

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

**ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE  
DIMENSIONAMENTO DE UMA VIA FÉRREA  
SUBMETIDA ÀS DEFORMAÇÕES VERTICAIS**

**Luiz Fernando de Melo Correia**

**Campinas  
2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

**ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE  
DIMENSIONAMENTO DE UMA VIA FÉRREA SUBMETIDA ÀS  
DEFORMAÇÕES VERTICAIS**

**Luiz Fernando de Melo Correia**

**Orientador: Prof. Dr<sup>o</sup>. Cássio Eduardo Lima de Paiva**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

**Campinas  
2007**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C817e Correia, Luiz Fernando de Melo  
Estudo da sensibilidade dos parâmetros de dimensionamento de uma via férrea submetida às deformações verticais / Luiz Fernando de Melo Correia.-  
-Campinas, SP: [s.n.], 2007.

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

1. Ferrovias. 2. Ferrovias – Deformação. 3. Engenharia ferroviária. 4. Ferrovias – Projetos e construção. 5. Transportes. 6. Transporte ferroviário. I. Paiva, Cassio Eduardo Lima de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Study of the sensitivity of the parameters of sizing of one submitted railway to the vertical deformations

Palavras-chave em Inglês: Railway, FERROVIA 1.0, Sensibility of elements of railway, Dimension models, Correlation

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Carlos Alberto Bandeira Guimarães, Jorge Luís Goudene

Spada

Data da defesa: 19/12/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

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

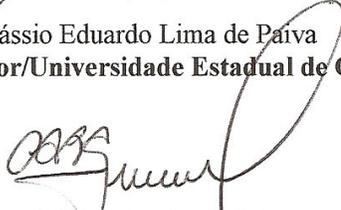
**ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DE  
DIMENSIONAMENTO DE UMA VIA FÉRREA SUBMETIDA ÀS  
DEFORMAÇÕES VERTICAIS**

**Luiz Fernando de Melo Correia**

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



**Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva  
Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães  
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Jorge Luis Goudene Spada  
Universidade Gama Filho**

Campinas, 19 de Dezembro de 2007

## **Dedicatória**

*Aos meus pais pelo apoio dado à minha formação e me incentivo pela contínua busca do conhecimento. E, a Vanessa, pelo companheirismo durante a realização deste trabalho.*

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Cassio Eduardo Lima de Paiva, que deu oportunidade e condições para que pudesse aprofundar meus conhecimentos na área ferroviária.

Aos colegas da pós-graduação, pelo espírito de equipe, união e solidariedade, formando um grupo coeso que buscou avançar sempre.

A todos os funcionários da secretária da pós-graduação, especialmente a Paula, por sua competência, dedicação e paciência.

Ao Eng<sup>o</sup> Paulo Roberto Aguiar, pela colaboração na busca do conteúdo para esta dissertação.

Ao Eng<sup>o</sup> João José Dal Secco, pela retaguarda dada às nossas atividades profissionais, mesmo diante de tantas adversidades.

Ao Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Reinaldo Charnet, do IMECC- UNICAMP, que auxiliou-me na interpretação dos resultados estatísticos deste trabalho.

A Eng<sup>a</sup> Candice Jorge Sousa, pelo apoio na utilização do programa FERROVIA 1.0.

Um agradecimento especial a Prof<sup>a</sup> Elenice Rodrigues Lorenz, revisora de texto.

## Homenagem

*A todos os colegas que trabalharam ou ainda trabalham para o desenvolvimento do setor ferroviário principalmente na recuperação de nossa malha, que estava durante muitos anos, carente de investimentos, e que, hoje, perante as condições logísticas, vem recebendo as interferências necessárias.*

*Para representá-los cito abaixo os companheiros de minha trajetória profissional:*

1 – A Edmilson José Couto (Galego), o grande mestre de linha que me ensinou os primeiros segredos da via permanente em especial dos nossos AMV's; (*In memorian*)

2 – A João José Dal Secco, por sua generosidade em passar muito dos seus conhecimentos do setor;

3 – A Norberto Tadeu de Oliveira e José Antonio Fonseca Colla, por sua perseverança e credibilidade no setor como também pela técnica apurada que os tornam ainda imprescindíveis;

4 – A Messias Ramos Ullmann, grande mestre que a história caminhou em paralelo com o crescimento da malha paulista, hoje, ainda atuante, “arquivo” e “memória” viva da ferrovia;

5 – A Luiz Fernando Veríssimo que durante anos e mais anos trabalhou na manutenção da malha do Porto de Santos;

6 – A Fábio André Steffler, Daniel Nascimento, os novos e grandes engenheiros ferroviários que têm, em seu trabalho, por anos e mais anos, a continuidade do desenvolvimento de nossa malha

ferroviária;

7 – A todos os colegas de “trecho”, de caminhadas e rondas sem fim, de idas e vindas de auto de via, de projetos e orçamentos, de reuniões e mais reuniões da ALL, da MRS, da Vale do Rio Doce, da FCA, da CODESP, da SUPERVIA, da ANTT. A todos vocês, os votos de sucesso.

## RESUMO

CORREIA, Luiz Fernando de Melo. **Estudo da Sensibilidade dos Parâmetros de Dimensionamento de uma Via Férrea Submetida às Deformações Verticais**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP, 2007. Dissertação de Mestrado.

O estudo da interação dos componentes da via permanente é fundamental para um projeto ferroviário adequado, como também tem grande importância para criar procedimentos de manutenção da via baseados em previsões sob um modelo de desempenho adequado. Para o conhecimento dessas interações, pela necessidade de um grande número de combinações, é de vital importância a utilização de um modelo computacional para dimensionamento das suas camadas, no caso o programa FERROVIA 1.0.

Foi desenvolvido um estudo crítico do programa FERROVIA 1.0 e suas variáveis foram caracterizadas através de valores observados em literatura. Após caracterização inicial foi realizado um estudo de sensibilidade comparativo entre essas variáveis e a indicação de comportamento significativo ou não na situação de uma via férrea deformada por carga de roda conhecida.

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado um programa estatístico com a finalidade de encontrar a correlação dos elementos. Pretende-se, pois, lançar no programa FERROVIA 1.0 e, posteriormente, em programa estatístico cerca de duas mil, cento e oitenta e sete combinações. Os dados que serão utilizados nessas correlações correspondem a valores referenciais dos elementos usados na prática da engenharia ferroviária.

**Palavras chave:** Ferrovia, Via Permanente, FERROVIA 1.0, sensibilidade dos elementos da via, modelos de dimensionamento, correlação dos elementos da via.

## **Abstract**

CORREIA, Luiz Fernando de Melo. **Study of the Sensitivity of the Parameters of Sizing of one Submitted Railway to the Vertical Deformations**. Campinas: University of Civil Engineering, Architecture and Urbanization - UNICAMP, 2007. Dissertation (Master's degree).

The study of the interaction of the components of the permanent way it is basic for adequate a railroad project, as also it has great importance to create procedures of maintenance of the way based in predictions under a model of adequate performance. For the knowledge of these interactions, for the necessity of a great number of combinations, it is of vital importance the use of a computational model for sizing of its layers, in the case the program FERROVIA 1.0.

A critical study of the program was developed FERROVIA 1.0 and its variable had been characterized through values observed in literature. After initial characterization was carried through a comparative study of sensitivity between these variable and the indication of significant behavior or not in the situation of a railway deformed by load of known wheel.

For the development of the study a statistical program with the purpose was used to find the correlation of the elements. It is intended, therefore, to launch in the program FERROVIA 1.0 and, later, in statistical program about two a thousand, one hundred and eighty and seven combinations. The data that will be used in these correlations correspond the normal values of the used elements in the practical one of railroad engineering.

**Palavras chave:** Railway, FERROVIA 1.0, sensibility of elements of railway, dimension models, correlation.

## SUMÁRIO

<b>Resumo</b>	xi
<b>Abstract</b>	xiii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xix
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xxiii
<b>LISTA DE FÓRMULAS</b>	xxix
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	xxxI
<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>2 – A VIA PERMANENTE</b>	<b>05</b>
<b>2.1 – Elementos da Via Férrea e suas Funções</b>	<b>05</b>
2.1.1 – A infra-estrutura ferroviária	05
2.1.2 – A superestrutura ferroviária	08
<b>2.2 – Solicitações em cada Elemento da Via Férrea</b>	<b>17</b>
2.2.1 – Avaliações estáticas	17
2.2.2 – Interação dos esforços sobre cada elemento	20
<b>2.3 – Deformações da Via Permanente</b>	<b>22</b>
2.3.1 – Deformações e os elementos da via	22
2.3.2 – Formas de medição das deformações	41
2.3.3 – Características das deformações de cada camada	44
2.3.4 – Valores disponíveis na literatura técnica	47
2.3.5 – Efeitos Dinâmicos	50
<b>2.4 - Modelos Clássicos de Dimensionamento da via Férrea</b>	<b>52</b>
2.4.1 – Dimensionamento da espessura da plataforma	52
2.4.2 – Dimensionamento da espessura do lastro	53
<b>2.5 – Modelos Recentes de Dimensionamento: FERROVIA 1.0 E GEOTRACK</b>	<b>66</b>

2.5.1 – GEOTRACK	66
2.5.2 – O programa FERROVIA 1.0	68
<b>2.6 – Discussão</b>	<b>71</b>
<b>3 – O PROGRAMA FERROVIA 1.0 E SUAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS</b>	<b>73</b>
<b>3.1 – Estrutura do Programa FERROVIA 1.0</b>	<b>73</b>
<b>3.2 – Análise comparativa entre o cálculo da tensão no topo da plataforma por um modelo clássico e pelo programa FERROVIA 1.0</b>	<b>79</b>
<b>3.3 – Discussão</b>	<b>82</b>
<b>4 – UM ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO PROGRAMA FERROVIA 1.0</b>	<b>83</b>
<b>4.1 – Um estudo de sensibilidade</b>	<b>83</b>
<b>4.2 – Estudo de sensibilidade das variáveis do programa FERROVIA 1.0</b>	<b>86</b>
4.2.1 – Variáveis utilizadas no estudo de sensibilidade	86
4.2.2 – Valores de cada variável para o estudo de sensibilidade	87
4.2.3 – Avaliação preliminar da sensibilidade de cada variável	89
4.2.4 – As variáveis menos sensíveis	96
<b>4.3 – Estudo de sensibilidade das variáveis mais sensíveis</b>	<b>100</b>
4.3.1 – Apresentação das variáveis mais sensíveis	100
4.3.2 – Estudo preliminar para o calculo das correlações entre as variáveis mais sensíveis e a deformação	109
4.3.3 – Analise de correlação entre os elementos de maior sensibilidade e a Deformação vertical da via	114
<b>4.4 – Regressão linear das variáveis de maior sensibilidade</b>	<b>127</b>
4.4.1 – Generalidades	127
4.4.2 – Regressão linear para as variáveis de maior correlação em relação a deformação	128
4.4.3 – Tratamento das Dispersões	142
<b>4.5 – Intervalo de Previsão Estatística para os modelos propostos</b>	<b>147</b>
<b>4.6 – Análise dos Resultados</b>	<b>152</b>
<b>5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b>	<b>155</b>
<b>5.1 – Conclusões</b>	<b>155</b>
<b>5.2 – Sugestões para futuras pesquisas</b>	<b>157</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>159</b>
<b>Anexos</b>	<b>165</b>
Anexo A	167
Anexo B	183
Anexo C	193
Anexo D	197
Anexo E	205
Anexo F	215
Anexo G	247
Anexo H	255

## LISTA DE FIGURAS

<b>Nº</b>	<b>Figura</b>	<b>Pg.</b>
2.1	Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Perfil de Trilho	24
2.2	Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação do Espaçamento	27
2.3	Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação da Espessura do Lastro	29
2.4	Comparação dos efeitos na Via Permanente com a variação do tipo de lastro	31
2.5	Variação da Deformação Plástica Axial com o Número de Ciclos para oito tipos de materiais de lastro ferroviário	34
2.6	Comparação dos efeitos na via permanente com a variação da altura de sublastro	37
2.7	Comparação dos efeitos na via permanente com a variação do tipo de plataforma	39
2.8	Comparação entre a tensão na plataforma de acordo com a carga por eixo ferroviária e as tensões para a infra-estrutura rodoviária e aeroportuária.	40
2.9	Comparação dos efeitos na via permanente com a variação da posição da carga	41
2.10	Níveis de deflexão elástica da via permanente	48

2.11	Deformação no Ponto 6-2 realizada do método de deflectometro a laser	49
2.12	Figura 2.12: curvas de dimensionamento do lastro para plataformas argilosas desenvolvida pela BR.	56
2.13	Esquema de distribuição da tensão para o calculo do dimensionamento do lastro Segundo o método de Eisenmann	58
3.1	Grade de onze dormentes com os pontos nodais, base do programa FERROVIA 1.0	75
4.1	Gráfico de deformação da grade de onze dormentes do programa FERROVIA 1.0 de acordo com a variação do coeficiente de Poisson do Lastro	92
4.2	Gráfico de deformação para a variação do Módulo de Elasticidade dos Dormentes	97
4.3	Gráfico de deformação para a variação dos Coeficientes de Poisson do Sublastro	98
4.4	Gráfico de deformação para a variação do Coeficiente de Poisson da Plataforma	98
4.5	Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do ângulo de atrito das camadas de lastro, sublastro e plataforma	99
4.6	Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do ângulo de atrito para as camadas do lastro, sublastro e plataforma	101
4.7	Gráfico de deformação para a variação do Módulo de Elasticidade do Sublastro	102
4.8	Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do espaçamento entre os dormentes	103
4.9	Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores da carga por eixo	104

4.10	Gráfico de dispersão para as deformações com a variação das cargas por eixo	104
4.11	Variação da deformação com o valor da altura dos dormentes	105
4.12	Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do módulo de elasticidade da plataforma	106
4.13	Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do K da fixação	107
4.14	Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do módulo de elasticidade do lastro	108
4.15	Pontos de aplicação de carga para o espaçamento de 50, 55 e 60 cm, em relação aos pontos nodais do programa FERROVIA 1.0	112
4.16	Gráfico de deformação para o experimento em que se aplicou a carga em quatro pontos nodais e depois em seis pontos nodais	113
4.17	Gráfico de deformação da grade para onze dormentes do programa FERROVIA 1.0 alterando-se apenas o módulo de elasticidade do lastro	130
4.18	Dispersão do espaçamento versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações	135
4.19	Dispersão da inércia do trilho versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações	135
4.20	Dispersão do módulo de elasticidade da plataforma versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações	136
4.21	Dispersão do módulo de elasticidade do lastro versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações	136
4.22	Dispersão para $X_{aux}$ versus a deformação no dormente d4	137
4.23	Dispersão para $X_{aux}$ versus a deformação com tratamento de dispersão no	

dormente d4	142
4.24: Cálculo Gráfico do valor do Módulo de Elasticidade da Plataforma para o Trilho TR 45 e Espaçamento de 60 cm para os dormentes D4 e D6 e carga por eixo de 20 toneladas;	146
Figura 4.25: Cálculo Gráfico do valor do Módulo de Elasticidade da Lastro para o Trilho TR45 e Espaçamento de 60 cm para os dormentes D4 e D6 e carga por eixo de 20 toneladas;	146
4.26 Equações do intervalo inferior e superior da equação de regressão para Trilho TR 45 e Espaçamento de Dormentes de 50 cm para o Dormente D4	148

## LISTA DE TABELAS

<b>Nº</b>	<b>Tabela</b>	<b>Pg.</b>
2.1	Valores de coeficientes de Poisson para alguns tipos de materiais	06
2.2	Granulometria do Sub-lastro segundo a AASHOT	10
2.3	Módulo de elasticidade de algumas madeiras utilizadas como dormentes	13
2.4	Dimensões dos dormentes de madeira utilizados no Brasil	14
2.5	Espaçamento Máximo entre os Dormentes	15
2.6	Tipos de trilhos utilizados no Brasil e suas características físicas	15
2.7	Bitolas existentes no Brasil	16
2.8	Valores típicos de cargas por eixo para algumas ferrovias no mundo	20
2.9	Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a variação do Espaçamento	27
2.10	Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a variação da Espessura do Lastro	29
2.11	Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a variação do Tipo do Lastro	31
2.12	Tipo de lastro usado no ensaio de RAYMOND & DIYALJEE (1979)	32
2.13	Distribuição Granulométrica segundo a EB-655, CN e Raymond	36
2.14	Espessura Mínima de Lastro de acordo com a NB-475 (1990)	36
2.15	Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Sublastro	38
2.16	Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Plataforma	39
2.17	Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a Variação da Carga de Roda	41
2.18	Perfil tipo do ponto de análise de deformação	49
2.19	Tabela da BR para dimensionamento do lastro	55
2.20	Tabela de dimensionamento do lastro da antiga URSS	55

2.21	Calculo das espessuras de sub-lastro e lastro pelos métodos apresentados de dimensionamento	65
2.22	<i>Variáveis de entrada que podem ser analisadas com o GEOTRACK E o FERROVIA 1.0</i>	70
3.1	Primeira série de entradas do programa FERROVIA 1.0	76
3.2	Segunda série de dados de entrada do programa FERROVIA 1.0	77
3.3	Terceira série de dados de entrada do programa FERROVIA 1.0	78
3.4	Dados de saída do programa FERROVIA 1.0	78
3.5	Planilha comparativa entre o calculo de tensão na plataforma pela adaptação de Eisenmann e o programa FERROVIA 1.0	81
4.1	Variáveis estudadas no programa FERROVIA 1.0	87
4.2	Valores a serem estudados, para a qualificação inicial de sensibilidade, para cada elemento com o programa FERROVIA 1.0	88
4.3	Folha de rosto para o calculo das deformações com a variação do Poisson do Lastro	91
4.4	Valores de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 de acordo com a variação do Poisson do Lastro	92
4.5	Construção da Tabela de Controle de Sensibilidade	94
4.6	Tabela de controle de sensibilidade das variáveis	95
4.7	Variação dos Valores do Módulo de Elasticidade dos dormentes para a mesma infraestrutura	96
4.8	Variação dos Valores do Coeficiente de Poisson para a mesma infraestrutura para o Lastro, Sublastro e Plataforma	97
4.9	Variação dos Valores do Ângulo de Atrito para a mesma infraestrutura	99
4.10	Variação da Inércia do Trilho para a mesma infraestrutura	100
4.11	Variação do módulo de elasticidade do sublastro para a mesma infraestrutura	101
4.12	Variação dos Valores do espaçamento dos dormentes para a mesma Infraestrutura	102
4.13	Variação dos valores da carga para a mesma infraestrutura	103
4.14	Variação dos valores da altura do dormente para a mesma infraestrutura	105
4.15	Variação do módulo de elasticidade da plataforma para a mesma infraestrutura	106

4.16	Variação dos valores do K da fixação para a mesma infraestrutura	107
4.17	Variação dos valores do módulo de elasticidade do lastro	108
4.18	Valores sensíveis a serem utilizados nas combinações para calculo de Sensibilidade	110
4.19	Pontos de aplicação das cargas de acordo com o espaçamento dos dormentes	111
4.20	Valores obtidos através do experimento considerando quatro pontos de aplicação das cargas e seis pontos de aplicação das cargas	113
4.21	Primeiras combinações da Matriz de Deformações calculadas através do programa FERROVIA 1.0	115
4.22	Correlações entre as deformações nos onze dormentes e os elementos da via	118
4.23	Correlações entre as deformações nos onze dormentes e o módulo de elasticidade da plataforma para os dormentes D4, D5 e D6, considerando apenas o Trilho TR45	119
4.24	Correlações entre as deformações nos onze dormentes e o módulo de elasticidade da plataforma para os dormentes D4, D5 e D6, considerando apenas o Trilho TR57	119
4.25	Correlações entre as deformações nos onze dormentes e o módulo de elasticidade da plataforma para os dormentes D4, D5 e D6, considerando apenas o Trilho TR68	119
4.26	Variação da correlação entre a deformação e o módulo de elasticidade da plataforma considerando-se correlações totais	120
4.27	Correlações parciais com o módulo de elasticidade do lastro como variável de controle	121
4.28	Correlações parciais com o módulo de elasticidade do lastro e da plataforma como variável de controle	121
4.29	Correlações parciais considerando apenas o efeito do módulo de elasticidade do lastro	123
4.30	Correlações totais para o espaçamento dos dormentes apenas para a combinação com Trilho TR45 e os 3 primeiros dormentes da área positiva do gráfico de deformação	123
4.31	Correlações totais para o espaçamento dos dormentes apenas para a	

combinação com Trilho TR57 e os 3 primeiros dormentes da área positiva do gráfico de deformação	124
4.32 Correlações totais para o espaçamento dos dormentes apenas para a combinação com Trilho TR68 e os 3 primeiros dormentes da área positiva do gráfico de deformação	124
4.33 Correlações parciais para o espaçamento dos para todos os dormentes	124
4.34 Correlações parciais para a inércia dos trilhos para todos os dormentes	125
4.35 Correlações parciais para o módulo de elasticidade do sublastro para todos os dormentes	126
4.36 Correlações parciais para o módulo de elasticidade do dormente para todos os dormentes	126
4.37 Correlações parciais para o K da Fixação para todos os dormentes	126
4.38 Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão considerando uma regressão linear e sem a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento	131
4.39 Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão considerando uma regressão linear e com a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento	132
4.40 Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e sem a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento	138
4.41 Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e com a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento	141
4.42 Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e sem a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento. Com tratamento de dispersão	143
4.43 Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e com a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento, Com tratamento de dispersão	144
4.44 Equações para os intervalos inferiores e superiores para os modelos propostos	

na Tabela 4.43 para o dormente D4;	149
4.45 Equações para os intervalos inferiores e superiores para os modelos propostos na Tabela 4.43 para o dormente D5	150
4.46 Equações para os intervalos inferiores e superiores para os modelos propostos na Tabela 4.43 para o dormente D6	151

## LISTA DE FORMULAS

Nº	Formula	Pg.
2.1	Relação que expressa a tensão cisalhante em solos de acordo com a teoria de Mohr	07
2.2	Cálculo da carga de roda estática	18
2.3	Carga horizontal aplicadas pelas rodas sobre o trilho externo	19
2.4	Módulo de via U calculado pelo ensaio de carga pontual simples	42
2.5	Integral de Linha para calculo do módulo de via	42
2.6	Equação final para calculo do módulo de via U	43
2.7	Fórmula de Heukelom e Klomp	53
2.8	Calculo do módulo de elasticidade dinâmico	53
2.9	Calculo da tensão na camada inferior dos dormentes por Eisenmann	57
2.10	Calcula da carga Q para a expressão de Eisenmann	57
2.11	Calculo do fator s para a expressão de Eisenmann	57
2.12	Calculo do fator $\phi$ para a expressão de Eisenmann	57
3.1	Calculo para determinação dos deslocamentos verticais e as rotações dos pontos nodais do programa FERROVIA 1.0	73
4.1	Calculo do coeficiente de correlação produto dos momentos de Pearson	116
4.2	Calculo do coeficiente de determinação	127

4.3	Varição total para cada par ordenado em relação a média	128
4.4	Varição explicada para cada par ordenado em relação a média	128
4.5	Expressão para cálculo do $X_{aux}$	137
4.6	Erro padrão da estimativa	145
4.7	Intervalo de variação para a estimativa	145
4.8	Erro máximo da estimativa	145

## LISTA DE NOTAÇÕES E DE ABREVIATURAS

AMV	Aparelho de Mudança de Via
BR	Linhas Férreas da Inglaterra
K1	Parâmetro do ensaio de resiliência
K2	Parâmetro do ensaio de resiliência
M	Parâmetro do ensaio de resiliência
N	Parâmetro do ensaio de resiliência
c	Coesão
$\Phi$	Ângulo de Atrito
ORE	Linhas férreas da França
SNCF	Linhas férreas da Espanha
Tf	Toneladas força
TR	Tipo do trilho de acordo com a peso linear
ANTF	Agência Nacional de Transportes Ferroviários
IG	Índice de Gravidade
LL	Limite de Liquidez
IP	Índice de Plasticidade
CBR	Índice Suporte Califórnia
AASHTO	American Association of State and Highway Transportation Officials
TR	Trilho de Referência
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
U	Módulo de Via
E	Módulo de Elasticidade
I	Momento de Inércia

$A_y$	Área da bacia de deflexão
$Y_m$	Deflexão Máxima
$M_m$	Momento Máximo
$F_m$	Força Máxima
$\sigma_{adm}$	Tensão Admissível
$E_d$	Módulo de Elasticidade Dinâmico
$N$	Número de aplicações de carga
$\sigma_t$	Tensão na camada inferior do dormente
$Q$	Carga
$s$	Coefficiente que agrega o estado da via e a velocidade de operação
$\varphi$	Fator de velocidade para o calculo do parâmetro $s$
$V$	Velocidade
$C$	Coefficiente de Lastro
[F]	Matriz de flexibilidade do programa FERROVIA 1.0
[KF]	Matriz de rigidez da estrutura em camadas do programa FERROVIA 1.0
[KS]	Matriz de rigidez da grade do programa FERROVIA 1.0
$\delta$	Deslocamentos
$P$	Carga
$p_c$	Máxima pressão de contato entre dormente e lastro
$\delta_T$	Máxima deflexão no trilho
$\delta_L$	Máxima deflexão do lastro
$\sigma_{SL}$	Máxima tensão de compressão no topo do subleito
$\sigma_T$	Máxima tensão de tração no trilho
$\sigma_D$	Máxima tensão de tração do dormente
C-C	Padrão de locomotiva com dois intervalos de três eixos
$S_e$	Erro padrão da estimativa
$E$	Erro máximo da estimativa

## **1 – INTRODUÇÃO**

A ferrovia tem papel fundamental no transporte de grandes volumes em nosso país, que tem dimensões continentais e um mercado interno e externo crescente.

Segundo dados de GARRIDO (2006), o sistema ferroviário brasileiro tem uma malha de 29.487 quilômetros de extensão. Somando todas as concessionárias, a frota atual está em torno de duas mil locomotivas e setenta mil vagões. Entre 1997 e 2005 a carga transportada saltou de 137 bilhões de toneladas por quilômetro útil para 222 bilhões de toneladas por quilômetro útil (TKU), tornando o Brasil a sétima maior nação em transporte de carga pesada do mundo. Na matriz de transportes brasileira, a participação das ferrovias, que não atingia 17% no tempo da antiga rede ferroviária federal, aumentou para 26% em 2005, e pode chegar a 28% ou 30% em 2008 dependendo do nível de investimentos. Comparando-se com os valores de referências internacionais de 42% de participação, existe um desafio a alcançar. Atualmente as ferrovias transportam além de grãos e minérios, cargas de elevado valor agregado, tais como aparelhos elétricos e eletrônicos, produtos alimentícios, siderúrgicos, petroquímicos e bens de consumo.

Um dos principais objetivos das concessionárias ferroviárias é o de transportar mais volume de carga em menos tempo. Desta forma, mais especificamente nas operadoras que transportam minério de ferro, o aumento de carga por eixo é a principal alternativa frente à demanda por esse mineral nos mercados nacional e internacional.

Segundo a REVISTA FERROVIÁRIA (2005) as três principais ferrovias de carga pesada no Brasil, considerando o parâmetro da carga por eixo superior a 27 toneladas são: a Estrada de Ferro Vitória a Minas, a Estrada de Ferro Carajás e a MRS Logística. Estas concessionárias vêm realizando grandes investimentos para viabilizar técnica e economicamente

um aumento de produtividade através de um incremento de carga por eixo. Só a companhia Vale do Rio Doce investiu cerca de R\$ 2,455 bilhões em 2005, para o aumento da carga por eixo na Estrada de Ferro Carajás de 31,5 para 32,5 toneladas. A principal meta é atingir o limite de carga do truque que é de 35 toneladas. Desta forma, consegue-se atingir o ponto máximo de produtividade para a relação carga versus resistência do truque, enquanto por outro lado, um aumento de carga pode prejudicar a via, levando a uma condição indesejável de manutenção de sua estrutura, diminuindo a segurança operacional.

Frente a essa necessidade de melhorar as características da via de acordo com o um aumento de solicitação, torna-se importante estudar as características de deformação vertical, que é aspecto fundamental na predição da deterioração da ferrovia, e a interação com os elementos da super e da infra-estrutura.

Assim, pretende-se neste trabalho realizar uma análise paramétrica comparativa dos elementos que compõem a via permanente e caracterizar o seu comportamento frente às deformações verticais da via, definindo a sua sensibilidade.

No próximo capítulo apresenta-se uma análise crítica dos elementos da via permanente. Através de pesquisas bibliográficas foram relacionados textos que permitem uma análise das principais funções estruturais: a interação entre os elementos frente aos esforços e como se comportam frente às deformações verticais da via. Também são analisados os métodos de dimensionamento das camadas da via e os métodos computacionais atuais.

O capítulo III apresenta, nesta dissertação, o modelo computacional utilizado neste trabalho para o cálculo das deformações. Também neste capítulo executa-se uma comparação entre esse modelo e um modelo clássico, de modo que se podem analisar as diferenças existentes entre os dois.

No capítulo IV, apresenta-se o significado de uma análise de sensibilidade e a metodologia necessária para este tipo de estudo. Aborda-se também um método computacional estatístico que serve de ferramenta para este tipo de análise. Também neste capítulo o experimento está relatado bem como sua metodologia e a análise com discussão dos resultados.

Neste capítulo, pode-se encontrar a análise das correlações entre as variáveis e as equações de regressão resultantes.

Finalmente o capítulo V contém as conclusões deste trabalho e sugestões para futuras pesquisas.

## **2 – A VIA PERMANENTE**

### **2.1 – Elementos da via férrea, suas funções e características**

#### **2.1.1 – A infra-estrutura ferroviária**

A infra-estrutura ferroviária é formada basicamente pela terraplenagem, tendo sua superfície acabada conhecida como leito ou plataforma, e todas as obras situadas abaixo deste nível (BRINA,1979). A plataforma ferroviária é o elemento de suporte da estrutura da via, recebendo através do lastro ou sublastro as tensões devidas ao tráfego (STOPATTO, 1987). Segundo RIVES, PITA E PUENTES (1977) “sua função fundamental é a de impedir deformações que impeçam a exploração da via férrea”.

HAY (1982) considera fundamental que a plataforma seja resistente e tenha capacidade de suporte e estabilidade frente à repetição de carregamentos. A plataforma precisa ser livre de deformações plásticas, falhas de fundação e depressões, buracos ou pontos moles no seu interior.

Tendo tal grau de importância, um projeto adequado de infra-estrutura é fundamental à medida que economizará com re-trabalhos de nivelamento da via, por exemplo. Aumentando os intervalos de manutenção e a vida útil dos elementos, tais como trilhos e dormentes (RAYMOND, 1937).

A plataforma é constituída por solos, naturais ou tratados, ou então por obras de arte como ponte de concreto, de aço ou outras (STOPATTO, 1987). Sendo a plataforma constituída de solos, sua resistência é caracterizada pelas seguintes variáveis:

- Coeficiente de Poisson;
- Módulo de Elasticidade/Resiliência;
- Coesão e Ângulo de Atrito;

Tanto para a plataforma como para as outras camadas de suporte da via, uma das características dos materiais usados é o coeficiente de Poisson, possuindo um valor numérico entre 0 e 0,5. Segundo CERNICA (1995), este coeficiente pode ser encontrado em muitas referências, menos para os solos, onde os valores variam de forma ampla de acordo com características específicas.

A Tabela 2.1 apresenta valores usuais do coeficiente de Poisson para alguns tipos de materiais, segundo MEDINA (1997):

Tabela 2.1: Valores de coeficientes de Poisson para alguns tipos de materiais.

<b>Valores de Coeficiente de Poisson</b>	
<b>Material</b>	<b><math>\mu</math></b>
Concreto de cimento portland	0,15
Misturas asfálticas	0,25
Materiais granulares	0,35
Solos argilosos	0,45

Fonte: MEDINA (1997)

Avançando no estudo dos solos, principalmente dos solos argilosos, a coesão representa a atração molecular entre partículas comuns. Em algumas propriedades dos solos, como a resistência ao cisalhamento, ela exerce papel importante, juntamente com o ângulo de atrito (CERNICA, 1995).

Segundo GAIOTO (1979), existem parâmetros importantes que influem na resistência ao cisalhamento de areias e argilas. No caso da areias, os fatores de influência principais são o

imbricamento e a resistência dos grãos. Areias melhores graduadas apresentam bom imbricamento e assim, melhor resistência ao cisalhamento. Portanto, quanto ao ângulo de atrito que afeta essa resistência tomam-se valores entre 35 a 45° para finas e entre 25 a 35° para areias grossas.

No caso das argilas, por possuir partículas muito finas, a resistência é influenciada por forças de atração, de natureza coloidal, originando a parcela de coesão, inexistente nas areias.

CERNICA (1995) observa que a coesão e o ângulo de atrito, juntamente com outras propriedades dos solos, podem ser representados pelo círculo de Mohr. A relação que expressa a tensão cisalhante, de acordo com a teoria de ruptura de Mohr é dada pela expressão 2.1:

$$s = c + \sigma \tan \Phi \quad (2.1)$$

onde

c é a coesão e

$\Phi$  o ângulo de atrito

O mesmo autor ainda observa que, como o aumento da tensão de confinamento, ocorre uma diminuição desprezível no ângulo de atrito, principalmente, em areias e outros materiais granulares menos coesivos. Assim, é importante o conhecimento de que a resistência ao atrito interna é gerada pelo atrito por escorregamento e por rotação. Juntamente a outros fatores como o grau de saturação, a forma das partículas, a consistência, interagem, com efeito, na resistência ao cisalhamento do solo.

Além da plataforma, outro componente fundamental da infra-estrutura é o sistema de drenagem que exerce papel fundamental na proteção da infra-estrutura à medida que impede a chegada de águas subterrâneas e facilita a retirada de água proveniente de camadas superiores da via. Estruturas tais como canaletas de drenagem, redes de condução e escoamento das águas superficiais e sub-superficiais são utilizadas (RIVES, PITA E PUENTES, 1977). Observando o

aspecto econômico, ela também é importante quando considerado o impacto de investimentos futuros de manutenção da via.

Segundo RAYMOND (1937) tanto as águas superficiais como as sub-superficiais devem ser consideradas, adequando elementos de escoamento, tais como construção de canaletas para retirada das águas superficiais e rebaixamento de lençol para águas sub-superficiais. Os taludes laterais da plataforma recebem elementos de contenção da chegada de água à estrutura da via como canaletas de interceptação, que devem ser projetadas em cota superior à via na estrutura dos taludes, devem ser projetadas nos taludes acima da ferrovia. Na consideração dessas estruturas, o escoamento deve ser suficiente para impedir a formação de bolsões de água na infraestrutura da via. O simples aumento da altura do lastro não é suficiente para impedir a ação deletéria dessa água sobre a via. Pode ser necessária a instalação de tubos de 0,15 m laterais a via, abaixo das canaletas, com função de drenar a água e conduzir para as camadas mais permeáveis ou a outras estruturas de escoamento.

### 2.1.2 – A superestrutura ferroviária

A superestrutura ferroviária é formada pelos seguintes elementos: trilhos, dormentes, lastro e sub-lastro, conjunto sujeito ao desgaste do tráfego e do clima, passível de renovação quando se atinge os limites de segurança ou comodidade determinados em normas específicas (BRINA, 1979).

O primeiro elemento considerado é o sub-lastro sendo a camada superior à plataforma e inferior ao lastro e pode ser definida, segundo STOPATTO (1987), como “... a camada de material selecionado colocada sobre a plataforma acabada e regularizada de terraplenagem, com a finalidade de absorver os esforços transmitidos pelo lastro e transferi-los para as camadas subjacentes, na taxa adequada à capacidade de suporte dessas camadas, impedindo a penetração do lastro.” Para RAYMOND (1937), deve-se selecionar o sub-lastro de forma que ele proporcione um bom suporte para o lastro e uma boa capacidade de drenagem.

Sendo assim, o sub-lastro é um elemento importante no conhecimento das interações dos elementos da via, tendo como principais funções, segundo BRINA (1979):

- a) Aumentar a capacidade de suporte da plataforma;
- b) Evitar a penetração do lastro na plataforma;
- c) Aumentar a resistência do leito à erosão e a penetração de água;
- d) Gerar um apoio elástico ao lastro, tornando a via mais flexível;
- e) Possuir boa capacidade de drenagem;
- f) Baratear a implantação, já que é material mais barato que o lastro;

A espessura desta camada varia entre 20 e 30 cm, dependendo do tipo de plataforma e da espessura da camada de lastro superior (BRINA, 1979; STOPATTO, 1987).

STOPATTO (1987) descreve como materiais que podem formar o sub-lastro, os constituídos de:

- solo;
- mistura de solos de jazidas;
- mistura de solo e areia;
- mistura de solo e agregado;
- mistura de solo e cimento;
- agregados miúdos e graúdos.

Quanto às características desses materiais, BRINA (1979), observa que se deve obedecer aos seguintes limites:

- IG: igual a zero;
- LL: máximo de 35;
- IP: máximo de 6;
- Preferencialmente material que se enquadre no grupo A1 de classificação de solos

HBR;

- Expansão máxima de 1 %;
- CBR: mínimo de 30 %;

Algumas diferenças em relação a esses valores são citadas por STOPATTO (1987), reproduzindo valores da ASTM-1241-64-T. As principais variações quanto aos materiais são:

- LL da fração que passa pela peneira nº 40 deve ser < 25% e para solos lateríticos < 35%;
- IP da fração que passa na peneira nº 40 < 6% e, no caso de solos lateríticos, < 10%;
- CBR: mínimo de 20%;
- Expansão máxima de 0,5%;
- Valor do “Los Angeles” do material que passa na peneira nº 10 deve ser 50%;
- A composição granulométrica do material a ser usado como sub-lastro deve estar nas faixas A, B, C e D da AASHTO, conforme apresentado na Tabela 2.2, permitindo-se a mistura de solos com areia, agregados ou cimento, ou só agregados para conseguir-se a granulometria adequada. A composição granulométrica deve atender às condições de filtro de Terzaghi em relação ao solo da plataforma evitando assim a subida de finos das camadas de infra-estrutura.

Tabela 2.2: Granulometria do Sub-lastro segundo a AASHTO.

Granulometria do Sublastro				
Peneiras	A	B	C	D
% em peso passando pelas peneiras				
2"	100	100	x	x
1"	x	75 - 90	100	100
nº 4	25 - 55	20 - 60	35 - 65	50 - 85
nº 10	15 - 40	20 - 60	25 - 50	40 - 70
nº 40	8 -- 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45
nº 200	2 -- 8	5 -- 15	5 -- 15	5 -- 20

Fonte: STOPATTO (1987)

Outra camada constituinte da superestrutura é o lastro. O lastro é a camada superior ao sub-lastro e inferior à grade constituída pelos dormentes e trilhos. “É a camada de material superior que, basicamente, suporta a grade ferroviária e distribui as cargas convenientemente para o sub-lastro” (STOPATTO, 1987).

Para SELIG (1985), o lastro é um componente fundamental na estrutura da via, frente ao aumento das cargas por eixo das composições e a velocidade do tráfego. O estudo do lastro ganha importância pelo alto grau de desconhecimento de alguns fatores que afetam seu desempenho, como o tipo de material, a graduação, a espessura.

As funções do lastro que são mais importantes para o bom desempenho da via, segundo BRINA (1979) e SELIG (1985), e que devem ser consideradas quanto ao seu dimensionamento são:

- a) Conter os dormentes contra as cargas da ferrovia, tanto na transversal como na longitudinal;
- b) Reduzir a tensão sobre subleitos de baixa capacidade de suporte;
- c) Facilitar a manutenção;
- d) Proporcionar drenagem rápida da via;
- e) Proporcionar resiliência a via;
- f) Constituir uma superfície contínua e uniforme para o assentamento da grade ferroviária;

Para atender às funções acima citadas, os materiais utilizados como lastros devem possuir certas características técnicas, segundo BRINA (1979) e RAYMOND (1937) tais como:

- a) Resistência aos esforços transmitidos pela grade;
- b) Possuir características elásticas limitadas;
- c) Ter dimensões adequadas ao preenchimento dos vãos entre os dormentes, fechando os espaços existentes também abaixo dos dormentes gerando uma superfície nivelada;
- d) Possuir resistência à ação do meio;
- e) Possuir boa permeabilidade para melhorar as características de drenagem;
- f) Gerar pouca quantidade de material fino;
- g) Deve ser formado por partículas que impeçam o crescimento de ervas daninhas.

Os materiais utilizados como lastro são geralmente provenientes de rochas de origem ígnea e rochas silicosas. As de origem ígnea são as mais utilizadas, com destaque especial para as pedras britadas de granito e basalto (AMARAL, 1957).

Acima da camada de lastro, o elemento no qual são fixados os trilhos são chamados de dormentes. Segundo BRINA (1979), o conjunto dos dormentes é a estrutura na qual são fixados os trilhos, servindo de elemento de transferência dos esforços do tráfego para o lastro. Além da transferência de esforços, deve permitir a fixação efetiva dos trilhos, impedindo a movimentação e mantendo constante a distância destes.

O mesmo autor observa que o dormente para executar suas funções deve possuir algumas características, tais como:

- a) Dimensões compatíveis para que a capacidade de suporte do lastro não seja ultrapassada;
- b) Rigidez e elasticidade;
- c) Resistência aos esforços da via;
- d) Durabilidade;
- e) Permita o nivelamento da via;
- f) Não permita a movimentação longitudinal e transversal da via;
- g) Permita uma fixação segura dos trilhos não sendo totalmente rígida;

E quanto ao tipo de material para utilização como dormentes em via férrea, empregam-se os seguintes:

- a) Madeira;
- b) Aço;
- c) Concreto;

O dormente de madeira é o de uso mais tradicional. Ele possui uma série de qualidades para esse tipo de elemento, entretanto o seu uso como dormente de linha férrea tornou-se pouco nobre, frente à escassez de madeira de lei, e, conseqüentemente, o alto valor agregado. Assim iniciou-se a busca por outros tipos de dormentes que tivessem características e pudessem ser utilizados na via férrea (BRINA, 1979).

Para SCHRAMM (1961), a seleção do dormente adequado para determinado uso depende da resistência da madeira, levando à escolha de uma seção transversal adequada, visando ao corte mais econômico possível. Também são levados em conta a capacidade de receber

fixações dos trilhos, a durabilidade, a estabilidade, a manutenção e a facilidade de manuseio.

Os parâmetros físicos dependem de espécie para espécie para ilustrar as principais utilizadas como dormente. AMARAL (1957) cita: Aroeira bugre, Canela sassafrás, Perobas, Jacarandá, Ipê, Carvalho, Pau Ferro, Eucalipto, dentre outras. Uma das características físicas importante, o módulo de elasticidade, é apresentado na tabela 2.3 a seguir, para alguma espécies, bastante usadas no Brasil, segundo PFEIL(1994).

Tabela 2.3: Módulo de elasticidade de algumas madeiras utilizadas como dormentes.

<b>Módulo de Elasticidade de alguns dormentes de madeira</b>	
Nome vulgar	Módulo de Elasticidade (flexão)
	E kgf/cm <sup>2</sup>
Ipê tabaco ou Ipê amarelo	154000
Eucalipto	136000
Pinho do paraná	105000
Peroba rosa	94000

Fonte: PFEIL (1994)

Outro parâmetro em relação aos dormentes é o seu comprimento. Para SCHRAMM (1961) o comprimento dos dormentes é importante, mas as condições do lastro exercem grande influência na transmissão dos esforços da via. A pressão no lastro é maior quando o lastro tem baixa rigidez para dormentes com mesmo comprimento. Dependendo das condições até dormentes menores sobre lastros bons exercem menos pressão. Considerando o papel dos dormentes frente à distribuição de tensões, demonstra que formas mais largas e mais compridas distribuem de forma melhor as cargas até a fundação da via, do mesmo modo que, seu espaçamento auxilia a qualidade da socaria.

Na tabela 2.4 a seguir, apresentam-se os principais parâmetros dimensionais dos dormentes de madeira utilizados no Brasil.

Tabela 2.4: Dimensões dos dormentes de madeira utilizados no Brasil.

<b>Dormentes Usado no Brasil</b>	
<b>Bitola Larga</b>	
Comprimento	2,5 a 2,80 m
Largura	0,18 a 0,25 m
Altura	0,17 m
<b>Bitola Estreita</b>	
Comprimento	1,80 a 2,00 m
Largura	0,18 a 0,22 m
Altura	0,12 a 0,16 m

Fonte: AMARAL (1957)

Os dormentes metálicos são utilizados essencialmente em lugares onde o custo da madeira é elevado. Executam-se os dormentes com perfil adequado aos esforços solicitantes e com forma necessária para atender a sua função de suporte do trilho, fixação e nivelamento da via (AMARAL, 1957). O mesmo autor observa que o dormente de concreto tem ganhado muito espaço nos últimos anos. Os dormentes de concreto podem ser monobloco ou bi-bloco. Suas vantagens principais são as resistências às intempéries do meio, o baixo custo de manutenção, salvo em caso de quebra da fixação e a facilidade de fabricação.

A distribuição dos dormentes na via permanente depende das características físicas da via. A NB-476 (1979) determina o espaçamento máximo que pode haver entre os dormentes de acordo com a classe da via e da velocidade. Os valores desta norma são apresentados na Tabela 2.5 onde se pode observar que vias principais de Classe I o espaçamento é menor do que em vias secundárias.

KERR (1976) observa que, quando a via com dormentes transversais foi introduzida, as cargas de roda eram muito pequenas e o espaçamento dos dormentes era relativamente grande. Um exemplo por ele apresentado indica que, no início do século XIX, o espaçamento dos dormentes era de aproximadamente 1,8 metros. Como as cargas de roda progressivamente aumentaram os trilhos e a secções da via aumentaram e o espaçamento dos dormentes diminuiu.

Tabela 2.5: Espaçamento máximo entre Dormentes

<b>Espaçamento Máximo entre Dormentes</b>	
Linhas em via	Espaçamento (cm)
Classe I	60
Classe II	65
Classe III	71
Acessória com velocidade máxima de 30 km/h	80

Fonte: ABNT - NB-476 (1979)

No topo da via férrea está o elemento que permite o rolamento das rodas dos vagões ou locomotivas e o responsável pela transferência de carga para os demais componentes, denominados trilhos. Os trilhos fazem parte da superestrutura ferroviária, permanecem em posição paralela e são feitos de aço, conduzindo as rodas dos vagões e locomotivas (HAY, 1982). É a superfície de rolamento dos veículos, o que, ao longo dos anos, sofreu modificações quanto ao seu formato e peso (BRINA, 1979). O perfil do trilho utilizado atualmente foi criado por Vignole, que idealizou um trilho que permitia tanto uma fixação adequada como resistência aos esforços, ficando denominado como perfil Vignole, constituído por boleto, alma e patim.

Os principais trilhos utilizados no Brasil atualmente são o TR45, TR57 e o TR68, os três, respectivamente, com as suas características descritas no tabela 2.6:

Tabela 2.6: Tipos de trilhos utilizados no Brasil e suas características físicas.

<b>Trilhos</b>			
Tipo Nominal Brasileiro - TR	45	57	68
Peso Calculado, em kg/m	44,645	56,897	67,56
Área Total (cm <sup>2</sup> )	56,9	72,58	86,13
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	1610,8	2730,5	3950

Fonte: ABNT - NBR 12320 – Trilho “Vignole” – Forma e Dimensão (1979)

Para fins de dimensionamento e cálculo dos esforços sob a via, considerando também o espaçamento existente entre os dormentes, o trilho pode ser analisado como uma viga suportada de forma flexível e elástica (HAY, 1982). Os trilhos são fixados aos dormentes a uma distância que garanta o perfeito posicionamento das rodas dos vagões. A essa distância dá-se o nome de bitola, que corresponde a distância entre a face interna de dois trilhos, em paralelo, medida a 12 mm do topo da face superior do boleto.

Segundo BRINA (1979), a bitola utilizada como padrão mundial é a 1435 mm, estabelecida na conferência internacional de Berna, em 1907. No caso brasileiro existe, predominantemente, a bitola de 1,00 metro, conhecida como bitola métrica, e a bitola de 1,60 metro, conhecida como bitola larga e definida, segundo o Plano Nacional de Viação, como o padrão nacional. Estas bitolas são apresentadas na tabela 2.7.

Tabela 2.7: Bitolas existentes no Brasil.

<b>Bitolas Existentes no Brasil e extensão</b>	
Bitola (m)	Extensão (km)
1,600	3444
1,435	194
1,000	26694
0,760	202
0,600	16

Fonte: BRINA (1979)

Segundo dados da ANTF (2007) a bitola universal é utilizada na Estrada de Ferro Amapá, e na nova linha do Metrô de São Paulo. O restante da malha é de bitola larga e bitola estreita. As bitolas 0,76 e 0,60 estão erradicadas ou possuem função turística.

A superestrutura ferroviária e seus elementos também são denominados por MEDINA (1997) como pavimento ferroviário. Tal denominação vem da metodologia utilizada para dimensionamento das espessuras de lastro e sublastro adotarem o método do CBR, de origem rodoviária e aeroportuária.

## **2.2 – Solicitações em cada elemento da via férrea**

### **2.2.1 – Avaliações estáticas**

Os esforços principais que interferem no dimensionamento da via são oriundos das cargas de orientação vertical, gerados pela circulação dos veículos ferroviários sobre os trilhos. Tais esforços são considerados quanto ao seu caráter estático e dinâmico (RIVES, PITA E PUENTES, 1979).

Para HAY (1982), a distribuição desses esforços se dá através do contato aço-aço, constituído pelas rodas do veículo e pelos trilhos, suportados por dormentes de madeira sobre uma base ou um lastro.

A resistência de sustentação e qualidade da ferrovia tem influência direta com as condições de carregamento, podendo considerar os três parâmetros fundamentais a carga por eixo, a tonelagem total e a velocidade de rolamento. ESVELD (1989) considera que as condições da ferrovia são determinadas pelo grau de carregamento estático, adicionado a um carregamento dinâmico. Através da tonelagem total é possível quantificar a deterioração da via e planejar trabalhos de manutenção e renovação.

A fonte dos esforços e a sua forma de ação foram analisadas por muito pesquisadores. RIVES, PITA E PUENTES (1979), no caso dos esforços estáticos, consideram que são provenientes do peso próprio dos veículos e dos elementos da via. No caso dos esforços dinâmicos, provêm de defeitos ou irregularidades da via férrea, defeitos dos trilhos, imperfeições de nivelamento de via e deficiência do apoio dos dormentes, ou do veículo ferroviário. Para esses carregamentos estáticos e dinâmicos, HAY (1982) considera que a via proporciona um apoio elástico, retransmitindo os esforços para os elementos constituintes até a plataforma.

Para ESVELD (1989) as forças que agem sobre a ferrovia caracterizam-se pelas ações repetidas com flutuações rápidas que podem ser consideradas quanto ao sentido do carregamento

em:

- Verticais;
- Horizontais, transversais a via;
- Horizontais, paralelas a via;

HAY (1982), considera que o trilho distribui a carga em mais de um dormente, fato que geralmente não se considera para o lastro e a plataforma, tomando-se a carga como concentrada em um dormente, como poderia acontecer em condições de falta de suporte dos dormentes e de falta de uniformidade do lastro. A distribuição das cargas depende também da área do dormente em questão e não é uniforme, dependendo do ponto de aplicação.

Tal consideração de distribuição de cargas sobre mais de um dormente foi estudada, ainda segundo HAY (1982), por Talbot, que descreveu que a carga de um eixo simples distribui-se para frente e para trás do ponto de aplicação. Valendo também para mais eixos pelo efeito da superposição, somando-se algebricamente os momentos ou deformações para um ponto qualquer em estudo.

Quanto à distribuição das cargas, ESVELD (1989) considera que a distribuição ocorre de forma irregular entre os trilhos dificultando sua quantificação, sendo assim as cargas podem ser divididas, quanto a sua natureza em:

- a) Carregamentos quase estáticos: resultado da ação do peso bruto, da força centrífuga e da força centrípeta nas curvas e AMV's, e cruzamentos;
- b) Carregamentos dinâmicos: resultado de irregularidades da via, rigidez irregular combinada com variações de assentamento da via e da fundação, descontinuidade das soldas e juntas, corrugações na superfície de rolamento, defeitos nas rodas (pontos planos e vibrações naturais) e o movimento de lace;

O carregamento vertical pode ser dado pela expressão 2.2:

$$Q_{est} = Q_{est} + Q_{centr} + Q_{cruz} + Q_{din} \quad (2.2)$$

Onde:

$Q_{est}$  = carregamento estático de roda: representa metade da carga por eixo, medida sobre uma reta horizontal da via;

$Q_{centr}$  = acréscimo de carga por roda: representa o aumento da carga sobre o trilho externo devido as curvas em conexão com as forças centrífugas não-compensadas;

$Q_{cruz}$  = igual ao item anterior, considerando a ação para cruzamentos;

$Q_{din}$  = Carregamento dinâmico por roda;

Devem-se citar os carregamentos horizontais, exercidos pelas rodas da composição sobre o trilho externo, expressos pela relação 2.3:

$$Y_{tot} = Y_{flange} + Y_{centr} + Y_{cruz} + Y_{din} \quad (2.3)$$

Onde:

$Y_{flange}$  : força lateral na curva: representa a força exercida pela flange da roda contra o trilho externo;

$Y_{centr}$  : força lateral combinada com a força centrífuga não compensada;

$Y_{cruz}$  : a mesma combinação anterior, mas considerando os cruzamentos;

$Y_{din}$  : componente da força dinâmica lateral: representa o esforço realizado diretamente sobre a via realizado pela ação predominantemente de um fenômeno de lace;

Os esforços laterais devem ser resistidos pela:

- a) Resistência ao deslocamento lateral dos dormentes dentro do lastro;
- b) Rigidez horizontal da estrutura da ferrovia

Ainda segundo ESVELD (1989), a resistência lateral da via é limitada no sentido horizontal, assim altos esforços laterais podem gerar movimentos nos dormentes dentro do lastro, podendo induzir a uma deformação permanente. Observa que o último sentido de ação das forças corresponde ao horizontal longitudinal da via, devido à ação da temperatura, principalmente em linha com trilho longo soldado, e ações consideradas como estáticas, tais como: aceleração e

frenagem, tensões de retração nos trilhos longos soldados e aumento do comprimento do trilho.

Para RIVES, PITA E PUENTES (1979), esforços originados pelo impacto da roda sobre juntas de trilhos, ou por pontos planos das rodas também podem produzir grandes solicitações sobre o sistema. Efeito de temperatura deve ser avaliado, porque exerce esforço sobre os trilhos e sobre o sistema como um todo, na tentativa de restrição do movimento.

Na tabela 2.8, apresenta-se alguns valores típicos de cargas por eixo em várias ferrovias ao redor do mundo. Os valores de carga por eixo no Brasil, nas ferrovias de minério, são em torno do padrão dos Estados Unidos e Austrália, predominantemente de carga pesada.

Além do valor da carga KERR (1976) nota que o espaçamento dos pontos de aplicação das cargas é um parâmetro importante que deve ser considerado com a avaliação dos esforços sobre a via.

Tabela 2.8: Valores típicos de cargas por eixo para algumas ferrovias no mundo.

<b>Valores Típicos de Carga por Eixo</b>		
<b>PAIS</b>	<b>Tipo</b>	<b>Carga (tf)</b>
HOLANDA	Trem de passageiro      vagão	12
	vagão + locomotiva	17
	Vagão de Carga	23
	Locomotivas	22
INGLATERRA		25
ESTADOS UNIDOS	Carga Pesada	25-35
AUSTRÁLIA	Carga Pesada	25-35

Fonte: ESVELD (1989)

## 2.2.2 – Interação dos esforços sob cada elemento

HAY (1975) define a ferrovia como uma estrutura que possui uma capacidade de carregamento dependente das características de combinação da fundação, superestrutura e cargas.

Os elementos da infra-estrutura e da superestrutura sofrem interação quando são solicitados pelo veículo ferroviário. Como observa HAY (1982), a aplicação de uma carga em um ponto qualquer da via, sobre um trilho, causa uma deflexão no trilho acompanhada de um movimento para baixo e compressão dos dormentes e lastro abaixo da aplicação da carga.

A via férrea como estrutura tende a ser dimensionada para que os elementos de maior resistência estejam em contato com as mais altas tensões. FREDERICK & ROUND (1985), em sua pesquisa sobre os carregamentos verticais que atingem a via, expõem o problema de variação dos esforços nos trilhos gerados pelo contato roda-trilho. Ainda, em sua pesquisa, entendem que a inércia, tanto de trilhos como dormentes, absorvem boa parte das cargas transmitidas para a via, possuindo uma parcela menor que atinge o lastro e outra menor ainda que atinge a plataforma. Assim, o projetista, ao considerar a interação dos componentes do sistema, muda a concepção dos carregamentos.

Um exemplo desta interação é o processo de deterioração da via sobre a ação de cargas descrita por HAY (1975). A deterioração aparece de muitas formas: perda de nivelamento e alinhamento, conversão da plataforma e de secções do lastro em camadas de massa plástica pelo bombeamento de lama e água, abertura de bitola, corte de placas de apoio, fendilhamento e ruptura das fixações, aceleração da abrasão, desgaste das extremidades dos trilhos e formação de corrugação por descamação dos trilhos e, finalizando, com um grande potencial de fraturas dos trilhos.

Para HAY (1982), considerando a influência exercida pelo trilho, um de maior rigidez torna a estrutura ferroviária mais rígida e estável. O dimensionamento do trilho juntamente com a rigidez do lastro e dos dormentes é considerado para gerar um sistema resistente à máxima tensão admissível. O tipo de trilho, descrito pelas suas características físicas e geométricas, contribui para a rigidez e estabilidade da via. A rigidez do trilho varia de forma quadrática com o peso e de razão cúbica com a altura. Observa que irregularidades nas superfícies dos trilhos podem gerar oscilações, choques e vibrações que podem levar ao aparecimento de defeitos em outras estruturas da via. O nível dos trilhos tem grande importância para manutenção das condições de rolamento, devendo ser feita a socaria do lastro tanto quanto necessário.

Também o estado da plataforma exerce papel importante sobre os outros elementos da via. Para RIVES, PITA E PUENTES (1979), o grau de rigidez que a plataforma confere a estrutura modifica os estados de tensão dos outros componentes. A importância de conhecer as características da plataforma quanto à deformação é vital para o entendimento da degradação da via com a passagem do tráfego. Degradação essa gerada por recalques diferenciais no lastro e de deficiência de apoio dos dormentes.

Processo que pode ser explicado, segundo HAY (1982), através da natureza elástica do suporte da via, quando sob ação de uma carga, gera-se uma deflexão que retorna a sua posição inicial tão logo a carga seja removida. Este fenômeno atinge todos os elementos constituintes da via, desde a plataforma até os trilhos, gerada pela passagem do tráfego, ocasionando assim um processo de fadiga e deformação plástica da estrutura. Assim não há o retorno do suporte a sua condição inicial quando a carga é removida.

Ainda HAY (1982) também considera que a influência do comportamento da plataforma pode influir no comportamento da grade. Plataformas com um comportamento mais rígido combinadas com tráfego leve dimensionam-se com grades de comportamento menos rígido, ou, por outro lado, plataformas menos rígidas combinados com tráfego pesado leva a adoção de uma grade de comportamento mais rígido.

## **2.3 – Deformações da Via Permanente**

### **2.3.1 – Deformações e os elementos da via**

Para SHENTON (1984) os três principais fatores de deterioração da geometria da via são: o efeito do carregamento dinâmico, a forma do trilho e o desempenho do lastro. Dentro do último fator, o desempenho do lastro, ainda existem pontos poucos explorados como, por exemplo, a importância do tipo de lastro e da rigidez do lastro sobre a deformação. A influência da seção do trilho e do espaçamento entre dormentes na deformação vertical da via são também

estudados e com o uso de equipamentos de carga rolante a influência deles poderia ser levada em conta apenas para o cálculo da carga em cada dormente. Desta forma, a mudança de deflexão vertical poderia ser levada em conta através da multiplicação por um fator de carga. Através de amostras triaxiais foram estudadas as cargas dinâmicas que afetam a via e, de acordo com estes ensaios, para um determinado nível de carga a frequência de carregamento não influencia o recalque do lastro.

#### a) Trilhos

Para SELIG E WATERS (1994) os trilhos devem ter rigidez suficiente para servir como viga para os esforços que atingem a via permanente. Assim, a carga concentrada de roda, através dos trilhos, se transfere para os dormentes sem deflexão excessiva entre os suportes, considerando o espaçamento que existe entre os dormentes. Descrevem que, no processo de deformação do trilho, mediante a ação de uma força vertical, fora do ponto de contato desta força, o trilho tende a levantar e, no ponto de contato, o trilho tende a abaixar. Essas forças são compensadas pelo peso do trilho e dos dormentes com alguma influência da fricção entre os dormentes e o lastro.

TARABJI e THOMPSON (1976) realizaram análise paramétrica dos elementos da via permanente baseado em um modelo de análise estrutural da via, modelo desenvolvido por método dos elementos finitos denominado ILLI-TRACK, desenvolvido na Universidade de Illinois.

Considerando o seu papel frente às deformações, estudos dos mesmos autores revelam que, para uma boa manutenção da via, o tipo de trilho tem pouca influência sobre a deformação final da via que pode ser observada na figura 2.1, onde praticamente as curvas de deformação para os três tipos de trilhos se sobrepõem.

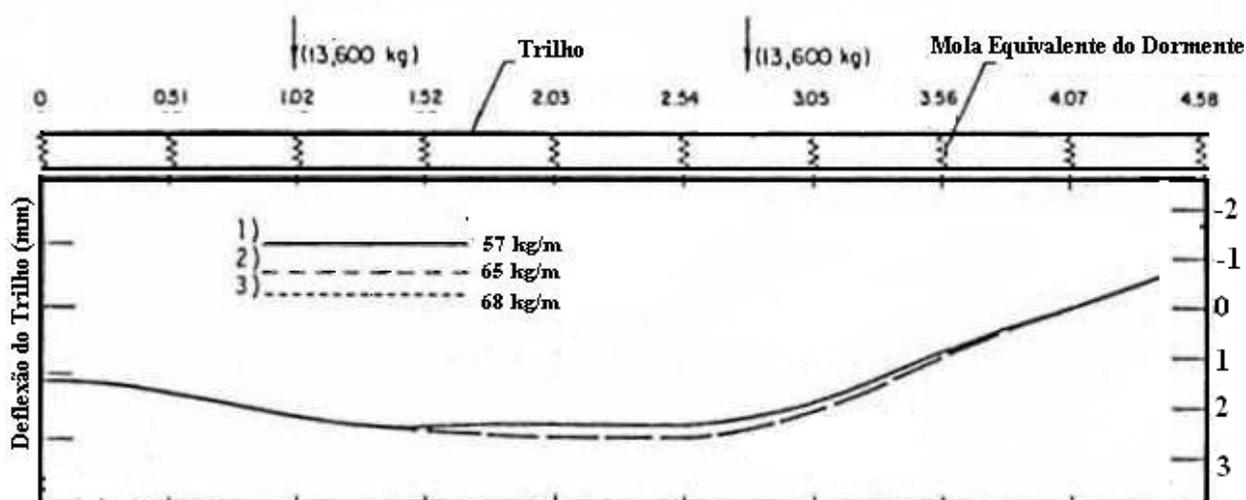


Figura 2.1: Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Perfil de Trilho. Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

## b) Fixações

TARABJI e THOMPSON (1976) observam que a proposta dos sistemas de fixação é de servir de contenção para os trilhos contra os dormentes e resistir aos movimentos verticais, longitudinais, laterais e rotacionais. Estes movimentos são gerados pela passagem das cargas de roda e o efeito da temperatura nos trilhos. Observam que as placas de apoio exercem função fundamental na transferência dos esforços de maneira mais adequada para os dormentes de madeira, proporcionando uma pressão de contato admissível na madeira e protegendo-a quanto ao desgaste mecânico. A este papel de proteção mecânica o tamanho da placa também exerce grande influência. Placas de tamanho inadequado podem acelerar o processo de ruptura das mesmas e deterioração prematura dos dormentes.

As placas de apoio têm importante papel quanto à movimentação dos trilhos, tais como:

- auxiliam as fixações na restrição lateral dos trilhos através da ficção e das ombreiras laterais;
- proporciona uma superfície angular entre a roda e o trilho tornando o ângulo de contato apropriado;

Ainda TARABJI e THOMPSON (1976) apresentam como outros elementos de fixação importantes são:

- os tirefondes: proporcionam pouca resistência ao levantamento do trilho, pois a cabeça do tirefonde freqüentemente não está em contato com o patim do trilho;

- os grampos elásticos: são uma alternativa aos tirefondes. Quando fortemente apertados contra a base dos trilhos, eles proporcionam alguma restrição ao levantamento, ao movimento longitudinal tão bem como uma restrição lateral dos trilhos;

- placas de amortecimento: permitem a formação de uma superfície resiliente nos dormentes de concreto, aumentando a durabilidade do dormente;

EISENMANN, STEINBEISSER E DEISCHL (1984) apresentam um outro aspecto em relação às fixações elásticas descrevendo a característica de permitir uma alta deflexão do trilho sobre carga de roda, reduzindo, assim, a impedância do mecanismo da superestrutura a qual pode levar à excitação da vibração.

### c) Dormentes

Para STOPATTO (1987), a importância do conhecimento das características dos dormentes é fundamental para entender-se a forma de transferência de carga para lastro, possibilitando estabelecer relações matemáticas para descrever o fenômeno.

No que tange aos aspectos de deformação, segundo SELIG e WATERS (1994) os dormentes têm algumas funções importantes. No caso dos dormentes de concreto, proporcionam um ângulo de fixação para os trilhos que ajuda a desenvolver um apropriado contato roda/trilho.

A deformação dos dormentes pode variar também de acordo com o tipo, concreto ou madeira, e as suas dimensões. Segundo SHENTON (1984) Os dormentes de madeira têm recalques entre 70 e 90% de um dormente de concreto com mesmo comprimento e largura. Testes de meia escala, que determinam a influência da forma e tamanho dos dormentes quanto à deformação, mostram que o recalque é inversamente proporcional à área de suporte, com uma ligeira influência do fator de forma, isto é, uma área quadrada é o ponto de ótimo.

Em relação à distribuição longitudinal de pressão sobre a via, SCHRAMM (1961) considera que os valores de espaçamento e largura dos dormentes são importantes. Isso se deve a superposição das áreas de pressão entre dois dormentes vizinhos, o que conduz ao aparecimento de pressão entre os dormentes, o que é desejável, ajudando a impedir a subida de solo fino, que contamina o lastro.

Tal tendência também foi observada por HAY (1975). O uso de dormentes maiores e mais largos com um espaçamento mais próximo é o melhor para a distribuição de cargas.

Por outro lado, pesquisas de TARABJI e THOMPSON (1976) demonstram que a máxima deflexão no trilho e o máximo momento do trilho são similares para os três valores diferentes de largura de dormente. Há, apenas, uma redução na máxima tensão vertical sobre o lastro e na máxima deformação vertical na plataforma com o aumento da largura do dormente. Ao considerar o efeito transversal à grade, o lastro tem mais importância do que o comprimento dos dormentes, em relação à influência da pressão, neste aspecto, tendo a dimensão do dormente pequena relação com a altura do lastro.

#### d) Espaçamento dos dormentes

Sobre o efeito do espaçamento dos dormentes, TARABJI e THOMPSON (1976), apresentam dois aspectos. Pouco espaçamento permite um aumento na sobreposição dos efeitos dos dormentes adjacentes no lastro e na plataforma, mas uma menor reação em cada dormente. Um aumento do espaçamento permite a diminuição da sobreposição dos efeitos dos dormentes adjacentes no lastro e na plataforma, mas uma maior reação nos dormentes. Assim em um pequeno espaçamento, os efeitos de sobreposição nos dormentes adjacentes dominam enquanto para um espaçamento maior, a reação individual dos dormentes domina os resultados em relação às deformações sobre os dormentes como pode ser observado na figura 2.2 e na tabela 2.9. Observando-se a Tabela 2.9 e a Figura 2.2 é nítida a influência do espaçamento sobre as deformações, tanto em relação ao trilho como em relação à máxima deformação vertical da plataforma. Para obter uma melhor precisão executaram-se os cálculos para uma malha de elementos com mais pontos nodais e denominou-se de “malha mais fina”.

Tabela 2.9: Comparação dos Efeitos na Via Permanente com A Variação do Espaçamento.

Comparação dos Efeitos na Via Permanente de acordo com a Variação do Espaçamento					
	Espaçamento dos Dormentes (cm)				
				Malha mais Fina	
	50,80	60,96	76,92	60,96	76,92
Deflexão Máximo no Trilho (mm)	2,50	2,80	3,30	2,30	3,10
Máxima Deformação Vertical na Plataforma (x0,0001)	11,50	10,80	14,00	9,40	13,80

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

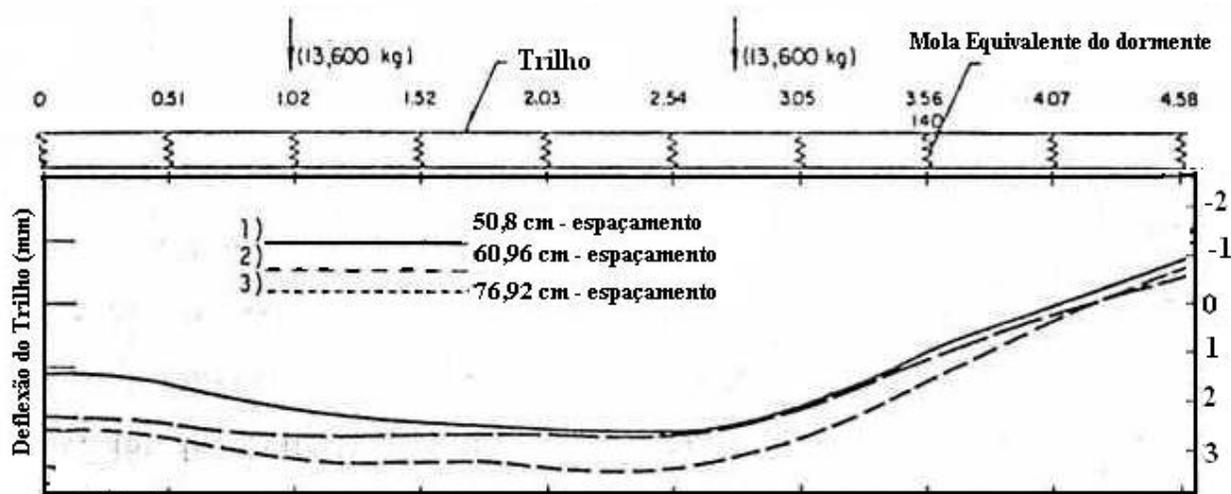


Figura 2.2: Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação do Espaçamento. Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

Também as combinações dos efeitos do espaçamento dos dormentes, com a rigidez do trilho e das fixações modificam as características das deformações. KERR (1976) observa que a proximidade do espaçamento dos dormentes e a rigidez de algumas das fixações de uso corrente, muito contribuem para o aumento da efetiva inércia da via, a qual por sua vez tem um efeito sobre a deformação. A proximidade no espaçamento dos dormentes, correntemente em uso nas linhas principais, torna aconselhável medir as deformações e as tensões nos trilhos em uma via real, a fim de estabelecer se o enrijecimento dos trilhos nas fixações notadamente os afeta.

#### e) Altura das camadas inferiores ao lastro

A falha no projeto das alturas das camadas do sublastro e as outras camadas inferiores ao lastro asseguraria recalques diferenciais na ausência da possibilidade de penetração do lastro dentro da plataforma com perda de nivelamento e alinhamento; se a plataforma é de uma argila consistente e tem umidade em excesso, ocorre formação de lama e bombeamento da via.(HAY, 1975). A profundidade do lastro meramente não traz uma solução completa, especialmente quando o topo da plataforma é composto de solos graduados com a fração fina com um alto índice de plasticidade. A área de contato entre a plataforma e o lastro é freqüentemente de estabilidade crítica. Os solos de granulometria fina, quando ainda contém uma pequena quantidade de umidade, adquire uma consistência leve como a umidade é trazida para a superfície através de capilaridade e ação de bombeamento pela passagem das cargas de roda. Uma camada pastosa pode se formar, não mais do que uma polegada ou menos de espessura. A camada menos rígida pode infiltrar no lastro sujo e permite que as partículas do lastro penetrem dentro da plataforma formando pacotes de água com uma tendência à perda de nivelamento, de alinhamento e de vida útil da via permanente.

Percebe-se na Tabela 2.10 e na Figura 2.3 que para uma diminuição da deformação relativa ao topo do trilho de aproximadamente 17% teve-se que aumentar a camada de lastro em praticamente 50%, indo de encontro com os estudos apresentados por HAY (1975) em que a influência das camadas inferiores ao lastro é de vital importância para entender a deformação da via. Mais adiante, poder-se-á observar como a utilização de uma camada de sub-lastro, por exemplo, melhora as características da via frente às deformações. Tal análise será apresentada no subitem “g” desta seção.

Tabela 2.10: Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a variação da espessura do lastro.

Comparação dos Efeitos na Via Permanente de acordo com a Variação do Espessura do Lastro			
	Espessura do Lastro (Considerando Trilho de 57kg/m)		
	20,32 cm	30,48 cm	60,96 cm
Deflexão Máximo no Trilho (mm)	2,80	2,30	2,00
Máxima Deformação Vertical na Plataforma (x0,0001)	15,20	9,40	7,80

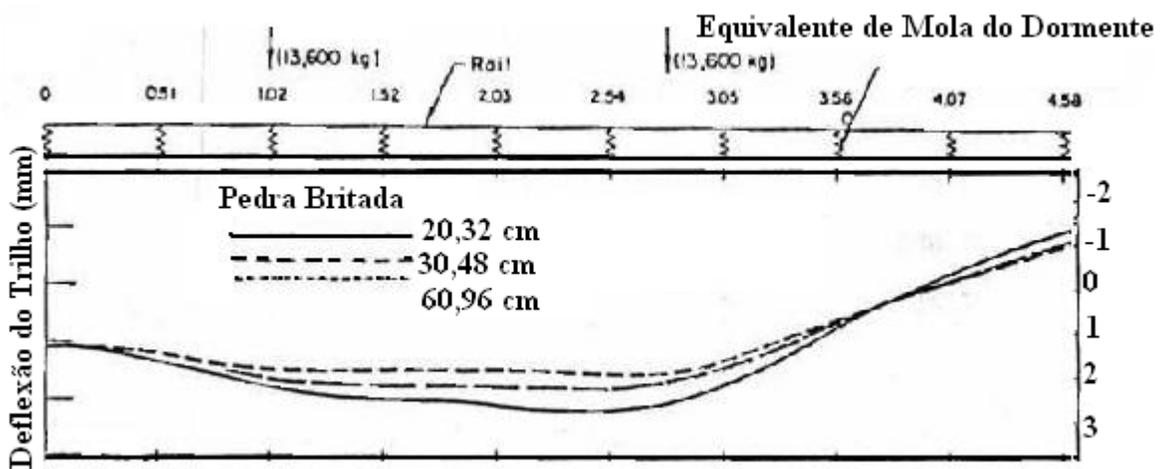


Figura 2.3: Comparação dos efeitos na via permanente com a variação da espessura do lastro.

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

#### f) Lastro

A seleção do lastro deve ser direcionada em busca da realização de uma estabilidade vertical, longitudinal e lateral. Enquanto as mantas de filtro e a parte inferior do lastro servirão como sublastro, o topo de 0,25 a 0,30 m deve ser selecionado com cuidado para escolha dos melhores materiais. É interessante notar que as especificações de lastro usadas em testes nos Estados Unidos dizem muito pouco a respeito de estabilidade, apenas de durabilidade. (HAY, 1975)

Segundo SELIG E WATERS (1994), para o estudo da deformação do lastro, pode-se subdividi-lo em três camadas:

- vão do lastro: camada de lastro que fica entre os dormentes, na região do espaçamento;
- topo do lastro: porção superior do lastro a qual recebe perturbação da socaria;
- fundo do lastro: porção inferior da camada de suporte do lastro a qual não é perturbada pela socaria e que, geralmente, é a porção mais contaminada quando não há nenhum tipo de tratamento no topo da plataforma que impeça o processo de bombeamento de finos.

Das camadas citadas, para SELIG (1984) o topo do lastro é a que merece maior atenção. Esta camada está sujeita a altas tensões e é constantemente perturbada pela manutenção e pelo tráfego da ferrovia. O estado de compactação do lastro afeta diretamente o recalque da ferrovia. Além disso, a perturbação do topo do lastro resulta numa significativa redução da resistência de flambagem lateral da via no estado descarregado. A vibração das operações de socaria re-densificam o lastro abaixo dos dormentes, mas não nas suas laterais.

Tentar substituir este adensamento apenas pelo poder do tráfego de adensar o lastro sobre os dormentes leva tempo e pode gerar como resultado um recalque não uniforme ao longo da via. Mesma tendência descrita por KERR (1976) notando que, em uma ferrovia nova ou renovada, as propriedades do lastro podem diferir substancialmente daquela ferrovia adensada pelo tráfego, e, desta forma, para a mesma carga a resposta da ferrovia pode diferir. Observa que o tipo de lastro também afeta a degradação da via. O aumento do tamanho das partículas do lastro está correlacionado com um aumento do recalque da via.

Para uma via com lastro contaminado, deve-se considerar também o efeito do “*gap*” entre os dormentes e o lastro. PAIVA, AGUIAR e SILVA (2007) demonstraram, em estudo que esse espaço entre o fundo dos dormentes e o topo do lastro pode ser uma medida do grau de contaminação do lastro e da necessidade de limpeza e/ ou renovação do mesmo.

Resultados de pesquisas de TARABJI e THOMPSON (1976) indicam que a influência do tipo de lastro sobre a resposta do sistema de suporte da ferrovia não é grande. Entretanto, diferentes materiais de lastro exibem características diferentes em relação à deformação permanente, comportamento e quebra das partículas quando sujeitas à repetição de aplicação do estado de tensão. Enquanto a resposta transiente com o uso de diferentes lastros pode ser similar, o lastro pode possuir diferentes propriedades em relação à durabilidade. Portanto, é essencial

comparar os tipos de lastros observados na figura 2.4 e na tabela 2.11, ao considerar os fatores que afetam o comportamento do lastro em adição a sua resposta estrutural. Nota-se, principalmente na Tabela 2.11, que a variação do tipo de lastro modifica não somente o perfil de deformação do trilho mas, também, a máxima deformação vertical da plataforma.

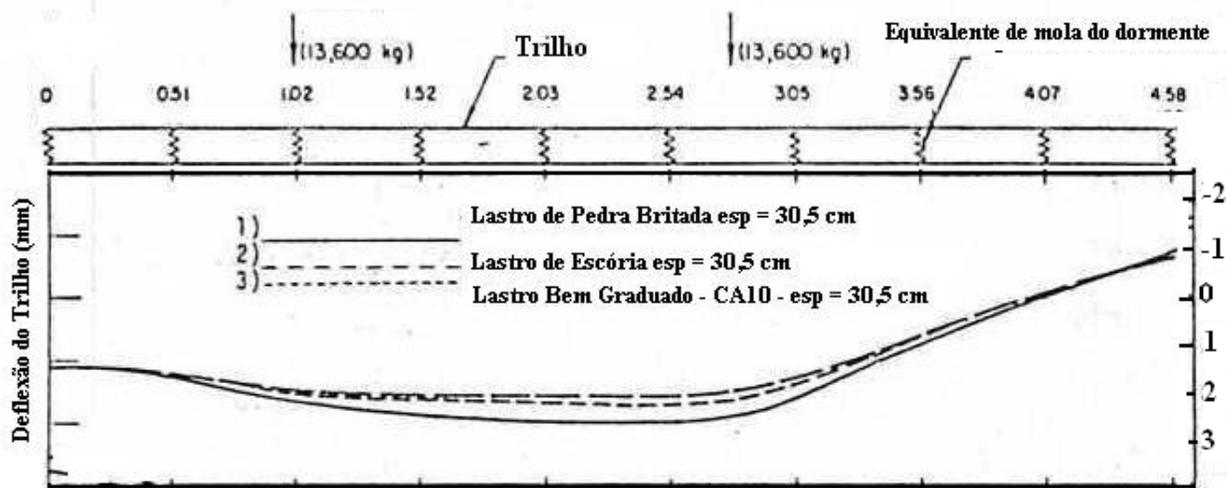


Figura 2.4: Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Lastro. Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

Tabela 2.11: Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Lastro.

Comparação dos Efeitos na Via Permanente de acordo com a Variação do Tipo de Lastro			
	Tipo de Plataforma		
	Pedra Britada	Escória	Lastro Bem Graduado
Deflexão Máximo no Trilho (mm)	2,50	2,00	2,30
Máxima Deformação Vertical na Plataforma (x0,0001)	11,50	7,10	8,30

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

Segundo RAYMOND & DIYALJEE (1979), a importância de conhecer a relação entre o tipo de agregado e sua deformação esta em:

- a) Melhorar as especificações de lastro;
- b) Desenvolver um programa efetivo de manutenção incluindo os custos;

- c) Obter parâmetros para análises e projetos;
- d) Conhecer o comportamento dos vários tipos de lastro frente à deformação permanente e a taxa de degradação do lastro;

Os tipos de lastro utilizados nas pesquisas dos dois autores apresentam-se na tabela 2.12. A Tabela 2.12 serviu de base para a elaboração do gráfico de deformação plástica apresentado na Figura 2.5 desta secção.

Tabela 2.12: Tipo de lastro usado no ensaio de RAYMOND & DIYALJEE

<b>Tipo de Materiais de Lastro ensaiados por RAYMOND &amp; DIYALJEE</b>
Dolomita
Granito
Escória
Marmore
Cascalho
Xisto
Pedra Calcaria
Pedra de Origem Sedimentar

Fonte: RAYMOND & DIYALJEE (1979)

Através de uma série de ensaios em oito tipos diferentes de lastro, RAYMOND & DIYALJEE (1979) obtiveram algumas conclusões a respeito do tipo de lastro, das quais se destacam sete:

- a) A dureza do agregado é a mais importante característica em relação à taxa de acumulação de deformação plástica axial. Quando a dureza do agregado aumenta a deformação plástica axial diminui;
- b) Apenas o teste de abrasão Los Angeles não é suficiente para determinação da degradação do material de lastro. Deve-se aplicar uma combinação deste com o ensaio de abrasão Mill. (Ensaio de abrasão com presença de água, em que 3 quilos de material sofrem 10000 revoluções a 33 rpm em um recipiente. O valor de abrasão Mill, segundo SELIG e WATERS (1994), é a quantidade de material fino menor que 0,075 mm);
- c) O mais alto valor de correlação foi encontrado entre o ensaio de abrasão Mill e a qualidade do lastro;

- d) O fator de forma é importante para prever o comportamento do material de lastro;
- e) O coeficiente de Poisson não sofreu grandes alterações em relação a mudança de material de lastro;
- f) Há uma considerável variação entre as características dos materiais e o módulo de resiliência, porém sem uma tendência óbvia, algumas evidências apontam para materiais mais resistentes tem um módulo mais alto;

Um dos gráficos obtidos no trabalho de RAYMOND & DIYALJEE (1979) foi o que apresenta a variação da deformação plástica do material com o número de ciclos de aplicação de carga, para duas tensões desvio, para cada um dos oito tipos de lastro analisados. Este gráfico é apresentado na Figura 2.5 onde se pode observar que materiais como Granito, Escória, Pedra Calcária e Xisto têm um desempenho a deformação semelhantes quando considerado um determinado número de ciclos. Podem-se notar três tendências distintas na variação da deformação plástica para os tipos de lastro estudados. A primeira tendência, onde estão os materiais que sofreram menos deformação com o número de ciclos, se compõe de Granito, Xisto, Dolomita e Escória, portanto, esses materiais são os de melhor desempenho dinâmico em relação às deformações plásticas axiais. O segundo grupo, de desempenhos intermediário, é constituído de Cascalho, Pedra Sedimentar e Rocha Calcária. E o terceiro grupo, constituído apenas pelo Mármore, demonstra-se frágil em relação aos efeitos dinâmicos da via.

Além do tipo de lastro, a sua granulometria também exerce fator importante quanto à deformação. Segundo RAYMOND (1979), é importantíssimo a seleção do lastro ferroviário para melhores condições de estabelecimento da via, quanto à manutenção e a qualidade de rolamento. Quanto à granulometria do lastro, o mesmo autor enfatiza que partículas de tamanho maiores geralmente mantêm melhor o alinhamento da via e o seu nivelamento do que um lastro de partículas menores. Esta afirmação torna-se mais clara quando, em vias de alta velocidade de tráfego, geram-se grandes vibrações. O lastro de partículas maiores exige uma maior força para movimentação dentro do meio, já que, para uma dada aceleração, a força é proporcional a massa.

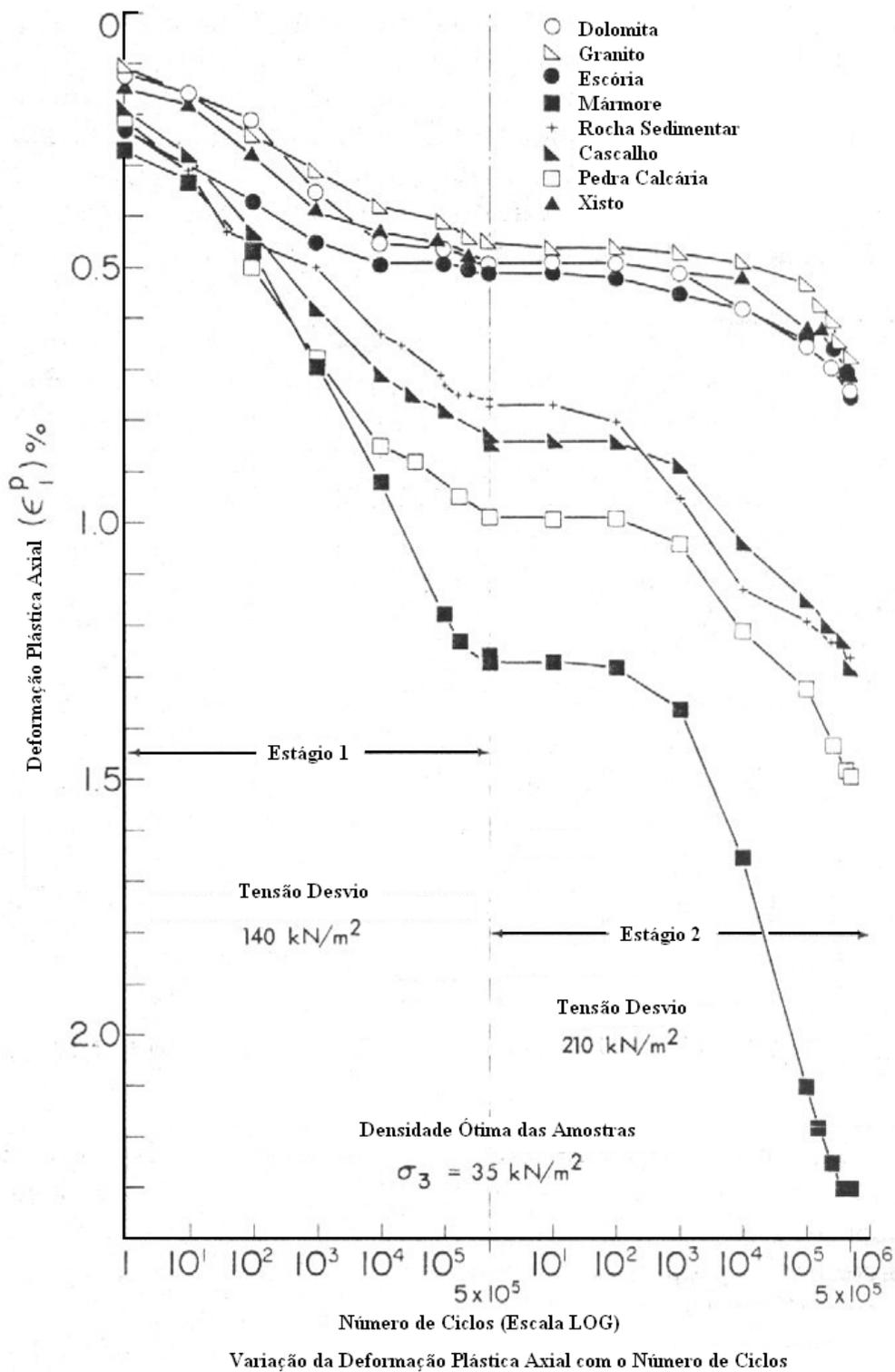


Figura 2.5: Variação da Deformação Plástica Axial com o Número de Ciclos para oito tipos de materiais de lastro ferroviário. Fonte: RAYMOND & DIYALJEE (1979)

As granulometrias de lastro ferroviárias seguem uma tendência mais uniforme do que aberta, contrariando as tendências utilizadas em aeroportos e rodovias onde uma granulometria mais aberta é geralmente mais estável do que uma uniformemente graduada. Por outro lado, RAYMOND (1979) considera vantagem uma graduação aberta do lastro por ter uma menor possibilidade de mistura entre o lastro e o sub-lastro, pelas condições de filtro que se estabelecem. Além disso, o mesmo autor observa a contaminação de lastro por sub-lastro que ocorre quando há a combinação de lastro uniformemente graduados com sub-lastros de areia com pouca ou nenhuma partícula com tamanha de cascalho.

A comparação das granulometrias utilizadas para o lastro segundo a EB-655, a CN e Raymond são apresentadas na Tabela 2.13. Seguindo as considerações de RAYMOND (1979), a granulometria ideal é mais aberta do que a utilizada pela EB-655 e similar a utilizada pela CN. Desta forma a granulometria de Raymond e CN tem melhor desempenho como filtro do que a granulometria da EB-655, ou seja, sempre se deveria empregar uma camada de sublastro que corrigisse esta deficiência.

Parâmetro de grande importância no estudo do lastro é a sua altura. Quanto maior a altura de lastro, segundo SCHRAMM (1961) melhor é a distribuição de cargas, porém, razões econômicas e de geometria da via limitam essa profundidade. Assim, o lastro deveria ser profundo o suficiente para surgir uma região de cruzamento das tensões de dois dormentes vizinhos. Por outro lado STOPATTO (1987), referindo-se a uma das comissões da ORE, observa que grandes espessuras de lastro provocam maiores recalques com a repetição de cargas, sendo necessário, portanto, conciliar a altura do lastro com a pressão na plataforma e o recalque.

Sobre a espessura da camada de lastro, SELIG (1985), da mesma forma que SCHRAMM (1961) e STOPATTO (1987) observam que a espessura da camada de lastro é um fator importante podendo influenciar no desempenho da ferrovia. Valores típicos, utilizados em ferrovias americanas de carga pesada, é altura de lastro da ordem de 30 cm, mas que podem variar de acordo com as condições do subleito e das condições de serviço da via. O estudo da espessura do lastro também é importante para definir as condições de limpeza do lastro, re-lastreamento da via e programar eventuais trabalhos de renovação ou remodelação.

Tabela 2.13: Distribuição Granulométrica segundo a EB-655, CN e Raymond.

Distribuição Granulométrica do Lastro-Padrão				
Lado da malha da peneira (mm)	Porcentagem em massa retida %			
	EB - 655		CN	Raymond
	Padrão A	Padrão B		
76,2				
63,5	0 - 0	0 - 10		7
50,8	0 - 10			18
38	30 - 65	40 - 75	7	
31,7				38
25,4	85 - 100		18	
19		90 - 100	38	
15,9				63
12	95 - 100	95 - 100	63	
9,5			80	80
4,8			98	98
2			99,5	99,5

Fontes: EB 655 – Via Férrea Lastro Padrão(1991) e RAYMOND (1979)

A tabela 2.14 apresenta as alturas mínimas para a camada de lastro de acordo com a classe da via. Vias principais que possuem maior movimentação de cargas e permitem uma maior velocidade de operação, representadas pelas vias de classe I, possuem uma camada de lastro maior. Por outro lado, vias secundárias, de pátios ou de acesso reduzido representados pela classe III possuem uma altura de lastro menor.

Tabela 2.14: Espessura Mínima de Lastro de acordo com a ABNT - NB-475 (1990)

Espessuras Mínimas do Lastro	
Classe de linha férrea	Altura mínima (cm)
I	40
II	30
III	25

Para SHENTON (1984) o fundo do lastro e as camadas de infra-estrutura, sendo bem dimensionadas, terão importância no entendimento dos movimentos permanentes durante as

primeiras idades da via ou quando há um aumento de carga.

### g) Sublastro

A inclusão de uma camada de solo ou de um material que sirva de filtro ou reforço tem uma grande influência sobre a resposta estrutural da via. Pesquisas de TARABJI e THOMPSON (1976) demonstram que a deflexão do trilho e o momento do trilho são reduzidos e a tensão vertical é uniformemente transmitida para a plataforma. A seção do lastro sem sublastro tem zonas localizadas de alta tensão na superfície da plataforma sobre o dormente onde a carga de roda é aplicada. Como estudado no item “e” desta seção, a influência das camadas inferiores de lastro são importantes ao considerar a deformação da via. Percebe-se, tanto na Figura 2.6 como na Tabela 2.15, que a simples colocação de uma camada de sublastro, considerando o pior caso apresentado de sublastro de areia, melhora em 25% o desempenho da via frente às deformações no topo do trilho e em mais de 50% quando o parâmetro analisado é a máxima deformação vertical na plataforma.

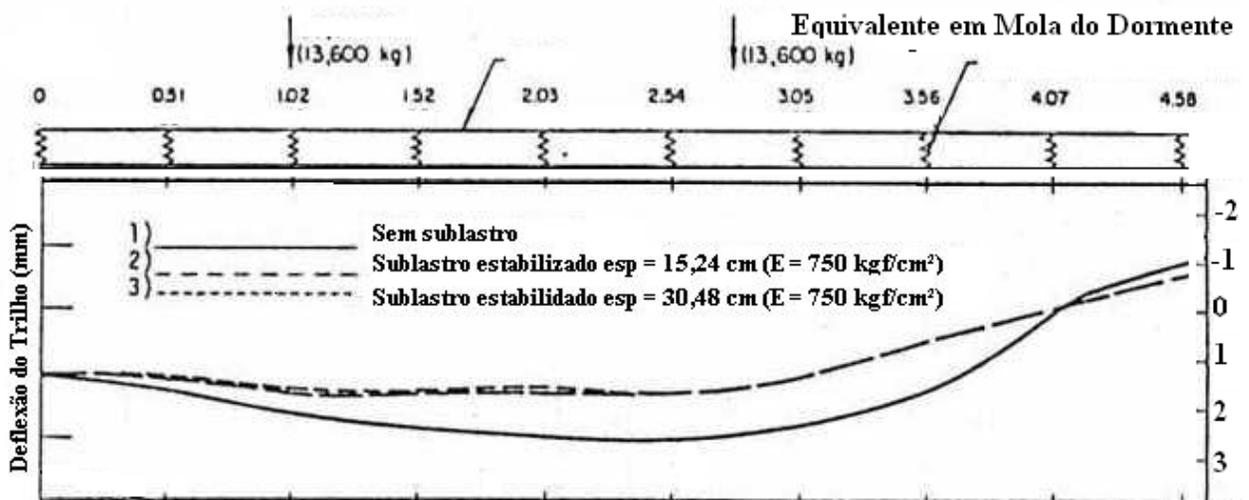


Figura 2.6: Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação da Altura de Sublastro.

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

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. Neste trabalho também

observaram o bom desempenho da via frente à deformação pela presença desta camada e o efeito de proteção que ela exerce em relação ao lastro frente à subida de finos da plataforma.

Tabela 2.15: Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Sublastro

Comparação dos Efeitos na Via Permanente de acordo com a Variação do Tipo de Sublastro				
	Tipo de Sublastro (Espessura de 15,24 cm)			
	Sem Sublastro	Sublastro E= 750 kgf/cm <sup>2</sup>	Sublastro E = 1500 kgf/cm <sup>2</sup>	Sublastro de Areia
Deflexão Máximo no Trilho (mm)	2,50	1,80	1,50	2,00
Máxima Deformação Vertical na Plataforma (x0,0001)	11,50	7,10	4,20	7,70

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

#### **h) Plataforma**

A plataforma é o maior componente de suporte da resiliência da superestrutura, e ainda contribui substancialmente para a deflexão elástica do trilho sobre a carga de roda. A magnitude de rigidez da plataforma é influenciada pela deterioração do trilho, dormentes e lastro, sendo uma fonte de recalques diferenciais que atingem os trilhos (SELIG E WATERS, 1994). Perante as deformações, para que a plataforma se mantenha estável, ela deve evitar o recalque excessivo progressivo oriundo da repetição de cargas e da consolidação do nivelamento, o cisalhamento oriundo de esforços da via e da estrutura da via e subsolo.

Observando a deformação de um tipo de trilho de três tipos de solos, TARABJI e THOMPSON (1976) demonstraram que, a variação do suporte da plataforma é um dos mais importantes parâmetros a serem estudados em um projeto de via permanente. Não só o tipo de solo, mas também o grau de saturação, a compactação e o estado de tensões. Os resultados desta análise são apresentados na Figura 2.7 e na Tabela 2.16 onde é nítida a grande influência da rigidez da plataforma sobre a deformação da via. Mesmo sem a apresentação dos módulos de elasticidade dos tipos de plataforma analisadas, nota-se que, o simples aumento de rigidez contribui de forma positiva contra o recalque da via.

Tabela 2.16: Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Plataforma

Comparação dos Efeitos na Via Permanente de acordo com a Variação do Tipo de Plataforma			
	Tipo de Plataforma		
	Plataforma Leve	Plataforma Média	Plataforma Rígida
Deflexão Máximo no Trilho (mm)	3,00	2,50	2,00
Máxima Deformação Vertical na Plataforma (x0,0001)	13,00	11,50	8,00

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

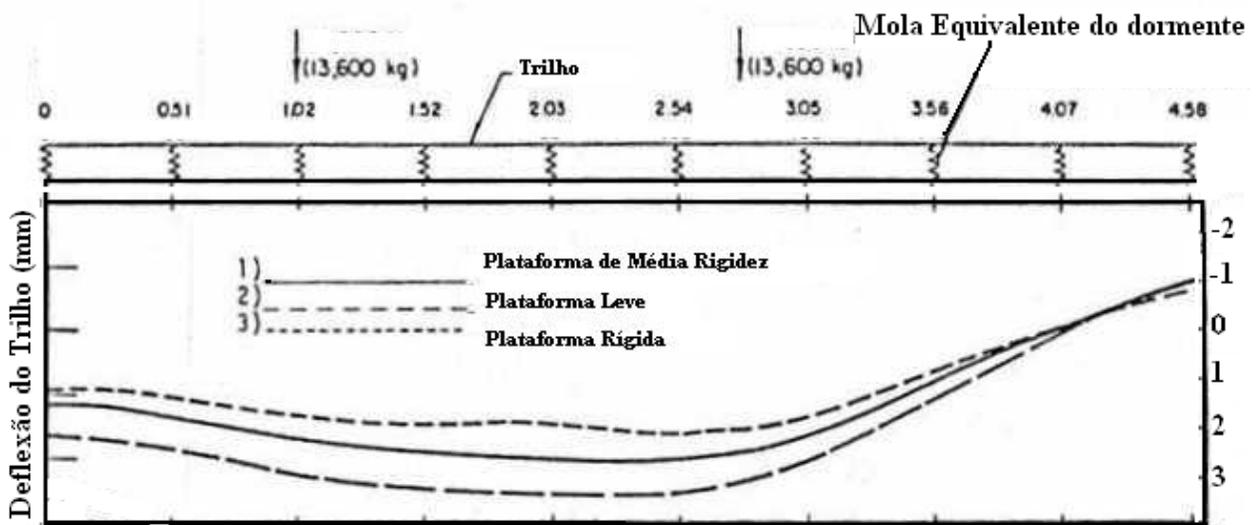


Figura 2.7: Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação do Tipo de Plataforma.

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

Segundo RIVES, PITA E PUENTES (1979), podem influir sobre a plataforma gerando recalques e deformações fatores tais como:

- 1 – Drenagem ineficiente;
- 2 – Elevação do nível do lençol freático;
- 3 – Trilhos sub-dimensionados;
- 4 – A dimensão e o espaçamento dos dormentes;
- 5 – A espessura do lastro;
- 6 – Defeitos da geometria da via;

PAIVA, GUIMARÃES E CORREIA (2007) apresentaram estudo comparativo entre modais e observaram a importância de um dimensionamento adequado da plataforma ferroviária, considerando que, em função do nível de tensões atuantes na plataforma para o modal ferroviário, aeroportuário e rodoviário, é necessário considerar que as condições de trabalho em plataformas ferroviárias de tráfego pesado são bastante semelhantes às observadas em plataformas aeroportuárias, enquanto que para plataformas para trens com menor carga por eixo, as plataformas ferroviárias trabalham em níveis de tensões semelhantes a uma infra-estrutura rodoviária, conforme figura 2.8. Desta forma, muitas pesquisas, desenvolvidas para o campo rodoviário e aeroportuário, podem ser incorporadas às especificações de terraplenos ferroviários.

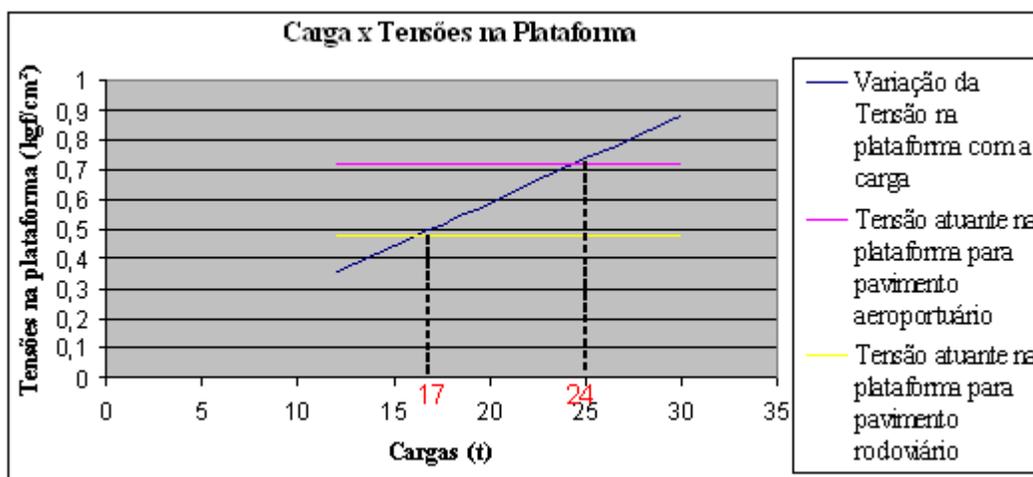


Figura 2.8: Comparação entre a tensão na plataforma de acordo com a carga por eixo ferroviária e as tensões para a infra-estrutura rodoviária e aeroportuária.

### i) Cargas

Um aumento das cargas de roda permite um aumento prejudicial à reposta das camadas de base para o modelo computacional proposto por TARABJI e THOMPSON (1976) para as camadas de suporte da via permanente. A magnitude da resposta à deterioração pode ser visto na figura 2.9 abaixo. Por exemplo, um aumento da carga de toda de 9072 kg para 27216 kg aumento a deflexão máxima do trilho e a deformação máxima da plataforma em cerca de 4 vezes e o máximo momento do trilho e a máxima tensão vertical da plataforma em cerca de 3 vezes. O aumento do momento do trilho com o aumento da carga é significativo porque pode permitir uma antecipada fadiga do trilho. Nas Figuras 2.9 e na Tabela 2.17, observa-se que a variação da carga

afeta a deformação da via, tomada pela deflexão máxima no trilho, e afeta com maior intensidade a máxima deformação vertical na plataforma que, ao se triplicar a carga aumentou cinco vezes o valor da deformação naquela camada.

Tabela 2.17: Comparação dos Efeitos na Via Permanente com a Variação da Carga de Roda

Comparação dos Efeitos na Via Permanente de acordo com a Variação da Carga de Roda				
	Carga de Roda (kg)			
	9072	13608	27216	36288
Deflexão Máximo no Trilho (mm)	1,50	2,50	6,40	8,90
Máxima Deformação Vertical na Plataforma (x0,0001)	4,80	11,50	20,00	27,90

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

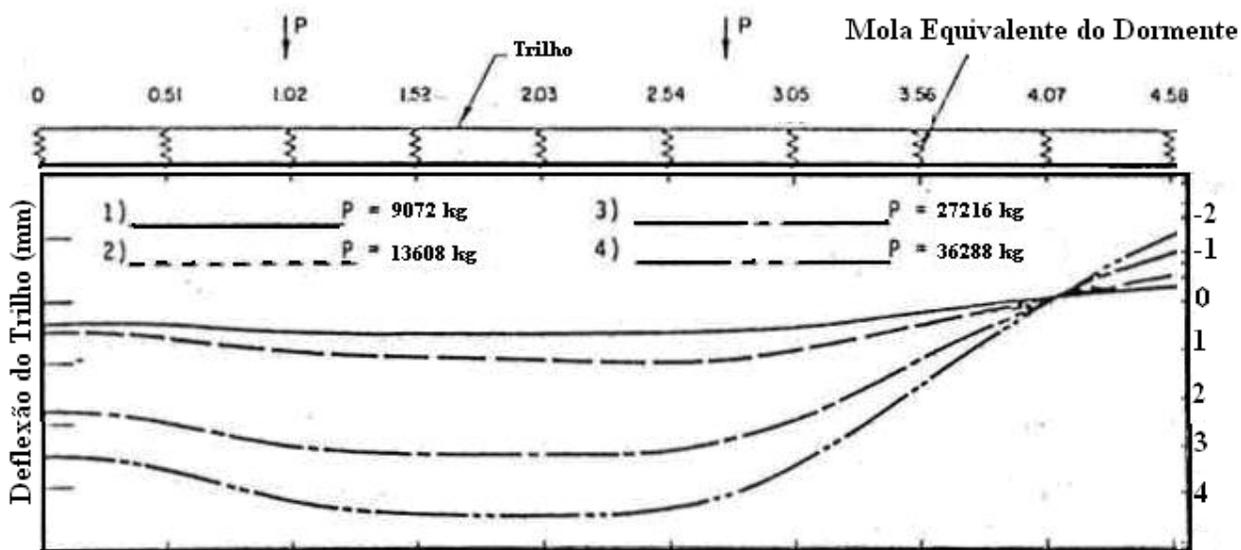


Figura 2.9: Comparação dos efeitos na Via Permanente com a Variação da Posição da Carga.

Fonte: TARABJI e THOMPSON (1976)

### 2.3.2 - Formas de medição do deslocamento vertical da via

Um dos métodos que permitem quantificar o deslocamento vertical da via é o da viga

Benkelman. Em pesquisa recente MUNIZ DA SILVA *et al* (2005), utilizaram-se de uma viga Benkelman afixada ao trilho por meio de um clipe magnético. Para produzir um deslocamento vertical utilizaram de um truque de uma locomotiva como veículo teste.

Um outro método é o deflectometro a laser. Este método foi utilizado por PAIVA, AGUIAR e SILVA (2007), em levantamento de linhas da CPTM na grande São Paulo. Baseia-se na colocação de dois pontos refletivos no topo do dormente e no topo do lastro, onde um feixe de luz incide. Quando ocorre a deflexão, este sistema, que é interligado a um computador, com um programa adequado de conversão, automaticamente quantifica a deformação e elabora o gráfico correspondente.

SELIG E WATERS (1994) apresentam as maneiras de calcular a deflexão, freqüentemente utilizados para o calculo do módulo de via  $u$ . Como o cálculo é realizado de forma indireta, necessita-se de meios para encontrar o valor do deslocamento vertical da via. Há três maneiras básicas para fazer isso:

- a) Teste de carga pontual simples;
- b) O teste da bacia de deflexão;
- c) O teste com veículos de cargas múltiplas;

No teste de carga pontual simples é necessário um aparato de aplicação de carga vertical pontual no trilho e para medição da deflexão vertical. O módulo de via é então calculado por.

$$U = (P/um)^{3/4} / (64 EI)^{1/3} \quad (2.4)$$

O método da bacia de deflexão é baseado no equilíbrio de forças para um modelo de fundação sobre apoio elástico. A deflexão é medida por uma carga pontual simples e o módulo de via calculado pela equação descrita pela seguinte integral da linha de influência (SELIG E WATERS, 1994):

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} u y dx \quad (2.5)$$

Se  $u$  é considerado uma constante ao longo do trilho, então a equação anterior pode ser

dada por:

$$P = u Ay \quad (2.6)$$

Onde  $Ay$  é a área da deflexão da bacia causada pela força vertical  $P$ .

Nota-se que, na equação anterior, o  $EI$  do trilho é independente, embora a forma da bacia de deflexão varie-se com o  $EI$ . Para eliminar o efeito das folgas da ferrovia, uma força vertical leve e uma pesada podem ser usadas ao invés de uma força simples. Então  $Ay$  é a diferença nas duas áreas das bacias de deflexão e  $P$  é a diferença entre as forças pesadas e leves (SELIG E WATERS, 1994).

A principal desvantagem deste método é requerer medições de deflexão de muitas posições simultâneas do trilho. A vantagem é que o cálculo pela média do comprimento do trilho é mais preciso do que em um único ponto (SELIG E WATERS, 1994).

O último método aplica a carga usando dois ou três eixos de um veículo. Para a interpretação de dados, é necessário um critério de superposição. A desvantagem deste método é que a referência de deflexão carregada para a deflexão descarregada incorpora a folga, visto que o primeiro dos dois métodos permite referenciar a carga de assentamento da deflexão. Este método, entretanto, pode ser estendido para uso em eixos de carga pesada referenciado em cargas leves (SELIG E WATERS, 1994).

Deve-se considerar na análise da deflexão a carga de assentamento do trilho sobre os dormentes e sobre as placas de apoio. RAYMOND (1984) considera esta análise importante, pois diferentes módulos de via produzem diferentes tensões de suporte e cargas de assentamento de trilhos, necessitando de uma série de cálculos das deformações totais. Os resultados deveriam ser comparados com os deslocamentos verticais preditos por um modelo de viga sobre suporte elástico, determinando o módulo de via que define iguais deformações. Entende-se, assim, que o deslocamento vertical do trilho e o assentamento do trilho não incluem apenas a deformação do suporte da via, mas também, dos dormentes e acessórios.

### 2.3.3 – Características das deformações de cada camada

A deterioração da geometria vertical da via permanente pode ser causada apenas por recalques diferenciais do lastro e da sua fundação. Por outro lado, SHENTON (1984) observa que os recalques diferenciais podem ser resultados de dormentes experimentando diferentes cargas ou diferentes recalques em dormentes sobre cargas idênticas. Desta forma, conclui-se que pode haver seis mecanismos de deterioração que podem ocorrer simultaneamente e são sempre interativos. Os seis mecanismos descritos por SHENTON (1984) são:

a) Forças dinâmicas: A carga vertical de roda pode ser continuamente variada ao longo do topo do trilho por irregularidades na superfície do trilho ou irregularidades verticais na geometria. Isto fará com que os dormentes em posições diferentes experimentem cargas diferentes, e, mesmo se o berço de lastro for uniforme, esses dormentes experimentarão cargas mais elevadas causando falhas na ferrovia.

b) Forma do trilho: Defeitos na forma longitudinal do trilho podem acontecer no processo de manufatura ou da preparação da produção da solda. Mesmo com uma força de um eixo, essa forma permanece constante e, com um berço uniforme, a falta de um perfeito nivelamento do trilho resulta em dormentes que suportam cargas diferentes entre si. O resultado é uma tendência para, gradualmente, imprimir uma forma livre não acentuada do trilho para dentro do lastro com a passagem de sucessivos eixos. Depois de um infinito número de eixos o perfil do carregamento ferroviário será o mesmo da forma original do trilho. A taxa, a qual estas falhas se desenvolvem, é uma função do comprimento de onda da falha. Estes comprimentos com menos de 5 metros aparecem mais rapidamente àqueles que têm comprimento de onda maior que 15 metros e que não deveriam aparecer dentro de um ciclo de socaria. Investigações detalhadas deste fenômeno têm sido realizadas através de comparações de medidas e previsões teóricas.

c) Espaçamento dos dormentes: Se dentro da secção da ferrovia os dormentes têm um espaçamento variado, aqueles que estão mais próximos individualmente carregam menos e, portanto, terão menos recalque sobre o tráfego. Isso ocorre inversamente àqueles que estão mais separados, pois, individualmente, receberão mais cargas e terão maiores recalques. Entretanto,

dentro de limites de espaçamento, eles ocorrem sobre uma linha principal moderna, cuja contribuição da variação do espaçamento dos dormentes não é muito importante.

d) Suporte do dormente: Se o suporte elástico dos dormentes individuais é diferente, o carregamento dos dormentes também é diferente. Um dormente com um suporte mais rígido tem a tendência a receber mais carga enquanto um outro com suporte menos rígido recebe menos carga. Desta forma, devido à concentração dos esforços, o dormente sobre um recalque mais rígido sofre maior recalque.

e) Recalque do lastro: Como o lastro é um arranjo aleatório de pedras, sobre uma dada carga, o recalque é também randomizado. É óbvio que todas as outras condições são uniformes, então, haverá ainda um deslocamento vertical da via devido a recalques diferenciais pelas propriedades do lastro. Tão bem como uma falta intrínseca de homogeneidade do lastro, outros fatores que contribuem no movimento diferencial, tais como a ação da máquina de socaria e a variabilidade da plataforma.

f) Infra-estrutura: A contribuição final do recalque diferencial da fundação e a deterioração da geometria vêm do fundo do lastro, das camadas de infra-estrutura e da plataforma. Normalmente a maioria das ferrovias tem um adequado projeto de fundação e, assim, a responsabilidade direta do recalque dessas camadas é insignificante em termos próximos, quando considerado com o ciclo padrão de manutenção.

Tendo cada um dos mecanismos acima como pontos de referência, pode-se embasar ainda mais tais observações. Quanto ao efeito do deslocamento vertical ativado pelas cargas que atingem a estrutura da via, HAY (1975) descreve a deflexão da ferrovia como causa primária de deterioração. Para o pesquisador as cargas pesadas de roda, obviamente, intensificam a deflexão da ferrovia e o movimento diferencial entre os componentes que aceleram o seu uso. A frequência de aplicação das cargas, isto é, a taxa de impulso, combinada com a deflexão acelera a degradação. Com uma rigidez de suporte da via, isto é, um maior módulo de elasticidade da via, não apenas a deflexão é reduzida, mas o impulso, gerado pelas cargas de roda individuais, pode ser fundido com os conhecimentos de sua frequência. Os dois eixos de um truque, por exemplo, podem causar um efeito de um pulso simples porque a curva de deflexão pode ter-se fundido.

Como ocorre com todas as estruturas, o primeiro requisito para as cargas pesadas é uma fundação com grande capacidade de suporte. Para RODRIGUES (2003b), o mecanismo de recalque gerado pela carga dos trens inclui a compactação das camadas de infraestrutura, as deformações cisalhantes, a penetração do lastro no subleito e as vibrações.

Quanto ao tipo de trilho, várias pesquisas foram elaboradas fazendo análise paramétrica entre o tipo de trilho, a plataforma, o lastro e as espessuras dessas camadas. TARABJI e THOMPSON (1976), considerando o parâmetro da rigidez da via frente às deformações, subdividem a via em dois sub-sistemas: o sub-sistema trilho e o sub-sistema fundação o qual inclui o lastro, o sublastro e a plataforma. Quando a rigidez do sub-sistema trilho é grande, como em trilho TR68, a rigidez do sub-sistema fundação tem menos influência na resposta à deflexão da via, caso contrário, o sub-sistema fundação passa a ter mais influência.

Por outro lado, analisando a magnitude dos efeitos, HAY (1975) observa-se que um aumento do módulo de elasticidade da plataforma é mais significativo em termos de diminuição dos deslocamentos verticais do que o aumento do peso do trilho.

Quanto à espessura da camada de lastro, a pesquisa de TARABJI e THOMPSON (1976), comparando-se dois tipos de trilhos com três alturas diferentes de plataforma, revela que para valores de altura de lastro entre 20,3 cm e 30,5 cm há pouca diferença na resposta à deflexão do trilho, porém, quando se usa altura de lastro de 61 cm a redução passa a ser significativa. Descrevem também resultados da influência do tipo de lastro sobre recalque da via e a resposta do modelo por eles criado e mostra não haver tanta dependência do tipo de lastro com a deflexão. Porém, para a análise de comportamento do lastro, sobre cargas repetidas e sobre mudanças das condições ambientais, é significativamente dependente do tipo de lastro e deveria ser considerado quando avaliado os diferentes tipos de lastro.

Finalizando, com o efeito da infra-estrutura sobre a deformação, HAY (1975) descreve a importância de um projeto adequado que abrange a estabilidade do solo e a drenagem. O autor considera que uma boa estrutura ferroviária começa com uma fundação estável, isto é, o sistema plataforma-lastro. Para novas construções estes requisitos de condições de estabilidade do solo são condições para a locação. A estabilidade do solo é precisamente relacionada com a ausência

de umidade excessiva. A boa prática demanda adequada drenagem. A drenagem requer mais do que uma borda de serviços tão frequentemente recebidos. Valetas de interceptação são necessárias para prevenir a estrutura contra o fluxo da água. As valetas e os bueiros devem carregar para longe a água que alcança a área da via. Todos os elementos de drenagem devem ser mantidos limpos e com livre fluxo. A intenção da drenagem, e especialmente da sub-drenagem, é manter a umidade longe daquelas porções da plataforma onde a distribuição das cargas é máxima. Ainda para o mesmo autor estas medidas são primariamente aplicáveis para novas construções. Para a maioria das ferrovias o problema é de resistência e estabilidade para um dado segmento da plataforma. Um passo inicial, tão freqüentemente negligenciado é fazer o exame sub-superficial. A causa obvia da instabilidade nem sempre é a causa primaria. A pesquisa pode incluir uma revisão na construção e nos relatórios de inspeção, uma revisão da geologia local, ou a experiência de outras ferrovias e rodovias no mesmo local. O segundo passo é corrigir qualquer adversidade das condições de drenagem. Nenhuma plataforma pode resistir aos esforços transmitidos pelas rodas sobre condições de saturação.

Para SELIG E WATERS (1994) uma forma de correlacionar todos esses componentes da superestrutura e da subestrutura da via, representado além do efeito da deformação, a complexa interação dos efeitos das cargas do tráfego sobre tensão e os sistemas de deformação é o calculo do módulo de via, que é um modelo base para a predição do desempenho da via. A precisão do modelo é afetada pelas incertezas nas magnitudes do carregamento, complexidade das propriedades do lastro, manutenção, condições ambientais e falhas nas informações das características da subestrutura. Além dos mecanismos descritos anteriormente, RODRIGUES (2003b) salienta que os fatores climáticos/ambientais também são atuantes no entendimento do recalque da via permanente.

#### 2.3.4 – Valores disponíveis na literatura técnica

Nos estudos de LUNDGREN, MARTIN E HAY (1970) preparou-se um diagrama baseado nas pesquisas de Talbot que mostra o efeito sobre o nivelamento e o alinhamento da via para vários níveis de deflexão. Este diagrama é apresentado na Figura 2.10 e representa os limites

de deflexão para uma via permanente e a interpretação desses limites frente ao grau de deterioração da via. Considera-se a aplicação de cargas por dois eixos e a curva de deflexão resultante embasado nas considerações do diagrama de Talbot. A zona A tem uma vida indefinida com taxas de deformação entre 0 e 0,2 polegadas (0 e 5,08 mm) . A zona D, com deflexões de 0,4 polegadas (10,16 mm) ou mais, possui uma rápida deterioração. A maior parte das vias são provavelmente no nível B, com taxas de deformação entre 0,25 e 0,35 polegadas (6,35 e 8,89 mm).

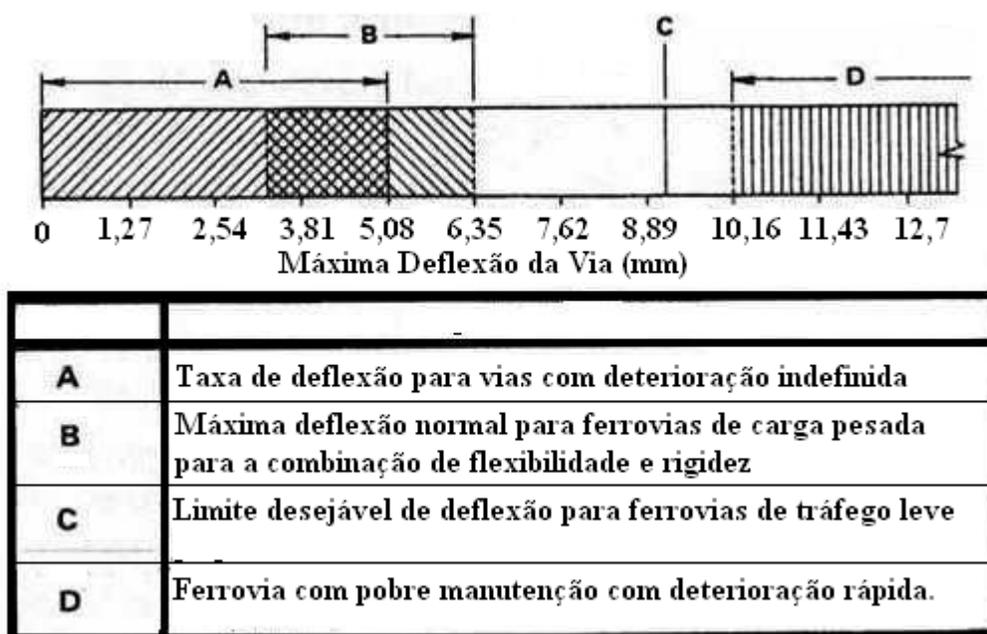


Figura 2.10: Níveis de deflexão elástica da Via Permanente. Fonte: LUNDGREN, MARTIN E HAY (1970)

Um bom exemplo de valores de deformação da via é obtido no trabalho de PAIVA, AGUIAR e SILVA (2007) em que, com utilização de deflectometro a laser, mediu-se a variação da deformação da via com a passagem de uma locomotiva. Na análise apresentada na tabela figura 2.11 foi utilizada uma locomotiva U20, tipo diesel elétrico, com arranjo de eixos C-C e peso total de 120000 kgf. O espaçamento entre eixos do mesmo truque era: para D 1-2 = 1,60 m e para D 2-3 = 1,92 m, com diâmetro de rodas igual a 36 polegadas. Na primeira tabela 2.18 é apresentado o perfil da via, inclusive com as espessuras e os tipos de materiais encontrados na inspeção. A figura 2.11 apresenta o gráfico de deformação que é configurado diretamente em um

computador portátil, em programa específico que permite a leitura da deformação registrada pelo deflectometro a laser. Os valores da deformação estão na escala do milímetro (PAIVA, AGUIAR e SILVA, 2007).

Tabela 2.18 – Perfil tipo do ponto de análise de deformação. Fonte: PAIVA, AGUIAR e SILVA (2007)

Poço de Inspeção: 06-02				
Local: Hospital do Juqueri Poste 30/05-06				
Data: Setembro/2004				
Camadas				
Número	Denominação	Descrição do Material	Espessura (m)	Profundidade (m)
		dormente	0,17	0,17
1	6/2/2001	lastro	0,40	0,57
2	6/2/2002	lastro contaminado	0,50	1,07
3	6/2/2003	solo e rachão	0,30	1,37
Obs.: Não ocorreu divisão nítida entre as camadas 02 e 03				

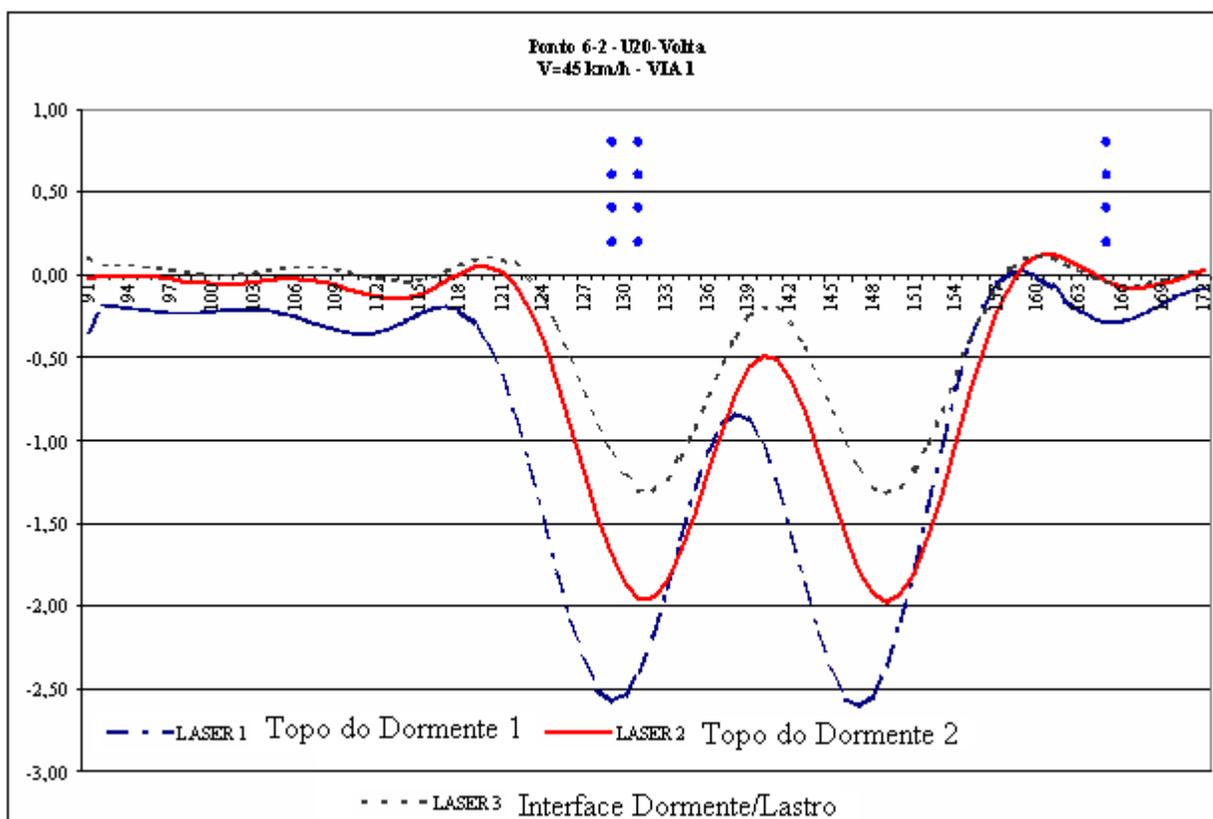


Figura 2.11 – Deformação no Ponto 6-2 realizada através do método de deflectometro a laser. Fonte: PAIVA, AGUIAR e SILVA (2007)

As curvas do laser 1 e do laser 2 representam a variação dos topos dos dormentes admitidos iguais a variação dos trilhos e a do laser 3 representa a variação na interface da camada de lastro e o fundo do dormente de madeira correspondente ao laser 2.

### 2.3.5 – Efeitos Dinâmicos

Para SELIG E WATERS (1994) a determinação do ambiente de carregamentos dinâmicos que é transferido pela superestrutura e deve ser suportado pela subestrutura tem como origem a combinação de forças verticais, laterais e longitudinais exercidas sobre. No caso brasileiro, pela baixa velocidade em nossas vias de transporte de carga, o efeito dinâmico tem papel secundário.

Uma das maneiras de medir o efeito dinâmico que as cargas exercem é através da medição da frequência de vibrações. BIRMANN (1975) observa que a frequência dessas vibrações fica 40 e 60 Hz, e tem uma significância particular. Essas vibrações fazem propagar pelo lastro ondas de compressão no sentido longitudinal a via. Elas conduzem a redistribuição dos grãos do lastro, de modo a favorecer a perda de nivelamento e alinhamento. A resposta da ferrovia a esse tipo de vibração pode ser representada por um sistema massa-mola. Entre os componentes do veículo e da via há quase uma complementação. A grade da via, feita de dormentes e trilhos, possui uma frequência natural que impulsiona por si mesma a ressonância de vibração da plataforma. De acordo com medidas de transição entre o lastro e a plataforma, a intensidade da vibração evidentemente alcança um máximo entre 40 e 60 Hz sobre diferentes tipos de estruturas de ferrovias. Através de medidas de ensaios em locomotivas C-C foi encontrado frequências entre 45 e 65 Hz ocorrendo quase independentemente da velocidade de viagem e praticamente independente da estrutura, isto é, a influencia da vibração a flexão do eixo, demonstrado através das medidas sobre a ferrovia e das medidas das cargas de roda, estende sobre a grade, o lastro e para a plataforma. Desta forma tem-se que considerar a existência de um módulo de elasticidade dinâmico o qual leva em consideração a influência do efeito da vibração dessas cargas sobre o sistema e os elementos da via. De acordo com testes realizados os seguintes parâmetros tem influência marcante na magnitude do módulo de elasticidade dinâmico.

- a) Carga estática inicial;
- b) Frequência de excitação;
- c) Massa efetiva excitada;
- d) Estrutura da via (projeto estrutural, secção do trilho, tipo de dormentes);

Sobre os efeitos dinâmicos sobre os elementos BIRMANN (1975) apresenta dois testes: o primeiro utilizando-se dois trilhos diferentes e o segundo variando-se a altura do lastro.

No primeiro BIRMANN (1975) utilizou-se um trilho de 59 kg/m e um de 60 kg/m onde as medidas de laboratório demonstraram um pouco de aumento no deslocamento dinâmico. Com a consideração do módulo dinâmico apenas uma mínima diferença foi encontrada. A alteração das condições de distribuição de cargas deve ser aqui levada em conta, porque o trilho de secção mais pesada distribuiu as forças de vibração para mais dormentes. Esta produção ensina que a intensidade da vibração no lastro, e através dos trilhos mais pesados, leva a uma grande estabilidade da posição da via no lastro. No segundo teste o mesmo autor aumentou a altura do lastro sobre os dormentes de madeira de 30 para 40 cm produzindo nenhum significado diferente, porque para um lastro de maior altura as deformações sobre as cargas já se tornaram pequenas.

Também contribuem para o aparecimento de efeitos dinâmicos sobre a via os trilhos corrugados e o efeito de “plano-na-roda”. GUIMARÃES (1999) elaborou modelo computacional para análise desses efeitos, quantificando os mesmos de acordo com as características da via. Para o caso do “plano de roda”, regiões em que se formam planos pelo desgaste da banda de rodagem no contato com o trilho, por exemplo, os resultados do modelo sugerem que o efeito em relação à força de contato entre a roda e o trilho será menor quanto menor for a rigidez da via, visto que uma via menos rígida amortecerá mais o impacto gerado pela passagem da irregularidade da roda. O autor enfatiza que o efeito de plano-na-roda tem maior importância quando em vias de alta qualidade e altas velocidades, para vias de baixa rigidez a deformação permanente da via é fator mais crítico que conduz a uma degradação mais rápida das características do lastro. A modelagem elaborada pelo autor também pode simular efeitos de não-linearidades na camada de lastro, modificação do tipo de fixação, falta de fixações, juntas entre trilhos e falta de dormentes, fatores que também geram efeitos dinâmicos sobre a via.

## 2.4 – Modelos Clássicos de dimensionamento da via férrea

### 2.4.1 - Dimensionamento da espessura da plataforma

O primeiro elemento das camadas de suporte da via férrea é a plataforma. De acordo com a NBR 7964 – Plataforma para via férrea (1983), ela pode ser considerada como plataforma ruim, média e boa. A referida norma estabelece a necessidade ou não de camadas de reforço para a plataforma, e, quando há necessidade, a espessura e o tipo de material para esse reforço.

Para consideração de dimensionamento é importante conhecer-se os fatores que podem influenciar, segundo RIVES, PITA E PUENTES (1979), na capacidade de sustentação da plataforma, influenciando assim no sistema como um todo:

- a) A carga que esta submetida a via;
- b) O veículo;
- c) A velocidade de circulação do tráfego;
- d) A espessura do lastro;
- e) A quantidade de tráfego;

Para o dimensionamento da plataforma é importante o conhecimento da capacidade mínima de suporte do solo e do número de camadas entre a plataforma e o lastro. RIVES, PITA E PUENTES (1979) descrevem os estudos de diversos autores sobre as alturas de camada de proteção. Para o conhecimento da capacidade mínima o fator principal é o módulo de elasticidade dinâmico da plataforma, em relação as camadas superiores podemos considerar a metodologia de Eisenmann, por exemplo. Considerando a proteção da plataforma Eisenmann (1974) determina valores de 30 a 40 cm entre o lastro e a plataforma somados aos valores da metodologia da DB para lastro, chega-se a um valor de proteção em torno de 70 a 80 cm, para as consideração de efeito de gelo da Alemanha, suficiente. Valores coincidentes foram publicados por Togno (1973). A metodologia da antiga União Soviética, para proteção da plataforma, considerava uma camada de 20 cm de areia entre a plataforma e o lastro, para proteção da primeira.

Ainda segundo RIVES, PITA E PUENTES (1979), pode-se estabelecer as tensões admissíveis na plataforma através da relação 2.7 de Heukelom e Klomp, considerando a tensão admissível para N ciclos de carga:

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 * E_d}{1 + 0,7 * \log N} \quad (2.7)$$

Considerando o valor de  $E_d$  pela expressão 2.8:

$$E_d = 100 * CBR \quad (2.8)$$

Considerando-se esforços na plataforma da ordem de 0,6 a 1 kg/cm<sup>2</sup>, deve-se ter módulos elásticos dinâmicos na plataforma entre 500 e 700 kgf/cm<sup>2</sup> para  $2 \times 10^6$  solicitações.

#### 2.4.2 - Dimensionamento da espessura do lastro

O estudo da camada de lastro, como meio de proteção da plataforma, distribuição das tensões da ferrovia e como elemento elástico, permitindo um maior conforto ao rolamento dos veículos, foi realizado por muitos pesquisadores. Segundo RIVES, PITA E PUENTES (1979), os estudos buscavam elucidar a questão da pressão existente sob o dormente e a distribuição das tensões na camada de lastro. No início do século XIX, Zimmermann desenvolveu uma metodologia que dimensionava de forma direta a espessura do lastro através da pressão de contato do dormente.

As considerações de Zimmermann sobre as linhas de distribuição de tensão e a profundidade em que elas se interceptam, em relação ao espaçamento dos dormentes, segundo RIVES, PITA E PUENTES (1979), foi considerada em outros dois métodos semi-empíricos. Um alemão, o qual a camada de lastro era definida pela distância entre as bordas dos dormentes mais 20 cm e um Norte Americano, considerando a distância entre as bordas mais 7,5 a 10 cm. Os estudos de Schubert para plataformas argilosas, determinavam valores em torno de 50 cm de

lastro. As pesquisas sofreram avanço significativo na década de 1950, quando Clarke considerou o caráter tridimensional do lastro para o dimensionamento, e Schramm introduziu a variável comprimento do dormente para o cálculo das tensões da plataforma. Complementando as pesquisas anteriores, aumentado a base das metodologias de dimensionamento que consideram a interação dos elementos da via. HAY (1982) observa que o dimensionamento do lastro sofre interferência direta da capacidade de suporte da plataforma. Plataformas de materiais mais resistentes conduzem a espessuras de lastro menores, plataformas menos resistentes a maiores camadas de lastro.

#### a) Método da SNCF:

O método da SNCF, proposto em meados de 1960, utilizava a teoria elástica e introduziu o índice de suporte CBR no dimensionamento do lastro ferroviário. Como observa RIVES, PITA E PUENTES (1979), o critério era baseado na experiência com pavimentos flexíveis, fazendo uma relação entre a fundação flexível e o sistema lastro-plataforma, e o impacto de um semi-dormente no lastro ao de uma roda de caminhão em um terreno firme. Obteve-se assim, um gráfico que relacionava o valor do CBR da plataforma com o tráfego da via em número de toneladas e velocidade de passagem encontrando como resposta final o valor da espessura do lastro. O método da SNCF baseia-se na hipótese de que o sistema lastro-plataforma pode ser representado a um semi-espaço indefinido de Boussinesq, o qual o estado tridimensional é independente da elasticidade. Mesmo não sendo perfeitamente representativo da realidade a ORE (1970) considera válida a teoria de Boussinesq para as tensões verticais.

#### b) Método de classificação das linhas:

Baseados na metodologia da SNCF surgiram os métodos da BR e da antiga URSS, baseado na classificação das linhas de acordo com o espaçamento entre dormentes, velocidade de tráfego e tonelagem bruta suportada. Em ambas, a idéia principal, segundo RIVES, PITA E PUENTES (1979), é o estabelecimento de uma seção transversal tipo. Para este fim, ambos os métodos estabelecem a espessura do lastro de acordo com as características citadas, espessura determinada de acordo com as tabelas para cada entidade. Importante notar, que em ambas não é caracterizada as condições da plataforma, não exigindo a solicitação máxima sobre essa camada.

O método da BR fornece a espessura mínima do lastro, utilizando-se na categoria da via, da velocidade, da tonelage bruta anual, do tipo de dormente e do espaçamento dos dormentes. O dimensionamento pela antiga URSS já considera na análise o peso do trilho, o espaçamento e tipo de dormente, o tipo de lastro e a tonelage bruta anual.

Classificação das Linhas na Inglaterra					
Categoria	Velocidade (km/h)	Tonelage Bruta por ano (milhões)	Dormentes		Espessura Mínima do Lastro (cm)
			Tipo	Espaçamento (cm)	
A4	161 a 200	Mais de 18	Concreto novo	65	38
A3	161 a 200	12 a 18	Concreto novo	65	38
A2	161 a 200	6 a 12	Concreto novo	65	30
A1	161 a 200	Menos de 6	Concreto novo	70	23
B4	121 a 160	Mais de 18	Concreto novo	70	38
B3	121 a 160	12 a 18	Concreto novo	70	30
B2	121 a 160	6 a 12	Concreto novo	70	30
B1	121 a 160	Menos de 6	Concreto novo	76 a 70	23
C4	81 a 120	Mais de 18	Concreto novo	70	30
C3	81 a 120	12 a 18	Concreto novo	70	23
C2	81 a 120	6 a 12	Concreto novo	76	23
C1	81 a 120	Menos de 6	Concreto novo/Madeira usada	76 / 65	23
D4	< 80	Mais de 18	Concreto novo	70	23
D3	< 80	12 a 18	Concreto novo	70	23
D2	< 80	6 a 12	Concreto usado/Madeira usada	76 / 65	23
D1	< 80	Menos de 6	Concreto usado/Madeira usada	76 / 65	15

Tabela 2.19: Tabela da BR para dimensionamento do lastro. Fonte: RIVES et al (1979)

Índices e condições de emprego	Tipo de Estrutura da Via		
	Superpesado	Pesado	Normal
Peso do Trilho (Kg/m)	75	65	50
Número de Dormentes por Km de via:			
Reta	1840	1840	1840
Curva	2000	2000	2000
Tipo de Dormentes	Concreto Armado e Protendido e de Madeira Tipo I	Concreto Armado e de Madeira Tipo I e II	Concreto Armado e de Madeira Tipo I, II e III
Lastro	Pedra sobre base de areia e arbesto	Pedra e cascalho sobre areia e arbesto	Pedra, cascalho e arbesto
Espessura do Lastro abaixo dos dormentes (cm)	40 / 35	35 / 30	30 / 25
Espessura da Base de areia (cm)	20	20	20
Densidade anual de tráfego em milhões de T - Km/Km	Mais de 50	25 / 50	Menos de 25
<b>Os valores da esquerda correspondem aos dormentes de concreto armado e os da direita aos dormentes de madeira</b>			

Tabela 2.20: Tabela de dimensionamento do lastro da antiga URSS. Fonte: RIVES et al (1979)

c) Método da BR para plataformas argilosas:

A BR desenvolveu um método baseado no estudo de argilas sobre esforços repetitivos. Tomando como base a teoria de Boussinesq como no método da SNCF, foi criado um ábaco onde se obtém o valor da espessura do lastro, de acordo com as tensões obtidas em ensaios de esforços repetitivos e de acordo com a carga por eixo (RIVES, PITA E PUENTES, 1979).

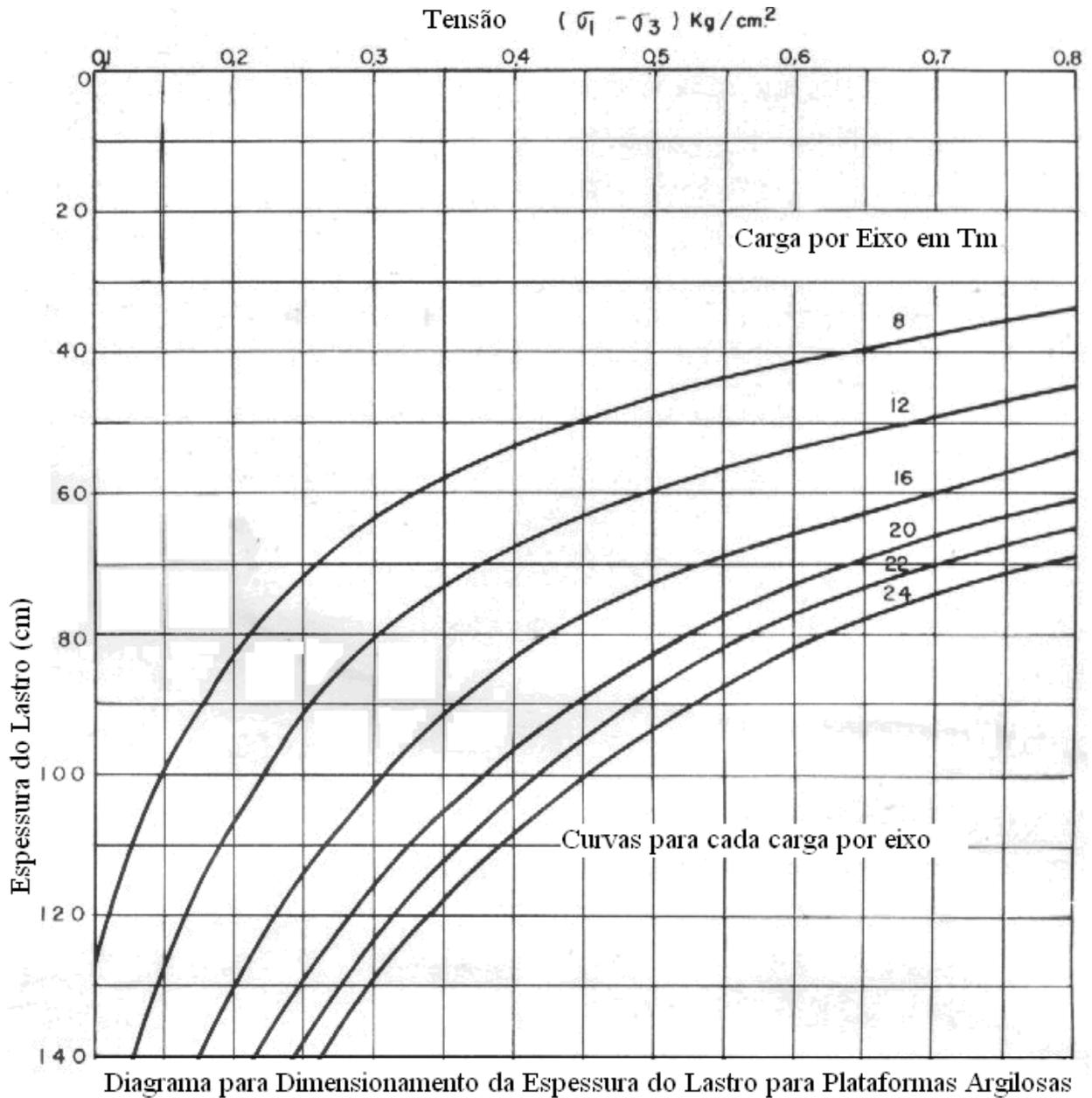


Figura 2.12: curvas de dimensionamento do lastro para plataformas argilosas desenvolvida pela BR. Fonte: RIVES et al (1979)

d) Adaptação de Eisenmann:

Eisenmann desenvolveu um método baseado em um sistema de duas camadas representando o sistema lastro-plataforma, adaptado nas considerações da teoria elástica multicamadas. Utilizando-se da relação de Heukelom e Klomp, calcula a tensão admissível na plataforma, podendo dimensionar a altura do lastro, para aquela tensão que é inferior a admissível. Parte, portanto, como elucidada RIVES, PITA E PUENTES (1979), para uma linha metodológica diferente da teoria de semi-espaço indefinido de Boussinesq, para um método que se aproxima da realidade física das tensões da via. No método introduz o conceito de coeficiente de lastro, porém de forma simplificada por não considerar a espessura do lastro. Outra simplificação é o caráter constante do módulo de elasticidade do lastro, fato que se sabe, ser variável, dependendo das tensões submetidas, contornado pelo emprego das espessuras equivalente de Demark.

Equações do Método de Eisenmann (RIVES, PITA E PUENTES, 1979):

1º Parte – Cálculo da tensão na camada inferior dos dormentes

$$\sigma_t = \frac{Q \cdot d}{2 \cdot F} \cdot \left( \frac{F \cdot C}{8 E I d} \right)^{1/4} \quad (2.9)$$

$$Q = Q_n (1 + t s) \quad (2.10)$$

$$s = \delta \cdot \varphi \quad (2.11)$$

$\delta$  – 0,1 para via em muito bom estado  
0,2 para via em bom estado  
0,3 para via em mal estado

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{140} \quad (2.12)$$

C - 2 Infraestrutura ruim  
5 Infraestrutura boa  
10 Infraestrutura muito boa

Neste método verifica-se que já se introduz no cálculo o efeito da carga dinâmica, o espaçamento dos dormentes, a área de apoio do dormente correspondente a um trilho, o coeficiente de lastro, a rigidez do trilho, além de fatores de majoração de efeitos devido a velocidade e ao estado de deterioração da via (RIVES, PITA E PUENTES, 1979).

Além desses fatores, também são considerados os módulos de elasticidade do lastro e da plataforma, inclusive com a altura da plataforma, utilizando-se da relação de Heukelom e Klomp para o cálculo da tensão admissível na plataforma, com o auxílio da expressão de Demark a fim de poderem-se transformar as camadas em outra equivalente levando-se assim os efeitos das diferenças de módulo de elasticidade e espessura e, finalizando, utilizando-se das duas expressões de CAROTHERS – TERZAGHI, podem-se calcular as tensões em um ponto embaixo do centro de um dormente e a tensão gerada pelos outros dormentes sobre um dormente em análise (RIVES, PITA E PUENTES, 1979).

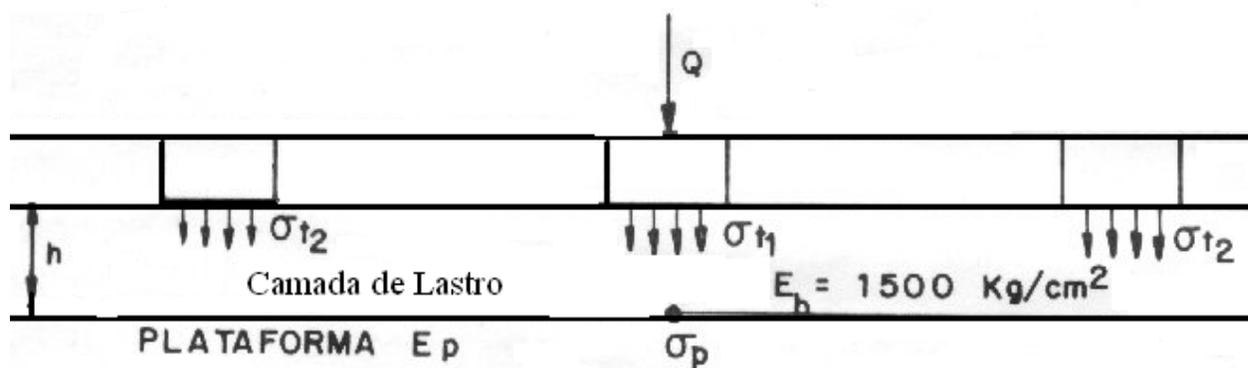


Figura 2.13: Esquema de distribuição da tensão para o cálculo do dimensionamento do lastro segundo o método de Eisenmann. Fonte: RIVES, PITA E PUENTES (1979)

#### e) Método de Lopez Pita:

Diferenciando-se dos métodos anteriores o método de Lopez Pita (1976) considera a influência do módulo de via na espessura da camada de lastro e na capacidade de suporte da plataforma, bem como, considera nos cálculos, o módulo de elasticidade real do lastro. Para o

desenvolvimento desse método, Lopez Pita elaborou o seguinte procedimento, descrito por RIVES, PITA E PUENTES (1979):

- a) Determinação experimental do módulo de via U, em vias com diferentes plataformas e espessuras de lastro, submetidas ao tráfego;
- b) Através dos resultados considerou a variação linear do módulo de via em relação ao lastro e ao suporte da plataforma;
- c) Com os valores da variação do módulo de via U e do suporte da plataforma, pode-se calcular a tensão sob o dormente para cada espessura de camada de lastro;
- d) Com os resultados do módulo de via, deduz os valores do módulo de elasticidade do lastro, e através do uso da teoria elástica de duas camadas, encontra a tensão aplicada na plataforma;
- e) Finalmente pode-se calcular a espessura do lastro para que se respeite a tensão admissível sobre a plataforma;

O desenvolvimento das relações permitiu a elaboração de um ábaco de dimensionamento do lastro, que leva em conta, os seguintes parâmetros (RIVES, PITA E PUENTES, 1979):

- a) O CBR ou módulo de elasticidade dinâmico da plataforma;
- b) A tensão admissível segundo a expressão de Heukelon;
- c) Velocidade máxima que se deseja na linha;
- d) Fator de estado da via, segundo Eisenmann;
- e) Características de deformação da plataforma pela utilização do módulo de elasticidade estático;
- f) Encontramos o valor que corresponde a espessura do lastro incluindo as eventuais camadas de proteção.

f) Método de Dimensionamento de Cassio E.L. Paiva:

A metodologia foi desenvolvida por PAIVA (1982), permitindo o dimensionamento das camadas da via férrea através dos valores dos seus CBR e do subleito existente, e da carga do

trem-tipo, para as estruturas analisadas.

Para o desenvolvimento da metodologia, elaboraram-se curvas de dimensionamento, através do seguinte processo:

- a) Distribuição dos esforços produzidos pelo trem-tipo ferroviário solicitante através dos trilhos e dormentes, a fim de avaliar a solicitação sob cada dormente;
- b) Utilizando-se do valor da pressão atuante sob cada dormente, aplicou-se um método de dimensionamento de pavimentos aeroportuários, obtendo-se as curvas de correlação desejadas.

As curvas foram desenvolvidas para:

Trilhos: TR-45, 50, 57 e 68;

Dormentes de Madeira;

Espaçamento de Dormentes: 55, 60 e 65 cm;

Considerou-se uma grade ferroviária composta por 5 dormentes mais carregados, que, representam cerca de 85 % do total dos esforços solicitantes. Tais dormentes representam um trem de pouso de avião e, para diferentes cargas por eixo de um truque ferroviário, pode-se definir a variação dos valores de CBR e as correspondentes espessuras necessárias.

Para a utilização dos gráficos de dimensionamento é necessário o cálculo da carga dinâmica média e da carga solicitante. Para o cálculo da carga dinâmica média utiliza-se o processo empírico proposto por Eisenmann.

Possuindo-se os valores do espaçamento dos dormentes, tipo de trilho, e o valor da carga solicitante, pode-se utilizar os gráficos de dimensionamento propostos pelo método.

#### g) Métodos de dimensionamento do METRÔ-SP e ENGEFER:

PAIVA (1982) cita em sua dissertação, mais dois métodos elaborados para a realidade brasileira: o do METRÔ-SP e o da ENGEFER. O primeiro foi elaborado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo para o dimensionamento das linhas sobre lastro de pedra no trecho

Leste da linha Leste-Oeste. O segundo, foi criado pelos engenheiros Severino Pereira de Rezende Filho e Aron David Davidovitsch, para dimensionamento de vários trechos da Ferrovia do Aço.

O método do METRO-SP baseia-se nas seguintes hipóteses:

a) as tensões são determinadas na face inferior dos dormentes, considerando que o trilho se comporta como uma viga apoiada em um meio elástico. Os valores de tensão encontrados são similares com os valores obtidos pela adaptação de Eisenmann;

b) a distribuição das tensões verticais é executada utilizando-se uma curva envoltória, resultante da combinação de curvas traçadas com base nas fórmulas de Talbot e de Holl;

c) as várias camadas a serem dimensionadas são consideradas isotrópicas e homogêneas;

d) as tensões admissíveis são calculadas pela fórmula de Heukelom;

e) as tensões de serviço são fixadas em valores inferiores a 50 % da tensão admissível;

f) as várias camadas componentes devem satisfazer aos critérios de filtro de Terzaghi nas interfaces de material granular e coesivo;

g) para o caso de haver necessidade de reforço da plataforma, o material a ser usado deve apresentar  $LL \leq 35 \%$  ou  $IP \leq 10\%$ ;

h) o nível do lençol de água deve atingir, no máximo, 2,5 m abaixo da cota do boleto do trilho;

i) o trilho utilizado neste método é o do tipo TR 57;

j) o espaçamento entre os dormentes é de 65 cm, tendo os dormentes de concreto as seguintes dimensões: 25 x 25 x 280 cm;

k) os valores adotados para coeficiente de lastro são  $c = 8 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 15 \text{ kg/m}^3$  e  $c = 25 \text{ kg/m}^3$ ;

l) no cálculo das curvas de dimensionamento, utilizaram-se os seguintes parâmetros;

- carga por eixo de 13,66 t;
- velocidade de operação de 100 km/h;
- frequência de 1 viagem a cada 90 s;
- 24 eixos por composição;
- vida útil de 25 anos;

m) a curva envoltória resultante apresenta, em ordenadas, a espessura da camada entre 0 e 240 cm e, em abscissas, o valor do CBR da camada entre 0 e 30. A escala utilizada em ambos

os eixos é linear.

Ainda PAIVA(1982), descreve em seu trabalho, as características do método da ENGEFER. As principais características e hipóteses são:

a) foi utilizado o método dos deslocamentos para resolução de pórticos planos para o cálculo das tensões solicitantes nos dormentes;

b) considerou-se o conjunto lastro plataforma como um meio elástico homogêneo. Utilizaram-se as expressões de Boussinesq para a determinação das tensões, com objetivo de comparar as tensões produzidas pelas várias cargas ferroviárias estudadas com as tensões produzidas pelo eixo rodoviário padrão (8,2t);

c) foi empregado o processo de somatória dos recalques do Corpo de Engenheiros do Exército Americano para o cálculo do efeito de superposição dos vários dormentes solicitantes;

d) levou-se em conta nas várias profundidades o efeito de deterioração causado pelas repetições de carga, baseando-se na experiência rodoviária, onde o número máximo de operações é admitido como uma função exponencial da relação entre a carga considerada e a carga padrão;

e) para a elaboração das curvas finais do método da ENGEFER, os valores de CBR foram obtidos a partir da curva do método CBR original para rodovias, assemelhando-se com aquele utilizado pelo DNER para dimensionamento de pavimentos;

f) o trilho utilizado foi do tipo TR 68, e o dormente media 270 cm de comprimento por 30 cm de largura;

g) o espaçamento entre dormentes utilizado neste método foi de 50 cm;

h) o coeficiente de lastro utilizado neste método foi  $c = 10 \text{ kg/cm}^3$ ;

i) o trem-tipo era composto por duas cargas iguais com afastamento de 1,50 m;

j) as cargas por eixo utilizadas foram de 25t e 30t, com e sem fator dinâmico, cujo valor era 1,5;

k) as intensidades de tráfego consideradas foram 50 milhões de toneladas por ano na via simples e 100 milhões de toneladas por ano para a via dupla;

l) as curvas finais de dimensionamento apresentam o CBR versus a profundidade resultantes, no eixo das ordenadas, a profundidade em “cm” variando entre 30 e 260 cm e, no eixo das abscissas, o valor do CBR da camada que varia entre 2 e 22 %, tendo a escala nos dois eixos uma variação linear;

#### h) Análise dos Métodos de Dimensionamento

RIVES, PITA E PUENTES (1979) ao apresentar os métodos de dimensionamento fazem as ponderações que seguem. Em relação ao método da SNCF, consideram fato importante que suprime uma extrapolação do método, é que o mesmo baseia-se num tipo particular de infraestrutura, restringindo o tipo de plataforma em que o gráfico de dimensionamento é válido.

Ao descrever os métodos de classificação das linhas da BR e da antiga URSS, observam que os dois métodos não estipulam os valores de tensão na plataforma, sendo assim, tais métodos devem partir de parâmetros pré-fixados, caso contrário os métodos não teriam sentido (RIVES, PITA E PUENTES, 1979).

Quanto ao método da BR para plataformas argilosas, analisam como principal limitação do método a sua aplicação prática com cada tipo particular de plataforma estudada. Para obtenção da tensão desejada na plataforma, a fim de se utilizar o gráfico do método, são necessários ensaios laboratoriais (RIVES, PITA E PUENTES, 1979).

A metodologia proposta por Lopez Pita, mostra-se limitada a um tipo específico de trilho, de dormente, de espaçamento de dormente e carga por eixo. Já as características da plataforma são descritas através do valor do seu CBR, do módulo de elasticidade estático e da tensão admissível na plataforma, aumentando o alcance do método para diferentes tipos de plataforma (RIVES, PITA E PUENTES, 1979).

PAIVA (1982) ao comparar seu método com o do METRO-SP e da ENGEFER, descreve algumas das limitações destes últimos dois métodos. O do METRO-SP, além de uma série de limitações quanto as condições de tráfego, tais como: carga por eixo de 11,66 t, velocidade de operação limitada a 100 km/h, espaçamento de dormentes de 65 cm e trilho TR 57, foi elaborado dentro de uma hipótese conservadora, considerando-se que a tensão de serviço é metade da tensão admissível. Quanto ao método da ENGEFER as limitações quanto as hipóteses também são grandes. Para elaboração das curvas foi utilizado o trilho do tipo TR 68, dormente com 270 cm de comprimento por 30 cm de largura, coeficiente de lastro de 10 kg/cm<sup>3</sup>, espaçamento entre dormentes de 50 cm e cargas por eixo de 25 t e 30 t. Tanto as hipóteses da

ENGEFER como a de PAIVA (1982), foram elaboradas utilizando-se de hipóteses baseadas em outros tipos de estruturas, adaptadas para a realidade ferroviária. A da ENGEFER foi elaborada sobre o gráfico de eixo rodoviário, enquanto a segunda foi baseado sobre a metodologia para pavimentos aeroportuários.

Abaixo, apresenta-se a tabela 2.21 em que é dimensionado o lastro de acordo com algumas características da plataforma, sub-lastro, tráfego, tipo de trilho, espaçamento dos dormentes, tipo de dormentes e carga por eixo.

Na Tabela 2.21, nota-se que os métodos mais “antigos” partiam de certas simplificações, como por exemplo, um pré-dimensionamento do sub-lastro, restando-se apenas a espessura do lastro para realização do dimensionamento, como fica claro em RIVES, PITA E PUENTES (1979), ao descrever os métodos de dimensionamento das camadas de fundação da via.

Os métodos mais “modernos” possuem a possibilidade do calculo das subcamadas, como o sub-lastro, por exemplo. Além disso, em seus modelos, já são considerados a ação da deterioração do tráfego com o tempo, sendo uma das explicações do aumento das espessuras do sub-lastro e lastro, apresentados no quadro anterior.

Importante salientar que tanto a Adaptação de Eisenmann como o método de Paiva, permitem a definição da espessura da camada superficial da plataforma.

Tabela 2.21: Calculo das espessuras de sub-laastro e lastro pelos métodos apresentados de dimensionamento.

<b>Dimensionamento das Sub-Camadas Ferroviarias</b>			
	Cargas por Eixo		
	25		
<b>Plataforma</b>			
CBR (%)	2	5	9
<b>Sublastro</b>			
CBR (%)	25	25	25
	Espessuras Calculadas		
<b>Sub Lastro</b>			
Método da SNCF	20	20	20
Método de classificação das linhas			
BR	20	20	20
URSS	20	20	20
Método da BR para plataformas argilosas	20	20	20
Adaptação de Eisenmann	240	130	52
Método de Lopez Pita	20	20	20
Método de Cássio E.L. Paiva	164	68	34
	Espessuras Calculadas		
<b>Lastro</b>			
Método da SNCF	> 70	60	22
Método de classificação das linhas			
BR	23	23	23
URSS	25	25	25
Método da BR para plataformas argilosas	72	62	52
Adaptação de Eisenmann	50	50	46
Método de Lopez Pita	32	25	22
Método de Cássio E.L. Paiva	30	30	30

## 2.5 – Modelos recentes de dimensionamento: GEOTRACK e FERROVIA 1.0

### 2.5.1 - GEOTRACK

Segundo CHANG, ADEGOKE E SELIG (1980), o GEOTRACK é um modelo computacional tridimensional baseado num modelo elástico e numa aproximação multicamadas, a qual executa objetivos exigidos. O modelo foi validado pela comparação com medidas de ensaios de campo em testes com vagões. Ele considera as propriedades dependentes da tensão dos materiais e a separação entre dormente e lastro. O estado de tensão do solo calculada pelo programa é utilizado para prever as determinações permanentes da ferrovia. Os dados de saída incluem a carga de assentamento do trilho, a reação dormente-lastro, as deflexões dos dormentes e trilhos e os momentos fletores de dormentes e trilhos. Entretanto, o modelo GEOTRACK enfatiza os aspectos geotécnicos do comportamento da ferrovia e deste modo, também produz dados de saída das deflexões e do completo estado de tensão tridimensional em locais específicos dentro das camadas da via. As soluções podem ser obtidas tanto para eixo simples e para o truque carregado.

O modelo do GEOTRACK representa os trilhos como uma viga linear elástica suportada por um número de reações concentradas, uma em cada ponto de contato entre dormente e trilho. Os trilhos rotacionam em 11 dormentes e são livres para uma rotação total em torno de si e em cada dormente. As propriedades consideradas nos trilhos são: a área da seção transversal, momento de inércia e módulo de elasticidade do material. As conexões entre os trilhos e os dormentes são representadas por uma mola linear, com uma constante de mola específica, a qual podem ser tensionadas tão bem como comprimidas.. Os dormentes também são representados por um modelo de viga elástico, sendo considerados o seu módulo de elasticidade, a área da secção transversal e o momento de inércia. Eles são divididos em dez segmentos iguais com a reação subjacente do lastro representado como uma força concentrada no centro de cada segmento. Estas forças são aplicadas na superfície do lastro como uma pressão uniforme sobre uma área circular de tamanho especificado pelas dimensões do segmento do dormente (CHANG, ADEGOKE E SELIG, 1980).

O lastro, o sub-lastro e as camadas de solo inferiores são representadas como camadas elásticas lineares, onde é considerado seu módulo de elasticidade e um coeficiente de Poisson. Todas as camadas são infinitas na direção horizontal e são situadas sobre um semi-espaço, a qual é infinita na horizontal e para baixo. O GEOTRACK permite dividir a via em muitas camadas como o usuário deseja a fim de calcular a variação das propriedades como o resultado do volume da variação de tensão com a profundidade (CHANG, ADEGOKE E SELIG, 1980).

O sistema multicamadas representa o lastro e as camadas do subleito usadas para desenvolver a tensão e os coeficientes que influenciam o deslocamento. A compatibilidade dos deslocamentos e o equilíbrio das forças entre a base da estrutura trilho-dormente e o topo da fundação são impostas para um efeito de solução global do sistema. Importante notar que o efeito de cisalhamento do dormente e o lastro não são considerados neste modelo (CHANG, ADEGOKE E SELIG, 1980).

Ainda segundo CHANG, ADEGOKE E SELIG (1980), a matriz de flexibilidade do sistema multicamadas representando o lastro, sub-lastro e o solo do subleito, é obtida através do uso da solução analítica de Burmister. Sobre uma área circular é aplicada a reação do dormente aplicada às camadas elásticas em lugar de uma área retangular porque a solução assimétrica é mais econômica para o computador do que a solução retangular. As matrizes de flexibilidade da fundação e da estrutura trilho-dormente são combinadas considerando a compatibilidade e as condições de equilíbrio, para formar um conjunto de equações simultâneas. Este conjunto de equações é resolvido para obter o deslocamento e a pressão de contato dos segmentos e subsequentemente a tensão e os deslocamentos nos pontos desejados da estrutura trilho-dormente ou dentro das camadas de fundação.

Na ferrovia, os dormentes repousam sobre o lastro a qual não produz contenção significativa para cima. Assim, nenhuma tensão deveria ser permitida para desenvolver entre o lastro e os dormentes alguma tendência dos dormentes levantarem do lastro diretamente pela deformação do trilho causada pela carga por eixo. No GEOTRACK um procedimento interativo é usado para eliminar a tensão de tração e, portanto permitir a separação dormente-lastro (CHANG, ADEGOKE E SELIG, 1980).

No GEOTRACK, o conjunto do módulo de resiliência para as camadas é assumido a fim de começar o procedimento de cálculo. No final de cada interação um novo módulo de resiliência é calculado para as camadas, de acordo com o estado de tensão determinado na interação, que é usado na próxima interação, até que se convirja para o valor calculado no resultado de estado da tensão dentro da tolerância desejada (CHANG, ADEGOKE E SELIG, 1980).

### 2.5.2 – O Programa FERROVIA 1.0

O programa FERROVIA 1.0 é um programa computacional brasileiro e desenvolvido por Régis Martins Rodrigues (1993a). Este modelo procura tornar mais realistas as previsões de tensões em relação aos modelos tradicionais como o GEOTRACK, que segundo RODRIGUES (1994), fazem simplificações bastante drásticas nos seus modelos estruturais, o que os torna muito dependentes de empirismo para sua validade. O programa utiliza o método dos elementos finitos e o método das camadas finitas. O primeiro foi utilizado para simulação de elementos tais como os trilhos, dormentes e fixações, diferentemente do GEOTRACK que considera o trilho e os dormentes como uma viga linear elástica. O segundo representa a infra-estrutura e a geração da correspondente matriz de flexibilidade.

RODRIGUES (1993a) descreve o processo matemático utilizado no programa FERROVIA 1.0 onde se utiliza da inversão da matriz de flexibilidade para gerar uma matriz de rigidez da infra-estrutura. Visando o cálculo dos deslocamentos e rotações nos pontos nodais, a matriz de rigidez encontrada é somada à matriz de rigidez da superestrutura, e resolvido o sistema de equações lineares resultantes, processo que se assemelha ao desenvolvido no programa GEOTRACK. Através dos módulos de deformação resiliente, simula-se o comportamento tensão deformação dos solos e materiais granulares, sob ação das cargas em movimento sobre a via. Como no GEOTRACK um processo iterativo é executado até ocorrer uma convergência de valores, considerando a dependência do módulo resiliente com o estado de tensões geradas, atualiza os módulos em função das tensões, levando em conta o efeito do confinamento gerado pelo peso próprio das camadas.

Da mesma forma que no GEOTRACK, o programa FERROVIA 1.0 utiliza-se de uma grade de onze dormentes. A diferença é que essa grade juntamente com o trilho representa uma malha de elementos finitos que será utilizada para os cálculos (RODRIGUES, 1993a). Ainda segundo o mesmo autor, para o cálculo das tensões atuantes nas camadas de infra-estrutura utiliza-se de diagramas de pressão de contato entre os dormentes e o topo do lastro, relacionados com os deslocamentos calculados. Modelo que considerado mais adequado do que as previsões para o método de cálculo das tensões por Boussinesq, já que, para cargas em velocidade, a utilização deste último não traz resultados satisfatórios comparados com valores experimentais.

As principais características do programa são segundo RODRIGUES (1993a):

- a) Cálculo das tensões e deformações nas camadas de lastro, sub-lastro e subleito, e nos trilhos;
- b) Baixo esforço computacional, mesmo tendo como base uma estrutura tridimensional da estrutura ferroviária;
- c) Incrementar o modelo com outros já existentes;

A Tabela 2.22 apresenta as variáveis analisadas tanto pelo FERROVIA 1.0 como pelo GEOTRACK. Nota-se que o modelo FERROVIA 1.0 tem praticamente a mesma amplitude que o GEOTRACK.

Tabela 2.22: Variáveis de entrada que podem ser analisadas com o GEOTRACK E O FERROVIA 1.0

<b>Variáveis de entrada que podem ser analisadas com o GEOTRACK e o FERROVIA 1.0</b>		
	GEOTRACK	FERROVIA 1.0
Bitola	SIM	SIM
<b>Dormentes</b>		
Espaçamento dos dormentes	SIM	SIM
Tipo de dormente	SIM	SIM
Comprimento dos dormentes	SIM	SIM
Largura dos dormentes	SIM	SIM
Tipo de fixação	SIM	SIM
<b>Trilhos</b>		
Tipo de trilho		
Novo	SIM	SIM
Usado	SIM	SIM
Peso do Trilho	SIM	SIM
Momento de inércia	SIM	SIM
Área da Secção	SIM	SIM
<b>Lastro</b>		
Módulo de elasticidade	SIM	SIM
Coesão	SIM	SIM
Ângulo de Atrito	SIM	SIM
Coefficiente de Poisson	SIM	SIM
Espessura	SIM	SIM
Módulo Resiliente	SIM	SIM
<b>Sublastro</b>		
Módulo de elasticidade	SIM	SIM
Coesão	SIM	SIM
Coefficiente de Poisson	SIM	SIM
Ângulo de Atrito	SIM	SIM
Espessura	SIM	SIM
Módulo Resiliente	SIM	SIM
<b>Plataforma</b>		
Módulo de elasticidade	SIM	SIM
Coesão	SIM	SIM
Coefficiente de Poisson	SIM	SIM
Ângulo de Atrito	SIM	SIM
Espessura	SIM	SIM
Módulo Resiliente	SIM	SIM
Carga Vertical	SIM	SIM

## 2.6 - Discussão

Neste capítulo, apresentaram-se os principais elementos da infra-estrutura e da superestrutura ferroviária. Elementos estes que possuem características próprias quanto as suas dimensões, resistência aos esforços e em relação à deformação.

Quanto à infra-estrutura o elemento principal é a plataforma. Camada que recebe os esforços finais oriundos da via permanente. Este elemento também sofre grande influência das características dos materiais constituintes, sendo de importância fundamental o estudo do desempenho da plataforma em relação aos materiais constituintes.

A superestrutura é formada pelo sub-lastro, lastro, dormentes e trilhos, além de outros acessórios. Tais camadas desempenham conjuntamente resistência aos esforços do tráfego sobre a via e transferem esses esforços, de forma aliviada, para a plataforma.

Tal como a plataforma, o sub-lastro e o lastro sofrem influência das características de seus materiais constituintes. Tais características influem de maneira direta sobre a espessura dessas camadas e sobre o valor da deflexão da via.

Desta forma, para o estudo da plataforma, sub-lastro e lastro é de vital importância o conhecimento do módulo de elasticidade dos materiais, ângulo de atrito, coesão, módulo de resiliência. E a espessura destas camadas também deve ser considerada a fim de entender-se a interação existente entre elas, frente à variação do seu valor.

Quanto aos dormentes e os trilhos, as suas características geométricas exercem grande influencia sobre a distribuição dos esforços. No caso dos dormentes também deve ser considerado em qualquer estudo o tipo de madeira empregada, o qual varia o módulo de elasticidade do elemento. No caso dos trilhos, considerações quanto ao seu desgaste são importantes, pois fazem variar o valor do momento de inércia.

Quanto a influência em relação a deformação, conforme apresentou-se nas seções 2.3.1 e 2.3.3, a variação da carga de roda tem grande influência. Em ordem decrescente de influência podem-se considerar, além da carga, outros quatro elementos da via:

- a) Módulo de Elasticidade da Plataforma;
- b) Espaçamento dos Dormentes;
- c) A presença ou não de sublastro e o módulo de elasticidade do material utilizado;
- d) Tipo de Lastro;

Verificou-se que o tipo de trilho não exerce grande influência sobre a deformação da via. Por outro lado, trilhos mais rígidos distribuem melhor os esforços para as camadas de base do que os trilhos de maior rigidez. Desta forma, perfis mais robustos diminuem a necessidade de manutenção em bases de baixa capacidade de suporte ou deterioradas.

Fato importante para o modelo estudado por TARABJI e THOMPSON (1976) é que a variação da carga não estabeleceu uma variação proporcional na deformação da via. Tendência não esperada já que nas equações de deformação o valor da carga equivale a um fator de multiplicação e o aumento da deformação deveria ter alta proporcionalidade com o aumento da carga.

Quanto ao espaçamento dos dormentes os resultados obtidos por TARABJI e THOMPSON (1976) eram esperados, pois todas as teorias convergem em entender que um maior espaçamento dos dormentes leva a uma concentração maior de carga e, portanto, a uma maior deformação. Por outro lado, nota-se que, para intervalos pequenos de espaçamento, a variação da deformação não tem tanta influência como a variação dos módulos de elasticidade da plataforma, do sublastro ou do lastro. Na prática, estes três últimos são mais importantes pela grande variabilidade destes elementos, principalmente do material de plataforma.

Os estudos de TARABJI e THOMPSON (1976) convergem com os trabalhos de SHENTON (1984) e HAY (1975), onde, de forma geral, a estabilidade da plataforma e a capacidade de suporte dela, o valor da amplitude de carga e da ação das cargas dinâmicas, o tipo de lastro e o espaçamento dos dormentes são considerados como elementos fundamentais no estudo do processo de deterioração do nivelamento vertical da via.

## **3 – O PROGRAMA FERROVIA 1.0 E SUAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS**

### **3.1 – Estrutura do programa FERROVIA 1.0**

Segundo RODRIGUES (2003a) a estrutura do programa FERROVIA 1.0 baseia-se na superposição de programas, facilitando os cálculos em solos de comportamento não linear e dos materiais granulares. Permite também compatibilizar os módulos resilientes das camadas com o carregamento através de uma série de interações, procedimento importante por haver a possibilidade de ruptura localizada nessas camadas. O método dos elementos finitos foi a ferramenta utilizada para resolução do sistema trilho-dormente. Eles são representados como elementos de viga interconectados por meio de molas, representando o sistema de fixação, fixação expressa por um valor K que varia de zero à uma ligação perfeita rígida, ou seja, que não permita nenhum tipo de movimento.

O mesmo autor observa que a simulação do lastro, sub-lastro e subleito são executados através do método das camadas finitas, aplicando-se o programa ELASTMCF.. Tal programa determina a matriz de flexibilidade, [F], do conjunto de camadas, e, através da inversão desta matriz, encontra a matriz de rigidez, [KF] da estrutura em camadas. Para a determinação dos deslocamentos verticais e as rotações dos pontos nodais, encontra-se através do processo de inversão a matriz de rigidez da grade [KS] e resolve-se o sistema 3.1:

$$([KS] + [KF]) * \delta = P \quad (3.1)$$

Onde,

$P$  = vetor de cargas verticais e torques externos aplicados ao sistema;

$\delta$  = deslocamentos

Ainda segundo RODRIGUES (2003a) o processo de cálculo do FERROVIA 1.0 pode ser descrito como segue:

- a) Elaboração da matriz de rigidez da grade [KS];
- b) Montagem da matriz de rigidez a partir de valores iniciais do módulo de resiliência do sistema em camadas;
- c) Entrada dos valores de carregamento externo e determinação dos deslocamentos e rotações nodais;
- d) Determinação do diagrama das tensões de contato entre cada dormente e o topo do lastro;
- e) Com a determinação do diagrama de tensões de contato sob os dormentes, aplica-se o mesmo ao sistema de camadas, com as respectivas variações dos módulos resilientes das camadas com o estado de tensões, considerando também o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, com o programa ELASTMCF incremental, obtendo-se as tensões e deformações em cada camada;
- f) Obtendo-se os novos módulos resilientes das subcamadas, volta-se ao passo 2 e processa-se até o passo 5, repetindo o número de vezes necessário para que haja convergência de todos os resultados;
- g) Finalmente calculam-se os momentos fletores e esforços cortantes nos trilhos e dormentes

O programa INFRA, pertencente a estrutura do FERROVIA, descarta as tensões de contato negativas, evitando-se tensões de tração entre os dormentes e o lastro. Tais tensões de tração não são admitidas inclusive no cálculo dos módulos resilientes dos materiais granulares. É possível determinar onde ocorrem rupturas locais. Para a discretização dos elementos da grade, foi elaborada uma malha de pontos nodais baseadas em onze dormentes, cada dividido em dez elementos de viga [KS], descrito na figura a seguir (RODRIGUES, 2003a):

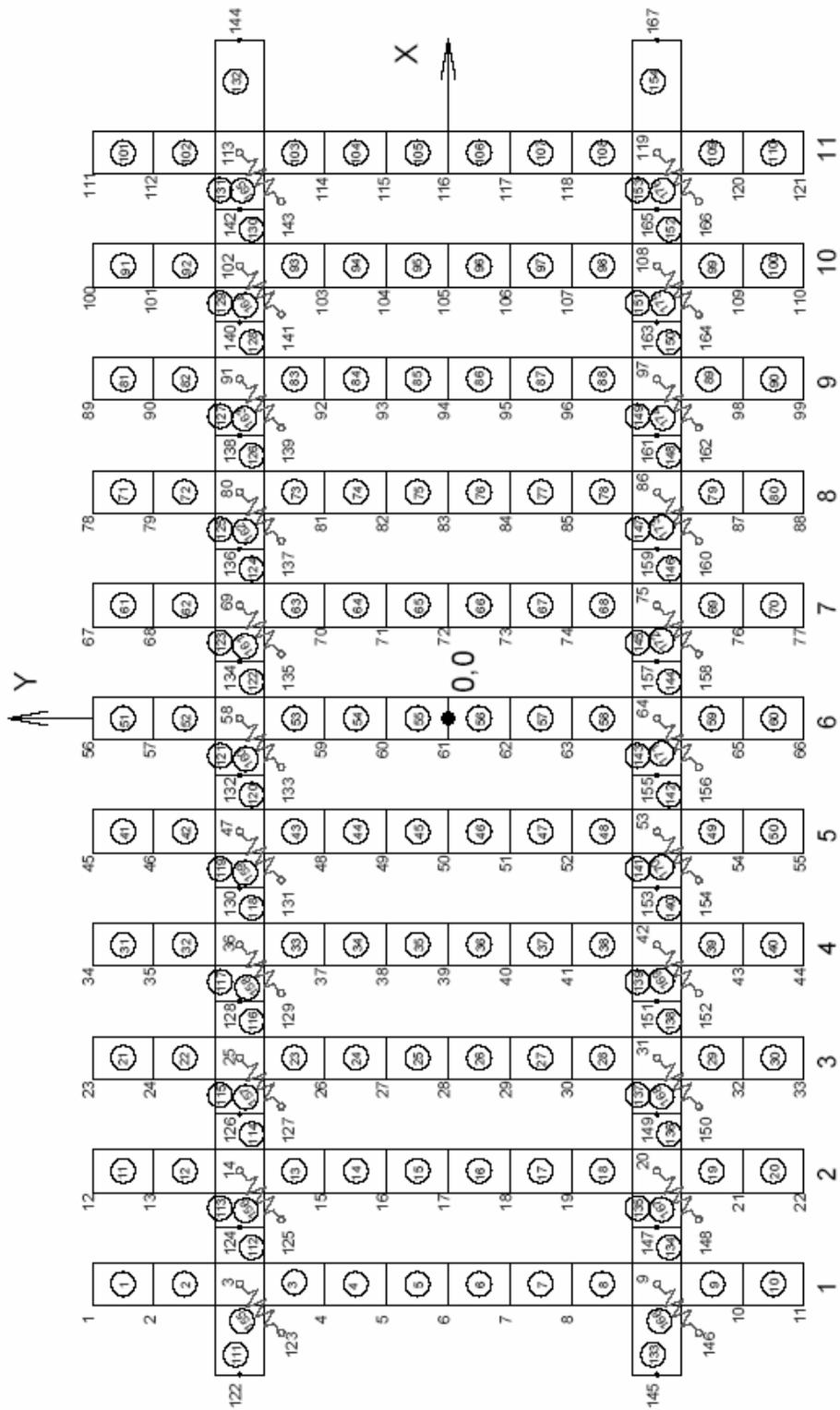


Figura 3.1: Grade de onze dormentes com os pontos nodais, base do programa FERROVIA 1.0 (RODRIGUES,2003a);

A entrada de dados no programa FERROVIA 1.0 dar-se pelo preenchimento de três conjuntos de dados, que são: dados da grade, dados da fundação e cargas aplicadas. Os dados do primeiro conjunto de entrada estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Primeira série de entradas do programa FERROVIA 1.0.

<b>Primeira série de dados de entrada do Ferrovia</b>	
<b>Dados da Grade</b>	<b>Unidade</b>
Bitola	cm
Espaçamento dos Dormentes	cm
Rigidez da Fixação - K	kgf/cm
<b>Dados do Trilho</b>	
Módulo de elasticidade - E	kgf/cm <sup>2</sup>
Momento de Inércia - I	cm <sup>4</sup>
Largura da Base do Trilho	cm
Área da Seção do Trilho	cm <sup>2</sup>
<b>Dados dos Dormentes</b>	
Módulo de elasticidade - E	kgf/cm <sup>2</sup>
Momento de Inércia - I	cm <sup>4</sup>
Largura da Base do Dormente	cm
Área da Seção do Dormente	cm <sup>2</sup>
Comprimento do Dormente	cm
Tipo de Dormente	bi-bloco/ monobloco

Fonte: SPADA (2003)

O segundo conjunto é constituído pelos dados de fundação iniciando-se pela entrada do número de camadas do trecho em estudo e da quantidade de incrementos de carga. Quanto as propriedades dos materiais das camadas, o programa fornece três opções quanto ao tipo de material, sendo eles: granular, coesivo e linear. Podem-se citar como matérias granulares os de origem arenosa, de baixa coesão, os coesivos geralmente representados pelas argilas em geral. O número de subcamadas para a execução dos cálculos pode ser escolhida para o lastro e o sublastro num máximo de 5 para os dois respectivamente, mas para o subleito este número é fixo em 7.

Os dados do segundo conjunto de entrada estão descritos na Tabela 3.2 abaixo, juntamente com as unidades.

Tabela 3.2: Segunda série de dados de entrada do programa FERROVIA 1.0.

<b>Segunda série de dados de entrada do Ferrovia</b>	
<b>Dados da Gerais</b>	<b>Unidade</b>
Número de camadas	-
Quantidade de incremento de carga	-
<b>Propiedades das Camadas</b>	
Número da Camada	-
Espessura	cm
Coefficiente de Poisson	-
Coesão	kgf/cm <sup>2</sup>
Ângulo de Atrito	graus
<b>Código da Camada - Opção Granular</b>	
Parâmetro de resiliência - K1	kgf/cm <sup>2</sup>
Parâmetro de resiliência - K2	-
Subcamadas	-
<b>Código da Camada - Opção Coesivo</b>	
Parâmetro de resiliência - K	kgf/cm <sup>2</sup>
n	-
Tensão desvio - Sdc	kgf/cm <sup>2</sup>
Subcamadas	-
<b>Código da Camada - Opção Linear</b>	
Módulo de elasticidade - E	kgf/cm <sup>2</sup>
Subcamadas	-

Fonte: SPADA (2003)

A última tela de entrada de dados é a referente as cargas aplicadas nos pontos nodais devido aos esforços verticais. Os pontos de aplicação das cargas seguem as posições dos nós da grade de onze dormentes, grade utilizada como parâmetro de modelagem do programa. O valor de uma carga que comprime a via é fornecido com o seu valor com sinal negativo e em toneladas força (tf). Além disso, mesmo estando em posição posterior na janela das entradas, deve-se entrar primeiramente com o número de cargas aplicadas.

Tabela 3.3: Terceira série de dados de entrada do programa FERROVIA 1.0.

<b>Terceira série de dados de entrada do Ferrovía</b>	
<b>Cargas Aplicadas</b>	
Número da carga	-
Número do ponto nodal	-
Tipo de Carga	Força Vertical - tf
	Momento concentrado - tf x cm
Valor da Carga	tf
Número de Cargas aplicadas	-

Fonte: SPADA (2003)

Os dados de saída do programa FERROVIA 1.0, representam diversos parâmetros da via permanente, de acordo com os dados de entrada. Segundo MUNIZ DA SILVA *et al* (2005), os dados de saída do programa são descritos no quadro abaixo:

Tabela 3.4: Dados de saída do programa FERROVIA 1.0.

<b>Dados de Saída do Programa FERROVIA 1.0</b>	
Máxima pressão de contato entre dormente e lastro	$p_c$
Máxima deflexão no trilho	$\delta_T$
Máxima deflexão do lastro	$\delta_L$
Máxima tensão de compressão no topo do subleito	$\sigma_{SL}$
Máxima tensão de tração no trilho	$\sigma_T$
Máxima tensão de tração do dormente	$\sigma_D$

Fonte: MUNIZ DA SILVA *et al* (2005)

Ainda segundo MUNIZ DA SILVA *et al* (2005), os diversos termos caracterizam-se da seguinte forma:

- a) O valor de  $p_c$  representa um potencial de comportamento entre a base do dormente e a superfície do lastro, podendo-se caracterizar assim prováveis problemas de nivelamento e ruptura do lastro.

- b) Os valores de  $\delta_T$  e  $\delta_L$  representam o nível de resiliência da via, podendo relacionar os valores de deflexão com a possibilidade de descarrilamento ou um uso extremo da via.
- c) O valor da máxima tensão de compressão no topo do subleito  $\sigma_{SL}$ , pode indicar uma tendência a problemas de nivelamento, nos casos de tensões superiores a capacidade da via.
- d) O valor de  $\sigma_T$  indica a máxima tensão de tração no trilho, podendo servir de parâmetro para análise de sua possibilidade de ruptura, ou defeitos de fundação que induzem altas trações no trilho.
- e) A importância do conhecimento do valor de  $\sigma_D$  esta na possibilidade de executar um dimensionamento correto dos dormentes, no caso de dormentes de concreto, e definir o nível de tensão que as fixações estarão sujeitas.

Neste trabalho utilizar-se-á o programa FERROVIA 1.0 para desenvolver um estudo comparativa entre os parâmetros da ferrovia em relação a deformação vertical da via.

### **3.2 – Análise comparativa entre o cálculo da Tensão no Topo da Plataforma por um Modelo Clássico e pelo FERROVIA 1.0**

O modelo clássico escolhido foi a Adaptação por Eisenmann (PAIVA, 1999). Este critério tem o seguinte procedimento:

a) Determinação das tensões atuantes na face inferior dos dormentes empregando as relações de Zimmermann. Para o calculo das tensões provocadas pelos dormentes adjacentes a um ponto determinado na infra-estrutura utiliza-se das fórmulas de Carothers-Terzaghi, baseadas nas hipóteses de Boussinesq que consideram o meio homogêneo e isotrópico. Para sanar esta limitação de meio homogêneo e isotrópico. Eisenmann utiliza-se das fórmulas de Odemark, para permitir a transformação das espessuras das camadas em altura equivalentes.

b) Cálculo das tensões admissíveis na plataforma através da fórmula de Heukelon e Fox.

c) Comparam-se as tensões atuantes com as tensões admissíveis. Caso a tensão seja superior, alteram-se os valores das espessuras e/ou dos módulos de elasticidade.

O programa FERROVIA 1.0 foi utilizado, conforme as características descritas na secção 3.1 deste trabalho.

Abaixo segue a Tabela 3.5, comparativa entre os dois modelos para uma mesma combinação de valores dos elementos da via permanente, valores esses obtidos através de referências bibliográficas. Os cálculos foram executados para a tensão vertical no topo da plataforma, considerando a profundidade equivalente de 72 cm, carga de 20 toneladas por eixo, distância entre eixos de 165 cm. Apresenta-se a seguir a tabela resumo com os resultados pelos dois dimensionamentos:

Percebe-se alguma variação entre os resultados pela Adaptação de Eisenmann e pelo Programa FERROVIA 1.0. Como visto no capítulo 2 desta dissertação, a adaptação de Eisenmann considera um fator dinâmico no cálculo dos esforços o que não é considerado pelo programa FERROVIA 1.0, porém quando se retirou este fator de carga a diferença entre os resultados é inferior a 5%.

Tabela 3.5: Planilha comparativa entre o cálculo de tensão na plataforma pela adaptação de Eisenmann e o programa FERROVIA 1.0.

Planilha Comparativa Cálculo da Tensão na Plataforma pela Adaptação de Eisenmann e pelo programa FERROVIA 1.0						
COMBINAÇÃO						
Espaçamento (cm)	Inércia do Trilho (cm <sup>4</sup> )	E do Lastro (kgf/cm <sup>2</sup> )	E do Sub Lastro (kgf/cm <sup>2</sup> )	E da Plataforma (kgf/cm <sup>2</sup> )	K (kgf/cm)	Inércia Dormente (kgf/cm <sup>2</sup> )
60	1610,8	1500	800	200	56000	7509
Via Classe I						
ESPESSURAS DAS CAMADAS DE BASE (cm)				Carga por eixo (t)		
Lastro	30			20		
Sublastro	15					
Plataforma	500					
Tensão Atuante no Topo da Plataforma no centro entre os dois rodeiros do truque (kgf/cm <sup>2</sup> )						
Adaptação de Eisenmann	<p align="center"><b>0,99</b></p> <p align="center">Utilizado Fator de Risco 95,4%. B=2. Supestrutura em boas condições S = 0,2*f. Velocidade &lt; 60 km/h / Carga Máxima sob o dormente vezes 1,9</p>					
Adaptação de Eisenmann sem o fator dinâmico	<p align="center"><b>0,45</b></p> <p align="center">Como não há efeito dinâmico retirou-se o fator 1,9 da carga do dormente mais carregado. Além da retirada dos coeficientes dinâmicos sob a carga de roda</p>					
FERROVIA 1.0	<p align="center"><b>0,47</b></p>					

### **3.3 – Discussão**

O programa Ferrovias 1.0 é uma ferramenta importante para análise das características da via permanente. O modelo tem grande importância principalmente pela utilização de uma base em elementos finitos, considerando a interação de todos os elementos da via permanente, e a capacidade de executar um grande número de cálculos de secções diferentes, tornando-se, desta forma, também uma potente ferramenta para análises de sensibilidade.

Para esta dissertação é importante o conhecimento dos valores de deformação, tendo como referencial o topo do trilho. Para isso, basta que se considerem os pontos nodais apresentados na grade padrão do programa, e utilizando-se destes pontos, torna-se precisa a extração da deformação no ponto exata de nossa análise.

Um exemplo do grau de precisão do programa foi visto na secção 3.2. Nesta secção utilizou-se a Adaptação de Eisenmann para o cálculo da tensão no topo da plataforma e o programa FERROVIA 1.0. A diferença nos valores da resposta foi gerada pela consideração do efeito dinâmico do primeiro método. Quando se tira o efeito dinâmico os valores diferem em cerca de 5%.

## **4 – ESTUDO DE SENSIBILIDADE DO PROGRAMA FERROVIA 1.0**

### **4.1 – Um estudo de sensibilidade**

#### **a) Análise de dados e análise de sensibilidade**

A análise de dados, segundo CASTRO (2001) envolve dois processos básicos: a análise da qualidade dos estudos que tem caráter qualitativo e a análise estatística que tem caráter quantitativo. A análise qualitativa busca a validade interna e externa dos dados e o método estatístico adequado, resultando na metodologia, descrição de variáveis. Na análise estatística são feitas inúmeras re-análises e análises de sensibilidade. Na análise estatística é fundamental que os dados ou variáveis sejam semelhantes, ou seja, os quais tenham sentido dentro do conjunto a ser estudado. Heterogeneidades podem levar a falsos resultados estatísticos.

Para HIGGINS e GREEN (2006) uma análise de sensibilidade depende de um processo de avaliação e tomada de decisão, tratando-se de um grande número de variáveis, é preciso saber também o quão sensível são os resultados de uma análise em relação às suposições ou combinações nela executadas. Desta forma o pesquisador pode identificar quais variáveis afetam com maior intensidade ou peso os resultados e, por consequência, as variáveis que afetam com maior intensidade a tomada de decisão. Numa análise de sensibilidade incluem-se como tipos de suposições ou critérios de decisão que podem ser interpretados:

- mudança de critério de inclusão de tipos de estudo, de participantes, de intervenções ou de medidas de resultado;

- incluindo-se ou excluindo-se os estudos ou combinações onde há alguma ambigüidade no processo de escolha dos critérios de inclusão;
- re-analisando os dados numa escala razoável onde os estudos demonstram alguma incerteza sobre os resultados;
- re-análise dos dados de entrada em uma escala razoável de valores para dados faltantes;
- re-análise dos dados usando diferentes critérios estatísticos;

Se na análise de sensibilidade executada a mudança dos resultados não for considerável, os resultados podem ser considerados de alta confiabilidade. Caso contrário é necessário uma maior atenção na interpretação dos resultados (HIGGINS e GREEN, 2006).

No processo de tomada de decisão, observa FURTADO E SUSLINK (2001), que a análise de sensibilidade é uma ferramenta para avaliação de um modelo de acordo com os pesos de cada variável. São dois os modelos básicos de análise de sensibilidade: o modelo unidimensional e/ou a combinação algébrica dos pesos. Na análise unidimensional há uma necessidade de variarem-se os pesos dos componentes enquanto é mantida uma razão constante entre os demais pesos das outras variáveis. Este tipo de análise não considera a interação que ocorre quando se manipula uma série grande de atributos ou variáveis, podendo ocasionar erros de avaliação. Na combinação algébrica, os pesos dos atributos ou variáveis são combinados de forma a possibilitar a interpretação dos resultados com suas interações. Para um número pequeno de variáveis a análise por pesos é bastante precisa, porém, quando se manipula um número muito grande de variáveis ou combinações são necessários outros tipos de modelos de análise de sensibilidade.

Desta forma, aplicando os princípios de análise de sensibilidade para estudos na via permanente, TARABJI e THOMPSON (1976) fizeram importantes pesquisas sobre as características dos fatores básicos que interferem em um projeto de suporte da via. Este estudo passaria por uma minuciosa seleção dos fatores básicos tais como os recursos disponíveis, o desempenho previsto, o nível de serviço recomendado. Esta análise de sensibilidade ou estudo paramétrico deve conduzir a seleção de um projeto ótimo do sistema de suporte ferroviário. O modelo estrutural usado para avaliar a resposta do sistema de suporte ferroviário deveria, portanto, ser capaz de incorporar os parâmetros de projeto mais relevantes para o

dimensionamento dos elementos da via férrea. As respostas estruturais particularmente interessantes nas pesquisas realizadas pelos dois autores anteriores são:

Deflexão do trilho;  
Momento do trilho;  
Tensão vertical do lastro;  
Tensão vertical da plataforma;  
Deformação vertical na plataforma;  
Testes de fadiga do lastro;

## **b) O programa SPSS 14.0**

O SPSS/PC+ é uma adaptação para microcomputadores do programa SPSS criado no ano de 1965 na Universidade de Stanford. O SPSS/PC+ é um programa que permite a leitura de dados e a análise estatística adequada dos mesmos, possibilitando, assim, uma tomada de decisão. Segundo NUNES (2007) o programa é constituído por uma série de rotinas que tem como foco principal o tratamento estatístico de dados, permitindo, também, a manipulação de dados, como, por exemplo, a criação de novas variáveis a partir de outras pré-definidas. O usuário interage com o programa através de comandos pré-definidos, através de menus descritivos e caixas de diálogo.

Este programa possui 3 módulos:

- editor de dados: que se assemelha a uma folha de cálculo e é utilizada para definição, introdução, edição e visualização de dados;
- janela de resultados: onde são apresentados todos os resultados dos vários tratamentos estatísticos;
- janela de sintaxe: onde estão disponíveis os comandos para utilização do SPSS;

Deve-se notar que, além de uma indicação apropriada de dados, a escolha do tratamento estatístico também é de vital importância. A escolha deste tratamento deve ser resultado das hipóteses formuladas e da escala de avaliação das variáveis, sendo também, de vital importância a interpretação final de todo o processamento estatístico efetuado, embasando assim a tomada de decisão (NUNES, 2007).

### **c) Metodologia para o estudo de sensibilidade**

A metodologia para o estudo da sensibilidade dos elementos da ferrovia foi dividida em três partes.

Na primeira, apresentada no capítulo 2 deste trabalho, buscaram-se valores característicos para os elementos da via através de pesquisa em referências bibliográficas.

A segunda parte, apresentada neste capítulo, elaborou-se uma análise paramétrica através do programa de determinação das tensões e deformações para via férrea, programa apresentado no capítulo 2 deste trabalho e aprofundado no capítulo 3.

E, finalmente, através de programa estatístico apresentado neste capítulo, foi analisada a correlação das variáveis objetivando analisar a sensibilidade das mesmas frente às deformações e finalizando com a pesquisa de uma equação de regressão que representa o modelo com a maior precisão possível.

## **4.2 – Estudo da sensibilidade das variáveis do programa FERROVIA 1.0.**

### **4.2.1 – Variáveis utilizadas no estudo de sensibilidade**

O estudo de sensibilidade foi realizado sobre o rol de variáveis do programa FERROVIA 1.0 apresentadas na Tabela 4.1. Importante ressaltar que no valor da bitola foi considerada apenas a bitola larga, 1600 mm, para o estudo paramétrico deste trabalho. O módulo de elasticidade do trilho é valor padrão pelo tipo de material e também não variou em todas as análises.

Tabela 4.1: Variáveis estudadas no programa FERROVIA 1.0

<b>Variáveis estudadas no programa FERROVIA 1.0</b>
Espaçamento dos dormentes
K da fixação
Inércia do trilho
Área da secção Transversal do Trilho
Largura do Patim do Trilho
Módulo de Elasticidade dos dormentes
Inércia dos dormentes
Módulo de Elasticidade do Lastro
Módulo de Elasticidade do Sublastro
Módulo de Elasticidade da Plataforma
Espessura do Lastro
Espessura do Sublastro
Espessura da Plataforma
Coefficiente de Poisson do Lastro
Coefficiente de Poisson do Sublastro
Coefficiente de Poisson da Plataforma
Ângulo de Atrito do Lastro
Ângulo de Atrito do Sublastro
Ângulo de Atrito da Plataforma
Carga aplicada

#### 4.2.2 – Valores de cada variável para o estudo de sensibilidade

Para o estudo de sensibilidade, baseado nas variáveis da Tabela 4.1, e nas observações realizadas na secção 4.2.1, utilizou-se os valores apresentados na Tabela 4.2. Estes valores em sua maior parte foram obtidos em literatura técnica específica, conforme apresentado no Capítulo 2 desta dissertação. Alguns valores foram obtidos pela variação de um valor padrão sobre uma percentagem a mais ou a menos do valor clássico, em outros, utilizou-se de valores extremos, não fixados em literatura, como forma de estudar os limites de variação da deformação e entender a amplitude da sensibilidade de algumas variáveis. A Tabela 4.2 constitui-se, desta forma, de uma tabela preliminar utilizada apenas para separar as variáveis mais sensíveis das menos sensíveis, podendo-se aprofundar o estudo naquelas que se mostrarem de maior sensibilidade. Na Tabela

4.2 é importante salientar que o valor que representará o comportamento do solo frente às solicitações será o módulo de elasticidade linear.

Tabela 4.2: Valores a serem estudados, para a qualificação inicial de sensibilidade, para cada elemento com o programa FERROVIA 1.0

<b>Quadro de Variação dos Elementos a serem Estudados</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Variações</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Bitola</b>	<b>larga 1600 mm</b>				
<b>K fixação (kgf/cm)</b>	50000	<b>70000</b>	90000	-	-
<b>Trilho</b>					
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2184,4	2457,45	<b>2730,5</b>	3003,55	3276,6
Area da Secção Transversal	58,06	65,32	<b>72,58</b>	79,84	87,09
Largura do Patim (cm)	13,5	13,97	<b>14,5</b>	-	-
<b>Dormente</b>					
Comprimento (cm)	<b>2,65</b>	2,7	2,8	-	-
Altura (cm)	0,01	16	<b>17</b>	18	25
Largura (cm)	<b>22</b>	24	26	-	-
Espaçamento (cm)	50	55	<b>60</b>	65	70
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	<b>94000</b>	105000	154000	-	-
<b>Camadas</b>					
<b>Plataforma</b>					
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	100	200	<b>400</b>	700	-
Poisson	0,4	<b>0,45</b>	0,5	-	-
Angulo de atrito (°)	0,01	25	<b>30</b>	45	-
coesão (kgf/cm <sup>2</sup> )	<b>0,1</b>	0,3	1	5	-
Tipo de calculo	<b>linear</b>	-	-	-	-
Espessura (cm)	400	<b>500</b>	600	-	-
<b>Sublastro</b>					
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	700	800	<b>1000</b>	1200	-
Poisson	0,25	0,3	<b>0,35</b>	-	-
Angulo de atrito (°)	0,01	25	<b>30</b>	45	-
coesão (kgf/cm <sup>2</sup> )	<b>0,1</b>	0,3	1	5	-
Tipo de calculo	<b>linear</b>	-	-	-	-
Espessura (cm)	10	<b>15</b>	20	-	-
<b>Lastro</b>					
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1200	1500	<b>2000</b>	2700	-
Poisson	0,25	0,3	<b>0,35</b>	-	-
Angulo de atrito (°)	0,01	25	<b>30</b>	45	-
coesão (kgf/cm <sup>2</sup> )	<b>0,1</b>	0,3	1	5	-
Tipo de calculo	<b>linear</b>	-	-	-	-
Espessura (cm)	25	<b>30</b>	35	-	-
<b>Carga por eixo (T)</b>	10	<b>20</b>	30	40	-

O programa FERROVIA 1.0 também permite a utilização dos valores de K1 e K2 das camadas de infra-estrutura. Tais valores representam as propriedades resilientes destas camadas e são encontrados através de ensaios triaxiais. Existe um número grande de pesquisas sobre estes valores e suas propriedades, tais como a de SVENSON (1980) para solos argilosos e a de SPADA (2002) que encontra os valores de K1 e K2 para britas e sua relação com a deformação da via. Porém, em análises paramétricas preliminares, estes valores mostraram certas inconsistências quanto aos resultados esperados pela literatura técnica.

Baseado em valores estudados por BARROS (1965), módulos de elasticidade entre 70 a 3500 kgf/cm<sup>2</sup> representam solos, podendo-se incluir as plataformas e alguns tipos de sublastro, e entre 700 a 7000 kgf/cm<sup>2</sup> para bases flexíveis, podendo-se incluir o lastro e outros tipos de sublastro.

As variáveis em negrito na Tabela 4.2 correspondem aos valores utilizados como referência para a análise preliminar dos elementos, a fim de manter um padrão para todas as variações que serão efetuadas, possibilitando a comparação dos resultados. Ao variar os valores dos elementos da via, um a um, esses valores serão fixos.

Para a construção da Tabela 4.5 e 4.6, os valores em negrito da Tabela 4.2 que foram utilizados como valores base, também foram utilizados para o cálculo da deformação para cada variação de cada elemento. Apenas o valor base daquelas tabelas foi tomado de forma aleatória dentro daqueles testados para cada elemento.

#### 4.2.3 – Avaliação preliminar da sensibilidade de cada variável

O processo de escolha das variáveis foi estabelecido através de uma adaptação ao critério estatístico. Com o uso desta adaptação dividiram-se as variáveis em menos ou mais sensíveis. O critério estatístico utilizado foi uma adaptação do nível de significância do teste.

Para o uso desta análise, de acordo com SPIEGEL (1974) deve-se escolher a

probabilidade antes da extração de qualquer amostra, para que os resultados não influenciem a escolha. Usualmente usa-se um nível de significância de 0,05. Escolher um nível de significância de 0,05, significa que a cada 100 probabilidades existe uma chance de 5 probabilidades da hipótese ser rejeitada. De modo geral, significa que a 95% de confiança de que a decisão foi correta.

Considerando as variáveis de referência uma a uma, a partir desta análise foram divididas em três grupos. As variáveis menos sensíveis foram aquelas que obtiveram valores de variação da razão inferiores a 5%, as pouco sensíveis aquelas com razão entre 5 e 10% e as muito sensíveis aquelas que obtiveram variação da razão acima de 10%, conforme Tabela 4.6. Desta forma, calculou-se a Tabela 4.6, onde se tem as razões das variáveis de acordo com os resultados obtidos no programa FERROVIA 1.0, considerando-se os valores da Tabela 4.2.

Construiu-se a Tabela 4.6 através do seguinte procedimento:

a – Para uma mesma infra-estrutura variou-se cada elemento, um de cada vez. Exemplo de uma variação de elemento apresentar-se-á na Tabela 4.3, onde se variou o valor do Poisson do Lastro mantendo-se os demais valores;

b – Encontrou-se a primeira razão pela variação do elemento;

c – A segunda razão foi encontrada pelo resultado da deformação para o primeiro valor do elemento e para o segundo valor calculado pelo programa FERROVIA 1.0. Da mesma forma na Tabela 4.4 e na Figura 4.1 são apresentados respectivamente os valores de deformação de acordo com a variação do Poisson do Lastro e o Gráfico de deformação de acordo com a variação do Poisson do Lastro;

d – A razão resultante foi a divisão da razão da variável pela razão da deformação para cada elemento da via férrea sendo apresentadas na Tabela 4.6, juntamente com a apresentação das variáveis não sensíveis, pouco sensíveis e muito sensíveis.

Tabela 4.3: Folha de rosto para o calculo das deformações com a variação do Poisson do Lastro

Variação dos Valores do Poisson para cada Camada de Infraestrutura							
Elemento	Variações						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Bitola</b>	<b>larga</b>						
<b>K</b>	70000						
<b>Variação da Carga por eixo (T)</b>							
Carga por eixo (T)	20						
<b>Trilho</b>	TR 57						
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2730,5						
Área da Secção Transversal (cm <sup>2</sup> )	72,58						
Largura do Patim (cm)	13,97						
<b>Dormente</b>							
Comprimento (m)	2,65						
Largura (cm)	22						
Altura (cm)	17						
Espaçamento (cm)	60						
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000						
<b>Camadas</b>							
<b>Plataforma</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	400						
Poisson	0,49	0,45	0,4				
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	500						
<b>Sublastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1000						
Poisson	0,35	0,3	0,25				
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	15						
<b>Lastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	2000						
Poisson	0,35	0,3	0,25				
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	30						

Tabela 4.4: Valores de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 de acordo com a variação do Poisson do Lastro

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Poisson Plataforma	0,49 0,35 0,35	0,45 0,35 0,35	0,4 0,35 0,35
Pontos nodais	0,49	0,45	0,4
146	0,01015092	0,01036511	0,01046264
148	0,01065648	0,01083492	0,01087964
150	0,002893097	0,002994601	0,002959552
152	-0,0249193	-0,02495101	-0,02509844
154	-0,07871997	-0,07891775	-0,079191911
156	-0,1288259	-0,1291784	-0,1295641
158	-0,1215488	-0,1220021	-0,1224605
160	-0,124463	-0,1249327	-0,1253931
162	-0,1359708	-0,1363735	-0,136773
164	-0,08292893	-0,08321244	-0,08352727
166	-0,008370901	-0,008517679	-0,008750352

Na Tabela 4.4, os pontos nodais correspondem aos onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0. Na linha referente aos coeficientes de Poisson, o primeiro valor corresponde a plataforma, o segundo ao sublastro e o terceiro ao lastro. A linha que se repete apresenta os valores de Poisson apenas para a plataforma.

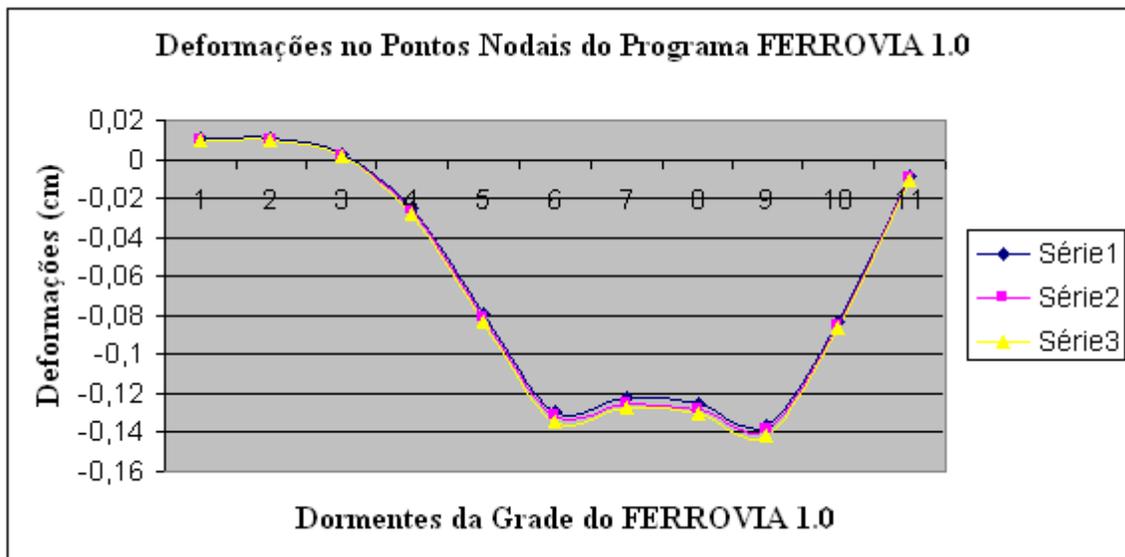


Figura 4.1: Gráfico de deformação da grade de onze dormentes do programa FERROVIA 1.0 de

acordo com a variação do coeficiente de Poisson do Lastro.

Na Figura 4.1 as séries 1, 2 e 3 correspondem respectivamente as séries apresentadas na Tabela 4.4

A Tabela 4.5 apresenta de forma detalhada como foi construída a Tabela 4.6 e como se encontrou os valores para a razão entre os valores para um mesmo elemento e a razão para as deformações. O Valor base da comparação e o valor de comparação foram assumidos dentro daqueles valores apresentados na Tabela 4.2, assim como, assumiu-se o dormente d1 da grade como dormente de comparação.

Desta forma têm-se como variáveis mais sensíveis: Inércia do Trilho, Espaçamento dos Dormentes, K da Fixação, Módulo de Elasticidade do Lastro, Módulo de Elasticidade da Plataforma, Carga e Altura do Dormente.

Como variáveis pouco sensíveis têm-se: Módulo de Elasticidade dos Dormentes, Poisson do Lastro, Poisson da Plataforma, Módulo de Elasticidade do Sublastro. E como variáveis não sensíveis têm-se: Poisson do Sublastro, Coesão do Lastro, Sublastro e Plataforma, Ângulos de Atrito do Lastro, Sublastro e Plataforma, Largura do Patim do Trilho e Área do Patim do Trilho.

Para a determinação das variáveis menos e mais sensíveis, considerou-se um nível de significância de 5%, ou seja, um nível de confiança de 95%. Desta forma, compararam-se as razões das variáveis em análise contra a razão de variação da deformação, ou seja, quando se tinha o valor da inércia de  $2184,40 \text{ cm}^4$ , a mesma foi comparada com o valor de inércia do trilho  $2457,45 \text{ cm}^4$ . Desta análise saiu a primeira razão, que foi comparada à razão das deformações para os trilhos de mesma inércia. Uma variação de 12,5 % na inércia no trilho resultou numa variação de quase 10% na deformação, de modo que a variável foi considerada muito sensível. Quanto mais próximo do valor unitário a razão resultante, ou abaixo dele, maior a sensibilidade.

Tabela 4.5: Construção da Tabela de Controle de Sensibilidade

Construção da Tabela de Sensibilidade						
Variável	Valor Base (Vb)	Valor de Comparação (Vc)	Vc/Vb	Deformações no dormente d1		
				Em Vb	Em Vc	Def.Vc/Def.Vb
Inércia do Trilho (cm <sup>4</sup> )	2184,40	2457,45	1,125	0,008323010	0,009134151	1,097
Espaçamento (cm)	50,00	55,00	1,100	0,018348860	0,013658798	0,744
E do dormente (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000,00	154000,00	1,638	0,009896578	0,008721457	0,881
K da fixação (kgf/cm <sup>2</sup> )	50000,00	90000,00	1,800	0,012222367	0,008715002	0,713
Poisson Lastro	0,25	0,35	1,400	0,009843040	0,010365110	1,053
Poisson Sublastro	0,25	0,35	1,400	0,010469300	0,010365110	0,990
Poisson Plataforma	0,40	0,49	1,225	0,010462640	0,010150920	0,970
E do Lastro (kgf/cm <sup>2</sup> )	1200,00	1500,00	1,250	0,005852514	0,007200256	1,230
E do Sublastro (kgf/cm <sup>2</sup> )	700,00	1200,00	1,714	0,009305627	0,010251200	1,102
E da Plataforma (kgf/cm <sup>2</sup> )	400,00	700,00	1,750	0,009896578	0,003272004	0,331
Coesão do Lastro (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,01	0,30	30,000	0,010365110	0,010365110	1,000
Coesão do Sublastro (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,01	0,30	30,000	0,010365110	0,010365110	1,000
Coesão da Plataforma (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,01	0,30	30,000	0,010365110	0,010365110	1,000
Ângulo de Atrito Lastro (°)	25,00	45,00	1,800	0,010365110	0,010365110	1,000
Ângulo de Atrito Sublastro (°)	25,00	45,00	1,800	0,010365110	0,010365110	1,000
Ângulo de Atrito Plataforma (°)	25,00	45,00	1,800	0,010365110	0,010365110	1,000
Largura do Patim (cm)	13,50	14,50	1,074	0,009896578	0,009896578	1,000
Área do Perfil (cm <sup>2</sup> )	58,06	87,09	1,500	0,009896578	0,009896578	1,000
Carga (T)	10,00	40,00	4,000	0,00494761	0,009896578	2,000
Altura do Dormente (cm)	16,00	18,00	1,125	0,010365110	0,009468560	0,914

Tabela 4.6: Tabela de controle de sensibilidade das variáveis.

Tabela Controle de Sensibilidade						
Considerando o primeiro dormente da grade de 11				Identificação		
Variável	Razão Variável	Razão Deformação	Razão Resultante	Não Sensível < 5%	Pouco Sensível 5 A 10 %	Muito Sensível > 10%
Inércia do Trilho	1,125	1,097	1,026			SIM
Espaçamento	1,100	1,340	0,821			SIM
E do dormente	1,640	1,130	1,451		SIM	
K da fixação	1,800	1,400	1,286			SIM
Poisson Lastro	1,400	1,050	1,333		SIM	
Poisson Sublastro	1,400	1,010	1,386	SIM		
Poisson Plataforma	1,220	1,030	1,184		SIM	
E do Lastro	1,250	1,230	1,016			SIM
E do Sublastro	1,710	1,100	1,555		SIM	
E da Plataforma	1,750	3,020	0,579			SIM
Coesão do Lastro	30,000	1,000	30,000	SIM		
Coesão do Sublastro	30,000	1,000	30,000	SIM		
Coesão da Plataforma	30,000	1,000	30,000	SIM		
Ângulo de Atrito Lastro	1,800	1,000	1,800	SIM		
Ângulo de Atrito Sublastro	1,800	1,000	1,800	SIM		
Ângulo de Atrito Plataforma	1,800	1,000	1,800	SIM		
Largura do Patim	1,075	1,000	1,075	SIM		
Área do Perfil	1,500	1,000	1,500	SIM		
Carga	4,000	4,000	1,000			SIM
Altura do Dormente	1,560	1,380	1,130			SIM

Importante notar, que numericamente um número maior de variáveis poderia ter sido considerado como sensível, porém extrapola valores clássicos de suas características, ou poder-se-ia incorrer em situações irreais, gerando uma falsa sensibilidade. Um caso típico é o do coeficiente de Poisson das camadas de infra-estrutura. Utilizando os valores disponíveis na literatura, percebe-se que, no caso do lastro, tal valor poderia ter ultrapassado os 5% de variação, porém seriam baseados em valores de Poisson irreais para este tipo de camada.

#### 4.2.4 – As variáveis menos sensíveis

Através da tabela 4.6, pode-se considerar como variáveis não sensíveis ou pouco sensíveis as seguintes: Poisson, coesão, ângulo de atrito, área do perfil do trilho, largura do patim do trilho, módulo de elasticidade do sub-lastro.

##### a) Estudo de sensibilidade do módulo de elasticidade dos dormentes

O valor de módulo de elasticidade do dormente, conforme Figura 4.2 atingiu um nível de correlação maior que 10%, porém, para isso, foram usados módulos de elasticidade de valores extremos para madeiras utilizadas como dormentes. Como é usual, tanto pelo custo como pela questão ambiental, o uso de dormentes de eucalipto, desconsiderar-se-á a análise do módulo de elasticidade da madeira.

Tabela 4.7 – Variação dos Valores do Módulo de Elasticidade dos dormentes para a mesma infraestrutura

Variação dos Valores de E dos Dormentes de Madeira para a Mesma Infraestrutura			
Elemento	Variações		
Comprimento (m)	2,65	-	-
Largura (cm)	22	-	-
Altura (cm)	17	-	-
Espaçamento (cm)	60	-	-
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000	105000	154000

A tabela 4.7 apresenta os valores de módulo de elasticidade dos dormentes de acordo com o tipo de madeira. Para o estudo de sensibilidade inicial deste trabalho utilizaram-se módulos de elasticidade de dormentes de: Peroba Rosa, Pinho do Paraná e Ipê Tabaco ou Amarelo.

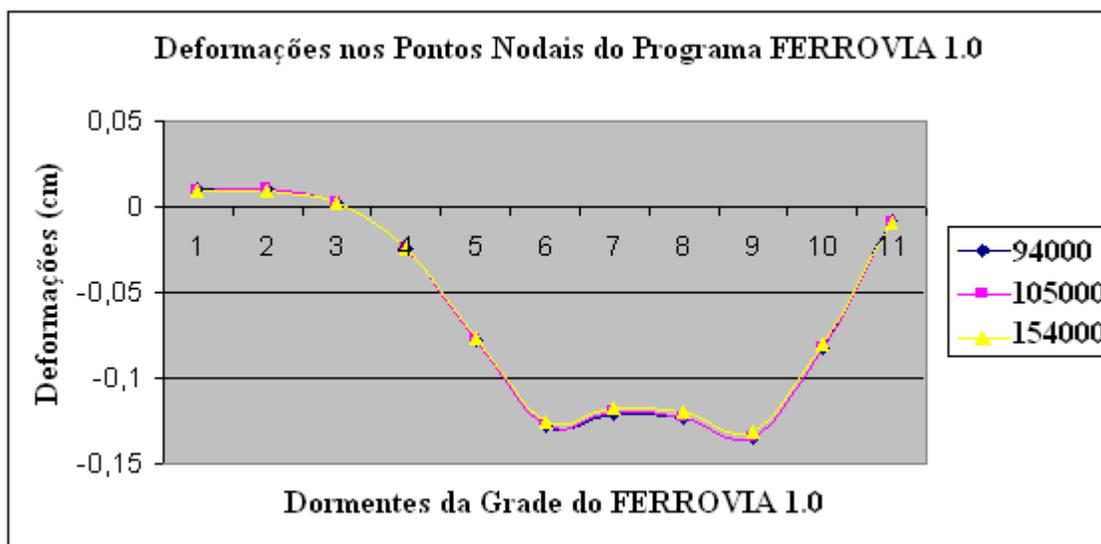


Figura 4.2: Gráfico de deformação para a variação do Módulo de Elasticidade dos Dormentes

b) Estudo de sensibilidade para o Coeficiente de Poisson do Lastro, Sublastro e Plataforma

Um exemplo deste estudo foi apresentado na Figura 4.1, onde o coeficiente de Poisson para o lastro apresentou-se com pouca sensibilidade. Nas Figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se as variações para o Coeficiente de Poisson para o Sublastro e para o Coeficiente de Poisson da Plataforma. Verifica-se que a variação foi menor do que a encontrada para o Poisson do lastro que se pode considerar esperado já que, com o aumento da profundidade, o efeito do Poisson diminui. A tabela 4.8 apresenta os valores de Poisson para cada camada estudada, de acordo com MEDINA (1997), apresentados na seção 2.1.1 deste trabalho.

Tabela 4.8 – Variação dos Valores do Coeficiente de Poisson para a mesma infraestrutura para o Lastro, Sublastro e Plataforma

Variação dos Valores de Poisson para a Mesma Infraestrutura			
Elemento	Variações		
Poisson - <b>Plataforma</b>	0,49	0,45	0,40
Poisson - <b>Sublastro</b>	0,35	0,30	0,25
Poisson - <b>Lastro</b>	0,35	0,30	0,25

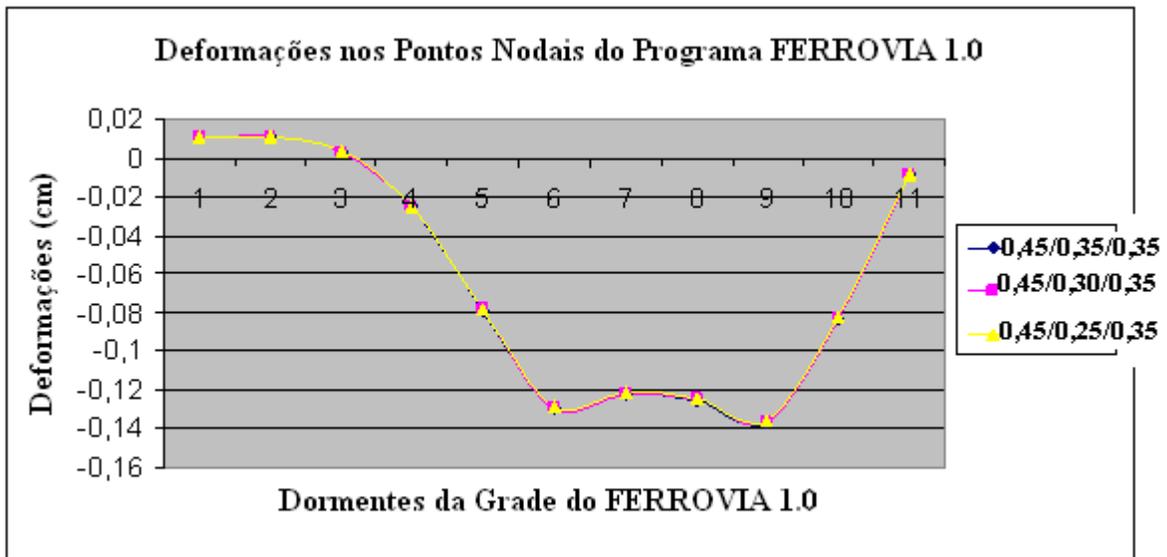


Figura 4.3: Gráfico de deformação para a variação dos Coeficientes de Poisson do Sublastro

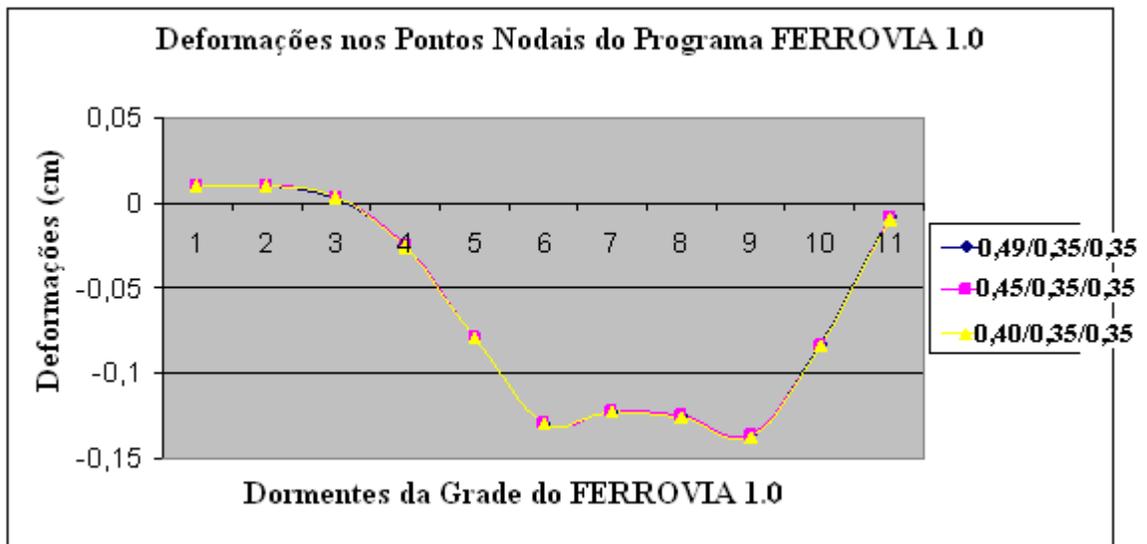


Figura 4.4: Gráfico de deformação para a variação do Coeficiente de Poisson da Plataforma.

c) Estudo de sensibilidade para os ângulos de atrito para o lastro, sublastro e plataforma.

Variando-se os ângulos de atrito para o lastro, sublastro e plataforma, respectivamente, não houve alteração na deformação. Na figura 4.5, o quadro ao lado do gráfico representa os valores de ângulo de atrito respectivamente para o lastro, o sublastro e a plataforma, apresentados

na tabela 4.9. Por ser uma análise paramétrica tomaram-se valores extremos, diferentes daqueles compatíveis com as camadas em questão para análise de comportamento. As linhas representativas das deformações estão sobrepostas, portanto observar-se-iam 5 curvas, porém, por não haver deformação apenas uma é visível.

Tabela 4.9 – Variação dos Valores do Ângulo de Atrito para a mesma infraestrutura

Variação dos Valores do Ângulo de Atrito para a Mesma Infraestrutura					
Elemento	Variações				
	1	2	3	4	5
<b>Variação do Ângulo de Atrito</b>					
Plataforma	0,01	25	30	45	30
Sublastro	0,01	25	30	25	30
Lastro	0,01	25	40	25	30

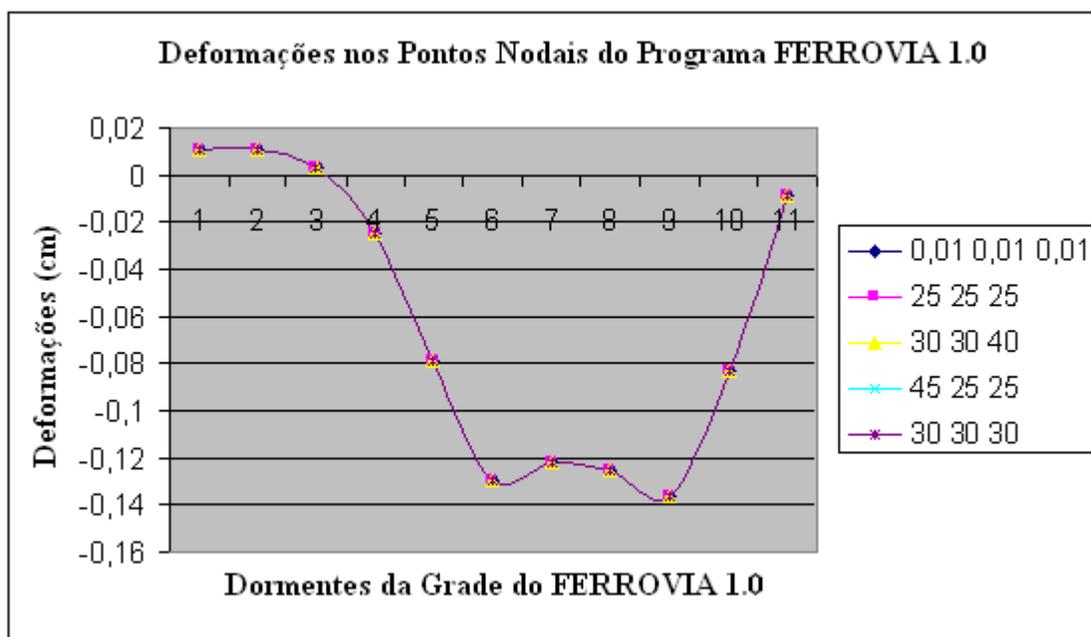


Figura 4.5: Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do ângulo de atrito das camadas de lastro, sublastro e plataforma.

As tabelas e gráficos das variáveis menos sensíveis estão apresentados no Anexo A deste trabalho.

### 4.3 – Estudo de sensibilidade das variáveis mais sensíveis

#### 4.3.1 – Apresentação das variáveis mais sensíveis

As variáveis de maior sensibilidade são: Inércia do Trilho, Módulo de Elasticidade da Plataforma, Módulo de Elasticidade do Lastro, Espaçamento dos Dormentes, Coeficiente K da fixação, Inércia dos dormentes e as Cargas aplicadas. Introduziu-se o módulo de elasticidade do sublastro, pois também, mesmo estando no intervalo de pouca sensibilidade, é um parâmetro importante no dimensionamento da estrutura ferroviária e que pode sofrer grande variação em campo.

##### a) Estudo de sensibilidade da inércia dos trilhos

Para a variação da inércia dos trilhos o gráfico de deformação apresentou-se de grande sensibilidade. Porém, comparando-se com os demais elementos, a variação é pequena, tendência que pode ser observado na figura 4.6. Esta tendência também se apresenta nos estudos de TARABJI e THOMPSON (1976) apresentado na seção 2.3.1 deste trabalho.

Tabela 4.10 – Variação da Inércia do Trilho para a mesma infraestrutura

Variação da Inércia do Trilho para a Mesma Infraestrutura					
Elemento	Variações				
<b>Trilho</b>					
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2184,40	2457,45	2730,50	3003,55	3276,60

A tabela 4.10 apresenta os valores de inércia dos trilhos utilizados na análise preliminar de sensibilidade e na construção do gráfico da figura 4.6. Variaram-se tais valores por uma porcentagem para menos e para mais do valor da inércia do trilho TR57.

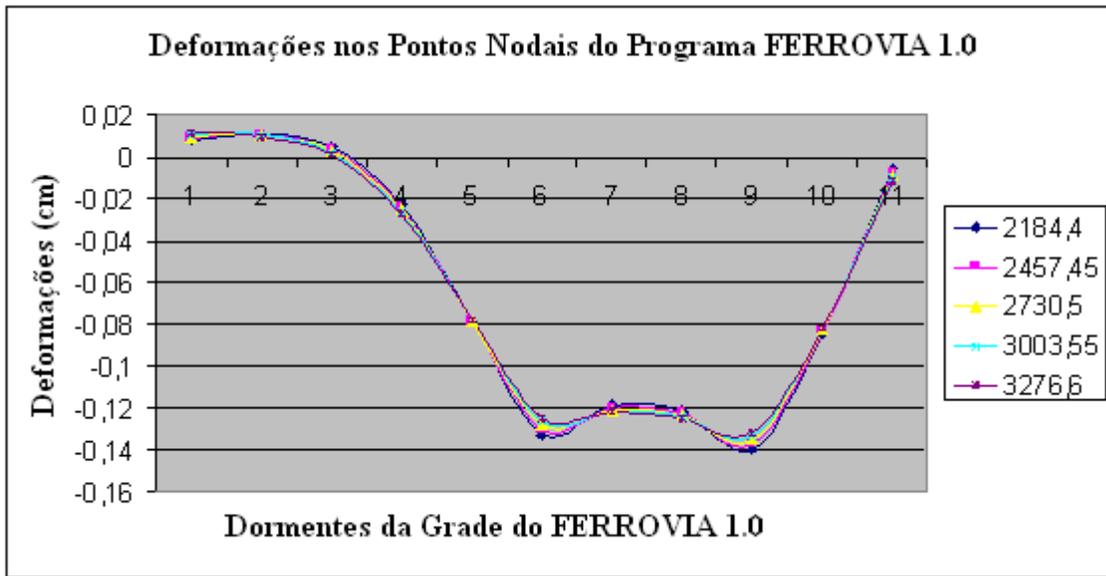


Figura 4.6: Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do ângulo de atrito das camadas de lastro, sublastro e plataforma.

b) Estudo de sensibilidade para o módulo de elasticidade do sublastro.

Apresenta-se na figura 4.7 a variação do módulo de elasticidade do sublastro com o gráfico de deformação. A variação é pequena, porém, como o intervalo de valores é maior considerando-se os tipos de materiais de sublastro, e a variabilidade de campo também tem valores importantes, este módulo será mais útil em uma análise de sensibilidade.

Tabela 4.11 – Variação do módulo de elasticidade do sublastro para a mesma infraestrutura

Variação do módulo de elasticidade do sublastro para a Mesma Infraestrutura				
Elemento	Variações			
<b>Sublastro</b>				
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	700	800	1000	1200

A tabela 4.11 apresenta os valores utilizados para a variação do módulo de elasticidade do sublastro. Estes valores estão embasados nas informações extraídas de BARROS (1965).

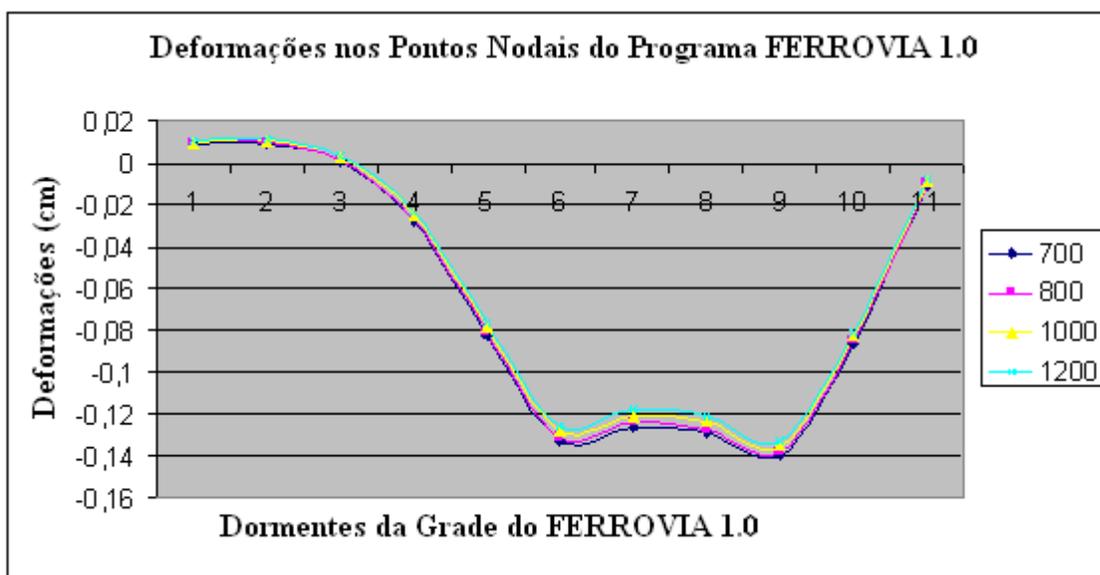


Figura 4.7: Gráfico de deformação para a variação do Módulo de Elasticidade do Sublastro

c) Estudo de sensibilidade para o espaçamento dos dormentes

Para o espaçamento dos dormentes, percebe-se na Figura 4.8 que o aumento do espaçamento conduz a um aumento de deformação. Tal fato pode ser observado em todas as variações desde o espaçamento para 50 cm até o espaçamento para 70 cm, variando de 5 em 5 cm o espaçamento no intervalo entre os dois valores extremos. Desta forma, verifica-se a tendência também observada por TARABJI e THOMPSON (1976) e apresentada na Figura 2.2 na seção 2.3.1 deste trabalho, em que se verifica um aumento das deformações.

Tabela 4.12 – Variação dos Valores do espaçamento dos dormentes para a mesma infraestrutura

<b>Varição dos Valores do Espaçamento dos Dormentes para a Mesma Infraestrutura</b>					
<b>Elemento</b>	<b>Variações</b>				
<b>Dormente</b>					
Espaçamento (cm)	50	55	60	65	70

A tabela 4.12 apresenta os valores de espaçamento dos dormentes utilizados NB – 476 (1979) apresentada no capítulo 2 deste trabalho. Consideraram-se mais dois valores de espaçamento para análise paramétrica: 50 e 55 cm.

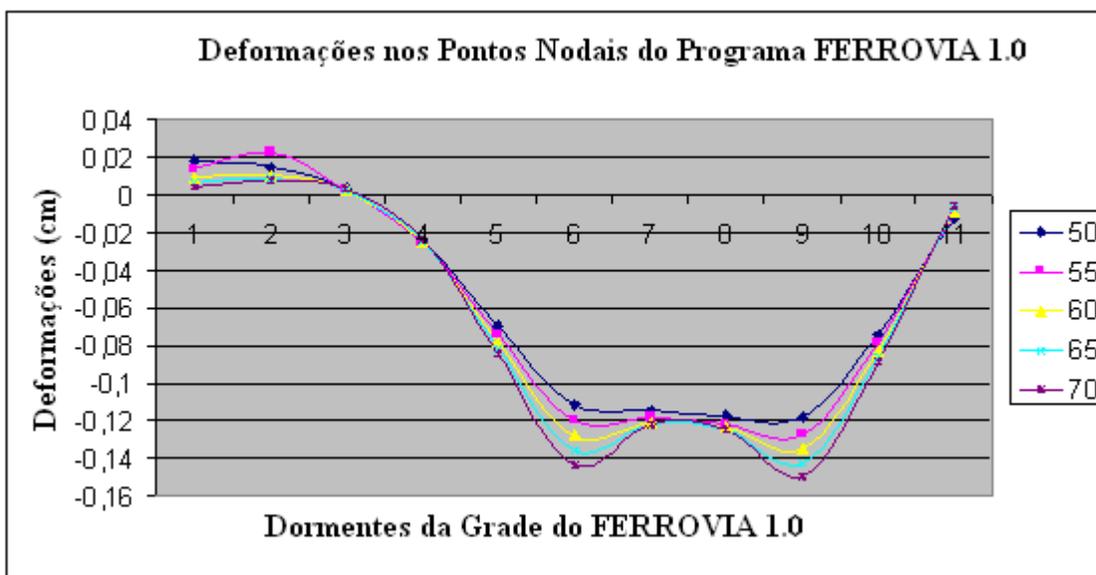


Figura 4.8: Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do espaçamento entre os dormentes.

d) Estudo de sensibilidade para as cargas

Quanto à variável carga já analisada anteriormente neste trabalho, que como sua variação foi perfeitamente linear não caberiam maiores pesquisas sobre ela. Apresenta-se na Figura 4.9 o gráfico de deformação com a variação das cargas. Na Figura 4.10 nota-se a variação linear da deformação em relação à variação das cargas, para um dos dormentes da grade do FERROVIA 1.0. No caso das cargas os resultados da análise paramétrica contrastam com os obtidos por TARABJI e THOMPSON (1976) e apresentados na seção 2.3.1 deste trabalho. No estudo realizado pelos referidos autores a variação da deformação não foi linear com a variação das cargas. Diferenças que podem ser oriundas da estrutura dos dois modelos de cálculo das deformações. A tabela 4.13 apresenta os valores de carga por eixo utilizadas na análise.

Tabela 4.13 – Variação dos valores da carga para a mesma infraestrutura

Variação dos Valores da Carga por Eixo para a Mesma Infraestrutura				
Elemento	Variações			
<b>Variação da Carga por eixo (T)</b>				
Carga por eixo (T)	10	20	30	40

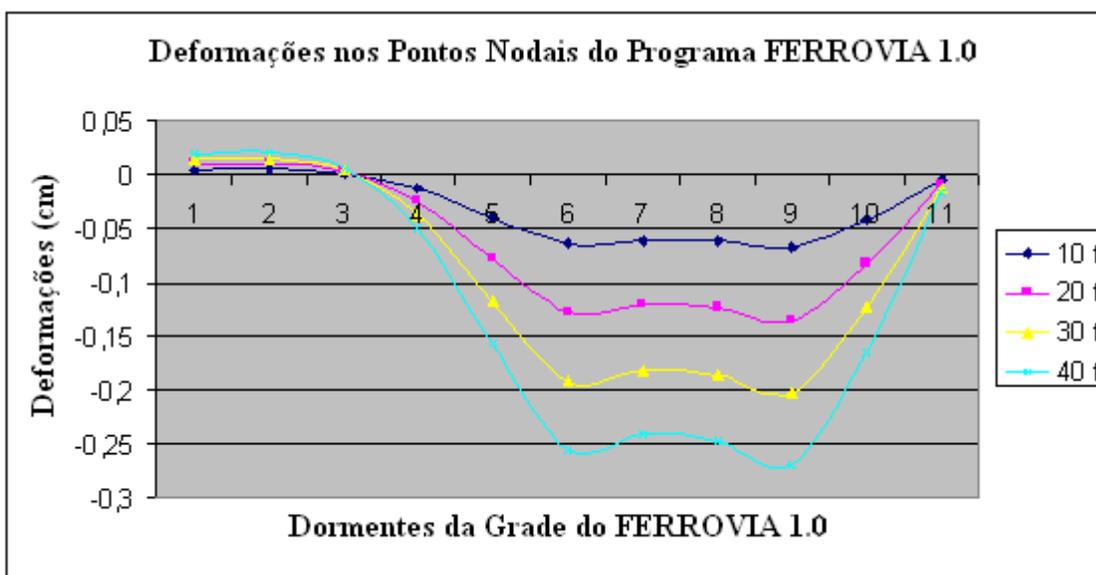


Figura 4.9: Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores da carga por eixo.

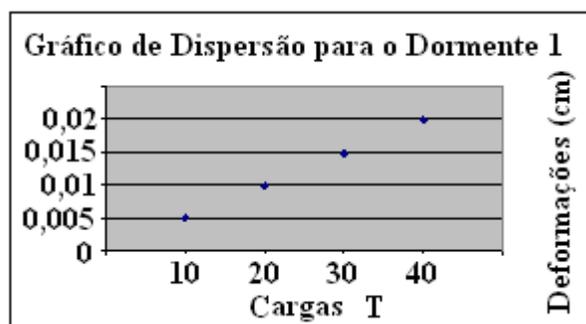


Figura 4.10: Gráfico de dispersão para as deformações com a variação das cargas por eixo.

e) Estudo de sensibilidade para a altura dos dormentes

O valor da altura do dormente obteve um grau de variação considerado alto. Para os cálculos posteriores desta dissertação esse valor foi tomado pela sua inércia transversal, considerando assim, a presença do valor da base incluída nos cálculos. Tal pesquisa é importante pois, como visto na seção 2.2.3, o valor do fator de forma em relação ao recalque da via é aspecto que merece consideração. A variação da deformação foi pequena, porém, como a variação da altura dos dormentes também é pequena, em termos de razão a variação foi significativa, como apresentado na Figura 4.11. Os valores de 0,01 e 25 cm, apresentados na tabela 4.14, foram utilizados para balizar os dados da análise paramétrica.

Tabela 4.14 – Variação dos valores da altura do dormente para a mesma infraestrutura

Variação dos Valores da Altura do Dormente para a Mesma Infraestrutura					
Elemento	Variações				
Altura do Dormente	0,01	16	17	18	25

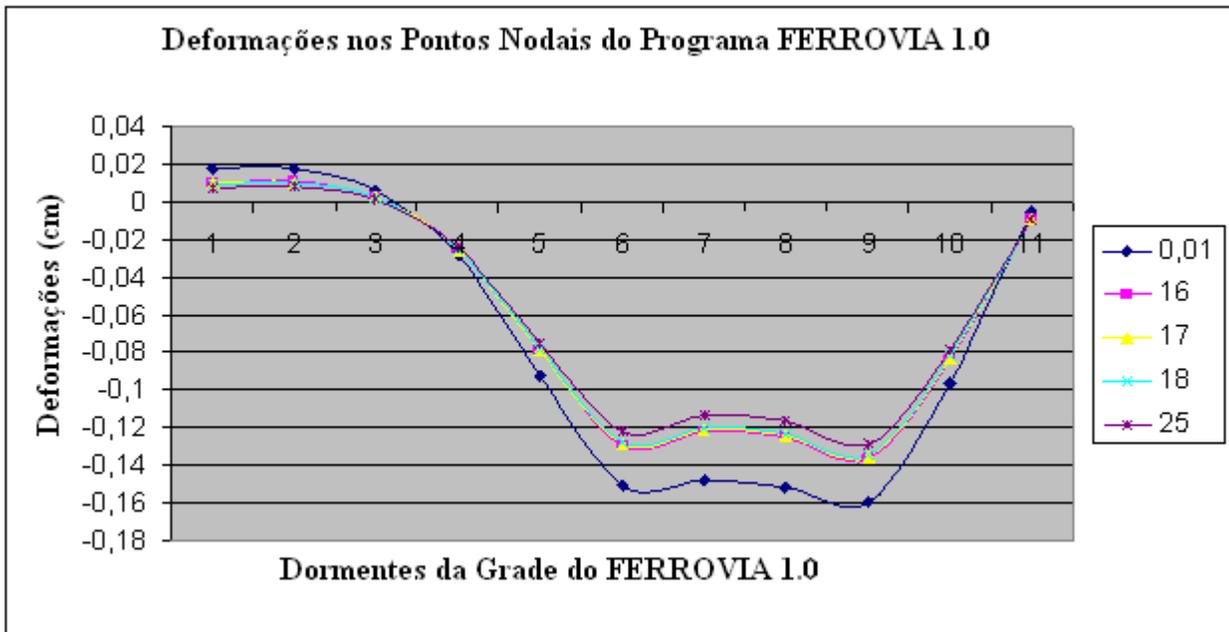


Figura 4.11: Variação da deformação com o valor da altura dos dormentes.

f) Estudo de sensibilidade para o módulo de elasticidade da plataforma

Variável com grande sensibilidade foi o valor do módulo de elasticidade da plataforma. Percebe-se na Figura 4.12 a variação não linear entre a deformação e a variação do módulo de elasticidade da plataforma, ou seja, um aumento de duas vezes no valor do módulo de elasticidade não corresponde a um aumento igual na deformação.

Comparando a variação da deformação na Figura 4.12 com o gráfico elaborado por TARABJI e THOMPSON a variação da rigidez da plataforma gerou uma variação na deformação da via. No gráfico da Figura 2.6, apresentado na seção 2.3.1, os mesmos autores consideraram apenas três tipos diferentes de lastro e não especificaram os valores dos módulos de elasticidade

dos materiais da plataforma. Porém, naquela análise uma maior rigidez da plataforma resultou em uma menor deformação vertical. No estudo realizado com o programa FERROVIA 1.0, houve uma inconsistência dos resultados para o valor de módulo de elasticidade da plataforma de 200 kgf/cm<sup>2</sup>, onde os valores de deformação da plataforma foram menores que aqueles para módulo de 700 kgf/cm<sup>2</sup>. Apresenta-se na tabela 4.15 os valores de módulo de elasticidade da plataforma embasados na referência de BARROS (1965).

Tabela 4.15 – Variação do módulo de elasticidade da plataforma para a mesma infraestrutura

Variação do Módulo de Elasticidade da Plataforma para a Mesma Infraestrutura				
Elemento	Variações			
<b>Plataforma</b>				
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	100	200	400	700

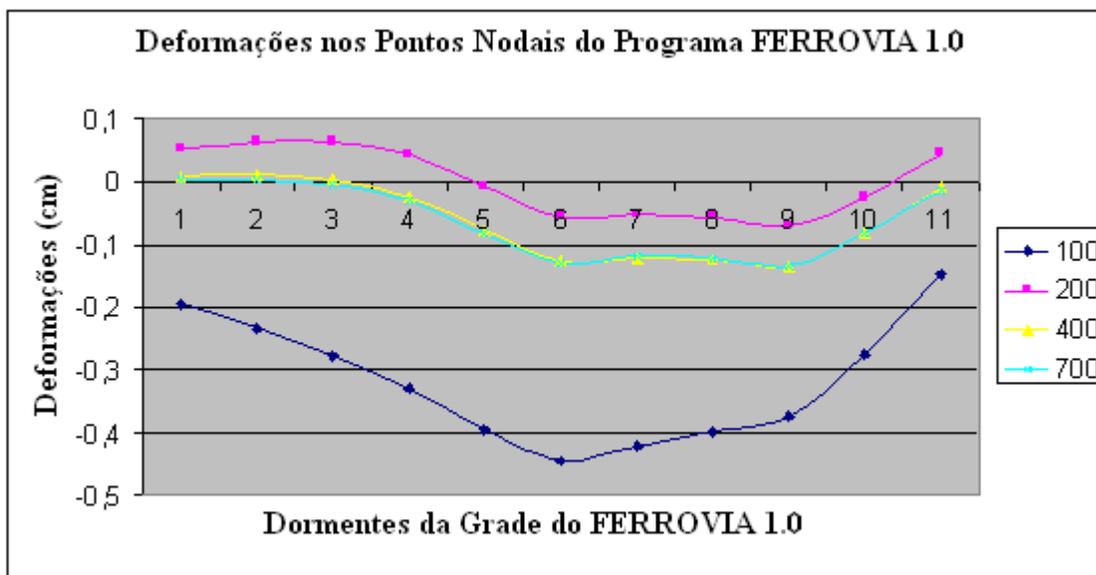


Figura 4.12: Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores do módulo de elasticidade da plataforma.

g) Estudo de sensibilidade do coeficiente “K” da fixação

Finalizando as variáveis de maior sensibilidade, apresenta-se na Figura 4.13, o gráfico de deformação com a variação do coeficiente de fixação K. O coeficiente K varia conforme o tipo de fixação. Representa um coeficiente de mola da fixação e tem a sua unidade em kgf/cm. Variando-

se o K, para dormentes de madeira de 70000 kgf/cm, verificou-se que a variação da deformação é bastante significativa.

Tabela 4.16 – Variação dos valores do K da fixação para a mesma infraestrutura

Variação dos K dos Dormentes de Madeira da Via para uma Mesma Infraestrutura			
Elemento	Variações		
Variação do Valor de K para Dormentes			K (kN/m)
Dormente de Madeira	50000	70000	90000

A tabela 4.16 apresenta os três valores do coeficiente K da fixação encontrados a partir de uma variação percentual para menos e para mais do valor de referência 70000 kgf/cm.

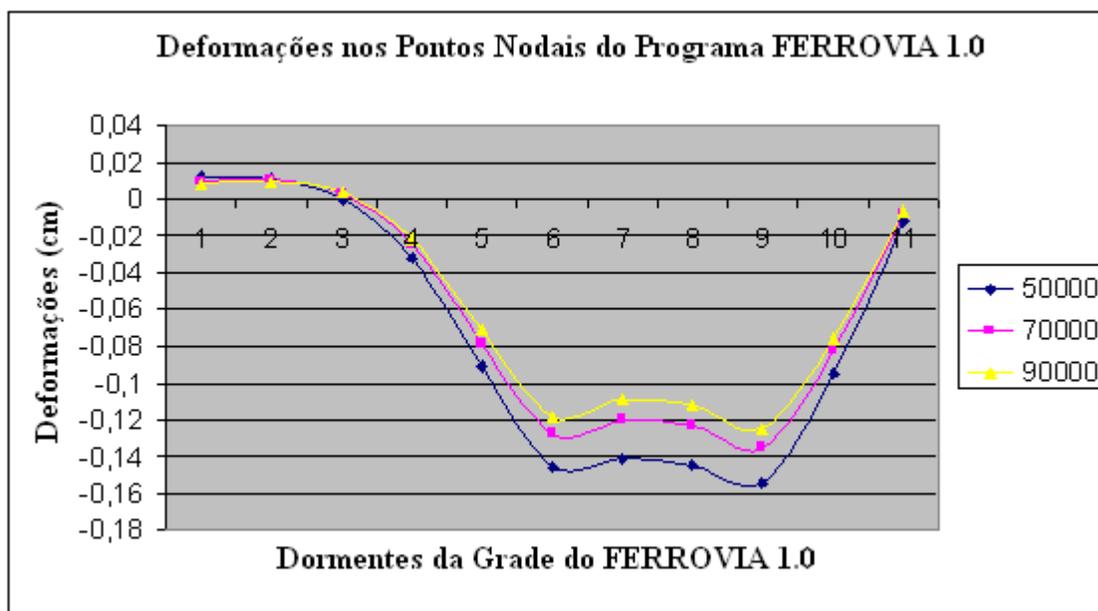


Figura 4.13: Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores de K da fixação.

#### h) Estudo de sensibilidade do módulo de elasticidade do lastro

O módulo de elasticidade do lastro apresentou variação importante na análise realizada com o programa FERROVIA 1.0. Comparando os resultados com os apresentados por TARABJI

e THOMPSON (1976) na seção 2.3.1 percebe-se que em ambas as análises, uma mudança de material representada pela variação do módulo de elasticidade provoca uma mudança no valor da deformação vertical. Na tabela 4.17 apresentam-se os valores de módulo utilizados para essa análise. Observa-se na figura 4.14 a variação da deformação com a alteração do módulo do lastro seguindo a tendência que lastros mais rígidos provocam uma deformação menor na via. Em comparação com as modificações provocadas pela variação do módulo de elasticidade da plataforma a amplitude dessas, no caso do módulo do lastro, é menor.

Tabela 4.17 – Variação dos valores do módulo de elasticidade do lastro

Variação do Módulo de elasticidade do lastro para uma Mesma infraestrutura				
Elemento	Variações			
<b>Lastro</b>				
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1200	1500	2000	2700

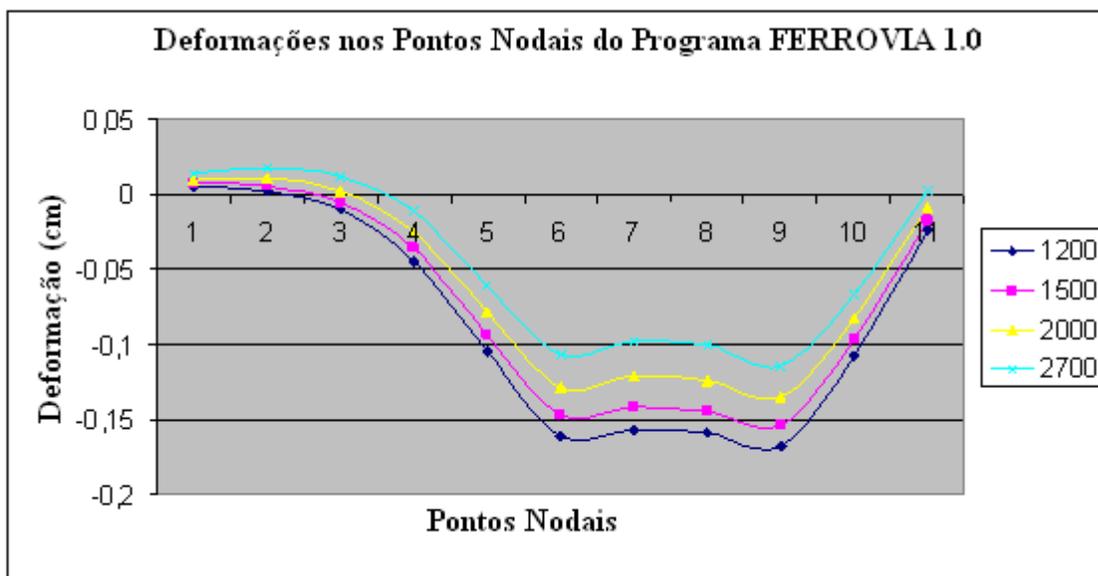


Figura 4.14: Gráfico de deformação para os onze dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 variando-se os valores de módulo de elasticidade do lastro.

As outras Tabelas e Gráficos estão apresentadas em detalhe no Anexo B deste trabalho.

### 4.3.2 – Estudo preliminar para o cálculo das correlações entre as variáveis mais sensíveis e a deformação

A partir do conhecimento das variáveis mais sensíveis, obteve-se o número de elementos que receberam atenção especial neste trabalho. Para estas variáveis, seguindo a premissa utilizada na primeira parte do estudo das variáveis, foram escolhidos três valores referenciados em bibliografias e com maior representatividade em relação às condições reais de uma seção de uma superestrutura e infra-estrutura ferroviária.

Desta forma, formou-se um novo conjunto de estudo, composto apenas dos elementos com maior sensibilidade com três valores para cada um. A partir daí passou-se a elaborar as combinações de forma direta, de modo que as outras variáveis, aquelas que foram consideradas como não sensíveis ou de sensibilidade direta, fossem fixadas em um único valor padrão também referenciado na bibliografia e escolhendo aqueles de maior representatividade prática.

A Tabela 4.18, base para a formação das combinações, é apresentada a seguir. Vale lembrar que os itens que não se demonstraram de grande sensibilidade estão considerados apenas por um único valor, valor este mais representativo em projetos reais de ferrovias. Para facilitar o entendimento, as variáveis pouco sensíveis estão procedidas por um asterisco, as de grande sensibilidade, com dois. As outras não apresentaram sensibilidade, não possuem nenhum tipo de marcação.

(\*) – Pouco sensíveis;

(\*\*) – Muito sensíveis.

A partir da elaboração da Tabela 4.18, iniciou-se o processo de combinação das variáveis. O primeiro ponto importante a considerar em relação ao lançamento das cargas são os pontos nodais da malha do programa FERROVIA 1.0 em relação ao espaçamento dos dormentes e em relação aos pontos de aplicação das cargas. No estudo em questão, considerou-se um truque com distância entre eixos de 1,50 m. No capítulo 3 deste trabalho, apresentou-se a grade do programa FERROVIA 1.0 onde se pode notar que esta possui pontos nodais pré-estabelecidos.

Tabela 4.18: Valores sensíveis a serem utilizados nas combinações para cálculo de sensibilidade

<b>Quadro de Valores Sensíveis para Cálculo de Correlação</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Variações</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Bitola</b>	<b>larga</b>	-	-
<b>K (kN/m) (**)</b>			
Dormente de Madeira	56000	70000	84000
<b>Trilho</b>	TR 45	TR 57	TR 68
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> ) (**)	1610,8	2730,5	3950
Área da Secção Transversal (cm <sup>2</sup> )	56,9	72,58	86,13
Largura do Patim (cm)	13,02	13,97	15,24
<b>Dormente</b>			
Comprimento (m)	2,65	-	-
Altura (cm) (**)	16	17	-
Largura (cm) (*)	22	24	-
Inércia do Dormente (cm <sup>4</sup> )	7509	9007	9826
Espaçamento (cm) (**)	50	55	60
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000	-	-
<b>Camadas</b>			
<b>Plataforma</b>			
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> ) (**)	200	400	500
Poisson (*)	0,45	-	-
Ângulo de atrito (°)	30	-	-
coesão	0,1	-	-
Tipo de calculo	linear	-	-
Espessura (cm)	500	-	-
<b>Sublastro</b>			
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> ) (*)	800	1000	1200
Poisson	0,35	-	-
Ângulo de atrito (°)	30	-	-
coesão	0,1	-	-
Tipo de calculo	linear	-	-
Espessura (cm)	15	-	-
<b>Lastro</b>			
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> ) (**)	1500	2000	2700
Poisson (*)	0,35	-	-
Ângulo de atrito (°)	30	-	-
coesão	0,1	-	-
Tipo de calculo	linear	-	-
Espessura (cm)	30	-	-
<b>Carga por eixo (T) (**)</b>	20	-	-

Na Figura 4.15, apresenta-se a configuração dos dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 em relação aos pontos de aplicação das cargas. Para os espaçamentos de 50 cm e para 60 cm, têm-se pontos nodais exatamente no eixo dos pontos de aplicação das cargas P1, primeira roda, e P2, segunda roda do truque. Na Tabela 4.19, apresentam-se os outros pontos que compõem a solicitação para cada espaçamento em relação aos pontos nodais do programa FERROVIA 1.0.

Porém, como se observa na Figura 4.15, para o espaçamento de 55 cm esses pontos estão deslocados dos nós, não coincidindo nem com o par de pontos nodais 138/161 e nem com o par 139/162. Desta forma, teve-se de fazer a seguinte simplificação:

1) Calculou-se a distância do ponto de aplicação de P2, para o caso de espaçamento dos dormentes de 55 cm, em relação ao par de pontos nodais 138/161 e 139/162;

2) A distância do ponto P2 em relação ao par de pontos nodais 138/161 é de 12,5 cm e em relação ao par 139/162 é de 15 cm;

3) Desta forma, deve-se colocar mais carga sobre o par 138/161 e menos carga sobre o par 139/162. Como a soma das distâncias é de 27,5 cm, que representa meio espaçamento dos dormentes para o caso, significa que 55% da carga é posicionada sobre o par 138/161 e 45% sobre o par 139/162.

Tabela 4.19: Pontos de aplicação das cargas de acordo com o espaçamento dos dormentes

<b>Pontos de Aplicação das cargas</b>		
<b>Espaçamento de 50 cm</b>		
	Trilho 1	Trilho 2
Eixo 1	133	156
Eixo 2	139	162
<b>Espaçamento de 55 cm</b>		
	Trilho 1	Trilho 2
Eixo 1	133	156
Eixo aux 1	138	161
Eixo aux 2	139	162
<b>Espaçamento de 60 cm</b>		
	Trilho 1	Trilho 2
Eixo 1	133	156
Eixo 2	138	161

Tal distribuição é uma aproximação visto a limitação do programa FERROVIA 1.0 em termos de pontos nodais suficientes para um estudo paramétrico maior. Para estimar o erro desta aproximação, executou-se o seguinte experimento:

a) Considerou-se, primeiramente a aplicação das cargas sobre quatro pontos nodais: 133/156 e 139/162, calculando-se os valores de deformação;

b) Consideraram-se seis pontos de aplicação das cargas: 133/156, 138/161 e 140/163. Nos dois últimos pares, onde, no centro de ambos, está o par de pontos nodais 139/162, dividiu-se 50% da carga para o par 138/161 e 50% da carga para 140/163, obtendo-se os seguintes resultados apresentados na Tabela 4.20 e na Figura 4.16.

c) Considerou-se o valor da carga de 20 t por eixo para esta análise;

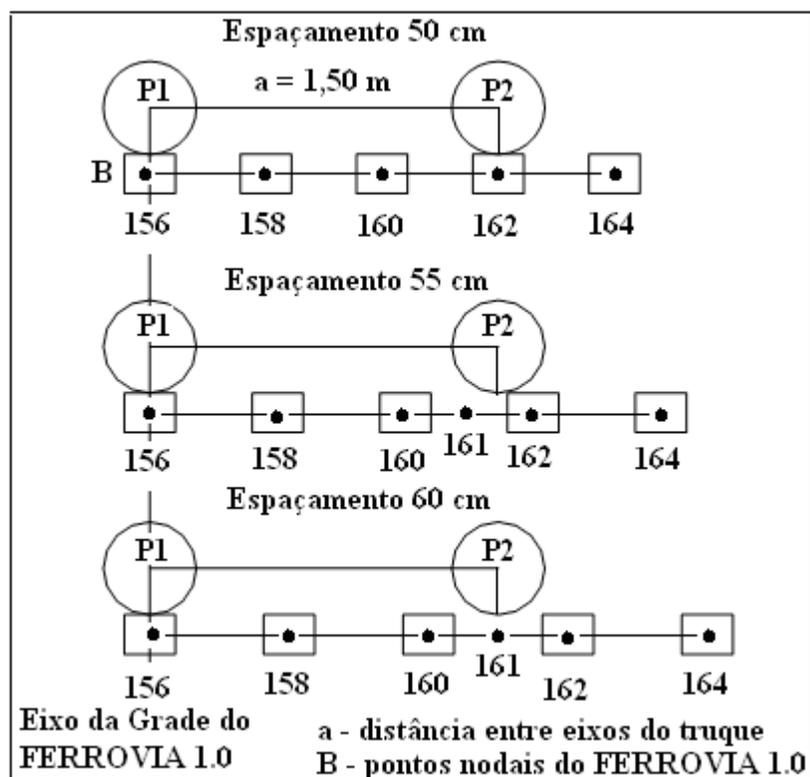


Figura 4.15: Pontos de Aplicação de Carga para Espaçamento de 50, 55 e 60 cm, em relação aos pontos nodais do programa FERROVIA 1.0.

Percebe-se pela Tabela 4.20 e pela Figura 4.16 que a aproximação tem um erro que gira entre 0 e 10%, com exceção dos pontos onde os valores de deformação foram próximos de zero.

Nestes pontos que variaram de combinação para combinação, os valores dos erros foram grandes: 79,23 % em D4 e 323,93% em D11. Para a maior parte das combinações e dos pontos nodais a aproximação é razoável. No final deste trabalho, após todos os cálculos necessários, ter-se-á uma noção se este erro prejudicará os resultados para o espaçamento entre dormentes de 55 cm.

Tabela 4.20: Valores obtidos através do experimento considerando quatro pontos de aplicação das cargas e seis pontos de aplicação das cargas.

<b>Calculo do erro para cada dormente de acordo com a aplicação direta ou indireta das cargas</b>						
<b>Dormente</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>
<b>Deformação 4 Cargas</b>	0,052311	0,047045	0,032603	-0,000243	-0,052480	-0,101001
<b>Deformação 6 Cargas</b>	0,052566	0,047040	0,032232	-0,001172	-0,054090	-0,103012
<b>Erro %</b>	0,49	-0,01	-1,15	79,23	2,98	1,95
<b>Dormente</b>	<b>D7</b>	<b>D8</b>	<b>D9</b>	<b>D10</b>	<b>D11</b>	<b>-</b>
<b>Deformação 4 Cargas</b>	-0,110536	-0,115370	-0,113163	-0,063953	0,004371	-
<b>Deformação 6 Cargas</b>	-0,111653	-0,112671	-0,103919	-0,063663	-0,003289	-
<b>Erro %</b>	1,00	-2,40	-8,90	-0,45	232,93	-

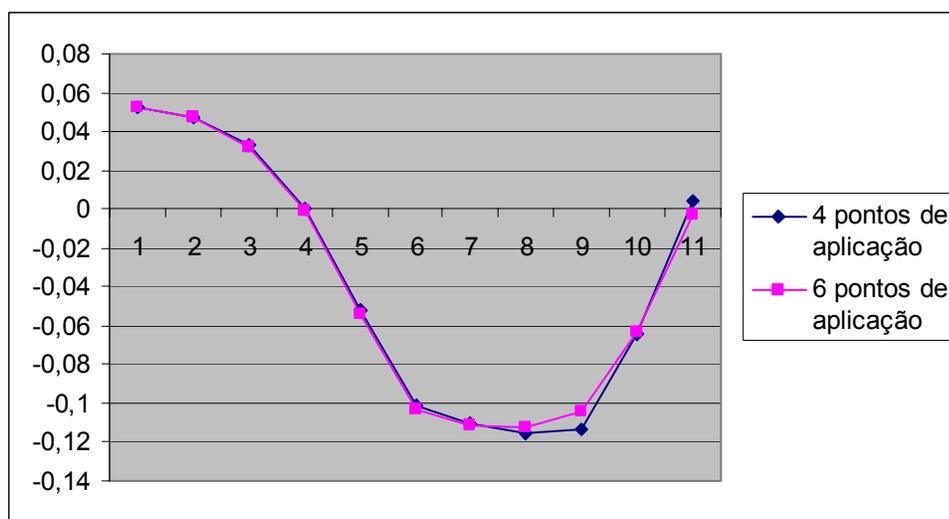


Figura 4.16 Gráfico de deformação para o experimento em que se aplicou a carga em quatro pontos nodais e depois em seis pontos nodais

Finalizada as questões quanto à aplicação das cargas e conhecendo-se os valores dos elementos mais sensíveis, parte-se, agora, para a elaboração da matriz de deformações. Na Tabela 4.21 apresentam-se as três primeiras combinações. Nelas alterou-se apenas o valor da inércia do

dormente. Desta mesma forma foram feitas todas as combinações para todas as variáveis envolvidas em número de 2187. A matriz completa esta no Anexo C deste trabalho.

#### 4.3.3 – Análise de correlação entre os elementos de maior sensibilidade e a deformação vertical da via

Embasado nos resultados apresentados na Tabela 4.21, pode-se estudar o comportamento da correlação de cada variável, ou do conjunto de variáveis com as deformações da via. O cálculo da correlação é um tipo de análise utilizada para descrever a relação de cada variável com a deformação e como cada variável em conjunto com as demais descrevem o comportamento da via frente às deformações. Analisando-se os gráficos de deformação nas seções anteriores, nota-se que na grande maioria deles os dormentes 4, 5 e 6 são os primeiros na área de deformação positiva do gráfico de deformação, considerando o eixo positivo para baixo.

A partir desta parte do trabalho esses três dormentes recebem atenção especial porque, por meio deles, pode-se criar uma sistemática através de regressão linear, possibilitando a criação de um modelo de predição das deformações e de retro-análise das deformações para as características dos componentes da via em relação ao programa FERROVIA 1.0, e, também a partir desta etapa, a região de onde as deformações estão abaixo da linha de referência do zero serão chamadas de região positiva do gráfico de deformação.

Segundo LARSON-FABER (2004) considerando uma relação entre duas variáveis, uma será a variável independente e a outra a variável dependente ou resposta. Neste trabalho a variável dependente é a deformação, tomada por referência no topo do trilho. A fim de interpretar matematicamente se existe ou não uma correlação linear entre os pares de variáveis é executada o cálculo do coeficiente de correlação. Este coeficiente, cujo nome oficial é coeficiente de correlação do produto dos momentos de Pearson, mede o grau e a direção de uma relação linear entre duas variáveis sendo simbolizado por R.

Tabela 4.21: Primeiras combinações da Matriz de Deformações calculadas através do programa

FERROVIA 1.0.

<b>Combinações para calculo das deformações e análise paramétrica - COMBINAÇÃO N° 1</b>						
<b>Espaçamento (cm)</b>	<b>Inércia do Trilho (cm4)</b>	<b>Módulo de Elasticidade do Lastro kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>Módulo de Elasticidade do Sublastro kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>Módulo de Elasticidade da Plataforma kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>K da da Fixação (kgf/cm)</b>	<b>Inércia do Dormente (cm4)</b>
50	1610,8	1500	800	200	56000	7509
<b>Pontos Nodais</b>	146	148	150	152	154	156
<b>Dormentes</b>	D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Deformações (cm)</b>	0,05559076	0,06238941	0,05757156	0,02718463	-0,0336769	-0,0916518
<b>Pontos Nodais</b>	158	160	162	164	166	-
<b>Dormentes</b>	D7	D8	D9	D10	D11	-
<b>Deformações (cm)</b>	-0,0905717	-0,0968436	-0,1080954	-0,0507896	0,03103238	-
<b>Combinações para calculo das deformações e análise paramétrica - COMBINAÇÃO N° 2</b>						
<b>Espaçamento (cm)</b>	<b>Inércia do Trilho (cm4)</b>	<b>Módulo de Elasticidade do Lastro kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>Módulo de Elasticidade do Sublastro kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>Módulo de Elasticidade da Plataforma kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>K da da Fixação (kgf/cm)</b>	<b>Inércia do Dormente (cm4)</b>
50	1610,8	1500	800	200	56000	9007
<b>Pontos Nodais</b>	146	148	150	152	154	156
<b>Dormentes</b>	D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Deformações (cm)</b>	0,05480923	0,0617036	0,05710529	0,02715559	-0,0331069	-0,090544
<b>Pontos Nodais</b>	158	160	162	164	166	-
<b>Dormentes</b>	D7	D8	D9	D10	D11	-
<b>Deformações (cm)</b>	-0,0891776	-0,0954211	-0,1069608	-0,0503507	0,03050722	-
<b>Combinações para calculo das deformações e análise paramétrica - COMBINAÇÃO N° 3</b>						
<b>Espaçamento (cm)</b>	<b>Inércia do Trilho (cm4)</b>	<b>Módulo de Elasticidade do Lastro kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>Módulo de Elasticidade do Sublastro kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>Módulo de Elasticidade da Plataforma kgf/cm<sup>2</sup></b>	<b>K da da Fixação (kgf/cm)</b>	<b>Inércia do Dormente (cm4)</b>
50	1610,8	1500	800	200	56000	9826
<b>Pontos Nodais</b>	146	148	150	152	154	156
<b>Dormentes</b>	D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Deformações (cm)</b>	0,05759304	0,06585721	0,06277572	0,03454204	-0,0239806	-0,0800386
<b>Pontos Nodais</b>	158	160	162	164	166	-
<b>Dormentes</b>	D7	D8	D9	D10	D11	-
<b>Deformações (cm)</b>	-0,0780052	-0,0844172	-0,0970078	-0,0422756	0,03622675	-

O intervalo de variação deste coeficiente varia entre -1 e 1, ou seja, valores próximos a 1 indicam forte correlação diretamente proporcional entre as variáveis, valores próximos a -1 indicam forte correlação inversamente proporcional e valores próximos de zero indicam que não há correlação linear ou que existe uma correlação linear fraca. A equação que descreve o cálculo do coeficiente de correlação produto dos momentos de Pearson é dada a seguir:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}} \quad (4.1)$$

onde n é o número de pares de dados.

A análise preliminar dos dados é importante, pois o fato de duas variáveis serem fortemente correlacionadas não explica por si que existe uma relação de causa e efeito entre elas. LARSON-FARBER(2004), sugere que o pesquisador deve considerar as seguintes possibilidades:

- a) Existe uma relação direta de causa e efeitos entre as variáveis;
- b) Existe uma relação inversa de causa e efeito entre as variáveis;
- c) Existe alguma possibilidade da relação entre as variáveis que tenha sido causada por uma terceira variável ou ainda pela combinação de outras variáveis;
- d) Existe a possibilidade da relação dessas variáveis ser uma mera coincidência;

A fim de atender a essas possibilidades, tomaram-se desde o início deste trabalho cuidados como a escolha de valores referenciados aos dados para a realidade ferroviária e escolheu-se também a deformação como variável dependente, valor clássico de análise em pesquisas e que tem forte relação com os elementos da via. Nesta etapa do trabalho foram tomados os seguintes procedimentos:

- a) Cálculo das correlações totais considerando todas as variáveis contra a deformação;
- b) Cálculo da correlação parcial entre uma única variável ou um grupo de variáveis contra a deformação, podendo-se, desta forma, verificar a existência de alguma correlação causada pela ação de uma segunda variável ou conjunto de variáveis;
- c) Cálculo das correlações tanto totais como parciais para cada dormente da grade do programa FERROVIA 1.0, de modo a verificar-se a existência de diferentes comporta -

mentos de deformação de acordo com o dormente;

SPIEGEL (1974) considera importante medir a correlação parcial das variáveis, caso em que todas as outras variáveis permanecem constantes, isto é, quando se removem os efeitos de todas as outras variáveis. MILONE (2004) lembra que, acrescentando o que já foi citado sobre as preocupações numa análise de correlação, as múltiplas variáveis independentes de uma função podem afetar a variável dependente de modo distinto. Vistas isoladamente umas podem ser positivamente correlacionadas; outras, negativamente correlacionadas com a variável dependente e, ainda, as próprias variáveis independentes sejam correlacionadas.

Estabelecidos estes critérios lançou-se no programa SPSS 14.0 a planilha com as 2187 combinações, que representam uma combinação total entre as variáveis sensíveis. As primeiras séries de resultados estão apresentadas na tabela 4.22. A partir desta etapa, considerando-se as combinações totais entre as variáveis, obtiveram-se os seguintes resultados, descritos pela ordem do grau de correlação do maior para o menor.

#### a) Módulo de Elasticidade da Plataforma

Existe forte correlação entre a deformação da via e o módulo de elasticidade da plataforma. Como se apresenta na Tabela 4.22, esta correlação é inversamente proporcional, ou seja, quando se diminui o módulo de elasticidade da plataforma, aumentamos o recalque. A correlação variou entre -0,627 e chegou a -0,770. No dormente D9, obteve-se uma correlação próxima a zero, porém, o nível de significância foi alta, em torno de 0,2, o que significa que não houve uma boa aproximação estatística para este dormente.

Importante notar a variação da correlação deste módulo com a inércia do trilho. Analisando-se o comportamento do módulo de elasticidade para os três tipos de trilhos, TR45, TR57 e TR68, a correlação quase não variou, como se pode notar nas Tabelas 4.23, 4.24 e 4.25, respectivamente. Os valores de correlação atingiram -0,741 para trilho TR45 contra valores em torno de -0,734 para trilho TR 68 e -0,740 para trilho TR 57, ou seja, quando se utiliza um trilho de menor inércia, em relação à deformação, não há grande influência, seguindo uma tendência já estudada por TARABAJI e THOMPSON (1976) e apresentada na secção 2.3.1 deste trabalho.

Tabela 4.22: Correlações entre as deformações nos onze dormentes e os elementos da via

<b>Considerando-se correlações totais entre as variáveis inclusive com a consideração dos três tipo de trilhos</b>							
Elemento	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,2230	-0,1600	-0,1220	-0,1180	-0,1800	-0,2630
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,2670	-0,2830	0,0000	0,0630	0,0990	-
	Significancia	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-
Inércia dos Trilhos	Dormentes						
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Pearson	0,0770	-0,0120	-0,0710	-0,0750	0,0030	0,0770
	Significancia	0,0000	0,5790	0,0010	0,0000	0,9020	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	-0,0020	0,0110	0,0260	-0,0070	-0,0960	-
	Significancia	0,9250	0,6200	0,2280	0,7410	0,0000	-
	Dormentes						
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Pearson	0,2580	0,2940	0,3290	0,3670	0,4040	0,4180
Módulo de Elasticidade do Sub-Lastro	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,4360	0,4280	-0,0280	0,3950	0,3510	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
	Módulo de Elasticidade da Plataforma	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Pearson		0,0220	0,0310	0,0400	0,0500	0,0600	0,0700
Significancia		0,3040	0,1460	0,0620	0,0200	0,0050	0,0010
		D7	D8	D9	D10	D11	-
K da Fixação	Pearson	0,0650	0,0570	0,0000	0,0430	0,0440	-
	Significancia	0,0020	0,0070	1,0000	0,0460	0,0400	-
	Dormentes						
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Pearson	-0,7610	-0,7700	-0,7590	-0,7360	-0,6970	-0,6400
Inércia do Dormente	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,6390	-0,6270	-0,0230	-0,6860	-0,7650	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
	Inércia do Dormente	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Pearson		-0,0280	-0,0020	0,0210	0,0500	0,0860	0,1120
Significancia		0,1880	0,9310	0,3370	0,0200	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
Inércia do Dormente	Pearson	0,1240	0,1260	0,0000	0,0880	0,0180	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,9980	0,0000	0,4070	-
	Dormentes						
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Pearson	0,0340	0,0370	0,0420	0,0470	0,0540	0,0500
Inércia do Dormente	Significancia	0,1160	0,0860	0,0520	0,0280	0,0120	0,0180
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,0590	0,0600	-0,0230	0,0560	0,0360	-
	Significancia	0,0060	0,0050	0,2760	0,0080	0,0940	-

Tabela 4.23: Correlações entre as deformações nos onze dormentes e o módulo de elasticidade da plataforma para os dormentes D4, D5 e D6, considerando apenas o Trilho TR45.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade da Plataforma para Trilho TR45				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7410	-0,6920	-0,6360
	Significância	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 4.24: Correlações entre as deformações nos onze dormentes e o módulo de elasticidade da plataforma para os dormentes D4, D5 e D6, considerando apenas o Trilho TR57.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade da Plataforma para Trilho TR57				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7400	-0,6960	-0,6700
	Significância	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 4.25: Correlações entre as deformações nos onze dormentes e o módulo de elasticidade da plataforma para os dormentes D4, D5 e D6, considerando apenas o Trilho TR68.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade da Plataforma para Trilho TR68				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7340	-0,7020	-0,6230
	Significância	0,0000	0,0000	0,0000

Nota-se que a correlação desta camada com a deformação da via sofre, em menor intensidade, influência da posição de aplicação da carga descrita através das diferenças de correlação para cada dormente. Um exemplo deste fato pode ser observado na Tabela 4.26, onde a correlação entre a deformação e a plataforma no primeiro dormente da grade é -0,761, variando em direção ao centro e a outra extremidade, chegando-se ao sexto dormente com uma correlação de -0,640.

Observa-se na Tabela 4.27 que, quando não se considera os módulos de elasticidade do lastro para o cálculo das correlações, nota-se que aumenta um pouco a influência da plataforma,

obtendo-se valores como no caso da correlação parcial, variando entre -0,806 a -0,693. Vale notar que, no dormente D9 a correlação com o módulo de elasticidade da plataforma é próxima de zero, porém neste ponto, o SPSS obteve um índice de significância em torno de 0,285, o que significa que o programa não obteve uma boa precisão na análise deste dormente.

Tabela 4.26: Variação da correlação entre a deformação e o módulo de elasticidade da plataforma considerando-se correlações totais.

Correlações											
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
Módulo de Elasticidade da Plataforma	-0,761	-0,770	-0,759	-0,736	-0,697	-0,640	-0,639	-0,627	-0,023	-0,686	-0,765

Mais uma vez nota-se a variação das correlações com o dormente da grade e com o ponto de aplicação das cargas, que pode ser observado na Tabela 4.27. Observando-se também a Tabela 4.28, nota-se esse fenômeno nos dormentes mais próximos ao ponto de aplicação das cargas: há uma diminuição na diferença entre a correlação do módulo de elasticidade do lastro com o da plataforma. Nesses pontos a correlação entre a deformação e o módulo de elasticidade da plataforma atingiu -0,627 e a correlação entre o módulo de elasticidade do lastro e a deformação foi de 0,436. Nos pontos mais distantes da aplicação das cargas a plataforma atingiu uma participação de -0,770 e o lastro 0,258. Mais uma vez não se considerou o dormente D9, pela pouca significância obtida no cálculo da correlação.

Vale lembrar que próximo aos pontos de aplicação das cargas, têm-se as áreas de deformação positiva, tomando a referência para baixo, e, nos pontos mais distantes, temos o efeito do levantamento da grade, ou seja, uma deformação referencial negativa.

Tabela 4.27: Correlações parciais com o módulo de elasticidade do lastro como variável de controle

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito do módulo de elasticidade do lastro								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Módulo de Elasticidade do Lastro</b>	Espaçamento	Pearson	-0,2300	-0,1670	-0,1290	-0,1270	-0,1970	-0,2900
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,2970	-0,3130	0,0000	0,0680	0,1060	-
		Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0010	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Inércia do Trilho	Pearson	0,0790	-0,0120	-0,0750	-0,0800	0,0030	0,0850
		Significancia	0,0000	0,5670	0,0000	0,0000	0,8930	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,0020	0,0120	0,0260	-0,0080	-0,1020	-
		Significancia	0,9160	0,5840	0,2270	0,7190	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade do Sub-Lastro	Pearson	0,0230	0,0330	0,0420	0,0540	0,0650	0,0770
		Significancia	0,0230	0,0330	0,0420	0,0540	0,0650	0,0770
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0730	0,0640	0,0000	0,0460	0,0470	-
		Significancia	0,0730	0,0640	0,0000	0,0460	0,0470	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7870	-0,8060	-0,8040	-0,7920	-0,7620	-0,7050
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,7110	-0,6930	-0,0230	-0,7470	-0,8170	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-

Tabela 4.28: Correlações parciais com o módulo de elasticidade do lastro e da plataforma como variável de controle

Correlações											
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
Módulo de Elasticidade da Plataforma	-0,761	-0,770	-0,759	-0,736	-0,697	-0,640	-0,639	-0,627	-0,023	-0,686	-0,765
Módulo de Elasticidade do Lastro	0,258	0,294	0,329	0,367	0,404	0,418	0,436	0,428	-0,028	0,395	0,351

## b) Módulo de Elasticidade do Lastro

O segundo valor que se apresentou mais representativo foi o módulo de elasticidade do lastro. Considerando o seu efeito com a influência dos outros elementos a correlação em relação à deformação da via fica em torno de 0,4, valor positivo, o qual é um fato interessante da análise e que será discutido a seguir.

Um aspecto importante é o perfil proporcional que o lastro demonstra em relação à deformação. Um aumento do módulo de elasticidade do lastro intuitivamente representaria uma diminuição da deformação, porém, o que ocorreu foi o contrário do previsto, o aumento do módulo gerou mais deformação. Porém, na análise individual do módulo de elasticidade do lastro apresentado na seção 4.3.1, a tendência demonstrava que um aumento do módulo conduzia a uma diminuição da deformação. Tal fenômeno encontrado no cálculo das correlações pode ser a característica indicada por MILONE (2004) no início desta seção em que o comportamento das variáveis frente às correlações, em conjunto, assume tendências diferentes de quando analisadas individualmente.

Quando se analisa a sua correlação parcial, ou seja, aquela sem a influência dos outros elementos, a sua contribuição cresce para uma média em torno de +0,55. Assim, independente do valor da correlação ser positiva ou negativa, realmente a contribuição deste elemento na predição da deformação da via é importante, principalmente, quando se analisa o trecho positivo da deformação, onde a sua correlação sobe para cerca de +0,619. Nos pontos mais distantes ao da aplicação da carga a sua correlação com a deformação cai para cerca de +0,429, como apresenta-se na Tabela 4.29. Despreza-se o dado do dormente D9 por ter uma significância em torno de 0,2, o que revela uma aproximação do cálculo do SPSS 14 ruim.

## c) Espaçamento dos dormentes

Quanto ao grau de correlação o elemento espaçamento dos dormentes é o terceiro de maior importância. Os valores de correlação foram em torno de -0,2, ou seja, existe uma certa correlação inversamente proporcional entre o espaçamento dos dormentes e a deformação. Um aumento do espaçamento define uma diminuição da deformação, como pode ser visto na Tabela

4.22. Este fato também vai de encontro com a tendência apresentada na secção 4.3.1, onde um aumento do espaçamento gera um aumento da deformação e pode ser explicada pelas mesmas ponderações utilizadas no módulo de elasticidade do lastro.

Tabela 4.29: Correlações parciais considerando apenas o efeito do módulo de elasticidade do lastro

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	0,4290	0,4780	0,5200	0,5590	0,5910	0,5940
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,6190	0,6030	-0,0280	0,5520	0,5610	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos e dormentes, K da fixação e Espacamento dos dormentes						

Em relação à correlação do espaçamento em relação ao tipo de trilho, apresentam-se uma maior correlação para o trilho TR 68 e uma menor correlação para o trilho TR 45. Pode ser visto nas Tabelas 4.30, 4.31 e 4.32 e 4.33, onde se considerou apenas os três dormentes onde o gráfico de deformação é positivo na maior parte dos casos.

Tabela 4.30: Correlações totais para o espaçamento dos dormentes apenas para a combinação com Trilho TR45 e os 3 primeiros dormentes da área positiva do gráfico de deformação.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o espaçamento para o Trilho TR45				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,0990	-0,1620	-0,2590
	Significancia	0,0070	0,0000	0,0000

Fato importante é quando se verifica a correlação do espaçamento com a deformação, ao ser retirada a influência das outras variáveis, apresentada na Tabela 4.32. O valor sobe de uma média de -0,2 para -0,3, um aumento ao redor de 50%, representado que realmente o espaçamento tem uma influência na deformação final da via.

Tabela 4.31: Correlações totais para o espaçamento dos dormentes apenas para a combinação com Trilho TR57 e os 3 primeiros dormentes da área positiva do gráfico de deformação.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o espaçamento para o Trilho TR57				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,1240	-0,1880	-0,2740
	Significancia	0,0010	0,0000	0,0000

Tabela 4.32: Correlações totais para o espaçamento dos dormentes apenas para a combinação com Trilho TR68 e os 3 primeiros dormentes da área positiva do gráfico de deformação.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o espaçamento para o Trilho TR68				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,1330	-0,1890	-0,2590
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela 4.33: Correlações parciais para o espaçamento dos para todos os dormentes.

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,3780	-0,2840	-0,2190	-0,2120	-0,3100	-0,4220
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,4350	-0,4470	0,0000	0,1050	0,1890	-
	Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos e dormentes e K da fixação						

#### d) Inércia do Trilho

Esperava-se uma influência maior da inércia do trilho sobre o valor final da deformação, porém, observando-se as respostas do SPSS 14, estes valores atingem uma média ao redor de 0,1, variando entre a média de -0,1 até +0,1, apresentado-se sem uma tendência definida, fato que é totalmente inesperado, já que esperava-se que quanto maior a inércia menor a deformação. Todavia, essa correlação pode ser considerada como entre fraca e média, mostrando-se de menor importância em relação ao módulo de elasticidade da plataforma, do módulo de elasticidade do

lastro e do espaçamento, considerando os cálculos realizados pelo programa FERROVIA 1.0 e pelo SPSS 14.0.

Outro fato importante é a grande variabilidade dessa correlação de acordo com a posição do dormente da grade. Importante salientar que essa variabilidade não é simplesmente explicada pela posição do dormente, mas sim pela posição de aplicação das cargas. Quando se analisa a correlação parcial na Tabela 4.34, ou seja, aquela em que se retira a influência de todas as outras variáveis, apresentam-se respostas variando entre +0,213 e -0,183. Tornou-se difícil definir a tendência da correlação até mesmo dentro da própria grade, já que essa variação entre positivo e negativo, não acompanha a variação do gráfico de deformação.

Tabela 4.34: Correlações parciais para a inércia dos trilhos para todos os dormentes.

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Inércia dos Trilhos	Pearson	0,1390	-0,0220	-0,1300	-0,1360	0,0040	0,1340
	Significancia	0,0000	0,3060	0,0000	0,0000	0,8410	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,0040	0,0180	0,0260	-0,0120	-0,1820	-
	Significancia	0,8390	0,4000	0,2280	0,5660	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos dormentes, K da fixação e Espaçamento dos dormentes						

e) Módulo de Elasticidade do sub-lastro, inércia do dormente e o K da fixação.

Estes elementos obtiveram valores de correlação menores que 0,1 em número absoluto. Desta forma considera-se de menor importância para a continuação da análise, já que para uma regressão linear, o ganho de precisão com o uso dessas variáveis seria mínimo e o gasto de tempo computacional seria muito grande. Nas Tabelas 4.35, 4.36 e 4.37 apresentam-se os valores de correlação para estes elementos onde se pode verificar a baixa influência destas em relação as deformações. No caso do Módulo de Elasticidade do Sub-lastro estes resultados divergem do trabalho de TARABJI e THOMPSON (1976) onde a alteração do tipo de sub-lastro modificou também o valor da deformação.

Tabela 4.35: Correlações parciais para o módulo de elasticidade do sublastro para todos os dormentes.

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Sublastro	Pearson	0,0400	0,0570	0,0740	0,0910	0,1080	0,1220
	Significancia	0,0600	0,0070	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,1180	0,1010	0,0000	0,0710	0,0850	-
	Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0010	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro e da Plataforma, Inércia dos dormentes e trilhos, K da fixação e Espaçamento dos dormentes						

Tabela 4.36: Correlações parciais para o módulo de elasticidade do dormente para todos os dormentes.

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Dormente	Pearson	0,0610	0,0680	0,0770	0,0860	0,0970	0,0890
	Significancia	0,0040	0,0020	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,1070	0,1070	-0,0230	0,0950	0,0690	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,2760	0,0000	0,0010	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos, K da fixação e Espaçamento dos dormentes						

Tabela 4.37: Correlações parciais para o K da Fixação para todos os dormentes.

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
K da Fixação	Pearson	-0,0530	-0,0040	0,0370	0,0900	0,1530	0,1940
	Significancia	0,0130	0,8400	0,0810	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,2180	0,2170	0,0000	0,1450	0,0340	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,9930	0,0000	0,1150	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos e dormentes, Espaçamento dos dormentes						

Nos anexos D e E estão as tabelas de correlação total e parcial calculadas pelo programa SPSS 14.0 e utilizadas para a análise do comportamento das variáveis neste trabalho.

## 4.4 – Regressão linear das variáveis de maior sensibilidade

### 4.4.1 – Generalidades

O passo seguinte do cálculo da correlação entre as variáveis é definir uma equação que descreva o comportamento do modelo, sendo representada graficamente através de uma curva. LARSON & FARBER (2004) chamam essa curva ou reta de regressão. A interpretação gráfica destes pontos é obtida através de um gráfico de dispersão. Os pontos obtidos através da curva podem possuir certas diferenças em relação à nuvem de pontos do modelo. Essas diferenças são os resíduos e são utilizados para o cálculo da soma dos quadrados dos resíduos. Quando a soma desses quadrados é mínima, obteve-se a reta do ajuste ótimo.

SPIEGEL (1974) considera o problema fundamental a determinação de uma curva que se ajuste aos dados do modelo. Como referência descreve alguns tipos básicos de curvas de ajustamento e suas referidas equações.

a) $Y = a_0 + a_1X$	Linha reta
b) $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2$	Parábola ou curva do 2º grau
c) $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3$	Curva do 3º grau
d) $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4$	Curva do 4º grau
e) $Y = a * b^X$	Curva exponencial

De forma similar ao coeficiente de correlação R, para a regressão também se tem um coeficiente que define o quanto uma curva descreve um modelo. Esse coeficiente é chamado de coeficiente de determinação  $r^2$  e é obtido pela razão da variação explicada pela variação total em torno da reta de regressão. LARSON & FARBER (2004).

$$r^2 = \text{variação explicada} / \text{variação total} \quad (4.2)$$

A variação total é a soma dos quadrados das diferenças entre o valor de cada par ordenado e a média de  $y$ . A variação explicada é a soma dos quadrados das diferenças entre cada valor previsto e a média destes. Desta forma, podem-se explicar esses dois valores através das seguintes equações:

$$\text{Variação total} = \sum (y_i - y)^2 \quad (4.3)$$

$$\text{Variação explicada} = \sum (\hat{y}_i - y)^2 \quad (4.4)$$

Onde:

$y_i$  = valor de cada par ordenado;

$y$  = média dos valores;

$\hat{y}_i$  = valor previsto;

Pode-se apresentar como exemplo que, quando  $r^2 = 0,90$ , significa, no caso de duas variáveis, que a variável independente explica o valor da variável dependente em 81%.

#### 4.4.2 – Regressão linear para as variáveis de maior correlação em relação a deformação

Apresentaram-se na secção 4.3.3 deste trabalho as variáveis de maior correlação em relação à deformação. Tais variáveis são: O módulo de elasticidade da plataforma, o módulo de elasticidade do lastro, o espaçamento e a inércia do trilho.

Ao se fazer uma análise de campo de qualquer trecho de uma via permanente as duas últimas medidas, espaçamento dos dormentes e inércia do trilho são facilmente obtidos. Por outro lado, o módulo de elasticidade da plataforma e do lastro não são facilmente obtidos por mera observação necessitando de ensaios laboratoriais específicos.

Desta forma é importante o conhecimento de uma equação que possibilite o cálculo desses dois valores através dos resultados de deformação da bacia de deflexão, utilizando-se

também dos valores do espaçamento dos dormentes e da inércia do trilho para melhorar a precisão do método.

Segundo TEIXEIRA *et al* (1988) para resolver esse sistema em que duas variáveis são desconhecidas, necessita-se de no mínimo duas equações. Invariavelmente, da mesma forma que se podem calcular os valores dos módulos utilizando-se da deformação (que pode ser obtida em ensaio de campo) e dos valores do espaçamento dos dormentes e inércia dos trilhos, pode-se também fazer o caminho inverso, predizendo uma deformação através do conhecimento dos valores dessas variáveis.

Para o cálculo desta equação utilizou-se o programa SPSS 14 através da utilização do comando regressão linear. Neste comando insere-se uma equação inicial como tentativa de descrever o modelo e o programa calcula os coeficientes e o valor do coeficiente de determinação  $r^2$ . A série de dados escolhidos foi referente aos dormentes que se situaram na área positiva de deformação, por similaridade o dormente inicial da bacia de deflexão e o dormente que representa o ponto de maior deformação positiva. Algumas tendências foram pré-analisadas com o uso de planilhas eletrônicas de uso corrente, utilizadas, assim, para encontrarem-se as equações mais representativas, de alguns modelos retirados destas planilhas. Além disso, dividiu-se esta análise nas seguintes tentativas:

1ª Tentativa – Equação única que descreve o modelo considerando-se: o módulo de elasticidade da plataforma, o módulo de elasticidade do lastro, o espaçamento e a inércia, ou equação que descrevam os módulos de Elasticidade da Plataforma e do Lastro, através de intervalos de espaçamento e tipo de trilho, já que estes últimos são facilmente obtidos em campo;

2ª Tentativa – Equação única para descrever o modelo, porém não linear;

3ª Tentativa – Criação de uma variável alternativa  $X_{aux}$  que envolva as outras variáveis tentando-se melhorar a curva de regressão.

Dentro dessas tentativas experimentaram-se vários tipos de curvas desde lineares, passando pelos polinômios e curvas logarítmicas, calculando-se os valores de  $r^2$  a fim de escolher as mais representativas.

## 1ª Tentativa

Nesta tentativa, primeiramente todos os valores de deformação para os três dormentes em questão foram utilizados, juntamente com os valores do espaçamento, módulo de elasticidade da plataforma e do lastro. As tentativas e seus resultados apresentam-se a seguir:

Na Tabela 4.38, encontram-se as regressões para os 3 dormentes estudados, os quais possuem suas deformações na área da bacia de deflexão. Os dormentes 4, 5 e 6 não obtiveram todas as deformações dentro da área de deflexão positiva, referenciando para baixo, porém são os três que mais obtiveram pontos nesta área do gráfico de deformação. A área positiva corresponde a bacia de deformação da via, podendo-se descobrir a curva que corresponde a esses valores pode-se descobrir o valor da deformação em cada ponto, de maneira contrária, a partir das deformações descobrir as características do módulo de elasticidade do lastro e da plataforma, que neste trabalho, demonstraram ter grande correlação com a deformação. A Figura 4.17 apresenta os três dormentes considerados na análise e as áreas positivas e negativas de deformação.

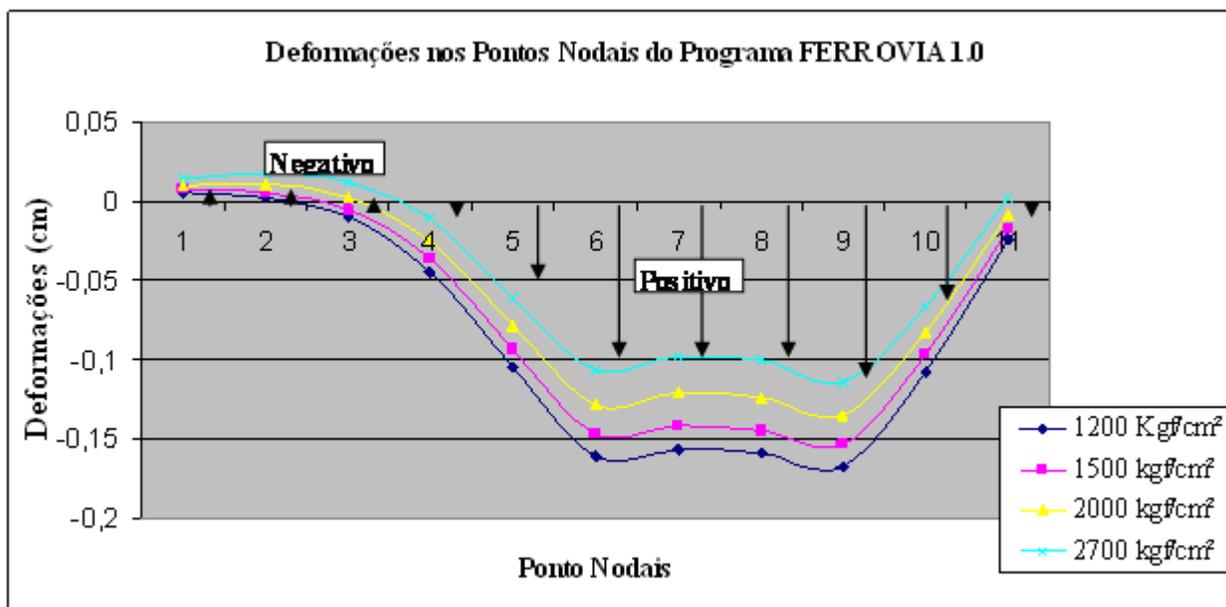


Figura 4.17: Gráfico de deformação da grade para onze dormentes do programa FERROVIA 1.0 alterando-se apenas o módulo de elasticidade do lastro.

A regressão foi realizada no programa SPSS no comando de análise regressão linear. Neste comando, utiliza-se uma equação do tipo “ $y = a + bx$ ”, a qual possui a constante “a” e a variável “b”, que pode ser uma soma de outras variáveis dependendo do número destas. Segue as equações de deformação para os dormente 4, 5 e 6, na Tabela 4.38.

Tabela 4.38 – Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão considerando uma regressão linear e sem a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento.

Coeficientes encontrados para cada variavel da equação de regressão - TOTAL					
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x + A_3.x$					
Onde	y = deformação (cm)			A1 = E plataforma	
	A0 = constante calculada pelo SPSS			A2 = E lastro	
	A1, A2 e A3 = Valores calculado pelo SPSS			A3 = Espaçamento	
Para o total de combinações					
Caso	A0	A1	A2	A3	R <sup>2</sup>
Dormente nº 4	0,15212424	-0,00038149	0,00004815	-0,00187320	0,690
Dormente nº 5	0,15531241	-0,00039741	0,00005840	-0,00313173	0,681
Dormente nº 6	0,18974106	-0,00039529	0,00006543	-0,00496242	0,654

O valor de R<sup>2</sup> demonstra que 69,0 % da deformação do dormente d4 é explicada pela equação d4, 68,1% pela equação de d5 e 65,4% pela equação do dormente d6. Observa-se que os coeficientes de determinação revelam uma equação pobre em precisão, apontando apenas uma tendência, mas que, por ser um valor pequeno, pode variar no erro entre positivo e negativo, fato que modifica totalmente um estudo de deformação. Dentro da primeira alternativa, com utilização de regressão linear, pode-se estudar um modelo de regressão considerando-se o espaçamento entre os dormentes e o tipo de trilho como intervalos fixos, já que o espaçamento e o tipo de trilho são obtidos de forma praticamente direta, e estabelecendo-se equações para cada intervalo. A Tabela 4.39 apresenta esta alternativa, sendo que, em mais de 50% das equações de regressão obtiveram um valor de coeficiente de determinação acima de 0,75. Este valor significa que o modelo explica 75 % do valor da deformação o que estatisticamente é uma melhora considerável em relação a primeira tentativa. Tentar-se-á uma segunda alternativa que consiste em descrever o modelo através de uma equação não linear buscando assim melhorar o coeficiente de determinação da equação do modelo. Os resultados pormenorizados das regressões lineares encontram-se no Anexo F deste trabalho.

Tabela 4.39 – Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão considerando uma regressão linear e com a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento.

Coeficientes encontrados para cada variável da equação de regressão				
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x$				
Onde	$y =$ deformação (cm)			$A_1 = E$ plat
	$A_0 =$ constante calculada pelo SPSS			$A_2 = E$ lastro
	$A_1, A_2 =$ Valores calculado pelo SPSS			
Para Dormente nº 4				
Caso	Ao	A1	A2	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,07290717	-0,00048618	0,00006226	0,707
TR45 - Espaçamento 55 cm	0,05760848	-0,00036834	0,00004411	0,681
TR45 - Espaçamento 60 cm	0,03739272	-0,00029237	0,00003749	0,841
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,07801495	-0,00051150	0,00006249	0,759
TR57 - Espaçamento 55 cm	0,04664449	-0,00035220	0,00004242	0,640
TR57 - Espaçamento 60 cm	0,02263839	-0,00028972	0,00004042	0,819
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,07144743	-0,00050868	0,00006301	0,757
TR68 - Espaçamento 55 cm	0,03713883	-0,00034684	0,00004346	0,632
TR68 - Espaçamento 60 cm	0,01809304	-0,00027755	0,00003772	0,840
Para Dormente nº 5				
Caso	Ao	A1	A2	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,00581805	-0,00050090	0,00007268	0,663
TR45 - Espaçamento 55 cm	-0,01373931	-0,00038316	0,00005373	0,669
TR45 - Espaçamento 60 cm	-0,04706230	-0,00029262	0,00004772	0,815
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,02553998	-0,00053912	0,00007205	0,754
TR57 - Espaçamento 55 cm	-0,02378962	-0,00036842	0,00005445	0,588
TR57 - Espaçamento 60 cm	-0,05089323	-0,00029526	0,00004977	0,809
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,02468743	-0,00053719	0,00007208	0,753
TR68 - Espaçamento 55 cm	-0,02052785	-0,00036202	0,00005201	0,630
TR68 - Espaçamento 60 cm	-0,05242929	-0,00029795	0,00005108	0,774
Para Dormente nº 6				
Caso	Ao	A1	A2	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	-0,05833536	-0,00050139	0,00008021	0,623
TR45 - Espaçamento 55 cm	-0,09184045	-0,00037738	0,00006179	0,665
TR45 - Espaçamento 60 cm	-0,13609642	-0,00027839	0,00005504	0,777
TR57 - Espaçamento 50 cm	-0,02574743	-0,00054919	0,00007896	0,751
TR57 - Espaçamento 55 cm	-0,08158147	-0,00036706	0,00005862	0,634
TR57 - Espaçamento 60 cm	-0,12390478	-0,00028966	0,00005607	0,785
TR68 - Espaçamento 50 cm	-0,02060013	-0,00054828	0,00007844	0,751
TR68 - Espaçamento 55 cm	-0,07606014	-0,00036641	0,00005825	0,633
TR68 - Espaçamento 60 cm	-0,13456075	-0,00027985	0,00006150	0,430

## 2ª Tentativa

O programa SPSS permite a entrada de equações pelo usuário dando liberdade na escolha de quais variáveis devem ser consideradas ou qual tratamento será dado a cada uma. Pode-se introduzir uma equação com o valor do espaçamento dos dormentes elevado ao cubo somado ao módulo do lastro ao quadrado, uma equação com vários termos constantes e os outros atrelados a uma variável e assim por diante.

Como a gama de equações, desta forma, tende a um número muito grande, consideraram-se os polinômios como equações de base para a descrição do modelo. Foi realizado um número de sete equações na tentativa de obter um coeficiente de determinação mais elevado, referenciando-se no dormente d4. As equações estão detalhadas no Anexo G e são apresentadas em resumo a seguir com os respectivos coeficientes de determinação:

1ª Equação	$a_1 + a_2 * plat + a_3 * lastro^2 + a_4 * espaçamento^3$	$R^2 = 0,049$
2ª Equação	$a_1 + a_2 * plat - a_3 * lastro^2 + a_4 * espaçamento^3$	$R^2 = 0,024$
3ª Equação	$a_1 + a_2 + a_3 * plat + a_4 * lastro^2 + a_5 * espaçamento^3$	$R^2 = 0,14$
4ª Equação	$a_1 + a_2 * plat + a_3 * plat - a_4 * lastro^2 + a_5 * esp^4$	$R^2 = 0,356$
5ª Equação	$a_1 + a_2 * plat + a_3 * plat + a_4 * lastro^2 + a_5 * espaçamento^4$	$R^2 = 0,522$
6ª Equação	$a_1 + a_2 * plat + a_3 * plat^2 - a_4 * lastro^3 + a_5 * espaçamento^4$	$R^2 = 0,206$
7ª Equação	$a_3 * plat + a_4 * lastro^2 + a_5 * espaçamento^3$	$R^2 = 0,542$

Das equações anteriores, apenas a quinta utilizou os três elementos em análise e, nesta equação, o coeficiente de determinação foi de apenas 0,522. Tal valor é muito baixo para explicar o comportamento de deformação e para prever a partir da deformação os módulos das camadas de lastro e plataforma. Significaria dizer que, para esta equação, um módulo de elasticidade de plataforma de valor igual a 400 poderia ser calculado com 200 ou 600, o que é uma má precisão.

Foi visto na tentativa executada para a regressão linear, denominada de 1ª tentativa, que as diferenciações entre os dormentes 4, 5 e 6 não são significativas. Desta forma, o estudo inicial para as regressões não lineares, limitou-se ao dormente d4, que é o primeiro dormente da bacia de deflexão.

### 3ª Tentativa

Demonstrou-se através das duas tentativas anteriores que tanto uma regressão linear como uma não linear envolvendo todas as variáveis significativas não gera uma equação resultante que represente, com precisão elevada, o modelo em análise. O  $R^2$  é o fator balizador que comprovou que na melhor das hipóteses o coeficiente de determinação foi de 0,690, no caso linear considerando a inércia dos trilhos e o espaçamento dos dormentes. Quando separou-se as equações de acordo com o espaçamento dos dormentes e da inércia dos trilho, obteve-se valores de  $R^2$  0,841 e 0,43.

Torna-se fundamental compreender o comportamento das variáveis em análise, considerando a influência das outras. Importante notar, que elas não possuem a mesma tendência de etapas iniciais da pesquisa, onde apenas as variáveis em análise eram alteradas, mantendo-se todas as outras fixas. Agora elas variam, e todas as outras também variam.

Assim, elaboraram-se alguns gráficos dos quatro principais elementos, ou seja, aqueles que obtiveram melhor correlação com a deformação. As Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 que seguem foram elaboradas em planilha eletrônica e tem a função de servir de rumo ao comportamento atual dessas variáveis frente à deformação. Nos gráficos que seguem existem alguns pontos conhecido como “*outliers*” um termo em língua inglesa que tem um significado estatístico de um ponto fora de uma tendência, pode acontecer por algum fenômeno estatístico em que um ponto não segue a tendência dos demais valores na nuvem de dispersão.

Nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 nota-se um ponto fora da nuvem de pontos do gráfico de dispersão. Os outros aparecem agrupados seguindo tendências que acompanham a variação do elemento em análise: espaçamento, inércia do trilho, módulo de elasticidade da plataforma e do lastro.

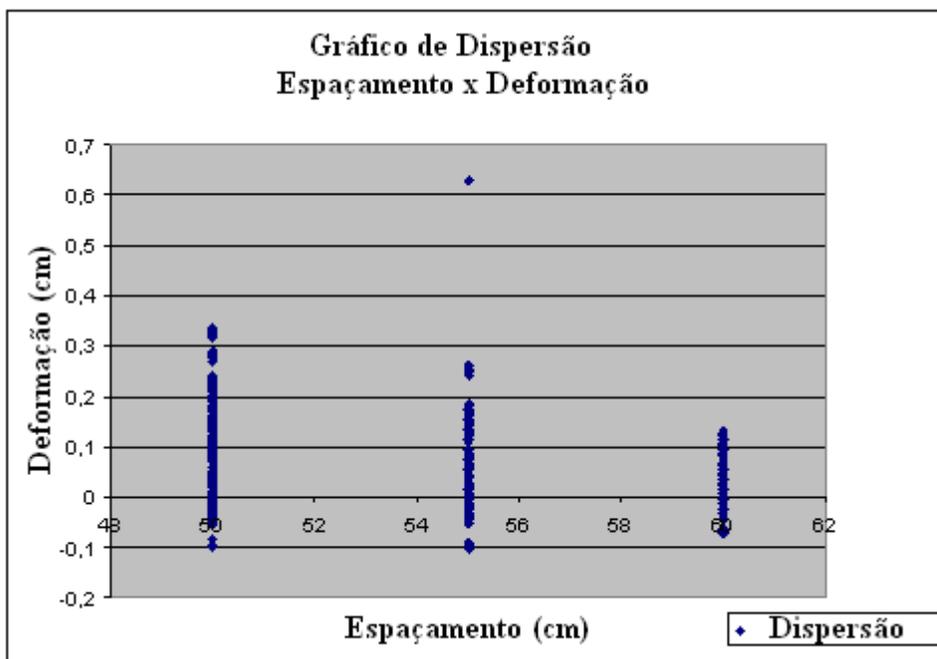


Figura 4.18 – Dispersão do Espaçamento versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações

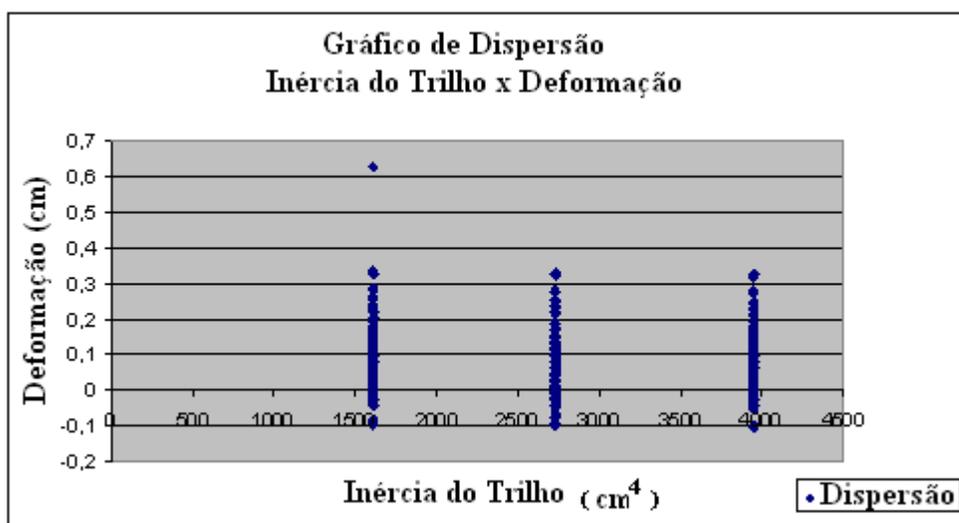


Figura 4.19 - Dispersão da Inércia do Trilho versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações

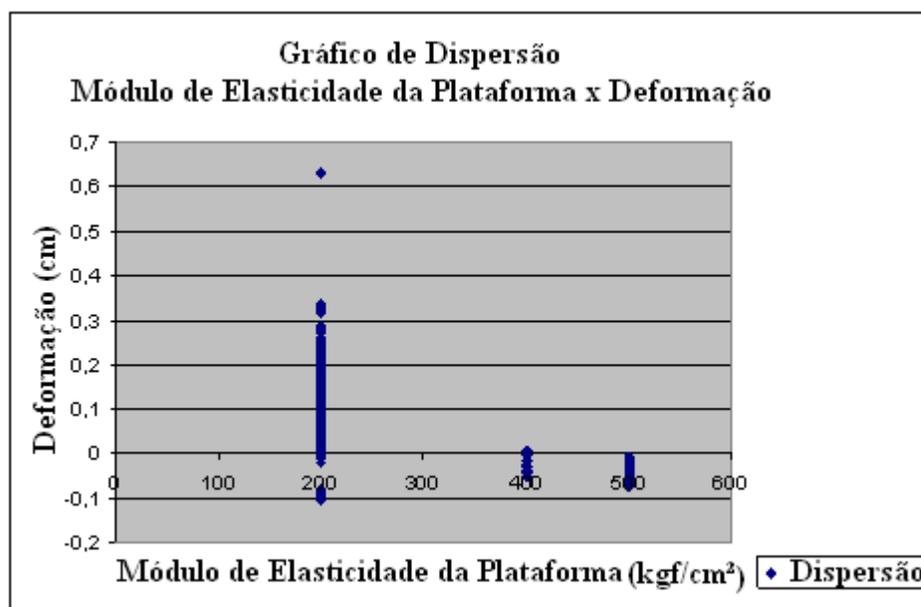


Figura 4.20 - Dispersão do Módulo de Elasticidade da Plataforma versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações

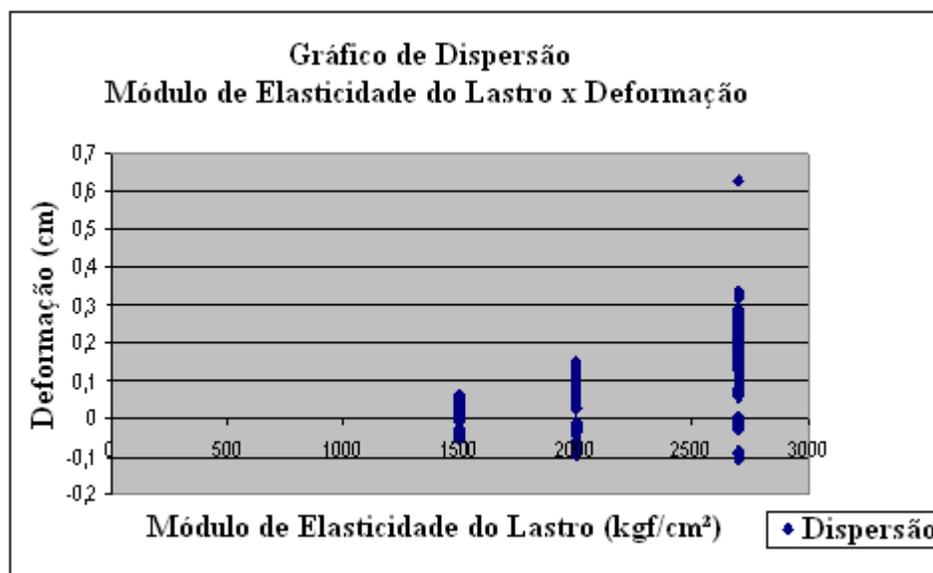


Figura 4.21 - Dispersão do Módulo de Elasticidade do Lastro versus a deformação no dormente d4 para todas as combinações;

Nota-se que a deformação segue padrões definidos em intervalos que tornam difícil a elaboração de uma curva que descreva o modelo de deformação da via. Uma opção será a criação

de uma variável que tenha como matriz os três elementos de maior correlação da via em relação à deformação. Criou-se uma nova variável chamada de  $X_{aux}$  a qual carrega o espaçamento, o módulo de elasticidade do lastro e o módulo de elasticidade da plataforma.

$$X_{aux} = (\text{Espaçamento} \times \text{Módulo de Elasticidade da Plataforma}) / \text{Módulo de Elasticidade do Lastro} \quad (4.5)$$

A opção de criar uma variável auxiliar permite que o gráfico de dispersão seja melhor gerador de uma curva de regressão com coeficiente de determinação satisfatório. Através da análise da curva a seguir demonstra-se, agora, que a criação de uma curva de alto valor de  $R^2$  é possível. A Figura 4.22 mostra a curva de tendência elaborada por planilha eletrônica.

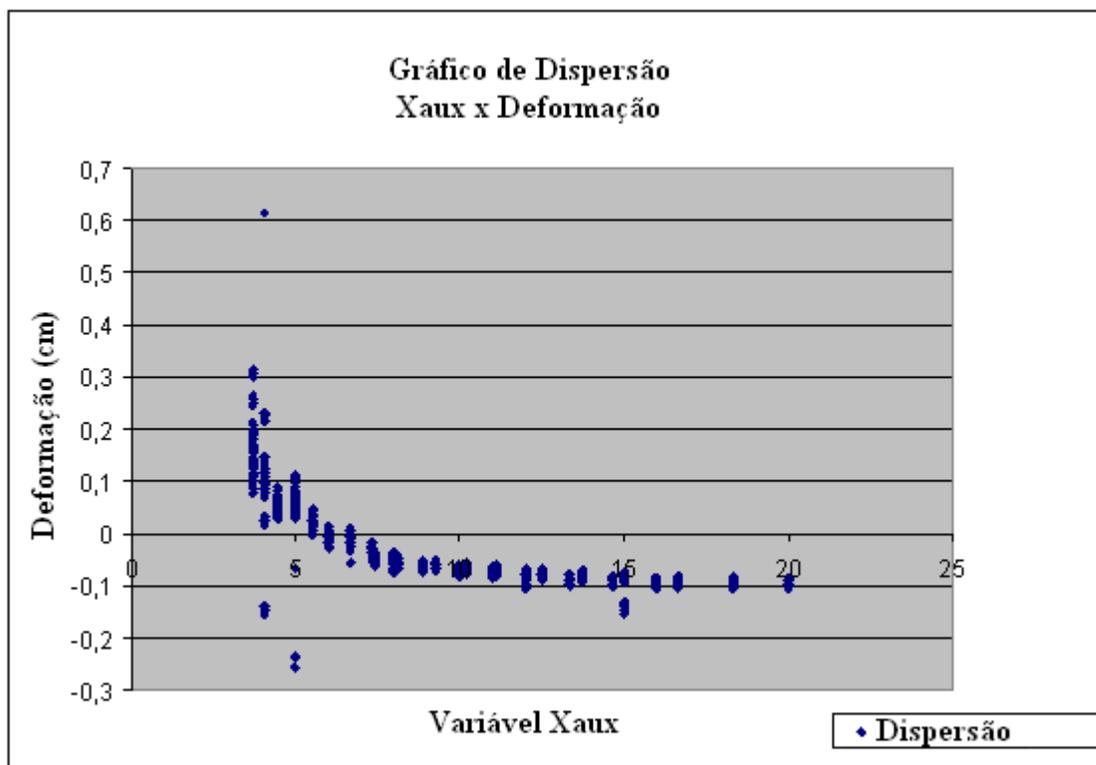


Figura 4.22 - Dispersão para  $X_{aux}$  versus a deformação no dormente d4

Pode-se observar os valores de  $R^2$  para o total de combinações, aquela em que não agrupou-se as equações de acordo com o espaçamento dos dormentes e inércia dos trilhos, na

tabela 4.40 abaixo, ficaram em torno de 0,8, o que já pode ser considerado um fator de determinação que gera equações mais precisas. Obteve-se, desta forma, uma melhora significativa nos coeficientes de determinação das equações de regressão linear, utilizando-se um recurso do SPSS 14 em que o programa, através de uma variável independente e outra dependente, encontra a regressão com maior precisão possível. No caso, obteve-se esta máxima precisão com uma equação do terceiro grau, do tipo representado na Tabela 4.40. Porém, cabe uma última tentativa para buscar um valor de coeficiente de determinação mais elevado, já que o espaçamento dos dormentes e a inércia do trilho são dados diretos de campo, como já citada na 1ª tentativa, sem necessidade de ensaios mais complexos podem-se elaborar regressões para cada par espaçamento-inércia. Desta forma melhorar-se-á o coeficiente de determinação aumentando a aplicabilidade das equações. Elaboraram-se equações para os seguintes pares, com a utilização do SPSS 14:

Tabela 4.40 – Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e sem a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento.

Coeficientes encontrados para cada variavel da equação de regressão - TOTAL					
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$					
Onde $y =$ deformação (cm) $A_0 =$ constante calculada pelo SPSS $A_1, A_2$ e $A_3 =$ Valores calculado pelo SPSS					
Para o total de combinações					
Caso	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
Dormente nº 4	0,46087485	-0,10601964	0,00745695	-0,00017156	0,834
Dormente nº 5	0,45547044	-0,11759228	0,00838247	-0,00019603	0,818
Dormente nº 6	0,43808105	-0,12728499	0,00925030	-0,00022073	0,762

- 1 – Trilho TR 45 – Espaçamento = 50 cm;
- 2 – Trilho TR 45 – Espaçamento = 55 cm;
- 3 – Trilho TR 45 – Espaçamento = 60 cm;
- 4 – Trilho TR 57 – Espaçamento = 50 cm;
- 5 – Trilho TR 57 – Espaçamento = 55 cm;
- 6 – Trilho TR 57 – Espaçamento = 60 cm;

7 – Trilho TR 68 – Espaçamento = 50 cm;

8 – Trilho TR 68 – Espaçamento = 55 cm;

9 – Trilho TR 68 – Espaçamento = 60 cm;

O modelo do SPSS 14.0 que procura a melhor equação de regressão chama-se “Curva estimada”. Esta rotina, como já citado nesta secção, calcula todos os modelos possíveis entre uma série pré-estabelecida no programa calculando o  $R^2$  e os coeficientes para cada regressão. Segundo o TUTORIAL SPSS 14.0 (2005) esses modelos de estimação da curva e suas respectivas equações são as seguintes:

- a) Linear:  $Y = b_0 + (b_1 * t)$ ;
- b) Logarítmica:  $Y = b_0 + (b_1 * \ln(t))$ .
- c) Inversa:  $Y = b_0 + (b_1 / t)$ ;
- d) 2º Grau:  $Y = b_0 + (b_1 * t) + (b_2 * t^2)$ ;
- e) 3º Grau:  $Y = b_0 + (b_1 * t) + (b_2 * t^2) + (b_3 * t^3)$ ;
- f) “Poderosa”:  $Y = b_0 * (t^{b_1})$  ou  $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * \ln(t))$ ;
- g) “Composta”:  $Y = b_0 * (b_1^t)$  ou  $\ln(Y) = \ln(b_0) + (\ln(b_1) * t)$ ;
- h) Curva S:  $Y = e^{(b_0 + (b_1/t))}$  ou  $\ln(Y) = b_0 + (b_1/t)$ ;
- i) Logística:  $Y = 1 / (1/u + (b_0 * (b_1^t)))$  ou  $\ln(1/y-1/u) = \ln(b_0) + (\ln(b_1) * t)$ , onde u é o valor superior de borda;
- j) Crescimento:  $Y = e^{(b_0 + (b_1 * t))}$  ou  $\ln(Y) = b_0 + (b_1 * t)$ ;
- k) Exponencial:  $Y = b_0 * (e^{(b_1 * t)})$  ou  $\ln(Y) = \ln(b_0) + (b_1 * t)$ .

Onde os valores de “b” representam os coeficientes de cada variável e “t” as variáveis propriamente ditas e “Y” é o valor da deformação.

Esta rotina do programa testa todos os modelos em relação aos dados de entrada. Quando havia alguma incompatibilidade com o modelo sugerido, o SPSS 14 não executa os cálculos e acusa uma mensagem de erro. Para as outras equações é calculado o  $R^2$  e os coeficientes de cada variável. O resultado da análise geral de nosso trabalho é a seqüência de equações que seguem que é o padrão de saída do SPSS 14. Vale lembrar que foi realizado o

calculado da regressão para cada um dos três dormentes que correspondem a região de deformação vertical para baixo.

O valor de  $R^2$  para cada uma das equações e para cada um dos dormentes é apresentado ao lado do dormente de referência. Para facilitar a visualização, a equação geral utilizada foi apresentada no topo da Tabela 4.41 e os coeficientes para cada caso estão no fim de cada linha no decorrer da tabela. Dividiu-se em dormente d4, d5 e d6, e, desta forma pode-se calcular a deformação para cada equação.

Nota-se, na Tabela 4.41, que se chegou a encontrar valores de  $R^2$  na casa de 0,977, o que é uma precisão excelente em relação a um modelo de regressão linear. A pior aproximação obteve valor de 0,507, para uma dos casos de espaçamento dos dormentes de 60 cm, o que pode ser considerado uma má aproximação do SPSS 14.0, porém, pode-se notar que as piores aproximações foram aquelas para o espaçamento de dormentes de 55 cm. É fato que o programa FERROVIA 1.0, por possuir uma malha limitada de elementos finitos, em alguns casos, não possui nós que coincidam com o ponto de aplicação das cargas. Desta forma, como no caso do espaçamento de 55 cm, executaram-se aproximações para o lançamento das cargas, como visto na seção 4.2 deste trabalho.

Tais aproximações carregam erros na análise as quais, naquela seção, já demonstravam ser entre 0 e 10% para a maior parte dos dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0 e, nos pontos onde a deformação era próxima a zero, valores superiores a 50% de erro. Desta forma, pode-se entender a menor aproximação dos valores de  $R^2$  para o espaçamento dos dormentes de 55 cm como reflexo da aproximação inicial executada para o lançamento das cargas.

O restante dos cálculos realizados pelo programa SPSS 14.0 estão no anexo H deste trabalho.

Tabela 4.41 – Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e com a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento.

Coeficientes encontrados para cada variável da equação de regressão com Xaux					
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$					
Onde $y =$ deformação (cm)					
A0 = constante calculada pelo SPSS					
A1, A2 e A3 = Valores calculado pelo SPSS					
Para Dormente nº 4					
Caso	Ao	A1	A2	A3	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,64315878	-0,16509421	0,01336731	-0,00035509	0,858
TR45 - Espaçamento 55 cm	0,43432881	-0,09841011	0,00698579	-0,00016431	0,795
TR45 - Espaçamento 60 cm	0,34057431	-0,07135476	0,00466133	-0,00010143	0,970
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,64950023	-0,16595077	0,01326802	-0,00034864	0,916
TR57 - Espaçamento 55 cm	0,39061679	-0,08862886	0,00617058	-0,00014300	0,738
TR57 - Espaçamento 60 cm	0,32909133	-0,06909432	0,00437367	-0,00009186	0,962
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,64475000	-0,16603422	0,01329124	-0,00034968	0,915
TR68 - Espaçamento 55 cm	0,37798851	-0,08705934	0,00607353	-0,00014102	0,734
TR68 - Espaçamento 60 cm	0,32259380	-0,07081552	0,00464875	-0,00010119	0,977
Para Dormente nº 5					
Caso	Ao	A1	A2	A3	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,64004539	-0,17932253	0,01467851	-0,00039419	0,808
TR45 - Espaçamento 55 cm	0,41608948	-0,10839304	0,00779405	-0,00018595	0,787
TR45 - Espaçamento 60 cm	0,30594526	-0,07863107	0,00524103	-0,00011645	0,944
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,65628470	-0,17959207	0,01443121	-0,00038148	0,913
TR57 - Espaçamento 55 cm	0,35566575	-0,09026301	0,00610854	-0,00013828	0,678
TR57 - Espaçamento 60 cm	0,30842981	-0,07837341	0,00513144	-0,00011176	0,945
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,65528591	-0,17944145	0,01442756	-0,00038157	0,912
TR68 - Espaçamento 55 cm	0,36898183	-0,09557384	0,00673977	-0,00015842	0,733
TR68 - Espaçamento 60 cm	0,30720274	-0,07851211	0,00522990	-0,00011557	0,919
Para Dormente nº 6					
Caso	Ao	A1	A2	A3	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,61713726	-0,18752649	0,01548554	-0,00041949	0,758
TR45 - Espaçamento 55 cm	0,37756030	-0,11461054	0,00837095	-0,00020287	0,782
TR45 - Espaçamento 60 cm	0,24949317	-0,08181369	0,00547951	-0,00012185	0,899
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,64207053	-0,18706942	0,01509393	-0,00040094	0,908
TR57 - Espaçamento 55 cm	0,34477246	-0,10279607	0,00733496	-0,00017466	0,735
TR57 - Espaçamento 60 cm	0,28508373	-0,08871550	0,00604950	-0,00013660	0,916
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,64475000	-0,16603422	0,01329124	-0,00034968	0,909
TR68 - Espaçamento 55 cm	0,65528591	-0,17944145	0,01442756	-0,00038157	0,734
TR68 - Espaçamento 60 cm	0,64481946	-0,18663928	0,01505830	-0,00039992	0,507

#### 4.4.3 – Tratamento das dispersões

Observou-se na figura 4.22 que na nuvem de dispersão formada pelo par Xaux-Deformação Vertical existem pontos que fogem da tendência, pontos estes que aparecem isolados no gráfico de deformação. Na seção anterior comentou-se sobre o que seriam esses pontos e o que representam. LARSON & FARBER (2004) descrevem os critérios de regressões lineares utilizados, destes, o método de mínimos quadrados é o de maior utilização. Sendo importante, desta forma, o tratamento dos pontos que fogem da dispersão, pois, estes pontos podem conduzir a mudanças no coeficiente linear da curva na tentativa de descrever estes no modelo.

Embasado na prática de especialistas na área de estatística, em especial no apoio recebido pelo Drº Reinaldo Charnet, do Instituto de Matemática, Estatística e Ciências da Computação da Universidade Estadual de Campinas, realizou-se o seguinte procedimento: retirada dos pontos que estavam fora da nuvem principal e novo cálculo das equações de regressão e valores de  $R^2$ . Desta forma, retirando-se apenas 30 pontos do total de 2187, perfazendo 1,37%, obteve-se a seguinte curva representada na figura 4.23.

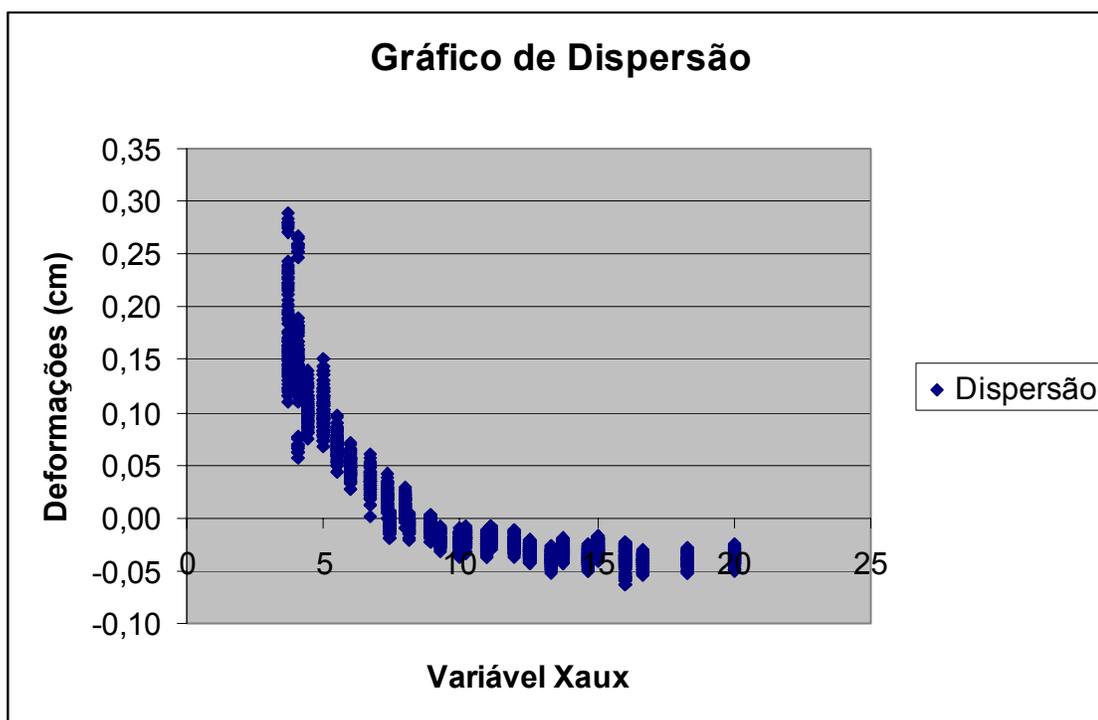


Figura 4.23 Dispersão entre Xaux e Deformação Vertical com tratamento de dispersão para D4

Desta forma, obtiveram-se as seguintes equações que seguem na tabela 4.42, considerando-se os três dormentes em análise nesta dissertação. Nesta tabela percebe-se que os valores de  $R^2$  calculados pelo SPSS 14.0 estão na casa de 0,90, uma melhora de mais de 10% em relação ao primeiro cálculo realizado sem o tratamento das dispersões. Importante salientar que essa melhora superior a 10% foi obtida com a retirada de apenas 1,37% do total de combinações realizadas com o programa FERRVOIA 1.0.

Tabela 4.42 - Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e sem a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento. Com tratamento das dispersões.

Coeficientes encontrados para cada variavel da equação de regressão - TOTAL					
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$				Tratamento das variáveis	
Onde $y =$ deformação (cm) $A_0 =$ constante calculada pelo SPSS $A_1, A_2$ e $A_3 =$ Valores calculado pelo SPSS					
Para o total de combinações					
Caso	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$R^2$
Dormente nº 4	0,46410112	-0,10639419	0,00746152	-0,00017125	0,912
Dormente nº 5	0,45957360	-0,11810761	0,00839736	-0,00019595	0,910
Dormente nº 6	0,43954372	-0,12649264	0,00912062	-0,00021628	0,877

Finalizando os estudos de regressão realizou-se o mesmo estudo da tabela 4.41, quando se separou as equações de acordo com o tipo de trilho e o espaçamento dos dormentes. A tabela 4.43 a seguir apresenta esta análise onde se pode observar que dos 27 valores obtidos apenas quatro obtiveram  $R^2$  inferior a 0,90 os outros foram todos acima deste valor o que representa a qualidade do modelo. Observa-se, mais uma vez, que as piores aproximações foram aquelas realizadas para o espaçamento de dormentes de 55 cm, fruto da simplificação que se teve que executar a fim de viabilizar o cálculo das deformações para este espaçamento de dormentes no programa FERROVIA 1.0.

Tabela 4.43 – Coeficientes encontrados no SPSS 14, para as equações de regressão para a nova variável Xaux considerando uma regressão linear e com a separação por tipo de trilho e valor de espaçamento. Com tratamento da dispersão.

Coeficientes encontrados para cada variável da equação de regressão com Xaux					
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$				Tratamento de dispersão	
Onde $y =$ deformação (cm) A0 = constante calculada pelo SPSS A1, A2 e A3 = Valores calculado pelo SPSS					
Para Dormente nº 4					
Caso	Ao	A1	A2	A3	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,59493382	-0,14789622	0,01159862	-0,00030016	0,943
TR45 - Espaçamento 55 cm	0,49488711	-0,11461728	0,00833008	-0,00019938	0,916
TR45 - Espaçamento 60 cm	0,34057431	-0,07135476	0,00466133	-0,00010143	0,970
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,59624244	-0,15011313	0,01180810	-0,00030643	0,938
TR57 - Espaçamento 55 cm	0,48362113	-0,11385488	0,00829152	-0,00019890	0,913
TR57 - Espaçamento 60 cm	0,32909133	-0,06909432	0,00437367	-0,00009186	0,962
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,59129010	-0,15013647	0,01182579	-0,00030730	0,937
TR68 - Espaçamento 55 cm	0,47722060	-0,11359244	0,00827569	-0,00019862	0,911
TR68 - Espaçamento 60 cm	0,34577650	-0,07253257	0,00474661	-0,00010340	0,976
Para Dormente nº 5					
Caso	Ao	A1	A2	A3	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,58954086	-0,16022574	0,01265642	-0,00033031	0,939
TR45 - Espaçamento 55 cm	0,47808214	-0,12479285	0,00913800	-0,00022067	0,903
TR45 - Espaçamento 60 cm	0,30594526	-0,07863107	0,00524103	-0,00011645	0,944
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,65628470	-0,17959207	0,01443121	-0,00038148	0,913
TR57 - Espaçamento 55 cm	0,47296351	-0,12407949	0,00912018	-0,00022100	0,904
TR57 - Espaçamento 60 cm	0,30842981	-0,07837341	0,00513144	-0,00011176	0,945
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,59743950	-0,16223925	0,01284186	-0,00033572	0,934
TR68 - Espaçamento 55 cm	0,47001626	-0,12328837	0,00904471	-0,00021882	0,903
TR68 - Espaçamento 60 cm	0,30982988	-0,07922841	0,00526988	-0,00011688	0,952
Para Dormente nº 6					
Caso	Ao	A1	A2	A3	R <sup>2</sup>
TR45 - Espaçamento 50 cm	0,56614816	-0,16727890	0,01329276	-0,00034934	0,933
TR45 - Espaçamento 55 cm	0,43983057	-0,13110239	0,00972405	-0,00023786	0,891
TR45 - Espaçamento 60 cm	0,24949317	-0,08181369	0,00547951	-0,00012185	0,899
TR57 - Espaçamento 50 cm	0,58196689	-0,16919597	0,01344636	-0,00035330	0,930
TR57 - Espaçamento 55 cm	0,44419069	-0,12985589	0,00961801	-0,00023499	0,892
TR57 - Espaçamento 60 cm	0,28508373	-0,08871550	0,00604950	-0,00013660	0,916
TR68 - Espaçamento 50 cm	0,58476145	-0,16877940	0,01341198	-0,00035231	0,930
TR68 - Espaçamento 55 cm	0,44484534	-0,12834287	0,00946851	-0,00023059	0,893
TR68 - Espaçamento 60 cm	0,25190832	-0,08180226	0,00545019	-0,00012071	0,912

Com as equações anteriores podem-se prever as deformações com os valores dos módulos de elasticidade do lastro e da plataforma, ou, por retro-análise com os valores de deformação obter os valores dos módulos de elasticidade dessas camadas. Importante notar que esse estudo foi realizado para 20 toneladas por eixo, ou seja, as equações são diretamente válidas para essa carga. Porém, como analisado no início desta seção, a deformação aumenta de forma linear com o aumento da carga, assim, caso queira utilizar-se de uma carga de 10 toneladas por eixo, por exemplo, basta transformar a deformação encontrada para a base 20, podendo-se utilizar as expressões anteriores. Exemplificando: para um deslocamento vertical unitário (1cm) para uma carga por eixo de 10 toneladas, devemos aplicar nas fórmulas acima um deslocamento vertical de 2,0 cm, proveniente da razão entre 20 e 10 toneladas. Se para uma carga de 40 toneladas por eixo o deslocamento vertical for unitário (1 cm) deve-se lançar nas expressões um deslocamento de 0,5 cm, e assim por diante.

Utilizando-se as equações anteriores, exemplifica-se, para o cálculo dos módulos que satisfazem as equações para TR45 e espaçamento dos dormentes de 60 cm. Observando-se a matriz de deformações para módulo do lastro de 1500 e módulo da plataforma de 200 obtiveram-se os seguintes deslocamentos verticais para os dormentes D4, D5 e D6.

$$D4 = 0,0054132 \text{ cm}; \quad D5 = -0,068852 \text{ cm}; \quad D6 = -0,139834 \text{ cm}$$

Tem-se, desta forma, três equações e duas variáveis. Escolhendo-se duas das equações deve-se resolver o sistema formado ou partir para uma solução gráfica. A solução gráfica pode ser necessária já que as equações não obtiveram um  $R^2 = 1$ , ou seja, existe um erro. Desta forma, constrói-se uma planilha com pares de valores prováveis do módulo de elasticidade do lastro e do módulo de elasticidade da plataforma obtendo-se os gráficos que seguem.

Percebe-se nas figuras 4.24 e 4.25 que os valores que satisfazem as duas equações estão no entorno de 210 kgf/cm<sup>2</sup> para o módulo de elasticidade da plataforma e 145 kgf/cm<sup>2</sup> para o módulo de elasticidade do lastro, próximo dos valores de origem. Torna-se necessário calcular os intervalos de validade das equações anteriores para facilitar a resolução do sistema linear.

Figura 4.24: Cálculo Gráfico do valor do Módulo de Elasticidade da Plataforma para o Trilho TR 45 e Espaçamento de 60 cm para os dormentes D4 e D6 e carga por eixo de 20 toneladas;

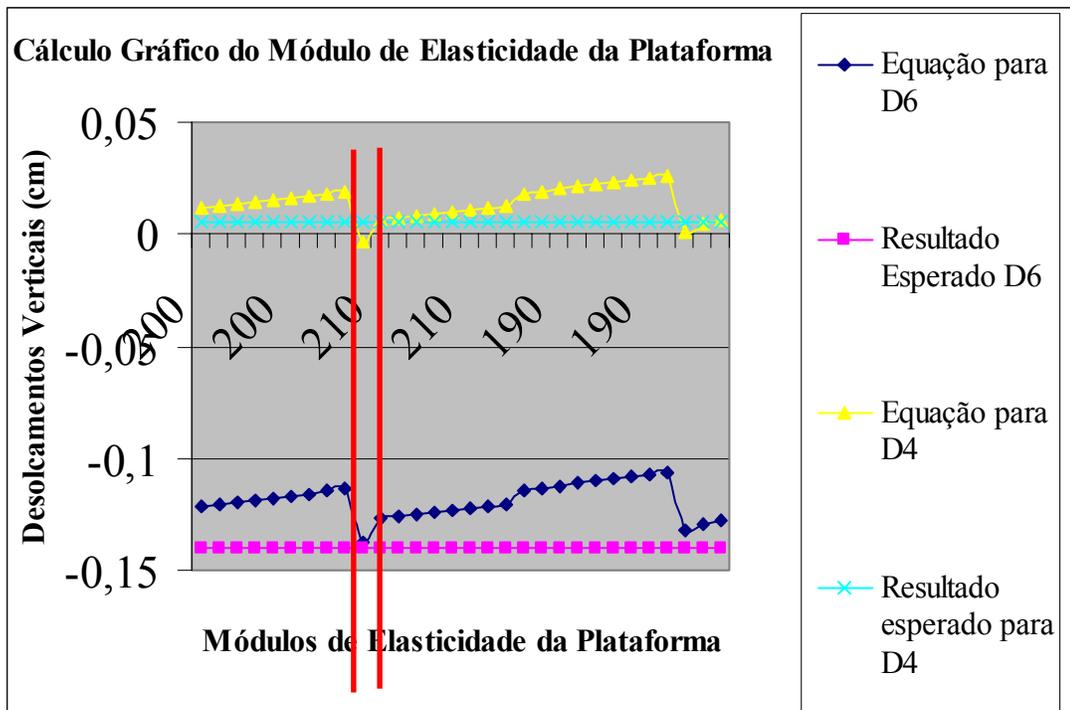
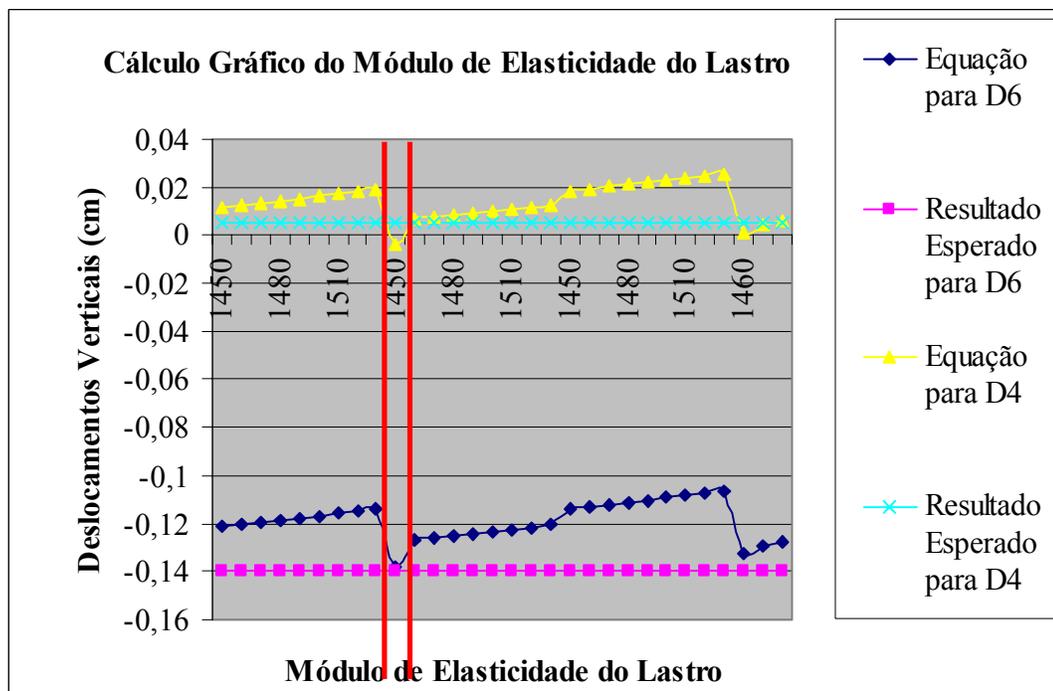


Figura 4.25: Cálculo Gráfico do valor do Módulo de Elasticidade da Lastro para o Trilho TR45 e Espaçamento de 60 cm para os dormentes D4 e D6 e carga por eixo de 20 toneladas;



## 4.5 – Intervalo de Previsão Estatística para os modelos propostos

Considerando-se as equações apresentadas na Tabela 4.43 como aquelas que melhor representam a deformação vertical da via de acordo com os cálculos realizados pelo programa FERROVIA 1.0, torna-se fundamental descobrir o intervalo de variação desses modelos, já que, os mesmos, foram calculados através de critérios estatísticos. De acordo com TRIOLA (1998) toda estimativa tem um erro padrão que provoca um intervalo de variação para menor ou para maior em um modelo. Desta forma, a análise consiste em primeiro definir o erro padrão para cada uma das 27 equações e, finalmente, construir as equações que representam o intervalo inferior e superior da variação dos resultados do modelo. Para o cálculo do erro padrão utiliza-se a equação:

$$S_e = \sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / n-2} \quad (4.6)$$

Onde:

$S_e$  – Desvio padrão dos valores de  $y_i$ ;

$y_i$  – Valores observados através do FERROVIA 1.0;

$\hat{y}_i$  – Valores previstos pelo modelo calculado pelo SPS 14.0;

TRIOLA (1998) observa que para a construção de um intervalo de previsão para o verdadeiro valor de “y” viabiliza-se uma vez que as equações de regressão são determinadas usando dados amostrais e supõe-se que os valores de x e y tenham uma distribuição normal bivariada. Para a construção do intervalo, utiliza-se de uma distribuição *t* com  $n - 2$  graus de liberdade. Desta forma, dada uma equação de regressão, o intervalo de variação dos resultados do modelo é dado por:

$$\hat{y} - E < y < \hat{y} + E \quad (4.7)$$

Onde E – Erro máximo da estimativa;

Para o cálculo de E utiliza-se a expressão:

$$E = t_c S_e \sqrt{1 + 1/n + (n(x_o - x_{méd})^2 / n \sum x^2 - (\sum x)^2)} \quad (4.8)$$

O valor “ $t_c$ ” na expressão refere-se a Distribuição  $t$  para um determinado nível de confiança estatística. No nosso estudo utilizar-se-á um nível de confiança de 95%, ou seja, 95% dos valores de “ $y$ ” poderão ser explicados pelas curvas de intervalo inferior e superior calculadas. Utilizando-se a matriz dos valores de deformação calculada pelo FERROVIA 1.0 e a equações de regressão extraídas do SPSS 14.0 parte-se para o cálculo das equações que representam as variações inferior e superior para cada uma das 27 equações da Tabela 4.43 proposta.

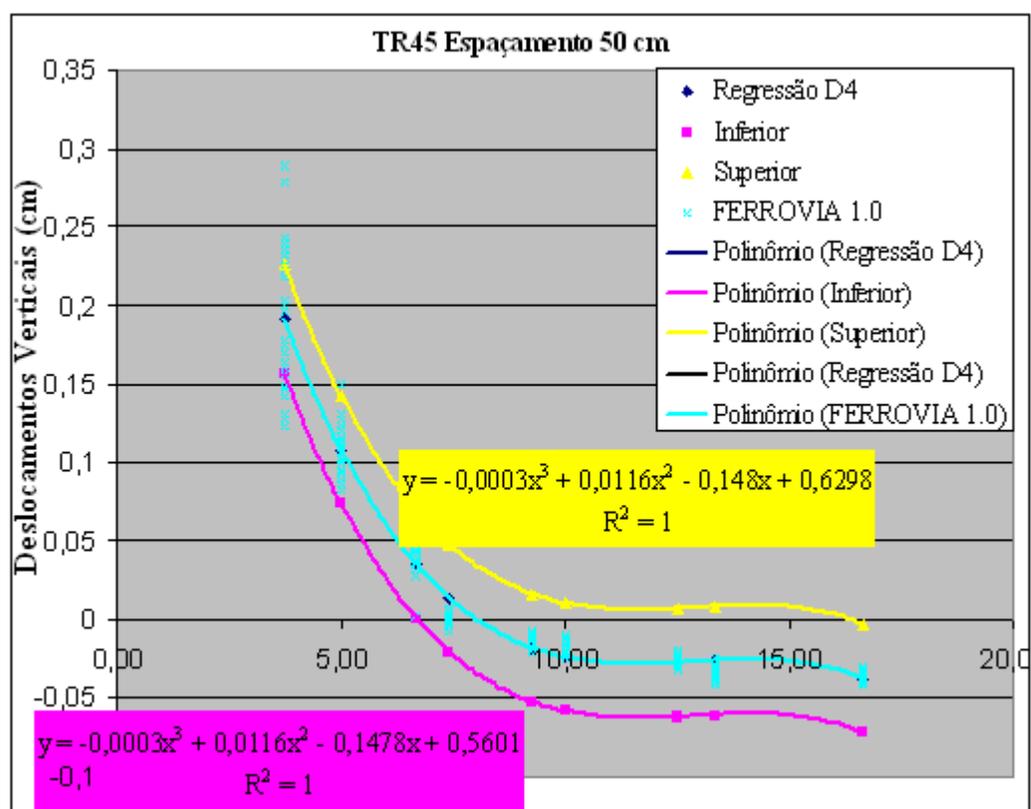


Figura 4.26: Equações do intervalo inferior e superior da equação de regressão para Trilho TR 45 e Espaçamento de Dormentes de 50 cm para o Dormente D4;

O intervalo apresentado na figura 4.26 é a representação gráfica da variação da equação de regressão, linha azul escuro sobre a linha azul clara que é a linha dos valores de deformação calculados pelo FERROVIA 1.0. O limite inferior está apresentado pela linha rosa e o limite superior pela linha amarela, calculados pelas expressões apresentadas nesta seção. Importante notar que os pontos de dispersão em azul claro estão 95% dentro do intervalo representado pelas equações de intervalo de previsão. Apresentar-se-á, para os outros intervalos de tipo de trilho/espacamento dos dormentes, apenas as equações, as tabelas 4.44, 4.45 e 4.46, para os

dormentes D4, D5 e D6 respectivamente, que permitem traçar gráficos para os outros modelos da Tabela 4.43.

Tabela 4.44 – Equações para os intervalos inferiores e superiores para os modelos propostos na Tabela 4.43 para o dormente D4;

Equações para o intervalo de previsão inferior e superior dos modelos propostos				
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$				95% de confiança
Onde $y =$ deformação (cm)				
A0 = constante calculada pelo SPSS				
A1, A2 e A3 = Valores calculado pelo SPSS				
Para Dormente nº 4				
Caso	A0	A1	A2	A3
<b>TR45 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,59493382</b>	<b>-0,14789622</b>	<b>0,01159862</b>	<b>-0,00030016</b>
Limite Inferior	0,56010000	-0,14780000	0,01160000	-0,00030000
Limite Superior	0,62980000	-0,14800000	0,01160000	-0,00030000
<b>TR45 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,49488711</b>	<b>-0,11461728</b>	<b>0,00833008</b>	<b>-0,00019938</b>
Limite Inferior	0,45940000	-0,11450000	0,00830000	-0,00020000
Limite Superior	0,53040000	-0,11470000	0,00830000	-0,00020000
<b>TR45 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,34057431</b>	<b>-0,07135476</b>	<b>0,00466133</b>	<b>-0,00010143</b>
Limite Inferior	0,32650000	-0,07130000	0,00470000	-0,00010000
Limite Superior	0,35460000	-0,07140000	0,00470000	-0,00010000
<b>TR57 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,59624244</b>	<b>-0,15011313</b>	<b>0,01180810</b>	<b>-0,00030643</b>
Limite Inferior	0,55930000	-0,15000000	0,00118000	-0,00030000
Limite Superior	0,63320000	-0,15020000	0,01180000	-0,00030000
<b>TR57 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,48362113</b>	<b>-0,11385488</b>	<b>0,00829152</b>	<b>-0,00019890</b>
Limite Inferior	0,44810000	-0,11380000	0,00830000	-0,00020000
Limite Superior	0,51920000	-0,11390000	0,00830000	-0,00020000
<b>TR57 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,32909133</b>	<b>-0,06909432</b>	<b>0,00437367</b>	<b>-0,00009186</b>
Limite Inferior	0,31180000	-0,06910000	0,00440000	-0,00009000
Limite Superior	0,34640000	-0,06910000	0,00440000	-0,00009000
<b>TR68 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,59129010</b>	<b>-0,15013647</b>	<b>0,01182579</b>	<b>-0,00030730</b>
Limite Inferior	0,55420000	-0,15000000	0,01180000	-0,00030000
Limite Superior	0,62830000	-0,15020000	0,01180000	-0,00030000
<b>TR68 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,47722060</b>	<b>-0,11359244</b>	<b>0,00827569</b>	<b>-0,00019862</b>
Limite Inferior	0,44150000	-0,11350000	0,00830000	-0,00020000
Limite Superior	0,51300000	-0,11370000	0,00830000	-0,00020000
<b>TR68 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,34577650</b>	<b>-0,07253257</b>	<b>0,00474661</b>	<b>-0,00010340</b>
Limite Inferior	0,31540000	-0,07250000	0,00470000	-0,00010000
Limite Superior	0,37620000	-0,07260000	0,00470000	-0,00010000

Tabela 4.45 – Equações para os intervalos inferiores e superiores para os modelos propostos na Tabela 4.43 para o dormente D5;

Equações para o intervalo de previsão inferior e superior dos modelos propostos				
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$				95% de confiança
Onde		y = deformação (cm)		
		A0 = constante calculada pelo SPSS		
		A1, A2 e A3 = Valores calculado pelo SPSS		
Para Dormente nº 5				
Caso	A0	A1	A2	A3
<b>TR45 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,58954086</b>	<b>-0,16022574</b>	<b>0,01265642</b>	<b>-0,00033031</b>
Limite Inferior	0,55080000	-0,16010000	0,01270000	-0,00030000
Limite Superior	0,62830000	-0,16030000	0,01270000	-0,00030000
<b>TR45 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,47808214</b>	<b>-0,12479285</b>	<b>0,00913800</b>	<b>-0,00022067</b>
Limite Inferior	0,43670000	-0,12470000	0,00910000	-0,00020000
Limite Superior	0,51950000	-0,12490000	0,00910000	-0,00020000
<b>TR45 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,30594526</b>	<b>-0,07863107</b>	<b>0,00524103</b>	<b>-0,00011645</b>
Limite Inferior	0,28470000	-0,07860000	0,00520000	-0,00010000
Limite Superior	0,32720000	-0,07870000	0,00520000	-0,00010000
<b>TR57 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,65628470</b>	<b>-0,17959207</b>	<b>0,01443121</b>	<b>-0,00038148</b>
Limite Inferior	0,61430000	-0,17950000	0,01440000	-0,00040000
Limite Superior	0,69820000	-0,17970000	0,01440000	-0,00040000
<b>TR57 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,47296351</b>	<b>-0,12407949</b>	<b>0,00912018</b>	<b>-0,00022100</b>
Limite Inferior	0,43280000	-0,12400000	0,00910000	-0,00020000
Limite Superior	0,51310000	-0,12420000	0,00910000	-0,00020000
<b>TR57 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,30842981</b>	<b>-0,07837341</b>	<b>0,00513144</b>	<b>-0,00011176</b>
Limite Inferior	0,28530000	-0,07840000	0,00510000	-0,00010000
Limite Superior	0,28530000	-0,07830000	0,00510000	-0,00010000
<b>TR68 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,59743950</b>	<b>-0,16223925</b>	<b>0,01284186</b>	<b>-0,00033572</b>
Limite Inferior	0,55660000	-0,16210000	0,01280000	-0,00030000
Limite Superior	0,63830000	-0,16230000	0,01280000	-0,00030000
<b>TR68 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,47001626</b>	<b>-0,12328837</b>	<b>0,00904471</b>	<b>-0,00021882</b>
Limite Inferior	0,42970000	-0,12320000	0,00900000	-0,00020000
Limite Superior	0,51030000	-0,12340000	0,00900000	-0,00020000
<b>TR68 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,30982988</b>	<b>-0,07922841</b>	<b>0,00526988</b>	<b>-0,00011688</b>
Limite Inferior	0,28370000	-0,07920000	0,00530000	-0,00010000
Limite Superior	0,33600000	-0,07930000	0,00530000	-0,00010000

Tabela 4.46 – Equações para os intervalos inferiores e superiores para os modelos propostos na Tabela 4.43 para o dormente D6;

Equações para o intervalo de previsão inferior e superior dos modelos propostos				
Forma Geral da Equação: $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$				95% de confiança
Onde $y =$ deformação (cm) $A_0 =$ constante calculada pelo SPSS $A_1, A_2$ e $A_3 =$ Valores calculado pelo SPSS				
Para Dormente nº 6				
Caso	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
<b>TR45 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,56614816</b>	<b>-0,16727890</b>	<b>0,01329276</b>	<b>-0,00034934</b>
Limite Inferior	0,52400000	-0,16720000	0,01330000	-0,00030000
Limite Superior	0,60830000	-0,16740000	0,01330000	-0,00030000
<b>TR45 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,43983057</b>	<b>-0,13110239</b>	<b>0,00972405</b>	<b>-0,00023786</b>
Limite Inferior	0,39460000	-0,13100000	0,00970000	-0,00020000
Limite Superior	0,48500000	-0,13120000	0,00970000	-0,00020000
<b>TR45 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,24949317</b>	<b>-0,08181369</b>	<b>0,00547951</b>	<b>-0,00012185</b>
Limite Inferior	0,21960000	-0,08180000	0,00550000	-0,00010000
Limite Superior	0,27940000	-0,08190000	0,00550000	-0,00010000
<b>TR57 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,58196689</b>	<b>-0,16919597</b>	<b>0,01344636</b>	<b>-0,00035330</b>
Limite Inferior	0,53800000	-0,16910000	0,01340000	-0,00040000
Limite Superior	0,62600000	-0,16930000	0,01350000	-0,00040000
<b>TR57 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,44419069</b>	<b>-0,12985589</b>	<b>0,00961801</b>	<b>-0,00023499</b>
Limite Inferior	0,39980000	-0,12980000	0,00960000	-0,00020000
Limite Superior	0,48860000	-0,13000000	0,00960000	-0,00020000
<b>TR57 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,28508373</b>	<b>-0,08871550</b>	<b>0,00604950</b>	<b>-0,00013660</b>
Limite Inferior	0,25520000	-0,08870000	0,00600000	-0,00010000
Limite Superior	0,31500000	-0,08880000	0,00610000	-0,00010000
<b>TR68 - Espaçamento 50 cm</b>	<b>0,58476145</b>	<b>-0,16877940</b>	<b>0,01341198</b>	<b>-0,00035231</b>
Limite Inferior	0,54100000	-0,16870000	0,01340000	-0,00040000
Limite Superior	0,62850000	-0,16890000	0,01340000	-0,00040000
<b>TR68 - Espaçamento 55 cm</b>	<b>0,44484534</b>	<b>-0,12834287</b>	<b>0,00946851</b>	<b>-0,00023059</b>
Limite Inferior	0,40070000	-0,12820000	0,00950000	-0,00020000
Limite Superior	0,48900000	-0,12840000	0,00950000	-0,00020000
<b>TR68 - Espaçamento 60 cm</b>	<b>0,25190832</b>	<b>-0,08180226</b>	<b>0,00545019</b>	<b>-0,00012071</b>
Limite Inferior	0,19940000	-0,08170000	0,00540000	-0,00010000
Limite Superior	0,30440000	-0,08190000	0,00550000	-0,00010000

## 4.6 – Análise dos Resultados

A primeira etapa de coleta dos resultados das correlações revelou uma alta tendência de correlação entre a deformação e o módulo de elasticidade da plataforma, para as combinações analisadas. Sendo a mesma inversamente proporcional, fato que, esperava-se, visto que uma diminuição do suporte intuitivamente acarreta um aumento de deformação.

Este fato reforça a tendência apresentada por muitos pesquisadores, entre eles RIVES, PITA E PUENTES (1979), como visto na seção 2.2.2 desta dissertação, que consideravam vital o conhecimento das características da plataforma quanto à deformação para o entendimento da degradação da via. Desta forma, observou-se através dos resultados, que a preocupação com a plataforma deve ser o ponto de partida para um bom desempenho da via. Tendência também indicada por SELIG E WATERS (1994) na seção 2.2.3 ao apresentarem a plataforma como o maior componente de suporte de resiliência da via. Na seção 2.2.5, SHENTON (1984) considera a plataforma, juntamente com o fundo do lastro, como sendo os que mais contribuem para recalques diferenciais.

Logo após o módulo de elasticidade da plataforma aparece o módulo de elasticidade do lastro. A importância do lastro frente às deformações já havia sido estudada por SHENTON (1984) e apresentada na seção 2.2.3 desta dissertação. O grau de correlação entre o lastro e a deformação apresentou-se ao redor de 0,4, porém, ao contrário do que ocorreu com o módulo de elasticidade da plataforma, a correlação foi diretamente proporcional, ou seja um aumento do módulo de elasticidade do lastro levou ao aumento da deformação. Fato de pouca facilidade de percepção, já que uma maior rigidez intuitivamente determina uma menor deformação. E que estatisticamente pode ser explicada pelo comportamento que as variáveis possuem quando em presença de outras, assumindo-se, desta forma, tendências diferentes de quando analisadas individualmente.

Isoladamente o comportamento do lastro, como apresentado na seção 4.4 condiz com pesquisas realizadas por RAYMOND & DIYALJEE (1979). Na seção 2.2.3, ao estudarem os tipos de agregados utilizados como lastros, demonstraram que agregados de maior dureza obtiveram menor deformação plástica axial.

Os outros dois fatores de certa relevância são: o espaçamento dos dormentes e a inércia dos trilhos, porém, este último, com correlação considerada apenas baixa, na ordem de 0,1. Quando considerado apenas o espaçamento dos dormentes, retirando o efeito dos outros elementos, o espaçamento dos dormentes chegou a valores da ordem de -0,3, inversamente proporcional. Esperava-se que o espaçamento dos dormentes fosse fator de maior influência na deformação. Também se esperava que a correlação fosse diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o espaçamento maior a deformação, fato que se mostrou exatamente o contrário em um estudo agrupado, quando comparado com a tendência individual apresentada pelo espaçamento dos dormentes, em que, um aumento do espaçamento gerava um aumento da deformação.

Porém SHENTON (1984), como observado na seção 2.2.3, em pesquisas com carga rolante, já havia considerado tais fatores como secundários, o espaçamento dos dormentes e a inércia dos trilhos, podendo ser levados em conta apenas para o cálculo dos esforços em cada dormente. Também na seção 2.2.5 apresentou-se que, para o mesmo autor, para linhas modernas a contribuição do espaçamento, dentro dos limites para este tipo de via, não seria de muita significância.

Estas correlações permitiram a elaboração de curvas e equações de regressão embasadas nos três principais elementos: módulo de elasticidade da plataforma, módulo de elasticidade do lastro, espaçamento dos dormentes. Descartou-se, inicialmente, a inércia do trilho, pois, como já descrito nas primeiras análises de correlação, não elevaria significativamente o  $R^2$ , acrescentando este elemento.

As primeiras regressões obtiveram  $R^2$  da ordem de 0,65 que pode ser considerado baixo para descrever um modelo ou para a predição de valores. Para três variáveis, necessita-se de três equações para resolução das mesmas. Cada equação descreve um dos pontos positivos do gráfico de deformação, considerando a referência para baixo.

Porém, mesmo com uma alta correlação entre os elementos, as regressões não convergiam para um bom modelo. Desta forma, analisou-se os gráficos de dispersão, buscando-se entender a real variação das deformações em relação às grandezas de cada elemento. Verificou-se

que cada elemento varia de forma distinta impedindo, assim, a criação de um modelo de regressão com alto valor de  $R^2$ .

Procuraram-se formas de correlacionar tais valores sem que houvesse perda de suas características. Analisou-se a grandeza dos elementos, para que se obtivesse um campo restrito de variação e que os valores não fossem dispersos. Chegou-se à relação em que o espaçamento dos dormentes é multiplicado pelo módulo de elasticidade da plataforma e dividido pelo módulo de elasticidade do lastro. Com essa relação, os resultados flutuam ao redor de 3 até 20 em números absolutos, um intervalo relativamente pequeno e, em escala, gerou uma curva mais homogênea.

Analisou-se mais uma vez as equações resultantes e as respostas obtiveram valores de  $R^2$  da ordem de 0,80. Uma melhora percentual da ordem de 20% mas que ainda não pode ser considerado uma regressão com alto valor de  $R^2$ , para isto tem-se de obter equações com  $R^2$  acima de 0,9.

Considerando-se que a inércia do trilho não possui alta correlação, mas interfere no processo de transferência dos esforços, como a determinação do tipo do trilho em campo é direta da mesma forma que é o espaçamento dos dormentes, elaboraram-se equações para cada par de espaçamento dos dormentes/inércia do trilho. Para os três tipos de trilhos estudados nesta dissertação e para os três valores de espaçamento dos dormentes. Como resultado, chegou-se a valores de regressão acima de 0,90, para alguns casos, e ao redor de 0,75 para alguns poucos casos específicos. Dos 27 resultados obtidos de  $R^2$  na Tabela 4.41, em que a melhor aproximação de regressão foi obtida com uma equação de terceiro grau do tipo  $y = A_0 + A_1.x + A_2.x^2 + A_3.x^3$ , em 15 resultados o valor de  $R^2$  foi acima de 0,90, perfazendo aproximadamente 55,6%. Ao realizar-se o tratamento da dispersão, apresentado pelas equações da tabela 4.43, a quantidade de equações com valor de  $R^2$  acima de 0,90, saltou para 23, perfazendo aproximadamente 85% do total, e também tornando mais uniforme os coeficientes de determinação para todos os casos.

Desta forma, propondo-se o último conjunto de equações para descrever a deformação vertical da via, apresentam-se, também, com uma confiança estatística de 95 %, as equações que representam o intervalo de variação para cada equação permitindo-se, assim, obter um intervalo confiável de previsão para o modelo estudado.

## **5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

### **5.1 – Conclusões**

O estudo realizado foi de grande importância tanto no aspecto da análise paramétrica realizada com as principais variáveis utilizadas no dimensionamento da estrutura da via permanente quanto pela utilização do programa FERROVIA 1.0. A análise paramétrica permite que se conheçam as principais variáveis em um dimensionamento da estrutura da via férrea e como ocorre a interação entre as mesmas, permitindo-se a busca de uma estrutura ótima em relação a deformação da via ou como ferramenta de predição de tais deformações. O Programa FERROVIA 1.0, por sua produtividade mostrou-se ferramenta de grande valia, salvo algumas limitações que serão citadas no decorrer destas conclusões.

O estudo de sensibilidade dos elementos da via permanente frente às deformações foi objeto de estudo de muitos pesquisadores. O que torna importante este tipo de análise é a interação que ocorre entre os elementos da via, devendo-se analisar a ferrovia como um sistema ou uma estrutura em que parcelas de cada elemento formam a característica final do sistema, como se apresentou no capítulo 2, na seção 2.2.2.

Este tipo de análise quantitativa é ainda pouco explorada como se observou na seção 2.3.1, onde SHENTON (1984) observa que ainda existem pontos pouco explorados na análise das deformações como o tipo de lastro ou a rigidez do mesmo. Outros pontos que merecem destaque neste tipo de análise são o espaçamento entre os dormentes, o tipo de perfil do trilho, o tipo de fixação, o tipo de dormente e fixação, a distribuição das cargas, a granulometria do lastro, em fim, a gama de elementos que interagem no processo de deformação é grande e inclui todos os elementos da via. Quantificar a influência de cada variável frente às deformações da via é,

portanto, de grande valor para tentar-se prever a deterioração da via, e, desta forma, melhorar as características dos materiais e as formas construtivas.

Neste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica dos valores dos elementos que pertencem a uma estrutura padrão de via férrea. Com esses valores realizou-se um estudo preliminar para verificar quais variáveis possuíam maior sensibilidade, podendo-se, desta forma, delimitar o objeto deste estudo. Daí também se extraiu as variáveis que não são sensíveis frente às deformações considerando os cálculos do programa FERROVIA 1.0.

Obtendo-se as variáveis de maior sensibilidade, que foram em número de 7, com 3 variações para cada uma. Desta forma tem-se um número de 3 elevado a sétima potência o que corresponde a 2187 combinações. Para todas essas combinações, calculou-se os valores das deformações no topo do trilho para os onze dormentes base do programa FERROVIA 1.0. Vale ressaltar que foi considerado, neste trabalho, apenas a bitola larga, para um tipo de truque com distância, entre os eixos, fixa.

Com os resultados das deformações, todas as combinações foram estudadas através do programa SPSS 14, onde se calculou os valores de correlação dos elementos frente às deformações. Estes cálculos demonstraram que as variáveis de maior sensibilidade frente à deformação são quatro, em ordem da maior para a menor importância: o módulo de elasticidade da plataforma, o módulo de elasticidade do lastro, o espaçamento dos dormentes e a inércia do trilho. Os dois primeiros de importância direta e os dois últimos de importância acessória.

Porém, as equações de regressão não obtiveram valores de  $R^2$  elevados para todos os casos. Tal fato é válido para novo estudo já que para o espaçamento de 50 cm e 60 cm obteve-se resultados melhores do que para espaçamento 55 cm. Desta forma, mesmo obtendo uma série de equações de boa representatividade não se conseguiu para todas as combinações modelos de regressão de grande precisão, que são aqueles que nos dão valores de  $R^2$  acima de 0,95.

Por outro lado, demonstrou-se que o módulo de elasticidade da plataforma e do lastro são peças fundamentais para a descrição da deformação através do programa FERROVIA 1.0 e também vai de encontro com as argumentações de muitos pesquisadores citados no capítulo 2

que consideram a plataforma e o lastro como de grande importância frente às deformações da via. Quando verificadas as correlações de um desses dois fatores sem a influência dos outros, obtiveram-se valores acima de 0,7 para o módulo de elasticidade da plataforma e acima de 0,5 para o módulo de elasticidade do lastro.

Faz-se importante observação sobre a deformação de acordo com o ponto de aplicação da carga. A correlação dos elementos da via com a deformação varia em relação ao ponto de aplicação das cargas, ou seja, a forma que a estrutura reage as deformações não é homogênea em relação aos pontos de aplicação das cargas, podendo um mesmo elemento ter um comportamento mais próximo do ponto de aplicação e outro mais afastado. Este fato pode ser observado na Tabela 4.22 da seção 4.3.3 deste trabalho.

Porém, um limitante para análise é a grade do programa FERROVIA 1.0. Ela poderia ser mais subdividida, possibilitando uma maior precisão quando se altera o espaçamento dos dormentes já que os pontos de aplicação das cargas não necessariamente coincidem com os nós da malha de elementos finitos do programa, fato que foi apresentado na seção 3.1.

Vale ressaltar a carência de bibliografia técnica específica para a natureza do tema tratado neste trabalho. Tal dificuldade resulta do meio ferroviário ser fechado no que tange a distribuição de informação e do intercâmbio entre profissionais. Por outro lado, essa carência de fontes espelha um tema tipicamente brasileiro, ainda pouco explorado, decorrente da realidade técnico/financeira do país.

## **5.2 – Sugestões para futuras pesquisas**

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:

- Executar a mesma análise deste trabalho, porém, calculando-se as deformações através do programa GEOTRACK;

- Refazer os cálculos, considerando-se a bitola métrica ou outro tipo de bitola já que neste trabalho considerou-se apenas a bitola larga;
- Elaborar a mesma pesquisa, porém, ao invés de definir-se a deformação como variável de controle, utilizar-se-ia o valor das tensões sobre as camadas constituintes da via;
- Elaborar a mesma pesquisa com os valores de K1 e K2 para utilizar a opção que considera a resiliência do programa FERROVIA 1.0;
- Aumentar o número de combinações através do aumento dos valores dos elementos sensíveis na busca de um coeficiente de determinação das equações de regressão mais elevado;
- Alterar as distâncias entre os eixos do truque ou aumentar o número de eixo para testar o comportamento das deformações ou tensões frente à variação deste elemento;
- Realizar a mesma pesquisa deste trabalho, ou todas as sugestões anteriores, utilizando-se também de dormente de concreto bi-bloco ou monobloco como elementos de estudos. Podendo-se, assim, analisar o comportamento da deformação ou tensão frente à variação do tipo de dormente;
- Realizar análise paramétrica visando estabelecer o ponto ótimo em que o aumento do módulo de elasticidade da plataforma é benéfico para a estrutura da via permanente como um todo;
- Em relação ao programa FERROVIA 1.0 poder-se-ia realizar melhorias como o aumento do número de dormentes da grade a fim de permitir o estudo com um truque C-C. Aumentar o número de nós na grade padrão do programa FERROVIA 1.0 aumentando a precisão de análises que necessitem de estudos paramétricos. Melhorar, também, a saída de dados do programa de forma que facilite o manuseio dos resultados e dinamizar a análise dos mesmos;
- Elaborar um procedimento para que, quando a carga se encontre fora do nó da malha de elementos finitos, possibilite a análise transferindo a mesma para um nó existente.
- Analisar o programa FERROVIA 1.0 com intuito de verificar o motivo da inconsistência encontrada em 32 variações realizadas, onde, percebeu-se que, na maioria desses valores, deformações positivas ocorriam quando se lançou valores de E do lastro de 2700 kgf/cm<sup>2</sup> e E da plataforma de 200 kgf/cm<sup>2</sup>; A estrutura em todos os casos era constituída de Lastro, Sublastro e Plataforma com espessuras de 30, 15 e 500 cm respectivamente. A carga utilizada foi de 20 T/eixo e tais inconsistência ocorreram independente do espaçamento dos dormentes, que tinham comprimento de 2,65 m;

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 7964.** “Plataforma para via férrea” , Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_ **EB 655.** “Via férrea – Lastro-padrão”. Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_ **NB 475.** “Projeto de lastro para via férrea”. Rio de Janeiro. 1990.

\_\_\_\_\_ **NBR 12320** – Trilho “Vignole” – Forma e Dimensão. Rio de Janeiro, 1979.

\_\_\_\_\_ **NB 476/79** – Dormente – procedimento. Rio de Janeiro, 1979.

**AMARAL, A.** “Manual de Engenharia Ferroviária”. Porto Alegre. Editora Globo, 1957.

**BARROS. S.T.** “O calculo das Tensões e das Deflexões do Pavimento Flexível” In.: I Simppósio sobre Pesquisas Rodoviárias realizado no Rio de Janeiro entre 16 e 31 de agosto de 1965.

**BIRMANN, F.** “ Recent Investigations of the Dynamic Modulus of Elasticity of the Track in Ballas with Regard to High Speeds”. In: Proceedings os a Symposium Held at Princeton University, pp. 197-220, April, 1975

**BRINA, H.L.** Estradas de Ferro 1 – Via Permanente. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos S.A. 1979.

**CASTRO AA.** “Revisão sistemática: análise e apresentação dos resultados”. in: Castro AA. Revisão sistemática com ou sem metanálise. São Paulo: AAC; 2001. Disponível em <<http://www.metodologia.org>> Acesso em 10/09/2007

**CERNICA, J.N.** “Geotechnical Engineering Soils Mechanics”. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1995.

**CHANG, C.S., ADEGOKE, C.W. e SELIG, E.T.** “Geotrack Model for Railroad Track Performance”. In: Journal of the Geotechnical Engineering Division. pp. 1201–1218, November, 1980.

**ESVELD, C.** “Modern Railway Track. Germany”. MRT-Productions, 1989.

**FREDERICK, C.O. e ROUND, D.J.** “Vertical track loading”. In: Track Technology – Proceedings of a conference organized by the Institution of Civil Engineers and held at the University of Nottingham, pp. 135-149, London, Thomas Telford Ltd, 1984.

**GAIOTO, N.** “Noções de Resistência ao Cisalhamento dos Solos”. São Carlos, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 1979.

**GARRIDO. JUAN.** “Mais carga nos mesmos trilhos”. Valor Setorial – Ferrovias. Edição de Valor Econômico S.A. Setembro de 2006.

**GUIMARÃES, C.A.B.** “ Análise das Solicitações Dinâmicas na Via Férrea através da Simulação da Interação entre o Veículo e a Via”. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

**HAY, W.W.** “Effect of Heavy Loads on Track”. In: 12<sup>th</sup> Annual Railroad Conference Proceedings, pp. 27-36, Pueblo, Colorado, October, 1975.

**HAY, W.W.** “Railroad Engineering”. 2. ed. New York. John Wiley & Sons, 1982.

**HIGGINS J.P.T., GREEN S.** “Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions 4.2.6”, [updated September 2006]. Disponível em <  
<http://www.cochrane.org/resources/handbook/hbook.htm>> Acesso em 06/10/2007.

**KERR, A.D.** “On the Stress Analysis of Rails and Ties” In: Report nº FRA – ORD&D – 76 – 234. Washington DC. September, 1976.

**LUNDGREN, J.R., MARTIN, G.C., HAY, W.W.** “ A simulation Model of Ballast Support and the Modulus of track elasticity” In: Civil Engineering Series, Transportation Series No. 4, University of Illinois, Urbana, September, 1970.

**LARSON, R., FARBER, B.** “ Estatística aplicada” tradução e revisão técnica Cyro de Carvalho Patarra – São Paulo: Prentice Hall, 2004

**MEDINA, J.** “Mecânica dos Pavimentos”. Rio de Janeiro. Editora UFRJ, 1997.

**MILONE, G.** “ Estatística: geral e aplicada” São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004

**MUNIZ DA SILVA, L.F. et al.** “Sleeper Lay Out Redesign of the Brazilian Southeast Railroad Net”. In: Proceedings of 8<sup>th</sup> International Heavy Haul Conference, pp. 277-286, Rio de Janeiro, Brazil, Junho, 2005.

**NUNES, R.** “MANUAL PRÁTICO DO SPSS versão 12/13”. Disponível em <  
<http://members.lycos.co.uk/renatonunes/spss13.pdf>> Acesso em 10/09/2007.

**PAIVA, C.E.L.** “Uma contribuição ao dimensionamento de subcamadas das plataformas ferroviárias”. Dissertação de Mestrado, POLI-USP, São Paulo, Brasil, 1982.

**PAIVA, C.E.L, AGUIAR P.R. e SILVA, F.C.M.** “Evaluation of Track / Ballast Behavior Under Increased Axle Load: Measuring Deflections on Track” In: Track International Heavy Haul Association - 2007 Specialist Technical Session Kiruna , Sueden 2007.

**PAIVA, C. E. L. ; GUIMARÃES, C. A. B. ; CORREIA, L. F. .M.** “Solicitações Atuantes na Infraestrutura Viária”. *In*: CONINFRA - Congresso de Infraestrutura de Transportes, 2007, São Paulo. Anais. São Paulo , SP : ANDIT - Associação Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2007. v. único.

**PFEIL, W.** Estruturas de Madeira. Ed. 5. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1994

**RAYMOND. G.P.** “Railroad Ballast Prescription: State of the Art”. *In*: Journal of the Geotechnical Engineering Division. Pp. 305 – 322, February, 1979.

**RAYMOND, G.P. e DIYALJEE, V.A.** “Railroad Ballast Load Ranking Classification”. *In*: Journal of the Geotechnical Engineering Division. Pp. 1133 – 1153, October, 1979.

**RAYMOND, W.G.** “The Elements of Railroad Engineering”. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1937.

**REVISTA FERROVIÁRIA.** “Mais toneladas por eixo”. Rio de Janeiro. Ano 65, Maio de 2005, pg 20-28;

**RIVES, F.O., PITA, A.L. e PUENTE, M.J.M..** Tratado de Ferrocarriles I – Via. Madrid. Editora Rueda, 1977.

**RODRIGUES, R.M.,.** “Análise Estrutural da Via Permanente Ferroviária” - DYNATEST ENGENHARIA Ltda, São Paulo, Brasil, Março, 1993.

**RODRIGUES, R.M.,.** “Metodologia para Projeto e Controle da Execução de Via Permanente Ferroviária” - DYNATEST ENGENHARIA Ltda, São Paulo, Brasil, Abril, 1993.

**RODRIGUES, R.M..** “Um Modelo para Análise Estrutural de Vias Permanentes Ferroviárias sobre Lastro”, X COBRAMSEF, Volume 3, pp. 755-762, Foz do Iguaçu, novembro, 1994.

**RUST, J. e SELIG, E.T.** ”Geotrack for Windows”. Amherst. University of Massachusetts, 1992

**SCHRAMM, G.** Permanent Way Technique and Permanent Way Economy. 1. ed. Otto Elsner Verlagsgesellschaft Darmstadt, 1961.

**SELIG, E.T.** “Ballast for heavy duty track”. In: Track Technology – Proceedings of a conference organized by the Institution of Civil Engineers and held at the University of Nottingham, pp. 245-252, London, Thomas Telford Ltd, 1985

**SELIG, E.T. e WATERS, J.M.** “Track Geotechnology and Substructure Management”. London, Thomas Telford Services Ltd. 1994.

**SHENTON, M.J.** “Ballast deformation and track deterioration” In: Track Technology – Proceedings of a conference organized by the Institution of Civil Engineers and held at the University of Nottingham, pp. 253-265, London, Thomas Telford Ltd, 1984.

**SPADA, J.L.G.** “Uma Abordagem de Mecânica dos Pavimentos Aplicada ao Entendimento do Mecanismo de Comportamento Tensão-Deformação da Via Férrea”. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003

**SPIEGEL, M.R.** “Estatística” Tradução: Pedro Cosentino – São Paulo – Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda, 1974.

**STOPATTO, S.** Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 1987.

**SUSLICK, S.B., FURTADO, R.** “Quantifying the value of technological, environmental and financial gain in the decision models for offshore oil exploration. Journal Of Petroleum Technology And Engineering”, London, v. 32, n. 2-4, p. 115-125, 2001

**SVENSON, M.** ”Ensaio Triaxiais Dinâmicos de Solos Argilosos” Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1980.

**TARABJI, S.D., THOMPSON, M.R.** “Track Support Systems Parameter Study – Ballast and Foundation Materials Research Program”. In: FRA-OR&D-76-256, Washington, D.C. July, 1976.

**TEIXEIRA. J.C., et al.** “Aulas Práticas de Matemática” – Volume 2 – São Paulo. Editora Ática S.A. 1988.

**TRIOLA, M.F.** “Elementary Statistics”, Addison Wesley Longman, Inc., 1998.

**“TUTORIAL SPSS 14.0”** *In:* SPSS 14.0 for Windows Evaluation Version Release 14.0.0. Copyright © SPSS Inc. (2005)

## **Anexos**

## **Anexo A - Variáveis não Sensíveis ou Linearmente Sensíveis**

Neste anexo são apresentados todas as tabelas e gráficos de deformação utilizados para estabelecer as variáveis não sensíveis ou linearmente sensíveis do programa FERROVIA 1.0.

Tabela A.1: Folha de rosto dos valores de variação do ângulo de atrito para a mesma infraestrutura

Variação dos Valores da Ângulo de Atrito das Camadas da Via para uma Mesma Infraestrutura							
Elemento	Variações						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Variação do Ângulo de Atrito</b>							
Plataforma	0,01	25	30	45	30		
Sublastro	0,01	25	30	25	30		
Lastro	0,01	25	40	25	30		
<b>Bitola</b>	<b>larga</b>						
<b>K (kN/m)</b>							
Dormente de Madeira	70000						
<b>Trilho</b>	TR 57						
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2730,5						
Área da Secção Transversal (cm <sup>2</sup> )	72,58						
Largura do Patim (cm)	13,97						
<b>Dormente</b>							
Comprimento (m)	2,65						
Largura (cm)	22						
Altura (cm)	17						
Espaçamento (cm)	60						
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000						
<b>Camadas</b>							
<b>Plataforma</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	400						
Poisson	0,45						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	500						
<b>Sublastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1000						
Poisson	0,35						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	15						
<b>Lastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	2000						
Poisson	0,35						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	30						
<b>Carga por eixo (T)</b>	20						

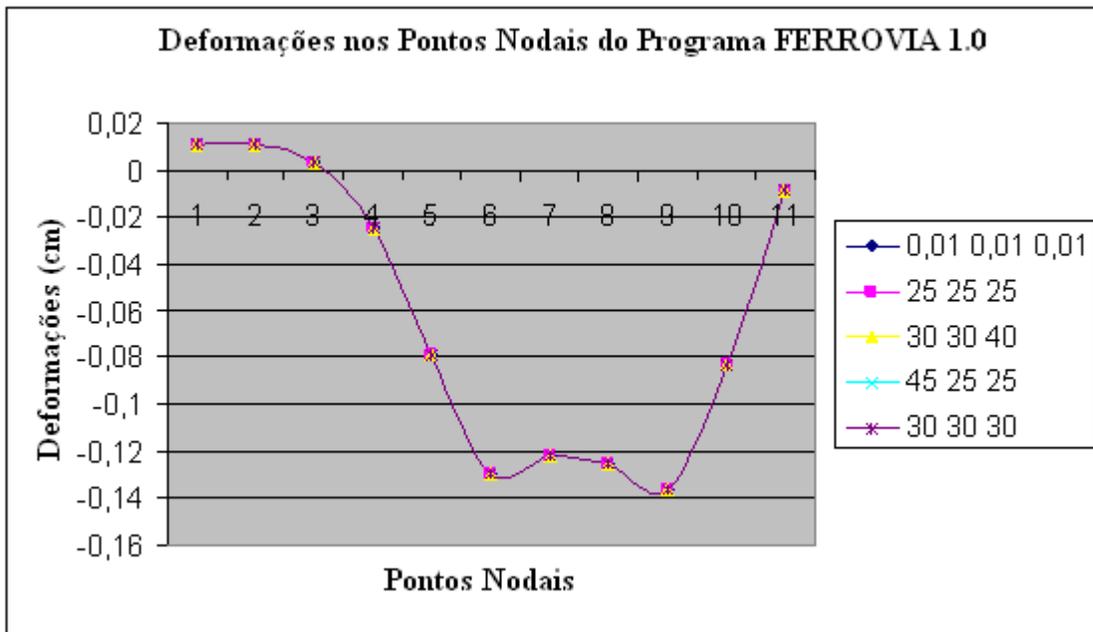


Figura A.1: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela A.1.1: Formação do Gráfico de deformação x ângulo de atrito

Tabela de Deflexões para a Combinação da folha de rosto					
	Série 1	Série 2	Série 3	Série 4	Série 5
Ângulos de Atrito	0,01 0,01 0,01	25 25 25	30 30 40	45 25 25	30 30 30
Pontos nodais					
146	0,01036511	0,01036511	0,01036511	0,01036511	0,01036511
148	0,01083492	0,01083492	0,01083492	0,01083492	0,01083492
150	0,002994601	0,002994601	0,002994601	0,0029946	0,0029946
152	-0,02495101	-0,02495101	-0,02495101	-0,02495101	-0,024951
154	-0,07891775	-0,07891775	-0,07891775	-0,07891775	-0,0789178
156	-0,1291784	-0,1291784	-0,1291784	-0,1291784	-0,1291784
158	-0,1220021	-0,1220021	-0,1220021	-0,1220021	-0,1220021
160	-0,1249327	-0,1249327	-0,1249327	-0,1249327	-0,1249327
162	-0,1363735	-0,1363735	-0,1363735	-0,1363735	-0,1363735
164	-0,08321244	-0,08321244	-0,08321244	-0,08321244	-0,0832124
166	-0,008517679	-0,008517679	-0,008517679	-0,00851768	-0,0085177

Tabela A.2: Folha de rosto dos valores de variação da coesão para a mesma infra-estrutura

Variação dos Valores da Coesão das Camadas da Via para uma Mesma Infraestrutura							
Elemento	Variações						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Variação da Coesão</b>							
Plataforma	0,01	0,3	1	5	0,01	0,01	
Sublastro	0,01	0,3	1	5	0,3	0,3	
Lastro	0,01	0,3	1	5	0,3	5	

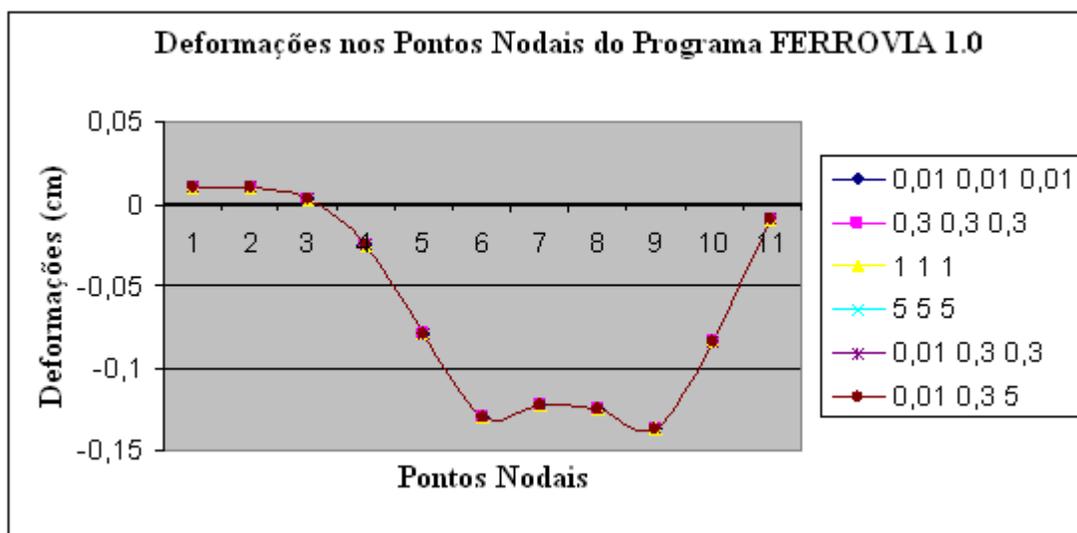


Figura A.2: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela A.2.1: Formação do Gráfico de deformação x coesões

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto						
Coesões	0,01 0,01 0,01	0,3 0,3 0,3	1 1 1	5 5 5	0,01 0,3 0,3	0,01 0,3 5
Pontos nodais						
146	0,01036511	0,01036511	0,01036511	0,01036511	0,01036511	0,01036511
148	0,01083492	0,01083492	0,01083492	0,01083492	0,01083492	0,01083492
150	0,002994601	0,002994601	0,002994601	0,0029946	0,0029946	0,0029946
152	-0,02495101	-0,02495101	-0,02495101	-0,02495101	-0,024951	-0,024951
154	-0,07891775	-0,07891775	-0,07891775	-0,07891775	-0,0789178	-0,0789178
156	-0,1291784	-0,1291784	-0,1291784	-0,1291784	-0,1291784	-0,1291784
158	-0,1220021	-0,1220021	-0,1220021	-0,1220021	-0,1220021	-0,1220021
160	-0,1249327	-0,1249327	-0,1249327	-0,1249327	-0,1249327	-0,1249327
162	-0,1363735	-0,1363735	-0,1363735	-0,1363735	-0,1363735	-0,1363735
164	-0,08321244	-0,08321244	-0,08321244	-0,08321244	-0,0832124	-0,0832124
166	-0,008517679	-0,008517679	-0,008517679	-0,00851768	-0,0085177	-0,0085177

Tabela A.3: Folha de rosto dos valores de variação do módulo de elasticidade do dormente para a mesma infra-estrutura

<b>Dormente</b>						
Comprimento (m)	2,65					
Largura (cm)	22					
Altura (cm)	17					
Espaçamento (cm)	60					
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000	105000	154000			

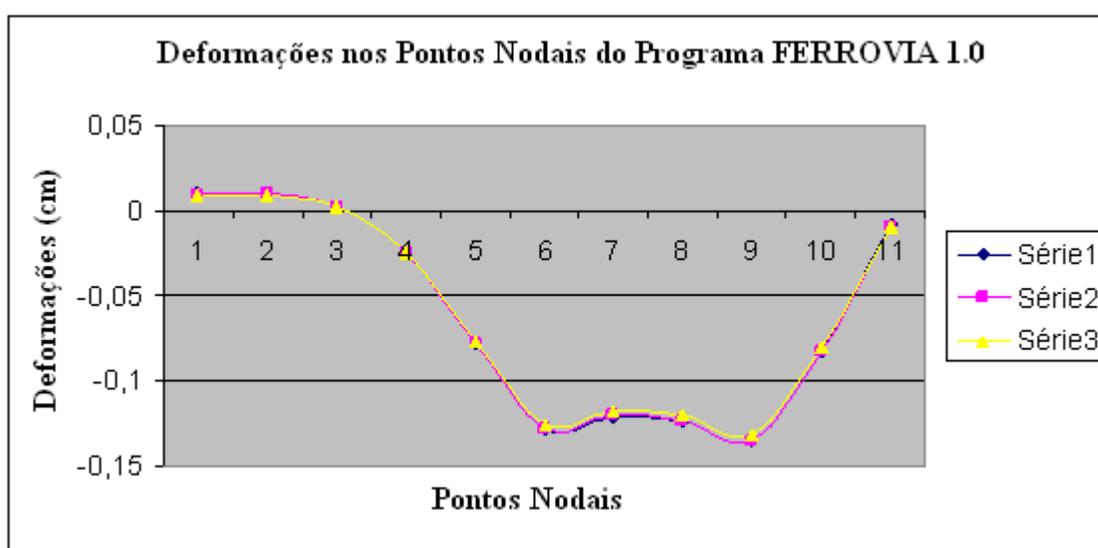


Figura A.3: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela A.3.1: Formação do Gráfico de deformação x Módulo de Elasticidade do dormente

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Módulos de Elast.	94000	105000	154000
Pontos nodais			
146	0,009896578	0,00961733	0,008721457
148	0,01039728	0,01013682	0,00930301
150	0,00271111	0,002545173	0,002021174
152	-0,0248617	-0,02480058	-0,02458049
154	-0,07828906	-0,07790179	-0,07661323
156	-0,1280706	-0,1273962	-0,1251669
158	-0,1206536	-0,1198361	-0,1171357
160	-0,1235316	-0,1226812	-0,1198744
162	-0,1351562	-0,1344136	-0,1319586
164	-0,08255711	-0,08215123	-0,08079013
166	-0,008688769	-0,008779914	-0,009029754

Tabela A.4: Folha de rosto dos valores de variação do Poisson para a mesma infra-estrutura

<b>Plataforma</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	400						
Poisson	0,45	0,4	0,5				
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	500						
<b>Sublastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1000						
Poisson	0,35	0,3	0,25				
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	15						
<b>Lastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	2000						
Poisson	0,35	0,3	0,25				
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	30						

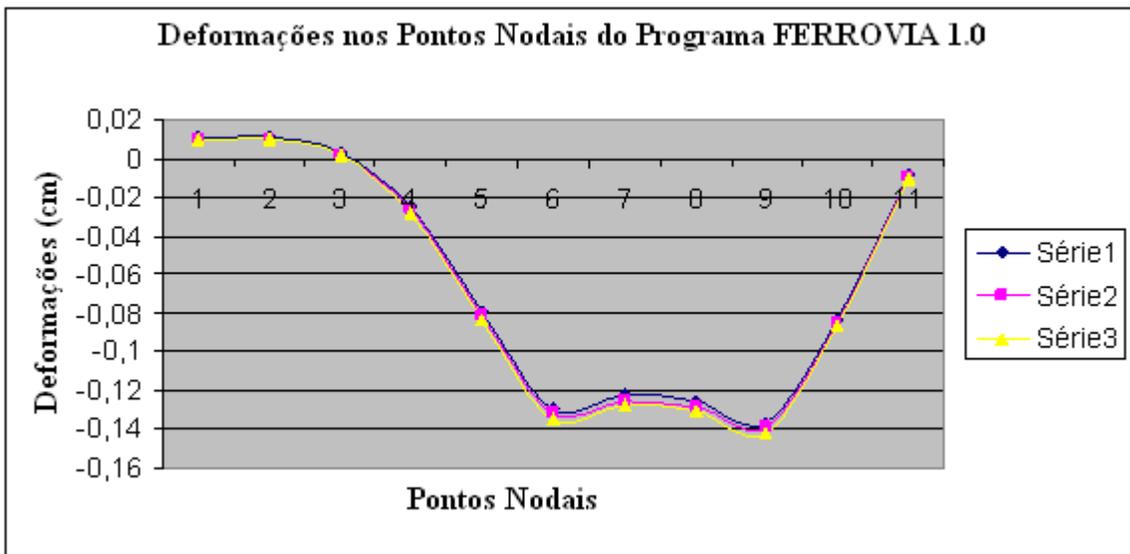


Figura A.4.1: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para o Poisson do Lastro

Tabela A.4.1: Formação do Gráfico de deformação x Poisson Lastro

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Poisson - Lastro	0,45 0,35 0,35	0,45 0,35 0,3	0,45 0,35 0,25
Pontos nodais			
146	0,01036511	0,01006846	0,00984304
148	0,01083492	0,01024674	0,009781346
150	0,002994601	0,002020896	0,001238216
152	-0,02495101	-0,02645974	-0,02768318
154	-0,07891775	-0,08104862	-0,08278489
156	-0,1291784	-0,1318331	-0,1340023
158	-0,1220021	-0,1249248	-0,1273177
160	-0,1249327	-0,1278568	-0,1302565
162	-0,1363735	-0,1390062	-0,1411668
164	-0,08321244	-0,0852155	-0,08685368
166	-0,008517679	-0,009678977	-0,01061551

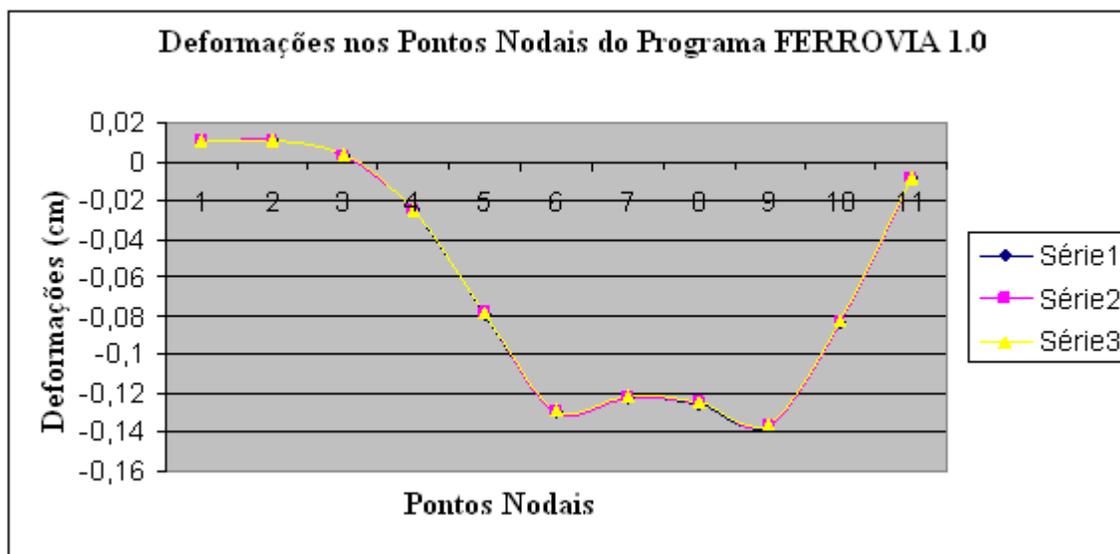


Figura A.4.2: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para o Poisson do Sub-Lastro

Tabela A.4.2: Formação do Gráfico de deformação x Poisson Sub-Laistro

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Poisson Sub lastro	0,45 0,35 0,35	0,45 0,30 0,35	0,45 0,25 0,35
Pontos nodais			
146	0,01036511	0,01041278	0,0104693
148	0,01083492	0,01091194	0,01100692
150	0,002994601	0,003110174	0,003255182
152	-0,02495101	-0,02477911	-0,0245654
154	-0,07891775	-0,07867596	-0,07838364
156	-0,1291784	-0,1288754	-0,1285186
158	-0,1220021	-0,1216687	-0,1212785
160	-0,1249327	-0,1245973	-0,124204
162	-0,1363735	-0,1360738	-0,1357153
164	-0,08321244	-0,08299609	-0,082726
166	-0,008517679	-0,008416529	-0,008272705

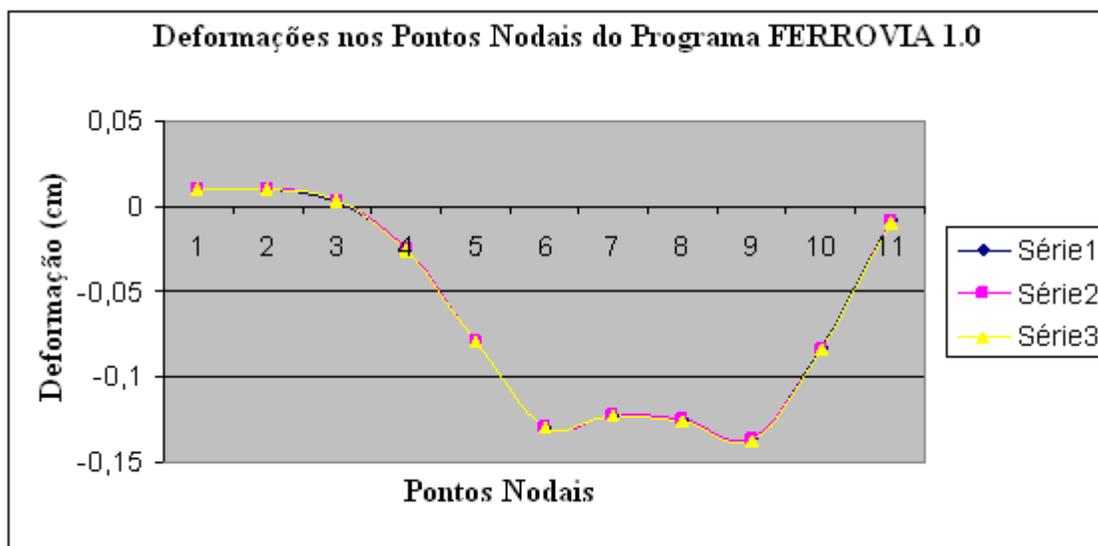


Figura A.4.3: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para o Poisson da Plataforma

Tabela A.4.3: Formação do Gráfico de deformação x Poisson Plataforma

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Poisson Plataforma	0,49 0,35 0,35	0,45 0,35 0,35	0,4 0,35 0,35
Pontos nodais			
146	0,01015092	0,01036511	0,01046264
148	0,01065648	0,01083492	0,01087964
150	0,002893097	0,002994601	0,002959552
152	-0,0249193	-0,02495101	-0,02509844
154	-0,07871997	-0,07891775	-0,079191911
156	-0,1288259	-0,1291784	-0,1295641
158	-0,1215488	-0,1220021	-0,1224605
160	-0,124463	-0,1249327	-0,1253931
162	-0,1359708	-0,1363735	-0,136773
164	-0,08292893	-0,08321244	-0,08352727
166	-0,008370901	-0,008517679	-0,008750352

Tabela A.5: Folha de rosto dos valores de variação da Espessura das Camadas de Base para a mesma infra-estrutura

<b>Plataforma</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	400						
Poisson	0,45						
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	400	500	600				
<b>Sublastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1000						
Poisson	0,35						
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	10	15	20				
<b>Lastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	2000						
Poisson	0,35						
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	25	30	35				

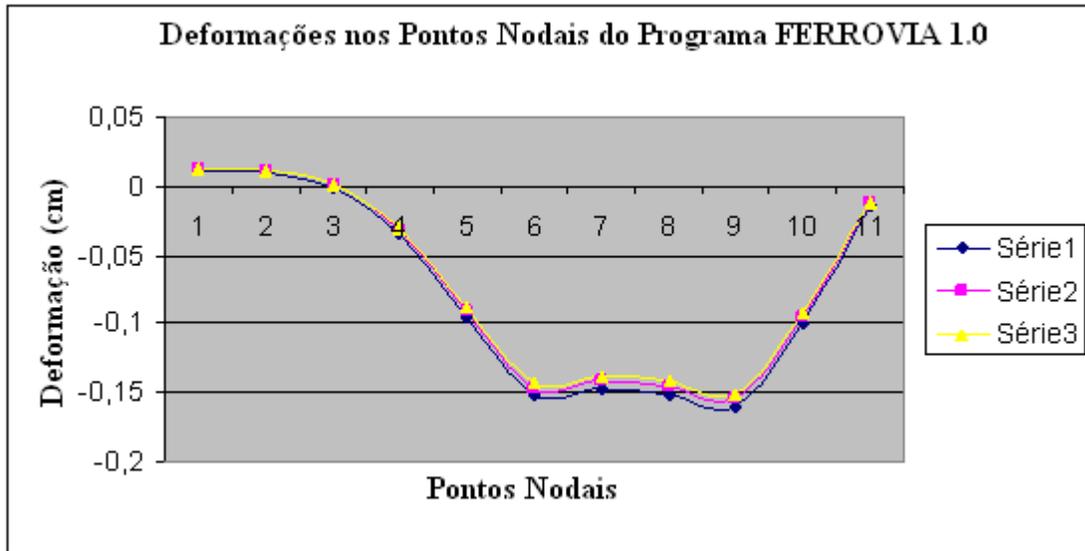


Figura A.5.1: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para Espessura do Lastro

Tabela A.5.1: Formação do Gráfico de deformação x Espessura do Lastro

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Altura do Lastro	25 15 500	30 15 500	35 15 500
Pontos nodais			
146	0,01158501	0,01222199	0,01245205
148	0,009866199	0,01110617	0,01168457
150	-0,001360534	0,00064598	0,001713834
152	-0,03470616	-0,03165791	-0,02985572
154	-0,09542699	-0,09117562	-0,08847431
156	-0,15158121	-0,1462579	-0,1427907
158	-0,1473481	-0,1415899	-0,1377427
160	-0,1505769	-0,1448263	-0,1409581
162	-0,1591282	-0,1539809	-0,1505239
164	-0,09892647	-0,09511117	-0,09264988
166	-0,01444422	-0,0124584	-0,01136824

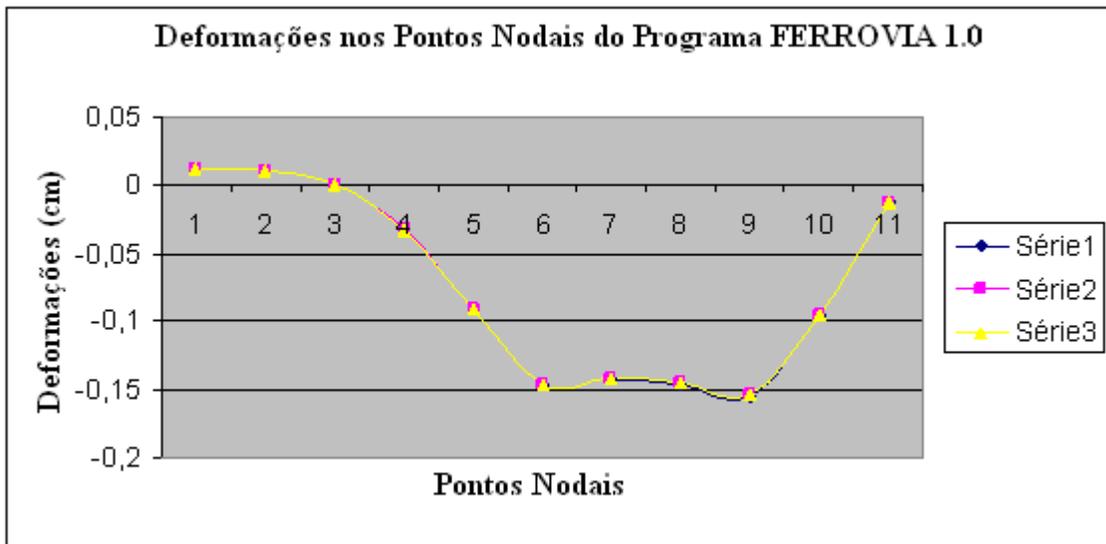


Figura A.5.2: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para Espessura do Sub-Lastro

Tabela A.5.2: Formação do Gráfico de deformação x Espessura do Sub-Lastro

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Altura do sub lastro	30 10 500	30 15 500	30 20 500
Pontos nodais			
146	0,01245376	0,01222199	0,0117604
148	0,01134239	0,01110617	0,01053953
150	0,000824335	0,00064598	3,32546E-05
152	-0,03165897	-0,03165791	-0,0321979
154	-0,09145465	-0,09117562	-0,09153367
156	-0,1467843	-0,1462579	-0,1464378
158	-0,1422398	-0,1415899	-0,1416869
160	-0,145509	-0,1448263	-0,1448777
162	-0,1545644	-0,1539809	-0,1540593
164	-0,09535722	-0,09511117	-0,09541518
166	-0,01217359	-0,0124584	-0,01312591

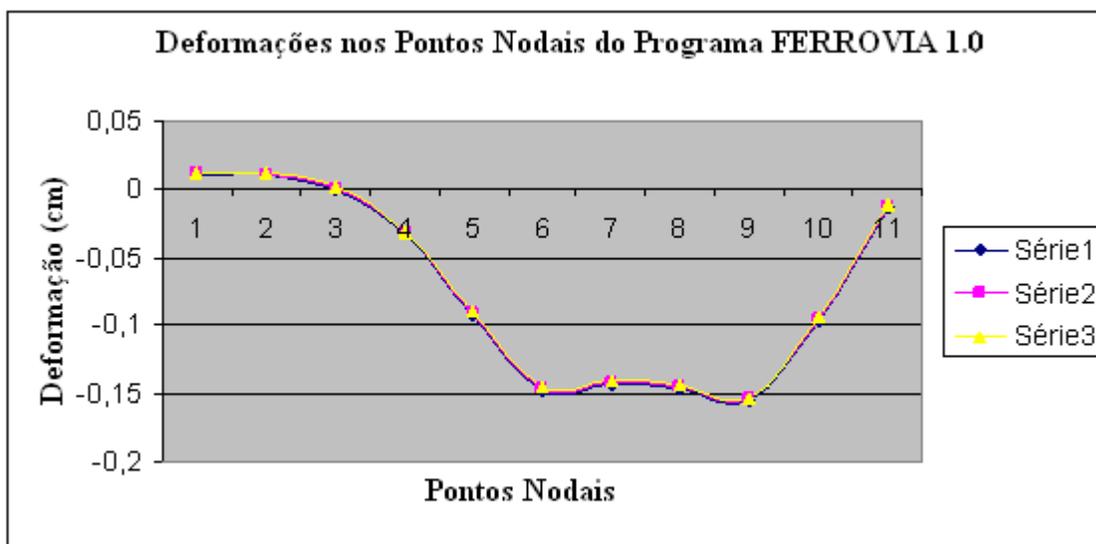


Figura A.5.3: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para Espessura da Plataforma

Tabela A.5.3: Formação do Gráfico de deformação x Espessura da Plataforma

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
	Série 1	Série 2	Série 3
Altura da Plataforma	30 15 400	30 15 500	30 15 600
Pontos nodais			
146	0,01138084	0,01222199	0,01281881
148	0,01004242	0,01110617	0,01185429
150	-0,000590916	0,00064598	0,001512269
152	-0,03297935	-0,03165791	-0,03073089
154	-0,09249395	-0,09117562	-0,09024111
156	-0,1475365	-0,1462579	-0,1453395
158	-0,142834	-0,1415899	-0,1406944
160	-0,1460054	-0,1448263	-0,1439669
162	-0,1550742	-0,1539809	-0,1531707
164	-0,0961539	-0,09511117	-0,09434754
166	-0,01346194	-0,0124584	-0,01172186

Tabela A.6: Folha de rosto dos valores de variação da Largura do Patim para a mesma infraestrutura

<b>Trilho</b>	TR 57					
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2730,5					
Área da Secção Transversal (cm <sup>2</sup> )	72,58					
Largura do Patim (cm)	13,97	13,5	14,5			

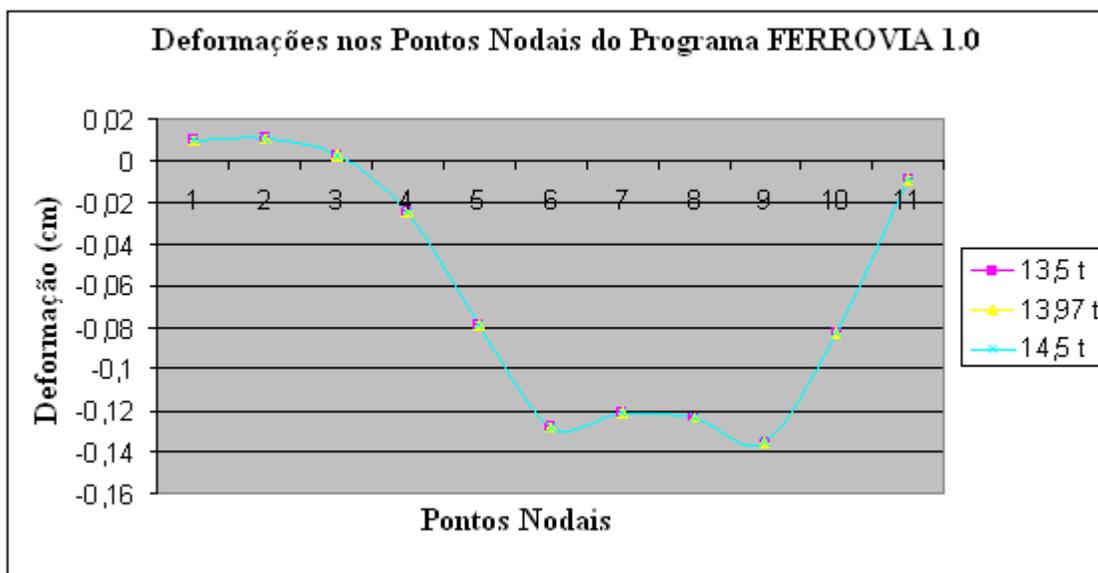


Figura A.6: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para Largura do Patim

Tabela A.6.1: Formação do Gráfico de deformação x Largura do Patim

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto			
Largura do Patim	13,5	13,97	14,5
Pontos nodais			
146	0,009896578	0,009896578	0,009896578
148	0,01039728	0,01039728	0,01039728
150	0,00271111	0,00271111	0,00271111
152	-0,0248617	-0,0248617	-0,0248617
154	-0,07828906	-0,07828906	-0,07828906
156	-0,1280706	-0,1280706	-0,1280706
158	-0,1206536	-0,1206536	-0,1206536
160	-0,1235316	-0,1235316	-0,1235316
162	-0,1351562	-0,1351562	-0,1351562
164	-0,08255711	-0,08255711	-0,08255711
166	-0,008688769	-0,008688769	-0,008688769

Tabela A.7: Folha de rosto dos valores de variação da Área da secção transversal do trilho para a mesma infra-estrutura

Trilho	TR 57					
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2730,5					
Área da Secção Transversal (cm <sup>2</sup> )	72,58	58,06	65,32	79,84	87,09	
Largura do Patim (cm)	13,97					

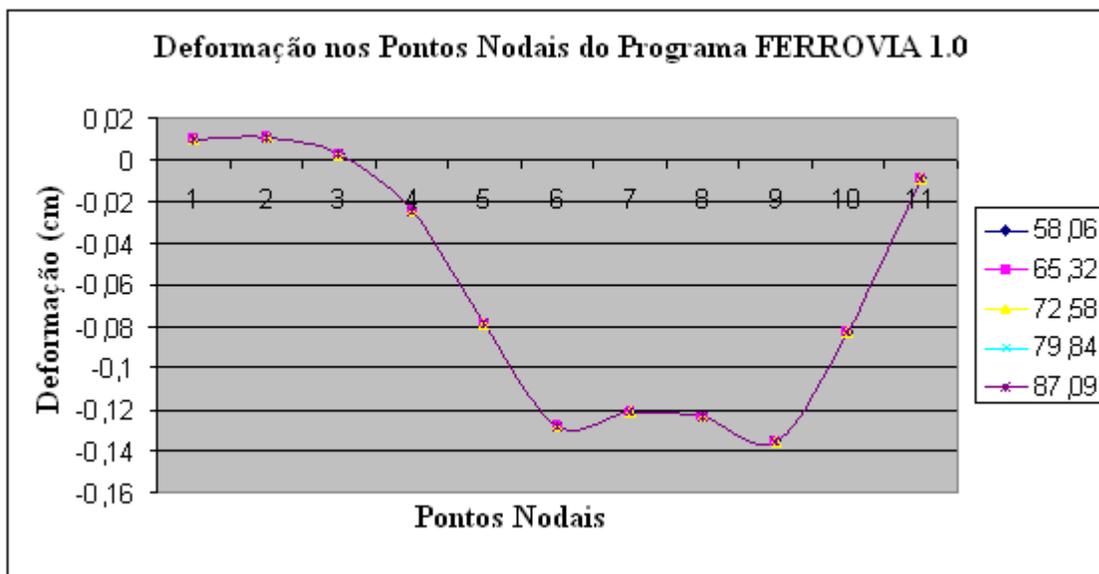


Figura A.7: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para área de secção transversal do trilho

Tabela A.7.1: Formação do Gráfico de deformação x Área de Secção Transversal do Trilho

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto					
Área do Trilho (cm <sup>2</sup> )	58,06	65,32	72,58	79,84	87,09
Pontos nodais					
146	0,00989658	0,009896578	0,009896578	0,00989658	0,00989658
148	0,01039728	0,01039728	0,01039728	0,01039728	0,01039728
150	0,00271111	0,00271111	0,00271111	0,00271111	0,00271111
152	-0,0248617	-0,0248617	-0,0248617	-0,0248617	-0,0248617
154	-0,07828906	-0,07828906	-0,07828906	-0,07828906	-0,0782891
156	-0,1280706	-0,1280706	-0,1280706	-0,1280706	-0,1280706
158	-0,1206536	-0,1206536	-0,1206536	-0,1206536	-0,1206536
160	-0,1235316	-0,1235316	-0,1235316	-0,1235316	-0,1235316
162	-0,1351562	-0,1351562	-0,1351562	-0,1351562	-0,1351562
164	-0,08255711	-0,08255711	-0,08255711	-0,08255711	-0,0825571
166	-0,00868877	-0,008688769	-0,008688769	-0,00868877	-0,0086888

Tabela A.8: Folha de rosto dos valores de variação da Carga por Eixo para a mesma infraestrutura

Variação da Carga por eixo (T)				
Carga por eixo (T)	10	20	30	40

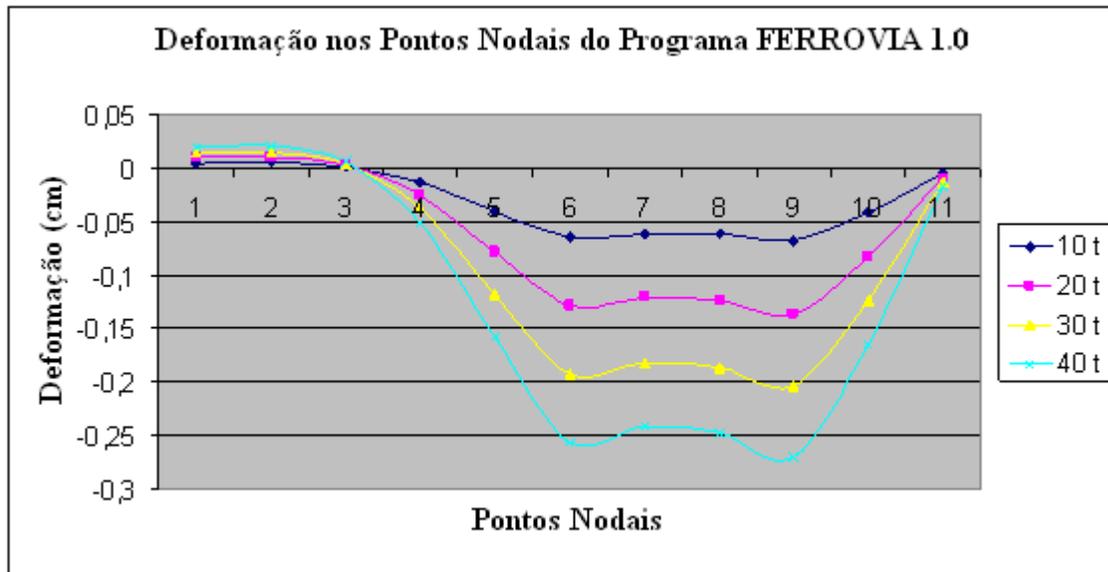


Figura A.8: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0 para variação das cargas por eixo

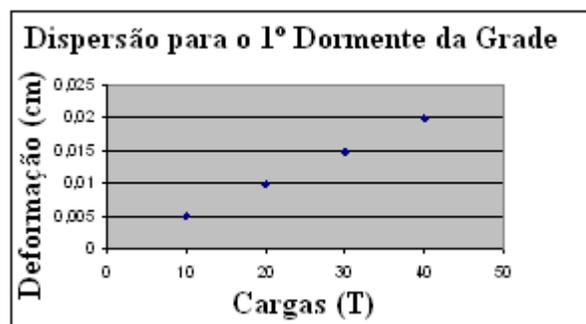


Gráfico A.8.1: Dispersão da deformação em relação a mudança de carga por eixo.

*Tabela A.8.1: Formação do Gráfico de deformação x Carga por Eixo*

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto				
Cargas (T)	10	20	30	40
Pontos nodais				
146	0,00494761	0,009896578	0,01484486	0,01979316
148	0,005198826	0,01039728	0,01559592	0,02079456
150	0,001356583	0,002711111	0,004066663	0,00542222
152	-0,0124296	-0,0248617	-0,03729253	-0,0497234
154	-0,03914465	-0,07828906	-0,1174336	-0,1565781
156	-0,06403699	-0,1280706	-0,1921059	-0,2561413
158	-0,06032633	-0,1206536	-0,1809804	-0,2413072
160	-0,06176551	-0,1235316	-0,1852974	-0,2470632
162	-0,0675802	-0,1351562	-0,2027343	-0,2703124
164	-0,04127903	-0,08255711	-0,1238357	-0,1651142
166	-0,004342603	-0,008688769	-0,01303314	-0,01737754

## **Anexo B - Variáveis sensíveis**

Neste anexo são apresentadas todas as tabelas e gráficos utilizados para determinação das variáveis sensíveis do programa FERROVIA 1.0.

Tabela B.1: Folha de rosto dos valores de variação do módulo de elasticidade do plataforma para a mesma infra-estrutura

Variação dos Valores do Módulo de Elasticidade da Plataforma para uma Mesma Infraestrutura							
Elemento	Variações						
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Bitola</b>	<b>larga</b>						
<b>K</b>	70000						
<b>Varição da Carga por eixo (T)</b>							
Carga por eixo (T)	20						
<b>Trilho</b>	TR 57						
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2730,5						
Área da Secção Transversal (cm <sup>2</sup> )	72,58						
Largura do Patim (cm)	13,97						
<b>Dormente</b>							
Comprimento (m)	2,65						
Largura (cm)	22						
Altura (cm)	17						
Espaçamento (cm)	60						
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000						
<b>Camadas</b>							
<b>Plataforma</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	100	200	400	700			
Poisson	0,45						
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	500						
<b>Sublastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1000						
Poisson	0,35						
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	15						
<b>Lastro</b>							
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	2000						
Poisson	0,35						
Ângulo de Atrito	30						
Coesão	0,1						
Espessura (cm)	30						

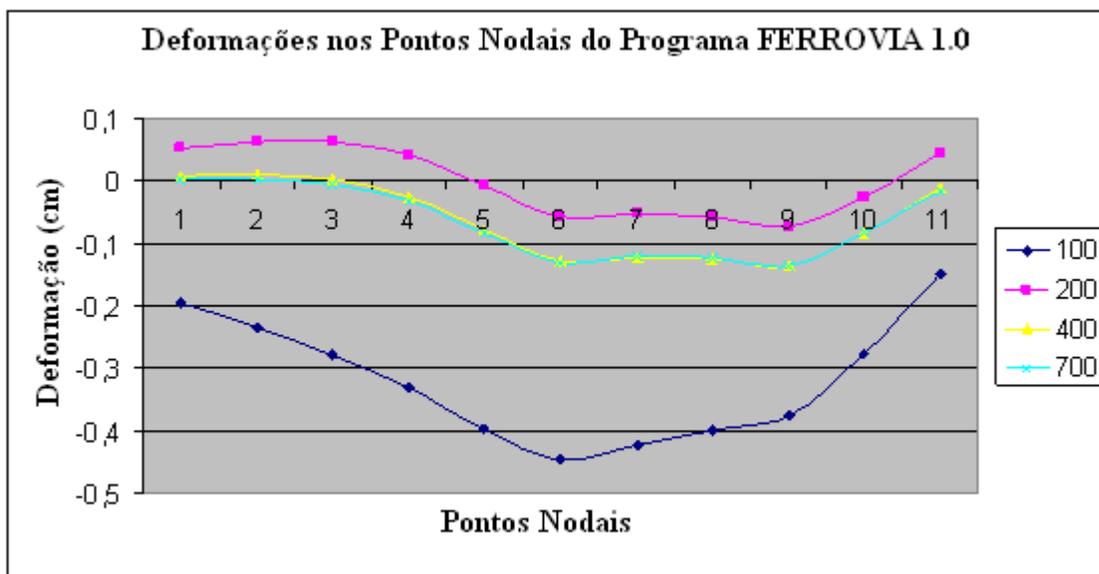


Figura B.1: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.1.1: Formação do Gráfico de deformação x módulo de elasticidade da plataforma

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto				
Módulo de Elasticidade da Plataforma	100	200	400	700
Pontos nodais				
146	-0,1939456	0,05198017	0,009896578	0,003272004
148	-0,2347617	0,06332115	0,01039728	0,002644175
150	-0,2776662	0,06468906	0,00271111	-0,005136562
152	-0,3303674	0,04293719	-0,0248617	-0,0310501
154	-0,3965667	-0,008020147	-0,07828906	-0,08144127
156	-0,4447881	-0,05734703	-0,1280706	-0,1283522
158	-0,4216679	-0,05065649	-0,1206536	-0,1193642
160	-0,3983042	-0,05639549	-0,1235316	-0,1215952
162	-0,3741721	-0,07274659	-0,1351562	-0,1337154
164	-0,2753522	-0,02502601	-0,08255711	-0,08359148
166	-0,1486095	0,04417387	-0,008688769	-0,01352602

Tabela B.2: Folha de rosto dos valores de variação do módulo de elasticidade do lastro para a mesma infra-estrutura

<b>Lastro</b>						
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	1200	1500	2000	2700		
Poisson	0,35					
Ângulo de Atrito	30					
Coesão	0,1					
Espessura (cm)	30					

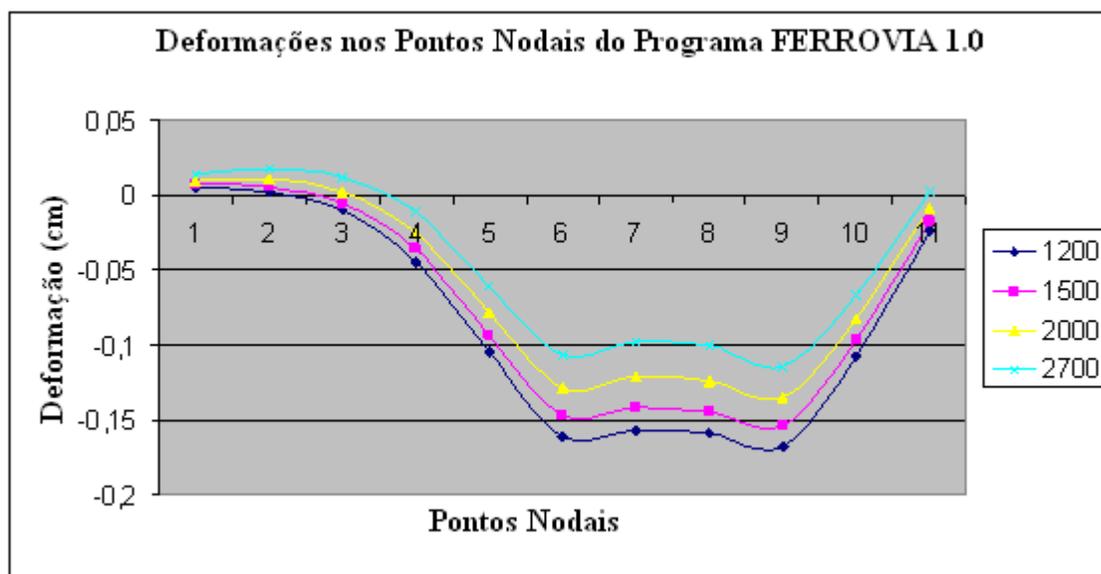


Figura B.2: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.2.1: Formação do Gráfico de deformação x módulo de elasticidade do lastro

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto				
Módulo de Elasticidade do Lastro	1200	1500	2000	2700
Pontos nodais				
146	0,005852514	0,007200256	0,009896578	0,01397762
148	0,002454529	0,005457621	0,01039728	0,01698647
150	-0,01012853	-0,005022492	0,00271111	0,01235325
152	-0,04412736	-0,03622915	-0,0248617	-0,01134543
154	-0,1047761	-0,09371625	-0,07828906	-0,06051457
156	-0,160607	-0,1468859	-0,1280706	-0,1067774
158	-0,1563537	-0,1412329	-0,1206536	-0,09754898
160	-0,1592024	-0,1440784	-0,1235316	-0,1005042
162	-0,167291	-0,1537013	-0,1351562	-0,1142745
164	-0,1074123	-0,09700704	-0,08255711	-0,06600206
166	-0,02397254	-0,01776476	-0,008688769	0,002209922

Quadro B.3: Folha de rosto dos valores de variação do espaçamento para a mesma infraestrutura

<b>Dormente</b>						
Comprimento (m)	2,65					
Largura (cm)	22					
Altura (cm)	17					
Espaçamento (cm)	50	55	60	65	70	
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	94000					

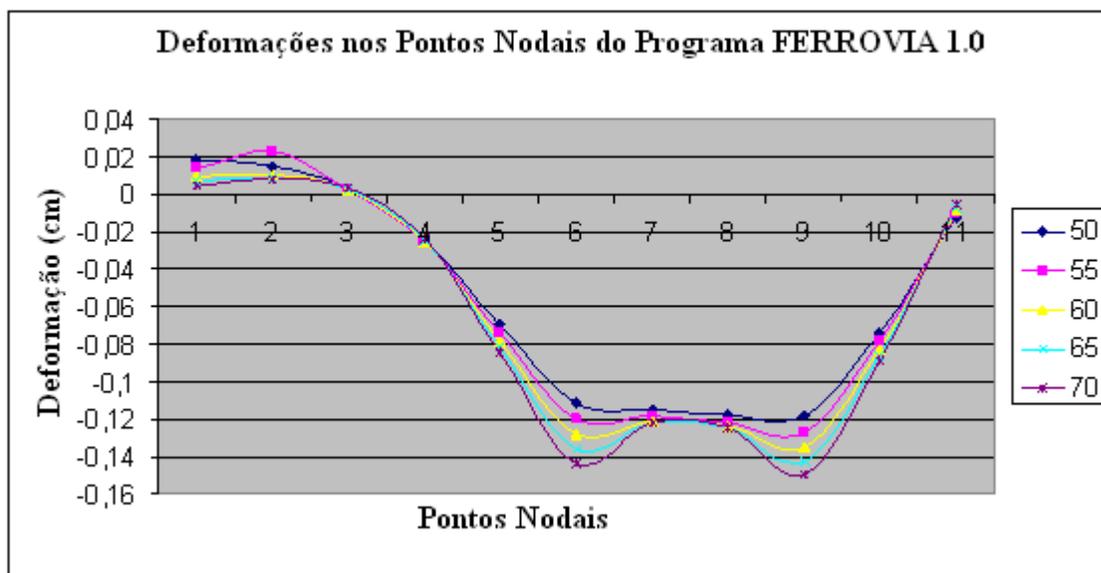


Figura B.3: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.3.1: Formação do Gráfico de deformação x espaçamento

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto					
Espaçamento	50	55	60	65	70
Pontos nodais					
146	0,01834886	0,013658798	0,009896578	0,006912963	0,004566412
148	0,01455636	0,0223703	0,01039728	0,00890823	0,007659566
150	0,003213907	0,002786607	0,00271111	0,002875431	0,003179929
152	-0,02418134	-0,02480653	-0,0248617	-0,02442136	-0,02355506
154	-0,06963608	-0,07427872	-0,07828906	-0,08172129	-0,08459984
156	-0,1114325	-0,1200247	-0,1280706	-0,1357333	-0,1431071
158	-0,1145264	-0,1183901	-0,1206536	-0,1216028	-0,1214646
160	-0,1174101	-0,121307	-0,1235316	-0,1243675	-0,124061
162	-0,1183245	-0,1270628	-0,1351562	-0,1427445	-0,1499471
164	-0,07403577	-0,07853816	-0,08255711	-0,08608229	-0,08911811
166	-0,01244656	-0,01056032	-0,008688769	-0,006807477	-0,00493524

Tabela B.4: Folha de rosto dos valores de variação da inércia do trilho para a mesma infraestrutura

Trilho						
Momento de Inércia (cm <sup>4</sup> )	2730,5	2184,4	2457,45	3003,55	3276,6	
Área da Secção Transversal (cm <sup>2</sup> )	72,58					
Largura do Patim (cm)	13,97					

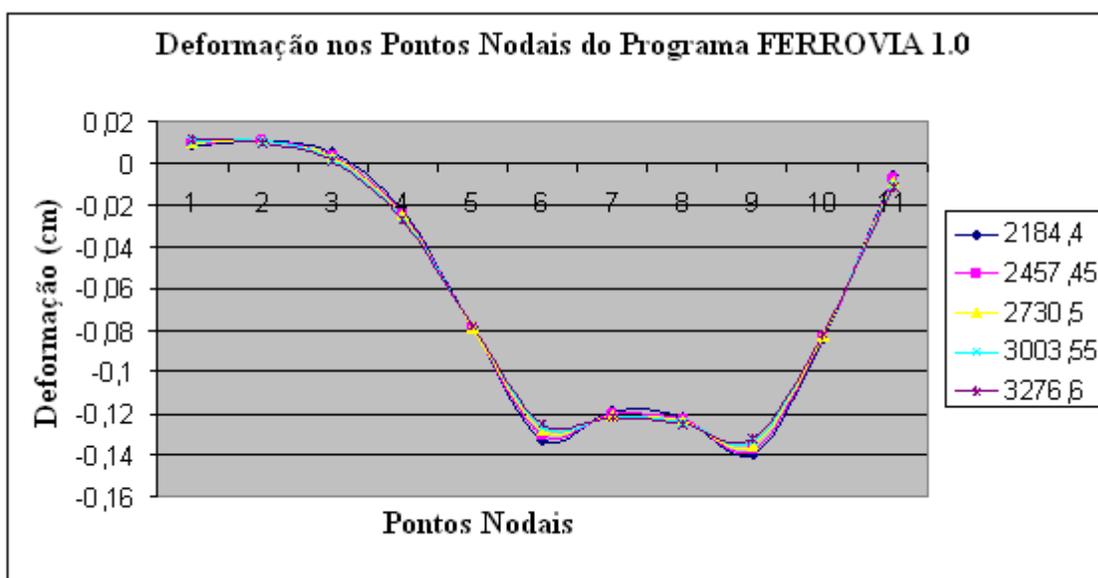


Figura B.4: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.4.1: Formação do Gráfico de deformação x inércia do trilho

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto					
Inércia do Trilho	2184,4	2457,45	2730,5	3003,55	3276,6
Pontos nodais					
146	0,00832301	0,009134151	0,009896578	0,01061151	0,01128411
148	0,01062785	0,01052444	0,01039728	0,01025644	0,010108
150	0,004851816	0,003742531	0,00271111	0,001751534	0,00085421
152	-0,0221373	-0,02358321	-0,0248617	-0,02600518	-0,02704328
154	-0,07886644	-0,07854778	-0,07828906	-0,07807665	-0,07790671
156	-0,1323726	-0,1300279	-0,1280706	-0,1264007	-0,1249569
158	-0,1187312	-0,1198231	-0,1206536	-0,1212817	-0,121757
160	-0,1215832	-0,1227028	-0,1235316	-0,1241405	-0,124588
162	-0,1396543	-0,1372324	-0,1351562	-0,1333456	-0,131754
164	-0,08374389	-0,08310946	-0,08255711	-0,08207552	-0,08166053
166	-0,005481158	-0,007154726	-0,008688769	-0,01010636	-0,01142501

Tabela B.5: Folha de rosto dos valores de variação do  $k$  da fixação para a mesma infra-estrutura

Varição do Valor de $K$ para Dormentes	$K$ (kN/m)		
Dormente de Madeira	50000	70000	90000

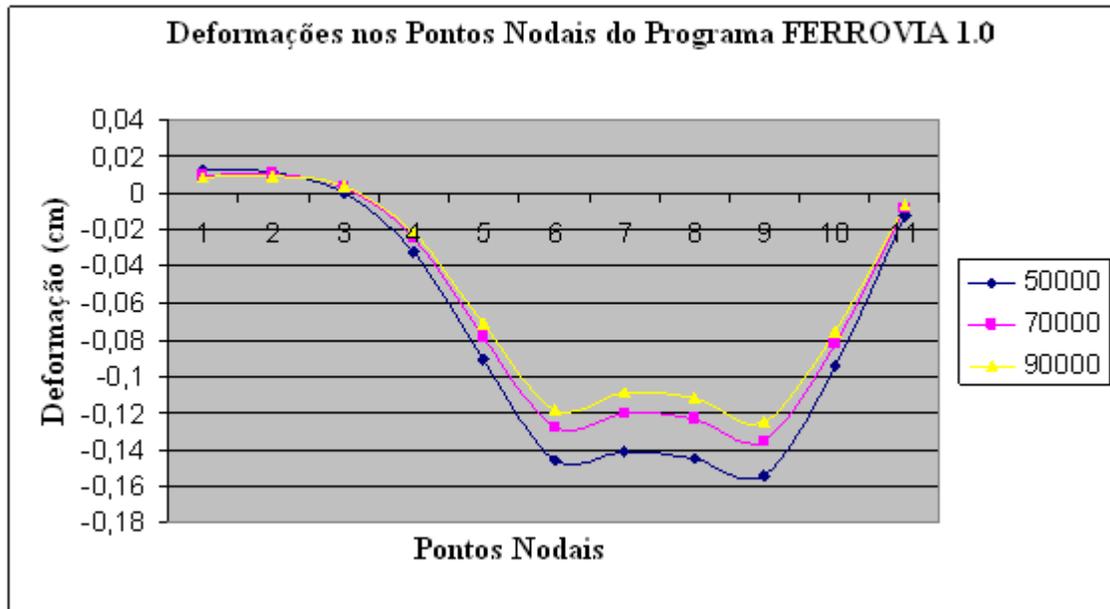


Figura B.5: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.5.1: Formação do Gráfico de deformação x  $K$  da fixação

Tabela de deflexão para a folha de rosto			
K da fixação	50000	70000	90000
Pontos nodais			
146	0,01222367	0,009896578	0,008715002
148	0,01110578	0,01039728	0,009962829
150	0,00064369	0,00271111	0,003721653
152	-0,03166063	-0,0248617	-0,02120451
154	-0,09117552	-0,07828906	-0,07113192
156	-0,1462548	-0,1280706	-0,1178894
158	-0,141591	-0,1206536	-0,1089663
160	-0,1448266	-0,1235316	-0,111614
162	-0,1539756	-0,1351562	-0,1245455
164	-0,09510882	-0,08255711	-0,07553449
166	-0,01244877	-0,008688769	-0,006814288

Tabela B.6: Folha de rosto dos valores de variação do módulo de elasticidade do sub-laastro para a mesma infra-estrutura

<b>Sublaastro</b>						
Módulo de Elasticidade (kgf/cm <sup>2</sup> )	700	800	1000	1200		
Poisson	0,35					
Ângulo de Atrito	30					
Coesão	0,1					
Espessura (cm)	15					

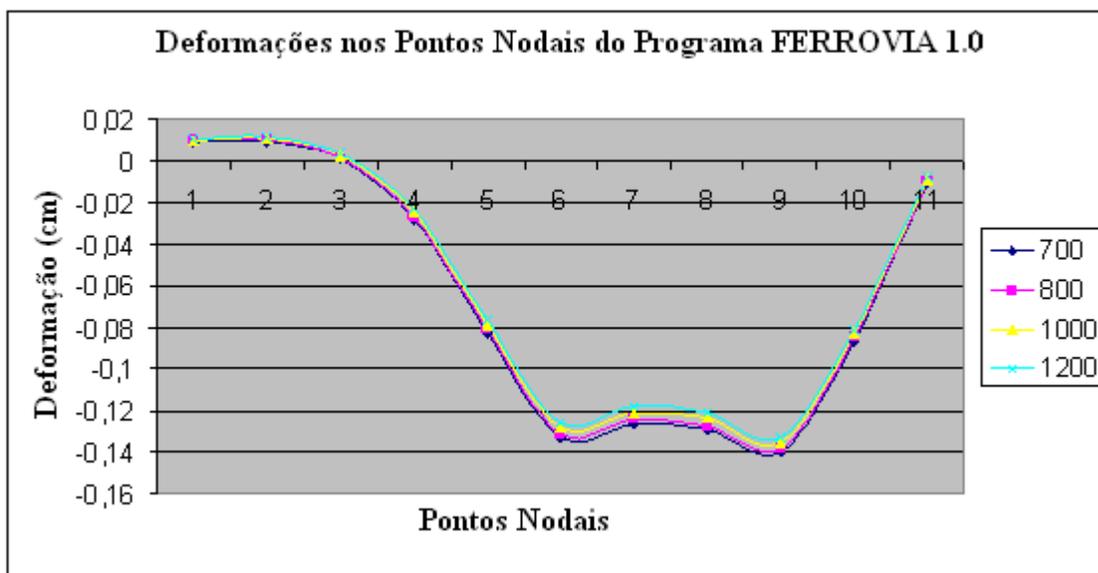


Figura B.6: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.6.1: Formação do Gráfico de deformação x Módulo de Elasticidade do Sub-Laastro

Tabela de deflexão para a combinação da folha de rosto				
Módulo de Elasticidade do Sublaastro	700	800	1000	1200
Pontos nodais				
146	0,009305627	0,009510208	0,009896578	0,0102512
148	0,009246493	0,009662188	0,01039728	0,01103465
150	0,000839605	0,001528053	0,00271111	0,003709031
152	-0,02770542	-0,02664886	-0,0248617	-0,02338178
154	-0,08224143	-0,08076618	-0,07828906	-0,07626233
156	-0,1329503	-0,1311245	-0,1280706	-0,1255877
158	-0,1260115	-0,1240017	-0,1206536	-0,1179359
160	-0,1288801	-0,1268706	-0,1235316	-0,1208187
162	-0,1399541	-0,1381508	-0,1351562	-0,1327179
164	-0,08620816	-0,0848371	-0,08255711	-0,08069398
166	-0,01082543	-0,0100255	-0,008688769	-0,007588089

Tabela B.7: Folha de rosto dos valores de variação da altura do dormente para a mesma infraestrutura

Altura do Dormente	16	17	18			
<b>Bitola</b>	<b>larga</b>					

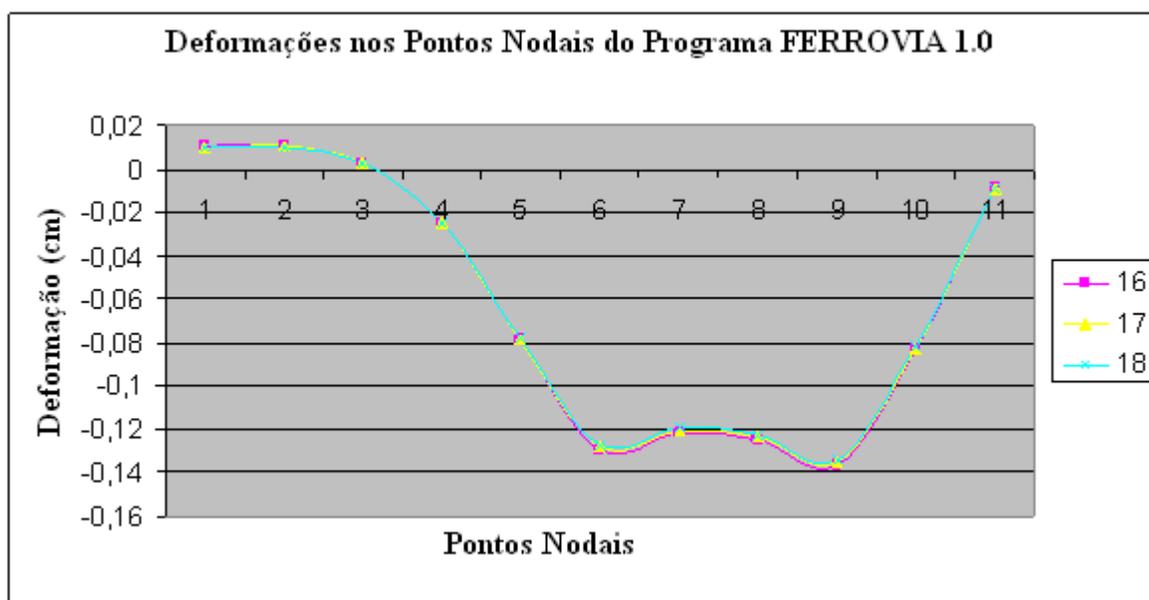


Figura B.7: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.7.1: Formação do Gráfico de deformação x Altura dos dormentes

Altura dos dormentes	16	17	18
Pontos nodais			
146	0,01036511	0,009896578	0,00946856
148	0,01083492	0,01039728	0,009997436
150	0,002994601	0,002711111	0,002455418
152	-0,02495101	-0,0248617	-0,02476951
154	-0,07891775	-0,07828906	-0,07769594
156	-0,1291784	-0,1280706	-0,1270359
158	-0,1220021	-0,1206536	-0,1193984
160	-0,1249327	-0,1235316	-0,1222259
162	-0,1363735	-0,1351562	-0,1340159
164	-0,08321244	-0,08255711	-0,08193356
166	-0,008517679	-0,008688769	-0,008827321

Tabela B.8: Folha de rosto dos valores de variação da largura do dormente para a mesma infraestrutura

Largura do dormente	22	24	26			
<b>Bitola</b>	<b>larga</b>					

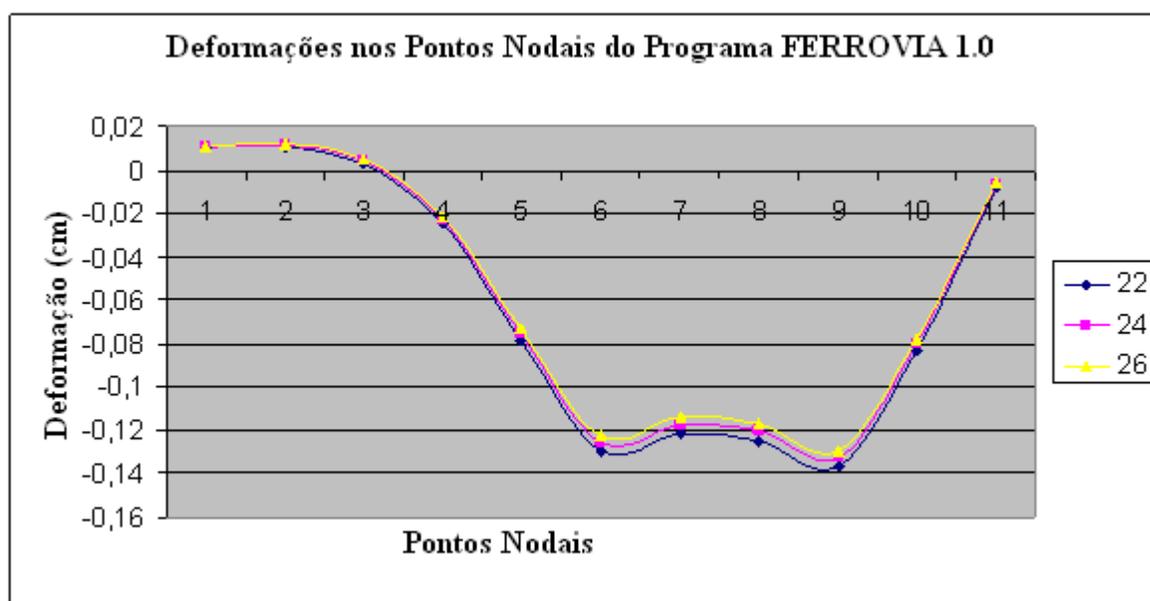


Figura B.8: Deformações no topo do trilho do eixo dos onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0

Tabela B.8.1: Formação do Gráfico de deformação x Largura dos dormentes

Tabela de deformações para a combinação da folha de rosto			
Largura dos dormentes	22	24	26
Pontos nodais			
146	0,01036511	0,01066617	0,01066173
148	0,01083492	0,01156461	0,01187026
150	0,002994601	0,00431173	0,005085848
152	-0,02495101	-0,02279536	-0,02130396
154	-0,07891775	-0,0757735	-0,07341167
156	-0,1291784	-0,1251899	-0,122081
158	-0,1220021	-0,1175663	-0,1140584
160	-0,1249327	-0,1204703	-0,1169241
162	-0,1363735	-0,1323581	-0,1291722
164	-0,08321244	-0,08018161	-0,0778175
166	-0,008517679	-0,006807914	-0,005553719

## **Anexo C – Tabela das Combinações dos Elementos de Maior Sensibilidade do programa FERROVIA 1.0 e a deformação para os onze dormentes da grade do FERROVIA 1.0**

Neste anexo apresenta-se a tabela matriz com parte das 2187 combinações realizadas entre as variáveis de maior sensibilidade do programa FERROVIA 1.0 e as deformações resultantes de cada combinação as quais se utilizou-se para o calculo das correlações entre as variáveis e a regressão linear.

Esp	I	E	E	E	K	I	16	18	10	12	14	16	18	10	12	14	16	Xar
	Trl	Las	Sb	Pat	Fx	Dm	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D0	D1	
50	1611	1500	800	200	5000	750	005591	006239	005752	0027185	-003367	-0091652	-0090572	-0096844	-0108095	-0050790	0081032	6666
50	1611	1500	800	200	5000	9007	0054809	0061704	0057105	0027156	-0033107	-0090544	-0089178	-0095421	-0108961	-0050351	0080807	6666
50	1611	1500	800	200	5000	9826	0057528	0065857	0062776	004542	-0023981	-0080039	-0078005	-0084417	-0097008	-0042276	0086227	6666
50	1611	1500	800	200	7000	750	0053834	0062016	0059162	0081709	-0025569	-0080398	-0077576	-0083646	-0096503	-0042937	0083765	6666
50	1611	1500	800	200	7000	9007	0053055	0061313	0058669	0081663	-0024925	-0079272	-0076166	-0082205	-0095346	-0042491	0083307	6666
50	1611	1500	800	200	7000	9826	0040047	0042822	0034269	0001668	-0056225	-0095554	-0058865	-0003402	0027535	0050017	0081353	6666
50	1611	1500	800	200	8400	750	0052696	0061746	0060167	0034658	-0020166	-0072858	-0068874	-0074801	-0088718	-0057692	0055497	6666
50	1611	1500	800	200	8400	9007	0051937	0061044	0059663	0034618	-0019597	-0071729	-0067458	-0073351	-0085546	-0057247	0034910	6666
50	1611	1500	800	200	8400	9826	0054746	0065175	0065285	0041966	-0010471	-0061189	-0066239	-0062291	-0077538	-0029165	0046549	6666
50	1611	2000	800	200	5000	750	0082256	0081222	0102610	0081677	0029560	-0021945	-0018122	-0020012	-0048418	0003686	0072999	5000
50	1611	2000	800	200	5000	9007	0084584	0101144	0103665	0086225	0034874	-0016110	-0012181	-0020357	-0038476	0007407	0075171	5000
50	1611	2000	800	200	5000	9826	0092034	0112169	0119947	0102276	0050074	0005538	0007888	-0001002	-0020994	0021971	0085217	5000
50	1611	2000	800	200	7000	750	0080512	0097688	0104104	0086135	0037686	-0010587	-0034979	-0012640	-0031665	0011573	0075549	5000
50	1611	2000	800	200	7000	9007	0163731	0102610	0021152	-0098819	-025492	-0325218	-0437412	-0446676	-0444513	-0270948	-0078424	5000
50	1611	2000	800	200	7000	9826	0172428	0113957	0050045	-0082641	-0236412	-0373466	-0418195	-0428234	-0397688	-0256552	-0066364	5000
50	1611	2000	800	200	8400	750	0079394	0097373	0105028	0080041	0040091	-0002984	0008818	-0003681	-0023769	0016845	0071756	5000
50	1611	2000	800	200	8400	9007	0081735	0100375	0108740	0095548	0048335	0002865	0009776	0002002	-0018390	0005666	0079248	5000
50	1611	2000	800	200	8400	9826	0090192	0111332	0122230	0109578	0066611	0022564	0029903	0021424	-0001240	0035145	0092212	5000
50	1611	2700	800	200	5000	750	0102247	0124509	0135928	0122833	0078520	0033320	0040373	0030261	0010331	0040563	0108969	3703
50	1611	2700	800	200	5000	9007	0131304	0160470	0178132	0169867	0128391	0084840	0091084	0079874	0053245	0058781	0137432	3703
50	1611	2700	800	200	5000	9826	0171218	0210021	0236440	0235315	0199202	0157571	0163172	0148285	0115047	0138489	0179637	3703
50	1611	2700	800	200	7000	750	0100548	0123996	0137334	0127157	0086613	0047475	0053634	0045586	0022225	0057487	0111348	3703
50	1611	2700	800	200	7000	9007	0129554	0159953	0179494	0174222	0136929	0096321	0104401	0098459	0065209	0093721	0139738	3703
50	1611	2700	800	200	7000	9826	0169439	0209038	0237822	0239710	0207404	0169139	0176583	0169957	0127091	0146436	0181828	3703
50	1611	2700	800	200	8400	750	009454	0123632	0138170	0129996	0092019	0052385	0062528	0054665	000247	0062790	0112835	3703
50	1611	2700	800	200	8400	9007	0128451	0159601	0180352	0177033	0142358	0104015	0113316	0102568	0073258	0090029	0141165	3703
50	1611	2700	800	200	8400	9826	0168321	0209446	0238676	0242576	0212862	0178878	0185550	0171141	0135210	0151773	0183203	3703
50	1611	1500	100	200	5000	750	0059611	0057805	0064421	0085505	-0023979	-0080920	-0079418	-0085944	-0098182	-0042550	0037199	6666
50	1611	1500	100	200	5000	9007	0059143	0057476	0064343	0085874	-0023023	-0079464	-0077699	-0084230	-0095785	-0041850	0036893	6666
50	1611	1500	100	200	5000	9826	0052595	0072458	0070947	0042899	-0012813	-0067861	-0065456	-0072216	-0085913	-0052997	0048273	6666
50	1611	1500	100	200	7000	750	0057844	0057410	0065985	0040012	-0015867	-0069662	-0066993	-0072716	-0086562	-0034588	0039905	6666
50	1611	1500	100	200	7000	9007	0057426	0057118	0065881	0040318	-0014994	-0068250	-0064689	-0070961	-0085101	-0033969	0039586	6666
50	1611	1500	100	200	7000	9826	0060865	0072029	0072457	0048757	-0004705	-0066554	-0052391	-0068926	-0074236	-0025129	0048888	6666
50	1611	1500	100	200	8400	750	0056719	0057136	0066979	0042970	-0010466	-0062108	-0057678	-0063852	-0078756	-0029493	0041613	6666
50	1611	1500	100	200	8400	9007	0056281	0066799	0066870	0043313	-0003510	-0060621	-0059943	-0062114	-0077322	-0028754	0041240	6666
50	1611	1500	100	200	8400	9826	0059757	0071742	0073427	0051688	0000697	-0048985	-0048350	-0050039	-0063923	-0019875	0047535	6666
50	1611	2000	100	200	5000	750	0089401	0107357	0113858	0094858	0044411	-0005925	-0001770	-0010169	-0028991	0015559	0082425	5000
50	1611	2000	100	200	5000	9007	0092299	0112206	0119738	0101741	0052187	0002375	0006615	-0002219	-0021989	0021339	0080026	5000
50	1611	2000	100	200	5000	9826	0104901	0127160	0137888	0122831	0075705	0027426	0031972	0022127	0000010	0039797	0100253	5000
50	1611	2000	100	200	7000	750	0087588	0106816	0115256	0092239	0052507	0005403	0011336	0003234	-0017213	0023749	0084942	5000
50	1611	2000	100	200	7000	9007	0091582	0111811	0121249	0106221	0060364	0013802	0019818	0011223	-0010151	0029282	0085550	5000
50	1611	2000	100	200	7000	9826	0103160	0126684	0133315	0122743	0083853	0038861	0045206	0035605	0011870	0047711	0102576	5000
50	1611	2000	100	200	8400	750	0086557	0106559	0116231	0102184	0057926	0013035	0020221	0012225	-0009285	0029028	0086515	5000
50	1611	2000	100	200	8400	9007	0090429	0111448	0122113	0109051	0065689	0021340	0028587	0020225	-0002179	0034566	0090044	5000
50	1611	2000	100	200	8400	9826	0102044	0126356	0140213	0130129	0082262	0046491	0054037	0044617	0019828	0052986	0104170	5000
50	1611	2700	100	200	5000	750	0113196	0133326	0152548	0141889	0095679	0055619	0062971	0058830	0030143	0066403	0122248	3703
50	1611	2700	100	200	5000	9007	0146603	0179534	0200710	0195400	0156761	0114468	0120535	0108123	0078963	0107788	0150038	3703
50	1611	2700	100	200	5000	9826	0197769	0242708	0274668	0278086	0245401	0206148	0213105	0197781	0159895	0175861	0208717	3703

50	1611	270	100	20	7000	759	0.111476	0.137806	0.153894	0.146204	0.107690	0.067074	0.076271	0.067398	0.040086	0.074838	0.124584	37
50	1611	270	100	20	7000	907	0.144849	0.178998	0.202048	0.199822	0.164888	0.125651	0.133866	0.121737	0.090957	0.115724	0.157281	37
50	1611	270	100	200	7000	9826	0.166836	0.204172	0.231020	0.231801	0.198702	0.159878	0.167089	0.152871	0.119286	0.141877	0.179242	37
50	1611	270	100	200	8400	759	0.110888	0.137422	0.154715	0.149026	0.113101	0.074757	0.085178	0.076496	0.050121	0.079647	0.126041	37
50	1611	270	100	200	8400	907	0.148729	0.178640	0.202904	0.202694	0.170341	0.133376	0.142812	0.130883	0.099046	0.121055	0.158689	37
50	1611	270	100	200	8400	9826	0.196817	0.244998	0.280057	0.288985	0.262834	0.228628	0.237045	0.220261	0.179833	0.190011	0.213296	37
50	1611	150	120	20	5000	759	0.063127	0.072479	0.070283	0.042580	-0.015775	-0.071895	-0.070048	-0.076795	-0.089856	-0.085606	0.042480	66
50	1611	150	120	20	5000	907	0.062994	0.072539	0.070634	0.043936	-0.044377	-0.070009	-0.067926	-0.074725	-0.088135	-0.084640	0.042372	66
50	1611	150	120	200	5000	9826	0.067134	0.078348	0.078212	0.052882	-0.008037	-0.057254	-0.054558	-0.061636	-0.076289	-0.024924	0.049445	66
50	1611	150	120	200	7000	759	0.061355	0.072074	0.071839	0.047089	-0.007651	-0.060604	-0.057009	-0.063551	-0.078214	-0.027742	0.045103	66
50	1611	150	120	200	7000	907	0.061275	0.072148	0.072167	0.047862	-0.006277	-0.058699	-0.054845	-0.061405	-0.076427	-0.026756	0.044989	66
50	1611	150	120	200	7000	9826	0.065413	0.077932	0.079724	0.057344	0.000076	-0.045925	-0.041479	-0.048338	-0.064592	-0.017035	0.052081	66
50	1611	150	120	200	8400	759	0.060232	0.071794	0.072819	0.060032	-0.002256	-0.050048	-0.048272	-0.054664	-0.070392	-0.022492	0.045786	66
50	1611	150	120	200	8400	907	0.060134	0.071849	0.073138	0.060818	-0.000861	-0.051142	-0.046145	-0.052568	-0.068635	-0.021520	0.046663	66
50	1611	150	120	200	8400	9826	0.064304	0.077655	0.080668	0.060261	0.010476	-0.083354	-0.082719	-0.089417	-0.066725	-0.011790	0.053666	66
50	1611	200	120	200	5000	759	0.095798	0.115503	0.123750	0.106378	0.057323	0.007890	0.012358	0.008512	-0.016524	0.026405	0.090636	50
50	1611	200	120	200	5000	907	0.101348	0.122430	0.132005	0.115853	0.067800	0.018931	0.023366	0.013321	-0.007295	0.038827	0.095856	50
50	1611	200	120	200	5000	9826	0.104711	0.126171	0.136349	0.121139	0.074273	0.026887	0.031974	0.023184	0.002281	0.043448	0.105499	50
50	1611	200	120	200	7000	759	0.094027	0.115014	0.125179	0.110789	0.066451	0.019294	0.025564	0.016951	-0.004713	0.044296	0.093099	50
50	1611	200	120	200	7000	907	0.098605	0.121980	0.133465	0.120290	0.079522	0.030351	0.036682	0.027381	0.004659	0.041743	0.098274	50
50	1611	200	120	200	7000	9826	0.099225	0.100279	0.004176	-0.019790	-0.057869	-0.113046	-0.104194	-0.105788	-0.119759	-0.073103	-0.008037	50
50	1611	200	120	200	8400	759	0.092915	0.114638	0.126085	0.113678	0.070851	0.026908	0.043379	0.025925	0.003307	0.039563	0.094646	50
50	1611	200	120	200	8400	907	0.098489	0.121632	0.134332	0.123139	0.081330	0.037966	0.045406	0.036688	0.012504	0.047022	0.099818	50
50	1611	200	120	200	8400	9826	0.113744	0.141039	0.157688	0.150037	0.111061	0.069893	0.077045	0.066677	0.039868	0.070017	0.117597	50
50	1611	270	120	200	5000	759	0.121626	0.148963	0.165293	0.156524	0.115795	0.072834	0.080425	0.070679	0.045516	0.079803	0.132604	37
50	1611	270	120	200	5000	907	0.160896	0.196884	0.221174	0.218623	0.181917	0.140468	0.146905	0.133413	0.102004	0.127541	0.170892	37
50	1611	270	120	200	5000	9826	0.228778	0.280988	0.319570	0.328368	0.292218	0.260965	0.265899	0.246155	0.203937	0.214839	0.241376	37
50	1611	270	120	200	7000	759	0.119917	0.148433	0.166614	0.160842	0.123919	0.084327	0.093773	0.084802	0.057309	0.087459	0.134917	37
50	1611	270	120	200	7000	907	0.158848	0.196368	0.222592	0.223004	0.190110	0.152031	0.160320	0.147110	0.114076	0.135522	0.173125	37
50	1611	270	120	200	7000	9826	0.226937	0.280461	0.320965	0.332757	0.307413	0.272535	0.279339	0.259913	0.216080	0.222815	0.243450	37
50	1611	270	120	200	8400	759	0.118828	0.148039	0.167429	0.163688	0.129312	0.091999	0.102678	0.093406	0.065555	0.092764	0.136333	37
50	1611	270	120	200	8400	907	0.157717	0.196007	0.223394	0.225862	0.195544	0.159736	0.169256	0.156262	0.122178	0.140845	0.174483	37
50	1611	270	120	200	8400	9826	0.225727	0.280088	0.321849	0.335694	0.312930	0.280361	0.288399	0.269188	0.224288	0.228178	0.244733	37
50	1611	150	80	400	5000	759	0.011327	0.008461	-0.004140	-0.089976	-0.100915	-0.158023	-0.155227	-0.158309	-0.168846	-0.104980	-0.019925	13
50	1611	150	80	400	5000	907	0.010762	0.008022	-0.004623	-0.086679	-0.099978	-0.156514	-0.153404	-0.156631	-0.164219	-0.103986	-0.019890	13
50	1611	150	80	400	5000	9826	0.011113	0.008921	-0.002717	-0.061224	-0.069640	-0.151966	-0.148355	-0.151570	-0.159669	-0.100802	-0.017810	13
50	1611	150	80	400	7000	759	-0.000995	-0.003649	-0.013854	-0.024489	-0.053344	-0.144804	-0.137281	-0.133555	-0.148862	-0.098096	-0.026398	13
50	1611	150	80	400	7000	907	0.009257	0.007623	-0.002933	-0.043448	-0.091913	-0.145201	-0.140396	-0.143409	-0.152534	-0.096150	-0.017457	13
50	1611	150	80	400	7000	9826	0.009624	0.008511	-0.001355	-0.031818	-0.088279	-0.140629	-0.135323	-0.138314	-0.147947	-0.092665	-0.015394	13
50	1611	150	80	400	8400	759	0.008839	0.007788	-0.001852	-0.031785	-0.087480	-0.139159	-0.135333	-0.136457	-0.146351	-0.091894	-0.015885	13
50	1611	150	80	400	8400	907	0.008304	0.007336	-0.002073	-0.031519	-0.086657	-0.137615	-0.131680	-0.134540	-0.144673	-0.090912	-0.015912	13
50	1611	150	80	400	8400	9826	0.008684	0.008218	-0.000512	-0.029000	-0.082899	-0.133033	-0.126605	-0.129441	-0.140073	-0.087414	-0.013894	13
50	1611	200	80	400	5000	759	0.015471	0.015420	0.006130	-0.024571	-0.082283	-0.135824	-0.131168	-0.134566	-0.144158	-0.087658	-0.008299	10
50	1611	200	80	400	5000	907	0.014854	0.014850	0.005732	-0.024480	-0.081742	-0.134785	-0.129859	-0.133302	-0.142998	-0.087070	-0.008531	10
50	1611	200	80	400	5000	9826	0.015328	0.015836	0.007377	-0.022150	-0.078203	-0.130392	-0.125017	-0.128353	-0.138628	-0.083696	-0.006468	10
50	1611	200	80	400	7000	759	0.013994	0.014987	0.007449	-0.002099	-0.074226	-0.124471	-0.118038	-0.121269	-0.132399	-0.079807	-0.009357	10
50	1611	200	80	400	7000	907	0.013396	0.014412	0.007030	-0.002048	-0.073685	-0.123420	-0.116786	-0.119900	-0.131225	-0.079219	-0.006206	10
50	1611	200	80	400	7000	9826	0.013881	0.015386	0.008650	-0.017917	-0.070144	-0.119009	-0.111919	-0.115019	-0.126819	-0.075833	-0.004176	10
50	1611	200	80	400	8400	759	0.013062	0.014675	0.008258	-0.017608	-0.068846	-0.116844	-0.109335	-0.112344	-0.124476	-0.074552	-0.004478	10
50	1611	200	80	400	8400	907	0.012478	0.014098	0.008277	-0.017648	-0.068308	-0.115799	-0.108036	-0.110980	-0.123291	-0.073966	-0.004764	10

## **Anexo D - Correlações Totais**

Neste anexo são apresentadas as correlações entre as variáveis de maior sensibilidade com a deformação nos dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0. O cálculo das correlações foi realizado através do programa SPSS-14.0.

## Análise Estatística Preliminar

### Frequência das Variáveis

Tabela D.1: Quantidade de cada variável calculada pelo SPSS 14.0

		Espaçamento	Inércia	E do	E do Sub	E da	K	Inércia
			Trilho	Lastro	Lastro	Plataforma	fixação	Dormente
Número	Validos	2187	2187	2187	2187	2187	2187	2187
	Erros	0	0	0	0	0	0	0

Tabela D. 2: Frequência de cada espaçamento dos dormentes no total das variáveis

Espaçamento					
		Frequencia	Porcentagem	Porcentagem	Porcentagem
			Trilho	Valida	Comulativa
Validade	50	729	33,3	33,3	33,3
	55	729	33,3	33,3	66,7
	60	729	33,3	33,3	100
	Total	2187	100	100	-

Tabela D. 3: Frequência de cada inércia do trilho no total das variáveis

Inércia do Trilho					
		Frequencia	Porcentagem	Porcentagem	Porcentagem
			Trilho	Valida	Comulativa
Validade	1610,8	729	33,3	33,3	33,3
	2730,5	729	33,3	33,3	66,7
	3950	729	33,3	33,3	100
	Total	2187	100	100	-

Tabela D. 4: Frequência de cada módulo de elasticidade do lastro no total das variáveis

E do lastro					
		Frequencia	Porcentagem	Porcentagem	Porcentagem
			Trilho	Valida	Comulativa
Validade	1500	729	33,3	33,3	33,3
	2000	729	33,3	33,3	66,7
	2700	729	33,3	33,3	100
	Total	2187	100	100	-

Tabela D. 5: Frequência de cada módulo de elasticidade do Sub-Lastro no total das variáveis

E do Sublastro					
		Frequencia	Porcentagem	Porcentagem	Porcentagem
			Trilho	Valida	Comulativa
Validade	800	729	33,3	33,3	33,3
	1000	729	33,3	33,3	66,7
	1200	729	33,3	33,3	100
	Total	2187	100	100	-

Tabela D. 6: Frequência de cada módulo de elasticidade da plataforma no total das variáveis

E da Plataforma					
		Frequencia	Porcentagem	Porcentagem	Porcentagem
			Trilho	Valida	Comulativa
Validade	200	729	33,3	33,3	33,3
	400	729	33,3	33,3	66,7
	500	729	33,3	33,3	100
	Total	2187	100	100	-

Tabela D. 7: Frequência de cada K da fixação no total das variáveis

K da Fixação					
		Frequencia	Porcentagem	Porcentagem	Porcentagem
			Trilho	Valida	Comulativa
Validade	56000	729	33,3	33,3	33,3
	70000	729	33,3	33,3	66,7
	84000	729	33,3	33,3	100
	Total	2187	100	100	-

Tabela D. 8: Frequência de cada inércia dos dormentes no total das variáveis

Inércia do Dormente					
		Frequencia	Porcentagem	Porcentagem	Porcentagem
			Trilho	Valida	Comulativa
Validade	7509	729	33,3	33,3	33,3
	9007	729	33,3	33,3	66,7
	9826	729	33,3	33,3	100
	Total	2187	100	100	-

Tabela D.9: Correlação entre todas as variáveis considerando a inércia dos Trilhos

Correlações entre as deformações para cada dormente da grade do FERROVIA 1.0 e os elementos componentes da via permanente calculadas pelo SPSS 14.0							
Caso 1: Considerando-se correlações totais entre as variáveis inclusive com a consideração dos três tipo de trilho							
		Dormentes					
Elemento	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,2230	-0,1600	-0,1220	-0,1180	-0,1800	-0,2630
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,2670	-0,2830	0,0000	0,0630	0,0990	-
	Significancia	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-
		Dormentes					
Elemento	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Inércia dos Trilhos	Pearson	0,0770	-0,0120	-0,0710	-0,0750	0,0030	0,0770
	Significancia	0,0000	0,5790	0,0010	0,0000	0,9020	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,0020	0,0110	0,0260	-0,0070	-0,0960	-
	Significancia	0,9250	0,6200	0,2280	0,7410	0,0000	-
		Dormentes					
Elemento	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	0,2580	0,2940	0,3290	0,3670	0,4040	0,4180
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,4360	0,4280	-0,0280	0,3950	0,3510	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
		Dormentes					
Elemento	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Sub-Lastro	Pearson	0,0220	0,0310	0,0400	0,0500	0,0600	0,0700
	Significancia	0,3040	0,1460	0,0620	0,0200	0,0050	0,0010
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,0650	0,0570	0,0000	0,0430	0,0440	-
	Significancia	0,0020	0,0070	1,0000	0,0460	0,0400	-
		Dormentes					
Elemento	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7610	-0,7700	-0,7590	-0,7360	-0,6970	-0,6400
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,6390	-0,6270	-0,0230	-0,6860	-0,7650	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
		Dormentes					
Elemento	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
K da Fixação	Pearson	-0,0280	-0,0020	0,0210	0,0500	0,0860	0,1120
	Significancia	0,1880	0,9310	0,3370	0,0200	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,1240	0,1260	0,0000	0,0880	0,0180	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,9980	0,0000	0,4070	-
		Dormentes					
Elemento	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Inércia do Dormente	Pearson	0,0340	0,0370	0,0420	0,0470	0,0540	0,0500
	Significancia	0,1160	0,0860	0,0520	0,0280	0,0120	0,0180
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,0590	0,0600	-0,0230	0,0560	0,0360	-
	Significancia	0,0060	0,0050	0,2760	0,0080	0,0940	-

Tabela D.10: Correlação entre o ESPAÇAMENTO da plataforma para o trilho TR45 contra a deformação nos dormentes 4, 5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o espaçamento para o Trilho TR45				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,0990	-0,1620	-0,2590
	Significancia	0,0070	0,0000	0,0000

Tabela D.11: Correlação entre o MÓDULO DE ELASTICIDADE DO LASTRO para o trilho T457 contra a deformação nos dormentes 4,5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade do lastro para o Trilho TR45				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	0,3670	0,4040	0,4270
	Significancia	0,0070	0,0000	0,0000

Tabela D.12: Correlação entre o MÓDULO DE ELASTICIDADE DA PLATAFORMA para o trilho TR45 contra a deformação nos dormentes 4,5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade da Plataforma para Trilho TR45				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7410	-0,6920	-0,6360
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela D.13: Correlação entre os ESPAÇAMENTO para o trilho T57 contra a deformação nos dormentes 4,5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o espaçamento para o Trilho TR57				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,1240	-0,1880	-0,2740
	Significancia	0,0010	0,0000	0,0000

Tabela D.14: Correlação entre os MÓDULOS DE ELASTICIDADE DO LASTRO para o trilho TR57 contra a deformação no dormentes 4,5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade do lastro para o Trilho TR57				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	0,3680	0,4030	0,4250
	Significancia	0,0070	0,0000	0,0000

Tabela D.15: Correlação entre os MÓDULOS DE ELASTICIDADE DA PLATAFORMA para o trilho TR57 contra a deformação nos dormentes 4, 5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade da Plataforma para Trilho TR57				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7400	-0,6960	-0,6700
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela D.16: Correlação entre os ESPAÇAMENTO para o trilho TR68 contra a deformação nos dormentes 4, 5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o espaçamento para o Trilho TR68				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,1330	-0,1890	-0,2590
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela D.17: Correlação entre os MÓDULO DE ELASTICIDADE DO LASTRO para o trilho TR68 contra a deformação nos dormentes 4, 5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade do lastro para o Trilho TR68				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	0,3690	0,4050	0,4080
	Significancia	0,0070	0,0000	0,0000

Tabela D.18: Correlação entre os MÓDULO DE ELASTICIDADE DA PLATAFORMA para o trilho TR68 contra a deformação nos dormentes 4, 5 e 6.

Considerando-se a correlação para os dormentes D4, D5 e D6 de acordo com o módulo de elasticidade da Plataforma para Trilho TR68				
Elemento	Correlação	Dormentes		
		D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7340	-0,7020	-0,6230
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000

## **ANEXO E – Correlações Parciais**

Neste anexo são apresentadas as correlações parciais entre as variáveis de maior sensibilidade e a deformação vertical da via em relação aos dormentes da grade do programa FERROVIA 1.0. Estas correlações são aquelas em que se retira uma das variáveis do estudo e se analisa o comportamento das outras em relação ao conjunto em foram realizadas com o uso do programa de cálculos estatísticos SPSS 14.0.

## A- Correlações extraídas do SPSS 14

Tabela E.2 – A variável de controle é o espaçamento, ou seja, retiramos o efeito do espaçamento.

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito do espaçamento								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
Espaçamento	Inércia do Trilho	Pearson	0,0790	-0,0120	-0,0710	-0,0750	0,0030	0,0800
		Significância	0,0000	0,5740	0,0010	0,0000	0,9010	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,0020	0,0110	0,0260	-0,0070	-0,0960	-
		Significância	0,9220	0,6060	0,2280	0,7400	0,0000	-
			Dormentes					
		Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	0,2650	0,2980	0,3310	0,3690	0,4110	0,4340
		Significância	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,4530	0,4470	-0,0280	0,3960	0,3530	-
		Significância	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
			Dormentes					
	Módulo de Elasticidade do Sub-Lastro	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		Pearson	0,0230	0,0310	0,0400	0,0500	0,0610	0,0720
		Significância	0,2920	0,1410	0,0600	0,0190	0,0040	0,0010
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0680	0,0600	0,0000	0,0430	0,0440	-
		Significância	0,0010	0,0050	1,0000	0,0460	0,0390	-
			Dormentes					
	Módulo de Elasticidade da Plataforma	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		Pearson	-0,7800	-0,7800	-0,7650	-0,7420	-0,7090	-0,6640
		Significância	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,6630	-0,6530	-0,0230	-0,6880	-0,7690	-
		Significância	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
			Dormentes					
	K da Fixação	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		Pearson	-0,0290	-0,0020	0,0210	0,0500	0,0880	0,1170
		Significância	0,1770	0,9300	0,3330	0,0200	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,1290	0,1320	0,0000	0,0880	0,0180	-
		Significância	0,0000	0,0000	0,9980	0,0000	0,4040	-
			Dormentes					
	Inércia do Dormente	Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
		Pearson	0,0340	0,0370	0,0420	0,0470	0,0540	0,0520
		Significância	0,1070	0,0820	0,0500	0,0270	0,0110	0,0140
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0610	0,0630	-0,0230	0,0570	0,0360	-
		Significância	0,0040	0,0030	0,2760	0,0080	0,0930	-

Tabela E.3 – A variável de controle é a inércia do trilho, ou seja, retiramos e feitos da inércia do trilho

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito da inércia do trilho								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Inércia do Trilho</b>	Espaçamento	Pearson	-0,2230	-0,1600	-0,1220	-0,1190	-0,1800	-0,2640
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Espaçamento		D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,2670	-0,2830	0,0000	0,0630	0,1000	-
		Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0030	0,0000	-
				Dormentes				
		Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	0,2590	0,2940	0,3300	0,3680	0,4040	0,4190
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,4360	0,4280	-0,0280	0,3950	0,5350	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
				Dormentes				
		Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade do Sub-Lastro	Pearson	0,0220	0,0310	0,0400	0,0500	0,0600	0,0700
		Significancia	0,3030	0,1460	0,0610	0,0190	0,0050	0,0010
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0650	0,0570	0,0000	0,0430	0,0440	-
		Significancia	0,0020	0,0070	1,0000	0,0460	0,0390	-
				Dormentes				
		Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7630	-0,7700	-0,7610	-0,7380	-0,6970	-0,6420
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,6390	-0,6270	-0,0230	-0,6860	-0,7690	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
				Dormentes				
		Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	K da Fixação	Pearson	-0,0280	-0,0020	0,0210	0,0500	0,0860	0,1130
		Significancia	0,1830	0,9320	0,3310	0,0190	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,1240	0,1260	0,0000	0,0880	0,0180	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,9950	0,0000	0,3970	-
				Dormentes				
		Correlação	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Inércia do Dormente	Pearson	0,0340	0,0370	0,0420	0,0470	0,0540	0,0510
		Significancia	0,1150	0,0860	0,0510	0,0270	0,0120	0,0180
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0060	0,0050	0,2760	0,0080	0,0930	-
		Significancia	0,0060	0,0050	0,2760	0,0080	0,0930	-
				Dormentes				

Tabela E.4 – A variável de controle é o E do lastro, ou seja, retiramos o efeito do E do lastro

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito do módulo de elasticidade do lastro								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Módulo de Elasticidade do Lastro</b>	Espaçamento	Pearson	-0,2300	-0,1670	-0,1290	-0,1270	-0,1970	-0,2900
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,2970	-0,3130	0,0000	0,0680	0,1060	-
		Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0010	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Inércia do Trilho	Pearson	0,0790	-0,0120	-0,0750	-0,0800	0,0030	0,0850
		Significancia	0,0000	0,5670	0,0000	0,0000	0,8930	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,0020	0,0120	0,0260	-0,0080	-0,1020	-
		Significancia	0,9160	0,5840	0,2270	0,7190	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade do Sub-Lastro	Pearson	0,0230	0,0330	0,0420	0,0540	0,0650	0,0770
		Significancia	0,0230	0,0330	0,0420	0,0540	0,0650	0,0770
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0730	0,0640	0,0000	0,0460	0,0470	-
		Significancia	0,0730	0,0640	0,0000	0,0460	0,0470	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7870	-0,8060	-0,8040	-0,7920	-0,7620	-0,7050
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,7110	-0,6930	-0,0230	-0,7470	-0,8170	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-

Tabela E.5 – A variável de controle é o E do sublastro, ou seja, retiramos o efeito do E do sublastro

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito do módulo de elasticidade do Sublastro								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Módulo de Elasticidade do Sublastro</b>	Espaçamento	Pearson	-0,2230	-0,1600	-0,1220	-0,1190	-0,1800	-0,2640
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,2680	-0,2830	0,0000	0,0630	0,1000	-
		Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0030	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	0,2590	0,2940	0,3290	0,3670	0,4050	0,4190
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,4370	0,4290	-0,0280	0,3960	0,3520	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	0,0770	-0,0120	-0,0710	-0,0750	0,0030	0,0770
		Significancia	0,0000	0,5790	0,0010	0,0000	0,9020	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,0020	0,0110	0,0260	-0,0070	-0,0960	-
		Significancia	0,9240	0,6200	0,2280	0,7410	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	-0,7610	-0,7700	-0,7590	-0,7370	-0,6980	-0,6420
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,6410	-0,6280	-0,0230	-0,6870	-0,7660	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	-0,0280	-0,0020	0,0210	0,0500	0,0860	0,1130
		Significancia	0,1830	0,9320	0,3310	0,0190	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,1250	0,1260	0,0000	0,0880	0,0180	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,9980	0,0000	0,4060	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	0,0340	0,0370	0,0420	0,0470	0,0540	0,0510
		Significancia	0,1160	0,0860	0,0520	0,0280	0,0120	0,0180
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0590	0,0600	-0,0230	0,0570	0,0360	-
		Significancia	0,0060	0,0050	0,2760	0,0080	0,0940	-

Tabela E.6 – A variável de controle é o E do plataforma, ou seja, retiramos o efeito do E do plataforma

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito do módulo de elasticidade da Plataforma								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Módulo de Elasticidade do Plataforma</b>	Espaçamento	Pearson	-0,3430	-0,2510	-0,1870	-0,1750	-0,2510	-0,3430
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,3480	-0,3630	0,0000	0,0860	0,1540	-
		Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	0,3980	0,4610	0,5050	0,5420	0,5640	0,5450
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,5680	0,5500	-0,0280	0,5430	0,5460	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	0,1180	-0,0190	-0,1090	-0,1100	0,0040	0,1000
		Significancia	0,0000	0,3850	0,0000	0,0000	0,8640	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,0030	0,0140	0,0260	-0,0100	-0,1490	-
		Significancia	0,9020	0,5250	0,2280	0,6490	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	0,0340	0,0490	0,0610	0,0740	0,0840	0,0910
		Significancia	0,1140	0,0230	0,0040	0,0010	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0850	0,0740	0,0000	0,0590	0,0680	-
		Significancia	0,0000	0,0010	1,0000	0,0060	0,0010	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	-0,0440	-0,0040	0,0310	0,0730	0,1190	0,1460
		Significancia	0,0390	0,8620	0,1500	0,0010	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,1610	0,1610	0,0000	0,1200	0,0270	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,9970	0,0000	0,2110	-
		Correlação	Dormentes					
		Pearson	0,0520	0,0580	0,0640	0,0700	0,0750	0,0660
		Significancia	0,0160	0,0070	0,0030	0,0010	0,0000	0,0020
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0770	0,0770	-0,0230	0,0780	0,0560	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,2760	0,0000	0,0000	-

Tabela E.7 – A variável de controle é o K da fixação, ou seja, retiramos o efeito do K da fixação.

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito do K da fixação								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>K da Fixação</b>	Espaçamento	Pearson	-0,2230	-0,1600	-0,1220	-0,1180	-0,1800	-0,2650
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,2700	-0,2850	0,0000	0,0630	0,0990	-
		Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Inércia do Trilho	Pearson	0,0770	-0,0120	-0,0710	-0,0750	0,0020	0,0770
		Significancia	0,0000	0,5800	0,0010	0,0000	0,9110	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,0020	0,0100	0,0260	-0,0070	-0,0960	-
		Significancia	0,9100	0,6300	0,2280	0,7310	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	0,2590	0,2940	0,3290	0,3670	0,4060	0,4210
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,4400	0,4320	-0,0280	0,3970	0,3510	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade do Sublastro	Pearson	0,0220	0,0310	0,0400	0,0500	0,0600	0,0700
		Significancia	0,3040	0,1460	0,0620	0,0190	0,0050	0,0010
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0660	0,0580	0,0000	0,0430	0,0440	-
		Significancia	0,0020	0,0070	1,0000	0,0460	0,0400	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7610	-0,7700	-0,7590	-0,7370	-0,7000	-0,6440
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,6440	-0,6310	-0,0230	-0,6890	-0,7650	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
	Inércia do Dormente	Pearson	0,0340	0,0370	0,0420	0,0470	0,0540	0,0510
		Significancia	0,1170	0,0860	0,0510	0,0270	0,0120	0,0170
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0600	0,0610	-0,0230	0,0570	0,0360	-
		Significancia	0,0050	0,0040	0,2760	0,0080	0,0940	-

Tabela E.8 – A variável de controle é a inércia do dormente, ou seja, retiramos o efeito da inércia do dormente.

Considerando-se correlações parciais entre as variáveis mais expressivas e retirando-se o efeito da Inércia do Dormente								
Variável de Controle	Elementos	Correlação	Dormentes					
			D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Inércia do Dormente</b>	Espaçamento	Pearson	-0,2230	-0,1600	-0,1220	-0,1180	-0,1800	-0,2630
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,2680	-0,2830	0,0000	0,0630	0,0990	-
		Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0030	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
	Inércia do Trilho	Pearson	0,0770	-0,0120	-0,0710	-0,0750	0,0030	0,0770
		Significancia	0,0000	0,5790	0,0010	0,0000	0,9020	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,0020	0,0110	0,0260	-0,0070	-0,0960	-
		Significancia	0,9240	0,6200	0,2280	0,7410	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
	Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	0,2590	0,2940	0,3290	0,3670	0,4050	0,4190
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,4370	0,4290	-0,0280	0,3960	0,3520	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
	Módulo de Elasticidade do Sublastro	Pearson	0,0220	0,0310	0,0400	0,0500	0,0600	0,0700
		Significancia	0,3040	0,1460	0,0610	0,0190	0,0050	0,0010
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,0660	0,0580	0,0000	0,0430	0,0440	-
		Significancia	0,0020	0,0070	1,0000	0,0460	0,0400	-
		Correlação	Dormentes					
	Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,7610	-0,7710	-0,7600	-0,7370	-0,6980	-0,6410
		Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	-0,6400	-0,6280	-0,0230	-0,6870	-0,7660	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
		Correlação	Dormentes					
	K da Fixação	Pearson	-0,0280	-0,0020	0,0210	0,0500	0,0860	0,1130
		Significancia	0,1890	0,9350	0,3340	0,0200	0,0000	0,0000
			D7	D8	D9	D10	D11	-
		Pearson	0,1250	0,1270	0,0000	0,0880	0,0180	-
		Significancia	0,0000	0,0000	0,9960	0,0000	0,4040	-

Tabela E.9 – Retirando o efeito de todas as variáveis com exceção do espaçamento

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Espaçamento dos Dormentes	Pearson	-0,3780	-0,2840	-0,2190	-0,2120	-0,3100	-0,4220
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,4350	-0,4470	0,0000	0,1050	0,1890	-
	Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos e dormentes e K da fixação						

Tabela E.10 – Retirando o efeito de todas as variáveis com exceção do E da plataforma

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade da Plataforma	Pearson	-0,8130	-0,8180	-0,8140	-0,8040	-0,7840	-0,7490
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,7560	-0,7420	-0,0230	-0,7540	-0,8280	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,2850	0,0000	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro e da Sub lastro, Inércia dos dormentes e trilhos, K da fixação e Espacamento dos dormentes						

Tabela E.11 – Retirando o efeito de todas as variáveis com exceção do E do lastro

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Lastro	Pearson	0,4290	0,4780	0,5200	0,5590	0,5910	0,5940
	Significancia	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,6190	0,6030	-0,0280	0,5520	0,5610	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,1980	0,0000	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos e dormentes, K da fixação e Espacamento dos dormentes						

Tabela E.12 – Retirando o efeito de todas as variáveis com exceção da inércia do trilho

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Inércia dos Trilhos	Pearson	0,1390	-0,0220	-0,1300	-0,1360	0,0040	0,1340
	Significancia	0,0000	0,3060	0,0000	0,0000	0,8410	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	-0,0040	0,0180	0,0260	-0,0120	-0,1820	-
	Significancia	0,8390	0,4000	0,2280	0,5660	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos dormentes, K da fixação e Espacamento dos dormentes						

Tabela E.13 – Retirando o efeito de todas as variáveis com exceção da E do sublastro

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Sublastro	Pearson	0,0400	0,0570	0,0740	0,0910	0,1080	0,1220
	Significancia	0,0600	0,0070	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,1180	0,1010	0,0000	0,0710	0,0850	-
	Significancia	0,0000	0,0000	1,0000	0,0010	0,0000	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro e da Plataforma, Inércia dos dormentes e trilhos, K da fixação e Espaçamento dos dormentes						

Tabela E.14 – Retirando o efeito de todas as variáveis com exceção da E do dormente

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
Módulo de Elasticidade do Dormente	Pearson	0,0610	0,0680	0,0770	0,0860	0,0970	0,0890
	Significancia	0,0040	0,0020	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,1070	0,1070	-0,0230	0,0950	0,0690	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,2760	0,0000	0,0010	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos, K da fixação e Espaçamento dos dormentes						

Tabela E.15 – Retirando o efeito de todas as variáveis com exceção do K

Elementos	Correlação	Dormentes					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
K da Fixação	Pearson	-0,0530	-0,0040	0,0370	0,0900	0,1530	0,1940
	Significancia	0,0130	0,8400	0,0810	0,0000	0,0000	0,0000
		D7	D8	D9	D10	D11	-
	Pearson	0,2180	0,2170	0,0000	0,1450	0,0340	-
	Significancia	0,0000	0,0000	0,9930	0,0000	0,1150	-
<b>Variáveis de Controle</b>	Módulo de Elasticidade do Lastro, Sublastro e da Plataforma, Inércia dos trilhos e dormentes, Espaçamento dos dormentes						

## **ANEXO F - REGRESSÃO LINEAR – Lineares**

Neste anexo são apresentadas as regressões lineares realizadas com as quatro variáveis de maior correlação entre aquelas de maior sensibilidade. Primeiramente foi realizado um estudo para tentar uma regressão linear direta com o maior coeficiente de determinação possível através do programa SPSS 14.0.

**a) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

Tabela F.1.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis.

Sumário Estatístico								
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Significancia de F
1	0,736	0,542	0,542	0,542	2588,19	1	2185	0
2	0,823	0,677	0,676	0,135	908,974	1	2185	0
3	0,831	0,691	0,69	0,014	98,885	1	2185	0
1	Módulo de elasticidade da plataforma							
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro							
3	Módulo de elasticidade da plataforma, do lastro e espaçamento dos dormentes							

Tabela F.1.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável.

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.	Intervalo de confiança de 95% de 95% para B	
	B	Desvio Padrão				Borda Inferior	Borda Superior
1							
Constante	0,149000	0,030000		51,173	0,0	0,143000	0,154000
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,736000	-50,874	0,0	0,000000	0,000000
2							
Constante	0,049000	0,040000		11,960	0,0	0,041000	0,057000
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,736000	-60,529	0,0	0,000000	0,000000
E do lastro	0,000048	0,000000	0,367000	30,149	0,0	0,000000	0,000000
3							
Constante	0,152000	0,011000		13,690	0,0	0,130000	0,174000
E da Plataforma	-0,000381	0,000000	-0,736000	-61,870	0,0	0,000000	0,000000
E do lastro	0,000048	0,000000	0,367000	30,817	0,0	0,000000	0,000000
Espaçamento	-0,001873	0,000000	-0,118000	-9,944	0,0	-0,002000	-0,002000

**Constante = 0,1521242403726**

**E plat = -0,0003814880797082**

**E lastro = 4,81539780332e-005**

**Espaçamento = -0,001873197307833**

**b) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5**

*Tabela F.2.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis.*

Sumário Estatístico								
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Significancia de F
1	0,697	0,486	0,486	0,486	2064,2	1	2185	0
2	0,806	0,649	0,649	0,163	1016,63	1	2185	0
3	0,825	0,681	0,681	0,032	221,499	1	2185	0
1	Módulo de elasticidade da plataforma							
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro							
3	Módulo de elasticidade da plataforma, do lastro e espaçamento dos dormentes							

*Figura F.2.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.	Intervalo de confiança de 95% de 95% para B	
	B	Desvio Padrão				Borda Inferior	Borda Superior
1							
Constante	0,104000	0,030000		30,626	0,0	0,097000	0,110000
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,697000	-45,433	0,0	0,000000	0,000000
2							
Constante	-0,017000	0,050000		-3,597	0,0	-0,026000	-0,008000
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,697000	-54,988	0,0	0,000000	0,000000
E do lastro	0,000058	0,000000	0,404000	31,885	0,0	0,000000	0,000000
3							
Constante	0,155312	0,012000		12,512	0,0	0,131000	0,180000
E da Plataforma	-0,000397	0,000000	-0,697000	-57,697	0,0	0,000000	0,000000
E do lastro	0,000058	0,000000	0,404000	33,455	0,0	0,000000	0,000000
Espaçamento	-0,003132	0,000000	-0,180000	-14,883	0,0	-0,004000	-0,003000

**Constante = 0,1553124081439**

**E plat = -0,0003974054112801**

**E lastro = 5,839599115564e-005**

**Espaçamento = -0,00313173295749**

**c) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6**

*Tabela F.3.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico								
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Significancia de F
1	0,640	0,410	0,410	0,41	1518,46	1	2185	0
2	0,765	0,585	0,585	0,175	920,441	1	2185	0
3	0,809	0,654	0,654	0,069	437,02	1	2185	0
1	Módulo de elasticidade da plataforma							
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro							
3	Módulo de elasticidade da plataforma, do lastro e espaçamento dos dormentes							

*Tabela F.3.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.	Intervalo de confiança de 95% de 95% para B	
	B	Desvio Padrão				Borda Inferior	Borda Superior
1							
Constante	0,052000	0,040000		13,244	0,0	0,044000	0,060000
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,640000	-38,967	0,0	0,000000	0,000000
2							
Constante	-0,083000	0,006000		-15,007	0,0	-0,094000	-0,072000
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,640000	-46,448	0,0	0,000000	0,000000
E do lastro	0,000065	0,000000	0,418000	30,339	0,0	0,000000	0,000000
3							
Constante	0,190000	0,014000		13,550	0,0	0,162000	0,217000
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,640000	-50,874	0,0	0,000000	0,000000
E do lastro	0,000065	0,000000	0,418000	33,230	0,0	0,000000	0,000000
Espaçamento	-0,005000	0,000000	-0,263000	-20,905	0,0	-0,005000	-0,004000

**Constante = 0,1897410635903**

**E plat = -0,00039529130921**

**E lastro = 6,543104575145e-005**

**Espaçamento = -0,004962417172565**

**d) Considerando apenas Espaçamento 50 e Trilho 45**

**d.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.4.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,751	0,563	0,562
2	0,841	0,707	0,705
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Figura E.4.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,202000	0,011000		18,876	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,751000	-17,633	0,0
2					
Constante	0,073000	0,015000		4,947	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,751000	-21,488	0,0
E do lastro	0,000062	0,000000	0,379000	10,859	0,0

**Constante = 0,07290716813977**

**E plat = -0,0004861842169339**

**E lastro = 6,226083122171e-005**

## d.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5

Tabela F.5.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,707	0,500	0,497
2	0,814	0,663	0,661
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Figura F.5.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,156000	0,013000		12,474	0,0
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,707000	-15,511	0,0
2					
Constante	0,006000	0,017000		0,337	0,737
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,707000	-18,871	0,0
E do lastro	0,000073	0,000000	0,405000	10,805	0,0

**Constante = 0,005818053577265**

**E plat = -0,0005008991513183**

**E lastro = 7,267684788747e-005**

### d.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.6.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,667	0,445	0,443
2	0,789	0,623	0,620
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Figura F.6.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,107000	0,014000		7,696	0,0
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,667000	-13,911	0,0
2					
Constante	-0,058000	0,019000		-3,007	0,030
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,667000	-16,835	0,0
E do lastro	0,000080	0,000000	0,421000	10,628	0,0

**Constante = -0,05833535859212**

**E plat = -0,0005013873464286**

**E lastro = 8,021132940197e-005**

e) Considerando apenas Espaçamento 55 e Trilho 45

e.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4

Tabela F.7.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	$R^2$	Ajuste do $R^2$
1	0,746	0,557	0,555
2	0,825	0,681	0,678
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.7.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,149000	0,080000		18,140	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,746000	-17,394	0,0
2					
Constante	0,057608	0,012000		4,913	0,000
E da Plataforma	-0,000368	0,000000	-0,746000	-20,462	0,0
E do lastro	0,000044	0,000000	0,353000	9,670	0,0

**Constante = 0,05760847889151**

**E plat = -0,0003683371052167**

**E lastro = 4,411097797212e-005**

**e.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5**

*Tabela F.8.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

<b>Sumário Estatístico</b>			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,716	0,512	0,510
2	0,818	0,669	0,666
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.8.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,097000	0,009000		10,433	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,716000	-15,913	0,0
2					
Constante	-0,013739	0,013000		-1,061	0,290
E da Plataforma	-0,000383	0,000000	-0,716000	-19,282	0,0
E do lastro	0,000054	0,000000	0,396000	10,669	0,0

**Constante = -0,013739311976**

**E plat = -0,0003831647791446**

**E lastro = 5,372604255069e-005**

**e.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6**

*Tabela F.9.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

<b>Sumário Estatístico</b>			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,685	0,469	0,467
2	0,816	0,665	0,662
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.9.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,036000	0,010000		3,582	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,685000	-14,597	0,0
2					
Constante	-0,091840	0,013000		-6,852	0,000
E da Plataforma	-0,000377	0,000000	-0,685000	-18,339	0,0
E do lastro	0,000062	0,000000	0,443000	11,850	0,0

**Constante = -0,09184044884915**

**E plat = -0,000377384252381**

**E lastro = 6,179484898743e-005**

**f) Considerando apenas Espaçamento 60 e Trilho 45**

**f.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.10.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

<b>Sumário Estatístico</b>			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,818	0,669	0,668
2	0,917	0,841	0,839
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.10.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,115000	0,005000		22,403	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,818000	-22,085	0,0
2					
Constante	0,037393	0,006000		6,233	0,0
E da Plataforma	-0,000292	0,000000	-0,818000	-31,747	0,0
E do lastro	0,000037	0,000000	0,414000	16,062	0,0

**Constante = 0,03739271550143**

**E plat = -0,0002923685369815**

**E lastro = 3,748569814118e-00**

**f.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5**

*Tabela F.11.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

<b>Sumário Estatístico</b>			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,759	0,576	0,575
2	0,903	0,815	0,814
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.11.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,052000	0,006000		8,240	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,759000	-18,112	0,0
2					
Constante	-0,047062	0,007000		-6,756	0,0
E da Plataforma	-0,000293	0,000000	-0,759000	-27,363	0,0
E do lastro	0,000048	0,000000	0,489000	17,609	0,0

**Constante = -0,04706229801532**

**E plat = -0,0002926178773192**

**E lastro = 4,771908681096e-005**

### f.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.12.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	$R^2$	Ajuste do $R^2$
1	0,695	0,483	0,481
2	0,881	0,777	0,775
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.12.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	-0,022000	0,007000		-3,109	0,02
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,695000	-14,998	0,0
2					
Constante	-0,136096	0,008000		-17,090	0,0
E da Plataforma	-0,000278	0,000000	-0,695000	-22,772	0,0
E do lastro	0,000055	0,000000	0,542000	17,765	0,0

**Constante = -0,1360964197165**

**E plat = -0,0002783940518959**

**E lastro = 5,503786923944e-005**

**g) Considerando apenas Espaçamento 50 e Trilho 57**

**g.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.13.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,785	0,616	0,614
2	0,871	0,759	0,757
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.13.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,207000	0,010000		20,545	0,0
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,785000	-19,646	0,0
2					
Constante	0,078015	0,013000		5,794	0,0
E da Plataforma	-0,000512	0,000000	-0,785000	-24,745	0,0
E do lastro	0,000062	0,000000	0,378000	11,930	0,0

**Constante = 0,0780149463289**

**E plat = -0,0005115031072628**

**E lastro = 6,249202555873e-005**

**g.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5**

*Tabela F.14.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,768	0,590	0,588
2	0,869	0,754	0,752
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.14.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,174000	0,011000		15,565	0,0
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,768000	-18,630	0,0
2					
Constante	0,025540	0,015000		1,746	0,082
E da Plataforma	-0,000539	0,000000	-0,768000	-24,013	0,0
E do lastro	0,000072	0,000000	0,405000	12,664	0,0

**Constante = 0,02553998136841**

**E plat = -0,0005391217638536**

**E lastro = 7,205209604746e-005**

### g.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.15.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,754	0,568	0,566
2	0,867	0,751	0,749
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.15.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,137000	0,012000		11,503	0,0
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,754000	-17,803	0,0
2					
Constante	-0,025747	0,015000		-1,684	0,094
E da Plataforma	-0,000549	0,000000	-0,754000	-23,394	0,0
E do lastro	0,000079	0,000000	0,428000	13,273	0,0

**Constante = -0,02574743456743**

**E plat = -0,0005491924299383**

**E lastro = 7,896041748782e-00**

**h) Considerando apenas Espaçamento 55 e Trilho 57**

**h.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.16.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,723	0,522	0,520
2	0,8	0,64	0,637
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.16.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,134000	0,008000		15,976	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,723000	-16,226	0,0
2					
Constante	0,046644	0,012000		3,793	0,000
E da Plataforma	-0,000352	0,000000	-0,723000	-18,657	0,0
E do lastro	0,000042	0,000000	0,343000	8,866	0,0

**Constante = 0,04664448935812**

**E plat = -0,0003521998447795**

**E lastro = 4,241575105901e-005**

## h.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5

Tabela F.17.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	$R^2$	Ajuste do $R^2$
1	0,662	0,439	0,436
2	0,767	0,588	0,584
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.17.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,089000	0,010000		8,533	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,662000	-13,721	0,0
2					
Constante	-0,023790	0,015000		-1,584	0,115
E da Plataforma	-0,000368	0,000000	-0,662000	-15,979	0,0
E do lastro	0,000054	0,000000	0,386000	9,319	0,0

**Constante = -0,02378962088089**

**E plat = -0,0003684195753086**

**E lastro = 5,444813726017e-005**

### h.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.18.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,674	0,454	0,452
2	0,796	0,634	0,631
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.18.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,040000	0,010000		3,939	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,674000	-14,156	0,0
2					
Constante	-0,081581	0,014000		-5,889	0,000
E da Plataforma	-0,000367	0,000000	-0,674000	-17,261	0,0
E do lastro	0,000059	0,000000	0,425000	10,876	0,0

**Constante = -0,08158147013918**

**E plat = -0,0003670639716931**

**E lastro = 5,861511186714e-005**

**i) Considerando apenas Espaçamento 60 e Trilho 57**

**i.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.19.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,793	0,628	0,627
2	0,905	0,819	0,817
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.19.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,106000	0,006000		19,104	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,793000	-20,189	0,0
2					
Constante	0,022638	0,070000		3,462	0,001
E da Plataforma	-0,000290	0,000000	-0,793000	-28,860	0,0
E do lastro	0,000040	0,000000	0,436000	15,890	0,0

**Constante = 0,02263839072429**  
**E plat = -0,0002897238866138**  
**E lastro = 4,042499364254e-005**

**i.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5**

*Tabela F.20.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

<b>Sumário Estatístico</b>			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,749	0,561	0,559
2	0,899	0,809	0,807
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Figura F.20.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,052000	0,007000		7,972	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,749000	-17,545	0,0
2					
Constante	-0,050893	0,070000		-7,026	0,0
E da Plataforma	-0,000295	0,000000	-0,749000	-26,550	0,0
E do lastro	0,000050	0,000000	0,498000	17,660	0,0

**Constante = -0,05089323149871**

**E plat = -0,0002952584235802**

**E lastro = 4,976845351252e-005**

### i.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.21.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,704	0,496	0,494
2	0,886	0,785	0,783
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.21.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	-0,080000	0,007000		-1,100	0,3
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,704000	-15,389	0,0
2					
Constante	-0,123905	0,008000		-15,441	0,0
E da Plataforma	-0,000290	0,000000	-0,704000	-23,512	0,0
E do lastro	0,000056	0,000000	0,538000	17,961	0,0

**Constante = -0,1239047846768**

**E plat = -0,0002896571645503**

**E lastro = 5,607272301053e-005**

**j) Considerando apenas Espaçamento 50 e Trilho 68**

**j.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.22.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

<b>Sumário Estatístico</b>			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,782	0,611	0,609
2	0,87	0,757	0,755
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.22.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,202000	0,010000		19,920	0,3
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,782000	-19,459	0,0
2					
Constante	0,071447	0,013000		5,298	0,0
E da Plataforma	-0,000509	0,000000	-0,782000	-24,571	0,0
E do lastro	0,000063	0,000000	0,382000	12,011	0,0

**Constante = 0,07144743392854**

**E plat = -0,0005086838764109**

**E lastro = 6,301378024408e-005**

**j.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5**

*Tabela F.23.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,767	0,588	0,587
2	0,868	0,753	0,751
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.23.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,174000	0,011000		15,495	0,0
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,767000	-18,564	0,0
2					
Constante	0,024687	0,015000		1,689	0,093
E da Plataforma	-0,000537	0,000000	-0,767000	-23,936	0,0
E do lastro	0,000072	0,000000	0,406000	12,674	0,0

**Constante = 0,02468743111595**

**E plat = -0,0005371946869224**

**E lastro = 7,208300501993e-005**

### j.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.24.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,755	0,569	0,568
2	0,866	0,751	0,749
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.24.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,142000	0,012000		11,895	0,0
E da Plataforma	-0,001000	0,000000	-0,755000	-17,850	0,0
2					
Constante	-0,020600	0,015000		-1,351	0,178
E da Plataforma	-0,000548	0,000000	-0,755000	-23,417	0,0
E do lastro	0,000078	0,000000	0,426000	13,220	0,0

**Constante = -0,02060012689747**

**E plat = -0,0005482808501323**

**E lastro = 7,844021993204e-005**

**k) Considerando apenas Espaçamento 55 e Trilho 68**

**k.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.25.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,713	0,508	0,506
2	0,795	0,632	0,629
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Figura F.25.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,127000	0,009000		14,902	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,713000	-15,766	0,0
2					
Constante	0,037139	0,012000		2,991	0,003
E da Plataforma	-0,000347	0,000000	-0,713000	-18,194	0,0
E do lastro	0,000043	0,000000	0,352000	8,997	0,0

**Constante = 0,03713883194557**  
**E plat = -0,0003468399273148**  
**E lastro = 4,346302049796e-005**

## k.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5

Tabela F.26.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,690	0,476	0,474
2	0,793	0,63	0,626
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.26.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,087000	0,009000		9,184	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,690000	-14,810	0,0
2					
Constante	-0,020528	0,013000		-1,529	0,127
E da Plataforma	-0,000362	0,000000	-0,690000	-17,570	0,0
E do lastro	0,000052	0,000000	0,391000	9,960	0,0

**Constante = -0,02052785102494**

**E plat = -0,0003620209956173**

**E lastro = 5,200644549892e-005**

### k.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.27.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	$R^2$	Ajuste do $R^2$
1	0,674	0,454	0,452
2	0,796	0,633	0,630
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.27.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,044000	0,010000		4,425	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,674000	-14,168	0,0
2					
Constante	-0,076061	0,014000		-5,495	0,0
E da Plataforma	-0,000366	0,000000	-0,674000	-17,244	0,0
E do lastro	0,000058	0,000000	0,423000	10,818	0,0

**Constante = -0,07606013657274**

**E plat = -0,0003664067417081**

**E lastro = 5,825040883176e-005**

**L) Considerando apenas Espaçamento 60 e Trilho 68**

**L.1) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d4**

*Tabela F.28.1 – Quadro com os valores de R<sup>2</sup> para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;*

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,808	0,653	0,651
2	0,917	0,84	0,839
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

*Tabela F.28.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável*

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,096000	0,050000		19,016	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,808000	-21,283	0,0
2					
Constante	0,018093	0,006000		3,136	0,002
E da Plataforma	-0,000278	0,000000	-0,808000	-31,331	0,0
E do lastro	0,000038	0,000000	0,433000	16,802	0,0

**Constante = 0,01809304115792**  
**E plat = -0,0002775522158598**  
**E lastro = 3,771872396143e-005**

## L.2) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d5

Tabela F.29.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	$R^2$	Ajuste do $R^2$
1	0,729	0,531	0,529
2	0,880	0,774	0,772
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.29.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	0,053000	0,070000		7,607	0,0
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,729000	-16,518	0,0
2					
Constante	-0,052429	0,008000		-6,415	0,0
E da Plataforma	-0,000298	0,000000	-0,729000	-23,748	0,0
E do lastro	0,000051	0,000000	0,493000	16,067	0,0

**Constante = -0,05242929332765**

**E plat = -0,0002979514484568**

**E lastro = 5,108380581266e-005**

### L.3) Combinação do Espaçamento, E do Lastro e E da Plataforma Para o d6

Tabela F.30.1 – Quadro com os valores de  $R^2$  para cada regressão linear calculada. O modelo 1 representa uma regressão com apenas uma variável e o modelo 3 com 3 variáveis;

Sumário Estatístico			
Modelo	R	R <sup>2</sup>	Ajuste do R <sup>2</sup>
1	0,495	0,245	0,242
2	0,656	0,430	0,425
1	Módulo de elasticidade da plataforma		
2	Módulo de elasticidade da plataforma e do lastro		

Tabela F.30.2 – Quadro com os coeficientes de cada variável

Modelo	Coeficiente com constante		Coeficiente s/ constante Beta	t	Sig.
	B	Desvio Padrão			
1					
Constante	-0,007000	0,012000		-0,610	0,542
E da Plataforma	0,000000	0,000000	-0,495000	-8,855	0,0
2					
Constante	-0,135000	0,018000		-7,505	0,0
E da Plataforma	-0,000280	0,000000	-0,495000	-10,167	0,0
E do lastro	0,000061	0,000000	0,430000	8,816	0,0

**Constante = -0,1345607480954**

**E plat = -0,0002798549741623**

**E lastro = 6,149648300487e-005**

## **ANEXO G - REGRESSÃO LINEAR – Não Lineares**

Neste anexo são apresentadas as regressões não-lineares realizadas com as quatro variáveis de maior correlação entre aquelas de maior sensibilidade. Como a tentativa de encontrar uma regressão linear com alto valor de  $R^2$  não foi possível, tentou-se encontrar uma equação não-linear conveniente através do programa SPSS 14.0. As sete equações testadas têm como origem modificações nas equações lineares calculadas pelas regressões lineares.

A - 1º Equação  $a_1 + a_2 * plat + a_3 * lastro^2 + a_4 * espaçamento^3$

Tabela G.1.1 – Resíduos da regressão baseada na equação 1;

Histórico das Interações					
Número da Interação	Residuo da Soma dos Quadrados	Parametros			
		a1	a2	a3	a4
0.2	8,919	0,000	0,000	0,000	0,000
1.2	8,376	0,000	0,000	3,17E-09	3,59E-11
2.1	8,376	0,000	0,000	3,17E-09	3,59E-11

Tabela G.1.2 – Valores dos coeficientes da regressão calculados pelo SPSS 14

Parametro Estimados				
Parametro	Estimativa	Erro padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
-	-	-	Borda inferior	Borda superior
a1	0	0,009	-0,015	0,015
a2	0	0,000	-0,0000208	0,0000208
a3	3,17E-09	0,000	1,93E-09	4,41E-09
a4	3,59E-11	0,000	-6,98E-08	6,99E-08

Tabela G.1.3 – Calculo do  $R^2$  para a equação com valor de 0,049;

Calculo do Coeficiente de Determinação da Equação			
	Soma dos quadrados	df	Quadrados mínimos
Regressão	0,543	4	0,136
Residuo	8,376	2183	0,004
Total não corrigidos	8,919	2187	-
Total não corrigidos	8,811	2186	-
$R^2 = 1 - \text{Residuo da Soma dos Quadrados} / \text{Soma dos quadrados corrigidos}$			
			<b>D4</b> <b>0,049</b>

$$B - 2^{\circ} \text{Equação } a_1 + a_2 * \text{plat} - a_3 * \text{lastro}^2 + a_4 * \text{espaçamento}^3$$

Tabela G.2.1 – Resíduos da regressão baseada na equação 2;

Histórico das Interações					
Número da Interação	Resíduo da Soma dos Quadrados	Parâmetros			
		a1	a2	a3	a4
0.3	8,919	0,000	0,000	0,000	0,000
1.3	8,862	2,35E-13	8,53E-10	0,000	2,96E-08
2.2	8,606	2,35E-13	6,28E-06	3,17E-09	0,000
3.2	8,602	4,92E-10	5,64E-06	3,17E-09	0,000
4.1	8,376	4,92E-10	5,67E-06	3,17E-09	0,000

Tabela G.2.2 – Valores dos coeficientes da regressão calculados pelo SPSS 14

Parâmetro Estimados				
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
-	-	-	Borda inferior	Borda superior
a1	4,92E-10	0,009	-0,018	0,018
a2	0,00000567	0,000	3,18E-07	0,000011
a3	0,000	0,000	-3,06E-08	3,06E-08
a4	0,000	0,000	-7,08E-08	7,08E-08

Tabela G.2.3 – Cálculo do  $R^2$  para a equação com valor de 0,024;

Cálculo do Coeficiente de Determinação da Equação			
	Soma dos quadrados	df	Quadrados mínimos
Regressão	0,317	4	0,079
Resíduo	8,602	2183	0,004
Total não corrigidos	8,919	2187	-
Total não corrigidos	8,811	2186	-
$R^2 = 1 - \text{Resíduo da Soma dos Quadrados} / \text{Soma dos quadrados corrigidos}$			
			<b>D4</b>
			<b>0,024</b>

**C - 3ª Equação  $a_1 + a_2 + a_3 * plat + a_4 * lastro^2 + a_5 * espaçamento^3$**

*Tabela G.3.1 – Resíduos da regressão baseada na equação 3;*

<b>Histórico das Interações</b>					
Número da Interação	Resíduo da Soma dos Quadrados	Parametros			
		a1	a2	a3	a4
0.2	8,919	0,000	0,000	0,000	0,000
1.1	8,376	0	0	3,17E-09	3,59E-11
2.1	7,578	0	0	1,05E-08	-0,00000024
3.1	7,578	0	0	1,05E-08	-0,00000024

*Tabela G.3.2 – Valores dos coeficientes da regressão calculados pelo SPSS 14*

<b>Parametro Estimados</b>				
Parametro	Estimativa	Erro padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
-	-	-	Borda inferior	Borda superior
a1	0,000	4E-13	-6,875E-13	6,875E-13
a2	0,000	4E-13	-6,875E-13	6,875E-13
a3	0,000	0,000	0,000	0,000
a4	1,45E-08	0,000	9,34E-09	1,17E-08
a5	0,000000238	0,000	-3,05E-07	-0,000000172

*Tabela G.3.3 – Calculo do R<sup>2</sup> para a equação com valor de 0,14;*

<b>Calculo do Coeficiente de Determinação da Equação</b>			
	Soma dos quadrados	df	Quadrados mínimos
Regressão	1,341	5	0,268
Residuo	7,578	2182	0,003
Total não corrigidos	8,919	2187	-
Total não corrigidos	8,811	2186	-
R <sup>2</sup> = 1 - Residuo da Soma dos Quadrados/Soma dos quadrados corrigidos			
			<b>D4</b>   <b>0,14</b>

$$D - 4^{\text{a}} \text{ Equação } a_1 + a_2 * \text{plat} + a_3 * \text{plat} - a_4 * \text{lastro}^2 + a_5 * \text{esp}^4$$

Tabela G.4.1 – Resíduos da regressão baseada na equação 4;

Histórico das Interações						
Número da Interação	Resíduo da Soma dos Quadrados	Parametros				
		a1	a2	a3	a4	a5
0.2	8,919	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1.2	8,875	0,000	-3,2E-14	0,000	0,000	4,58E-10
2.3	8,864	3,66E-17	-0,000001	0,000	0,000	7,2E-10
3.2	8,729	3,66E-17	0,0000072	0,000	0,000	7,2E-10
4.3	7,298	3,66E-17	0,000	0,000	0,000	6,96E-09
5.1	6,994	0,000000014	0,000	3,93E-06	0,000	6,96E-09
6.2	6,312	0,030	0,000	0,0000111	0,000	6,96E-09
7.1	5,74	0,064	0,000	0,0000261	0,000	6,96E-09
8.1	5,676	0,076	0,000	0,000	0,000	6,96E-09
9.1	5,676	0,076	0,000	0,000029	0,000	6,96E-09
10.1	5,676	0,076	0,000	0,0000292	0,000	6,96E-09
11.1	5,676	0,076	0,000	0,0000293	0,000	6,96E-09

Tabela G.4.2 – Valores dos coeficientes da regressão calculados pelo SPSS 14

Parametro Estimados				
Parametro	Estimativa	Erro padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
			Borda inferior	Borda superior
-	-	-		
a1	0,076	0,006	0,065	0,087
a2	0,000	111,873	-219,389	219,389
a3	0,0000293	111,873	-219,389	219,389
a4	0,000	0,000	-1,02E-09	1,02E-09
a5	6,96E-09	0,000	6,16E-09	7,75E-09

Tabela G.4.3 – Cálculo do R<sup>2</sup> para a equação com valor de 0,356;

Cálculo do Coeficiente de Determinação da Equação			
	Soma dos quadrados	df	Quadrados mínimos
Regressão	3,243	5	0,649
Resíduo	5,676	2182	0,003
Total não corrigidos	8,919	2187	-
Total não corrigidos	8,811	2186	-
R <sup>2</sup> = 1 - Resíduo da Soma dos Quadrados/Soma dos quadrados corrigidos			
			<b>D4</b> <b>0,356</b>

$$E - 5^{\text{a}} \text{ Equa\c{c}\~{o} } a_1 + a_2 * \text{plat} + a_3 * \text{plat} + a_4 * \text{lastro}^2 + a_5 * \text{espa\c{c}amento}^4$$

Tabela G.5.1 – Resíduos da regressão baseada na equação 5;

Histórico das Interações						
Número da Interação	Residuo da Soma dos Quadrados	Parametros				
		a1	a2	a3	a4	a5
0.2	8,919	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1.3	8,694	0,000	0,000	0,000	9,94E-10	5,63E-10
2.2	8,002	0,000	-0,000025	0,000	6,08E-09	5,63E-10
3.3	4,37	0,000	0,000	0,000	1,71E-08	5,63E-10
4.2	4,338	9E-17	0,000	0,000	1,77E-08	1,03E-09
5.3	4,291	9,2E-17	0,000	0,000	1,73E-08	1,4E-09
6.1	4,208	5,76E-16	0,000	1,18E-15	1,55E-08	2,88E-09
7.1	4,208	5,95E-16	0,000	-5,2E-17	1,55E-08	2,88E-09

Tabela G.5.2 – Valores dos coeficientes da regressão calculados pelo SPSS 14

Parametro Estimados				
Parametro	Estimativa	Erro padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
-	-	-	Borda inferior	Borda superior
a1	5,95E-16	0,000	5,95E-16	5,95E-16
a2	0,000	0,000	0,000	0,000
a3	-5,2E-17	0,000	-5,2E-17	-5,2E-17
a4	0,000	0,000	1,47E-08	1,63E-08
a5	2,88E-09	0,000	2,39E-09	3,38E-09

Tabela G.5.3 – Calculo do R<sup>2</sup> para a equação com valor de 0,522;

Calculo do Coeficiente de Determinação da Equação			
	Soma dos quadrados	df	Quadrados mínimos
Regressão	4,712	5	0,942
Residuo	4,208	2182	0,002
Total não corrigidos	8,919	2187	-
Total não corrigidos	8,811	2186	-
R <sup>2</sup> = 1 - Residuo da Soma dos Quadrados/Soma dos quadrados corrigidos			
			<b>D4</b> <b>0,522</b>

$$F - 6^{\text{a}} \text{ Equação} \quad a_1 + a_2 \cdot \text{plat} + a_3 \cdot \text{plat}^2 - a_4 \cdot \text{lastro}^3 + a_5 \cdot \text{espaçamento}^4$$

Tabela G.6.1 – Resíduos da regressão baseada na equação 6;

Histórico das Interações						
Número da Interação	Resíduo da Soma dos Quadrados	Parâmetros				
		a1	a2	a3	a4	a5
0.2	8,919	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1.2	8,694	0,000	-3,2E-14	0,000	0,000	4,58E-10
2.3	8,002	3,66E-17	-0,000001	0,000	0,000	7,2E-10
3.1	4,37	3,66E-17	-0,0000072	0,000	0,000	7,2E-10
4.2	4,338	3,66E-17	-0,000038	0,000	0,000	7,2E-10
5.1	4,291	3,66E-17	-0,000038	0,000	0,000	1,8E-09
6.1	4,208	3,66E-17	-0,000063	0,000	0,000	2,7E-09
7.1	4,208	3,66E-17	0,000	0,000	0,000	6,96E-09
8.1	4,208	3,66E-17	0,000	0,000	0,000	6,96E-09
9.1	4,208	3,66E-17	0,000	0,000	0,000	6,96E-09
10.1	4,208	3,66E-17	0,000	0,000	0,000	6,96E-09

Tabela G.6.3 – Correlação entre os coeficientes da regressão

Parâmetro Estimados				
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
			Borda inferior	Borda superior
-	-	-		
a1	3,66E-17	0,000	3,66E-17	3,66E-17
a2	0,000	0,000	0,000	0,000
a3	0,000	0,000	-1,04E-07	0,000000104
a4	0,000	0,000	-3,43E-13	3,43E-13
a5	6,96E-09	0,000	6,13E-09	7,79E-09

Tabela G.6.3 – Cálculo do  $R^2$  para a equação com valor de 0,206;

Cálculo do Coeficiente de Determinação da Equação			
	Soma dos quadrados	df	Quadrados mínimos
Regressão	1,925	5	0,385
Resíduo	6,994	2182	0,003
Total não corrigidos	8,919	2187	-
Total não corrigidos	8,811	2186	-
$R^2 = 1 - \text{Resíduo da Soma dos Quadrados} / \text{Soma dos quadrados corrigidos}$			
		<b>D4</b>	<b>0,206</b>

$$G - 7^{\text{a}} \text{ Equação } a_3 \cdot \text{plat} + a_4 \cdot \text{lastro}^2 + a_5 \cdot \text{espaçamento}^3$$

Tabela G.7.1 – Resíduos da regressão baseada na equação 7;

Histórico das Interações				
Número da Interação	Resíduo da Soma dos Quadrados			
		a3	a4	a5
0.2	8,919	0,000	0,000	0,000
1.3	8,376	0,000	0,000	8,59E-11
2.2	7,35	-0,000056	3,17E-09	8,59E-11
3.2	6,654	-0,000071	3,17E-09	9,73E-08
4.4	4,367	0,000	4,57E-09	8,99E-08
5.1	4,325	0,000	1,71E-08	4,18E-08
6.2	4,114	0,000	1,69E-08	0,000000143
7.1	4,040	0,000	1,58E-09	0,000000236
8.1	4,040	0,000	1,46E-08	0,000000238
9.1	4,040	0,000	1,45E-08	0,000000238
10.1	4,040	0,000	1,45E-08	0,000000238
11.1	4,040	0,000	1,45E-08	0,000000238
12.1	4,040	0,000	1,45E-08	0,000000238

Tabela G.7.2 – Valores dos coeficientes da regressão calculados pelo SPSS 14

Parametro Estimados				
Parametro	Estimativa	Erro padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
-	-	-	Borda inferior	Borda superior
a3	0,000	0,000	0,000	0,000
a4	1,45E-08	0,000	1,37E-08	1,54E-08
a5	0,000000238	0,000	2,07E-07	0,000000269

Tabela G.7.3 – Calculo do R<sup>2</sup> para a equação com valor de 0,542;

Calculo do Coeficiente de Determinação da Equação			
	Soma dos quadrados	df	Quadrados mínimos
Regressão	4,88	3	1,627
Residuo	4,04	2184	0,002
Total não corrigidos	8,919	2184	-
Total não corrigidos	8,811	2184	-
R <sup>2</sup> = 1 - Residuo da Soma dos Quadrados/Soma dos quadrados corrigidos			<b>0,542</b>

## **Anexo H – Regressões lineares considerando a variável auxiliar Xaux**

Neste anexo foi realizado através do programa SPSS 14.0 o cálculo das regressões lineares considerando a variável auxiliar Xaux. Esta variável é uma junção dos três principais elementos de correlação com a deformação do programa FERROVIA 1.0 sendo eles: o módulo de elasticidade da plataforma, o módulo de elasticidade do lastro e o espaçamento dos dormentes. Desta forma a nuvem de dispersão tem um comportamento mais adequado para estabelecer uma curva de regressão com alto valor de coeficiente de determinação  $R^2$ .

a) Regressão para o total de combinações para o dormente 4 considerando a variável  $X_{aux}$

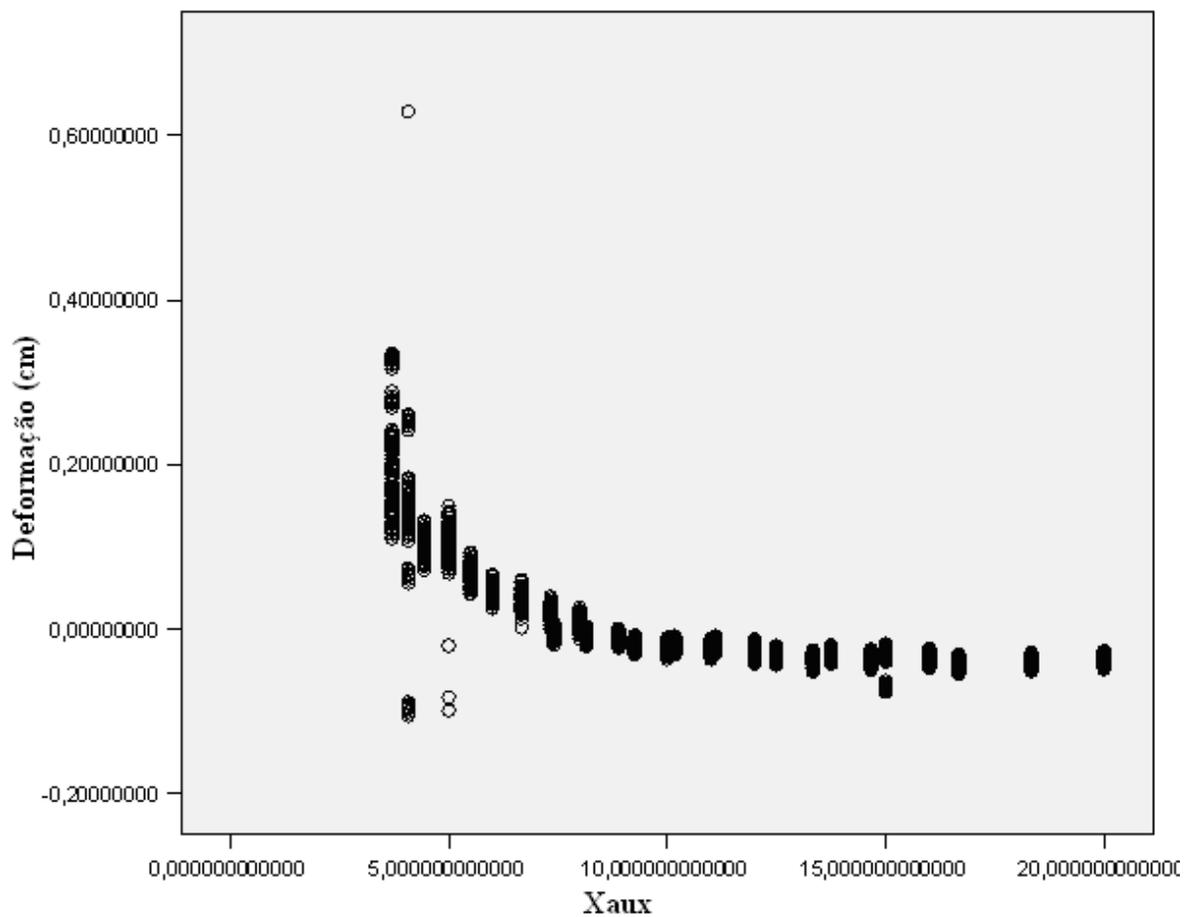


FIGURA H.1 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4 contra a variável  $X_{aux}$

TABELA H.1 – Lista de regressões executadas pelo programa SPSS na sub-função “curva estimada”

Descrição dos Modelos

<b>Variável Dependente</b>	V11
<b>Equação</b>	<b>Linear</b>
1	<b>logaritmica</b>
2	<b>Inversa</b>
3	<b>Quadratica</b>
4	<b>Cúbica</b>
5	<b>(Espaçamento x E da Plataforma)/E Lastro</b>
<b>Variável Independente</b>	
<b>Constante</b>	<b>Incluida</b>
<b>Tolerância para os termos da equação</b>	<b>0,0001</b>

TABELA H.2 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D4</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,546	2630,89	1	2185	0	0,1198596	-0,0107548	-	-
Logaritmica	0,708	5308,16	1	2185	0	0,2705885	-0,1171949	-	-
Inversa	0,820	9921,07	1	2185	0	-0,1094189	0,9875103	-	-
Quadratica	0,775	3764,36	2	2184	0	0,2779327	-0,0445596	0,0015118	-
Cubica	0,834	3664,36	3	2183	0	0,4608749	-0,1060196	0,0074569	-0,0001716

b) Regressão para o total de combinações para o dormente 5 considerando a variável Xaux

V12

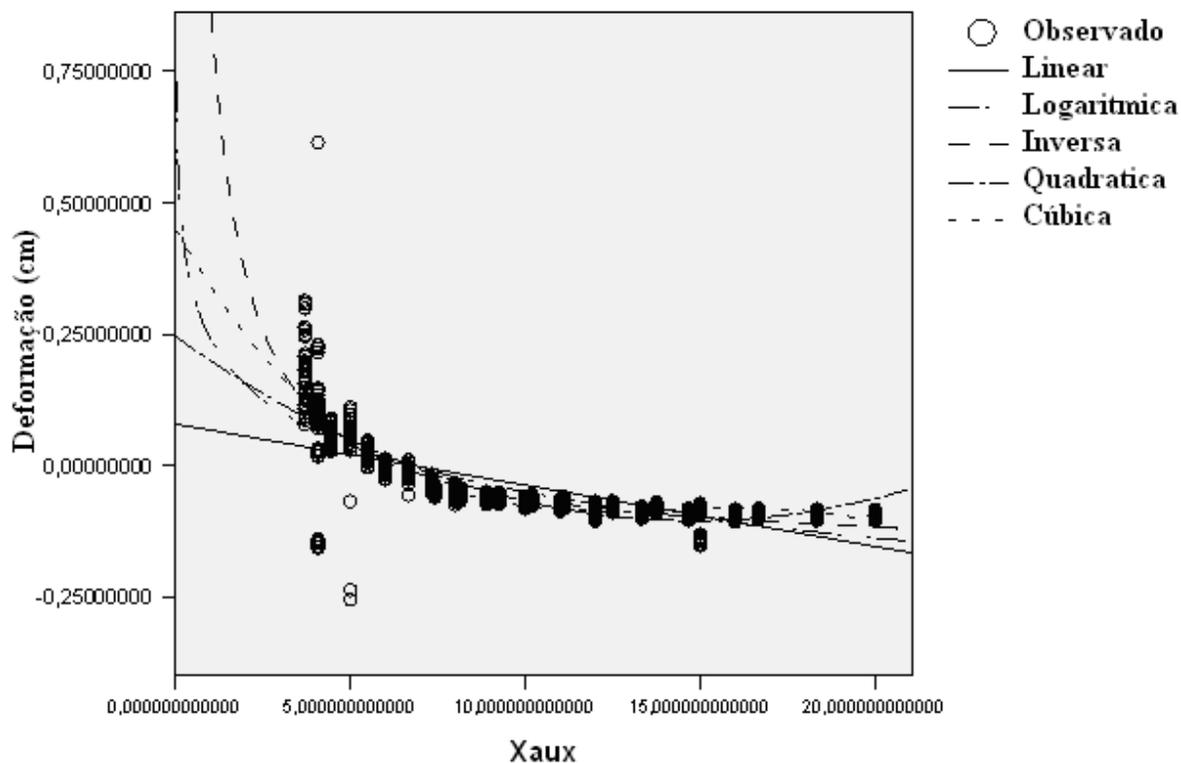


FIGURA H.2 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5 contra a variável Xaux

TABELA H.3 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D5	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,546	2625,04	1	2185	0	0,0802744	-0,0118306	-	-
Logaritmica	0,702	5139,24	1	2185	0	0,2448552	-0,1283694	-	-
Inversa	0,810	9284,89	1	2185	0	-0,1712080	1,0801821	-	-
Quadratica	0,754	3355,57	2	2184	0	0,2464255	-0,0473629	0,0015891	-
Cubica	0,818	3276,63	3	2183	0	0,4554704	-0,1175923	0,0083825	-0,0001960

c) Regressão para o total de combinações para o dormente 6 considerando a variável Xaux

V13

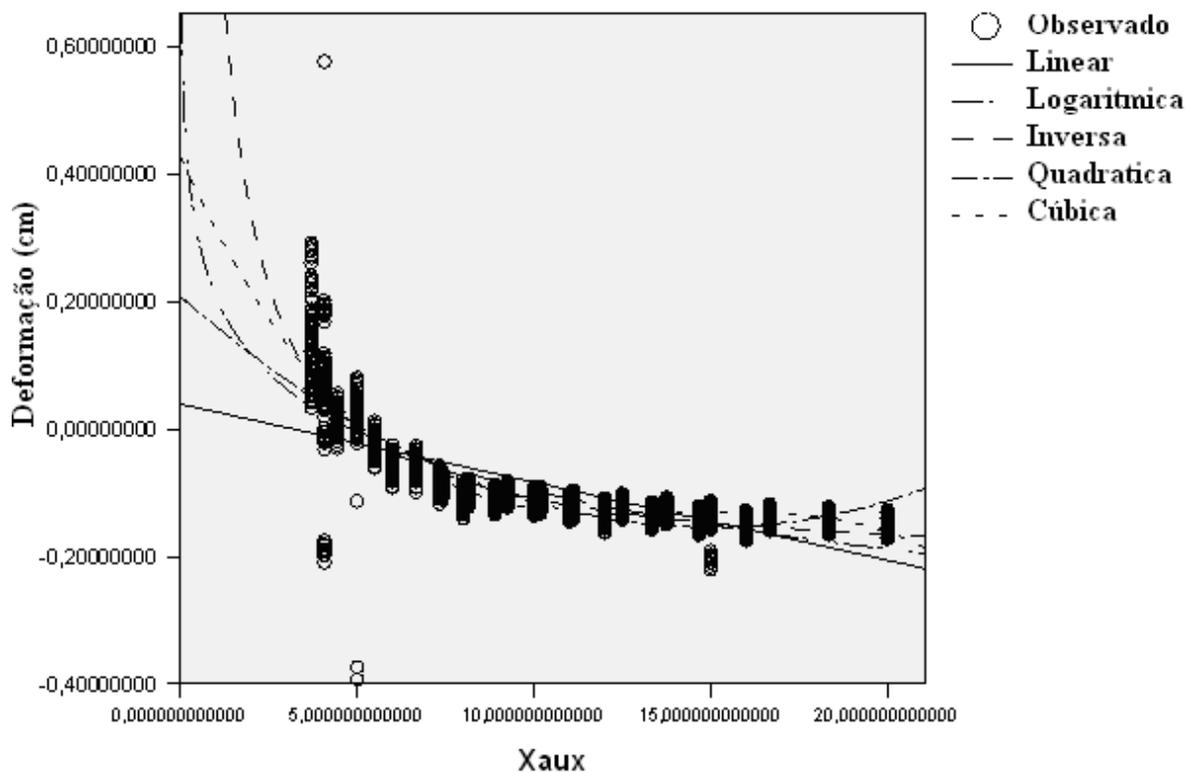


FIGURA H.3 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6 contra a variável Xaux

TABELA H.4 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D6</b>	$R^2$	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,512	2293,85	1	2185	0	0,0353011	-0,0124086	-	-
Logaritmica	0,655	4148,07	1	2185	0	0,2071209	-0,1342819	-	-
Inversa	0,756	6785,45	1	2185	0	-0,2281758	1,1305209	-	-
Quadratica	0,693	2463,77	2	2184	0	0,2026982	-0,0482073	0,0016010	-
Cubica	0,762	2328,53	3	2183	0	0,4380810	-0,1272850	0,0092503	-0,0002207

d) Gráfico de Dispersão para espaçamento 50 cm e TR45 para o dormente d4, d5 e d6

d4

V11

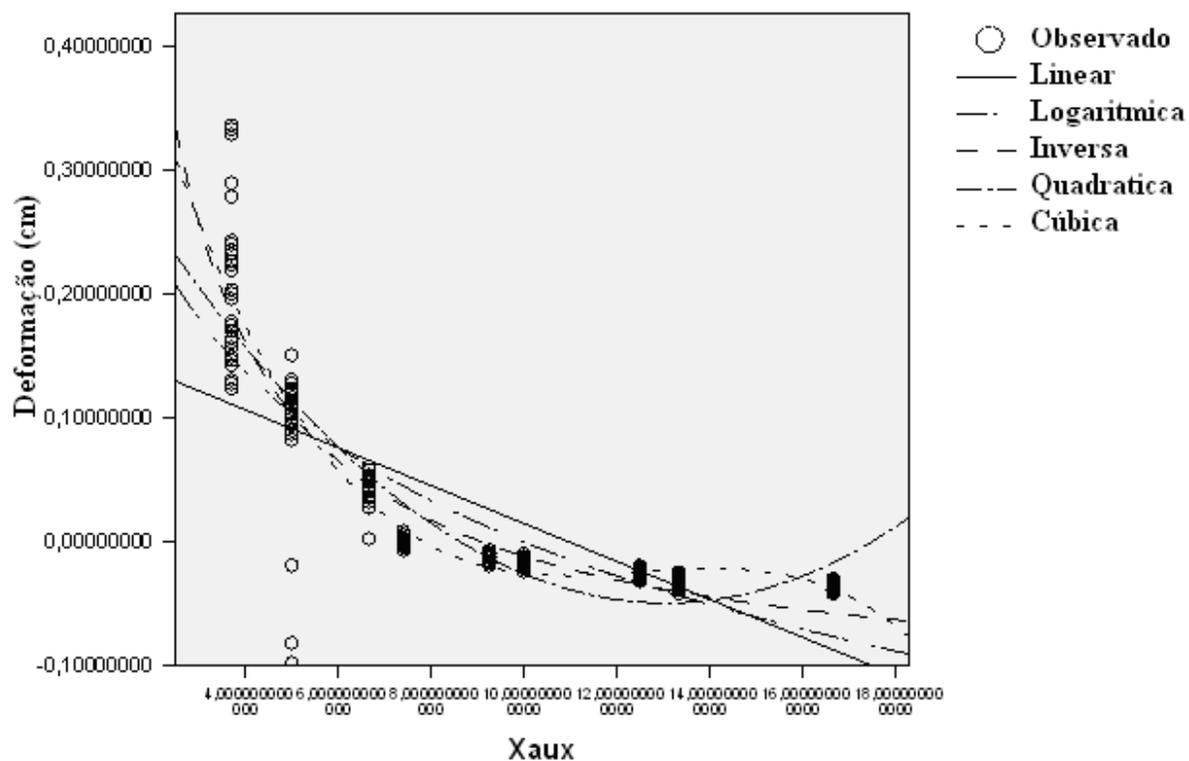


FIGURA H.4 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 50 cm e TR45 contra a variável Xaux;

TABELA H.5 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D4</b>	$R^2$	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,565	312,673	1	241	0	0,1671266	-0,0153108	-	-
Logaritmica	0,723	630	1	241	0	0,3446017	-0,1500109	-	-
Inversa	0,833	1201,82	1	241	0	-0,1277671	1,1542546	-	-
Quadratica	0,800	478,562	2	240	0	0,3797916	-0,0658379	0,0025198	-
Cubica	0,858	482,868	3	239	0	0,6431588	-0,1650942	0,0133673	-0,0003551

d5

V12

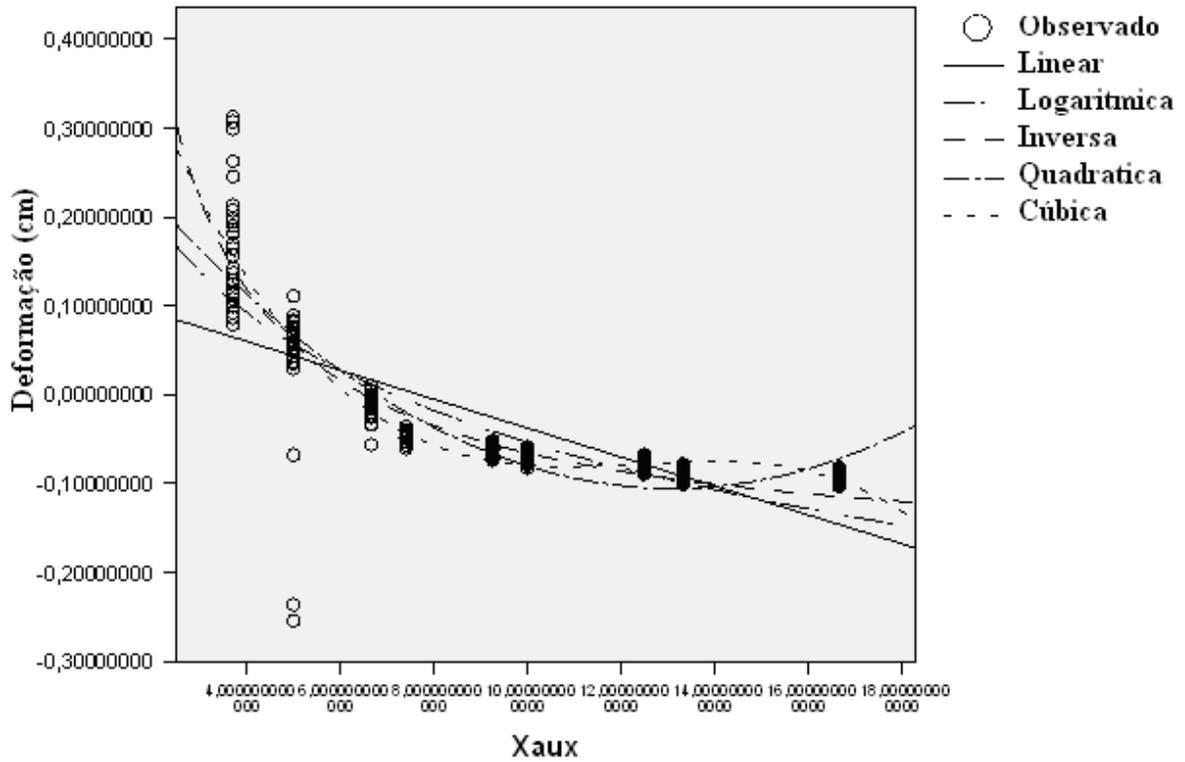


FIGURA H.5 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 50 cm e TR45 contra a variável Xaux;

TABELA H.6 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D5</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,533	274,608	1	241	0	0,1251516	-0,0162672	-	-
Logaritmica	0,682	515,819	1	241	0	0,3135658	-0,1593126	-	-
Inversa	0,787	892,308	1	241	0	-0,1883440	1,2277422	-	-
Quadratica	0,747	355,009	2	240	0	0,3476812	-0,0691380	0,0026367	-
Cubica	0,808	335,206	3	239	0	0,6400454	-0,1793225	0,0146785	-0,0003942

d6

V13

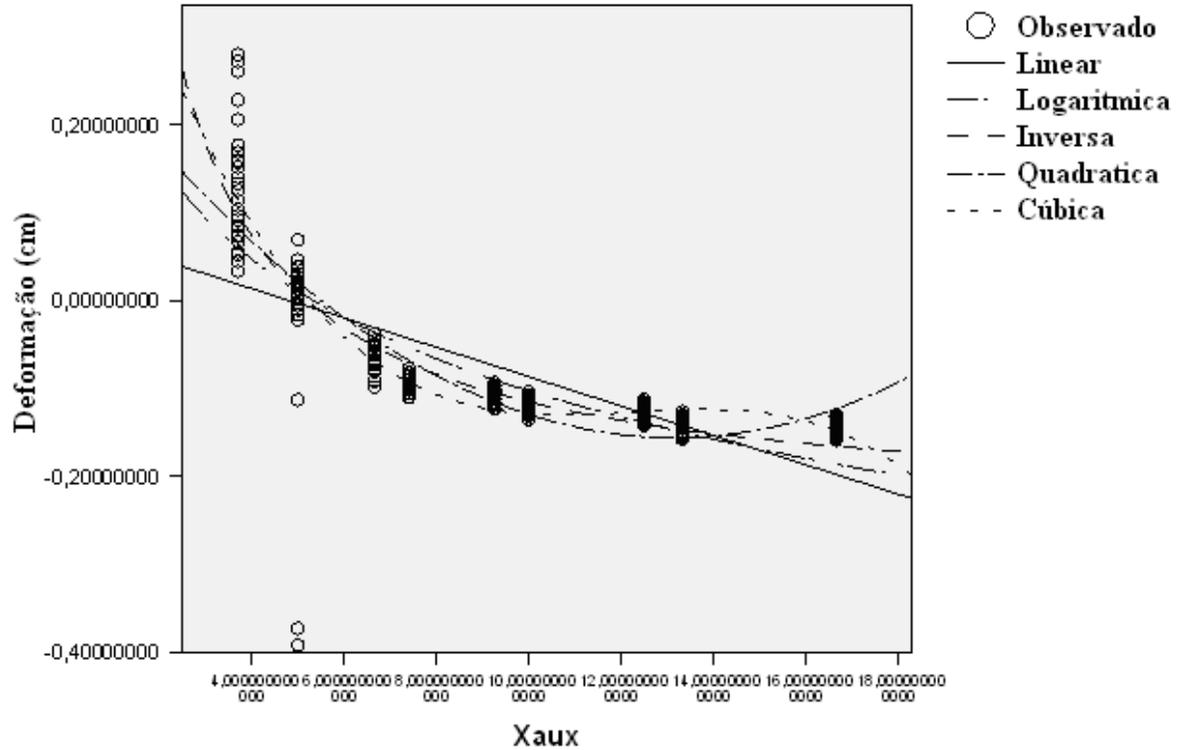


FIGURA H.6 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 50 cm e TR45 contra a variável Xaux

TABELA H.7 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D6</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,500	241,364	1	241	0	0,0806040	-0,0167158	-	-
Logaritmica	0,640	427,788	1	241	0	0,2740247	-0,1636175	-	-
Inversa	0,741	688,236	1	241	0	-0,2416394	1,2623845	-	-
Quadratica	0,696	275,319	2	240	0	0,3060053	-0,0702689	0,0026707	-
Cubica	0,758	248,872	3	239	0	0,6171373	-0,1875265	0,0154855	-0,0004195

e) Gráfico de Dispersão para espaçamento 55 cm e TR45 para o dormente d4, d5 e d6

**d4**

V11

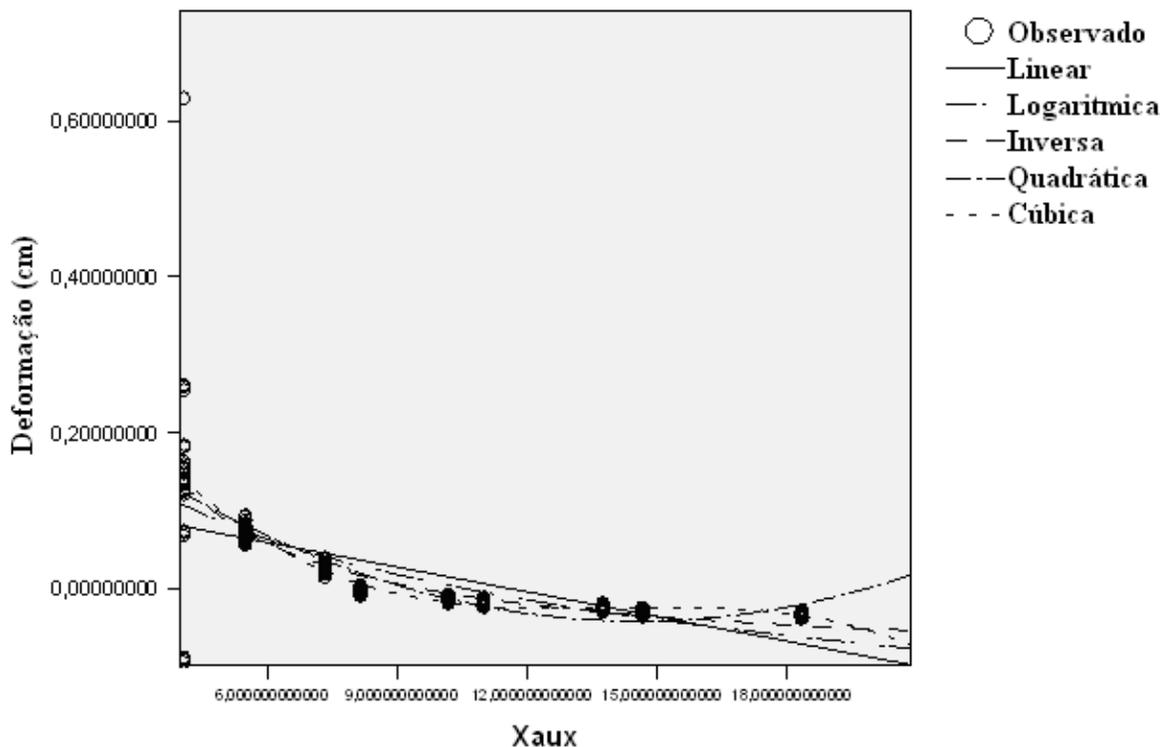


FIGURA H.7 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 55 cm e TR45 contra a variável Xaux;

TABELA H.8 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 55 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D4</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,557	303,165	1	241	0	0,1225832	-0,0105368	-	-
Logaritmica	0,696	550,621	1	241	0	0,2645315	-0,1121178	-	-
Inversa	0,778	846,576	1	241	0	-0,0975971	0,9354684	-	-
Quadratica	0,757	373,767	2	240	0	0,2721206	-0,0428355	0,0014643	-
Cubica	0,795	309,725	3	239	0	0,4343288	-0,0984101	0,0069858	-0,0001643



d6

V13

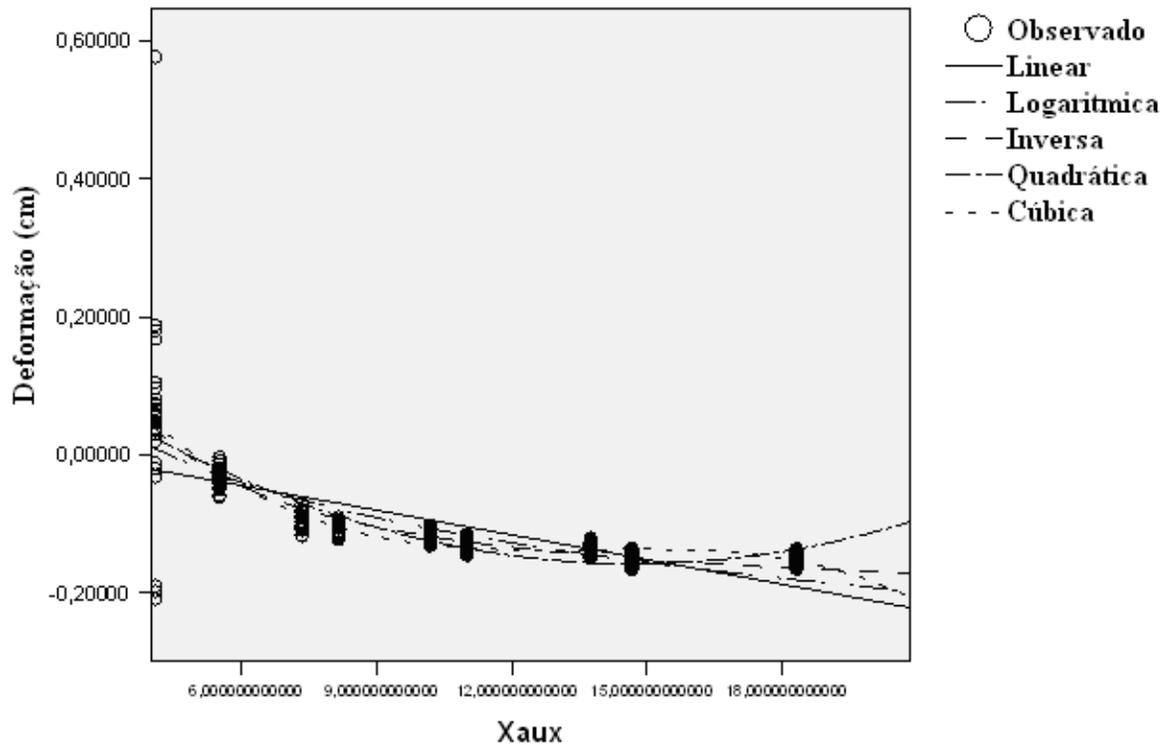


FIGURA H.9 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 55 cm e TR45 contra a variável Xaux;

TABELA H.10 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 55 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D6	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,554	299,043	1	241	0	0,0186123	-0,0117222	-	-
Logaritmica	0,688	530,813	1	241	0	0,1758049	-0,1244075	-	-
Inversa	0,772	815,293	1	241	0	-0,2261928	1,0394784	-	-
Quadratica	0,734	331,889	2	240	0	0,1772887	-0,0459949	0,0015538	-
Cubica	0,782	284,943	3	239	0	0,3775603	-0,1146105	0,0083709	-0,0002029

f) Gráfico de Dispersão para espaçamento 60 cm e TR45 para o dormente d4, d5 e d6

d4

V11

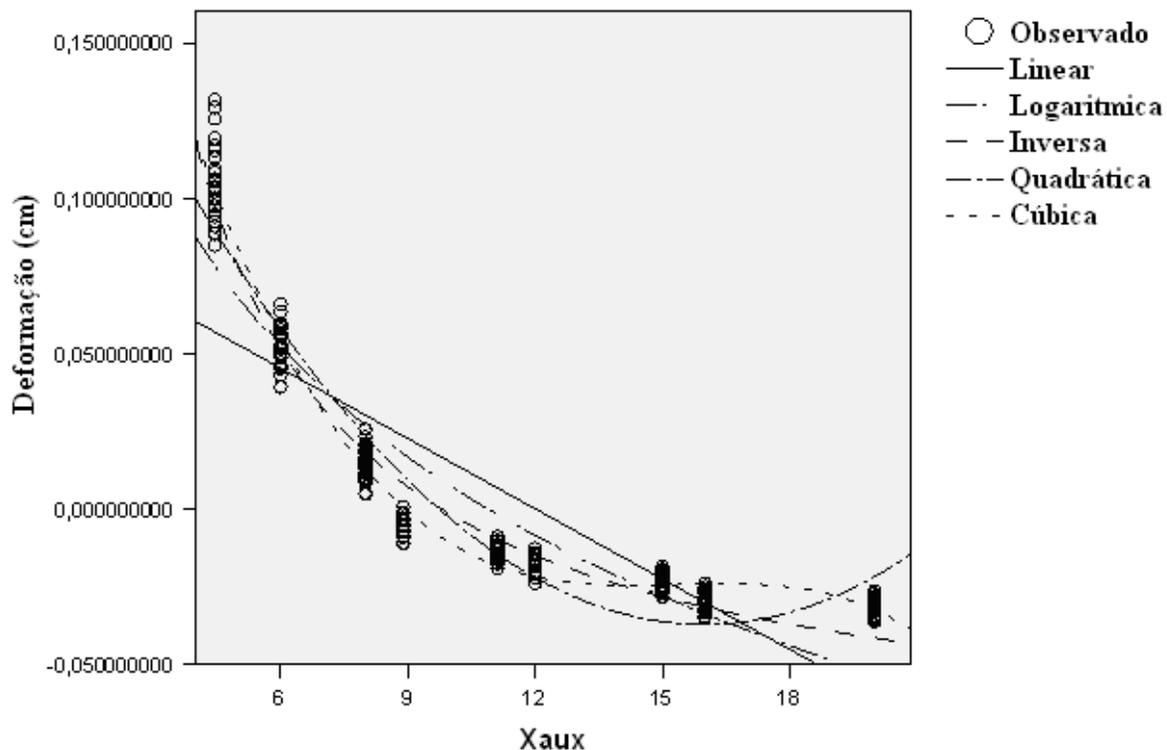


FIGURA H.10 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 60 cm e TR45 contra a variável Xaux;

TABELA H.11 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D4	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,699	560,205	1	241	0	0,0959472	-0,0078326	-	-
Logaritmica	0,862	1508,31	1	241	0	0,2176678	-0,0903604	-	-
Inversa	0,956	5287,89	1	241	0	-0,0816523	0,8188346	-	-
Quadratica	0,923	1445,56	2	240	0	0,2105838	-0,0305297	0,0009432	-
Cubica	0,970	2617,19	3	239	0	0,3405743	-0,0713548	0,0046613	-0,0001014

d5

V12

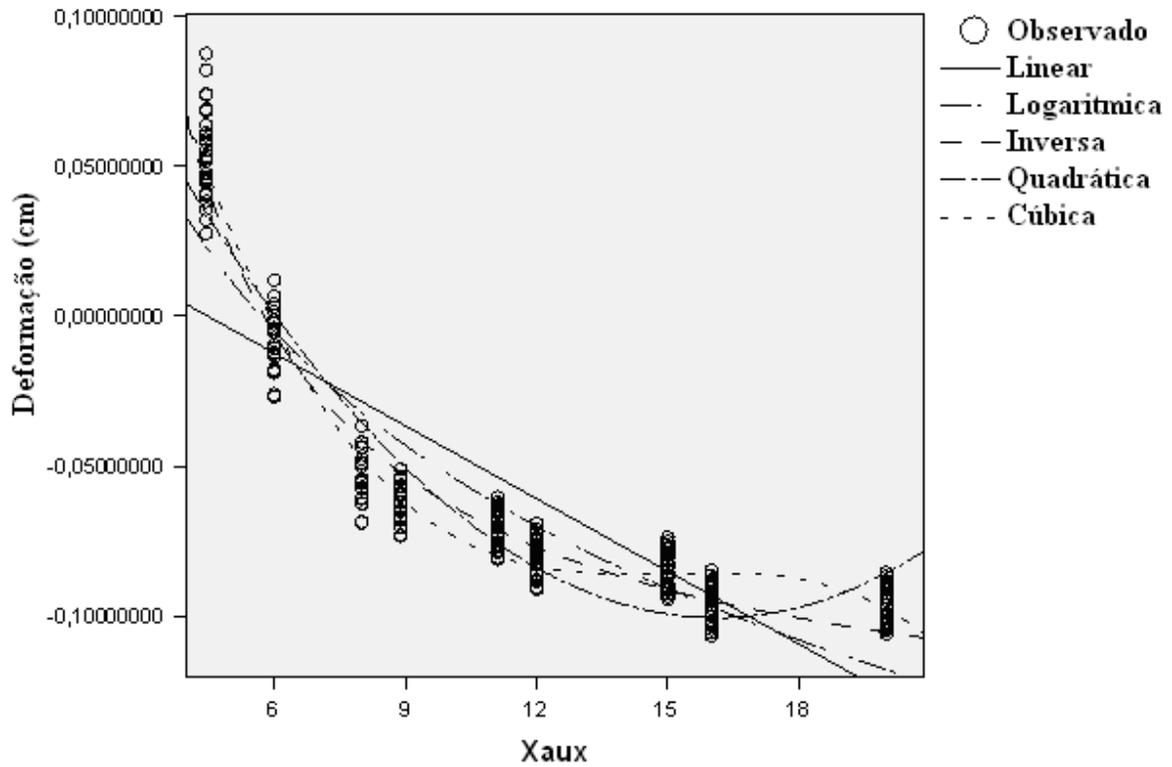


FIGURA H.11 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 60 cm e TR45 contra a variável Xaux;

TABELA H.12 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D5	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,686	525,344	1	241	0	0,0385362	-0,0083637	-	-
Logaritmica	0,842	1287,23	1	241	0	0,1681047	-0,0963130	-	-
Inversa	0,936	3553,35	1	241	0	-0,1510443	0,8737940	-	-
Quadratica	0,890	973,978	2	240	0	0,1567028	-0,0317597	0,0009723	-
Cubica	0,944	1335,46	3	239	0	0,3059453	-0,0786311	0,0052410	-0,0001164

d6

V13

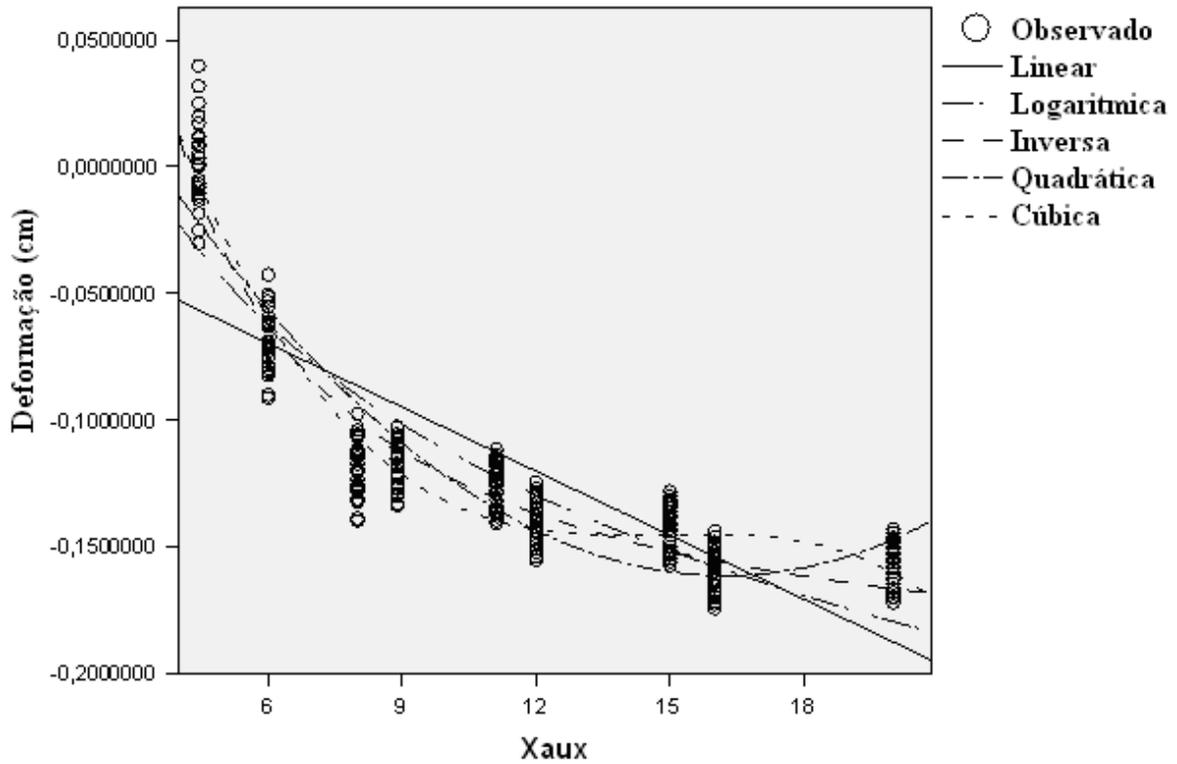


FIGURA H.12 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 60 cm e TR45 contra a variável Xaux;

TABELA H.13 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR45 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D6</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,640	428,065	1	241	0	-0,0297437	-0,0084004	-	-
Logaritmica	0,795	932,922	1	241	0	0,1016172	-0,0972620	-	-
Inversa	0,895	2052,26	1	241	0	-0,2212925	0,8880499	-	-
Quadratica	0,845	655,688	2	240	0	0,0933227	-0,0327665	0,0010126	-
Cubica	0,899	712,176	3	239	0	0,2494932	-0,0818137	0,0054795	0,0054795

g) Gráfico de Dispersão para espaçamento 50 cm e TR57 para o dormente d4, d5 e d6

d4

V11

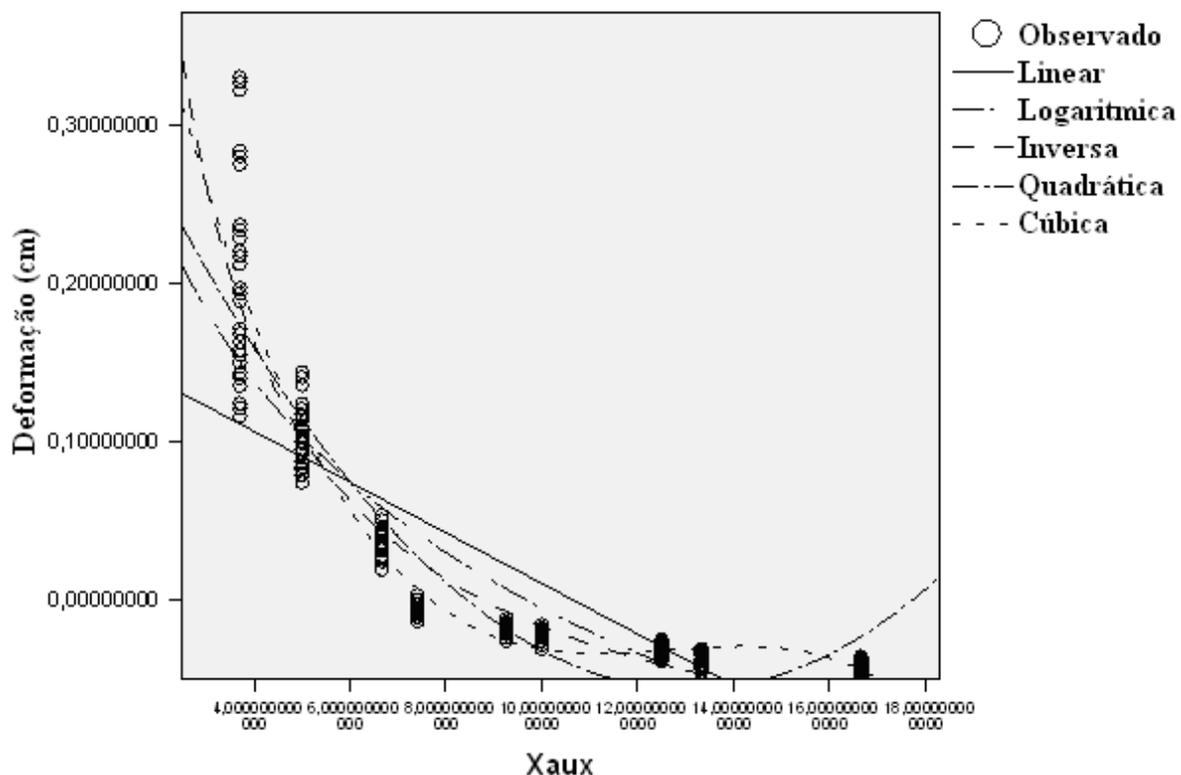


FIGURA H.13 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 50 cm e TR57 contra a variável Xaux;

TABELA H.14 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D4	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,610	376,525	1	241	0	0,1700078	-0,0160113	-	-
Logarítmica	0,777	839,375	1	241	0	0,3547356	-0,1564690	-	-
Inversa	0,887	1891,11	1	241	0	-0,1372850	1,1987192	-	-
Quadrática	0,860	736,289	2	240	0	0,3909146	-0,0684965	0,0026174	-
Cúbica	0,916	867,407	3	239	0	0,6495002	-0,1659508	0,0132680	-0,0003486

d5

V12

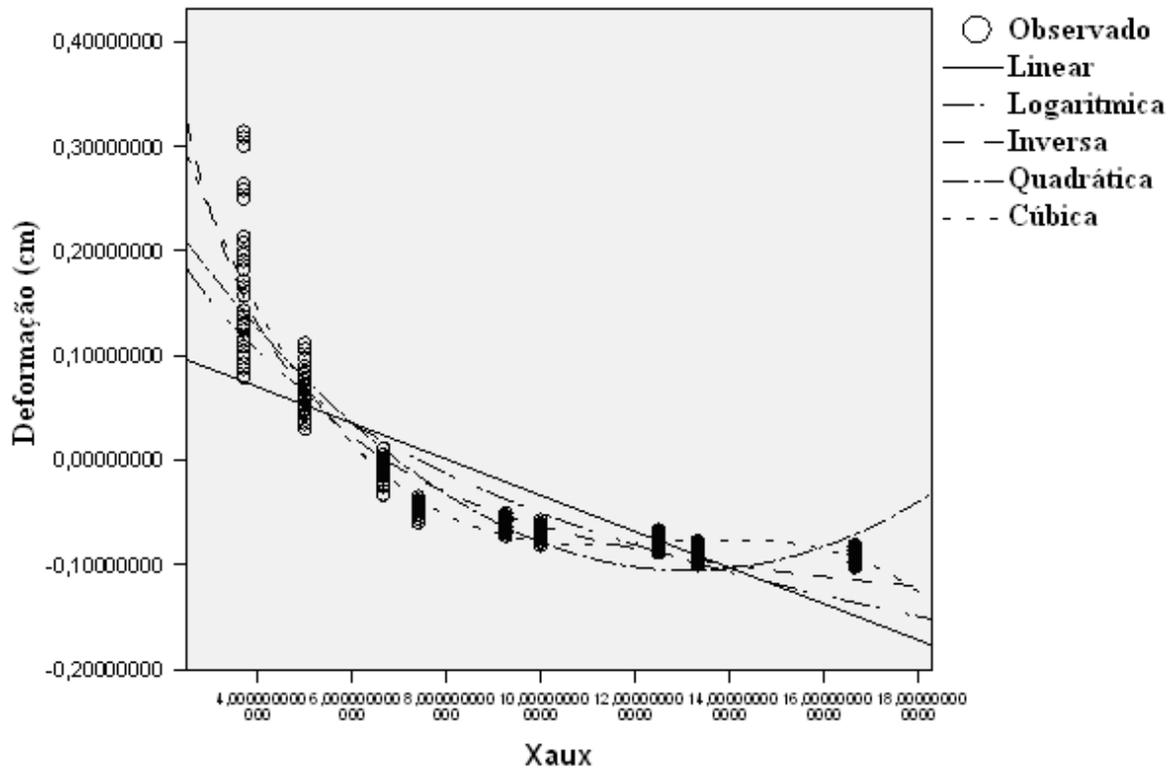


FIGURA H.14 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 50 cm e TR57 contra a variável Xaux;

TABELA H.15 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D5	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,612	379,65	1	241	0	0,1389229	-0,0172632	-	-
Logaritmica	0,777	841,32	1	241	0	0,3376069	-0,1684757	-	-
Inversa	0,887	1891,73	1	241	0	-0,1921286	1,2903941	-	-
Quadratica	0,855	706,327	2	240	0	0,3733462	-0,0729598	0,0027776	-
Cubica	0,913	832,472	3	239	0	0,6562847	-0,1795921	0,0144312	-0,0003815

d6

V13

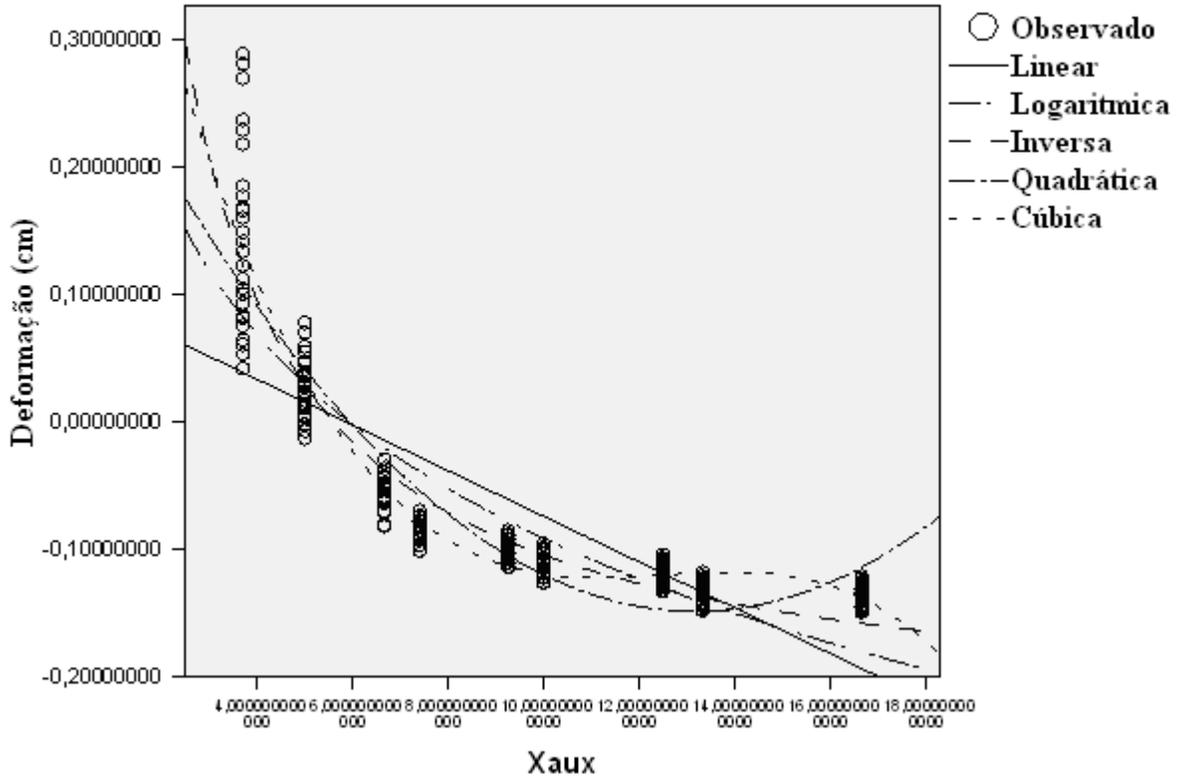


FIGURA H.15 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 50 cm e TR57 contra a variável Xaux;

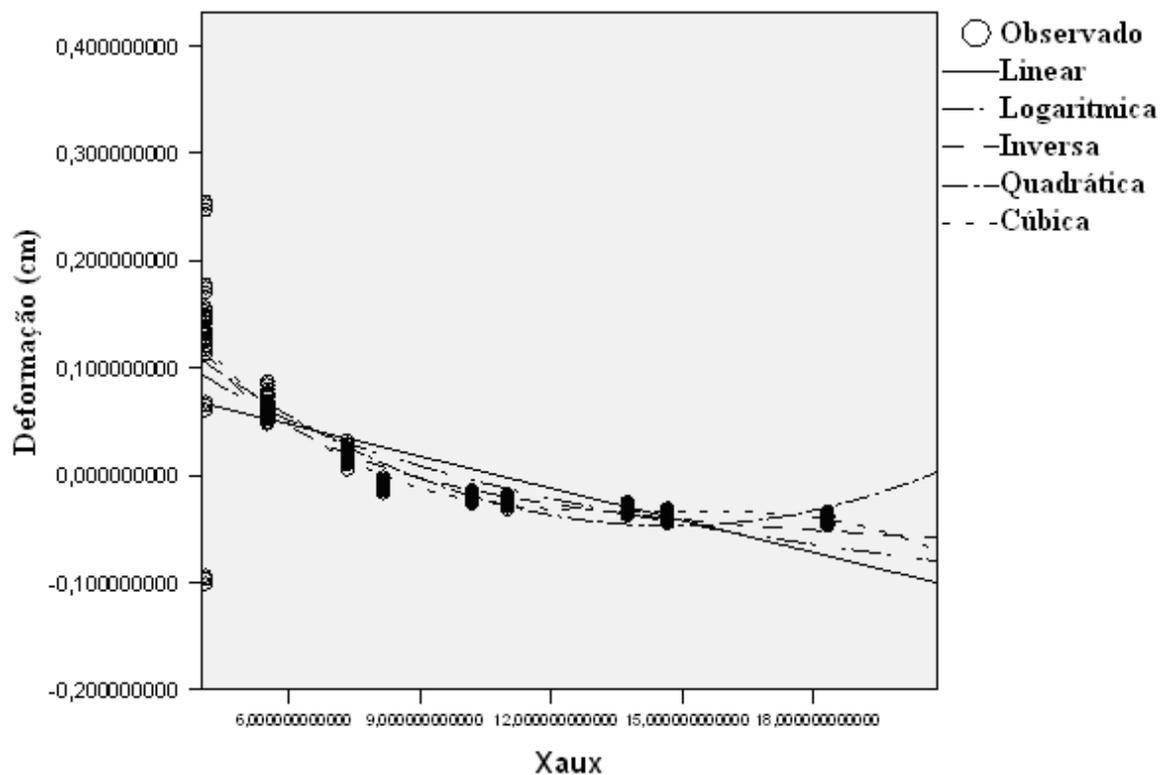
TABELA H.16 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D6	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,612	380,687	1	241	0	0,1045275	-0,0179347	-	-
Logaritmica	0,776	836,348	1	241	0	0,3104938	-0,1748207	-	-
Inversa	0,885	1861,81	1	241	0	-0,2391493	1,3386635	-	-
Quadratica	0,849	674,626	2	240	0	0,3446940	-0,0749958	0,0028456	-
Cubica	0,908	788,998	3	239	0	0,6420705	-0,1870694	0,0150939	-0,0004009

**h) Gráfico de Dispersão para espaçamento 55 cm e TR57 para o dormente d4, d5 e d6**

**d4**

**V11**



*FIGURA H.16 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 55 cm e TR57 contra a variável Xaux;*

*TABELA H.17 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;*

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 55 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D4</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,530	380,687	1	241	0	0,1100302	-0,0101494	-	-
Logaritmica	0,655	458,182	1	241	0	0,2455231	-0,1074430	-	-
Inversa	0,725	636,757	1	241	0	-0,1009284	0,8916061	-	-
Quadratica	0,709	291,675	2	240	0	0,2494460	-0,0402619	0,0013652	-
Cubica	0,738	224,841	3	239	0	0,3906168	-0,0886289	0,0061706	-0,0001430

d5

V12

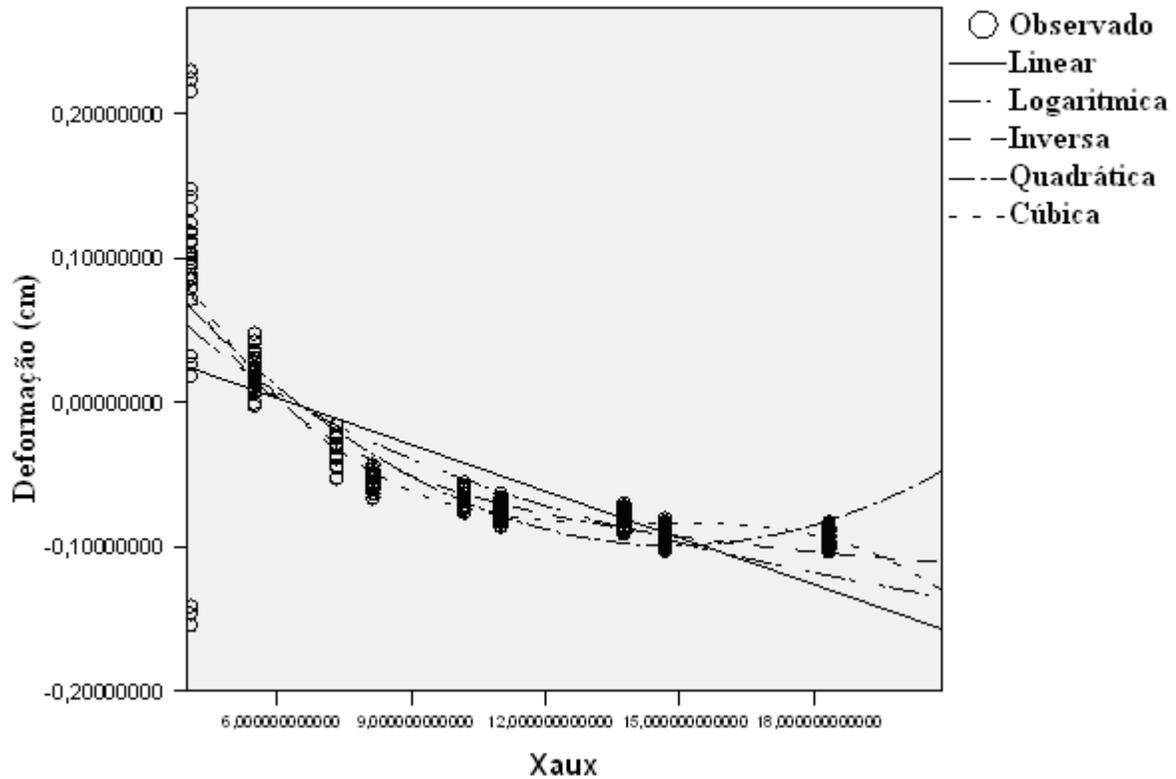


FIGURA H.17 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 55 cm e TR57 contra a variável Xaux;

TABELA H.18 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 55 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D5</b>	$R^2$	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,500	240,977	1	241	0	0,0698636	-0,0112477	-	-
Logaritmica	0,613	380,968	1	241	0	0,2188685	-0,1185556	-	-
Inversa	0,674	798,243	1	241	0	-0,1630633	0,9808622	-	-
Quadratica	0,657	229,717	2	240	0	0,2191597	-0,0434943	0,0014619	-
Cubica	0,678	167,979	3	239	0	0,3556657	-0,0902630	0,0061085	-0,0001383

d6

V13

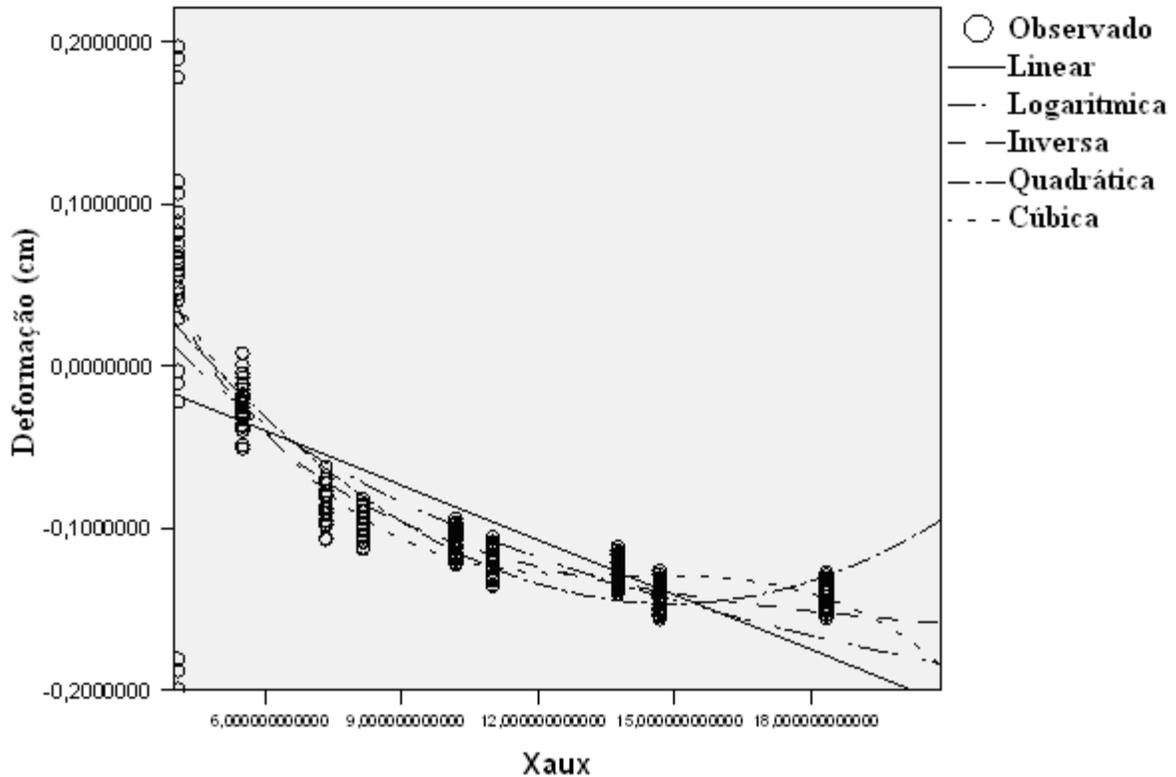


FIGURA H.18 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 55 cm e TR57 contra a variável Xaux;

TABELA H.19 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 55 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D6	$R^2$	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,535	277,072	1	241	0	0,0226680	-0,0113916	-	-
Logaritmica	0,657	462,442	1	241	0	0,1740304	-0,1202743	-	-
Inversa	0,729	648,283	1	241	0	-0,2138976	0,9989413	-	-
Quadratica	0,699	279,017	2	240	0	0,1723474	-0,0437210	0,0014657	-
Cubica	0,735	220,884	3	239	0	0,3447725	-0,1027961	0,0073350	-0,0001747

j) Gráfico de Dispersão para espaçamento 60 cm e TR57 para o dormente d4, d5 e d6

d4

V11

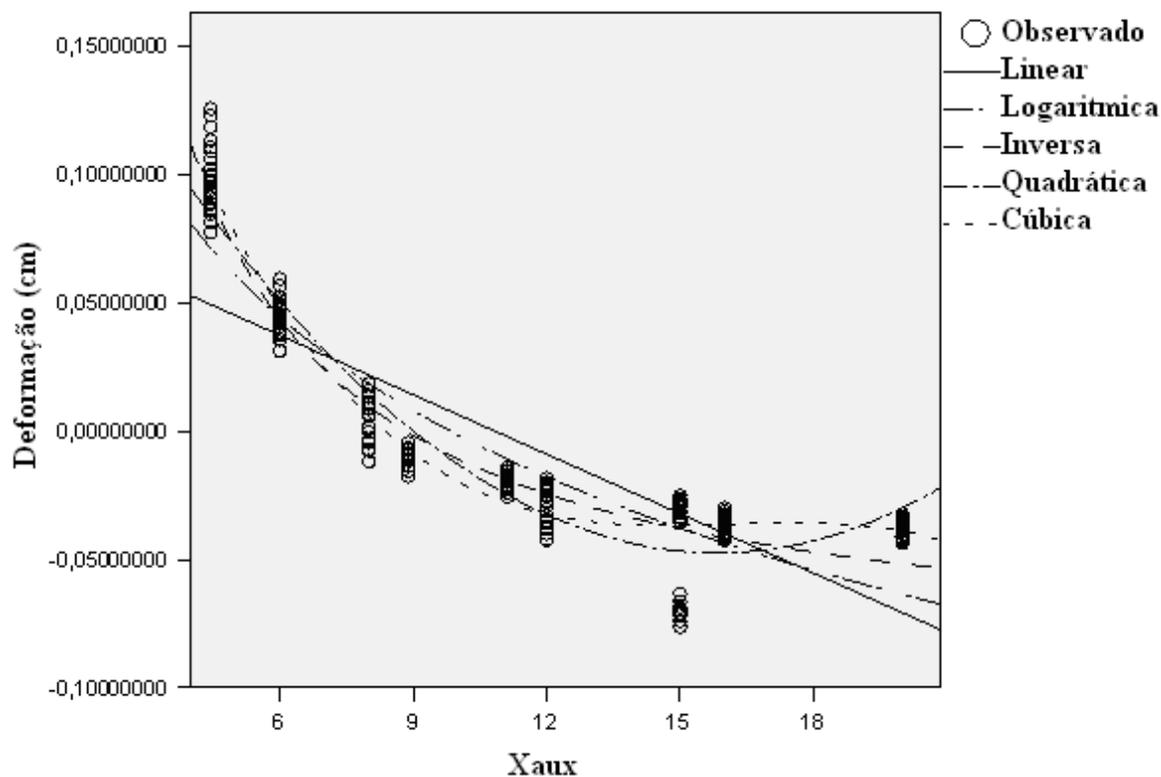


FIGURA H.19 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 60 cm e TR57 contra a variável Xaux;

TABELA H.20 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D4	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,681	514,75	1	241	0	0,0890636	-0,0079059	-	-
Logaritmica	0,849	1356,56	1	241	0	0,2130845	-0,0917058	-	-
Inversa	0,950	4557,88	1	241	0	-0,0910707	0,8344972	-	-
Quadratica	0,925	1480,66	2	240	0	0,2113616	-0,0321199	0,0010063	-
Cubica	0,962	2015,59	3	239	0	0,3290913	-0,0690943	0,0043737	-0,0000919

d5

V12

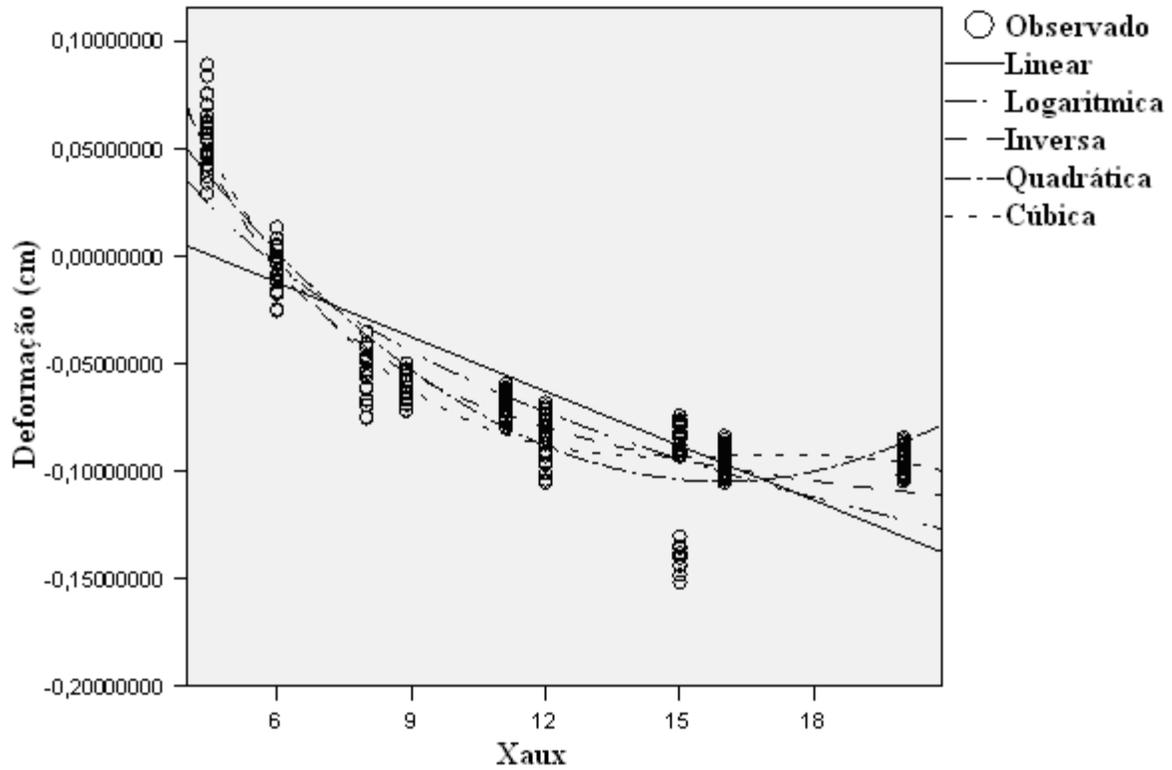


FIGURA H.20 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 60 cm e TR57 contra a variável Xaux;

TABELA H.21 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D5</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,676	503,289	1	241	0	0,0394792	-0,0084974	-	-
Logaritmica	0,838	1250,74	1	241	0	0,1721553	-0,0982984	-	-
Inversa	0,939	3696,09	1	241	0	-0,1539162	0,8949542	-	-
Quadratica	0,898	1052,81	2	240	0	0,1651885	-0,0333868	0,0010344	-
Cubica	0,945	1360,57	3	239	0	0,3084298	-0,0783734	0,0051314	-0,0001118

d6

V13

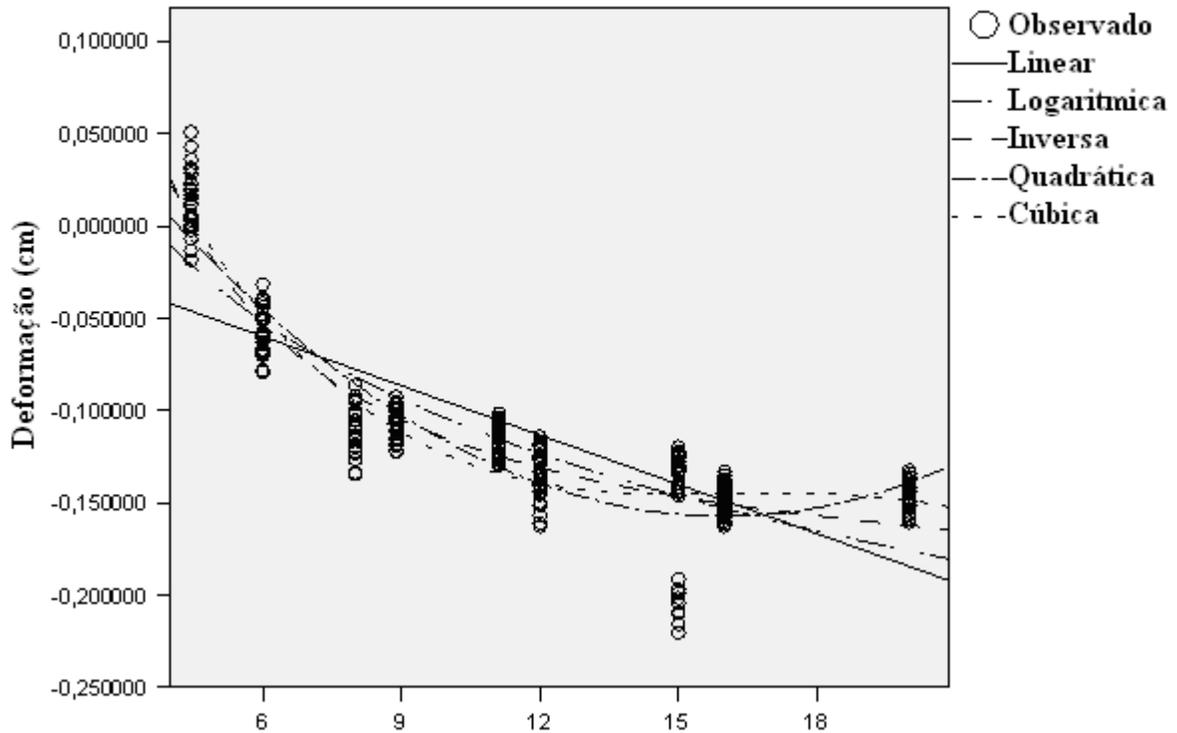


FIGURA H.21 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 60 cm e TR57 contra a variável Xaux;

TABELA H.22 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR57 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D6</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,645	437,416	1	241	0	-0,0166230	-0,0086594	-	-
Logaritmica	0,803	979,672	1	241	0	0,1190358	-0,1003678	-	-
Inversa	0,907	2355,35	1	241	0	-0,2143737	0,9181365	-	-
Quadratica	0,851	686,003	2	240	0	0,1100117	-0,0337321	0,0010420	-
Cubica	0,916	864,082	3	239	0	0,2850837	-0,0887155	0,0060495	-0,0001366

k) Gráfico de Dispersão para espaçamento 50 cm e TR68 para o dormente d4, d5 e d6

d4

V11

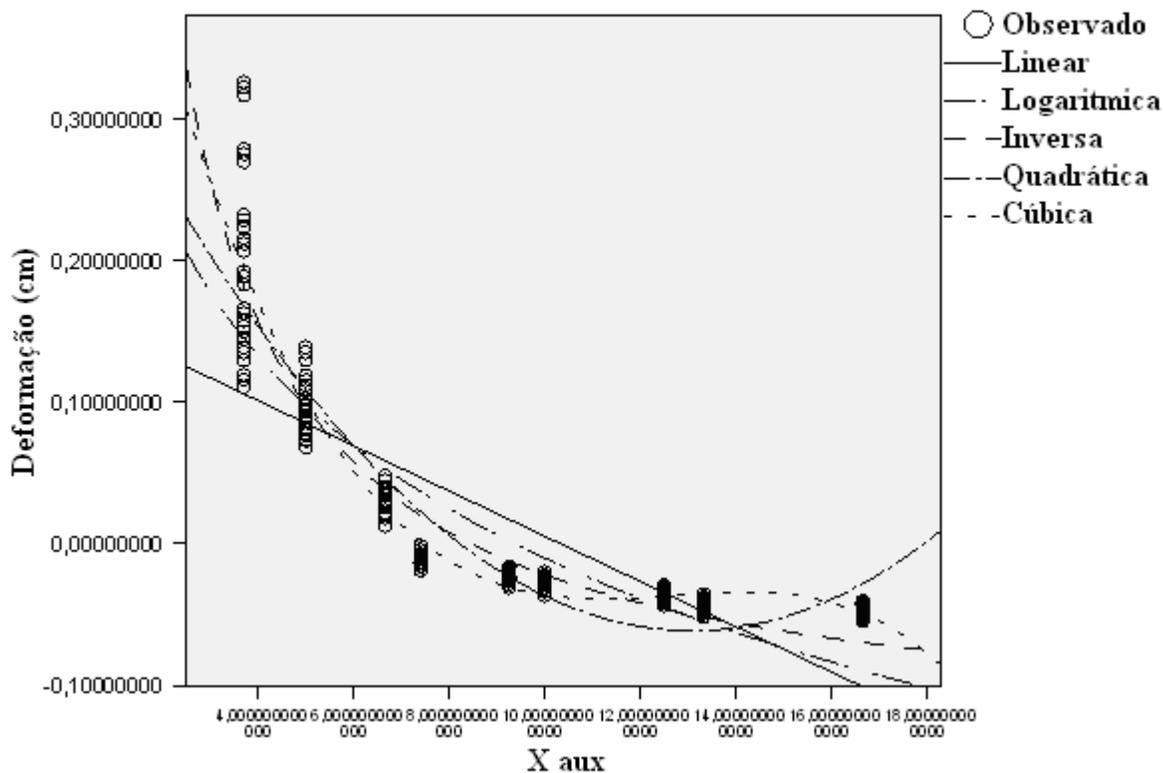


FIGURA H.22 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 50 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.23 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D4</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,609	375,471	1	241	0	0,1651964	-0,0159734	-	-
Logaritmica	0,776	835,542	1	241	0	0,3494990	-0,1561043	-	-
Inversa	0,886	1880,52	1	241	0	-0,1414051	1,1961565	-	-
Quadratica	0,859	728,089	2	240	0	0,3853976	-0,0682910	0,0026091	-
Cubica	0,915	858,303	3	239	0	0,6447500	-0,1660342	0,0132912	-0,0003497

d5

V12

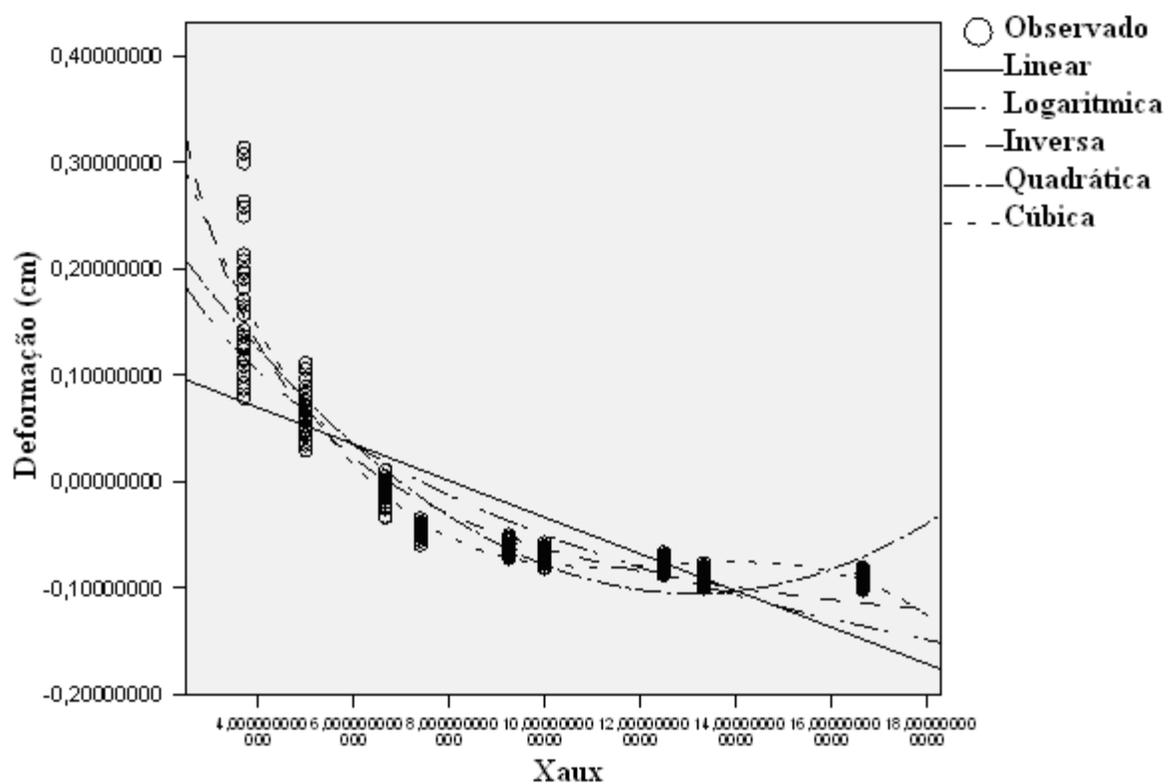


FIGURA H.23 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 50 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.24 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D5</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,611	378,499	1	241	0	0,1384007	-0,0172163	-	-
Logaritmica	0,777	837,72	1	241	0	0,3365856	-0,1680372	-	-
Inversa	0,886	1881,07	1	241	0	-0,1917977	1,2872390	-	-
Quadratica	0,854	701,7	2	240	0	0,3722795	-0,0727836	0,0027711	-
Cubica	0,912	826,837	3	239	0	0,6552859	-0,1794414	0,0144276	-0,0003816

d6

V13

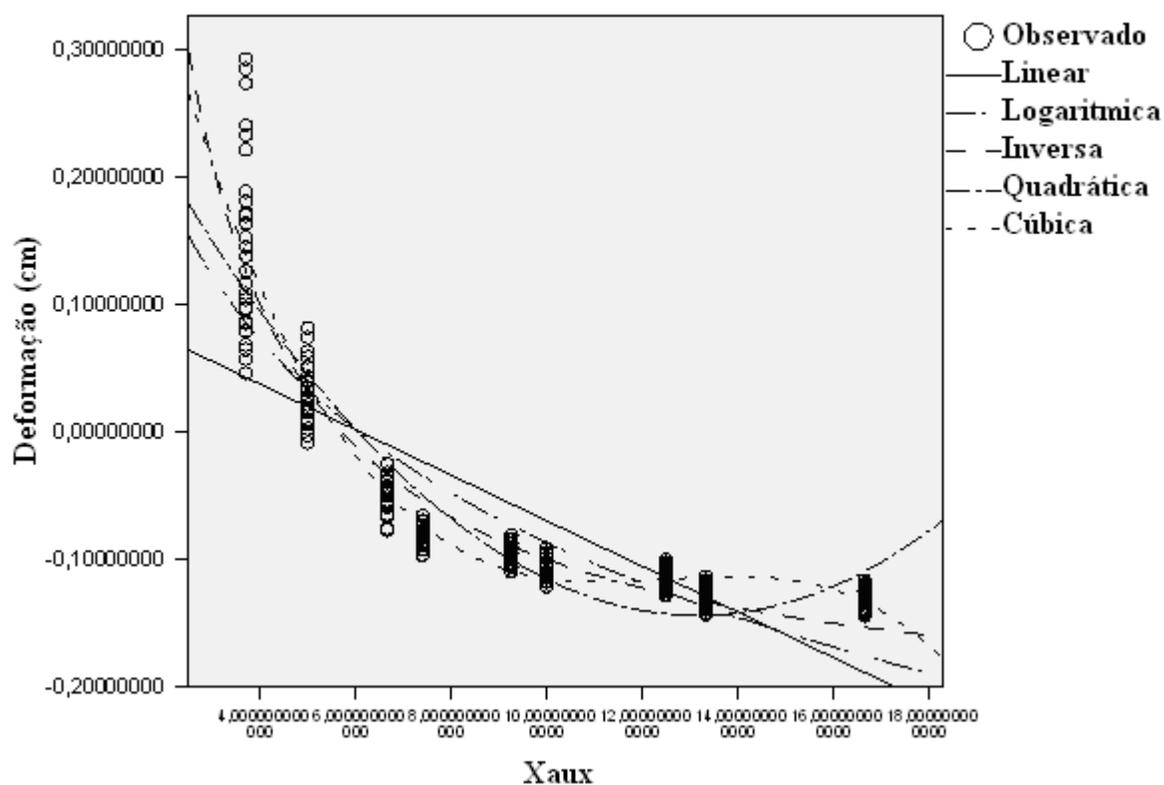


FIGURA H.24 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 50 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.25 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 50 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D6	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,612	380,029	1	241	0	0,1084049	-0,0178784	-	-
Logaritmica	0,776	835,205	1	241	0	0,3137925	-0,1743035	-	-
Inversa	0,885	1860,68	1	241	0	-0,2342451	1,3348606	-	-
Quadratica	0,849	675,633	2	240	0	0,3482017	-0,0748517	0,0028412	-
Cubica	0,909	791,1	3	239	0	0,6448195	-0,1866393	0,0150583	-0,0003999

**l) Gráfico de Dispersão para espaçamento 55 cm e TR68 para o dormente d4, d5 e d6**  
**d4**

V11

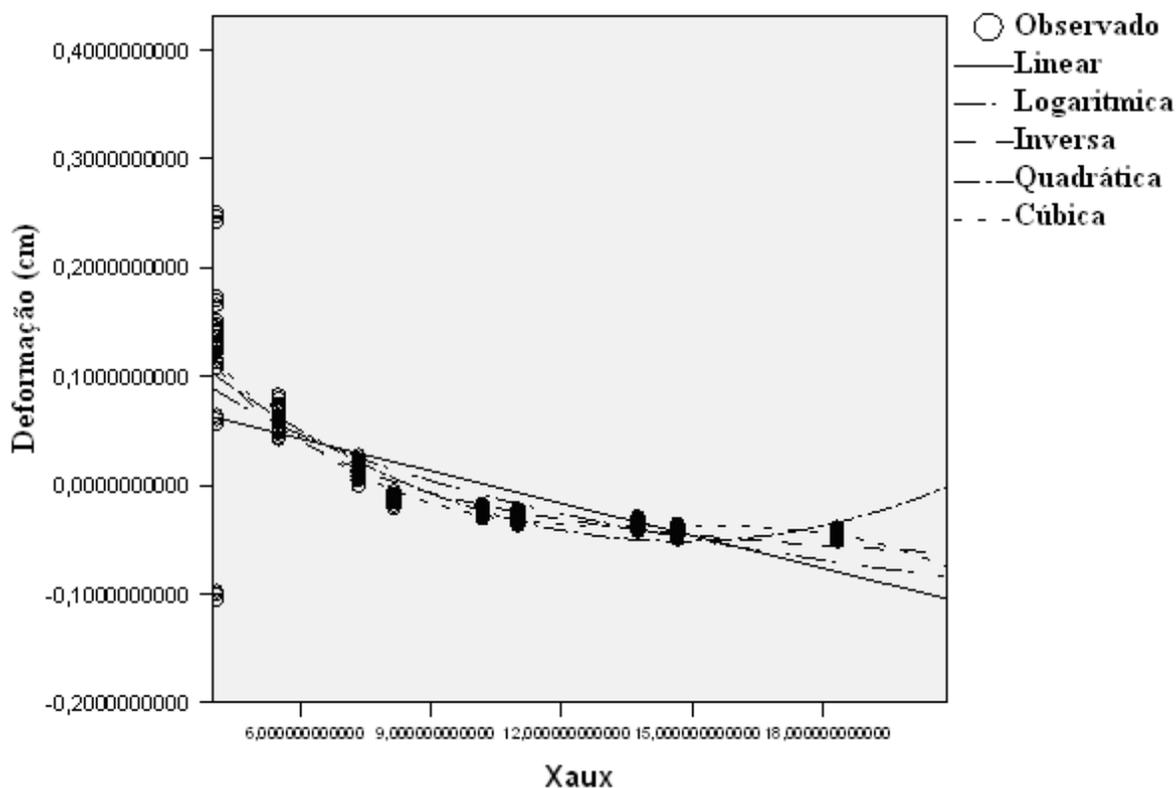


FIGURA H.25 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 55 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.26 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 55 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D4</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,524	265,259	1	241	0	0,1038817	-0,0100746	-	-
Logaritmica	0,649	445,698	1	241	0	0,2386644	-0,1067803	-	-
Inversa	0,721	621,873	1	241	0	-0,1058113	0,8874626	-	-
Quadratica	0,702	282,697	2	240	0	0,2430419	-0,0401319	0,0013627	-
Cubica	0,734	219,691	3	239	0	0,3886562	-0,0900213	0,0063193	-0,0001475

**D5**

**V12**

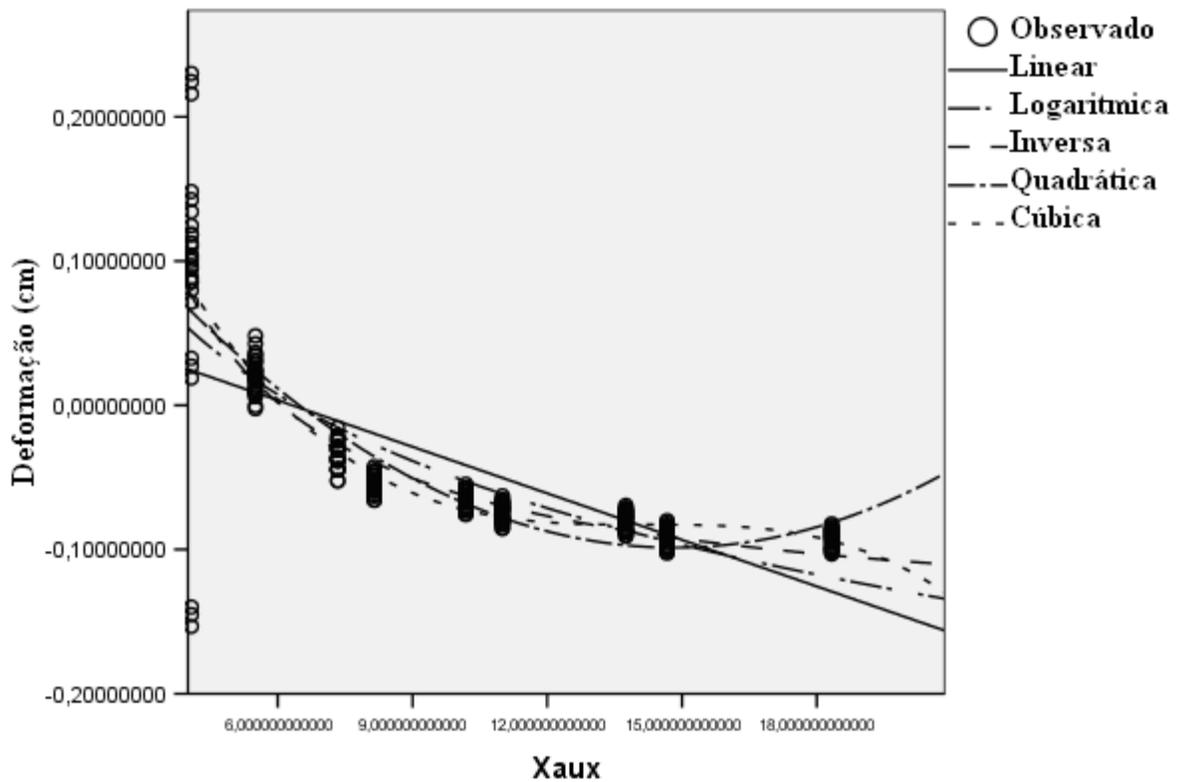


FIGURA H.26 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 55 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.27 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 55 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D5</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,528	269,131	1	241	0	0,0667568	-0,0108926	-	-
Logarítmica	0,652	450,695	1	241	0	0,2120996	-0,1152787	-	-
Inversa	0,724	631,556	1	241	0	-0,1598148	0,9582824	-	-
Quadrática	0,699	278,652	2	240	0	0,2138792	-0,0426697	0,0014407	-
Cúbica	0,733	219,224	3	239	0	0,3770707	-0,0985812	0,0069956	-0,0001653



m) Gráfico de Dispersão para espaçamento 60 cm e TR68 para o dormente d4, d5 e d6

d4

V11

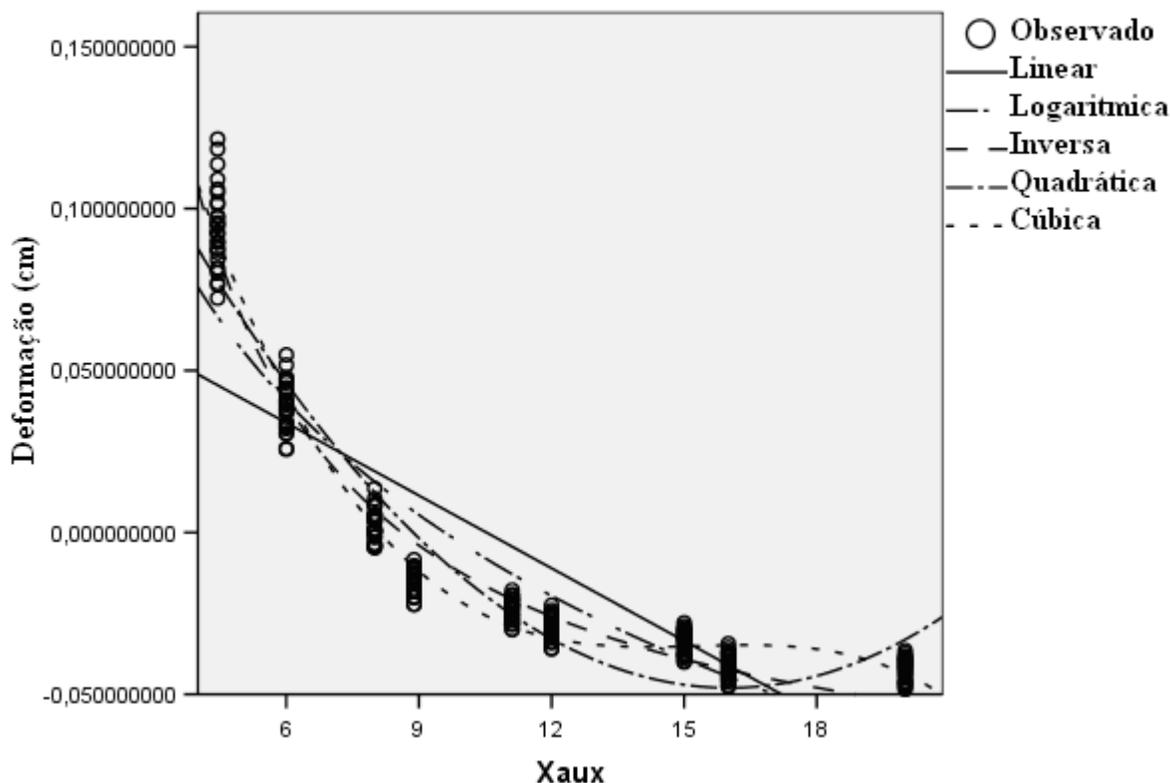


FIGURA H.28 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d4, espaçamento 60 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.29 – Valores de  $R^2$  para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
D4	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,700	562,634	1	241	0	0,0792010	-0,0075344	-	-
Logaritmica	0,866	1561,13	1	241	0	0,1966292	-0,0870674	-	-
Inversa	0,964	6388,36	1	241	0	-0,0919062	0,7901249	-	-
Quadratica	0,932	1639,19	2	240	0	0,1912374	-0,0297167	0,0009219	-
Cubica	0,977	3389,14	3	239	0	0,3137029	-0,0681785	0,0044247	-0,0000956

**D5**

**V12**

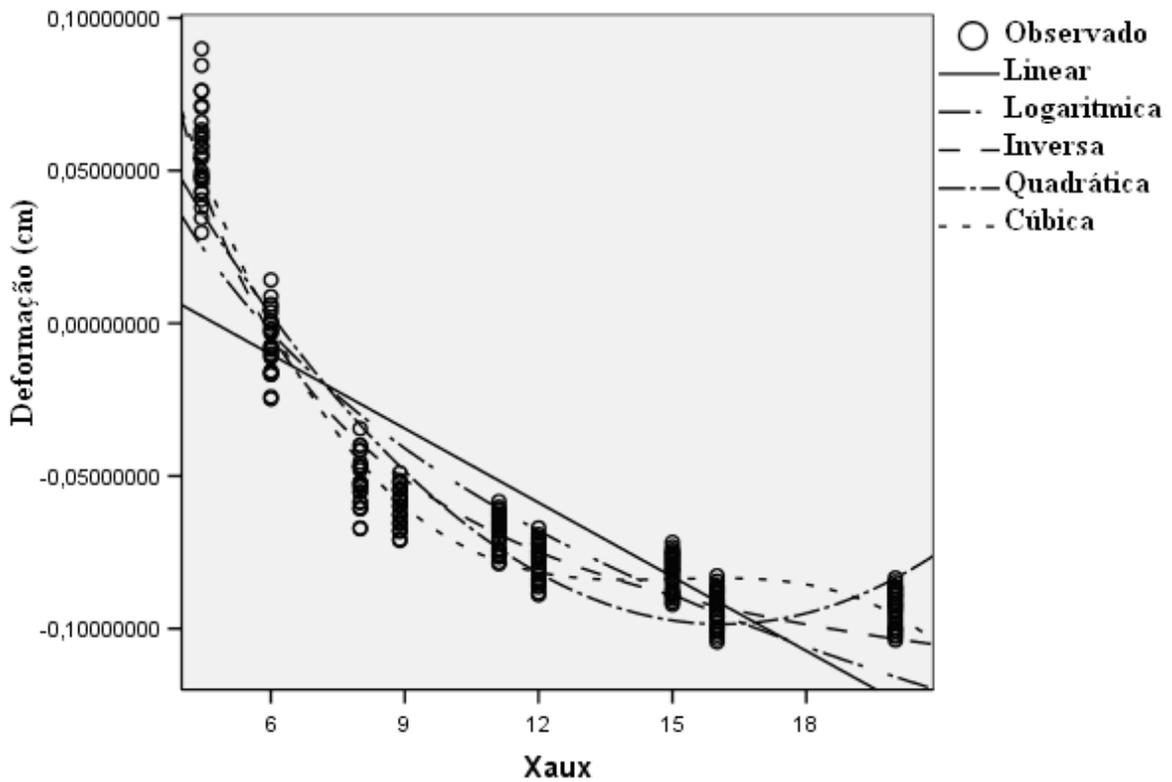


FIGURA H.29 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d5, espaçamento 60 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.30 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D5</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,635	418,627	1	241	0	0,0401308	-0,0085379	-	-
Logaritmica	0,797	945,944	1	241	0	0,1748999	-0,0993955	-	-
Inversa	0,906	2334,54	1	241	0	-0,1555870	0,9120596	-	-
Quadratica	0,855	710,234	2	240	0	0,1703152	-0,0343133	0,0010712	-
Cubica	0,919	900,377	3	239	0	0,3426475	-0,0884363	0,0060003	-0,0001345

**D6**

**V13**

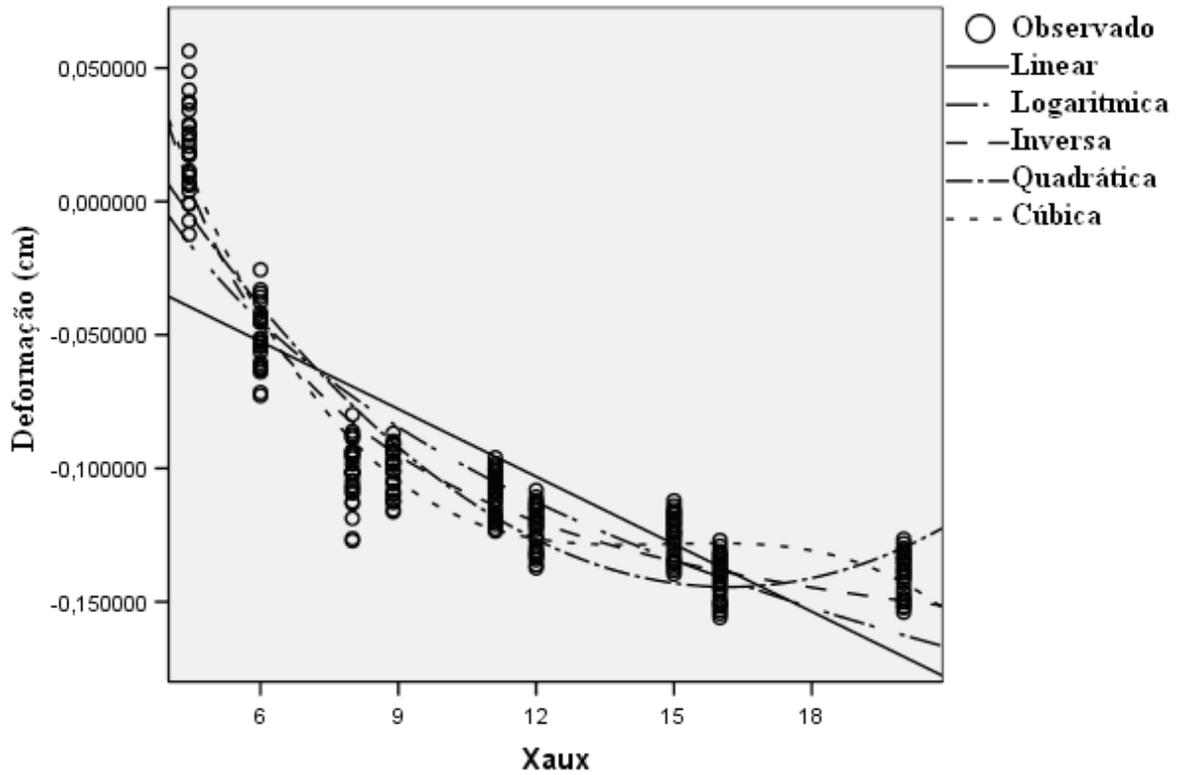


FIGURA H.30 – Gráfico de dispersão entre a deformação no dormente d6, espaçamento 60 cm e TR68 contra a variável Xaux;

TABELA H.31 – Valores de R<sup>2</sup> para cada modelo de regressão e os valores calculados pelo SPSS 14 para os parâmetros da equação;

Sumário Estatístico e Parâmetros Estimados - TR68 ESPAÇAMENTO 60 CM									
Equação	Sumário Estatístico					Parâmetros Estimados			
<b>D6</b>	R <sup>2</sup>	F	df1	df2	Signif	Constante	b1	b2	b3
Linear	0,336	121,941	1	241	0	-0,0133558	-0,0085814	-	-
Logaritmica	0,428	180,506	1	241	0	0,1238348	-0,1006482	-	-
Inversa	0,500	241,126	1	241	0	-0,2121597	0,9358612	-	-
Quadratica	0,456	100,474	2	240	0	0,1190687	-0,0348003	0,0010896	-
Cubica	0,507	81,859	3	239	0	0,3329809	-0,1019820	0,0072081	-0,0001669

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)