitações produzidas por forças estáticas concentradas e na direção vertical,

o que não corresponde à realidade, pois as solicitações são dinâmicas e tridimensionais.

SCHRAMM (1977) diz que existem ainda imprecisões e incertezas em relação às ações que atuam nos trilhos e as tensões nos trilhos variam entre largos limites. E na determinação das tensões na via permanente não se deve contar com o mesmo grau de precisão obtido com estruturas como pontes e outras. A incerteza quanto aos dados básicos implica, obviamente, também na incerteza em relação aos resultados. Portanto, na determinação das tensões, é ilusório procurar atingir maior grau de precisão através da sofisticação dos cálculos. Mais importante que a verdadeira grandeza das tensões é a comparação do comportamento de diferentes tipos de cargas, perfis de trilhos, espaçamento dos dormentes etc.

Até o presente momento, apenas as ações verticais são consideradas no projeto e dimensionamento dos elementos que compõem a via permanente. As ações transversais são consideradas para limitar a velocidade máxima dos veículos e as ações longitudinais para verificar a flambagem da via.

## **2.6 Dormente laqueado**

Dormente laqueado é aquele que não possui apoio, por tanto apresenta depressão no leito da linha onde a água penetra e fica confinada (MACÊDO, 2009). Quando as vias não possuem a camada de sublastro, expõe muitos trechos a drenagem deficiente trazendo como consequência a saturação da plataforma e a cravação do lastro, deixando de existir nessa interface (dormente-lastro) o pleno contato entre elas, trazendo o fenômeno conhecido como “GAP” e permitindo a livre movimentação durante seu carregamento pelo eixo ferroviário. As anomalias que apresentam o lastro com a existência de vazios (Figura 14), são em virtude de finos gerados pelo desgaste das partículas frente à solicitação do tráfego e pelo bombeamento dos mesmos (PAIVA, 2012).

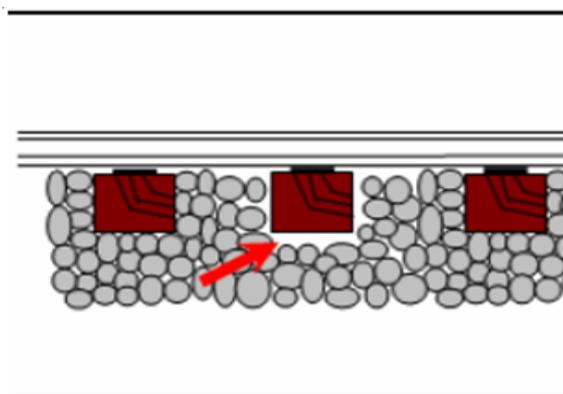


Figura 14 Vazios no lastro - Dormente Laqueado.  
Fonte: PAIVA (2012).

O dormente laqueado só se revela na passagem das cargas ferroviárias, devido ao livre deslocamento vertical cíclico. A via se apresenta laqueada, sujeita a tensões severas, principalmente quando a composição trafega em maior velocidade. Nesta situação a solicitação cíclica dos rodeiros pode provocar a fadiga dos trilhos.

Os trilhos trabalham em flexão em qualquer tipo de via férrea, então apresentam esforços de tração no seu patim e compressão no boleto. O que traz como situação mais severa o dormente suspenso, ou seja, não existe um apoio em contato pleno sobre ele, fenômeno conhecido como dormente laqueado (PAIVA, 2012).

A existência de dormentes laqueados provoca a vibração na via devido a golpe que o dormente dá no lastro após a sua decida em busca de apoio. Normalmente o lastro deve oferecer ao dormente um suporte elástico e contínuo, porém não ocorre a plena amortização dos golpes de martelamento gerados pelo tráfego, e devido a rodas não perfeitas as vibrações são transmitidas em maior intensidade ao lastro. Nestas situações os dormentes trabalham como um pilão aumentando a compactação do lastro provocando um rebaixo. Essa condição tem a tendência de aumentar conforme a solicitação do tráfego aumente.

Segundo Lima (1998) esta condição pode ocasionar: desnivelamento longitudinal e desnivelamento transversal, entre outras falhas na via permanente.

**Desnivelamento Longitudinal:** o nivelamento da via é responsável pelo perfeito rolamento dos trens pelos trilhos. O desnivelamento longitudinal é verificado

com a comparação das cotas do projeto da via com as cotas reais de cada trilho (Figura 15). É também responsável pelo movimento de galope dos veículos ferroviários (RODRIGUES,2001).

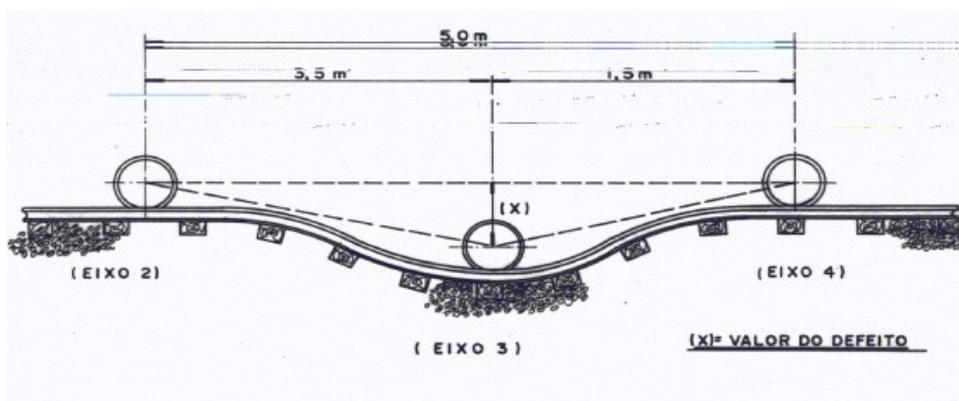


Figura 15 Desnivelamento Longitudinal da Via.  
Fonte: RODRIGUES (2001).

**Desnivelamento Transversal:** o desnivelamento transversal pode ocorrer na tangente ou na curva. Na tangente, o defeito é a diferença de nível entre os dois trilhos em relação a um nível horizontal e na curva, o desnivelamento ocorre em relação a superelevação do projeto original como pode ser visto na Figura 16 (DUVAL, 2001).

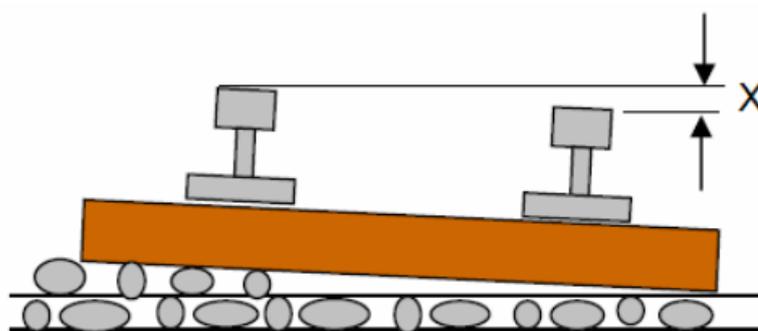


Figura 16 Desnivelamento Transversal em Tangente da Via.  
Fonte: DUVAL (2001).

## 2.7 Software LISA

Para analisar o comportamento da flexão de um trilho, foram feitos ensaios de laboratório, e assim, foi realizada a simulação no software LISA, que é um software canadense desenvolvido pela empresa SONNENHOF HOLDINGS, onde a versão atual é a 8.0.0. Considerado um dos mais completos programas de análise pelo

Método dos Elementos Finitos do mercado, o LISA 8.0.0 tem atualmente milhares de utilizadores a nível mundial. Muito deste sucesso deve-se a sua aplicabilidade direta a problemas de Engenharia Civil, especificamente na área de estruturas, acústica, térmica e hidráulica. No que diz respeito à análise estrutural, permite a simulação fácil e imediata de um grande número de componentes estruturais, características de materiais e ações estáticas e dinâmicas (LISA,2013).

LISA é um pacote de análises de elementos finitos para Windows, com um modelador integrado, solucionador de multi-fio e post-processador gráfico. A análise do modelo de vibração encontra as frequências naturais de uma estrutura e de seus modos de vibração. O programa também pode estudar o comportamento de estruturas sujeitas a cargas variáveis no tempo. Isto pode ser extremamente difícil de estimar sem simulação de computador. Portanto, trata-se de uma forma poderosa para prever o comportamento realista de muitas estruturas de engenharia e componentes (LISA,2013).

O software LISA tem uma versão gratuita, idêntica à paga, mas com um limite de 1.300 nós para simular. A licença é perpétua e nunca expira. O maior modelo que pode ser resolvido tipicamente tem cerca de 60000-100000 nós para análise estática, 40000 nós para vibração modal com elementos sólidos e mais de 100 mil nós para análise térmica.

O método dos elementos finitos tem três etapas principais:

- ✓ Construir o modelo diretamente no programa ao criar os nós para representar a forma do objeto (criar no LISA, ou importar a partir de um modelo CAD existente);
- ✓ Resolver o modelo (definir o tipo de análise que se requer, por exemplo, estática linear, modos vibracionais, dinâmica, entre outros);
- ✓ Mostrar os resultados (abrir o arquivo de resultados e selecionar os parâmetros que deseja exibir, por exemplo deslocamento, tensão principal, tensão secundaria, entre outros).

O software inicia-se com análise estática 3D, como análise padrão, mas pode alternar para outros tipos de análise, tais como análise térmica ou vibração modal, entre outros, descritos a seguir (LISA,2013).

**Análise estática:** a análise estática determina o estado de deformação estacionário e estresse em uma estrutura, cujo material tem uma relação linear de tensão-deformação.

**Resposta dinâmica:** quando uma estrutura é submetida a uma carga e tempo variáveis, as tensões são amplificadas por uma vibração induzida. A análise de resposta dinâmica leva essa vibração em conta para o cálculo das tensões e deformações.

**Resposta modal:** esta análise tem a mesma função que os tipos de análise de resposta dinâmica.

**Vibração modal:** as vibrações livres de uma estrutura ocorrem devido às suas próprias propriedades elásticas quando estas são perturbadas a partir de seu estado de equilíbrio. Esta análise encontra as frequências naturais de uma estrutura e as correspondentes deformações.

**Flambagem:** a análise de flambagem fornecida pelo Software LISA, só é capaz de descrever uma flambagem com uma separação e com uma relação simétrica constante de carga-deflexão.

**Análise térmica:** a análise térmica usa uma única temperatura para cada nó. O software calcula o fluxo de calor a partir da temperatura de campo. Todos os tipos de análise térmica são em 3D.

## 2.8 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um cenário geral da via férrea, contendo uma descrição de seus componentes básicos.

Nesta dissertação foi aplicado o modelo BOEF onde o trilho é um elemento contínuo suportado por molas elásticas e cuja constante de proporcionalidade pode ser relacionado com o coeficiente de Winkler. Este modelo teórico permite apenas a consideração de uma via continuamente apoiada. Para estudar a situação específica dos dormentes laqueados foi escolhido o programa LISA, para realizar uma simulação dinâmica e assim compreender a via como uma fundação elástica.

Nesta pesquisa se fez uso da análise Dinâmica (Resposta Dinâmica) do software LISA 8.0.0, para simular o comportamento de um trilho sobre um dormente laqueado, comparando os resultados com aqueles obtidos nos ensaios de laboratório ou de campo.

As metodologias de dimensionamento dos trilhos, relatadas anteriormente, sendo inúmeras as variáveis envolvidas, já foram definidas, assim como apresentados seus intervalos de valores normalizados. A metodologia mais empregada refere-se ao método de Zimmermann. Devido a isso, para projeto e dimensionamento dos elementos que compõem a superestrutura e a subestrutura das ferrovias, é muito importante o conhecimento do comportamento mecânico da via ferroviária frente às ações introduzidas pelos veículos em movimento; essas ações são aleatórias e dinâmicas, o que dificulta, até o presente momento, a adoção de modelos matemáticos exatos. A razão para a metodologia empírica ainda hoje em uso é devida ao carregamento dinâmico de alta frequência, difícil de medir na via. Tais medidas, quando feitas, podem ser invalidadas por mudanças nas condições de operação.

A importância de fazer o estudo do comportamento da via férrea em presença de um ou mais dormentes laqueados fez possível calibrar um modelo que permite obter o desempenho do trilho à flexão, já que até o presente momento, apenas as ações verticais são consideradas no projeto e dimensionamento dos elementos que compõem a via permanente, e, devido à simplificação de considerar somente a atuação dessa carga há em consequência uma flexão dos trilhos, dormentes e um estado de compressão do lastro e da plataforma que devem ser estudadas. O trilho é tecnicamente considerado o principal elemento de suporte e guia dos veículos ferroviários, e economicamente detém o maior custo dentre os elementos estruturais

de via. Assim sendo, torna-se imprescindível o uso adequado e racional desse material.

É importante seleccionar adequadamente os modelos de previsão de comportamento da via permanente, de modo a tornar a análise estrutural mais racional. O programa permite simular a via permanente através de análises e simulações da estrutura, para determinar as diferentes tensões e deformações. Tal metodologia resultou na possibilidade de analisar e prever estados de tensão – deformação de estrutura da via permanente através do programa computacional LISA 8.0.0.

### 3 PROPOSTA DO EXPERIMENTO

#### 3.1 Estudo a ser desenvolvido

Neste estudo foram desenvolvidas três simulações computacionais: a primeira de um trilho submetido a ensaios de flexo-tração num suporte biapoiado, o qual foi realizado em laboratório sob cargas repetidas verticais. A segunda simulação se refere a um segmento de via férrea, do qual foram medidas as deflexões geradas por carregamentos conhecidos, de 20t/eixo e 30t/eixo. E a terceira e última simulação está representada pela análise das tensões no patim do trilho carregado em presença de um, três e cinco dormentes laqueados.

Este trabalho utilizou o programa de análise estrutural LISA 8.0.0 para reproduzir o ensaio de laboratório, com os mesmos dados usados no laboratório, desenvolveu-se uma simulação computacional que, a partir dos resultados dos ensaios de flexo-tração dos trilhos foi possível calibrar o modelo comportamental de um trilho na flexão. Na primeira simulação se utilizou o programa de desenho AutoCAD, para compor um trecho do trilho TR57 de comprimento 2050mm, como se apresenta na Figura 17 a seção transversal e o segmento do trilho em estudo.

No começo se pretendia importar diretamente no software LISA esse desenho para fazer a simulação, mas na hora de fazer a simulação não foi possível pela quantidade de nós ser superior ao limite de 1500 da versão gratuita do software. Devido a esse empecilho, foi necessário fazer o desenho do trilho diretamente no software para dar início à simulação do ensaio do laboratório, usando esses dados foi possível medir os alongamentos do trilho em função do deslocamento vertical do trilho sobre um, três e cinco dormentes laqueados e a tensão que sofrem os mesmos nesse ponto (no meio do vão biapoiado).

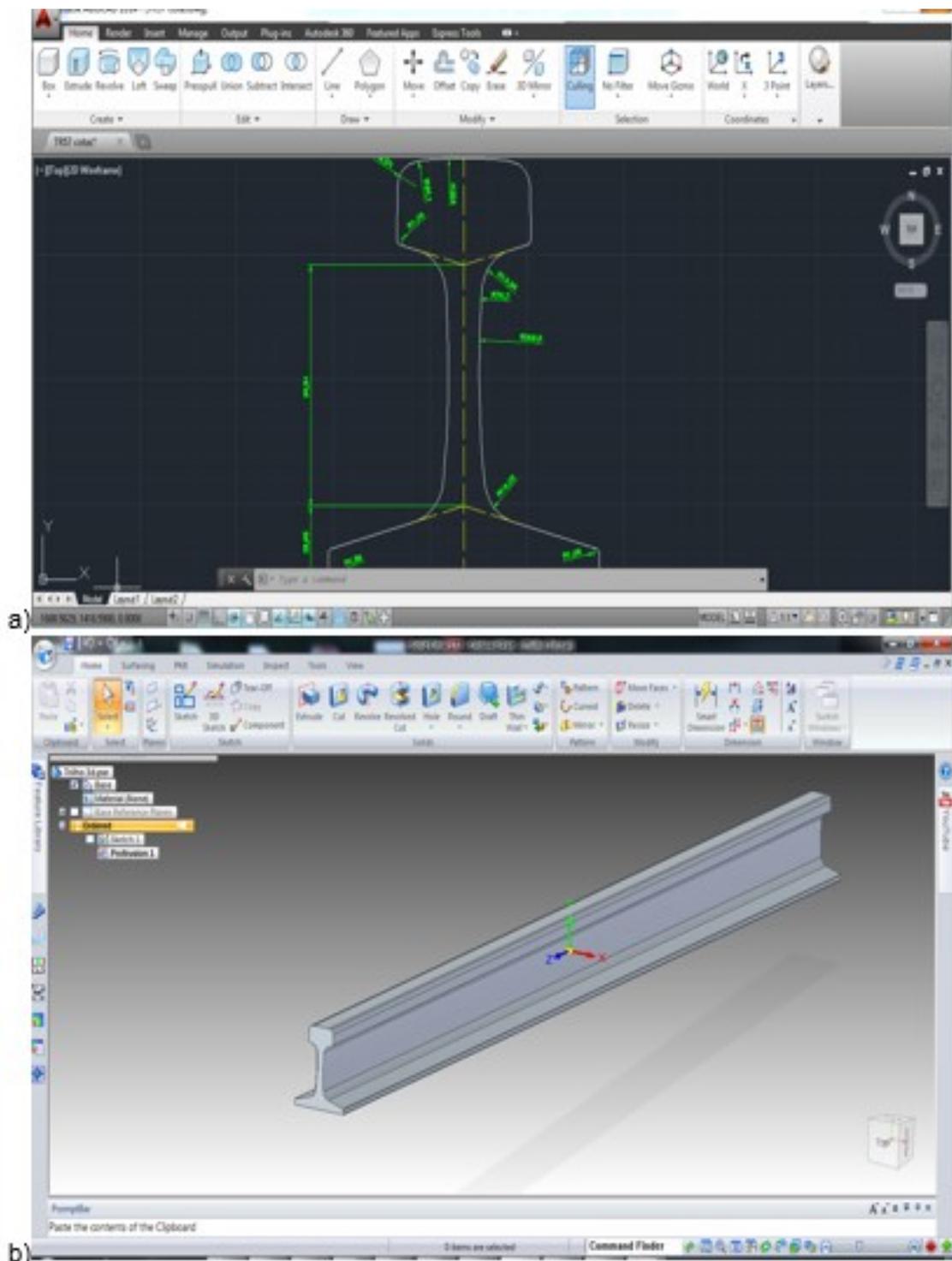


Figura 17 Desenho do Trilho TR57 em Autocad. a) em seção transversal, b) segmento do 2050mm do trilho.

Fonte: elaborado pelo autor

Na primeira simulação, as tensões nos trilhos foram avaliadas através dos resultados dos ensaios de laboratório que submeteram as amostras de trilhos a ensaios repetidos de cargas verticais no meio do vão biapoiado. Para a simulação deste ensaio no software LISA, tomaram-se os dados coletados em laboratório,

através do ensaio de flexão, com as cargas que foram submetidas os trilhos no laboratório (36.43kN; 160.31kN; 40kN e 180kN), analisando as igualdades de tensão e deslocamentos (deflexão vertical e deformação horizontal no patim do trilho), com a finalidade de calibrar um modelo que permita obter o comportamento do trilho a flexão. Os trilhos foram submetidos a ciclos ou solicitações de cargas até chegar a um máximo de  $5 \times 10^6$  ciclos, obtendo assim as curvas das cargas equivalentes correspondentes aos deslocamentos e deformações obtidos no laboratório.

Para realizar a segunda simulação foram considerados os dados levantados na pesquisa de campo de Paiva; Aguiar e Silva (2007), os quais apresentam uma bacia de deflexão de um segmento de uma via com um dormente laqueado para assim poder obter resultados experimentais por médio do software LISA e poder compará-los com a realidade.

Na sequência, fez-se a simulação de uma via férrea carregada com um, três e cinco dormentes laqueados, e, em função de diferentes alturas de “GAP” determinou-se tanto os alongamentos dos trilhos como as tensões ocorrentes nos mesmos quando ficam sujeitos ao aumento de uma carga.

### **3.1.1 Outros dados considerados neste estudo**

Seguindo as especificações AREMA (2005), as características dos elementos da via férrea utilizados nessa pesquisa foram as seguintes: dormentes de madeira 170 x 240 x 2800 mm, espaçados a 540 mm (de centro a centro), fixação de cliques elásticos, lastro de granito e bitola de 1.600 milímetros, Trilho TR57. (PAIVA. AGUIAR E SILVA, 2007).

Nessa pesquisa foram analisados os efeitos que causam o aumento de uma carga de 20t/eixo (200kN/eixo) (Loco GEU-20C) até 30t/eixo (300kN/eixo) (Loco GE U23C) sobre a subestrutura da via permanente, o que se conhece com o nome de bacia de deflexão. Esse artigo apresentou um aparelho inovador, chamado LDD – Dynamic Laser Deflectometer, que utiliza como base as emissões de laser para medir os deslocamentos verticais na própria via férrea. Este dispositivo foi utilizado no

levantamento realizado pelos pesquisadores da Universidade de Campinas-UNICAMP na via férrea. Usando o dispositivo LDD provou ser um método eficaz para a determinação da bacia de deflexão. Esta nova ferramenta permitiu a avaliação do estado da superestrutura e subestrutura da via, assim como a caracterização do estado estrutural da via férrea (PAIVA; AGUIAR E SILVA, 2007).

Nesse estudo, os lasers foram instalados em três posições diferentes:

- ✓ Dois no topo dos dormentes contínuos, para medir o deslocamento vertical dos dormentes. A localização do dormente era aproximadamente no meio dos locais do teste para ser mais representativos;
- ✓ Outro sobre a superfície do lastro no nível da base do dormente, de modo de medir o deslocamento vertical desta camada sob diferentes cargas.

Dentre os vários locais levantados se destaca o ponto TS 2.1 cujos resultados são mostrados na Tabela 6 e 7. Com o arranjo anterior foi possível medir e determinar a forma da bacia de deflexão precisamente, correlacionando cada bacia para o local de teste sobre a carga dinâmica específica. As duas tabelas que se seguem ilustram a produção de deslocamento vertical medido usando o dispositivo LDD. A Tabela 6 mostra a deformação típica medida sobre a carga de 20 toneladas por eixo (GE U-20C), enquanto que a Tabela 7 mostra os números semelhantes sobre a carga de 30 toneladas por eixo (GE U-23C). Para realizar os testes, foi considerada uma seção de 24 metros de comprimento e 28 dormentes.

A Tabela 6 e Tabela 7 são apenas exemplos dos valores recolhidos na mesma posição para diferentes cargas (PAIVA; AGUIAR E SILVA, 2007).

Tabela 6 LDD – Deslocamentos Verticais (mm). Locomotiva GE U-20C.

Localização do teste	Carga	Nº de Dormente	Deflexão do Dormente (1)	Deflexão do Lastro (2)	Coefficiente (1)/(2)
		131	-1,27	-0,98	1,3
		132	-1,32	-1,02	1,4
		133	-1,29	-0,98	1,5
		134	-1,21	-0,89	1,4
TS 2.1	U20C	135	-1,1	-0,79	1,5
Km 134+090		136	-0,94	-0,67	1,6
		137	-0,73	-0,53	1,7
		138	-0,47	-0,37	1,3
		139	-0,24	-0,22	1,1

Fonte: PAIVA, AGUIAR E SILVA (2007).

Tabela 7 LDD – Deslocamentos Verticais (mm). Locomotiva GE U23-C.

Localização do teste	Carga	Nº de Dormente	Deflexão do Dormente (1)	Deflexão do Lastro (2)	Coefficiente (1)/(2)
		131	-1,53	-1,01	1,5
		132	-1,54	-1,02	1,5
		133	-1,5	-1	1,6
		134	-1,48	-0,98	1,7
TS 2.1	U23C	135	-1,47	-0,96	1,8
Km 134+090		136	-1,42	-0,91	1,6
		137	-1,23	-0,78	1,7
		138	-0,9	-0,55	1,8
		139	-0,49	-0,27	1,8

Fonte: PAIVA, AGUIAR E SILVA (2007).

Um total de 13 locais de teste foram investigados. Em alguns locais, até 8 medições foram realizadas a fim de verificar a acurácia da metodologia e dispositivo LDD. Todos os resultados revelam-se consistentes como mostram os dados da bacia de deflexão no local (Tabela 6 e Tabela 7), sobre duas diferentes condições de carga, comportamento apresentados na Figura 18 e Figura 19, onde o deslocamento representado por traço-ponto corresponde a um dormente laqueado. Cabe assimilar que, a linha vermelha representa a deflexão elástica de um dormente bom, pelo que a diferença entre essa linha e a linha traço-ponto é o “GAP”. Na Figura 18, o dormente laqueado teve um deslocamento aproximado de 4.10mm, pelo que o GAP no

dormente N° 128 é 4.00mm, já na Figura 19 o dormente laqueado deslocou-se em uma amplitude de 4.30mm, por tanto o GAP no dormente N° 128 é 4.05mm.

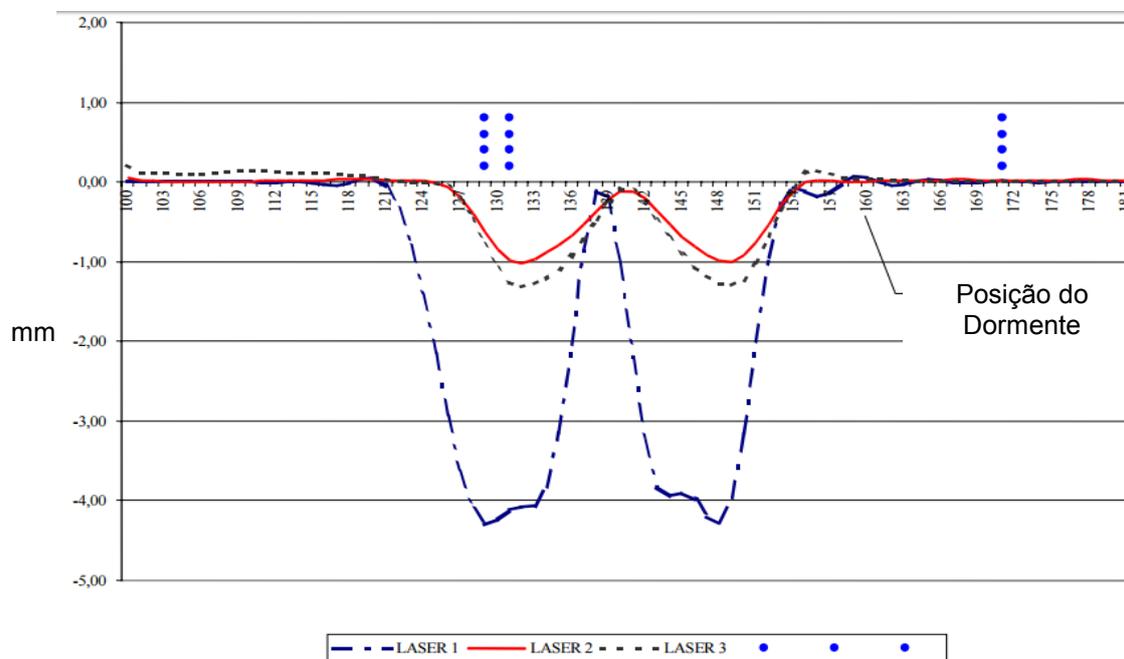


Figura 18 Deflexão (mm) vs Posição do dormente na Bacia de deflexão no local do teste, Locomotiva GE U-20C. Locomotiva U20 ; Velocidade = 18 kmh; Local de teste 2-1; Faixa #1. Fonte: PAIVA, AGUIAR E SILVA (2007).

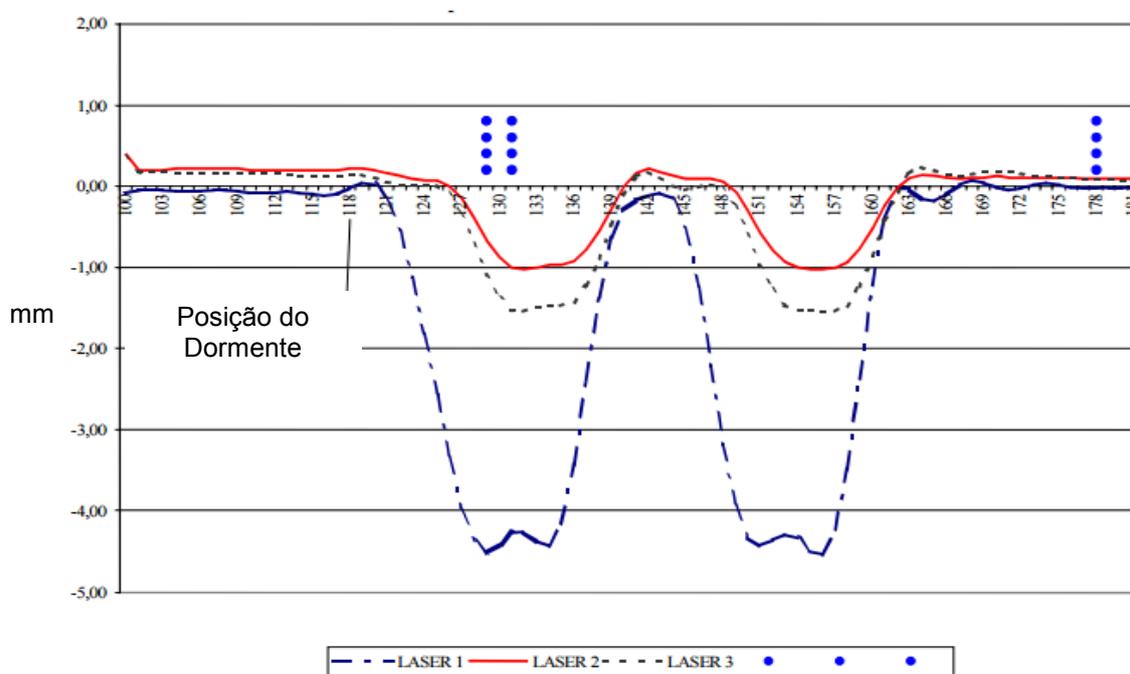


Figura 19 Deflexão (mm) vs Posição do dormente na Bacia de deflexão no local do teste. Locomotiva GE U-23C. Locomotiva U23 ; Velocidade = 19 kmh; Local de teste 2-1; Faixa # 1. Fonte: PAIVA, AGUIAR E SILVA (2007).

### 3.2 Ensaio de Laboratório

O estudo de simulação computacional do trilho foi iniciado a partir dos resultados de uma campanha de ensaios de laboratório de flexão num trilho TR57. Os ensaios envolveram as provas de carga realizadas no laboratório nos trilhos TR57, dos quais foram obtidas as curvas Deformação vs n° de ciclos, Deslocamento vs n° de ciclos e Deslocamento vs Força. Esses resultados foram usados na próxima etapa da pesquisa, onde foi realizada a simulação do ensaio de laboratório mediante o uso do software LISA, e assim poder fazer a comparação entre os resultados de laboratório e do software e desenvolver a calibração dos parâmetros do programa computacional.

As provas de carga ocorreram no LabEDin - Laboratório de Ensaio Dinâmicos – da FEM, Faculdade de Engenharia Mecânica, entre agosto e outubro de 2015. As investigações e ensaios no laboratório iniciaram no dia 13 de agosto de 2015 e se constituíram de ensaios de dois trilhos TR57 de 2050 mm de comprimento.

Por meio de uma célula de carga (Figura 20) o primeiro trilho foi submetido a duas cargas; 36.43kN e 160.31kN, com um máximo de  $3.5 \times 10^6$  ciclos, já o segundo trilho foi submetido a duas cargas maiores que as anteriores, de 40kN e 180kN respectivamente até um máximo  $5 \times 10^6$  ciclos, para verificar se o comportamento mudava. Considerou-se o módulo de elasticidade do trilho TR57 igual a  $E=21 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$  e o módulo de resistência do patim do trilho igual a  $W=360.65 \text{ cm}^3$ .

Alguns dos instrumentos utilizados para realização do ensaio no LabEDin - Laboratório de Ensaio Dinâmicos – FEM/Unicamp foram :

✓ O aplicador de carga (Figura 20): onde o diâmetro dos roletes era de 38mm e a distância entre eles (centro a Centro) era de 60mm (Figura 21).

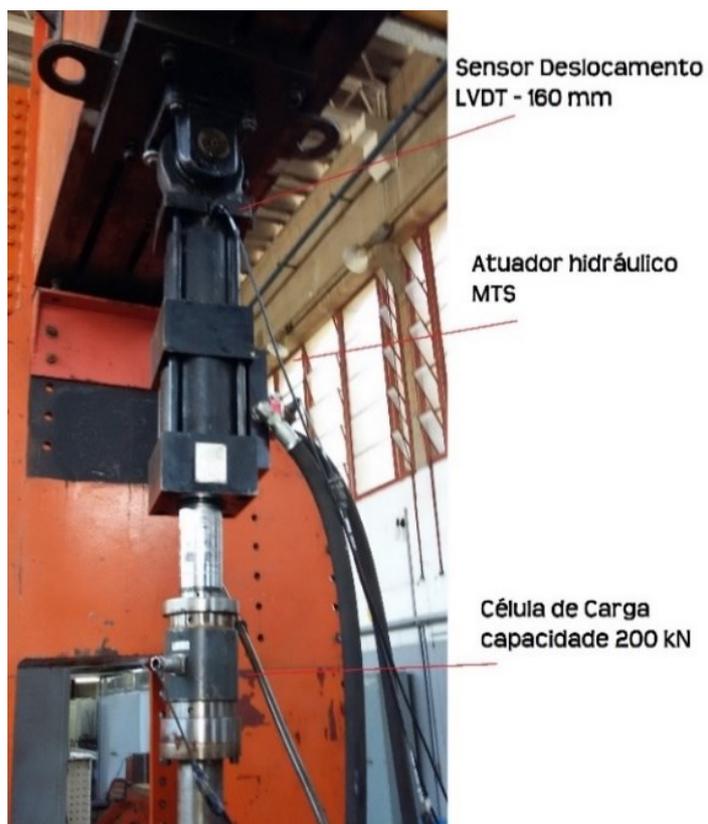


Figura 20 Aplicador de Carga.



Figura 21 Roletes para aplicador de Carga.

✓ O controlador utilizado no ensaio do primeiro Trilho (Figura 22):  
Spectra ST 7000/ Gerador de sinal Goldstar. Osciloscópio Tektronik TDS 2002.



Figura 22 Controlador utilizado no ensaio do primeiro Trilho. Spectra ST 7000/ Gerador de sinal Goldstar.

✓ Controlador utilizado no ensaio do segundo Trilho (Figura 23):

MTS FT 40.



Figura 23 Controlador utilizado no ensaio do segundo Trilho. MTS FT 40.

✓ Aparelhos utilizados para leitura da deformação:

Ponte amplificadora HBM – KWS – 3073

Osciloscópio Tektronil TBS 1062

✓ Relógio comparador do deslocamento:

Mituyoyo Absolute – 50mm.

✓ Extensômetro (*Straingauges*) utilizado:

Tipo KFG - 5 - 120 - C1 - 11.

Para obter estas medidas no laboratório foram usados extensômetros, que permitem medir variações de carga, pressão, torque, deslocamento, tensão, compressão, aceleração, vibração. A seleção do extensômetro apropriado para determinada aplicação é influenciada pelas características seguintes: material da grade metálica e sua construção, material do suporte isolante, material do adesivo, tratamento e proteção do medidor e configuração. O desenho dos extensômetros incorpora várias funcionalidades como alto fator de medição, alta resistividade, insensibilidade à temperatura, alta estabilidade elétrica e resistência mecânica, facilidade de manipulação, baixa histerese e troca termal com outros materiais e durabilidade. A sensibilidade à temperatura é um ponto fundamental no uso de extensômetros, e frequentemente o circuito de medição contém um compensador de temperatura (PORTNOI, 2014).

Por serem sensíveis, os extensômetros elétricos transformam pequenas deformações sofridas em variações equivalentes de sua resistência elétrica. O objetivo de seu uso é de se medir e registrar o fenômeno da deformação como sendo uma grandeza elétrica (ALBUQUERQUE e MELO, 2014).

A deformação depende da tensão aplicada e das características do material do corpo solicitado, tais como limites de resistência, de proporcionalidade e de escoamento. Como a maioria dos processos de cálculos são baseados em tensões, torna-se necessário transformar o efeito das deformações, que podem ser medidas, em tensões. A deformação em qualquer direção é composta por três parcelas: pelo

efeito de Poisson, pelo efeito da temperatura e por aquela relacionada com a tensão naquela direção.

Devido ao dispositivo ser colado na superfície, o valor da resistência elétrica varia proporcionalmente conforme a peça sofre deformação. Logo, o principal problema passa a ser a umidade. Entretanto, o uso de técnicas de colagem e impermeabilização consegue proteger os extensômetros contra a umidade promovendo, de certo modo, a permanência do zero.

Apresenta-se neste item o processo de instrumentação empregado nos trilhos usados nesta dissertação:

- ✓ Posicionou-se e fixou-se os extensômetros na superfície preparada com a cola Tek Bond 725.
- ✓ Depois, se mede a posição inicial do trilho TR57 (sem deformação) com o Relógio comparador, antes de submete-lo as cargas de ensaio. A Figura 24 apresenta o início do ensaio.



Figura 24 Medição da posição inicial do trilho TR57 (sem deformação) com o Relógio Comparador.

- ✓ Em seguida se registra o comportamento inicial do trilho TR57 com a primeira leitura sem deformação, com a ponte amplificadora e o osciloscópio.
- ✓ Para iniciar o ensaio (Figura 25), seguidamente se submete o trilho TR57 as cargas de ensaio, com o aplicador de carga (Figura 20), para registrar as deformações com a ponte amplificadora e o osciloscópio.



a)



b)

Figura 25 Início do ensaio. a) Aplicação das cargas, b) Registro das deformações

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados das provas de carga realizadas nos trilhos TR57. Com base nos ensaios no laboratório foram obtidos: as curvas de deformação vs n° de ciclos, deslocamento vs de ciclos e deslocamento vs força, descrição do seu comportamento e comparação entre os resultados de laboratório e o software LISA.

Também serão apresentados aqueles resultados provenientes da simulação da pesquisa anterior por meio do software LISA, e a sua vez a simulação do trilho carregado em presença de um, três e cinco dormentes laqueados.

### 4.1 Simulação do ensaio flexo-tração em laboratório por meio do Software LISA 8.0.0

Para a realização deste ensaio, foram considerados os dados coletados no laboratório, através do ensaio de flexão com quatro cargas conhecidas (36.43kN, 40kN, 160.31kN, e 180kN), se analisarem as igualdades de tensão e deslocamentos (deflexão vertical e deformação horizontal no patim do trilho), com a finalidade de achar a carga equivalente  $q$  abrange a carga padrão do ensaio.

Os trilhos foram submetidos em pares ou ciclos até chegar à máxima de  $5 \times 10^6$  número de ciclos (Tabela 8 e Tabela 9). Estas Tabelas mostram os números de ciclos aos quais foram submetidos as duas amostras dos trilhos, as deformações e deslocamentos resultantes pelas cargas impostas nele.

Tabela 8 Tabela com ciclos, cargas, deformações e deslocamentos verticais implementado no primeiro Trilho TR57. Ensaio no Laboratório

n° de ciclos	Carga = 36,43 Kn		Carga= 160,31 kN	
	Deformação [ $\mu\epsilon$ ]	Deslocamento [mm]	Deformação [ $\mu\epsilon$ ]	Deslocamento [mm]
0	271,66	1,43	1181,13	6,17
86030	274,12	1,44	1181,13	6,20
327609	271,47	1,42	1181,13	6,16
327609	272,04	1,42	1177,99	6,15
327609	272,80	1,43	1178,91	6,15
434000	271,85	1,42	1178,82	6,13
434000	274,69	1,44	1180,33	6,20
645900	284,36	1,50	1233,47	6,46
653400	283,03	1,50	1230,32	6,45
705000	291,00	1,53	1265,27	6,63
906000	272,42	1,43	1183,91	6,18
997000	271,28	1,43	1180,76	6,22
997000	270,71	1,41	1176,51	6,12
1075000	272,80	1,43	1179,53	6,16
1190000	271,66	1,41	1179,34	6,15
1291000	272,99	1,42	1178,96	6,13
1531000	272,99	1,42	1178,58	6,10
1856000	272,23	1,40	1179,34	6,11
2000000	271,66	1,42	1179,34	6,14
2408000	270,90	1,31	1179,15	6,13
2760000	263,32	1,39	1153,74	5,83
3218000	269,19	1,42	1178,20	6,12
3500000	271,09	1,40	1178,96	6,13

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 9 Tabela com ciclos, cargas, deformações e deslocamentos verticais implementado no segundo Trilho TR57. Ensaio no Laboratório

n° de ciclos	Carga = 40 kN		Carga= 180 kN	
	Deformação [ $\mu\epsilon$ ]	Deslocamento [mm]	Deformação [ $\mu\epsilon$ ]	Deslocamento [mm]
0	298,58	1,54	1355,45	7,04
340000	297,63	1,53	1355,07	7,02
705000	298,77	1,54	1355,64	7,02
1140000	298,39	1,54	1356,78	7,05
1480000	298,20	1,53	1355,45	7,04
1850000	299,15	1,54	1354,12	7,01
2190000	298,39	1,54	1353,55	6,99
2540000	298,58	1,54	1353,36	7,00
3270000	299,15	1,51	1355,45	6,98
3620000	298,58	1,54	1354,50	7,01
3980000	297,63	1,53	1355,07	6,99
4250000	298,77	1,53	1353,55	7,02
4620000	298,01	1,54	1352,42	7,02
5000000	299,53	1,54	1356,59	7,05

Fonte: elaborado pelo autor

A seguinte tabela apresenta em forma de resumo a resultante do deslocamento vertical vs força (Tabela 10) quando foram aplicadas as 4 cargas. O gráfico correspondente a esse comportamento é mostrado na Figura 26. Esta análise permitiu confirmar que na hora de aumentar as cargas aplicadas esses valores aumentam proporcionalmente aos anteriores, e mantem um comportamento similar durante todo o aumento dos ciclos.

Tabela 10 Deslocamento vs Forças, correspondente ao ensaio no laboratório.

Ensaio Laboratório	
Deslocamento (mm)	Forças (kN)
0	0
1,42	36,43
1,54	40
6,15	160,31
7,02	180

Fonte: elaborado pelo autor

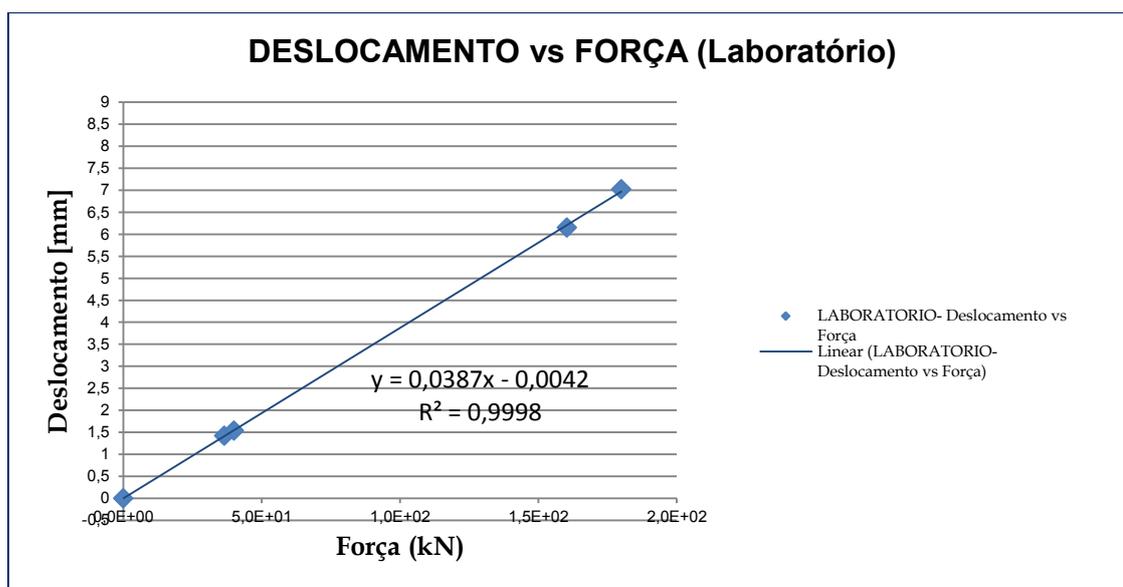


Figura 26 Deslocamento vs Força. Ensaio no laboratório.

Fonte: elaborado pelo autor

Seguidamente se apresentam os gráficos correspondentes à deformação vs nº de ciclos das cargas 36.43kN e 160.31kN (Figura 27) e das cargas 40kN e 180kN (Figura 29). Por sua vez o comportamento correspondente aos deslocamentos vs nº de ciclos, com as 4 cargas correspondentes: 36.43kN, 160.31kN, 40kN e 180kN se apresentam na Figura 28 e Figura 30. Onde se observou um comportamento constante e linear.

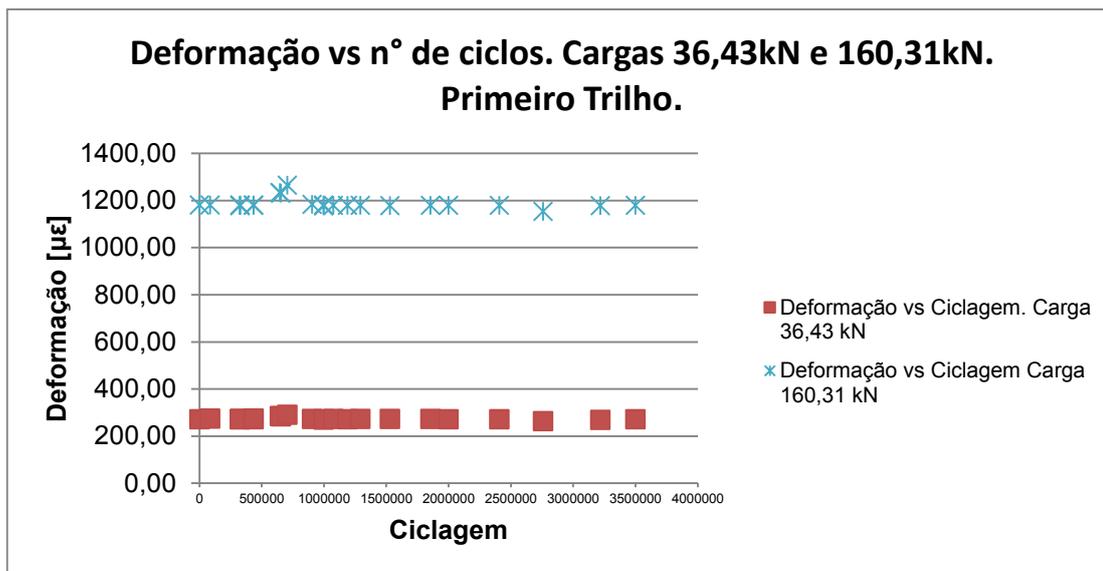


Figura 27 Deformação vs. nº de ciclos do Trilho TR57, sob ação das cargas 36.43kN e 160.31kN. Ensaio no laboratório.

Fonte: elaborado pelo autor

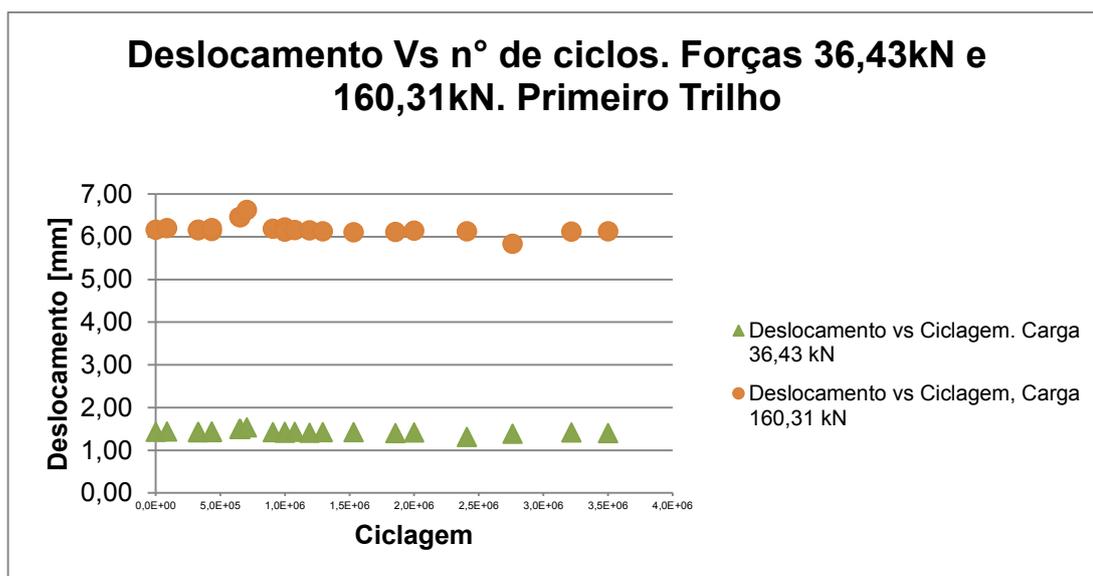


Figura 28 Deslocamento vs. nº de ciclos do trilho TR57, sob ação das cargas 36.43kN e 160.31kN. Ensaio no laboratório

Fonte: elaborado pelo autor

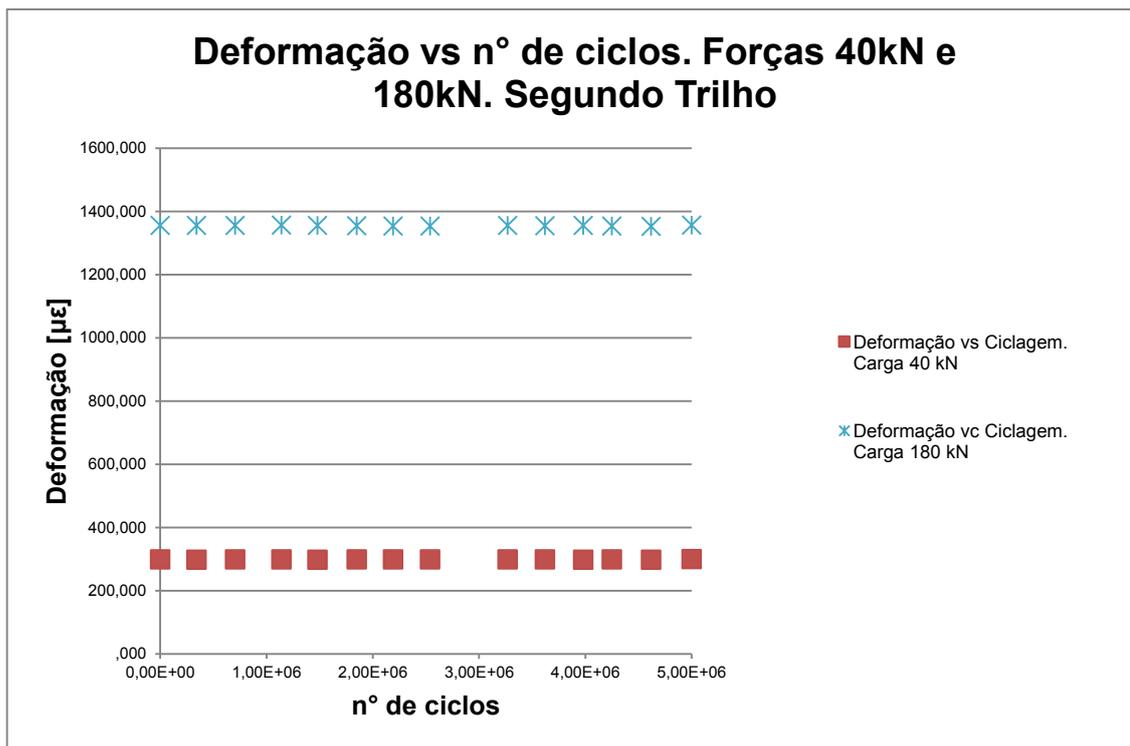


Figura 29 Deformação vs. nº de ciclos do trilho TR57, sob ação das cargas 40kN e 180kN.  
Ensaio no laboratório  
Fonte: elaborado pelo autor

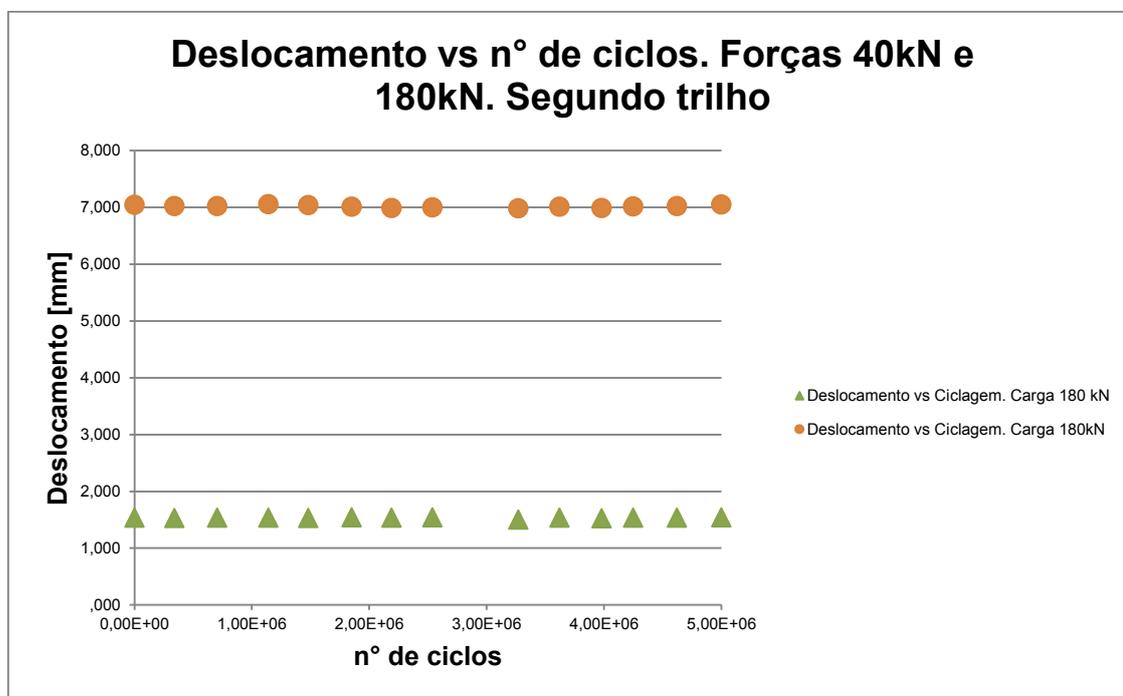


Figura 30 Deslocamento vs. nº de ciclos do trilho TR57, sob ação das cargas 40kN e 180kN.  
Ensaio no laboratório.  
Fonte: elaborado pelo autor

Através da análise dos resultados de laboratório apresentados nas Figura 27 a 30, verificou-se que a deformação horizontal e o deslocamento vertical têm um comportamento relativamente constante a medida que aumenta o número dos ciclos. Esses valores aumentam proporcionalmente aos anteriores ao sofrerem aumento das cargas aplicadas, e mantêm um comportamento similar durante todo o aumento dos ciclos, já que não chega ao limite do trilho para causar uma deformação considerável, pode-se confirmar esta situação quando foi realizada a análise de fadiga do trilho posteriormente. Tudo isso acontece devido ao fato de que as cargas aplicadas foram as máximas permitidas para realizar os ensaios no laboratório, que são as cargas máximas suportadas pelo equipamento do LaBedin para não sofrer deformações. Mas cabe assinalar que quando tensões cíclicas são aplicadas, o efeito do histórico de tensões pode ser observado pelo acúmulo de deformação permanente no trilho. E como era previsto quanto maior é a força aplicada no meio do vão do trilho biapoado, maior é o deslocamento vertical no trilho.

Depois da análise rigorosa dos resultados de laboratório, foi iniciado o estudo com uso do software LISA, para fazer a primeira simulação respectiva do ensaio de laboratório. Construindo o modelo diretamente no software, com os seguintes dados de entrada:

- ✓ Análise: Dynamic Response 3D.
- ✓ Material:
  - Isotrópico
  - Módulo de Young = 210kN/mm<sup>2</sup>
  - Poisson= 0.30
  - Densidade do aço= 7.6786E-<sup>8</sup> kN/mm<sup>3</sup>
- ✓ Força (kN)

O software LISA não exige unidades específicas, é necessário considerar que os dados de entradas tem que estar com unidades coerentes umas com outras, para ter resultados exatos e sem erros. A Figura 31 representa a tela inicial da entrada dos dados correspondente ao tipo de análise a se fazer, já a Figura 32. corresponde à tela referente ao tipo do material do material que será simulado, neste caso o aço (trilho TR57).

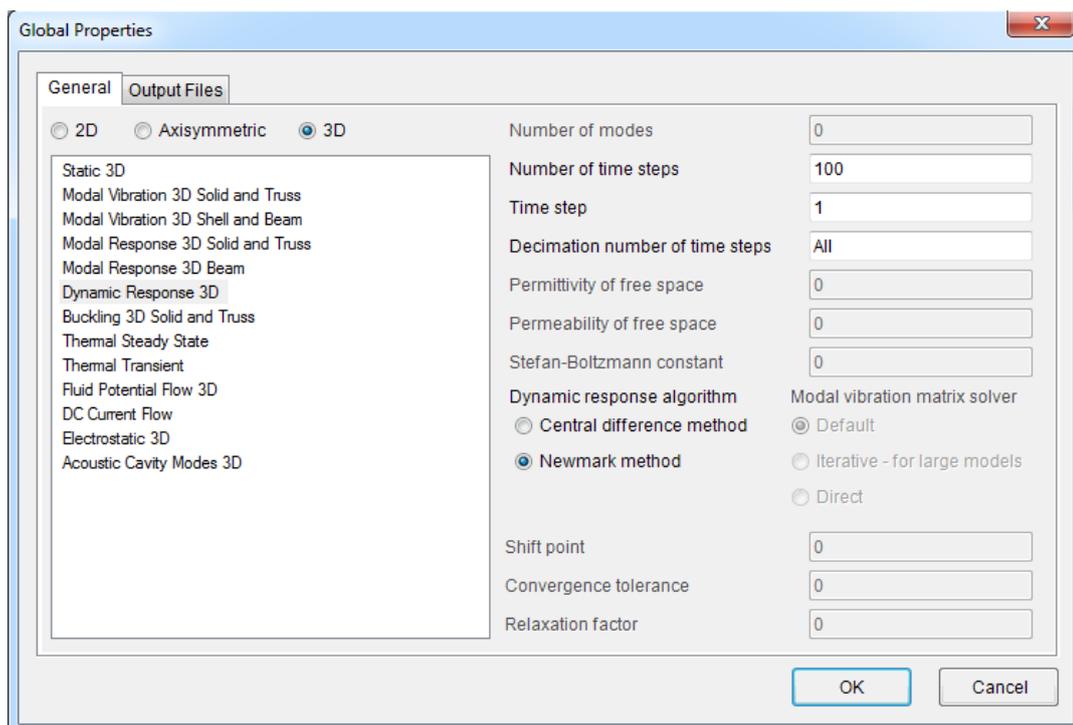


Figura 31 Tela correspondente aos dados de entrada Software LISA, Tipo de Análise.  
Fonte: elaborado pelo autor

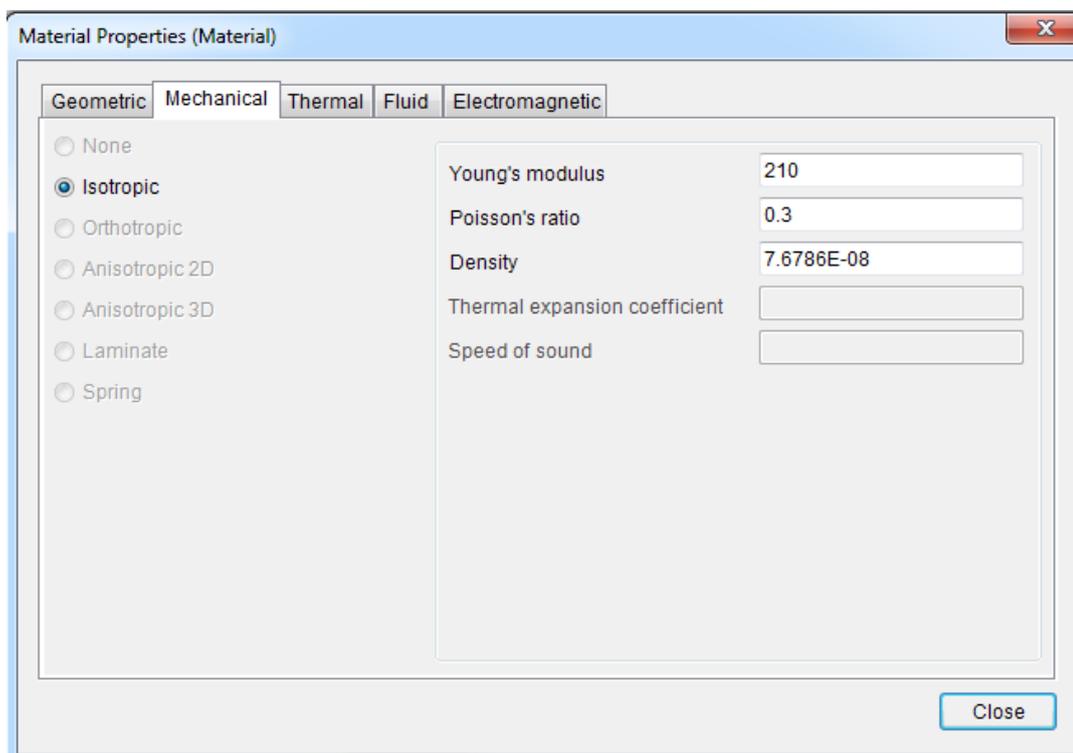


Figura 32 Tela correspondente aos dados de entrada do Software LISA. Tipo de Material,  
Trilho.  
Fonte: elaborado pelo autor

Uma vez colocados os dados de entrada no programa (tipo de análise e tipo de material), se iniciou a primeira simulação correspondente à força de 36,43kN (Figura 33) no trilho biapoiado. Se fez o mesmo procedimento para as demais forças (40kN; 160,31kN e 180kN).

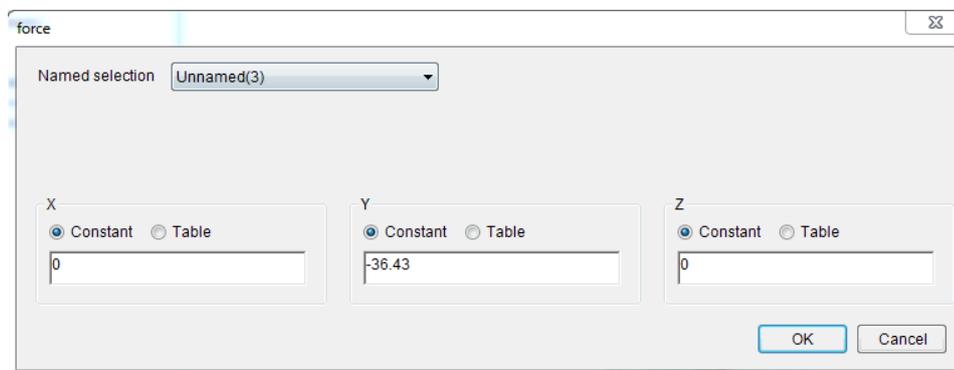


Figura 33 Tela correspondente à primeira simulação no Software LISA, Carga 36.43kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

No software LISA pode-se ter uma visão do trilho em todos os planos. A Figura 34 apresenta o plano XY; a Figura 35 o plano ZY, já a Figura 36 o plano ZX e por último a Figura 37 corresponde à visão do trilho em 3D no plano XYZ.

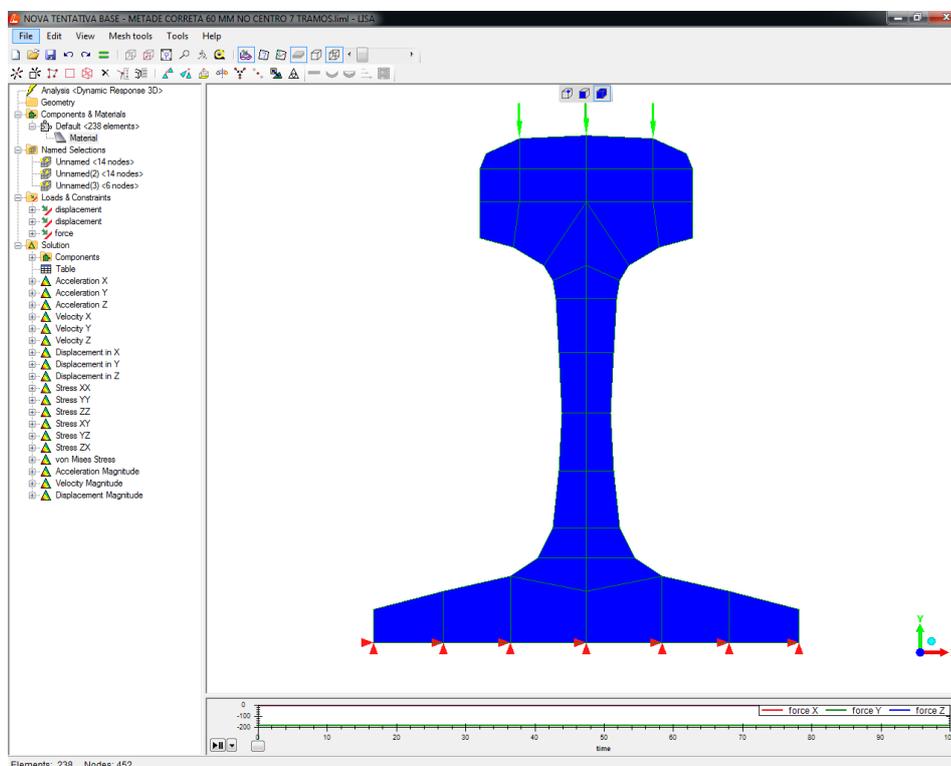


Figura 34 Tela do Software LISA, Trilho no plano YX.  
Fonte: elaborado pelo autor

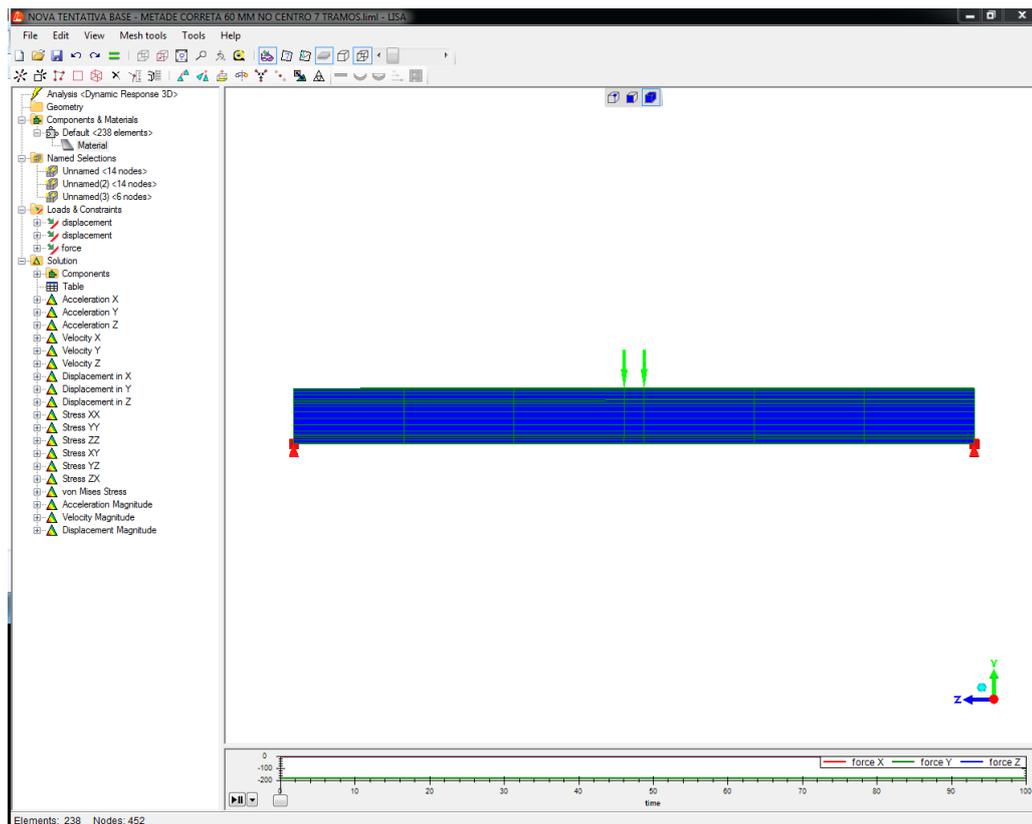


Figura 35 Tela do Software LISA, trilho no plano YZ.  
Fonte: elaborado pelo autor

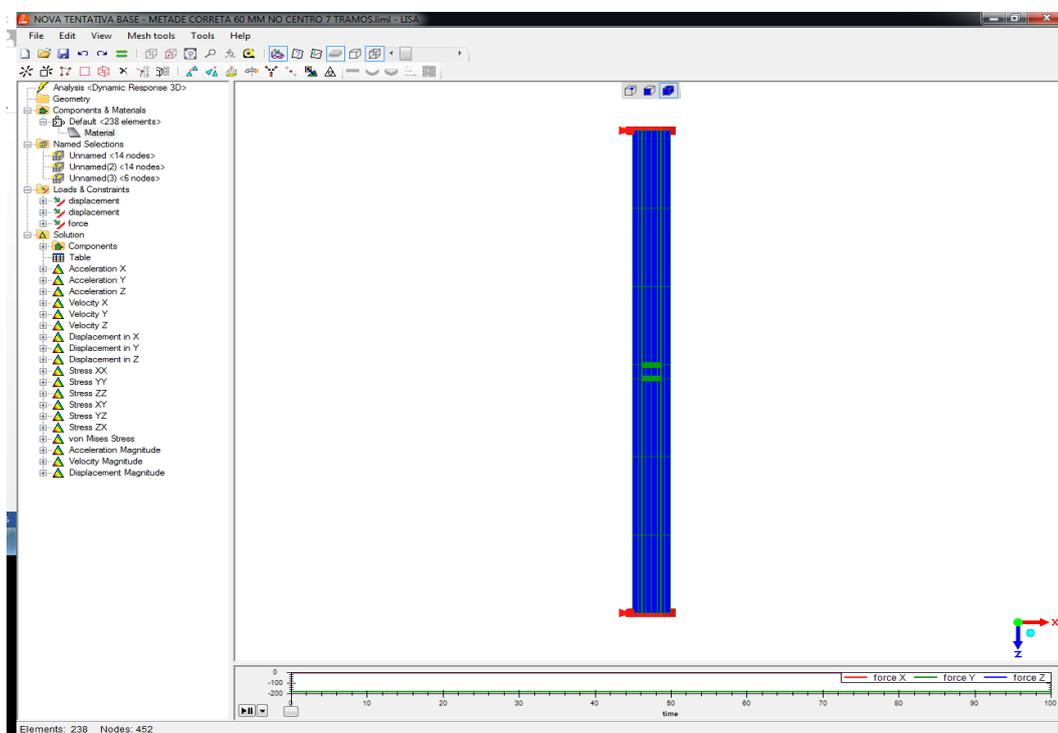


Figura 36 Tela do Software LISA, trilho no plano ZX.  
Fonte: elaborado pelo autor

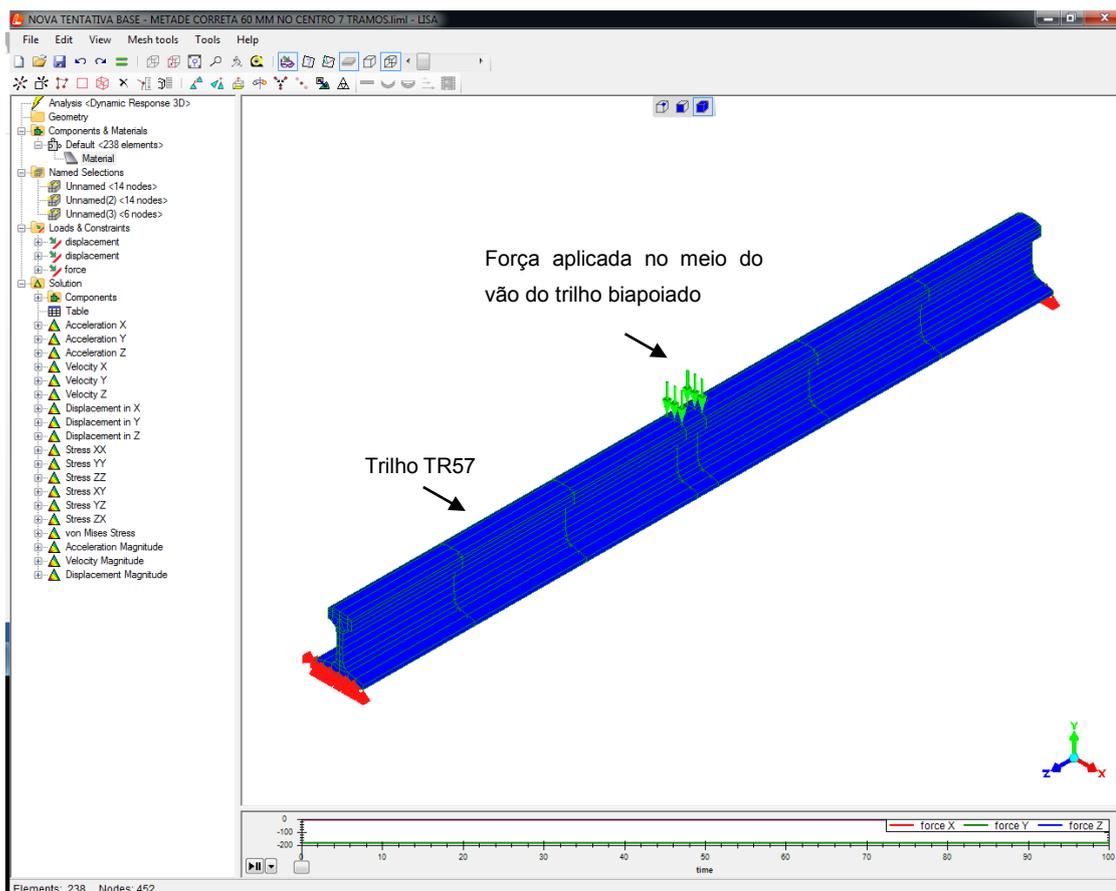


Figura 37 Tela do Software LISA, trilho no plano 3D XYZ.  
Fonte: elaborado pelo autor

Ao realizar a primeira simulação do ensaio do trilho com a carga de 36.43kN, obteve-se que o máximo valor de deslocamento no centro do vão do trilho biapoiado foi de 1.41mm (Figura 38), já com a carga de 40kN deu um deslocamento de 1.55mm (Figura 39), com 160.31kN um deslocamento de 6.22mm (Figura 40), já com a última carga de 180kN o máximo deslocamento foi de 6.99mm (Figura 41). É digno de nota mencionar que, as telas do software LISA que representam as figuras dos resultados da simulação computacional não estão em escala e, sendo assim, a escala do desenho é deformada de uma forma exagerada para ser possível visualizar os deslocamentos verticais e tensões no patim do trilho, já que estes na realidade seus valores são muito pequenos para ser perceptíveis ao olho nu.

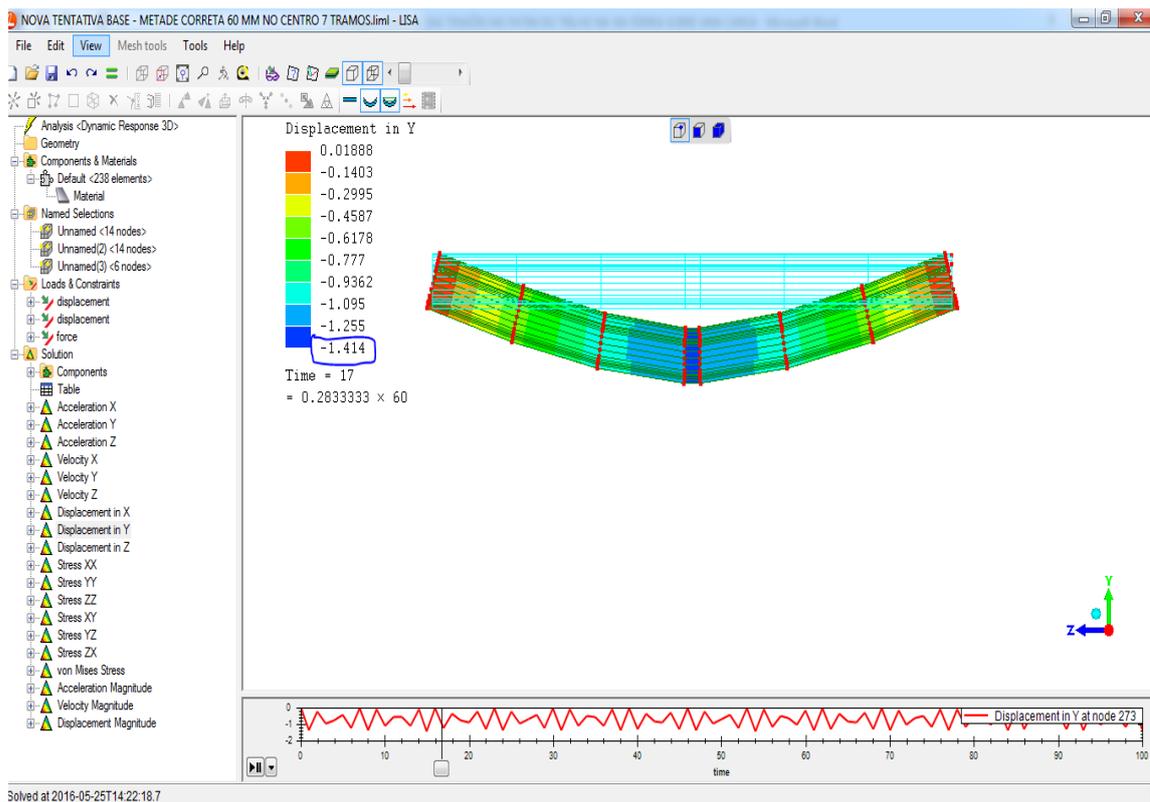


Figura 38 Tela do software LISA. Deslocamento máximo de 1.414mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 36.43kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

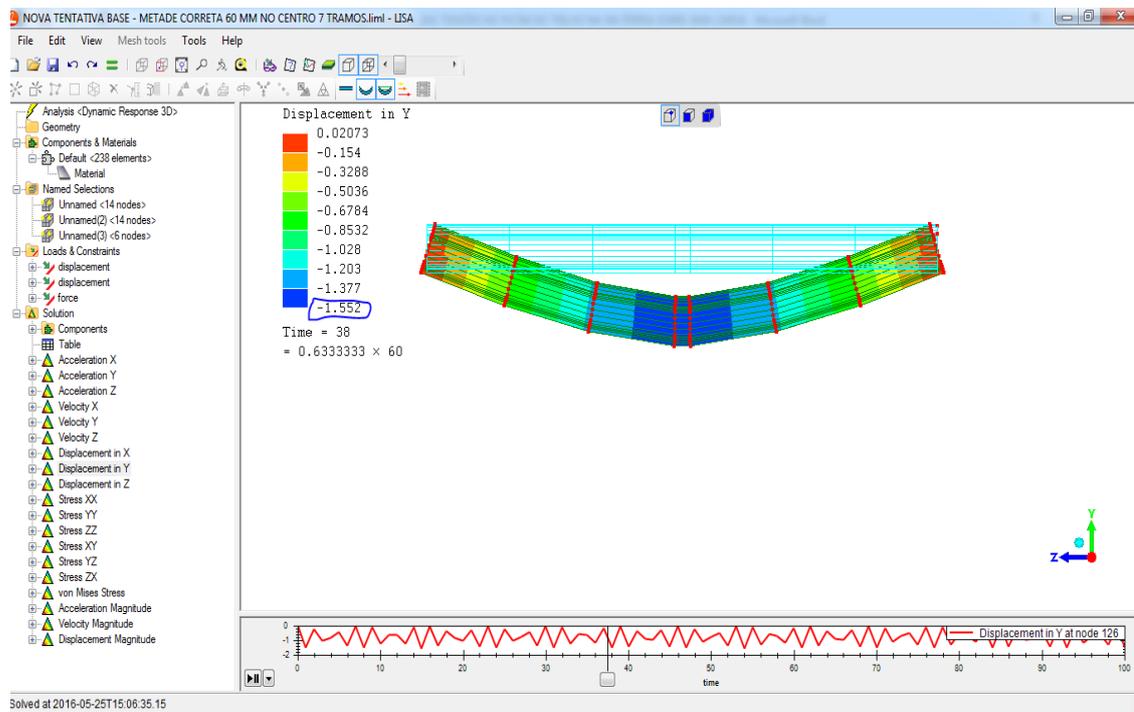


Figura 39 Tela do software LISA. Deslocamento máximo de 1.552mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 40kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

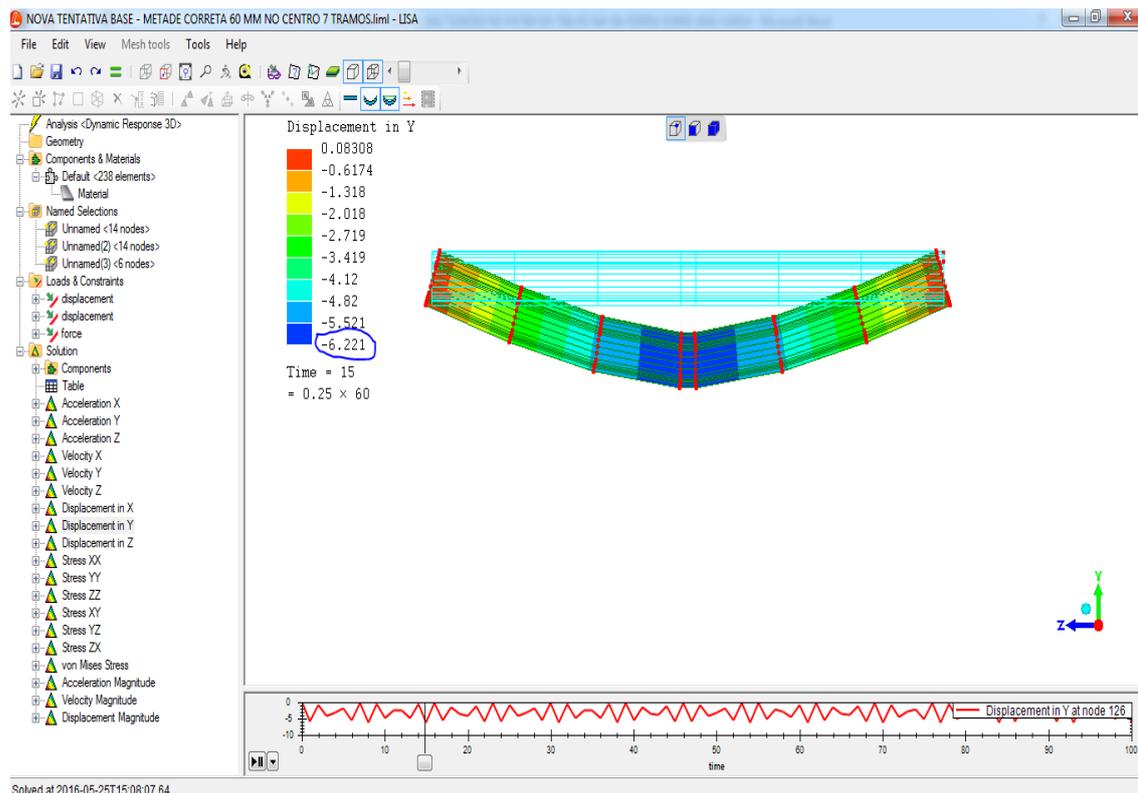


Figura 40 Tela do software LISA. Deslocamento máximo de 6.221mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 160kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

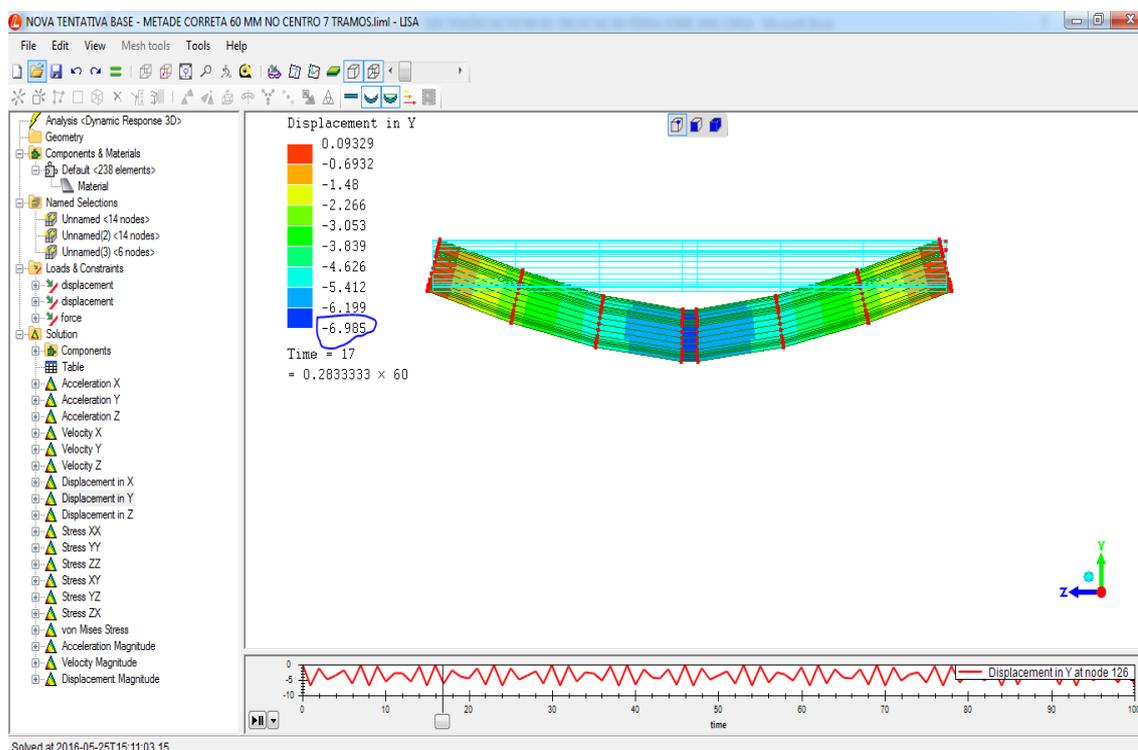


Figura 41 Software LISA, Deslocamento máximo de 6.985mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 180kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

Com os resultados obtidos tanto do Software LISA junto com os de laboratório se gerou uma tabela comparativa (Tabela 11) e respectivamente um gráfico de deslocamento vs. força (Figura 42), para observar o comportamento em ambos os casos.

Tabela 11 Tabela comparativa dos resultados do Deslocamento (Y, mm) obtidos no laboratório e o Software LISA.

Carga (kN)	Deslocamento Y(mm). Ensaio no Laboratório	Deslocamento Y(mm). Simulação Software LISA	dif (%)
36.43	1,42	1,41	-0,70
40	1,54	1,55	0,65
160.31	6,15	6,22	1,14
180.00	7,02	6,99	-0,43

Fonte: elaborado pelo autor

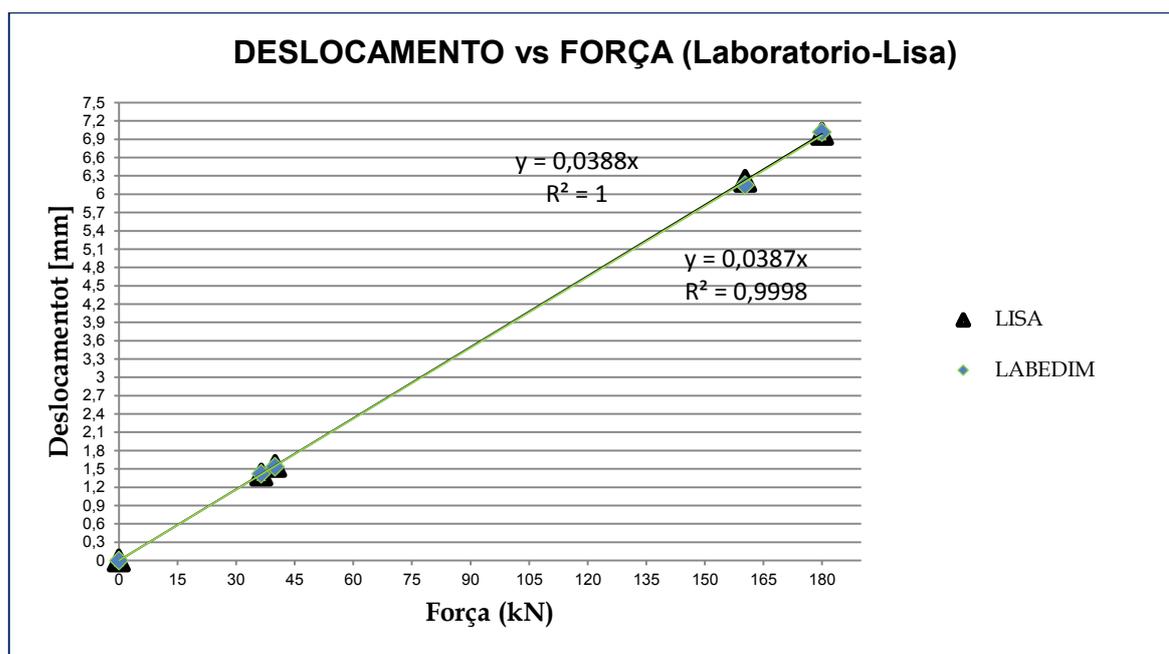


Figura 42 Gráfico comparativo dos resultados de Deslocamento vs Força, obtidos no laboratório e no software LISA.

Fonte: elaborado pelo autor

Como apresentado na Tabela 11, os valores dos deslocamentos verticais (Y) obtidos por ambos os modelos são próximos, com erros relativos na ordem de 1%. Assim, a comparação dos resultados, obtidos a partir dos ensaios de laboratório, com os resultados do modelo numérico elaborado no software LISA, gerou um modelo que facilitou a interpretação e validação dos resultados obtidos experimentalmente;

comprovando que quanto maior é a força aplicada no centro do trilho maior é o deslocamento que sofre nesse ponto, como mostra a Figura 42.

Esta primeira simulação também permitiu determinar as tensões a tração no patim do trilho quando este fica exposto a uma carga. Com a carga de 36.43kN, se teve que o máximo valor da tensão foi de 0.058kN/mm como é apresentado na Figura 43, já com a carga de 40kN deu uma tensão de 0.066kN/mm (Figura 44), com 160.31kN uma tensão de 0.0242 kN/mm (Figura 45), já com a última carga de 180kN a máxima tensão foi de 0.269 kN/mm (Figura 47).

Esta primeira simulação também permitiu determinar as tensões a tração no patim do trilho quando este fica exposto a uma carga. Com a carga de 36.43kN, se teve que o máximo valor da tensão foi de 0.058kN/mm como é apresentado na Figura 43, já com a carga de 40kN deu uma tensão de 0.066kN/mm (Figura 44), com 160.31kN uma tensão de 0.0242 kN/mm (Figura 45), já com a última carga de 180kN a máxima tensão foi de 0.269 kN/mm (Figura 47).

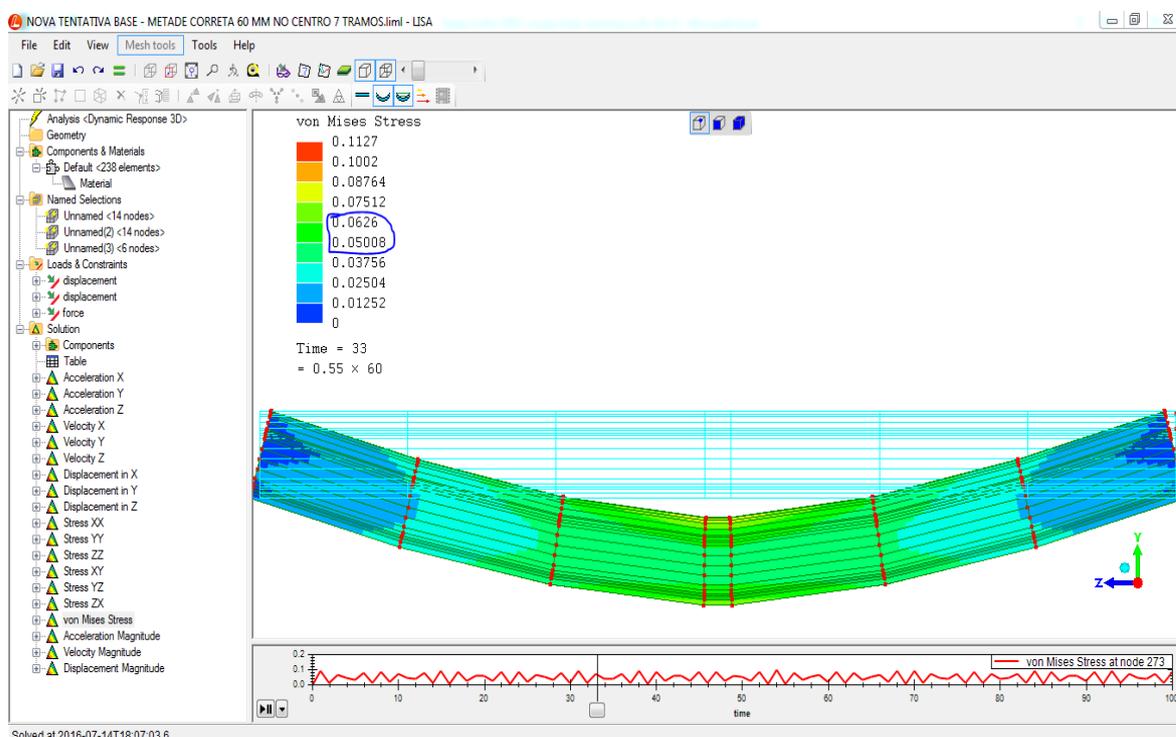


Figura 43 Tela do Software LISA. Tensão máxima a tração de 0.058kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 36.43kN.

Fonte: elaborado pelo autor

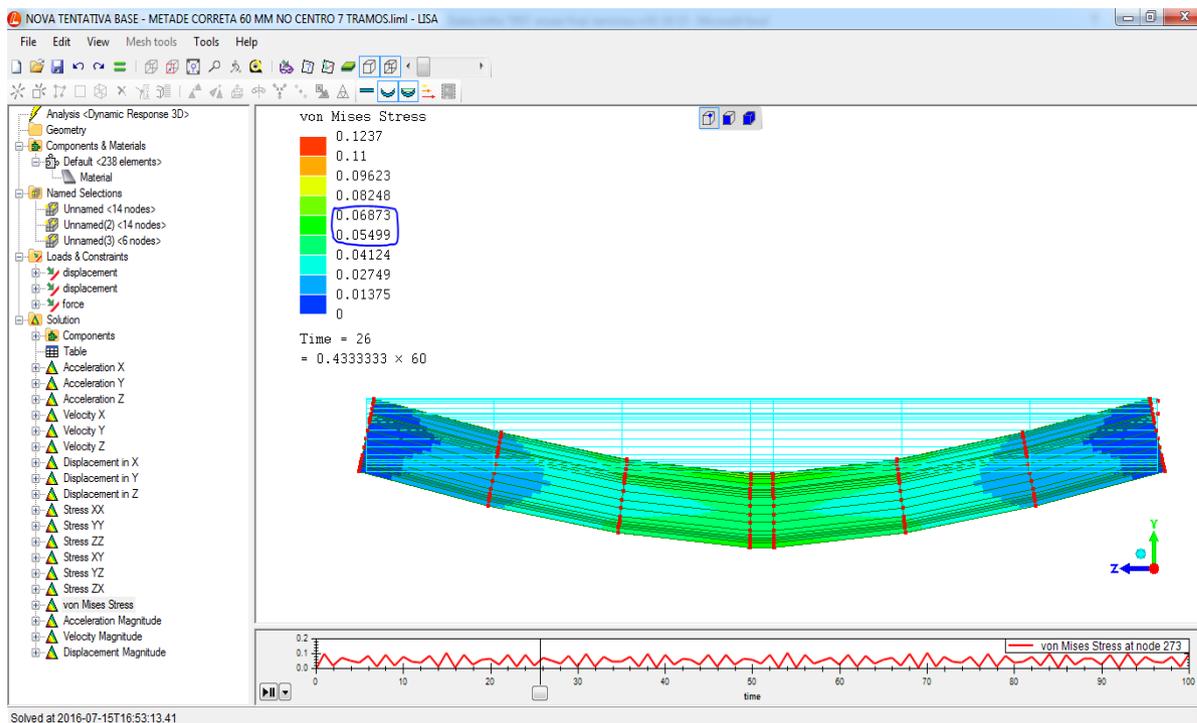


Figura 44 Tela do software LISA, Tensão máxima a tração de 0.066kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 40kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

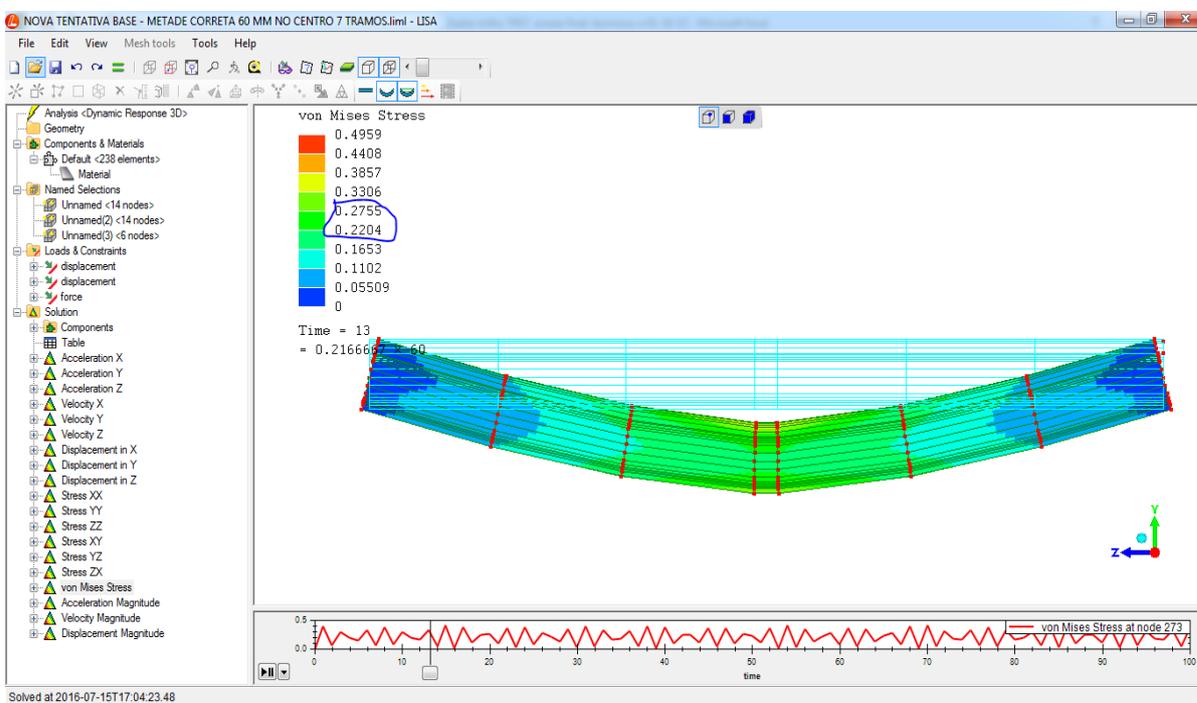


Figura 45 Tela do software LISA, Tensão máxima a tração de 0.0242 kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 160.31kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

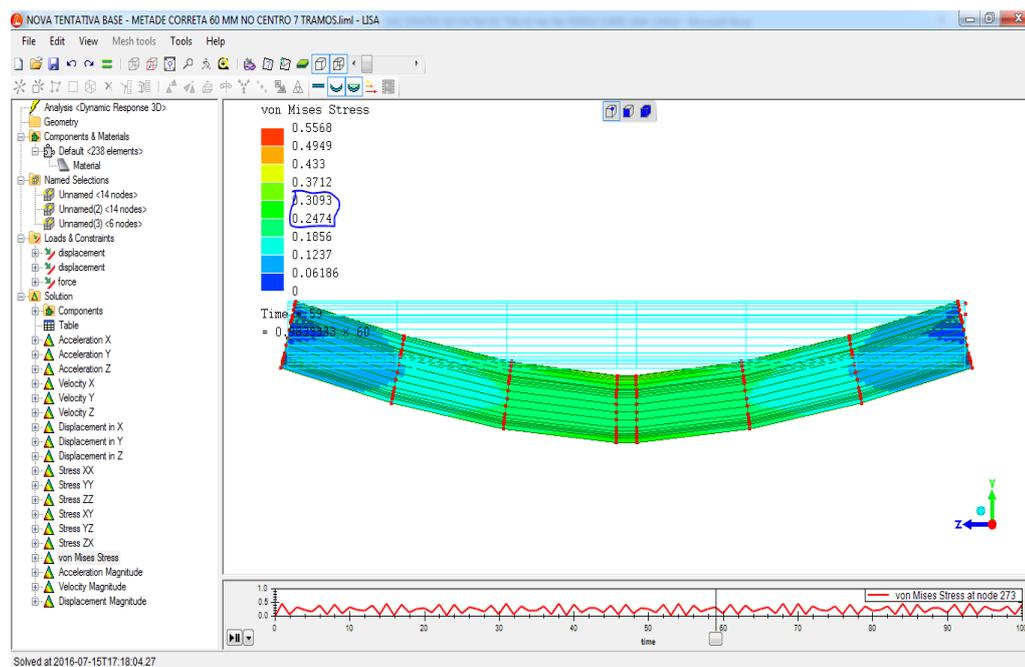


Figura 46 Tela do software LISA, Tensão máxima a tração de 0.269 kN/mm no centro do vão do trilho biapoiado, carga 180kN.  
Fonte: elaborado pelo autor

Comparando os resultados do software LISA referente à tensão a tração no patim do trilho com aqueles obtidos no laboratório por meio dos extensômetros se observou que, o programa gerou resultados um pouco maiores ao do laboratório em como se mostra na Tabela 12.

Tabela 12 Tabela comparativa, tensão obtida no laboratório com os do software LISA.

Carga (kN)	Tensão $\sigma$ (kN/mm) Ensaio no Laboratório	Tensão $\sigma$ (kN/mm) Simulação Software LISA	dif (%)	Diferença Média (%)
36,43	0,059	0,056	-5,08	7,40
40	0,062	0,066	7,00	
160,31	0,221	0,242	9,30	
180	0,249	0,269	8,21	

Fonte: elaborado pelo autor

Analisando a tabela anterior, tem-se que os resultados obtidos numericamente por meio do software LISA são aceitáveis já que são valores muito parecidos ao obtidos no laboratório. Com uma diferença na média de 7.40%.

Cabe destacar que para realizar essas simulações baseou-se no tutorial e guia do Software LISA (LISA, 2013). Por outra parte, apresentam-se como anexo (Anexo I) como abordar os aspectos que foram identificados como carentes de

aprofundamento nessa guia e tutorial, que geraram várias dificuldades na utilização do software LISA: definição do uso de ponto ou vírgula em cifras com decimais, importar o desenho do trilho TR57 em AutoCAD no LISA, a forma de colocação de vários materiais, pelo que se anexa os passos que se seguiram na hora de implementar o programa.

#### 4.2 Simulação da via férrea com carga de 20 ton/eixo por meio do Software LISA 8.0.0.

Considerando os dados da pesquisa de campo contidos no artigo de Paiva, Aguiar e Silva (2007), intitulada Evaluation Of Track/Ballast Behavior Under Increased Axle Load: Measuring Deflections On Track, começa-se com a simulação de uma parte do trilho TR57 de 7020mm de comprimento, submetido a uma carga de 20t/eixo – 10t/roda (100kN/roda), apoiado sobre quatorze dormentes de madeira espaçados a 540 mm (de centro a centro), onde os dormentes apoiados no lastro e subleito são representados por molas no software LISA (Figura 47 e Figura 48).

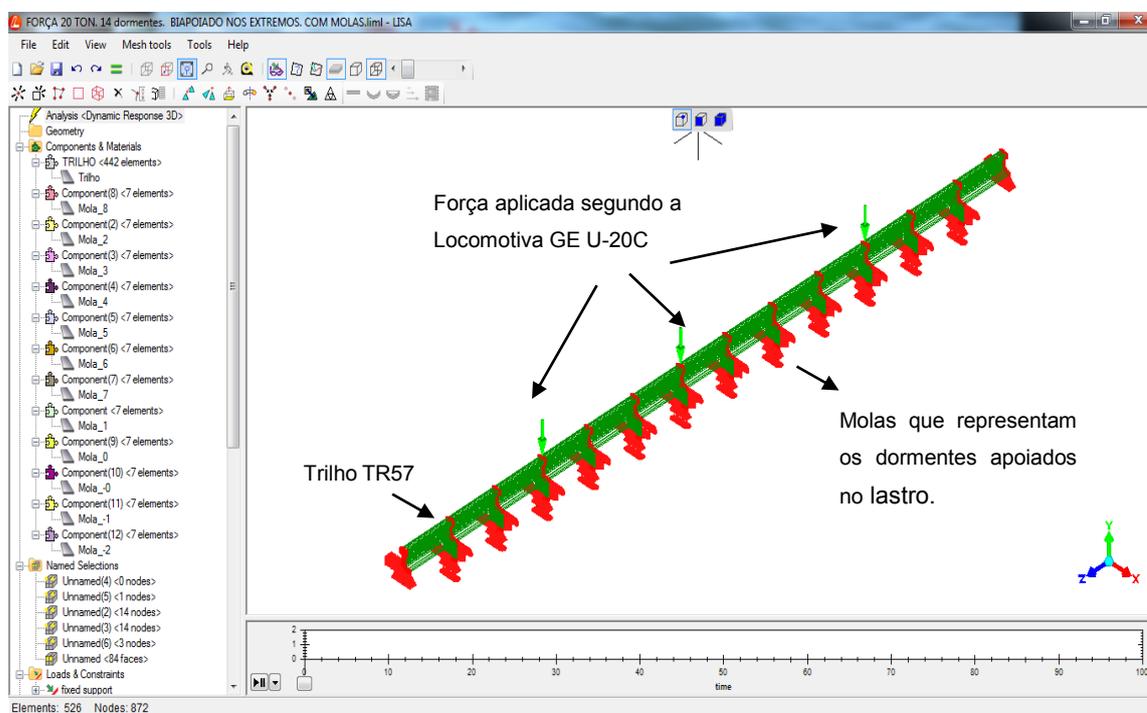


Figura 47 Tela do software LISA da simulação do Trilho TR57, com molas representando aos dormentes apoiados sobre o lastro. Força aplicada 100kN/roda (Visão da Malha).

Fonte: elaborado pelo autor

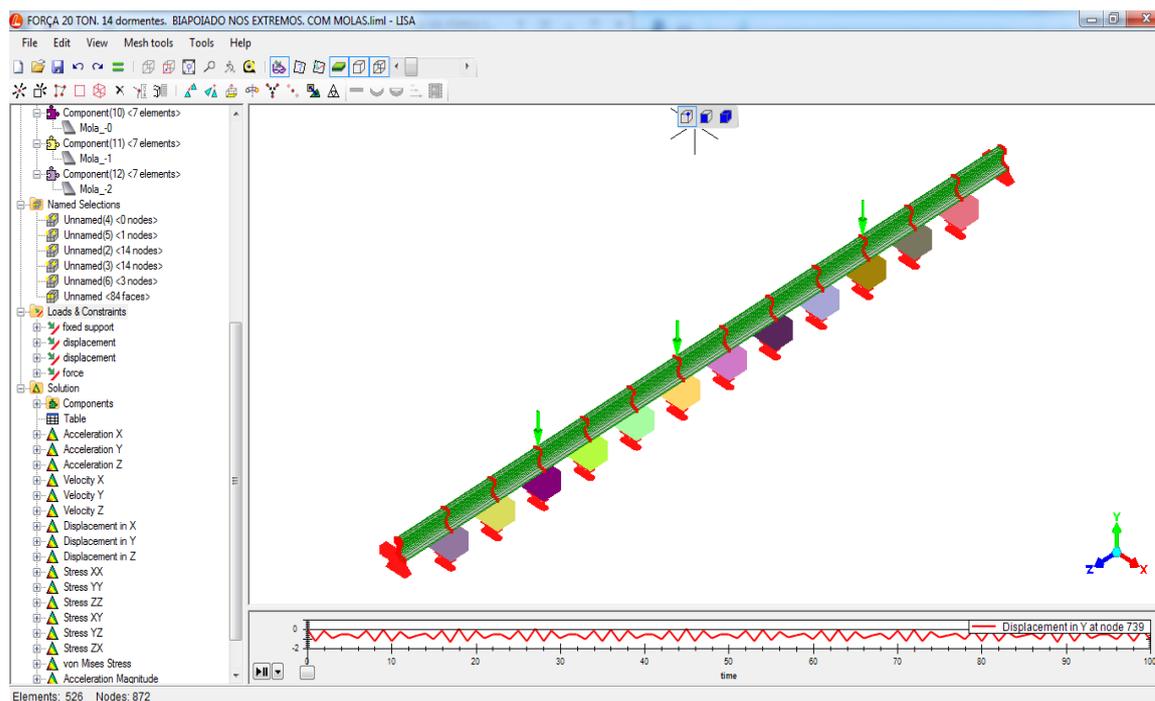


Figura 48 Tela do software LISA da simulação do Trilho TR57, com molas representando aos dormentes apoiados sobre o lastro. Força aplicada 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C (Visão da Superfície).

Fonte: elaborado pelo autor

Para poder realizar a simulação do ensaio do trilho apoiado sobre molas deve-se determinar a constante da mola ( $k$ ) de cada dormente, pelo que, foram considerados os valores de  $L1$  (mm, deflexão do dormente) e  $c$  ( $\text{kgf}/\text{cm}^3$ , coeficiente do lastro/subleito), que são parte do total da tabela de medidas de deflexão do trilho por meio do LDD da pesquisa anterior (PAIVA, AGUIAR E SILVA, 2007). Lembrando que, foram modificadas as unidades desses valores para aquelas que se vem aplicando desde o começo da simulação, de  $\text{kgf}/\text{cm}^3$  para  $\text{kN}/\text{mm}^3$  respectivamente (Tabela 13).

Tabela 13 Parte da tabela utilizada das medidas de deflexão do trilho por meio do LDD

L1 (mm)	L2 (mm)	$c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^3$ )	$c'$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^3$ )	$L1*c$	$L2*c'$	K
4,30	0,7	2,83	24,93	12,99	17,45	0,74

Fonte: PAIVA, AGUIAR E SILVA (2007).

Com o valor do coeficiente do lastro ( $c$ ) igual a  $2,83\text{kgf}/\text{cm}^3$  ou  $0,000278\text{kN}/\text{mm}^3$ , começou-se a determinar o valor da constante da mola, considerando as deflexões obtidas com o LDD ao ser aplicada a carga de 100kN/roda, processo que é mostrado na tabela 14:

Tabela 14 Cálculo da constante da mola (k). Trilho submetido a uma carga de 100kN/roda

Carga de 20 t/eixo - 10t/roda (100kN)			P= c.d	F= P.A	k=F/d
Nº do dormente	Deslocamento do dormente (d) (mm)	Coefficiente do lastro ( c ) (kN/mm <sup>3</sup> )	Pressão na parte inferior do dormente (P) (kN/mm <sup>2</sup> )	Força (F) (kN)	Constante da Mola (K) (kN/mm)
131	1,27	0,0000278	0,0000352	9,6363	7,59
132	1,32	0,0000278	0,0000366	10,0157	7,59
133	1,29	0,0000278	0,0000358	9,7880	7,59
134	1,21	0,0000278	0,0000336	9,1810	7,59
135	1,1	0,0000278	0,0000305	8,3464	7,59
136	0,94	0,0000278	0,0000261	7,1324	7,59
137	0,73	0,0000278	0,0000203	5,5390	7,59
138	0,47	0,0000278	0,0000130	3,5662	7,59
139	0,24	0,0000278	0,0000067	1,8210	7,59
c (kgf/cm <sup>3</sup> )	2,83	Coeficiente do lastro			
A (mm <sup>2</sup> )	273400,000	área de contato trilho-dormente			
A(cm <sup>2</sup> )	2734				

Fonte: elaborado pelo autor

O valor de k, constante da mola, igual a 7.59kN/mm<sup>3</sup> representa o valor médio ou valor característico da constante da mola no local, para determinar o valor efetivo em cada mola se fez várias simulações com vários valores de k até achar aqueles deslocamentos nos dormente conseguidos com o LDD mostrados na Tabela 6. A Tabela 15 apresenta os valores finais de k utilizados no software LISA para realizar a simulação e posteriormente a distribuição da numeração dos dormentes (Figura 49).

Tabela 15 Valores efetivos da constante de cada mola, utilizados na simulação do ensaio no Software LISA 8.0.0, com a carga de 100kN/roda

Nº do dormente	Constante da Mola (k) (kN/mm)
130	7.59
131	7.59
132	8
133	8
134	8
135	8
136	8
137	8
138	8
139	8
140	7.59
141	7.59

Fonte: elaborado pelo autor

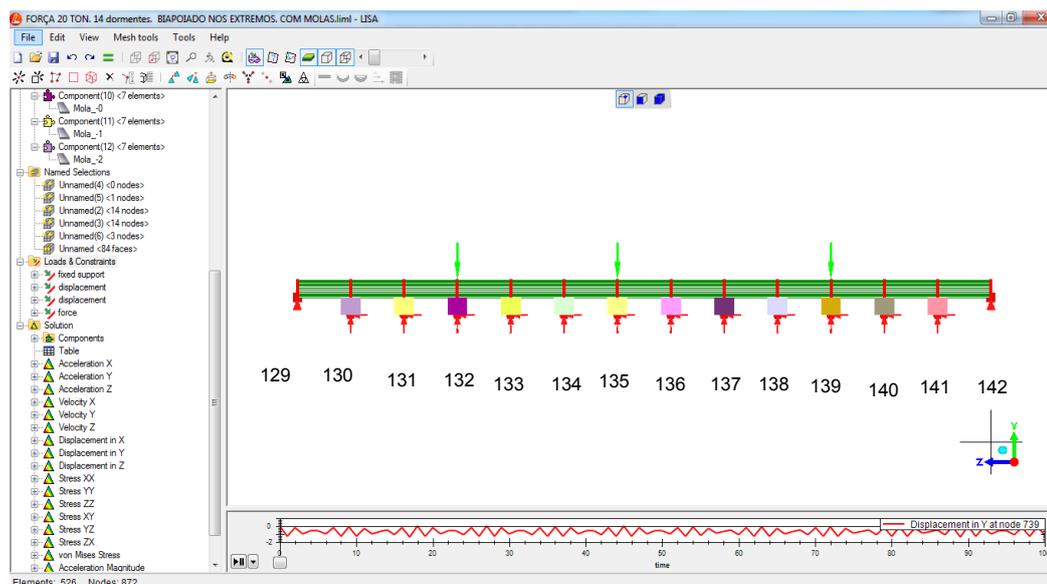


Figura 49 Tela do Software LISA referente à distribuição da numeração dos dormentes  
Fonte: elaborado pelo autor

Uma vez determinadas essas constantes da mola procedeu-se a simulação no software LISA, obtendo assim um deslocamento máximo de 1.393mm (Figura 50) 5.30% maior ao obtido com o LDD na pesquisa de Paiva, Aguiar e Silva (2007) que deu 1.32mm (Tabela 6).

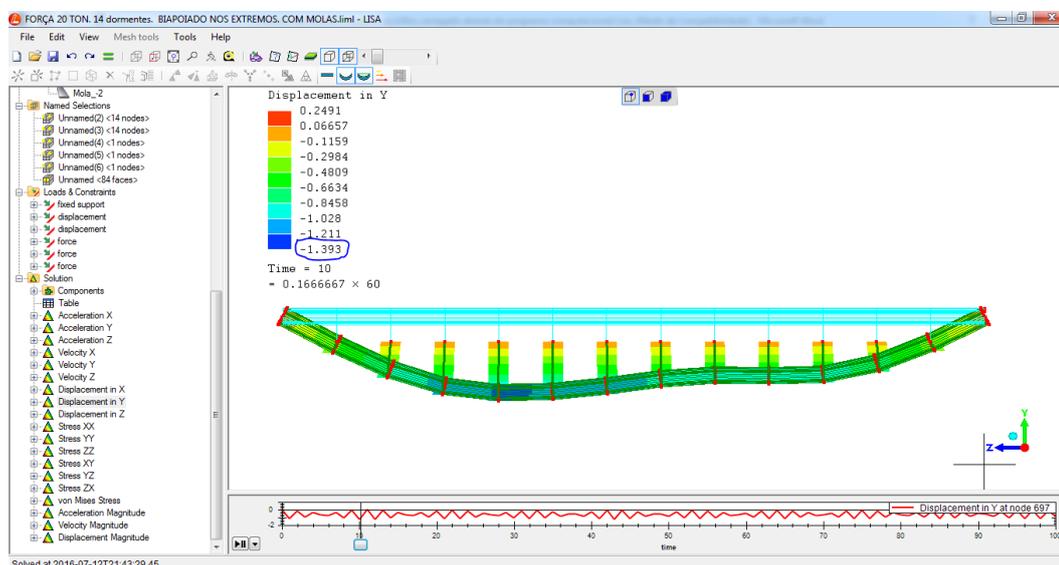


Figura 50 Tela do Software LISA apresentando os resultados de deslocamento da primeira simulação do ensaio com o LDD aplicando a carga de 200kN/eixo. Locomotiva GE U - 20C  
Fonte: elaborado pelo autor

Por sua vez, foi obtida a máxima tensão de tração no patim do trilho por meio do Software LISA (Figura 51) igual a  $\sigma = 0.06312\text{kN/mm}^2$  ( $6.312\text{N/cm}^2$ ).

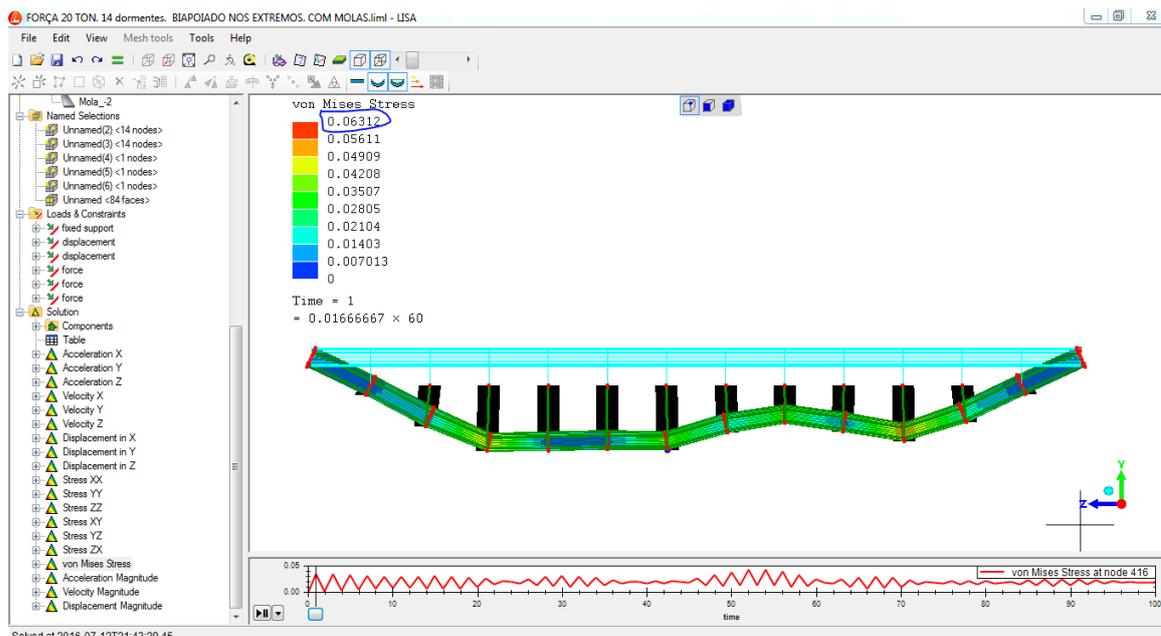


Figura 51 Tela do Software LISA apresentando os resultados da tensão da primeira simulação do ensaio com o LDD aplicando a carga de 200kN/eixo. Locomotiva GEU-20C. Fonte: elaborado pelo autor

Para comparar os resultados da simulação do software LISA com os resultados do modelo convencional de Zimmermann (1888) tem-se as seguintes equações:

$$\sigma = \frac{\left(\frac{P \cdot L}{4}\right) \mu}{W} \quad (8)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{EI}{b \cdot c}} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{\cos x/L - \sin x/L}{e^{x/L}} \quad (10)$$

Onde;

$\sigma$ : máxima tensão a tração no patim do trilho (kN/mm<sup>2</sup>)

P: carga por roda no trilho (kN) = 100kN

L: comprimento elástico do trilho (cm)

W : módulo de resistência no patim do trilho (cm<sup>3</sup>) = 360.65 cm<sup>3</sup>

$\mu$ : fator para considerar o efeito das outras rodas (Tabela 16)

E: módulo de elasticidade do trilho(kg/cm<sup>2</sup>) = 2.1x10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup>

l: momento de inercia (cm<sup>4</sup>) = 2730.40 cm<sup>4</sup>

b: espaçamento efetivo (cm) = 25cm

c; coeficiente do lastro (kg/cm<sup>3</sup>) = 2.83 kg/cm<sup>3</sup>

e: base do expoente x/L.

L é definido como o comprimento elástico da linha elástica, conforme o seguinte:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4x2100000x2730.48}{25x2.83}} = 134.18 \text{ cm}$$

Os valores de  $\mu$  dependem da relação x/L. No ponto de aplicação da carga, x é zero e  $\mu$  assume seu valor máximo, igual a 1. Neste ponto, o momento e a deformação são, portanto, máximos. O valor de  $\mu$  foi determinado por meio da seguinte tabela:

Tabela 16 Determinação do  $\mu$ , para obter o efeito das outras rodas no sistema.

L (cm)	x (cm)	x/L	e <sup>(x/L)</sup>	cos(x/L)	sen(x/L)	U
134,18	0	0	1	1	0	1
134,18	159,4	1,187956476	3,280	0,37356	0,927607534	-0,168898982
134,18	350,5	2,612162766	13,62849425	-0,86310	0,5050414	-0,100387943
Soma						0,730713075

Fonte: elaborado pelo autor

$$\sigma = \frac{\left(\frac{100x134.18}{4}\right)0.730713075}{360.65} = 6.796 \text{ kN/cm}^2 = 0.06796 \text{ kN/mm}^2$$

Fazendo a comparação de ambos resultados se tem que a tensão de tração no patim do trilho pelo software LISA foi 7.13% menor que aquela gerada pela fórmula de Zimmermann, como se apresenta na Tabela 17.

Tabela 17 Comparação da tensão por meio do Método Zimmermann e os Resultados do LISA 8.0.0. Para a carga de 200kN/eixo.

Zimmermann	LISA 8.0.0	dif
kN/mm <sup>2</sup>		%
0,06796	0,06312	-7,13

Fonte: elaborado pelo autor

### 4.3 Simulação da via férrea com carga de 30 ton/eixo por meio do Software LISA 8.0.0.

Para a segunda simulação de uma parte do trilho TR57 de 7020mm de comprimento, submete-o a uma carga de 30t/eixo – 15t/roda (150kN/roda), apoiado sobre quatorze dormentes de madeira, espaçados a 540 mm (de centro a centro). Assim como na simulação anterior, os dormentes apoiados no lastro e subleito são representados por molas no software LISA. Com o valor do coeficiente do lastro ( c ) igual a 2,83kgf/cm<sup>3</sup> ou 0,0000278kN/mm<sup>3</sup>, se começa a determinar o valor da constante da mola, considerando as deflexões obtidas com o LDD ao ser aplicada a carga de 150kN/roda, processo que se mostra na tabela seguinte:

Tabela 18 Cálculo da constante da mola (k). Trilho submetido a uma carga de 150kN/roda.

Carga de 30 t/eixo - 15t/roda (150kN)		P= c.d	F= P.A	k=F/d	
N° do dormente	Deslocamento do dormente (d) (mm)	Coeficiente do lastro ( c ) (kN/mm <sup>3</sup> )	Pressão na parte inferior do dormente (P) (kN/mm <sup>2</sup> )	Força (F) (kN)	Constante da Mola (k) (kN/mm)
131	1,53	0,0000278	0,0000425	11,6091	7,59
132	1,54	0,0000278	0,0000427	11,6849	7,59
133	1,5	0,0000278	0,0000416	11,3814	7,59
134	1,48	0,0000278	0,0000411	11,2297	7,59
135	1,47	0,0000278	0,0000408	11,1538	7,59
136	1,42	0,0000278	0,0000394	10,7744	7,59
137	1,23	0,0000278	0,0000341	9,3328	7,59
138	0,9	0,0000278	0,0000250	6,8289	7,59
139	0,49	0,0000278	0,0000136	3,7179	7,59
c (kgf/cm <sup>3</sup> )	2,83	Coeficiente do lastro			
A (mm <sup>2</sup> )	273400,00	área de contato trilho-dormente			
A(cm <sup>2</sup> )	2734	área de contato trilho-dormente			

Fonte: elaborado pelo autor

Este valor obtido é o valor meio ou valor característico da constante da mola (k) no local, para determinar o valor efetivo em cada mola se fez várias simulações com vários valores de k até achar aqueles deslocamentos nos dormentes conseguidos

com o LDD mostrados na Tabela 6. A seguinte Tabela 19 apresenta os valores finais de k utilizados no software LISA para realizar a simulação:

Tabela 19 Valores efetivos da constante de cada mola, utilizados na Simulação do ensaio no software LISA 8.0.0 com a carga de 150kN/roda.

N° do dormente	Constante da Mola (K) (kN/mm)
130	8
131	8
132	7.59
133	7.59
134	7.59
135	7.59
136	7.59
137	7.59
138	7.59
139	7.59
140	8
141	8

Fonte: elaborado pelo autor

Uma vez colocados os dados de entrada no software LISA, procede-se a simulação pretendida, obtendo assim um deslocamento máximo de 1.613mm (Figura 52), 4.55% maior ao obtido com o LDD na pesquisa de Paiva, Aguiar e Silva (2007) que deu 1.54mm (Tabela 7). Lembrando que as figuras não estão em escala.

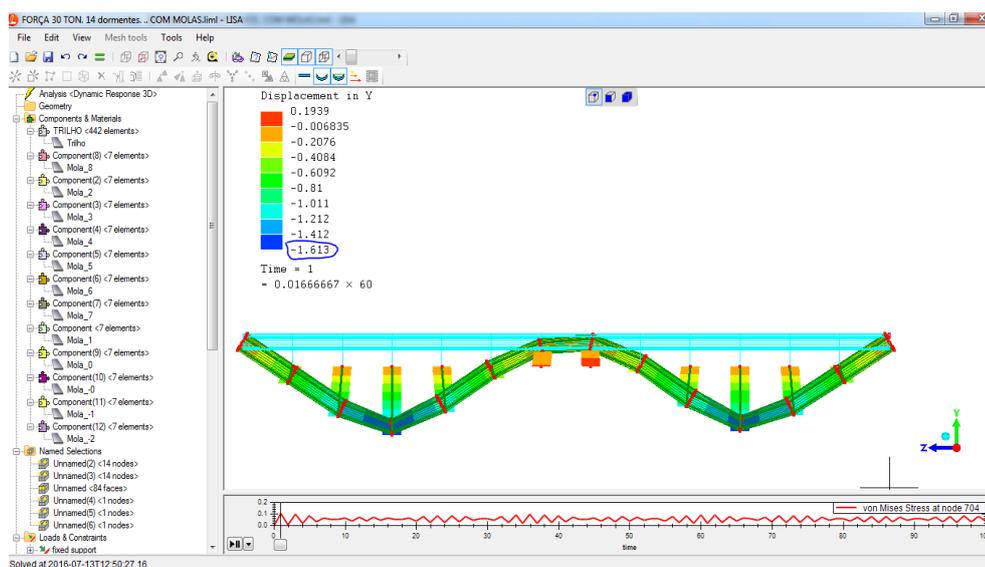


Figura 52 Tela do Software Lisa apresentando os resultados de deslocamento da segunda simulação do ensaio com o LDD aplicando a carga de 300kN/eixo. Locomotiva GE U – 23C.

Fonte: elaborado pelo autor

Também, se obteve a máxima tensão de tração no patim do trilho por meio do Software LISA (Figura 53) igual a  $\sigma=0.1053\text{kN/mm}^2$  ( $10.53\text{kN/cm}^2$ ), agora com a fórmula convencional tem-se que  $\sigma=0.1020\text{kN/mm}^2$  ( $10.20\text{kN/cm}^2$ ). Comparando ambos resultados se tem que a tensão no patim do trilho pelo software LISA foi 3.48% maior que pela fórmula de Zimmermann (Tabela 20).

Tabela 20 Comparação da tensão por meio do Método Zimmermann e os Resultados do LISA 8.0.0. Para a carga de 300kN/eixo.

Zimmermann	LISA 8.0.0	dif
kN/mm <sup>2</sup>		%
0,1020	0,1055	3,48

Fonte: elaborado pelo autor

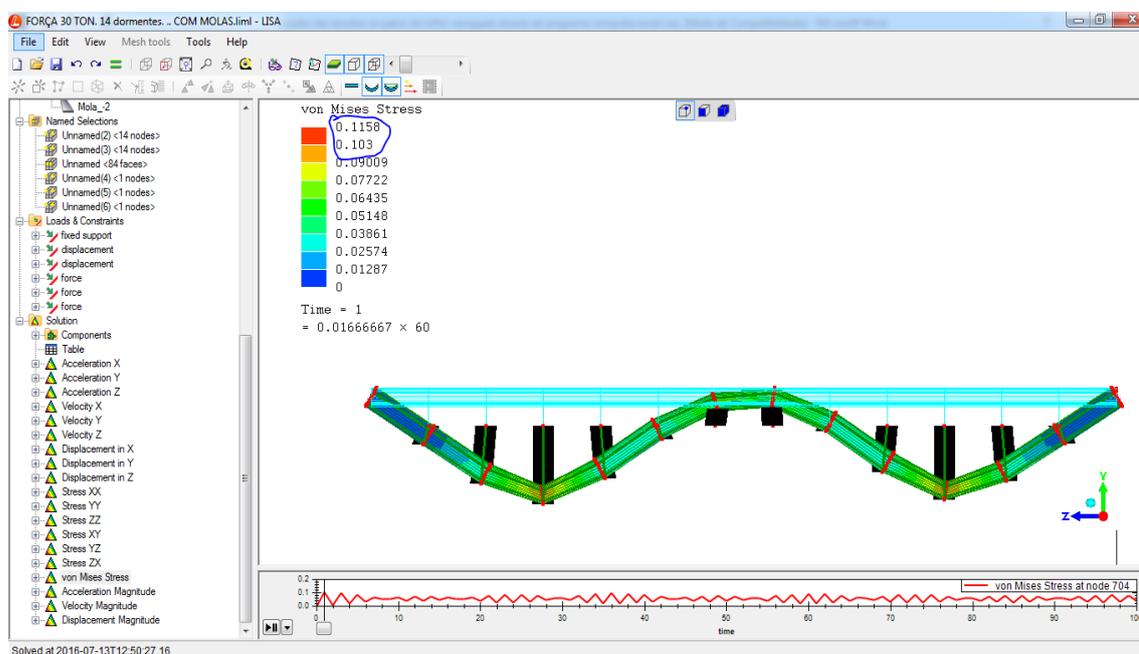


Figura 53 Resultados de tensão da segunda simulação do ensaio com o LDD aplicando a força de 300kN/eixo. Locomotiva GE U-23C.

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.4 Simulação de um trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados por meio do software LISA 8.0.0., submetido a uma carga de 20t/eixo.

Determinaram-se as tensões e deslocamentos ocorrentes no patim do trilho quando submetido à carga da locomotiva GE U-20 com 20t/eixo em presença de um, três e cinco dormentes laqueados, para comparar esses resultados com os resultado

da simulação do item 4.2. Esta comparação se apresenta nas seguintes tabelas (Tabela 21 e Tabela 22).

Tabela 21 Tabela comparativa das Tensões ( $\text{kN/mm}^2$ ) e Deslocamento Vertical (mm) de um Trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados. Força de 200kN/eixo. Considerando a constante da mola (k)

SIMULAÇÃO LISA 8.0.0	Constante da mola (k)	DESLOCAMENTO		TENSÃO	
	kN/mm	d (mm)	dif %	kN/mm <sup>2</sup>	dif %
<b>Dormente Bom</b>	8	1,393	-	0,06312	-
<b>1 Dormente Laqueado</b>	7,59	2,03	45,73	0,104	64,77
	6	2,296	64,82	0,1119	77,28
	4	2,981	114,00	0,1258	99,30
	2	4,289	207,90	0,1712	171,23
	1	5,11	266,83	0,1911	202,76
<b>3 Dormentes laqueados</b>	0	6,37	357,29	0,2432	285,30
<b>5 Dormentes laqueados</b>	0	8,456	507,04	0,293	364,20

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 22 Tabela comparativa das Tensões ( $\text{N/mm}^2$ ) e Deslocamento Vertical (mm) de um trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados. Força de 200kN/eixo. Considerando a constante da mola (k)

SIMULAÇÃO LISA 8.0.0	Constante da mola (k)	DESLOCAMENTO		TENSÃO	
	N/mm	d (mm)	dif %	N/mm <sup>2</sup>	dif %
<b>Dormente Bom</b>	8000	1,393	-	63,12	-
<b>Dormente Laqueado</b>	7590	2,03	45,73	104	64,77
	6000	2,296	64,82	111,9	77,28
	4000	2,981	114,00	125,8	99,30
	2000	4,289	207,90	171,2	171,23
	1000	5,11	266,83	191	202,76
	<b>3 Dormentes laqueados</b>	0	6,37	213,79	243,2
<b>5 Dormentes laqueados</b>	0	8,456	316,55	293	181,73

Fonte: elaborado pelo autor

Para compreender melhor o comportamento do trilho submetido ao efeito de uma carga considerando a constante da mola do dormente, e representar a Tabela 21 e Tabela 22 tem-se os seguintes gráficos:

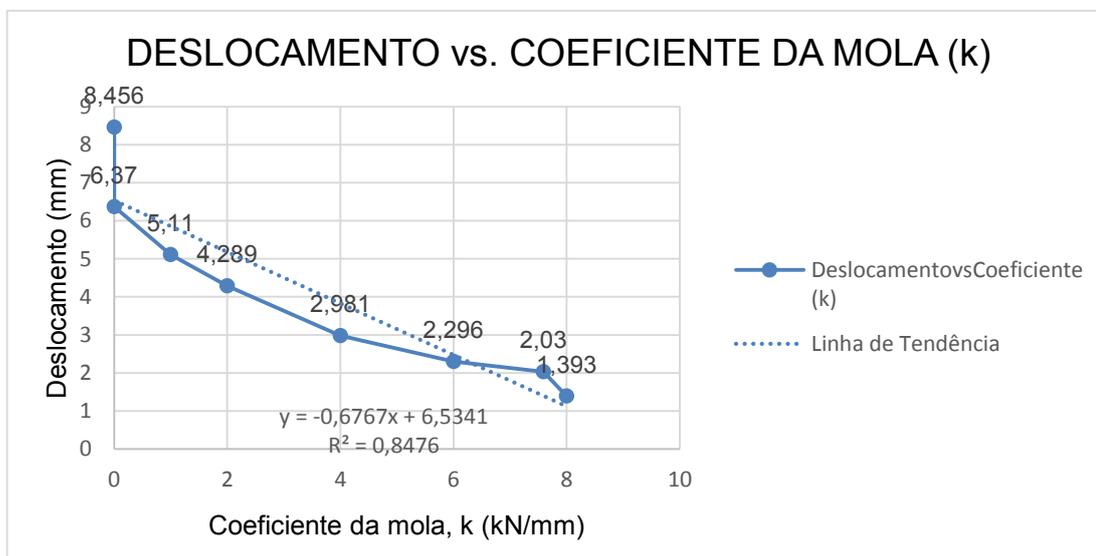


Figura 54 Deslocamento vs. Coeficiente da Mola (k). Força 200kN/eixo  
 Fonte: elaborado pelo autor

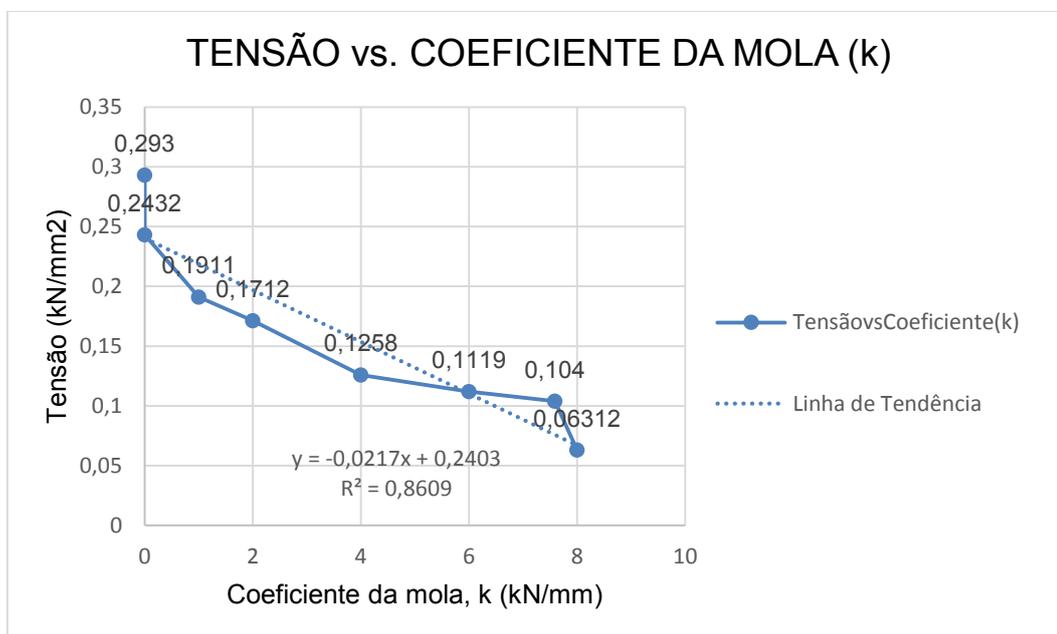


Figura 55 Tensão vs. Coeficiente da Mola (k). Força 200kN/eixo  
 Fonte: elaborado pelo autor

A partir do análise da Tabela 21 e das Figura 54 e Figura 55, percebe-se que a medida que os dormentes ficam comprometidos ou aumenta o número de dormentes laqueados, tanto os deslocamentos como as tensões aumentam de

maneira significativa comprometendo a qualidade e a resistência do trilho, e a segurança da via. Tudo isto comprova que quanto maior seja a constante da mola menor será o deslocamento e tensão que sofre o trilho, e quando menor seja esta constante o trilho sofrerá maiores deslocamentos e tensões.

Fazendo a primeira simulação da via com um dormente laqueado, quando a constante da mola  $k = 4\text{kN/mm}$ , se obteve um deslocamento igual a  $4.289\text{mm}$  (Tabela 21 e Tabela 22), valor muito parecido aquele coletado com o LDD da pesquisa de Paiva; Aguiar e Silva (2007) (Tabela 13) este deslocamento permitiu obter uma tensão máxima de tração nesse ponto (patim do trilho) de  $0.1712\text{kN/mm}^2$  ( $171.20\text{N/mm}^2$ ), como se mostra Figura 55.

Seguidamente, apresenta-se os resultados da simulação no LISA, tanto dos deslocamentos como os das tensões no patim do trilho considerando diferentes valores de constante das molas ( $k$ ). Na Figura 56 se apresenta o resultado do deslocamento vertical no patim do trilho igual a  $2.03\text{mm}$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola é  $k = 7.59\text{kN/mm}$ .

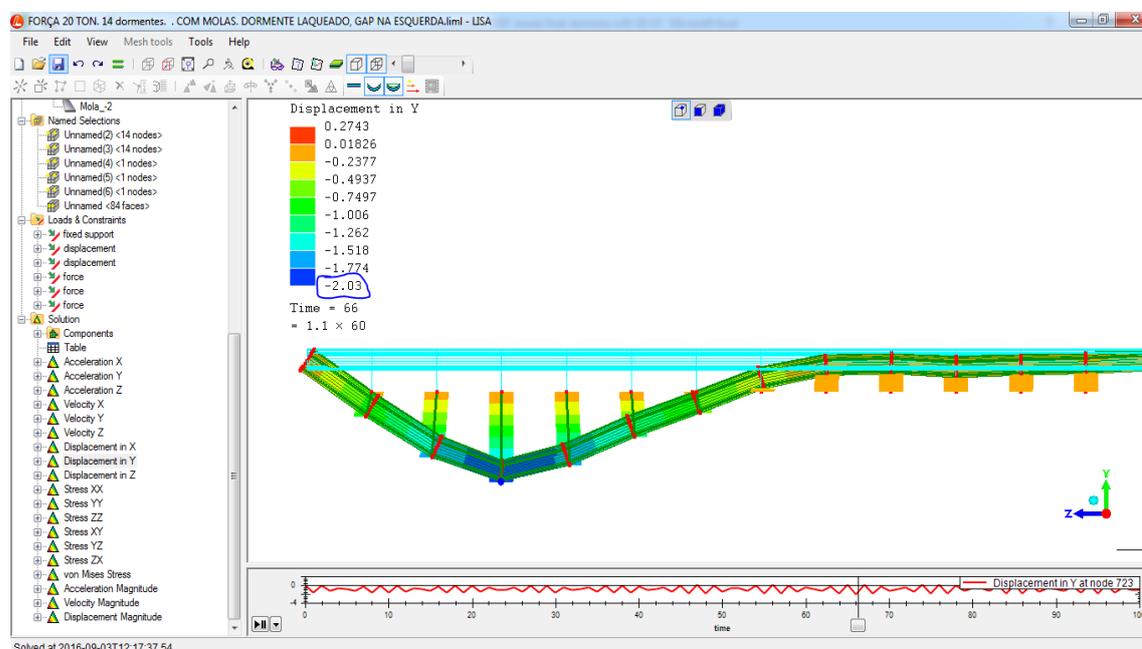


Figura 56 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200\text{kN/eixo}$ ,  $100\text{kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k=7.59\text{ kN/mm}$ .

Fonte: elaborado pelo autor

Já a Figura 57 apresenta o resultado da tensão a tração no patim do trilho igual a  $0.104\text{kN/mm}^2$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola é  $k = 7.59\text{kN/mm}$ .

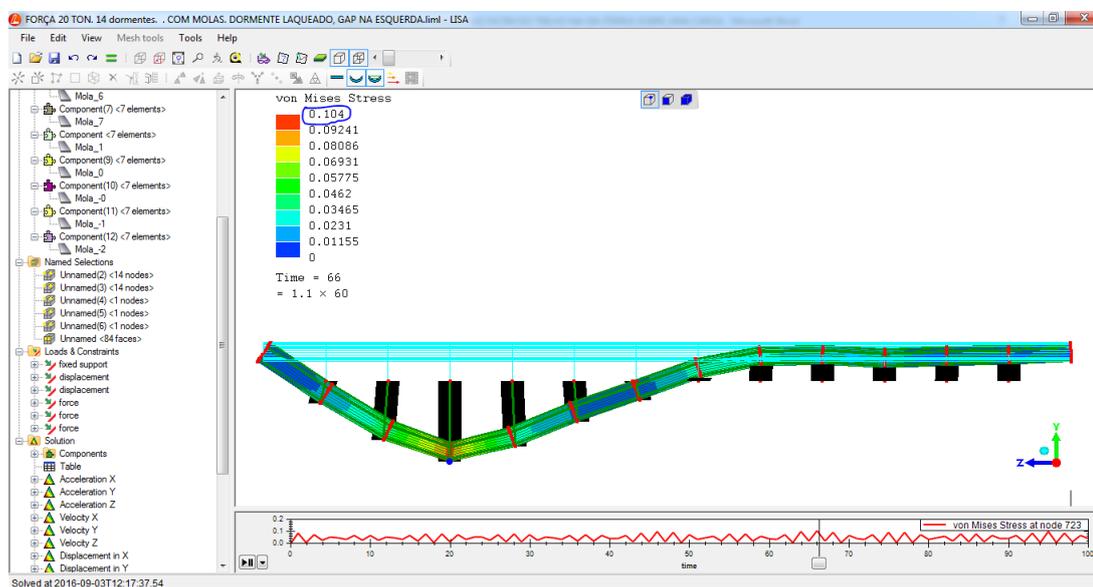


Figura 57 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200\text{kN}/\text{eixo}$ ,  $100\text{kN}/\text{roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k=7.59\text{kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 58 se apresenta o resultado do deslocamento vertical no patim do trilho igual a  $2.296\text{mm}$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola é  $k = 6\text{kN/mm}$ .

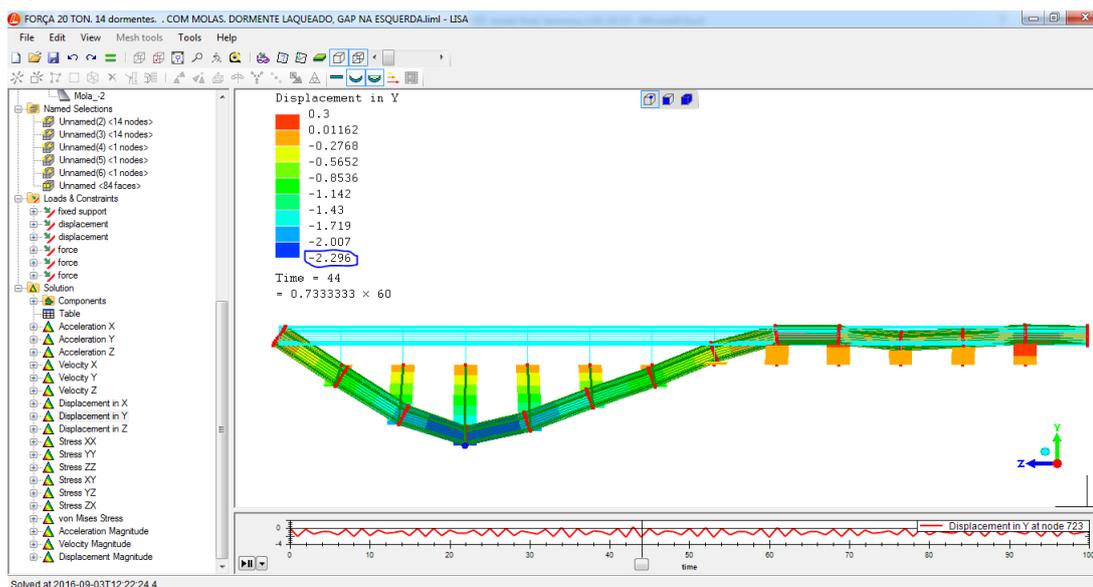


Figura 58 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200\text{kN}/\text{eixo}$ ,  $100\text{kN}/\text{roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k=6\text{kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Por sua parte, a Figura 59 apresenta o resultado da tensão a tração no patim do trilho igual a  $0.1119 \text{ kN/mm}^2$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola é  $k = 6 \text{ kN/mm}$ .

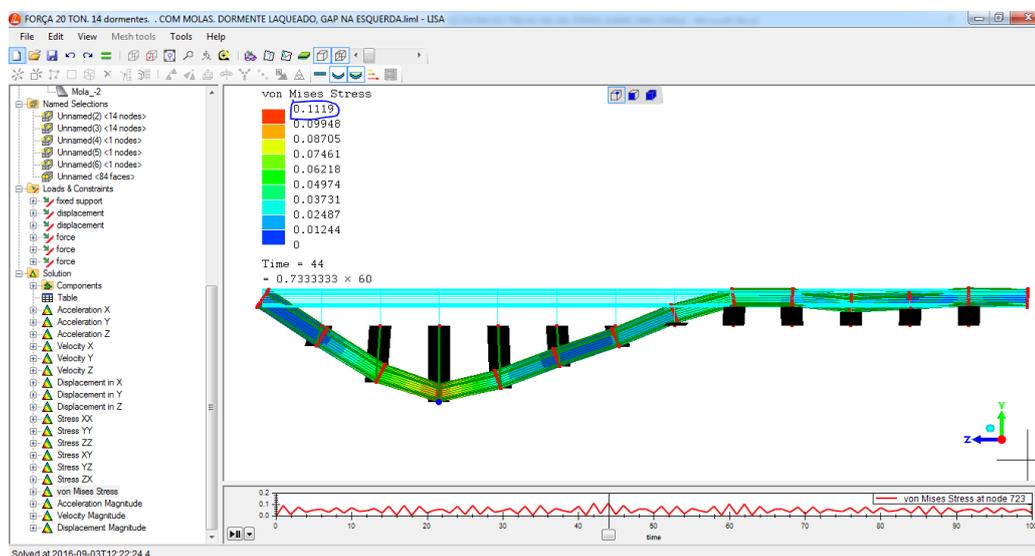


Figura 59 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200 \text{ kN/eixo}$ ,  $100 \text{ kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k = 6 \text{ kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 60 se apresenta o resultado do deslocamento vertical no patim do trilho igual a  $2.981 \text{ mm}$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola é  $k = 4 \text{ kN/mm}$ .

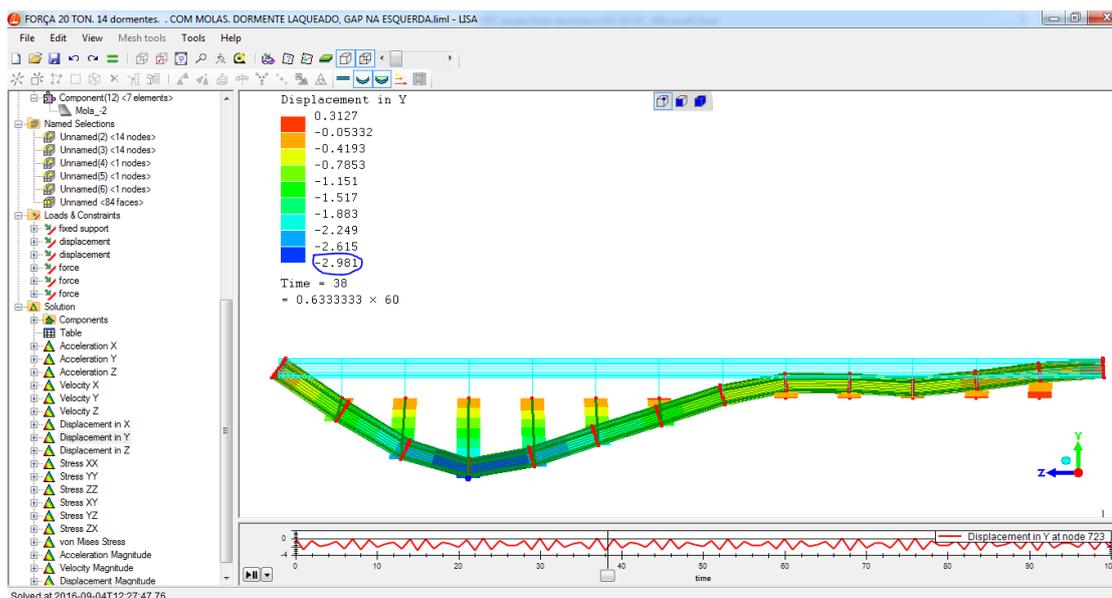


Figura 60 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200 \text{ kN/eixo}$ ,  $100 \text{ kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k = 4 \text{ kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Já a Figura 61 apresenta o resultado da tensão a tração no patim do trilho igual a  $0.1258\text{kN/mm}^2$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola es  $k = 4\text{kN/mm}$ .

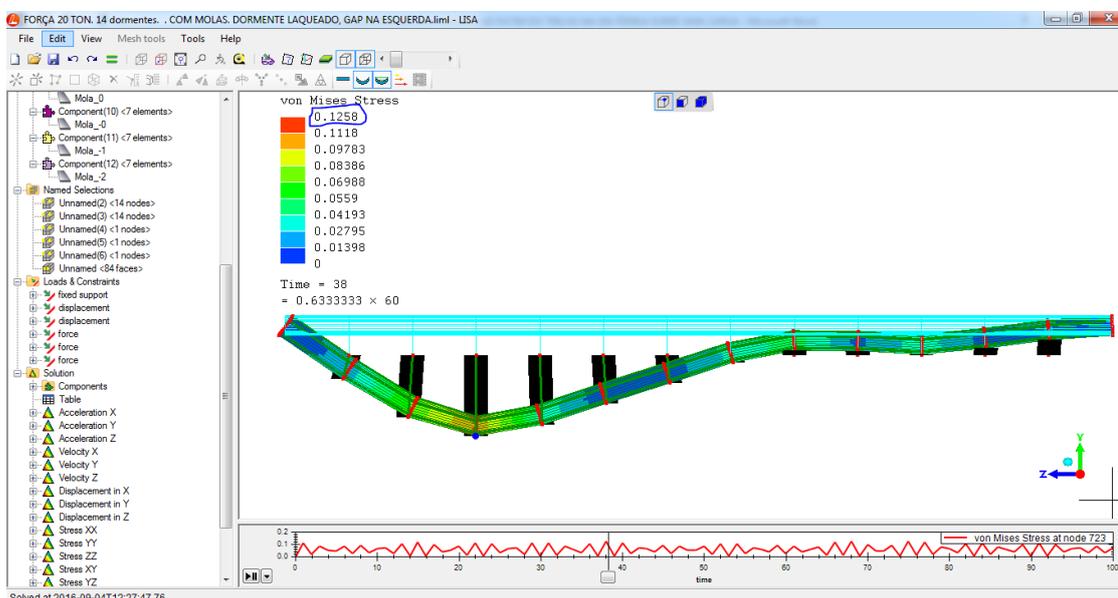


Figura 61 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200\text{kN/eixo}$ ,  $100\text{kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k = 4\text{ kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 62 se apresenta o resultado do deslocamento vertical no patim do trilho igual a  $4.289\text{mm}$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola es  $k = 2\text{kN/mm}$ .

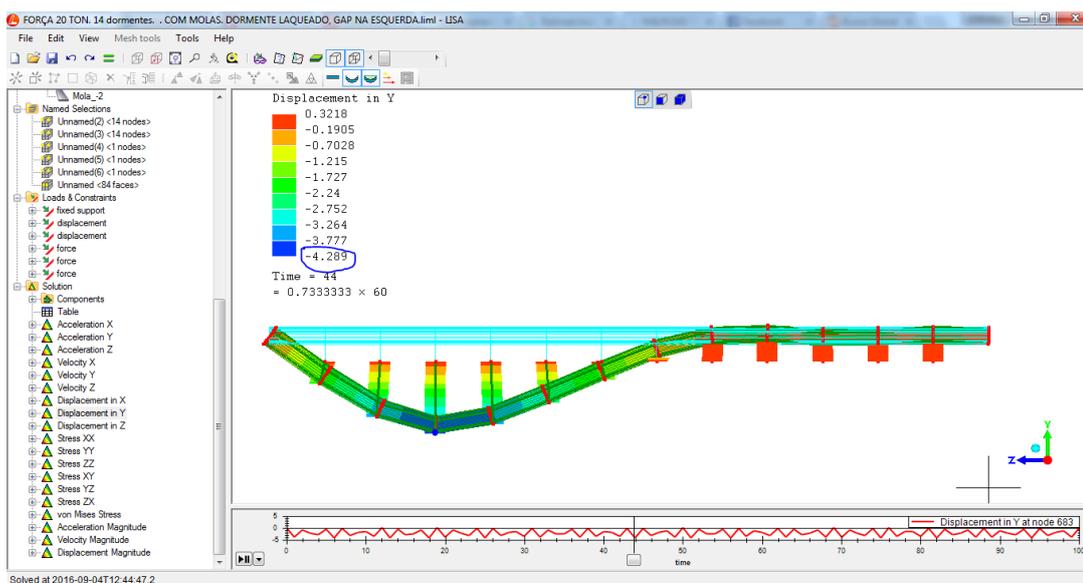


Figura 62 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200\text{kN/eixo}$ ,  $100\text{kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k=2\text{ kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Já a Figura 63 apresenta o resultado da tensão a tração no patim do trilho igual a  $0.1712 \text{ kN/mm}^2$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola es  $k = 2 \text{ kN/mm}$ .

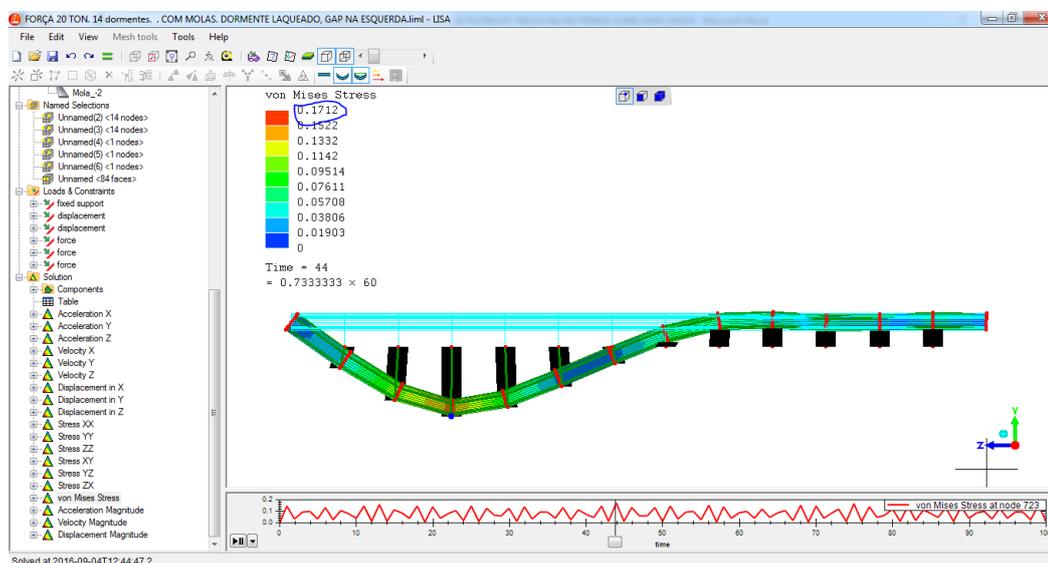


Figura 63 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200 \text{ kN/eixo}$ ,  $100 \text{ kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k = 2 \text{ kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 64 se apresenta o resultado do deslocamento vertical no patim do trilho igual a  $5.11 \text{ mm}$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola es  $k = 1 \text{ kN/mm}$ .

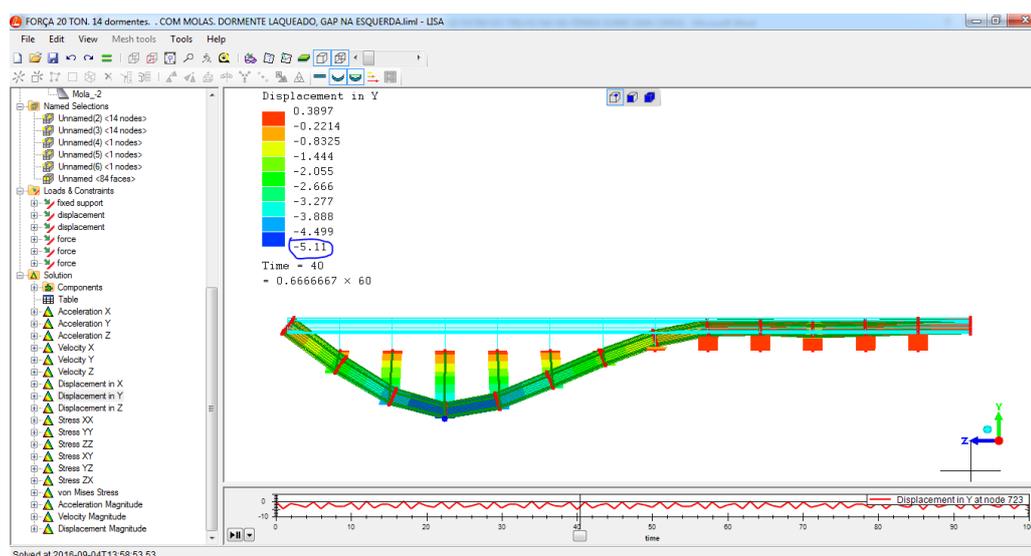


Figura 64 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200 \text{ kN/eixo}$ ,  $100 \text{ kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k=1 \text{ kN/mm}$ .

Fonte: elaborado pelo autor

Já a Figura 65 apresenta o resultado da tensão a tração no patim do trilho igual a  $0.1911 \text{ kN/mm}^2$ , em uma via com um dormente laqueado, quando a constante da mola es  $k = 1 \text{ kN/mm}$ .

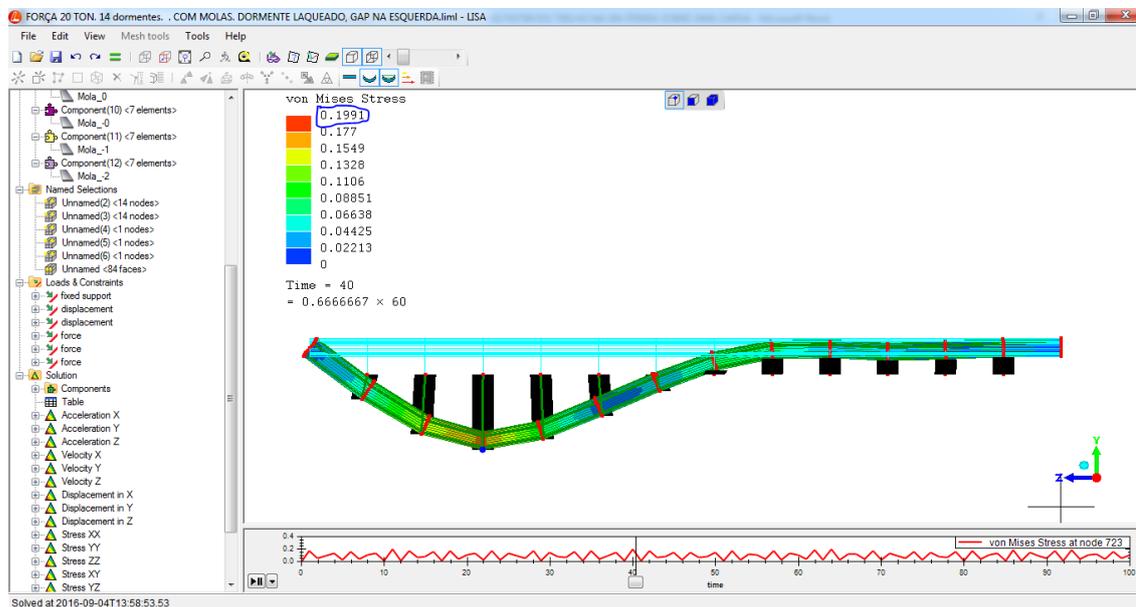


Figura 65 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de um dormente laqueado aplicando a força de  $200 \text{ kN/eixo}$ ,  $100 \text{ kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k = 1 \text{ kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 66 se apresenta o resultado do deslocamento vertical no patim do trilho igual a  $6.37 \text{ mm}$ , em uma via com três dormentes laqueados, quando a constante da mola es  $k = 0 \text{ kN/mm}$ .

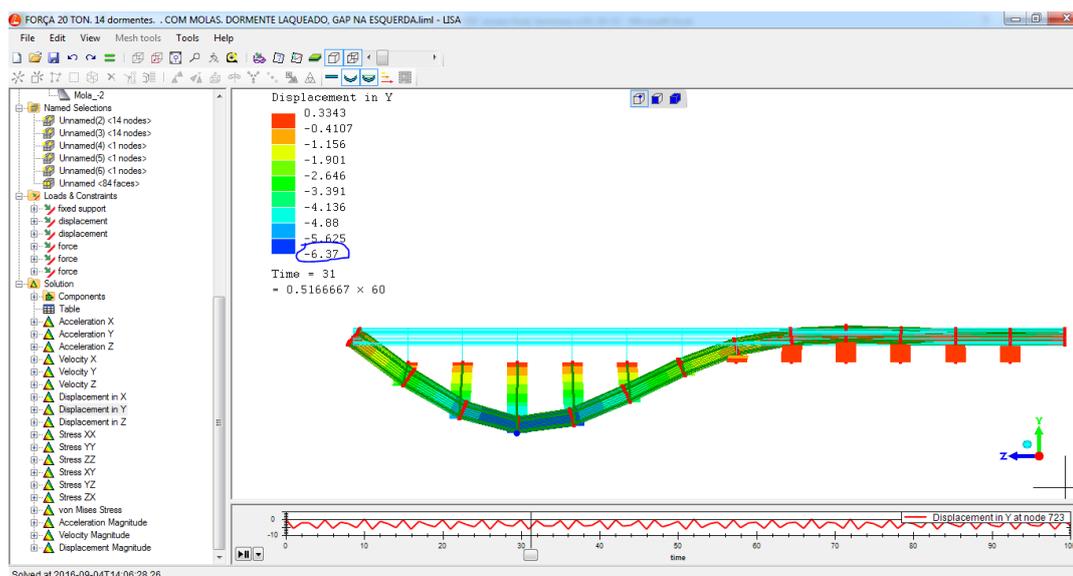


Figura 66 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de três dormentes laqueados aplicando a força de  $200 \text{ kN/eixo}$ ,  $100 \text{ kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k = 0 \text{ kN/mm}$ .

Fonte: elaborado pelo autor

Já a Figura 67 apresenta o resultado da tensão a tração no patim do trilho igual a  $0.2432\text{kN/mm}^2$ , em uma via com três dormentes laqueados, quando a constante da mola es  $k = 0\text{kN/mm}$ .

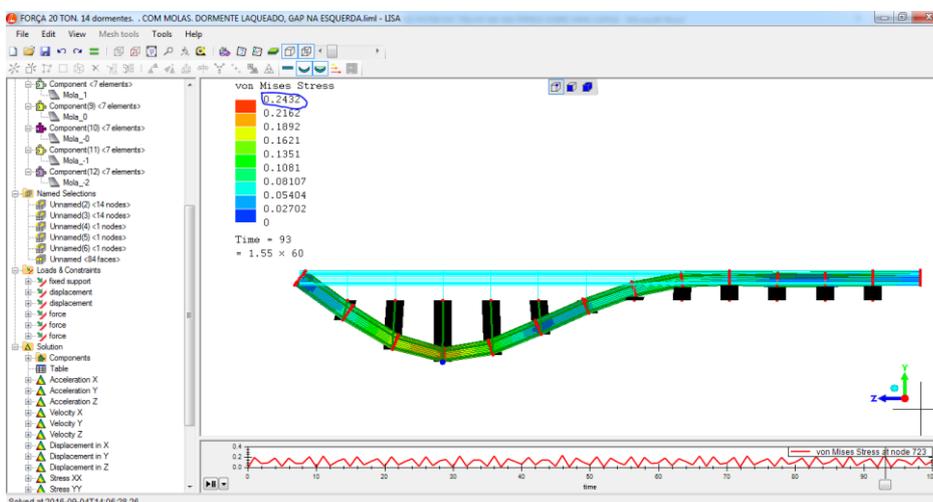


Figura 67 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de três dormentes laqueados aplicando a força de  $200\text{kN/eixo}$ ,  $100\text{kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k=0\text{kN/mm}$ .  
Fonte: elaborado pelo autor

Por sua parte, na Figura 68 se apresenta o resultado do deslocamento vertical no patim do trilho, igual a  $8.456\text{mm}$ , em uma via com cinco dormentes laqueados, quando a constante da mola es  $k = 0\text{kN/mm}$ .

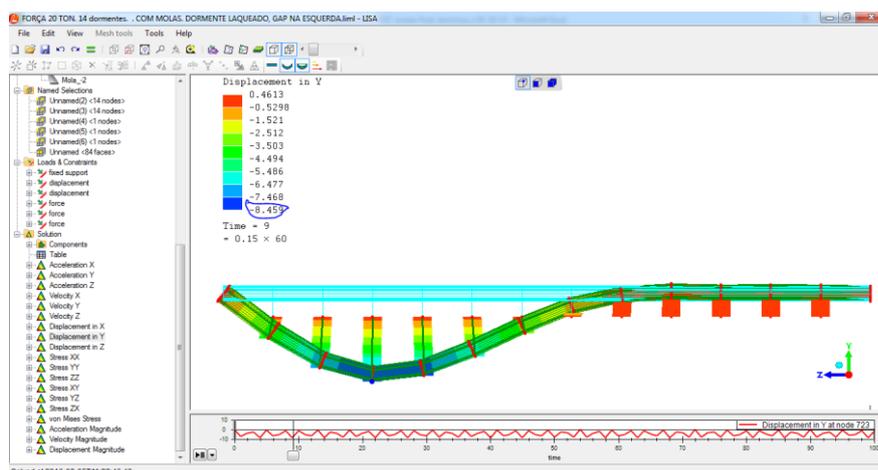


Figura 68 Tela dos resultados do Deslocamento no patim do trilho em presença de cinco dormentes laqueados aplicando a força de  $200\text{kN/eixo}$ ,  $100\text{kN/roda}$ . Locomotiva GE U-20C.  $k = 0\text{ kN/mm}$ .

Fonte: elaborado pelo autor

Para concluir, a Figura 69 apresenta o resultado da tensão da tração no patim do trilho igual a  $0.293\text{kN/mm}^2$ , em uma via com cinco dormentes laqueados, quando a constante da mola es  $k = 0\text{kN/mm}$ .

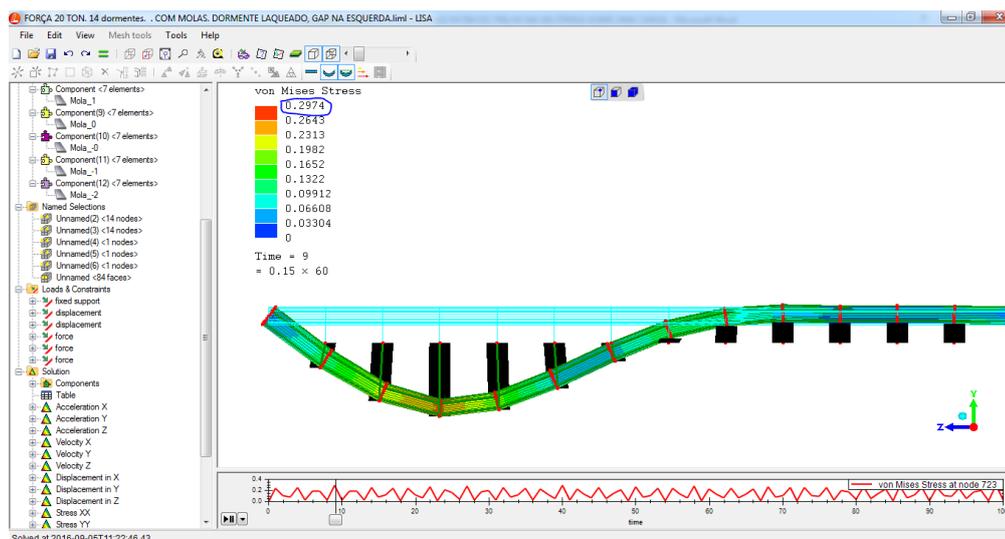


Figura 69 Tela dos resultados da Tensão no patim do trilho em presença de cinco dormentes laqueados aplicando a força de 200kN/eixo, 100kN/roda. Locomotiva GE U-20C.  $k = 0$  kN/mm

#### 4.5 Simulação de um trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados por meio do software LISA 8.0.0., submetido a uma carga de 30t/eixo.

Semelhante ao item anterior (4.4), determinaram-se as tensões e deslocamentos ocorrentes no patim do trilho quando submetido à carga da locomotiva GE U-23 com 30t/eixo em presença de um, três e cinco dormentes laqueados, para comparar esses resultados com os resultados da simulação do item 4.3. Esta comparação se apresenta na seguinte Tabela 23.

Tabela 23 Tabela comparativa das Tensões ( $\text{kN/mm}^2$ ) e Deslocamentos (mm) de um Trilho em presença de um, três e cinco dormentes laqueados. Força de 300kN/eixo. Considerando a constante da mola (k)

SIMULAÇÃO LISA 8.0.0	Constante da mola (k)	DESLOCAMENTO		TENSÃO	
	kN/mm	d (mm)	dif %	$\text{kN/mm}^2$	dif %
<b>Dormente Bom</b>	7,59	1,613	-	0,1053	-
<b>1 Dormente Laqueado</b>	7	2,348	45,57	0,1585	50,52
	6	2,482	53,87	0,1653	56,98
	4	2,874	78,18	0,1824	73,22
	2	3,456	114,26	0,2065	96,11
	1	3,819	136,76	0,2280	116,52
<b>3 Dormentes laqueados</b>	0	4,342	169,19	0,2800	131,15
<b>5 Dormentes laqueados</b>	0	5,923	267,20	0,3100	175,50

Fonte: elaborado pelo autor

Para compreender melhor o comportamento do trilho submetido ao efeito de uma carga considerando a constante da mola do dormente, e representar a Tabela 23 tem-se os seguintes gráficos:

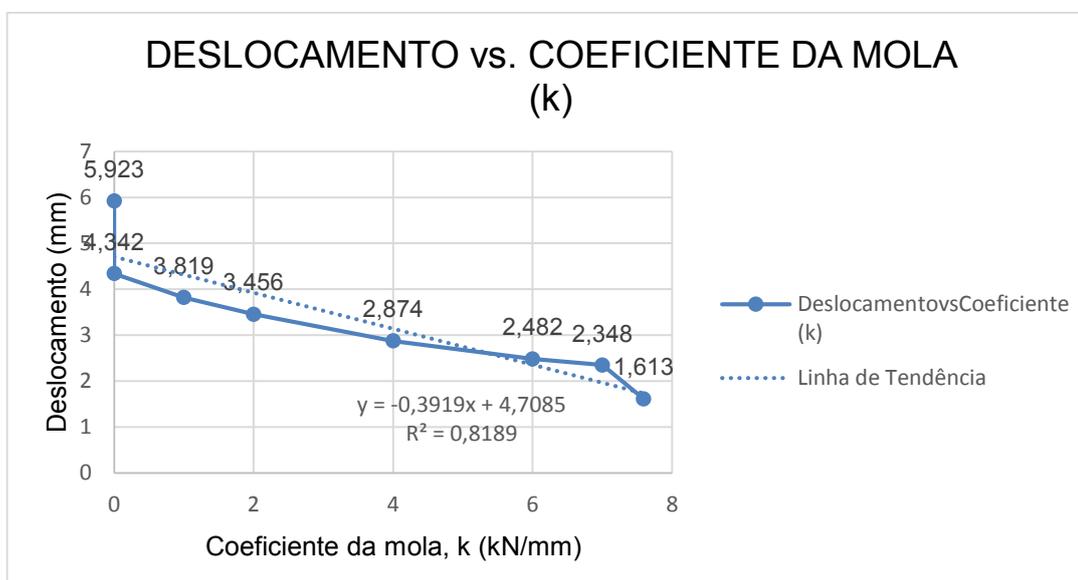


Figura 70 Deslocamento vs. Coeficiente da Mola (k). Força 300kN/eixo.  
 Fonte: elaborado pelo autor

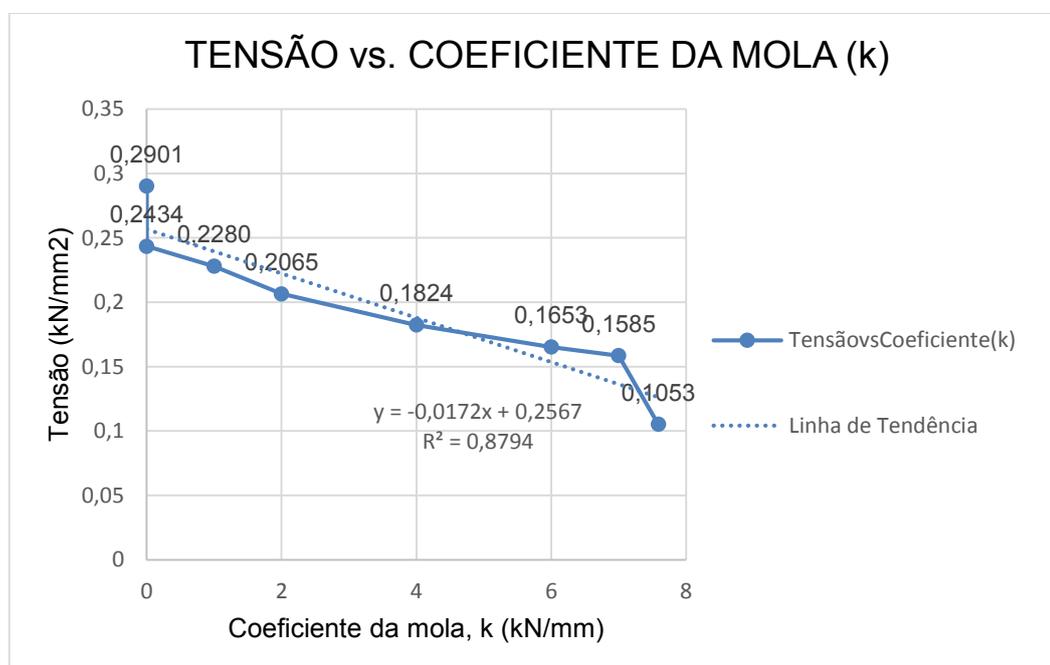


Figura 71 Tensão vs. Coeficiente da Mola (k). Força 300kN/eixo.  
 Fonte: elaborado pelo autor

A partir do análise da Tabela 23 e da Figura 70 e Figura 71 percebe-se que a medida que os dormentes laqueados aumentam, tanto os deslocamentos como as

tensões aumentam de maneira significativa comprometendo a qualidade e a resistência do trilho, e a segurança da via. Tudo isto comprova que quanto maior for a constante da mola, menor será o deslocamento e tensão que sofre o trilho, e quanto menor for esta constante, maiores serão os deslocamentos e tensões sofridas pelo trilho.

#### **4.6 Avaliação do trilho nas condições da ocorrência de um, três e cinco dormentes Laqueados**

Para realizar a verificação de fadiga do trilho ensaiado apoiou-se no Diagrama de Goodman (BUDYNAS E NISBETT, 2011). Para isso, procurou-se as propriedades do trilho tipo TR57 com resistência à tração igual a 965 Mpa ( $S_{ut}$ ) e tensão mínima de escoamento 483 Mpa ( $S_y$ ), especificação DNIT (ETS – 006: Furacão de Trilhos). Para determinar os valores da equação do Marin ( $S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_e'$ ), calculasse por separado cada um deles como se apresenta a continuação (BUDYNAS E NISBETT, 2011).

##### **Fator de Superfície $k_a$**

Entrando na Tabela 2 com o acabamento superficial laminado a quente obtém-se um valor de  $a = 57,7$  e do expoente  $b = 0,718$ . Substituindo dados na equação 2:

$$k_a = 57,7 * 965^{-0,718} = 0,412$$

##### **Fator de Tamanho $k_b$**

Como  $51 < d < 254\text{mm}$   $\longrightarrow$   $51 < 168,28$  (altura do Trilho TR57)  $< 254\text{mm}$

$$k_b = 1,5 * 168,28^{-0,157} = 0,6708$$

##### **Fator de Carregamento $k_c$**

Apresenta-se valores médios do fator de carregamento:

$$k_c = 1 \text{ (Flexão)}$$

##### **Fator de Temperatura $k_d$**

Como a temperatura não é conhecida se assume um valor de

$$Kd = 1$$

### **Fator de Confiabilidade ke**

Considerando um valor de 95% de confiabilidade da Tabela 4, tem-se um valor da variante de transformação  $Z_a = 1,645$ . Substituindo valores na equação 4 tem-se:

$$ke = 1 - 0,8(1,645) = 0,868$$

### **Fator de Efeitos Diversos kf**

$$kf = 1$$

### **Limite de Endurança S'e**

Da equação 6 tem-se  $S'_e = 0,50 S_{ut}$ , já que  $S_{ut} < 1400\text{Mpa}$ , Onde  $S_{ut} = 965$  Mpa, por tanto:

$$S'_e = 0,50 * 965 = 482,50 \text{ Mpa}$$

### **Limite de Resistencia à fadiga**

$$Se = 0,412 * 0,6708 * 1 * 1 * 0,868 * 1 * 482,50 = 115,24 \text{ Mpa}$$

Uma vez determinados todos os dados ( $S_{ut}$ ,  $S_e$ ,  $S_y$ ,  $\sigma_m$ ), se realiza a Tabela 24 para realizar o diagrama de Goodman com o trilho submetido à carga de 200kN/eixo (Figura 72). Por sua vez se apresenta a Tabela 25 e a Figura 73 da análise de fadiga do trilho TR57 submetido a uma carga de 300 kN/eixo.

Tabela 24 Dados para o Diagrama de Goodman. Trilho submetido à carga 200kN/eixo

Mpa (N/mm <sup>2</sup> )	
<b>Se</b>	115,54
<b>Sy</b>	483
<b>Su</b>	965
<b>Tensão Média Ensaio Labedin</b>	134,5
<b>Tensão Média GE U-20C</b>	31,56
<b>Tensão Média 1 Dormente Laqueado</b>	85,6
<b>Tensão Média 3 Dormente Laqueado</b>	121,6
<b>Tensão Média 5 Dormente Laqueado</b>	146

Fonte: elaborado pelo autor

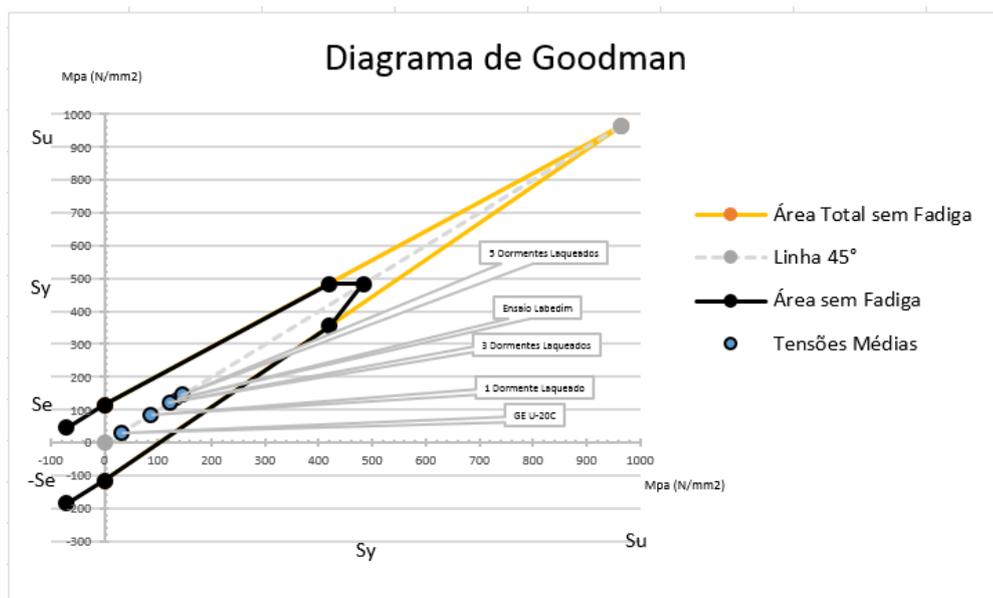


Figura 72 Diagrama de Goodman. Avaliação de fadiga do trilho TR57 submetido à carga de 200kN/eixo.

Tabela 25 Dados para o Diagrama de Goodman. Trilho submetido à carga 300kN/eixo

Mpa (N/mm <sup>2</sup> )	
<b>Se</b>	115,54
<b>Sy</b>	483
<b>Su</b>	965
<b>Tensão Média Ensaio Labedim</b>	134,5
<b>Tensão Média GE U-23C</b>	105,30
<b>Tensão Média 1 Dormente Laqueado</b>	103,25
<b>Tensão Média 3 Dormente Laqueado</b>	121,70
<b>Tensão Média 5 Dormente Laqueado</b>	145,05

Fonte: elaborado pelo autor

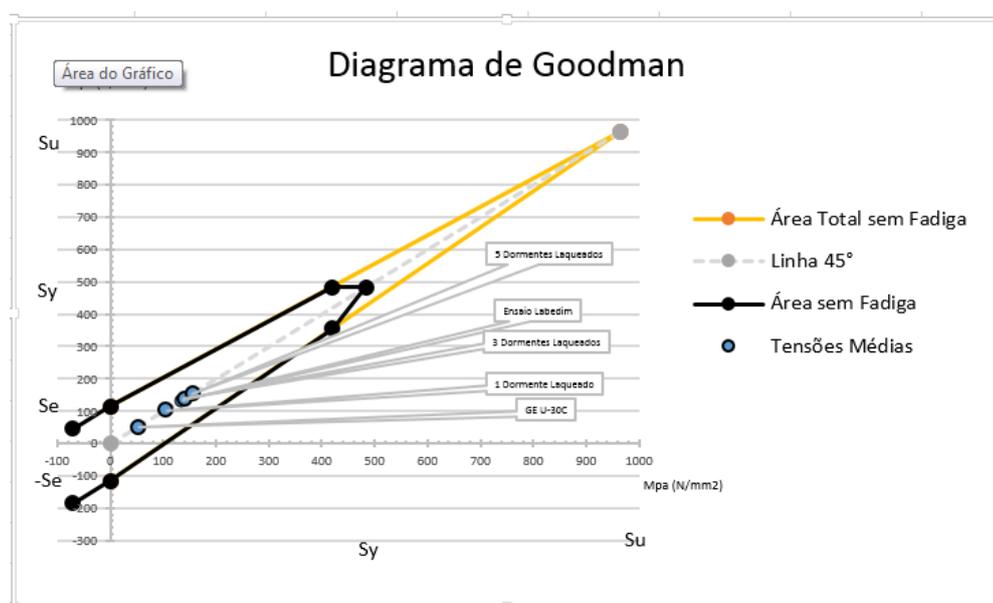


Figura 73 Diagrama de Goodman. Avaliação de fadiga do trilho TR57 submetido à carga de 300kN/eixo.

Analisando os diagramas das Figuras 72 e 73 pode-se verificar que os trilhos TR57 ensaiados tanto no laboratório como nas situações avaliadas na pesquisa de Paiva; Aguiar e Silva (2007), caso estivessem expostos às cargas por eixos consideradas e na via ocorressem um, três ou cinco dormentes laqueados não sofreriam fadiga, já que as tensões médias obtidas na simulação computacional resultaram em valores que estão dentro da área limitada sem fadiga. No Anexo II apresenta-se de forma detalhada o processo de montagem dos diagramas mostrados nas Figuras 72 e 73.

O conteúdo desta pesquisa permitiu o desenvolvimento de dois artigos, os quais foram submetidos a dois jornais qualificados; o primeiro deles foi o *The International Journal of Railway Technology (IJRT)*, que é um jornal internacional dedicado à pesquisa, desenvolvimento e aplicação no âmbito dos sistemas ferroviários (Anexo III). Por sua vez, o Anexo IV apresenta o segundo artigo submetido no *Canadian Journal of Civil Engineering (CJCE)*, o qual é reconhecido como o jornal técnico oficial da Sociedade Canadense de Engenharia Civil.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O estudo realizado serve como base bibliográfica para se entender o comportamento a flexão de um trilho em condições de carga variadas. As conclusões retiradas a partir desta pesquisa têm o intuito de contribuir para um projeto de vias férreas mais eficientes, pois ao conhecer as deformações e tensões que sofrem os trilhos, permite-se o conhecimento adequado de um trilho ao longo de sua vida útil e, conseqüentemente, reduzidos custos de manutenção. Finalmente, o propósito deste trabalho foi o de proporcionar uma melhor compreensão deste tema complexo para trazer uma melhoria no projeto de trilhos ferroviários, aplicando uma tecnologia de ponta, como o software LISA. Espera-se que o assunto gere mais interesse entre aos pesquisadores e engenheiros no campo de transporte voltada às linhas férreas e auxilie no desenvolvimento ferroviário nacional.

A realização de todos os estudos e atividades que compuseram este trabalho de pesquisa permitem as seguintes conclusões:

- ✓ O ensaio realizado permitiu a calibração do programa computacional de análise da deflexão de um trilho e, a partir dos parâmetros de calibração se define a situação de dormente laqueado e os esforços que o trilho se submete durante a passagem dos eixos ferroviários.
- ✓ Com este objetivo, realizou-se uma série de revisões bibliográficas em artigos, teses e livros publicados acerca do assunto e a abordagem do “tensão nos trilhos” sobre o conhecimento envolvido na elaboração de ensaios para avaliações do mesmo.
- ✓ O trilho é um componente fundamental no sistema. É tecnicamente considerado o principal elemento de suporte e guia dos veículos ferroviários. Para otimizar o seu uso são necessários estudos de sua vida útil e formas de tensões e deslocamentos, pois a segurança e a eficiência devem sempre ser mantidas.

- ✓ Na pesquisa comprovou-se que quanto maior é a carga aplicada no meio do vão do trilho TR57, maior será o deslocamento sofrido nesse ponto, e conforme a frequência de trens é maior, esse aumento do deslocamento evolui de forma crescente.
- ✓ Quando as vias não possuem a camada de sublastro, nos trechos com drenagem deficiente ocorrendo a saturação da plataforma e consequentemente a cravação do lastro, deixando de existir na interface dormente-lastro o pleno contato entre elas, trazendo o fenômeno conhecido como “GAP”.
- ✓ A existência do fenômeno conhecido como “GAP” entre a base do dormente e a superfície do lastro, induz a aumentos de impactos na passagem dos trens, podendo levar à ruptura dos dormentes e solicitações excessivas nas fixações e placas de apoio.
- ✓ Na simulação realizada com o programa LISA em situação semelhante àquela do ensaio de campo apresentado por Paiva, Aguiar e Silva (2007), intitulada Evaluation of Track/Ballast Behavior Under Increased Axle Load: Measuring Deflections on Track, foram obtidos resultados muito parecidos aos obtidos pelo LDD, na ordem de 1.50 % de discrepância.
- ✓ O estudo realizado serve como análise prévia para se entender o comportamento da flexão de um trilho em condições de carga variadas e de carregamento experimental.
- ✓ O ensaio realizado permitiu a calibração do programa computacional de análise da deflexão de um trilho, em situações específicas como a análise das tensões a tração no patim do trilho, ocorrentes na sequência de um, três e cinco dormentes laqueados. Onde se observou o aumento das tensões e deslocamentos à medida que o número de dormentes laqueados aumenta. Assim, o estudo contribui para o entendimento dos limites que o trilho pode estar sujeito. Ressaltando que a medida que aumenta o movimento vertical dos dormentes, estes não fornecem sustentação ao trilho comprometendo sua capacidade de suportar os esforços proporcionados pela passagem dos trens.

- ✓ A partir dos resultados obtidos pode-se observar que os valores das tensões não excedem o limite de escoamento, que é da ordem de 483 MPa mínimo, ficando dentro do limite do Diagrama de Goodman. Verificou-se, também, a resistência à fadiga, onde o trilho TR57) não sofreu fadiga quando sujeito a tais situações.
- ✓ Finalmente, o propósito deste trabalho foi o de proporcionar simulações aplicando uma tecnologia de ponta, como o software LISA para um estudo exclusivo do trilho e dos seus deslocamentos verticais. Enfatizando que o Software LISA gerou resultados aceitáveis, muito parecidos aos resultados do laboratório e aqueles gerados pelo modelo clássico (BOEF).
- ✓ Enfim, embora o aperfeiçoamento progressivo dos modelos estruturais seja importante para se elevar a confiabilidade dos modelos de previsão de desempenho mecanístico-empíricos, anteriormente a maiorias das incertezas se encontravam na calibração experimental dos modelos. Assim, antes de aplicar esses modelos, é fundamental reavaliarem-se os fatores de calibração utilizando-se os dados de desempenho locais ou regionais disponíveis.

O desenvolvimento deste trabalho e as conclusões permitem propor sugestões para pesquisas que poderão complementar ou expandir os resultados aqui obtidos. Como temas, podem-se sugerir:

- ✓ Fazer mais pesquisas de Inovações que tragam mais eficiência ao transporte, e assim poder gerar pessoal capacitado para a manipulação dos diferentes softwares existentes na atualidade referentes à análise estrutural de uma via permanente, trazendo como consequência infraestruturas de qualidade;
- ✓ Executar a mesma análise deste trabalho, porém, calculando-se as deformações e tensões através do programa FERROVIA 3.0;
- ✓ Executar a mesma análise deste trabalho, porém, calculando-se as deformações e tensões através do programa ANSYS;

- ✓ Utilizar o programa LISA incorporando os dormentes, fixações e as camadas: lastro, sublastro, plataforma e subleito.
- ✓ Outros pontos que merecem destaque e ser analisados em outras pesquisas são o espaçamento entre os dormentes, o tipo de perfil do trilho, a distribuição das cargas, para verificar a influência de cada variável frente às deformações e tensões no patim do trilho.
- ✓ Neste estudo só foram analisadas as tensões a tração e deformações no patim do trilho, então, é interessante analisar as tensões a compressão no boleto do trilho.
- ✓ Aumentar o número de ciclos nos ensaios do laboratório para realizar a verificação da fadiga do trilho e assim poder determinar a sua vida útil. A finalidade dos ensaios de fadiga nos trilhos seria determinar a curva resistência à fadiga x número de ciclos. Desta forma, poderiam ser obtidas correlações entre os resultados de laboratório e aqueles verificados em situação real na via.
- ✓ Finalmente, recomenda-se realizar novas simulações, analisando a estabilidade do trilho usando todos os recursos do Software LISA, aplicando todos os tipos de análise do programa, como por exemplo análise térmica, para determinar a flambagem da via férrea.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; MELO, E. O., 2014. **EMPREGO DE EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS DE RESISTÊNCIA PARA INSTRUMENTAÇÃO DE ESTACAS METÁLICAS**. In: Congresso Brasileiro De Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica XVII, COBRAMSEG, 2014, Goiânia. Goiânia: 2014, CD ROM.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE ASSOCIATION - AREMA., 2005. **MANUAL FOR RAILWAY ENGINEERING**. American Railway Engineering.

ASTM, 2012. **STANDARD TERMINOLOGY RELATING TO FATIGUE AND FRACTURE TESTING**. In: ASTM E 1823-2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIARIOS - ANTF, 2014. **"ANTF prevê incremento de 12,5% de cargas transportadas por ferrovias até 2016"**. Disponível em: <[http://www.guiamaritimo.com/gm\\_wp/noticias/antf-preve-incremento-de-125-de-cargas-transportadas-por-ferrovias-ate-2016/](http://www.guiamaritimo.com/gm_wp/noticias/antf-preve-incremento-de-125-de-cargas-transportadas-por-ferrovias-ate-2016/)> [Acesso fevereiro 2016].

BARBOSA, R., 1995. **DINÂMICA DO RODEIRO NA INSCRIÇÃO DE CURVAS**. In: Congresso Internacional sobre Operação, Condução, Segurança e Integração nos Transportes Ferroviários, Curitiba. Anais. Curitiba, p. 33-45.

BRANDES, E. A., 1983. **SMITHELLS METAL REFERENCE BOOK**. 6 ed, Butterworth, Londres, p. 22-128 a 22-131.

BRINA, H. L., 1979. **ESTRADAS DE FERRO**. Livros Técnicos e Científicos, v.1. Rio de Janeiro.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K., 2011. **ELEMENTOS DE MÁQUINAS DE SHIGLEY: PROJETO DE ENGENHARIA MECÂNICA. [SHIGLEY'S MECHANICAL ENGINEERING DESIGN, 8TH ED (INGLÊS)]**. Tradução de João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 8 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 1084 p. Inclui índice; il. tab. quad.; 28cm.

CARVALHO, C., 2013. **LINHA FERROVIÁRIA COM LASTRO. AS RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA A INSTALAÇÃO DE VIAS PERMANENTES**. Infraestrutura Urbana, Transportes. Edição 29. São Paulo.

CNT, 2015a. **BOLETIM ESTATÍSTICO CNT**. Publicação: Abril, 2015. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Boletim/boletim-estatistico-cnt>> Acesso setembro 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **PIM 001 - PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO DE MATERIAL TRILHO**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/ferrovias/consulta-publica/101-pim-trilho.pdf>> Acesso fevereiro 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. **GLOSSÁRIO DE TERMOS FERROVIÁRIOS**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/ferrovias/glossario-de-terminos-ferroviarios/glossario.pdf>> Acesso dezembro 2016.

DUVAL, E., 2001. **CURSO DE VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA**. Ferrovia Centro Atlântica.

DUVAL, E.; MAGALHÃES, P. C. B., 2006. **PROGRAMA PARA CAPACITAÇÃO EM SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**, Apostila, Belo Horizonte.

EISENMANN, J., 1981. **THE RAIL AS SUPPORT AND ROADWAY THEORETICAL PRINCIPLES AND PRACTICAL EXAMPLES**. In: FASTENRATH, Fritz. (Ed.). Railroad Track: theory and practice. Tradução de Walter Grant. New York: Frederick Ungar Publishing CO, 1981, p. 10-79. Versão inglesa de Die Eisenbahnschiene: Theoretische und Praktische do original alemão.

ESVELD, C., 1989. **MODERN RAILWAY TRACK**. Tradução de Julie Page. West Germany: Graphics Department of Thyssen Stahl AG.

ESVELD, C., 2001. **MODERN RAILWAY TRACK**. MRT Productions, 654p.

GUIMARÃES, C. A. B., 1999. **ANÁLISE DAS SOLICITAÇÕES DINÂMICAS NA VIA FÉRREA ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE O VEÍCULO E A VIA**. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, SP: [s.n].

GRIFFIN, K., 1992. **SURFACE RESIDUAL STRESSES FOR RAIL STEELS AND FLASH-BUTT**. Rail Steels Symposium Proceedings, pp. 93-107.

GOODMAN, J., 1899. **“MECHANICS APPLIED TO ENGINEERING”**. 1ST ED. London: Longmans, Green and Co., 1899.

HETÉNYI, M., 1979. **BEAMS ON ELASTIC FOUNDATION – THEORY WITH APPLICATIONS IN THE FIELDS OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING**. The University of Michigan Press. 11<sup>a</sup> ed. United States of América.

ILOS., 2014. **PANORAMA CUSTOS LOGÍSTICOS NO BRASIL**. Rio de Janeiro. Disponível em: <[https://www.ilos.com.br/ilos\\_2014/wp-content/uploads/PANORAMA/PANORAMAS\\_brochura\\_custos.pdf](https://www.ilos.com.br/ilos_2014/wp-content/uploads/PANORAMA/PANORAMAS_brochura_custos.pdf)> Acesso em setembro 2016.

INDRARATNA, B.; SALIM, W., 2005. **MECHANICS OF BALLASTED RAIL TRACKS: A GEOTECHNICAL PERSPECTIVE**. Taylor & Francis Group plc.Londres, 248 pp.

INDRARATNA, B.; NIMBALKAR, S.; CHRISTIE, D.; RUJIKIATKAMJORN, C.; VINOD, J., 2010a. **FIELD ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF A BALASTED RAIL TRACK WITH AND WITHOUT GEOSYNTHETICS**. Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, No. 7, pp. 907-917.

INDRARATNA, B.; THAKUR, P.; VINOD, J., 2010b. **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF RAILWAY BALLAST BEHAVIOR UNDER CYCLIC LOADING**. International Journal of Geomechanics, Vol. 10, No. 4, pp 136-144.

INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C., 2011. In: **ADVANCED RAIL GEOTECHNOLOGY BALLASTED TRACK**. Taylor & Francis Group, London, UK.

IPEA, 2010. **TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL: GARGALOS E PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E REGIONAL**. Rio de Janeiro, Ipea, nº 50, maio 2010. [Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro]. Disponível em: <[http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/3767/1/Comunicados\\_n50\\_Transporte.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/3767/1/Comunicados_n50_Transporte.pdf)> Acesso Outubro 2016.

JEFFS, T.; TEW, G.P., 1991. **A REVIEW OF TRACK DESIGN PROCEDURES, VOL. 2, SLEEPERS AND BALLAST, RAILWAYS OF AUSTRALIA**.

KLINCEVICIUS, M. G. Y., 2011. **ESTUDO DE PROPRIEDADES, DE TENSÕES E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LASTROS FERROVIÁRIOS**. São Paulo: Dissertação de Mestrado. USP.

LIMA, H. A. D., 1998. **PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO DE MÉTODO DE MANUTENÇÃO PARA A SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. 123 p.

LIMA, M.; LOBO, A., 2014. **CUSTOS LOGÍSTICOS NO BRASIL – 2014. PANORAMA ILOS**. Disponível em:< <http://www.ilos.com.br/web/custos-logisticos-no-brasil/> >. Acessado em 23 de setembro de 2016.

LISA, 2013. **BEGINNERS' GUIDE:GETTING STARTED WITH FEA. LISA Finite Element Analysis, Software Version 8.0.0**.

MACÊDO, F. B., 2009. **ESTUDO DO DESGASTE DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)- Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

MAGALHÃES, P. C.; BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R., 2000. **CONTATO RODA-TRILHO**. In : Tratado de Estradas De Ferro. Rio de Janeiro, p. 80-111.

MARIN, J., 1992. **MECHANICAL BEHAVIOR OF ENGINEERING MATERIALS**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, p. 224.

NADAL, M. J., 1896. **LOCOMOTIVES A VAPEUR**. Collection encyclopedie scientifique. Bibliotheque de mecanique applique´et genie, Paris.

NETO, J. P. M., 2010. **APOSTILA DE FERROVIAS**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel.

PAIVA, C. E. L., 1999. **SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**. 2. ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.

PAIVA, C. E. L. ; AGUIAR, P. R. ; SILVA, F. C. M., 2007. **EVALUATION OF TRACK/BALLAST BEHAVIOR UNDER INCREASED AXLE LOAD: MEASURING DEFLECTIONS ON TRACK**. In: International Heavy Haul Association - 2007 Specialist Technical Session, 2007, Kiruna, Sweden. High Tech in Heavy Haul. Virginia Beach, VA: IHHA, Inc., 2007. v. único. p. 31-38.

PAIVA, C. E. L.; SOUSA J. L. A. O; ALMEIDA L. C.; AGUIAR P. R.; CORREIA L. F. M.; WATANABE J. S.; CARVALHO R. M.; PEIXOTO C. F. E PASCHOALIN D. P., 2013; **STRESSES ANALYSIS ON A RAIL PART**. Journal of Civil Engineering and Architecture (Print), Volume 7, No. 8 (Serial No. 69), pp. 964-972.

PAIVA, C.E.L., 2012 **SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**. Apostila da disciplina FEC 310. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. UNICAMP.

PAIVA, C.E.L., 2016, **SUPER E INFRAESTRUTURA DE FERROVIAS, CRITÉRIOS PARA PROJETOS**. Elsevier, Rio de Janeiro, 313 pg.

PORTO, T. G., 2004. **PTR 2501 - FERROVIAS**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de transportes, São Paulo. Disponível em: <<http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Ferrovias/55090665.html>> Acesso e download em: 03 Out. 2015.

PORTNOI, M., 2014. **EXTENSOMETRIA: HISTÓRIA, USOS E APARELHOS**. [S.L.:s.n.,s.d.].Disponível:< <https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html>> Acesso em fevereiro de 2016.

PROFILLIDIS, V.A., 2006 **RAILWAY MANAGEMENT AND ENGINEERING**. Avebury Technical, Ashgate Publishing Ltd, UK.

RAMAKRISHNAN, V.; LOKVIK, B. J., 1992. **FLEXURAL FATIGUE STRENGTH OF FIBER REINFORCED CONCRETES. IN: HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CEMENT COMPOSITES**. Proceedings of the International RILEM/ACI Workshop. E&FN Spon. London. p.271-287.

RIVES, F. O.; PITA, A. L.; PUENTE, M.J.M., 1977. **TRATADO DE FERROCARRILES I VIA**. Madrid: Rueda.

RODRIGUES, C. A., 2001. **CONTRIBUIÇÃO AO PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA DA SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA**. 260 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

RODRIGUES R. M, 1994. **“A MODEL FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF PERMANENT WAY ON BALLAST”**. 1994.

SCHRAMM, G., 1977. **TÉCNICA E ECONOMIA DA VIA PERMANENTE**. Trad. E. Volkmann. Emma. Porto Alegre.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M., 1994 **TRACK GEOTECHNOLOGY AND SUBSTRUCTURES MANAGEMENT**. Thomas Telford Services Ltd., Londres. 446 pp.

SHENTON, M.J, 1975. **DEFORMATION OF RAILWAY BALLAST UNDER REPEATED LOADING CONDITIONS**. In: Kerr (ed.): Railroad Track Mechanics and Technology. Proc. of a symposium held at Princeton Univ., pp. 387–404.

SCHUTZ, W., 1996. **A HISTORY OF FATIGUE. ENGINEERING FRACTURE MECHANICS**, v.52, n.2, p.263-300.

SILVA, P.R.T., 1995. **CARACTERIZAÇÃO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS QUANTO À TENACIDADE À FRATURA E COMPORTAMENTO EM FADIGA**. Dissertação de Mestrado, PPGEM – UFRGS, Porto Alegre.

SILVA, F. E. T., 2006. **ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS DEFEITOS DA VIA PERMANENTE DA MRS PARA PLANEJAMENTO DE INTERVENÇÕES PREDITIVAS DE MANUTENÇÃO**. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.

SILVA, B. L., 2009. **ESTRATÉGIA ALTERNATIVA PARA DETERMINAÇÃO DO LIMIAR DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS ATRAVÉS DA TEORIA DA DISTÂNCIA CRÍTICA**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

SILVA, B. L.; OLIVEIRA, F.; FERREIRA, J. L. A.; ARAÚJO, J. A., 2009. **DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DO AÇO ASTM A743 – CA6NM - EFEITO DA PRESENÇA DE TENSÃO MÉDIA SOBRE A VIDA**, relatório interno, 2009.

MUÑOZ, S. J. R.; ARENAS, M. A. T.; COSTA, D. C.; PAIVA, C. E. L., 2016. **APPLICATIONS OF POWER RAIL TRACK PROGRAM TO TRACINGS OF BRAZILIAN RAILWAYS**. Journal of Civil Engineering and Architecture 10 (2016) 501-512.

SURESH, S., 1998. **FATIGUE OF MATERIALS**. 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

TOGNO, F., 1973. **FERROCARRILES. NAUCÁLPAN: REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE INGENIERÍA S.A.**

VALE, C. 2010. **INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DOS SISTEMAS FERROVIÁRIOS NO COMPORTAMENTO DINÂMICO E NO PLANEAMENTO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE VIAS DE ALTA VELOCIDADE**. Porto: [s. n.].

WINKLER, E., 1867. **DIE LEHRE VON ELASTICITÄT UND FESTIGKEIT**. 1st Edn., H. Dominicus, Prague.

ZIMMERMANN, H., 1888. Die berechnung des eisenbahnoberbaues. Verlag W. Ernst & Sohn, apud KERR, A. D., 1978. **ON THE STRESS ANALYSIS OF RAILS AND TIES**. American Railway Engineering Association (AREA), Bulletin 659, p.19-43.

## ANEXOS

Anexo I - Passos realizados na simulação do Ensaio no Laboratório com o Software LISA.....	116
Anexo II - Passos para a realização do Diagrama de Goodman Modificado.....	118
Anexo II - Artigo Submetido - The International Journal of Railway Technology (IJRT).....	121
Anexo II - Artigo Submetido - Canadian Journal of Civil Engineering (CJCE).....	122

## **Anexo I - Passos realizados na simulação do Ensaio no Laboratório com o Software LISA.**

Antes de começar a simulação devemos considerar que todas as unidades utilizadas dentro do programa devem ser as mesmas, para ter resultados coerentes. O programa não exige que se use certas unidades, só recomenda que elas tenham coerência entre elas. Neste trabalho, as unidades utilizadas no programa foram: kN, kN/mm<sup>2</sup>, mm, kN/mm<sup>3</sup>

1. Importar o desenho em AutoCAD do Trilho TR57 diretamente no LISA, sempre e quando o número de nó seja menor ao limite estabelecido no software (1300). Através do comando *Geometry - Import STEP/IGES file* e depois gerar malha com *Generate mesh*.
2. Se a quantidade de nó for maior de 1300 devemos pegar as coordenadas do desenho em AutoCAD e criar nosso desenho diretamente no LISA através do comando *New node - Add Single Node - Enter coordinates - X;Y;Z – Cartesian coordinates ou Mesh tools – Create - Node*. Fazer isso até ter todo o desenho em 2D.
3. Para obter a face da superfície 2D do trilho devemos criar elementos, unindo os nós criados no passo anterior por meio do comando *New elemento – quad4 our Mesh tools – Create - Element*, selecionando os 4 nós que serão parte de nosso primeiro elemento, o qual será parte de nossa malha final feita manualmente.
4. Depois de obter a face do trilho em 2D, devemos selecionar todo o desenho por meio do *Select faces* e assim poder expandir ele na longitude total a ser estudada (2050mm) utilizando o comando *Extrude* ou *Mesh tools – Extrude*. Isto permite estender o desenho no eixo Z tornando-o um desenho em 3D.
5. Uma vez pronto o desenho do trilho em 3D se designa o material de cada componente, neste caso o aço, através do comando *Component & Materials – Assing new material – Material Properties (Material) – Geometric (None)*,

*Mechanical (Isotropic - Youngs modulus, Poisson's ratio, Densidade)*. Lembrando que devesse trabalhar com pontos (.) em vez de vírgula (,) na cifras com decimais. Repete-se esse procedimento para todos os materiais utilizados no desenho, seleciona-se os elementos que são parte de outro material e adiciona-se um novo componente por meio de *New component* e assim poder colocar um novo material.

6. Agora, se realiza as restrições nos extremos do trilho para torna-lo um trilho biapoiado e se coloca a carga no meio do vão, para simular o ensaio no laboratório. Seleciona-se os nós dos extremos e através do comando *Loads & Constraints - New displacement* se restringe aos movimentos nos eixos X e Y, depois para colocar a carga no meio do vão seleciona-se os nós onde ela será aplicada através do comando *Loads & Constraints – New força*, em sentido Y com valores negativos já que indica uma força para abaixo, lembrando que devesse trabalhar com pontos (.) em vez de vírgula (,) nas cifras com decimais.
7. Uma vez terminado o passo anterior procedesse a dar solução ao problema, através do comando *Solution – Solver* o que gerará uma janela de soluções referente à Aceleração (X,Y,Z), Velocidade (X,Y,Z), Deslocamento (X,Y,Z), Tensão, entre outras.

## Anexo II – Passos para a realização do Diagrama de Goodman Modificado.

Apresenta-se a continuação passo a passo como realizar o gráfico:

1. Procurou-se as propriedades do trilho em estudo, segundo a norma DNIT: a resistência à tração ( $S_{ut}$   $S_u$ ) e a tensão mínima de escoamento ( $S_y$ );
2. Determinam-se os fatores da equação do Marin, equação 2, para determinar o limite de resistência, neste caso, do trilho ( $S_e$ ).
  - 2.1 O primeiro fator é o Fator de superfície ( $k_a$ ), equação 3, e depende do acabamento da superfície, neste caso o trilho tem acabamento laminado. Este valor se encontra na Tabela 2.
  - 2.2 Seguidamente determina-se o Fator de Tamanho ( $k_b$ ), equação 4, o qual depende da altura do trilho ( $d$ ).
  - 2.3 Outro fator é o Fator de Carregamento ( $k_c$ ), que vai depender do efeito a ser avaliado: flexão, axial ou torção. Neste caso foi flexão.
  - 2.4 Já o Fator de Temperatura ( $k_d$ ) pode ser determinado a través da Tabela 3. E se não se tem este dado então automaticamente  $k_d = 1$ .
  - 2.5 O Fator de Confiabilidade ( $k_e$ ), equação 5, depende da confiabilidade que você requer, onde é recomendado um mínimo de 95%, e este pode ser visualizado na Tabela 4.
  - 2.6 Em sequência, o Fator de Efeitos Diversos ( $k_f$ ), se considera igual a 1 já que tem diferentes efeitos que devem ser considerados, e estes valores não estão sempre disponíveis.

- 2.7 O Limite de Endurança ( $S'_e$ ), equação 6, vai depender da resistência à tração do trilho.
- 2.8 E por último, substituindo os valores anteriores na equação 2, se obtém o Limite da Resistencia à fadiga:  $S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e$
- 3 Uma vez determinados todos os fatores e propriedades do trilho, se realiza o Diagrama de Goodman, lembrando que todas as unidades tem que estar consistentes ( $kN/mm^2$  ou  $N/mm^2$ ).
- 3.1 Na Ordenada se colocam o valores do Limite de Resistencia à Fadiga, tanto positivo como negativo ( $S_e; -S_e$ ). (Ponto **A** e **B** na Figura 74)
- 3.2 Seguidamente, se coloca o valor positivo da resistência à tração ( $S_u$ ) na ordenada e abcissa, formando assim um só ponto (ponto **C** na Figura 74).
- 3.3 Juntando os pontos dos passos 3.1 ; 3.2 e 3.3, será gerada aquela “Área Total sem Fadiga”.
- 3.4 Agora juntamos o ponto da origem do gráfico (0,0) com o ponto **C** no gráfico e geraremos uma linha em  $45^\circ$ , como se apresenta na Figura 74.
- 3.5 Em sequência, se coloca o valor positivo da tensão mínima de escoamento ( $S_y$ ) na ordenada e abcissa, formando assim o ponto **D**, agora quando o valor de  $S_y$  da ordenada toque aquela linha superior da área total sem fadiga se forma o ponto **E**. A partir do ponto **E** desce paralelamente ao eixo Y até encontrar a linha inferior da área total sem fadiga para formar assim o ponto **F** (Figura 74).
- 3.6 A partir dos pontos **A** e **B** se trazem duas paralelas a aquela linha criada no passo 3.4 (linha  $45^\circ$ ), fazendo assim dois novos pontos, **G** e **H** (Figura 74).
- 3.7 A área representada pela união dos pontos **G, A, E, D, F, B** e **H**, representa aquela área limitada pela “área sem fadiga”. Isto quer dizer

que, se quando colocamos no gráfico os resultados da Tensão média ( $\sigma_m$ , ponto I) obtidas na tanto na simulação de laboratório como a do software LISA ficam dentro desta área, podemos garantir que o trilho não sofreu fadiga quando sujeito a tais situações.

Todos os passos se apresentam na Figura 74.

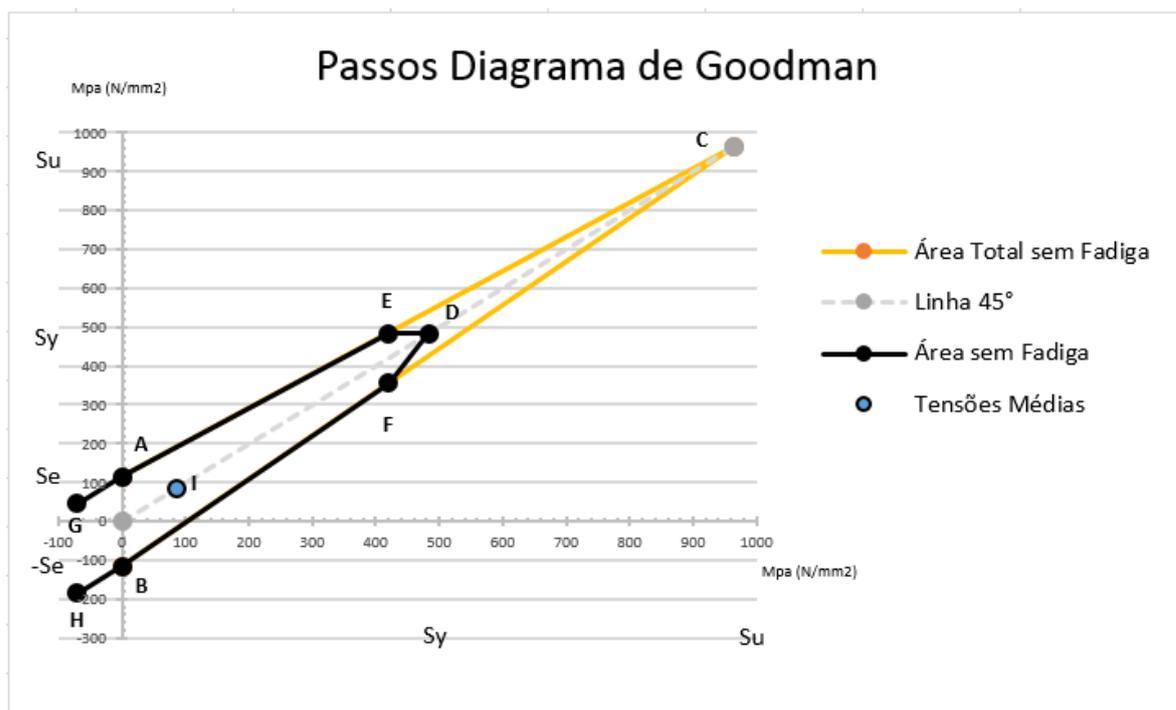


Figura 74 Passos Diagrama Goodman  
Fonte: elaborado pelo autor

**Anexo III – Artigo Submetido - The International Journal of Railway Technology (IJRT).**

## **Studies of tensions in the loaded foot of the rail through the computational software LISA 8.0.0.**

Silva, Mhileizer Arielys Toledo Arenas (Venezuela) <sup>1</sup> and Prof. Dr. de Paiva, Cassio Eduardo Lima (Brazil).<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Master's degree program students in civil engineering. Dept. of Transport. Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, FEC. Campinas Brazil [mhileizer@gmail.com](mailto:mhileizer@gmail.com)

<sup>2</sup> Dept. of Transport. Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, FEC. Campinas Brazil [celpaiva@fec.unicamp.br](mailto:celpaiva@fec.unicamp.br)

### **Abstract**

The rail system is an important modal in the country, especially for the transport of bulk loads. According to estimations of the National Association of Railway Transport (ANTF), the year of 2015 will end with a total of 485 million tons transported, and the year of 2016 will present an increase of 5.1% when closing the year with 510 million tons transported. In Brazil, there are many old railways, which have never suffered any modification or reconstruction with the use of modern construction techniques. Therefore, these pathways do not have the subballast layer, which expose many parts of the road to a poor drainage, bringing as consequence the platform saturation and the crimping of the ballast. In this work, it is intended to incorporate the use of one of the most modern technological resources currently available for evaluation of the railway permanent way: the LISA analysis program. With this program and with the data obtained in the laboratory, it will be simulated a railway under the stress of a load to determine both the stretching and the tension of the rails when they are subjected to the increase of a load. This research allowed to conduct a study of specific situations, such as the determination of the tensions in the foot of the rail in spans of unserviceable sleepers.

**Keywords:** rail, tensions, axle load, software, deflection basin.

OBS: Artigo em processo de avaliação

**Anexo IV – Artigo Submetido - Canadian Journal of Civil Engineering (CJCE)****Studies of tensions in the foot of the rail on the track about a load through the computational software LISA 8.0.0.**

Silva, Mhileizer Arielys Toledo Arenas (Venezuela) <sup>1</sup> and Prof. Dr. de Paiva, Cassio Eduardo Lima (Brazil).<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Master's degree program students in civil engineering. Dept. of Transport. Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, FEC. Campinas Brazil [mhileizer@gmail.com](mailto:mhileizer@gmail.com)

<sup>2</sup> Dept. of Transport. Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, FEC. Campinas Brazil [celpaiva@fec.unicamp.br](mailto:celpaiva@fec.unicamp.br)

**Abstract**

The rail system is an important modal in the country, especially for the transport of bulk loads. According to estimations of the National Association of Railway Transport (ANTF), the year of 2015 will end with a total of 485 million tons transported, and the year of 2016 will present an increase of 5.1% when closing the year with 510 million tons transported. In Brazil, there are many old railways, which have never suffered any modification or reconstruction with the use of modern construction techniques. Therefore, these pathways do not have the subballast layer, which expose many parts of the road to a poor drainage, bringing as consequence the platform saturation and the crimping of the ballast. In this work, it is intended to incorporate the utilization of LISA analysis program, with data obtained in the laboratory; it will be to simulated a railway under the stress of a load to determine both the stretching and the tension of the rails when they are subjected to the increase of a load. This research allowed to conduct a study of specific situations, such as the determination of the tensions at the foot on the rail in presence of one, three and five lacquered sleepers.

**Keywords:** rail, tensions, axle load, software, deflection basin, lacquered sleepers