

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

ANÁLISE PARAMÉTRICA DA ESTABILIDADE DE PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS DEGRADADAS

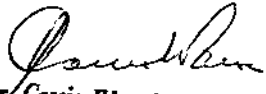
Autor: Paulo Roberto Aguiar

Orientador: Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva

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

Campinas
2007

i


Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva
Matr. - 24568-2
Atesto que esta é a versão definitiva da
dissertação/tese.
Prof. Dr. CASSIO E L de Paiva
Matrícula 245682 - 08 / 11 / 07

UNIDADE 82C
Nº CHAMADA: Ag93a
T/UNICAMP
V. _____ EX. _____
TOMBO BCCL 75381
PROC 16145-07
C _____ D X
PREÇO 11,00
DATA 19/12/07
BIB-ID 419103

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

Ag93a Aguiar, Paulo Roberto
 Análise paramétrica da estabilidade de plataformas
 ferroviárias degradadas / Paulo Roberto Aguiar.--
 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. Fundações (Engenharia). 2. Engenharia ferroviária.
 3. Cisalhamento dos solos. 4. Ferrovias – Trilhos –
 Fundações. 5. Ferrovias. I. Paiva, Cassio Eduardo Lima
 de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

 Título em Inglês: Parametric evaluation of degraded railway subgrade stability

 Palavras-chave em Inglês: Rupture circle, Railway yard track, Tensions at subgrade,
 Degraded railway track

 Área de concentração: Transportes

 Titulação: Mestre em Engenharia Civil

 Banca examinadora: Carlos Alberto Bandeira Guimarães, Benedito de Souza Bueno

 Data da defesa: 22/08/2007

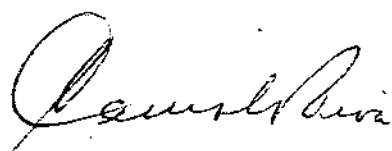
 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

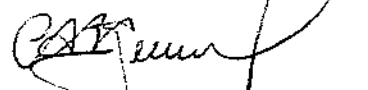
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

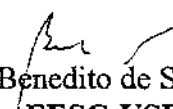
**ANÁLISE PARAMÉTRICA DA ESTABILIDADE DE PLATAFORMAS
FERROVIÁRIAS DEGRADADAS**

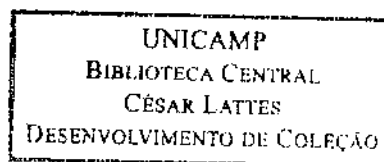
Paulo Roberto Aguiar

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:


Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva
Presidente e Orientador/FEC-Unicamp


Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães
FEC-Unicamp


Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno
EESC-USP



Campinas, 22 de agosto de 2007

2007-05262

RESUMO

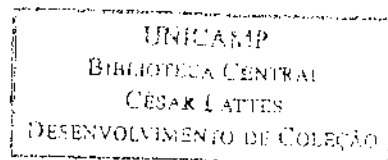
AGUIAR, Paulo Roberto. *Análise Paramétrica da Estabilidade de Plataformas Ferroviárias Degradadas*. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2007 118 pág. Dissertação de Mestrado

O estudo desenvolvido neste trabalho consiste na avaliação da capacidade de suporte do subleito ferroviário, através da determinação do risco à ruptura circular da plataforma, de uma secção transversal de um pátio ferroviário sujeito à carga de um veículo estacionado em uma via lateral. são utilizadas as equações

Para fins de desenvolvimento do presente estudo é utilizado o método de Eisenmann para determinação das tensões atuantes na base do trilho. As tensões atuantes na plataforma são calculadas através das equações de Carothers-Terzaghi. A avaliação do risco à ruptura circular é feita através do programa computacional GEOSLOPE-SLOPE/W versão 6.

Após a determinação dos fatores de segurança à ruptura para várias situações analisadas, é feita a análise dos resultados obtidos no sentido de determinar as situações de risco de estabilidade da via à ruptura circular da plataforma.

Palavras Chave: ruptura circular, pátio ferroviário, tensões na plataforma, vias férreas degradadas.



ABSTRACT

AGUIAR, Paulo Roberto. *Parametric Evaluation of Degraded Railway Subgrade Stability*
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 118 pages,
Master's Degree Dissertation.

This study deals with an evaluation of subgrade capacity by determining the circular rupture stability risk of a slope adjacent to a railway yard track subject the tensions of a loaded gondola car parked in this track.

The Eisenmann method is applied for determination of tensions at the railway subgrade and the tensions are calculated by means Carothers-Terzaghi equations. The analysis of circular failure risk is made by means of the computer software Geoslope-Slope/W version 6.

After calculating the safety factors for many situations, the results are evaluated to establish the stability risks of the slope adjacent to the railway track.

Key-words: rupture circle, railway yard track, tensions at subgrade, degraded railway track.

DEDICATÓRIA

À memória de meu pai, Luiz Aguiar, exemplo de dedicação e perseverança, à minha esposa Mirian e aos meus filhos Marcelo e Marília, pela compreensão e paciência.

AGRADECIMENTOS

- Ao prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva, pela orientação e dedicação prestadas ao longo de todo este trabalho.
- Ao prof. Benedito de Souza Bueno da EESC-USP, por ter permitido o acesso ao uso do programa GEOSLOPE, e por sua orientação.
- À prof. Dra. Delma Vidal e ao prof. Paulo Ivo do ITA Depto. de Geotecnia, pela orientação prestada.
- Ao eng. Carlos Vinícius Benjamim pela paciente orientação ao longo deste trabalho.
- Ao prof. e amigo Osvaldo Shigueru Nakao, do Depto. de Eng. e Estruturas de Fundações – EPUSP, pela colaboração prestada neste trabalho.
- Aos meus colegas da pós-graduação, especialmente Silvio Rodrigues, Ricardo Jefferson, Luiz Balau, e Luiz Fernando pelo companheirismo e amizade.

SUMÁRIO

Nº		Pág.
	LISTA DE FIGURAS.....	xiv
	LISTA DE TABELAS.....	xvi
	LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxi
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxiii
1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	A superestrutura ferroviária e seus problemas.....	2
1.3	Objetivo e relevância do estudo.....	2
1.4	Estrutura do trabalho.....	3
2	A SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA.....	5
2.1	Histórico.....	54
2.2	Características da superestrutura ferroviária.....	9
2.2.1	Secção típica.....	9
2.2.2	Lastro.....	11
2.2.3	Sublastro.....	13
2.2.4	Plataforma.....	14
2.2.5	Dormentes.....	15
2.2.6	Declividade transversal.....	16
2.3	Avaliação dos problemas potenciais da via permanente.....	16
2.3.1	Drenagem.....	16
2.3.2	Tensões repetidas na plataforma.....	16

2.3.3	Defeitos em trilhos e rodas e vibrações provocadas pelos veículos.....	17
2.3.4	Tipos de ruptura de plataforma.....	18
2.3.5	Degradação do lastro e dos demais componentes.....	21
2.4	Técnicas e soluções para restauração das vias férreas.....	21
2.5	Métodos de dimensionamento da superestrutura.....	23
2.5.1	Método de Eisenmann.....	23
2.5.2	Método de Talbot.....	25
2.5.3	Geotrack	26
2.5.4	Ferrovia	27
2.5.5	Polyfelt Geotextile Design.....	28
2.5.6	Geoslope (Slope/W).....	29
2.6	Exemplos de vias férreas degradadas existentes no Brasil.....	31
3	ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UMA VIA FÉRREA DEGRADADA.....	35
3.1	Questões principais.....	35
3.2	Conceituação do problema proposto.....	36
3.3	Variáveis e avaliações realizadas.....	36
3.4	Seqüência de desenvolvimento do estudo.....	39
3.5	Distribuição das cargas nos dormentes mais carregados.....	40
3.6	Distribuição das tensões na plataforma.....	43
3.6.1	Bitola larga.....	46
3.6.2	Bitola métrica.....	53
3.6.3	Bitola mista.....	53
3.7	O lançamento das variáveis no programa Geoslope.....	55
3.8	Apresentação dos resultados.....	58
3.9	Análise dos resultados.....	63
3.9.1	Inclinação do talude.....	64
3.9.2	Distância “d” entre a saia do aterro e a crista do talude.....	66
3.9.3	Bitola	68
3.9.4	Altura do talude.....	69
3.9.5	Características do solo da plataforma.....	71
3.9.6	Características da camada CSP.....	75

3.9.7	Espessura da camada CSP	83
3.9.8	Espessura da camada de lastro (h).....	85
3.9.9	Trilho e desgaste do boleto.....	86
3.9.10	Comentários relativos aos resultados obtidos.....	88
4	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	91
5	BIBLIOGRAFIA.....	95
5.1	Referências bibliográficas.....	95
5.2	Bibliografia de apoio	97
	APÊNDICES.....	99
	APÊNDICE A: VIBRAÇÕES NA VIA FÉRREA.....	100
	ANEXOS.....	103
	ANEXO A: TENSÕES APLICADAS NA PLATAFORMA.....	104
	ANEXO B: RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Nº	Figura	Pág.
2.1	Secção transversal original de via múltipla da Pennsylvania Railroad, adaptado de Howson (14).....	8
2.2	Secção transversal da via férrea indicando-se a nomenclatura utilizada.....	10
2.3	Faixas granulométricas A e B recomendadas pela ABNT para material de lastro..	12
2.4	Secção transversal da via férrea tendo o geotêxtil como elemento de protecção filtrante do lastro ou do sublastro.....	14
2.5	Ruptura por cisalhamento em via férrea.....	19
2.6	Ruptura progressiva por cisalhamento.....	20
2.7	Contaminação do lastro por bombeamento de finos.....	20
2.8	Fatores de segurança em relação ao equilíbrio de momentos e de forças versus λ .	31
3.1	Secção transversal da via em trecho de pátio ferroviário, adjacente a talude de aterro, utilizada para as avaliações. A camada de lastro contaminado foi considerada como tendo a espessura fixa de 0,10 m.....	37
3.2	Distância entre eixos do vagão gôndola utilizado no estudo.....	38
3.3	Valores da carga no dormente central (D1), em função da carga/roda para as bitolas larga (BL), métrica (BME) e mista (BMI).....	41
3.4	Valores do somatório das 5 cargas nos dormentes mais carregados, para cada coeficiente de Winkler adotado, referentes à bitola larga.....	42
3.5	Dormente central (D1), dividido em 20 elementos. A área hachurada representa o trecho sujeito à socaria.....	45

3.6	Tensões devidas às cargas da roda atuantes no trilho 1, distribuídas para os dormentes D2, D3, D4 e D5, medidas ao longo do eixo do dormente central D1; a) vista superior; b) secção longitudinal à via.....	46
3.7	Valores das tensões aplicadas na plataforma, em função da espessura de lastro....	48
3.8	Curvas de distribuição das tensões na plataforma para a bitola larga e para as espessuras da camada de lastro de 15 e 35 cm.....	50
3.9	Curvas de distribuição das tensões na plataforma para a bitola métrica e para as espessuras da camada de lastro de 15 e 35 cm.....	53
3.10	Secção transversal de via com bitola mista e identificação das regiões de socaria adotada (SK1=0,80 m; SK2=1,40 m).....	54
3.11	Curvas de distribuição das tensões na plataforma para a bitola mista e para as espessuras da camada de lastro de 15 e 35 cm.....	54
3.12	Gráfico comparativo das tensões atuantes na plataforma por tipo de bitola e espessura de lastro.....	55
3.13	Secção transversal típica utilizada para a avaliação do círculo de ruptura.....	57
3.14	Formas da camada CSP avaliadas previamente.....	57
3.15	Valores de FS x tensão aplicada na plataforma para a bitola larga, em talude 1:1..	62
3.16	Variação de FS em função da inclinação do talude, por tipo de bitola.....	66
3.17	Curva de variação de FS x altura do talude.....	70
3.18	Curva de variação de FS x coesão do solo da plataforma.....	74
3.19	Curva de variação de FS x espessura da camada CSP.....	84
A.1	Variação das frequências típicas.....	101

LISTA DE TABELAS

Nº	Tabela	Pág.
2.1	Estrutura do tráfego ferroviário no período 1956 a 2004.....	6
2.2	Evolução da cargas por eixo de locomotivas.....	7
2.3	Diversas estruturas de assentamento da via recomendadas pela UIC 719R (18)- 1982.....	10
2.4	Granulometria de lastro recomendada pela ABNT EB 655.....	12
3.1	Valores do comprimento elástico (L), pra os três casos avaliados de trilho e desgaste do boleto, para a bitola larga.....	40
3.2	Cargas dos 5 dormentes mais carregados, calculados para trilho TR-57 com desgaste do boleto de 0 %, carga por roda de 15 T e coeficiente de Winkler $c=0,14 \text{ N/mm}^3$	41
3.3	Valores das tensões dormente/lastro, determinados a partir das cargas nos 5 dormentes mais carregados, para o trilho TR-57 sem desgaste do boleto.....	43
3.4	Carga atuante no dormente e tensão dormente/lastro, calculadas em função do tipo de trilho e desgaste do boleto, para a bitola larga.....	47
3.5	Tensões atuantes na plataforma para a bitola larga, trilho TR-57 e desgaste 0%.....	47
3.6	Tensões nos dormentes D1, D2 e D4, calculadas a partir de uma carga unitária, com tensão máxima na plataforma equivalente ao valor de T_{max} , da tabela 3.5.....	49
3.7	Pontos das curvas de distribuição de tensões (em %) ao longo do eixo transversal da via.....	51
3.8	Valores das tensões máximas atuantes na plataforma, para espaçamento entre dormentes de 55 cm, por tipo de trilho e desgaste do boleto.....	52

3.9	Valores das tensões máximas atuantes na plataforma, para espaçamento entre dormentes de 65 cm, por tipo de trilho e desgaste do boleto.....	52
3.10	Experimentos realizados por tipo de bitola.....	58
3.11	Experimentos realizados por camada de solo.....	59
3.12	Experimentos realizados por tipo de bitola, para avaliação da sensibilidade do trilho e desgaste do boleto.....	60
3.13	Experimentos realizados por tipo de bitola, para avaliação da sensibilidade da altura do talude.....	61
3.14	Valores de FS (em relação aos momentos) determinados para a bitola larga.....	62
3.15	Valores de FS obtidos para a bitola larga, talude 1,5:1, em função da coesão e do ângulo de atrito do solo da plataforma.....	63
3.16	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x inclinação do talude.....	64
3.17	Variável em estudo e respectivos valores.....	65
3.18	Valores de FS para a altura de talude de 5 m e desvios relativos à cada inclinação de talude.....	65
3.19	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x “d”.....	67
3.20	Variável em estudo e respectivos valores.....	67
3.21	Valores do fator FS x distância “d”.....	67
3.22	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x bitola.....	68
3.23	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	68
3.24	Valores do coeficiente FS por tipo de bitola.....	68
3.25	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x altura do talude (H). ..	69
3.26	Variável em estudo e respectivos valores.....	70
3.27	Valores do coeficiente FS em função da altura do talude (H).....	70
3.28	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x peso específico do solo da plataforma.....	71
3.29	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	72
3.30	Valores do coeficiente FS em função do peso específico do solo da plataforma.....	72
3.31	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x coesão do solo da plataforma.....	72
3.32	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	73

3.33	Valores de FS para a coesão do solo da plataforma em relação à altura do talude..	73
3.34	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x ângulo de atrito do solo da plataforma.....	74
3.35	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	75
3.36	Valores de FS para o ângulo de atrito do solo da plataforma x altura do talude.....	75
3.37	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x peso específico da camada CSP.....	76
3.38	Variável em estudo e respectivos valores.....	76
3.39	Valores do coeficiente FS em função do peso específico da camada CSP.....	76
3.40	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x coesão da camada CSP.....	77
3.41	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	77
3.42	Valores do coeficiente FS para a coesão da camada CSP em relação à altura do talude.....	78
3.43	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x ângulo de atrito da camada CSP.....	78
3.44	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	79
3.45	Valores do coeficiente FS para o ângulo de atrito da camada CSP em relação à altura do talude.....	79
3.46	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x peso específico da camada CSP em plataforma plana.....	80
3.47	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	80
3.48	Valores do coeficiente FS em função do peso específico da camada CSP em plataforma plana.....	80
3.49	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x coesão da camada CSP em plataforma plana.....	81
3.50	Variável em estudo e respectivos valores.....	81
3.51	Valores do coeficiente FS para a coesão da camada CSP em plataforma plana.....	81
3.52	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x ângulo de atrito da camada CSP em plataforma plana.....	82
3.53	Variável em estudo e respectivos valores.....	82

3.54	Valores do coeficiente FS para o ângulo de atrito da camada CSP em plataforma plana.....	83
3.55	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x espessura da camada CSP.....	83
3.56	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	84
3.57	Valores do coeficiente FS em função da espessura da camada CSP e da altura do talude.....	84
3.58	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x espessura da camada de lastro.....	85
3.59	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	86
3.60	Valores do coeficiente FS determinados para as duas espessuras de lastro consideradas.....	86
3.61	Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x tipo de trilho e desgaste do boleto.....	87
3.62	Variáveis em estudo e respectivos valores.....	87
3.63	Valores do coeficiente FS em função do tipo de trilho e do desgaste do boleto.....	88
A.1	Cargas calculadas para os 5 dormentes mais carregados, em função da carga por roda, coeficiente de Winkler e tipo de bitola.....	105
A.2	Valores das tensões máximas (Tmax) atuantes na plataforma para a bitola larga, trilhos TR-57 e TR-50, com desgaste do boleto de 25 %.....	108
A.3	Carga atuante no dormente e tensão dormente/lastro, calculadas em função do tipo de trilho e do desgaste do boleto, para a bitola métrica.....	108
A.4	Valores das tensões máximas (Tmax) atuantes na plataforma para a bitola métrica, trilhos TR-57 sem desgaste do boleto e trilhos TR-57 e TR-50, com desgaste do boleto de 25 %.....	109
A.5	Pontos (em % da tensão máxima) das curvas de distribuição de tensões ao longo do eixo transversal da via para a bitola métrica.....	110
A.6	Carga atuante no dormente e tensão dormente/lastro, calculadas em função do tipo de trilho e do desgaste do boleto, para a bitola mista.....	111

A.7	Valores das tensões máximas (T_{max}) atuantes na plataforma para a bitola mista, trilhos TR-57 sem desgaste do boleto e trilhos TR-57 e TR-50, com desgaste do boleto de 25 %.....	111
A.8	Pontos (em % da tensão máxima) das curvas de distribuição de tensões ao longo do eixo transversal da via para a bitola mista.....	112
B.1	Valores do coeficiente de segurança FS à ruptura circular obtidos para a bitola larga, em função da altura H (m) do talude, da distância d da saia do aterro à crista do talude, tensão na plataforma e para cada inclinação do talude.....	114
B.2	Valores do coeficiente de segurança FS à ruptura circular obtidos para a bitola métrica, em função da altura H (m) do talude, da distância d da saia do aterro à crista do talude, tensão na plataforma e para cada inclinação do talude.....	115
B.3	Valores do coeficiente de segurança FS à ruptura circular obtidos para a bitola mista, em função da altura H (m) do talude, da distância d da saia do aterro à crista do talude, tensão na plataforma e para cada inclinação do talude.....	116
B.4	Valores de FS em função das características do solo da plataforma, para a bitola larga, talude 1,5:1, $d=0,0$ e espessura $e=0,70$ m da camada CSP.....	117
B.5	Valores de FS em função das características da camada CSP, para a bitola larga, talude 1,5:1, $d=0,0$ e espessura $e=0,70$ m da camada CSP.....	118
B.6	Valores de FS em função das características da camada CSP, para o caso de plataforma plana e espessura $e=0,70$ m da camada CSP.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Meia largura do dormente
b	Largura da sapata corrida
c	Coefficiente de lastro ou coeficiente de Winkler
c'	Coesão efetiva
C	Coesão
d	Distância entre a saia do lastro e a crista do talude
D	Carga linear
Di	Dormente i
e	Espessura da camada CSP
E	Módulo de elasticidade
E _E	Força normal interlamelar
E _{v2}	Módulo de deformação
f _x)	função
FS	Fator de segurança
F _m	Fator de segurança em relação ao equilíbrio de momentos
F _f	Fator de segurança em relação ao equilíbrio das forças horizontais
h	Espessura da camada de lastro
h _{BETT}	Espessura da camada de lastro
h _{PSS}	Espessura da camada de sublastro
H	Altura do talude
I	Momento de inércia do trilho
IP	Índice de plasticidade
K _F	Matriz de rigidez da infraestrutura
K _S	Matriz de rigidez da superestrutura
L	Comprimento elástico
LL	Limite de liquidez
M	Momento fletor da via
M _r	Módulo de resiliência
N	Força normal à base da lamela
p	Tensão dormente/lastro (tensão na face inferior do dormente)
P	Pressão exercida pelo dormente no lastro

q	Carga atuando na via
Q	Carga por roda aplicada no trilho
SK1	Trecho da socaria 1
SK2	Trecho da socaria 2
T_{Di}	Tensão devida ao dormente i
u	Poropressão
U	Módulo da via
V	Velocidade
x	Distância entre o ponto de aplicação da carga Q e o ponto considerado
X_F	Força de cisalhamento interlamelar
X_L	Força interlamelar
X_R	Força interlamelar
X	Distância ao longo da secção transversal da via, longitudinal ao dormente central, iniciando na saia do lastro até a saia extrema do lastro da via.
y	Deformação (recalque) da via
z	Distância entre a face inferior do dormente e o ponto considerado de aplicação da tensão na plataforma
W	Peso da lamela
W_{opt}	Umidade ótima
α	Inclinação da base da lamela
α_1	Ângulo entre a base da plataforma e a extremidade mais distante do dormente
α_2	Ângulo entre a base da plataforma e a segunda extremidade do dormente
ϕ'	Angulo de atrito efetivo
η	Coefficiente
λ	Porcentagem (na forma decimal) da função utilizada
μ	Coefficiente
σ_1	Carga na superfície, 0,5 m sob os dormentes
σ_2	Capacidade portante do lastro
σ_z	Tensão atuante na plataforma devida ao dormente considerado
σ_{ZUL}	Capacidade portante do subleito

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT-EB	Associação Brasileira de Normas Técnicas -Especificação Brasileira
ABNT-MB	Associação Brasileira de Normas Técnicas -Método Brasileiro
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance of Way Association
CBR	Califórnia bearing ratio
CSP	Camada de composição mista de solo e lastro onde a parcela solo encontra-se saturada
ELG	Equilíbrio limite geral
EN	European norm
HCA	Hollow cylinder apparatus
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
ORE	Office de Recherches et d'Essais de L'Union Internationale des Chemins de Fer
RENFE	Red de Los Ferrocarriles Españoles
SNCF	Societe Nationale des Chemins de Fer Français
SPT	Standard Penetration Test
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
TCP	Tensão de compressão na plataforma
TKU	Tonelada Quilometro Útil
TGV	Train a Grand Vitesse
TUE	Trem unidade elétrico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

As vias férreas no Brasil vêm passando por um período de transição, em termos de manutenção e de operação. Após a transferência das vias férreas de transporte de carga, para as concessionárias, os recursos alocados nos últimos anos têm sido principalmente destinados à aquisição de veículos e melhoria do material rodante.

No aspecto operacional, constata-se que as empresas ferroviárias nacionais, principalmente as concessionárias, vêm conseguindo sucessivamente obter incremento da quantidade de produtos transportados e, com isso, obter retorno financeiro satisfatório.

Entretanto, estas empresas estão diante de um paradoxo: como transportar quantidades crescentes de carga, empregando para tal locomotivas de alto custo agregado, de maior rendimento e que permitem desenvolver maiores velocidades, sobre vias com crescente estado deterioração e que apresentam segurança restrita sob tais condições?

De fato, grande parte das vias férreas nacionais encontra-se em elevado estado de deterioração e com elevado grau de contaminação do lastro. Em determinados trechos da via, a condição é tão precária que seria necessário o abandono da via existente através do remanejamento da via para outro local, onde seria feita a construção de uma via nova, o que representa uma solução extremamente onerosa devido aos altos custos de implantação e principalmente de desapropriação, que seriam necessários.

1.2. A superestrutura ferroviária e seus problemas

A grande maioria das nossas vias férreas foi executada há mais de 50 anos e não foi contemplada com uma camada de sublastro entre o lastro e a plataforma. Por esta razão, verifica-se a ocorrência disseminada de contaminação do lastro por efeito do bombeamento de finos da plataforma.

Outro aspecto relevante é que tais vias encontram-se posicionadas ao mesmo nível do terreno adjacente, ou até mesmo enterradas, o que dificulta o escoamento das águas pluviais e propicia a intensificação do efeito de bombeamento de finos acima relatado, reduzindo a capacidade de suporte da plataforma.

1.3. Objetivo e relevância do estudo

As avaliações usualmente realizadas para a verificação da condição de suporte da via, consistem na determinação das condições de suporte atual e futura e do seu nível de deformações atual e previsto ao longo do tempo, para uma quantidade de cargas transportadas no período considerado. A partir desta análise, são tomadas precauções e/ou medidas no sentido de minimizar o efeito de redução das propriedades mecânicas do solo e do lastro.

O objetivo deste estudo foi o de avaliar as vias férreas nacionais, sobretudo aquelas mais degradadas, segundo um critério pouco usual no meio ferroviário. Geralmente a via é avaliada segundo o eixo longitudinal, através de suas tensões, solicitações, recalques, etc, mas raramente é avaliada a sua secção transversal, através do risco de ruptura circular da plataforma. Este método de avaliação é somente empregado durante a fase de projeto de uma via nova, mas em uma condição operacional de uma via, tal verificação não é feita. Com o passar do tempo, as vias vão se degradando, seus dispositivos de drenagem perdem sua eficiência; há a geração de pressões neutras na camada mais superficial da plataforma, surgindo bolsões de argila sob a camada de lastro; o lastro vai se contaminando e muitas vezes o talude perde sua configuração original. No Brasil, com o crescente aumento das cargas transportadas, aliado à crescente deterioração da superestrutura, justifica-se uma avaliação do risco à ruptura circular da plataforma. Esta avaliação, embora não seja usual nos países desenvolvidos, torna-se necessária principalmente em países em desenvolvimento

com panorama ferroviário idêntico ao nosso, com vias em crescente estado de deterioração e elevado fluxo de transporte de carga.

O risco de ruptura circular da plataforma em uma secção transversal da via foi considerado neste estudo por ser o tipo mais provável de ruptura, tendo sido realizado a partir da determinação das tensões atuantes nos trilhos, dormentes e na plataforma, devidas a um vagão gôndola carregado, estacionado em uma via lateral de um pátio ferroviário adjacente a um talude de aterro. A estabilidade à ruptura é verificada através do programa computacional GEOSLOPE – Slope/W versão 6, para várias situações com possibilidade de ocorrência em vias férreas degradadas.

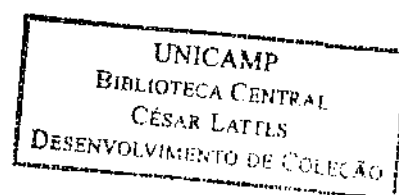
1.4. Estrutura do trabalho

Excluída esta introdução, o presente trabalho está estruturado em mais 3 capítulos, os quais são descritos a seguir.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica relativa aos materiais componentes da via férrea e de sua influência no subleito. São relatados os principais problemas potenciais e as soluções disponíveis para a restauração das vias férreas. São também apresentados os métodos clássicos e computacionais para o dimensionamento da via, sendo ao final apresentado exemplos de vias férreas, com elevado grau de deterioração.

O capítulo 3 compreende o experimento realizado, consistindo nas variáveis selecionadas, os dados geométricos, geotécnicos e de distribuição das cargas sobre a plataforma, qual é avaliada quanto à sua estabilidade à ruptura circular. São também discutidos os resultados obtidos e as situações de risco da plataforma para as condições estudadas.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.



2. A SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA

2.1. Histórico

Segundo Castello Branco e Ferreira (1), a primeira evidência de utilização de guias para as rodas dos carros, equivalente à via férrea atual, data do tempo dos romanos, embora somente no século XVI é que apareceram vagonetes com rodas flangeadas de madeira, deslizando sobre trilhos de madeira, movimentados por animais, em minas de carvão da Europa, que foram posteriormente aperfeiçoadas nas minas inglesas.

Entretanto, foi somente no começo do século XIX, de acordo com Brina (2), que foram implantadas as primeiras ligações ferroviárias, como meio de transporte terrestre, sendo que a estrada de ferro propriamente dita nasceu da combinação de uma via dotada de trilhos de ferro, com o veículo motorizado.

Por tratar-se de uma modalidade de transporte com mais de 200 anos de existência, muitas das novas tecnologias de Engenharia não foram a ela incorporadas. É o caso da geotecnia, que somente a partir de 1936 tornou-se uma disciplina reconhecida no campo da engenharia civil, após a realização da Primeira Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, segundo Ishihara (3), de acordo com prefácio da edição comemorativa da ABMS, pelos 50 anos de geotecnia no Brasil.

Por esta razão, muitos dos conceitos e das técnicas ferroviárias utilizadas atualmente, não são contemplados, na prática, com o emprego desta ferramenta que é a geotecnia, a qual pode contribuir de maneira definitiva para a solução de inúmeros problemas crônicos relacionados com a capacidade portante dos subleitos.

O surgimento das ferrovias no Brasil, segundo Motoyama (4), ocorreu através de um ato político, o decreto 101 de 31 de Outubro de 1835, que concedia o privilégio de exploração por 40 anos pela empresa que construísse uma ferrovia ligando Rio de Janeiro a Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia. Entretanto, a primeira ferrovia nacional foi construída somente em 1854 pelo Visconde de Mauá e ligava o fundo da Baía da Guanabara à raiz da Serra de Petrópolis. Cintra (5) relata que esta ligação foi também a primeira a ser construída na América do Sul, tendo sido denominada de E. F. Mauá. Foi inaugurada em 30 de abril de 1854 e possuía 14,5 km de extensão, em bitola de 1,68 m e trilhos assentados sobre dormentes de madeira e lastro de areia.

Um aspecto que contribuiu para o aprimoramento da ferrovia foi o aumento da carga total transportada ao longo do tempo. A tabela 2.1. mostra a evolução da tonelada quilometro útil (TKU) no Brasil, no período de 1956 a 2004.

Tabela 2.1: Estrutura do tráfego ferroviário no período 1956 a 2004.

ANO	Tonelada quilometro útil TKU (10 ⁶)
1956	122
1996	128
1997	138
1998	142
1999	140
2000	155
2003	183
2004	201

Fontes: Adaptado de Motoyama (4), Pires (6) e Revista Ferroviária (7)

Por sua vez, a velocidade média também aumentou nas últimas décadas. Na Europa a velocidade que era de 140 km/h, com a implantação do TGV na França, saltou para 270 km/h a partir de 1981, operando hoje comercialmente a uma velocidade de até 350 km/h, segundo Castello Branco e Ferreira (1), o que exigiu uma revisão significativa dos conceitos existentes até então, por lá. No caso do Brasil, as vias admitem, em geral, uma velocidade nominal de até 120 km/h, em linhas ferroviárias de condição boa a excelente. Outro aspecto ainda a considerar está relacionado com a carga/eixo dos veículos. A título de ilustração, apresenta-se a seguir a tabela 2.2 que mostra a variação da carga por eixo das locomotivas, ao longo do tempo.

Tabela 2.2: Características das locomotivas ao longo do tempo.

Ano	Numeração ou modelo	Potência (HP)	Fabricante	Peso (T)	Comprimento (m)	Diâmetro Rodas Guia (mm)	Tração Múltipla
1921	300-303	1450	General Electric	107	16,76	914	Não
1921	400-407	1450	ALCO-G.E.	88,9	11,94	-	Não
1921	410-411	1218	Baldwin-Westinghouse	107	15,29	-	Sim
1922	310-312	1627	Baldwin-Westinghouse	129	16,13	914	Sim
1940 1946-8	370-373 374-391	3817	General Electric	165,1	23,10	914	Sim
1951	450-454	4655	General Electric	242,6	27,10	949	Não
	U-20	-	General Electric	120	14,03	914	-
	U23C	-	General Electric	180	18,35	1016	-

Fontes: Adaptado de <http://www.efbrasil.eng.br/electro/cpef.html> (8) e Paiva (9).

O lastramento das vias férreas (colocação de pedra britada sob os dormentes), de acordo com Schramm (10) é uma prática comum desde os primórdios da ferrovia. No Brasil, este lastramento da via não era comum até determinada época. Conforme Ferreira (11), a ferrovia Madeira - Mamoré, estando próxima de ser inaugurada, recebeu autorização do Ministério da Viação, para que a partir daquela data (23 de abril de 1910), fosse executado o serviço de lastramento da linha cujo custo não havia sido considerado. Ou seja, provavelmente até aquela data fosse usual a execução de vias férreas diretamente sobre a terra, ou sobre areia.

Entretanto, até 1984, segundo Stopatto (12), eram encontradas vias nacionais em que o lastro era constituído por terra, cascalho, cinzas, pedras quebradas à mão, piçarra, além da pedra britada. Em termos de espessura, era usual o emprego de 10 cm de lastro, podendo, em algumas situações, chegar a 1 m ou mais, “tornando um verdadeiro aterro de lastro”.

Quanto ao sublastro, uma das primeiras suposições seria a de que foi a partir dos trabalhos de Cedergren (13) para filtros, ou após o advento da geotecnia em 1936, que tenha ocorrido o seu emprego pela primeira vez.

Entretanto, Howson (14), na edição de 1942, já apresentava recomendação do Comitê de Lastro da A.R.E.M.A. para o emprego do sublastro, além de uma secção transversal de via com sublastro da Pennsylvania Railroad, de acordo com a figura 2.1, o que permite concluir que anteriormente à data daquela publicação, esta camada já fosse utilizada pelos engenheiros ferroviários.

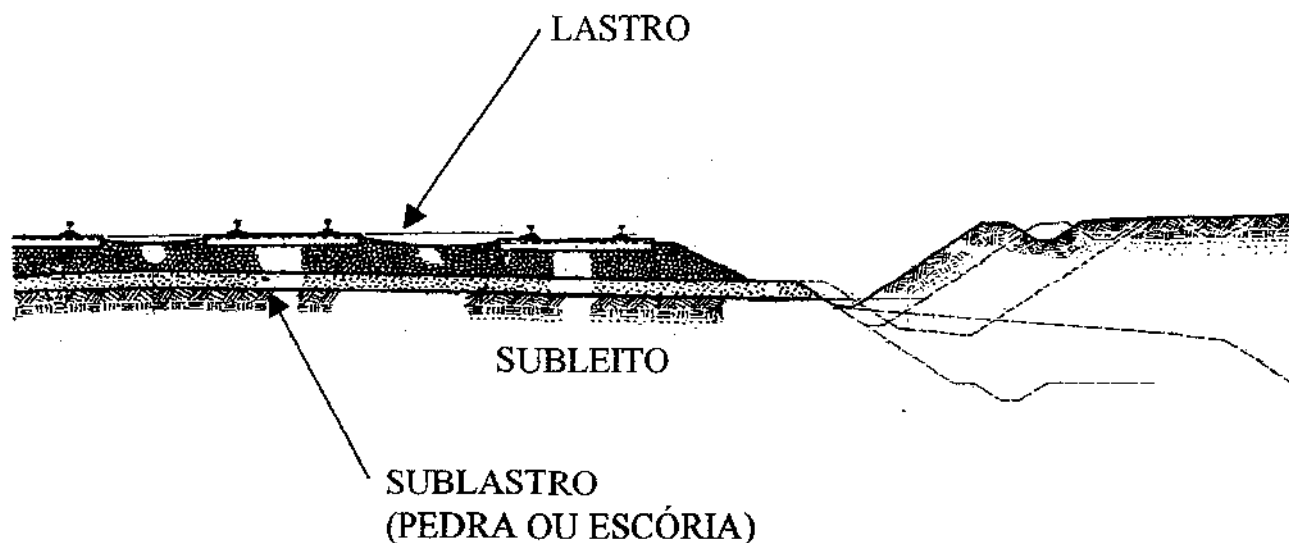


Figura 2.1 Secção transversal original de via múltipla (apresentada pela primeira vez em 1942) da Pennsylvania Railroad, adaptada de Howson (14).

Para Selig (15), a superestrutura (trilhos, fixações, e dormentes), sempre recebeu no passado as maiores atenções, enquanto que o lastro, sublastro e subcamadas, embora apresentassem maior participação no custo de manutenção, sempre tiveram importância reduzida. A razão, para tal, talvez seja porque seus componentes são mais variáveis e difíceis de serem definidos que aqueles da superestrutura, representando um desafio para o engenheiro ferroviário.

Outro aspecto apontado por Raymond (16) está relacionado à grande variabilidade dos solos, devido às suas variações periódicas das características de resistência, influência da água na sucção do solo, tornando difícil a avaliação da capacidade de carga dos subleitos.

Para Hay (17), a qualidade da via é quem determina a carga por eixo admissível, a velocidade, a segurança e a dependência da operação ferroviária. Uma via de boa qualidade, estável, exige um subleito firme, bem drenado, compacto e um lastro bem graduado e limpo, com dormentes

sólidos, suportando trilhos de seção e peso adequados à carga transportada. Contrariamente, uma via instável, de baixa qualidade, apresentará deflexão excessiva, degradação da via e dos seus materiais constituintes, perda de alinhamento e da bitola, e reduzida resistência à deformação lateral sob ação das forças de origem térmica e frenagem, além de atrasos provocados ao tráfego devido às restrições de velocidade.

2.2. Características da superestrutura ferroviária

2.2.1. Secção Típica

Brina (2) considera a superestrutura ferroviária constituída pela via permanente, a qual se apóia sobre a plataforma, ou camada final de terraplenagem. A via permanente é formada pelos seguintes elementos: sublastro, lastro, dormentes e trilhos.

Em termos de distribuição das diversas camadas, a especificação UIC-719R (18) classifica, de acordo com a tabela 2.3, segundo a qualidade da plataforma, definida segundo 3 tipos de plataformas denominadas de P1, P2, e P3 correspondentes respectivamente à plataforma ruim, média, e boa.

A qualidade da plataforma assim estabelecida depende da qualidade do solo que constitui o corpo do aterro ou do fundo de escavação do corte, e da qualidade e espessura da camada de reforço, quando ela existir. A camada anticontaminante é constituída por areia, devendo ser prevista somente para as plataformas de classe P1. Os solos constituintes da plataforma podem ainda ser tratados ou não tratados, dependendo na necessidade. O tratamento destes materiais é feito por meio dos seguintes ligantes: pedregulho ou cascalho tratado com cimento para vias com elevado transporte de carga particularmente utilizado nas vias alemã e austríaca; areia tratada com cal, técnica adotada nas vias francesas e que a SCNF recomenda cuidado com uma aplicação generalizada, devendo ser complementada com um colchão de pedra não tratada, intercalada entre a camada tratada e o lastro; utilização de solos tratados com ligantes hidráulicos, aplicadas nas vias férreas alemãs por exemplo, como é o caso da cal.

Tabela 2.3:-Diversas estruturas de assentamento recomendadas pela UIC 719 R (18)-1982

	Solo Suporte QS1 (RUIM)	Solo Suporte QS2 (MÉDIO)	Solo Suporte QS3 (BOM)
Plataforma P1 (ruim)	Lastro Sublastro Fundação (0,15 m) Anticontaminante (01,5 m) QS1 não tratado (0,30) QS1		
Plataforma P2 (média)	Lastro Sublastro Fundação (0,15 m) QS1 tratado (0,30m) ou QS2 não tratado (0,55 m) ou QS3 não tratado (0,40 m) QS1	Lastro Sublastro Fundação (0,15 m) QS2 não tratado (0,30 m) QS2	
Plataforma P3 (boa)	Lastro Sublastro QS3 não tratado (0,60 m) QS1	Lastro Sublastro QS3 não tratado (0,40 m) QS2	Lastro Sublastro QS3 não tratado (0,30 m) QS3

QS1: solo suporte ruim; QS2: solo suporte médio; QS3: solo suporte bom

Sauvage (19) prefere denominar superestrutura como sendo o conjunto de trilhos, fixações e dormentes, e o restante (lastro, sublastro e subcamadas) como “camadas de assentamento”, as quais por sua vez contribuiriam para assegurar o bom desempenho de uma via férrea quanto à sua rigidez, quanto ao seu nivelamento e quanto à sua drenagem.

Neste trabalho, será adotada a denominação dos demais componentes da via férrea conforme a figura 2.2, onde a plataforma poderá ser constituída por uma camada de fundação, uma camada de reforço e eventualmente um geossintético, empregado para melhoria do material de reforço de uma plataforma, ou nos casos onde houver necessidade de um filtro.

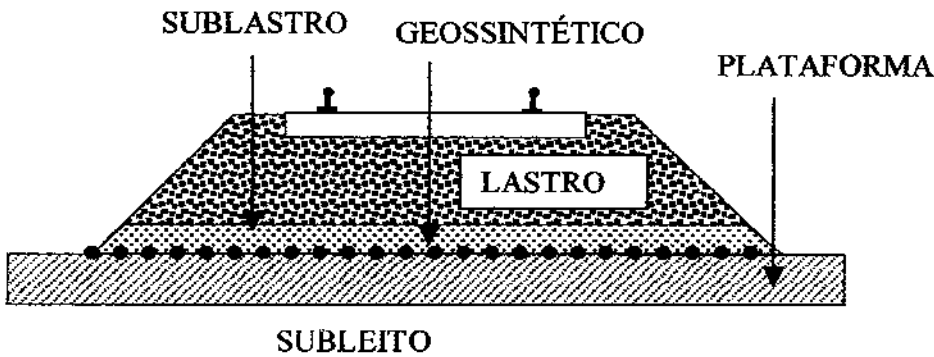


Figura 2.2. Secção transversal da via férrea, indicando-se a nomenclatura utilizada.

2.2.2. Lastro

Para Esveld (20), o lastro é constituído por um agregado sem partículas finas, de alta permeabilidade, que resulte em um atrito interno entre os grãos capaz de absorver compressões intensas, mas não tração. Considera ainda que os mais importantes requisitos a serem atendidos pelo material de lastro são a sua dureza, resistência ao desgaste e distribuição granulométrica uniforme, devendo ainda as partículas possuírem arestas vivas.

Quanto à sua composição, Rico e Del Castillo (21), recomendam a utilização de um lastro com diâmetro máximo de agregado de 7,6 cm, de preferência entre 5,1 e 6,4 cm e que possua menos de 10% de material passando na peneira No. 4 (4,75 mm) devendo este material ser controlado através de seu equivalente de areia.

Mas, para Selig (15), ainda não ocorreu um entendimento universal acerca das especificações adequadas ao material de lastro, as quais deveriam ser traduzidas em termos de dimensões, forma, dureza, resistência à abrasão e composição, que proporcionem o melhor desempenho da via.

Entretanto, na Europa, a Norma ISO EN 13450 relativa aos agregados para lastro ferroviário, está em vigor desde 2005, de acordo com Kuula-Vaisanen e Kaivola (22) e que tem como objetivo uma especificação única entre os países europeus. No Brasil, a norma ABNT EB 655 (23), estabelece as seguintes características necessárias ao lastro ferroviário:

- Granulometria: ver tabela 2.4.
- Massa específica aparente mínima: $2,4 \text{ g/cm}^3$ (MB-893);
- Absorção de água máxima: 1% (MB-893);
- Porosidade aparente máxima: 1% (MB-893);
- Resistência ao desgaste Los Angeles máxima: 40 % (MB-170);
- Resistência ao choque – índice de tenacidade Treton máximo: 20 % (MB-964);
- Formato da partícula: cúbica (MB-894);
- Partículas lamelares: $\leq 10 \%$;
- Material pulverulento: $\leq 1 \%$ (MB-894);

- Torrões de argila: $\leq 0,5 \%$ (MB-8);
- Fragmentos macios e friáveis: $\leq 5 \%$ (MB-8);

A granulometria do lastro recomendada pela ABNT está apresentada na tabela 2.4 e na figura 2.3, onde pode se observar que a faixa granulométrica está situada entre os diâmetros 12 mm e 50 mm.

Tabela 2.4: Granulometria do lastro recomendada pela ABNT EB 655 (23).

PENEIRA (mm)	GRADUAÇÃO (% QUE PASSA)	
	A	B
76,2	-	100
63,5	100	90-100
50,8	90-100	-
38,0	35-70	25-60
25,4	0-15	-
19,0	-	0-10
12,0	0-5	0-5

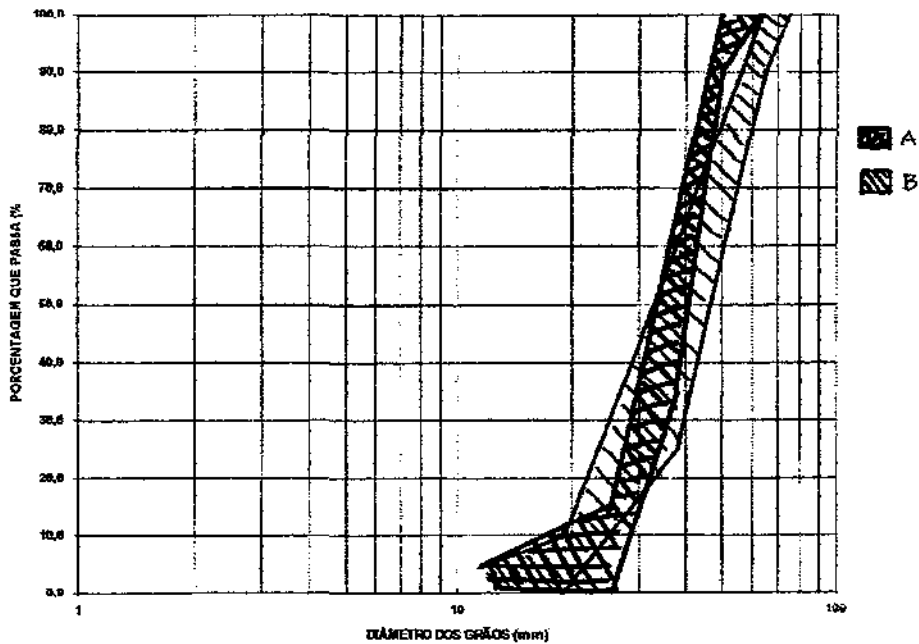


Figura 2.3 Faixas granulométricas A e B recomendadas pela ABNT para material de lastro

2.2.3. Sublastro

A A.R.E.M.A., segundo Howson (14), já em 1942, definia sublastro como sendo “qualquer material de característica superior, que é espalhado sobre a camada final da estrada e abaixo do lastro, para proporcionar melhor drenagem, evitar ascensão de finos por ação do degelo e melhor distribuir a carga sobre a plataforma”.

Para Selig (15), os materiais utilizados para sublastro, devem ser materiais granulares naturais ou artificiais constituídos por mistura de areia e pedras e que devem atender aos requisitos de filtro (Terzaghi, e outros) para separação do lastro e da plataforma, devendo ainda desempenhar as seguintes funções:

- Redução das tensões devidas ao tráfego, para um nível tolerável na camada superior da base;
- Ampliar a proteção da base contra o degelo, onde isto pode ocorrer.
- Evitar a interpenetração da subcamada e lastro;
- Evitar a ascensão de finos da plataforma;
- Evitar atrito da plataforma pelo lastro, que na presença de água, provoca a formação de lama, e por consequência o bombeamento;
- Interceptar a água do lastro e direcioná-la para a lateral da via
- Permitir a drenagem de água fluindo para fora da subcamada.

Quanto às suas características principais, Esveld (20) cita como sendo as seguintes:

- Espessura: 10 cm;
- Granulometria: situada entre 5 mm e 40 mm;
- Capacidade portante: CBR superior a 25
- Energia de compactação superior a 100 % Proctor Normal;
- Irregularidade da superfície da plataforma, inferior a 10 mm.

Adicionalmente à camada do sublastro, Esveld (20) ainda recomenda a colocação de um geotêxtil ou geomembrana, para evitar a ascensão de partículas finas, devendo, entretanto ser ainda colocada uma camada protetora (areia) sob este material, para prevenir danos de perfuração, conforme ilustra a figura 2.4.

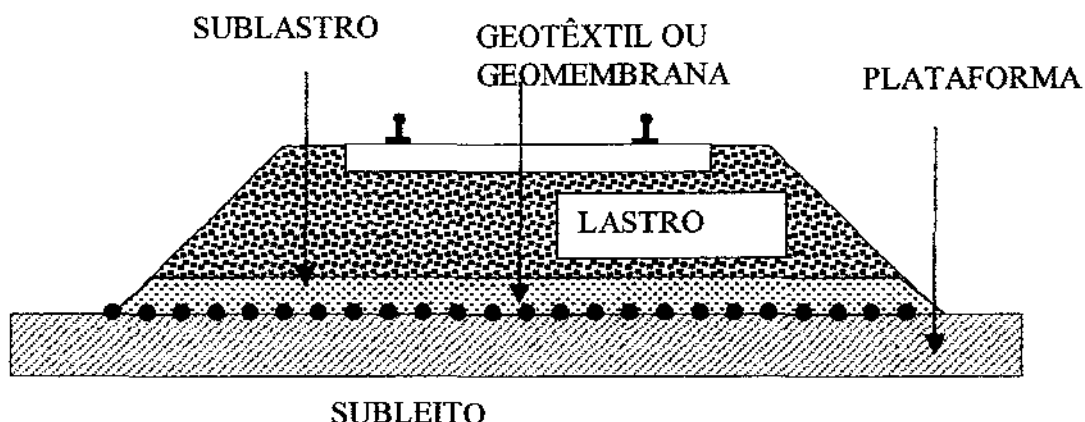


Figura 2.4: Secção transversal de via férrea tendo o geotêxtil ou geomembrana como elemento de proteção filtrante do lastro ou do sublastro.

2.2.4. Plataforma

Além do subleito, a plataforma incorpora uma camada de fundação e eventualmente uma camada de reforço, e/ou uma camada anticontaminante, e/ou um geossintético. Para a UIC (18) a camada de fundação tem finalidade construtiva, para permitir a circulação de veículos da obra, recomendando a instalação de uma camada de reforço sobre a plataforma somente quando for necessário.

Segundo Sauvage (19), a camada de reforço é constituída pelo próprio material do aterro, ou por material de melhor qualidade se distinguindo, entretanto, por uma taxa de compactação mais elevada. O geossintético tem por finalidade melhorar a anticontaminação das camadas superiores.

Os requisitos mínimos aceitáveis para fins de compactação, segundo a UIC (18) são os seguintes:

Para o corpo de aterro:

Peso específico do solo ≥ 95 % do peso específico da amostra no ensaio Proctor Normal;

E_{v2} (módulo de deformação) ≥ 45 MPa para solos finos; 60 MPa para solos arenosos e pedregulhosos.

Para camadas de reforço:

Peso específico do solo ≥ 100 % do peso específico da amostra no ensaio Proctor Normal;

$E_{v2} \geq 80$ MPa.

Como requisitos da camada de reforço, Esveld (20) relaciona:

CBR superior a 5 %

Energia de compactação 97 % Proctor Normal

Irregularidade da superfície da plataforma, inferior a 10 mm.

Paiva e Guimarães (24) realizaram estudo comparativo entre estruturas viárias distintas: a rodoviária, aeroportuária e a ferroviária. Verificaram que o nível de tensão no topo da camada de solo de uma plataforma ferroviária, na condição de carga pesada (20 toneladas/eixo) está mais próximo do nível de tensão de um carregamento aeroportuário e que, portanto, as exigências em termos de compactação da plataforma devem ser as mesmas daquelas empregadas em pavimentos aeroportuários sendo o grau de compactação mínimo de 90 % no caso de solos coesivos e 100 % para solos não coesivos na energia modificada; nas seções de corte, nos primeiros 15 cm do topo o grau de compactação deverá ser de 100 % e nos 46 cm seguintes, de 95 %, de acordo com Fortes e Merighi (25).

2.2.5. Dormentes

Como requisitos importantes a serem considerados, Stopatto (26) resume algumas conclusões da Comissão D-71 da ORE, a qual constatou que a rigidez do dormente é de importância secundária, verificando-se as mesmas distribuições de tensões, no caso de dormentes de madeira ou de concreto. Já o espaçamento entre dormentes, por sua vez, influencia na distribuição de tensões,

embora para espaçamentos inferiores a 50 cm esta influência deixa de ocorrer e o conjunto da infraestrutura acaba atuando como se fosse uma viga.

2.2.6. Declividade transversal da plataforma

A declividade transversal é considerada um item importante para o escoamento das águas pluviais pela plataforma pela UIC (18), não devendo ser inferior a 5 % (casos usuais), ou a 3 % em casos excepcionais. Já nos trechos em curvas com via dupla, a declividade transversal deve ser de 5 a 8 % dependendo do raio da curva, devendo as camadas superiores estarem inclinadas da mesma maneira.

2.3. Avaliação dos problemas potenciais da via permanente

2.3.1. Drenagem

Segundo Lieberenz e Weisemann (27), uma das condições típicas da ferrovia, é a elevada influência da água na via, pois, contrariamente às estruturas rodoviárias, há uma infiltração direta das águas pluviais na superestrutura, devido ao fato de não haver uma camada final impermeável para revestimento da via. Por esta razão, Hay (17) afirma que a drenagem é o mais importante item na construção e manutenção de uma ferrovia. Para Schramm (28), quando o solo da plataforma apresenta capacidade de suporte insuficiente, não consegue conduzir as águas de maneira adequada para as valas laterais e, por esta razão, a água tende a subir através do lastro por efeito do bombeamento, deteriorando-o. Entretanto, o problema basicamente está relacionado à baixa permeabilidade dos solos siltosos e argilosos, que não permite rápido escoamento, seja superficial ou subterrâneo, das águas do lençol freático para os drenos. Por esta razão, a água acumulada no próprio solo acaba por reduzir a capacidade de suporte da via.

2.3.2. Tensões repetidas na plataforma

A British Railways, a respeito das tensões repetidas na plataforma (constituída por solos argilosos), devidas às passagens dos veículos na via, realizou pesquisas, e as suas conclusões foram reunidas pela comissão D71 da ORE, conforme Stopatto (26) relata:

- Sob a ação de cargas repetidas, determinados solos deformam-se sob tensões inferiores àquelas que provocariam sua ruptura, sob ação de uma carga única.
- Para tais solos há um nível de tensões acima do qual a ação repetida de cargas provoca uma deformação permanente (plástica) e uma deformação elástica. Esta tensão foi denominada de *tensão limite ou tensão umbral*.
- Esta tensão (limite ou umbral) não representa um parâmetro característico do material, sendo dependente das solicitações médias efetivas, forma da frequência da onda de carga, e da magnitude e forma com que foram aplicadas cargas anteriores àquele carregamento.
- Outros solos contendo elevada porcentagem de argila ou areia, não apresentam tensão limite (ou umbral) claramente definida.

Procurando explicar as conclusões acima da comissão D71 da ORE, a tensão limite é traduzida pelo módulo resiliente do solo, o qual é obtido através de ensaios triaxiais cíclicos, realizado em laboratório, conforme relata Selig (15) e que tem como objetivo prever as deformações permanentes devido ao carregamento repetido na via. Estas deformações são de origem plástica inicialmente e com a repetição das cargas ocorrem as deformações elásticas.

Recentemente, Gräbe, Clayton e Shaw (29), relataram que os ensaios triaxiais cíclicos não reproduziriam adequadamente o padrão de tensões na fundação, pois ocorreria o fenômeno da rotação da tensão principal e que, portanto, as deformações permanentes estimadas estariam subdimensionadas e para uma melhor determinação das deformações permanentes, recomendaram o emprego do ensaio HCA – “hollow cylinder apparatus”. Entretanto tal constatação ainda é vista com ressalvas e sujeita a críticas.

2.3.3. Defeitos em trilhos e rodas e vibrações provocadas pelos veículos

Os defeitos em trilhos e rodas, de acordo com Selig (15) também podem provocar impactos dinâmicos prejudiciais à superestrutura, sendo que as talas de junção têm sido um dos locais em que se concentram os maiores problemas de manutenção.

O impacto da passagem de veículos, de acordo com Selig (15) produz, além dos esforços na superestrutura, vibrações devido à sua frequência de atuação. Estas vibrações também contribuem

para a deformação da via e deterioração de seus componentes, como é o caso das fixações, pulverização do lastro e movimentação das suas ombreiras.

Müller-Boruttau e Breitsamter (30), apresentam um gráfico (vide figura A.1 do Apêndice A), que mostra que a intensidade das frequências depende da velocidade do veículo, e de distâncias típicas (do veículo, do truque, distâncias entre eixos, etc). Nele, verifica-se que para uma distância entre eixos de um mesmo truque, da ordem de 1,60 m, as frequências de passagem variam desde 3,0 a 21 Hz (baixas frequências), caso as velocidades estejam situadas entre 20 e 120 km/h, usual no Brasil. Se ainda considerarmos a distância entre truques de uma locomotiva, por exemplo, de 9,0 m, as frequências de passagem irão variar de um mínimo de 0,5 Hz ao máximo de 4,0 Hz, estando situadas dentro da faixa de baixa frequência e para velocidades do veículo entre 20 e 120 km/h. Verifica-se ainda que quanto maior a velocidade e menor a distância entre eixos, maior é a frequência, mas ficando ainda dentro da faixa de frequências baixas (baixas frequências até 40 Hz; média frequências até 400 Hz); por outro lado, quanto menor a velocidade e maior a distância entre truques, menores serão as frequências. Entretanto, deve ainda ser considerado um outro efeito ocorrente em baixas velocidades, próximas da situação estática, que é a vibração provocada pelos motores de uma locomotiva, que passa a ser significativa.

Segundo Lieberenz e Weisemann (27), as vibrações são geradas através de excitações de baixa, média e alta frequência devidas ao movimento dos veículos e são transmitidas aos trilhos, à via permanente e ao subleito, na forma de ondas de compressão, ondas de cisalhamento e ondas Rayleigh. As ondas de cisalhamento são mais intensas que as ondas de compressão e geram tensões mais desfavoráveis nas estruturas do solo.

2.3.4. Tipos de ruptura de plataformas

Para que uma plataforma seja considerada estável, Selig (12) recomenda que sejam evitados seis tipos de ruptura:

1. Deformação progressiva devido às cargas repetidas;
2. Ruptura por cisalhamento da plataforma sob o conjunto peso do trem, estrutura da via, e aterro.
3. Ruptura progressiva por cisalhamento (“cess heave”) devido às cargas repetidas;

4. Alterações significativas de volume (expansão ou retração) por alteração da umidade do solo;
5. Inchamento por congelamento e amolecimento por descongelamento;
6. Contaminação do lastro por bombeamento de finos.

Destas rupturas acima relacionadas, três delas são detalhadas a seguir:

- Ruptura por cisalhamento da plataforma;
- Ruptura progressiva por cisalhamento (ou ruptura generalizada do solo de fundação) devido às cargas repetidas;
- Contaminação do lastro por bombeamento de finos (ou ruptura localizada do solo de fundação).

A ruptura por cisalhamento, também conhecida por ruptura em cunha ou circular, é provocada pela ação de uma carga sobre um solo excessivamente saturado, com baixa resistência mecânica, conforme ilustra a figura 2.5. As forças atuantes são o peso do truque e o peso da superestrutura. A força resistente é a força de cisalhamento da infraestrutura. Para Selig (15), este mecanismo de ruptura é de maior probabilidade de ocorrência durante a estação chuvosa, embora, em solos não drenados, esta situação possa ocorrer a qualquer tempo. Nesta situação, a grade (conjunto de trilhos e dormentes) interfere na superfície de ruptura, pois, graças à rigidez da grade, a ruptura acaba ocorrendo externamente à ela conforme a figura 2.5.

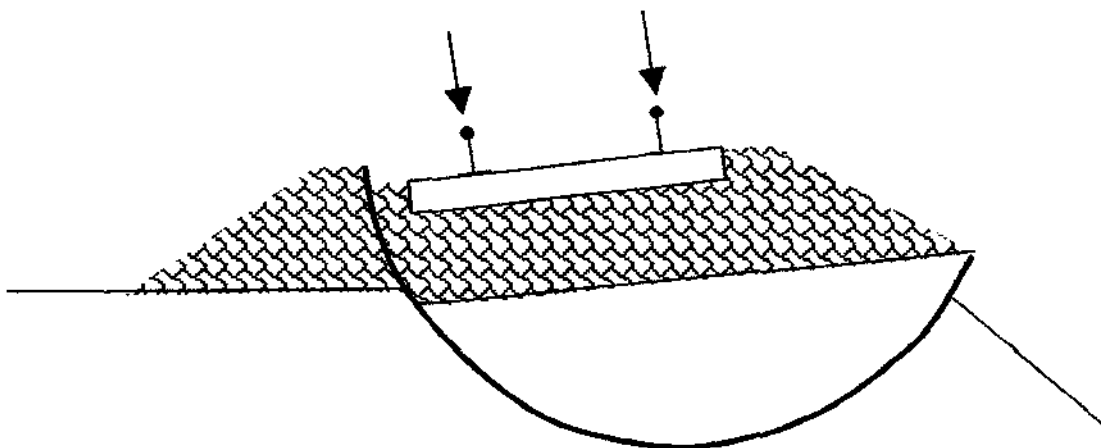


Figura 2.5 – Ruptura por cisalhamento em via férrea.

A ruptura progressiva por cisalhamento ocorre geralmente na parte superficial da plataforma, onde as tensões atuantes são elevadas. O solo é comprimido lateralmente à via e para cima, em direção à superfície da plataforma, conforme a figura 2.6. Esta ascensão do solo impede a drenagem da via e a depressão formada sob os trilhos armazena a água pluvial que percola pela camada superior de lastro.

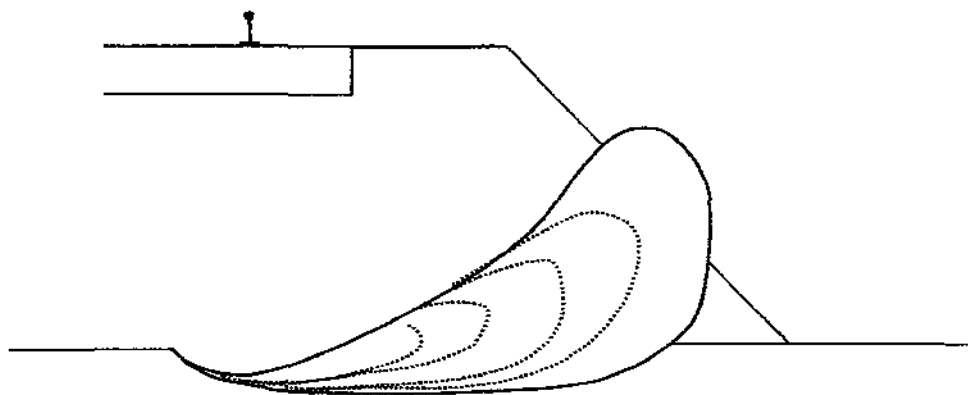


Figura 2.6. –Ruptura progressiva por cisalhamento

A ruptura progressiva por cisalhamento conforme Li e Selig (31), foi relatada pela primeira vez pela ORE em 1970, e ocorre principalmente em subleitos com alto conteúdo de argila, e atrito interno reduzido.

A contaminação do lastro (figura 2.7), provocada pela deformação plástica excessiva, ocorre pela falta de capacidade portante do subleito, permitindo a penetração das partículas do lastro no subleito ou de partículas por via aérea (minérios, poeira, líquidos), pelo efeito das cargas cíclicas.

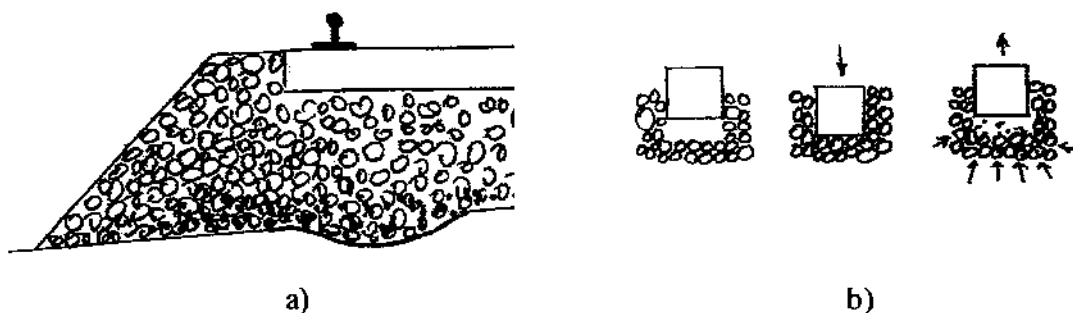


Figura 2.7. -Contaminação do lastro por bombeamento de finos: a) a presença inicial de finos no lastro prejudica o escoamento das águas pluviais para o exterior; b) deformações no conjunto propiciam o fenômeno do bombeamento causado pela movimentação do dormente como se fosse um êmbolo, succionando mais finos do subleito.

Com o aumento do grau de saturação do subleito, irão ocorrer maiores deformações no conjunto lastro/plataforma, resultando na formação de bolsões de lama.

2.3.5. Degradação do lastro e dos demais componentes

Os problemas de contaminação do lastro, além das causas externas, já relacionadas no item anterior, podem ainda apresentar, segundo Esveld (20), contaminação devido à causas internas, tais como desgaste e envelhecimento do próprio material do lastro. Selig (15) considera que estas alterações da graduação do lastro podem ser resultantes de:

- Degradação mecânica das partículas durante as fases de construção e manutenção e da passagem dos veículos;
- Deterioração química e mecânica por variações ambientais;

Assim, o lastro torna-se contaminado, perde suas características granulométricas e sua habilidade de desempenhar suas funções fica reduzida ou totalmente comprometida. Entretanto, Selig (15) considera que o subleito é o maior responsável pela resiliência da superestrutura e contribuindo por consequência e de maneira substancial para as deflexões elásticas dos trilhos sob as rodas. Além disso, a rigidez do subleito influencia na deterioração do lastro, trilho e dormentes, sendo também uma fonte dos recalques diferenciais dos trilhos.

2.4. Técnicas e soluções para restauração das vias férreas

Existem várias técnicas para a restauração da superestrutura, sendo as principais relatadas a seguir, que consistem do emprego de sublastro, de aditivos para reforço da plataforma e do emprego de geossintéticos.

Schramm (28) recomenda o emprego de sublastro constituído por uma camada de areia de 20 a 40 cm de espessura, entre o lastro e a plataforma, devendo ser feita a determinação da sua composição granulométrica, para que ocorra a proteção do lastro. Cedergren (13) e Hay (17) recomendam uma solução para eliminar a formação de bolsões de lama, através do emprego de tubo-dreno conectado a trincheiras profundas paralelas à via.

Uma outra técnica, a qual depende do tipo de solo utilizado na plataforma, consiste no emprego de aditivos para o seu reforço, tornando-a menos sensível à saturação. Hay (17), afirma que o emprego de aditivos tais como a areia, cimento, cal, silicato de sódio no subleito instável, apresenta bons resultados.

Voottipruex e Roongthanee (32), relatam a solução de um caso na Tailândia, em um aterro ferroviário, onde era freqüente o bombeamento de finos para o lastro. Foram realizados ensaios de campo adicionando cinzas volantes e cinzas volantes com cimento portland, ao solo local, constituído por uma argila inorgânica de plasticidade média a baixa. Como resultado, obteve-se uma redução das tensões no aterro de 42 % no caso de solo com cinzas volantes e 87,2 % no caso de solo com cinzas volantes e cimento portland. O bombeamento de finos do solo decorridos 90 dias da implantação desta técnica foi, de acordo com os autores, praticamente insignificante.

Embora o tempo de acompanhamento do desempenho desta solução tenha sido muito reduzido, esta técnica apresenta o inconveniente de se constituir em uma solução rígida e que, com o aparecimento de fissuras no aterro, provavelmente voltem a ocorrer os problemas de bombeamento com o tempo.

Outra técnica que tem sido muito promissora, sobretudo na Europa e Estados Unidos e já utilizada no Brasil, consiste no emprego de geossintéticos como elemento de reforço, e/ou filtro/separação entre a plataforma e o lastro ou entre sublastro e o lastro. Até o momento os geossintéticos mais utilizados na interface plataforma/superestrutura ferroviária, foram: geotêxteis não-tecidos, geogrelhas, geocélulas, geomembranas e geocompostos para reforço.

Na avaliação do desempenho de um geossintético devem ser consideradas as seguintes propriedades: resistência à tração, resistência à perfuração, resistência à abrasão, diâmetro de filtração, e capacidade de fluxo, que correspondem às seguintes funções que o mesmo pode desempenhar: reforço, filtração, separação e drenagem. Com relação aos produtos, os geotêxteis apresentaram, até agora, o melhor desempenho, embora seja recomendável sempre se considerar o emprego de produtos mais espessos, com peso superior a 1000 g/m^2 , para proporcionar melhor desempenho da solução. As geogrelhas e geocélulas foram mais eficientes quando se tratou de reforço da plataforma e redução nas deformações. As geomembranas foram empregadas principalmente na Inglaterra e na França, com resultados satisfatórios.

2.5. Métodos de dimensionamento da superestrutura

Na literatura técnica existem disponíveis diversos métodos para o dimensionamento de uma superestrutura ferroviária, tais, como o de Talbot, Eisenmann, British Railways, SNCF, RENFE, AREMA, etc.

Para fins de simplificação, são apresentados a seguir 2 métodos clássicos: Eisenmann e Talbot, e 2 métodos computacionais: o Geotrack, e o Ferrovia, sendo feito também menção ao Polyfelt Geotextile Design. Além destes métodos é incluído ao final deste item o método computacional Geoslope (Slope-W).

2.5.1. Método de Eisenmann

Desenvolvido em 1790, conforme Rives (33), utiliza várias metodologias para a determinação das tensões atuantes na plataforma. Para o cálculo das tensões atuantes na face inferior dos dormentes, Eisenmann recomenda o emprego das curvas de Zimmermann, o qual considera que a via esteja apoiada sobre uma sapata corrida. Para a determinação das tensões atuantes na plataforma, são utilizadas as seguintes equações (fórmulas de Carothers-Terzaghi):

$$\sigma_z = \frac{2p}{\pi} \left(\arctg \frac{a}{z} + \frac{az}{a^2 + z^2} \right) \quad (2.1)$$

$$\sigma_z = -\frac{p}{\pi} \left(\alpha_2 - \alpha_1 - \frac{1}{2} (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) \right) \quad (2.2)$$

onde:

a= meia largura do dormente

z=distância entre a face inferior do dormente e o ponto de aplicação da tensão na plataforma considerado.

p=tensão dormente/lastro (ou tensão na face inferior do dormente)

σ_z =tensão atuante na plataforma devida ao dormente considerado

α_1 =ângulo entre a base da plataforma e a extremidade mais distante do dormente;

α_2 = ângulo entre a base da plataforma e a segunda extremidade do dormente

A equação 2.1 é utilizada para a determinação da tensão no ponto sob o dormente central, enquanto que a equação 2.2, é utilizada para a determinação das tensões provocadas pelos 4 dormentes adjacentes ao dormente central, em relação ao mesmo ponto (sob o dormente central)

Conforme o conceito de Zimmermann, a via férrea se deforma de acordo com a expressão de Winkler, relata Brina (2):

$$P = c \times y \quad (2.3)$$

onde:

P= pressão exercida pelo dormente no lastro

c= constante de proporcionalidade, ou de lastro ou ainda coeficiente de Winkler

y= recalque da via

O coeficiente de Winkler apresenta valores que variam de 0,02 a 0,50 N/mm³.

O método atualmente utilizado foi adaptado por Timoshenko, Saller e Hanker, transformando dormentes espaçados em um apoio contínuo, sendo a , a área de espaçamento entre dormentes e b , a largura da sapata corrida. Desta forma, são obtidos os valores do recalque y , do momento M , e da pressão atuante P , através das expressões a seguir:

$$y = \text{deformação da via} = \frac{Q}{2 \times b \times c} \times \eta \quad (2.4)$$

$$M = \text{momento fletor da via} = \frac{Q}{4} \times L \times \mu \quad (2.5)$$

$$P = \text{pressão exercida pelo dormente no lastro} = c \times y = \frac{Q}{2 \times b} \times \eta \quad (2.6)$$

$$L = \text{comprimento elástico} = 4 \sqrt{\frac{4 \times E \times I}{b \times c}} \quad (2.7)$$

$$\eta = \text{coeficiente} = \frac{\cos \frac{x}{L} + \text{sen} \frac{x}{L}}{e^{\frac{x}{L}}} \quad (2.8)$$

$$\mu = \text{coeficiente} = \frac{\cos \frac{x}{L} - \text{sen} \frac{x}{L}}{e^{\frac{x}{L}}} \quad (2.9)$$

$$S_0 = \frac{P}{\sum \eta_i} \quad (2.10)$$

$$\sum S_i = S_0 \times \sum \eta_i \quad (2.11)$$

sendo:

E= módulo de elasticidade

I= momento de inércia do trilho

x=distância entre o ponto de aplicação da carga Q e o ponto considerado

Q= carga por roda aplicada no trilho.

2.5.2. Método de Talbot

Desenvolvido em 1890, conforme Hay (17), também se baseia em Zimmermann. Talbot, entretanto, preconiza o coeficiente U denominado módulo da via, correspondente a uma carga q atuando na via, e produzindo um recalque unitário no trilho.

$$q = U \times y \quad (2.12)$$

q= carga linear atuante sobre a unidade de comprimento do trilho.

y= recalque do trilho (de valor unitário para a obtenção de U)

U=módulo da via

A determinação do recalque y, do momento e da carga linear q é feita como segue:

$$y = Q \times \sqrt[4]{\frac{1}{64 \times E \times I \times U^2}} \times e^{\frac{-x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \text{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (2.13)$$

$$M = Q \times \sqrt[4]{\frac{E \times I}{64 \times U}} \times e^{\frac{-x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} - \text{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (2.14)$$

$$q = Q \times \sqrt[4]{\frac{U}{64 \times E \times I}} \times e^{\frac{-x}{L}} \left[\cos \frac{x}{L} + \text{sen} \frac{x}{L} \right] \quad (2.15)$$

2.5.3. Geotrack

O “GEOTRACK”, conforme relatado por Chang, Adegoke, e Selig (34), é um programa computacional que considera a via férrea de acordo com um modelo tridimensional multicamadas, para a determinação do comportamento elástico da via, considerando as propriedades de deformação e resiliência dos materiais e a separação do conjunto lastro e dormente. O estado das tensões no solo por ele calculado é utilizado para prever as deformações permanentes da via. A saída do programa inclui as reações trilho-dormente, reações dormente-lastro, deflexões e momentos fletores nos trilhos e dormentes.

O número total de dormentes considerado é de 17 unidades . O trilho é representado por uma viga elástica linear. Os parâmetros que representam os trilhos são: a sua secção transversal, momento de inércia e módulo de elasticidade do material. A ligação entre o trilho e o dormente é representada por uma mola linear, com uma constante de mola especificada que pode ser de tração, ou de compressão.

Os dormentes são representados por uma viga elástica linear, representada pelo módulo de elasticidade (E), secção transversal e momento de inércia (I). As forças são aplicadas à superfície do lastro através de uma pressão uniforme sobre uma área circular cuja dimensão depende da dimensão do segmento do dormente, obtido pela divisão do seu comprimento em 10 partes iguais. O efeito do cisalhamento entre dormente e lastro não é considerado neste modelo. O lastro, sublastro e demais camadas do subleito são representadas por uma série de camadas elásticas lineares, cada qual representada pelo seu módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e profundidade da camada. Todas as camadas são infinitas na horizontal. A espessura máxima da camada é de 2,5 m, sendo que a última camada é considerada como infinita. O modelo ainda permite que seja utilizado qualquer número de camadas, considerando-se a variação das propriedades do subleito.

Spada (35) relata que o carregamento atuante sobre a via é disposto de tal forma que o eixo número 1 é posicionado sobre o dormente número 1, sendo considerados apenas os carregamentos simétricos. Quando um carregamento de roda ficar posicionado entre dois dormentes, as cargas devem ser divididas em duas componentes, as quais são proporcionalmente colocadas entre os dormentes adjacentes. Somente os dormentes 1 a 12 podem ser carregados.

Os dados de saída são os seguintes:

- Informações dos dados de entrada no programa;
- Deflexão vertical do trilho, reação trilho-dormente, deflexão do dormente sob o trilho a cada dormente.
- Momentos fletores atuantes sobre o trilho, sobre o dormente na posição do trilho e sobre o centro do dormente.
- Módulo da via.
- Deslocamento vertical e o incremento de tensões provocado pelo carregamento da roda, no ponto selecionado em cada camada.

2.5.4. Ferrovia

O programa computacional “FERROVIA” foi desenvolvido por Rodrigues (36) e atualizado em 2002, com orientação de Spada (35). Está fundamentado no método dos elementos finitos e na teoria da elasticidade, para simulação dos trilhos, dormentes e fixações e no método das camadas finitas para simulação da infraestrutura e geração de sua matriz de flexibilidade, através do programa ELASTMCF. Esta matriz invertida fornece a matriz de rigidez da infraestrutura (K_F), que junto com a matriz de rigidez da superestrutura (K_S) da grade, permite o cálculo dos deslocamentos e rotações dos pontos nodais, por meio da resolução do sistema de equações lineares resultantes.

O modelo assim desenvolvido apresenta as seguintes características:

- Calcula a resposta da via sob o carregamento aplicado, incluindo tensões e deformações atuantes nas camadas de lastro, sublastro e subleito;
- Considera a natureza tridimensional do conjunto grade, lastro, sublastro e subleito, proporcionando nível aceitável de cálculo computacional.
- Incorpora as vantagens dos modelos existentes.

O comportamento tensão-deformação dos solos e dos materiais granulares constituintes do lastro e sublastro, sob a ação de cargas é simulado por meio dos seus módulos resilientes (M_r), definidos como os módulos de Young referentes às deformações recuperáveis provocadas por uma

carga transiente com duração de 0,10 s. A dependência desse módulo com o estado de tensões é levada em conta por meio de um processo iterativo, quando se parte de estimativas iniciais para os módulos, calculando-se a seguir as tensões geradas e se atualizando os módulos em função dessas tensões, considerando-se o confinamento gerado pelo peso próprio das camadas. A malha de pontos nodais da grade considera 11 dormentes, cada qual dividido em 10 elementos de viga. Os dados de saída do programa são obtidos através de 4 arquivos: `contact.dat`; `resposta.dat`; `tiesai.dat`; e `outflex.dat`, que fornecem as seguintes informações:

- Tensões de contato dormente-lastro (`contact.dat`);
- Deslocamentos e rotações dos trilhos (`resposta.dat`);
- Tensões e deformações na fundação (`tiesai.dat`);
- Módulos das subcamadas nos incrementos de carga (`tiesai.dat`);
- Tensões de tração e de cisalhamento nos trilhos e dormentes (`outflex.dat`);
- Esforço cortante e momentos fletores nos trilhos e dormentes (`outflex.dat`);
- Forças de reação trilho-dormente (`outflex.dat`).

As tensões de contato negativas são descartadas no programa INFRA, a fim de evitar tensões de tração entre lastro e dormente.

2.5.5. Polyfelt Geotextile Design

O programa computacional denominado “Polyfelt Geotextile Design” (37), é um programa guia, baseado nos próprios manuais da Polyfelt e está baseado no conceito de dimensionamento por função. Está destinado a orientar o emprego de geossintéticos nas mais variadas obras e para a linha de produtos fabricada pela empresa. É o único programa atualmente existente, destinado a cálculo de vias férreas incorporando reforço com geossintéticos na interface plataforma/lastro. Este programa é fornecido gratuitamente e inclui entre as aplicações, as obras ferroviárias. Neste programa são consideradas as seguintes variáveis:

- Carga na superfície (0,5 m abaixo dos dormentes): σ_1 (kN/m²);
- Espessura da camada de lastro: h_{BETT} (cm);
- Espessura da camada de sublastro: h_{PSS} (cm);

- Capacidade portante do lastro: σ_z (MN/m²);
- Capacidade portante do subleito: σ_{ZUL} (MN/m²);
- Layout: consideradas 4 secções transversais de via (plana, corte, aterro, a meia-encosta);
- Resistência da base: 3 situações com variação do número do SPT-Standard Penetration Test.

A partir dos dados informados no programa, é fornecido o tipo de reforço mais adequado a cada caso.

2.5.6. Geoslope (Slope/W)

De acordo com Krahn (38) a análise de estabilidade de taludes de aterro é a mais antiga técnica de análise numérica da engenharia geotécnica. Existem vários métodos de cálculo, tais como o de Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, etc. Cada um destes métodos considera o equilíbrio de forças e/ou de momentos e leva em consideração ou não as forças interlamelares normais e de cisalhamento. O método de Morgenstern-Price é um método que considera todas estas condições. O programa computacional Geoslope (Slope-W), é um programa que efetua análises de estabilidade de taludes, segundo vários métodos. Está baseado na formulação do Equilíbrio Limite Geral (ELG) desenvolvido por Fredlund em 1970, e utiliza duas equações para a determinação dos fatores de segurança (FS): uma fornece este fator em relação ao equilíbrio de momentos (equação 2.16) e a outra fornece o fator em relação ao equilíbrio de forças horizontais (equação 2.17).

$$F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u\beta) R \tan \phi')}{\sum W_x - \sum N_f \pm \sum Dd} \quad (2.16)$$

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad (2.17)$$

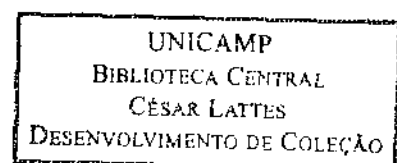
onde:

c' = coesão efetiva

ϕ' = ângulo de atrito efetivo

u = poropressão

N = força normal à base da lamela



W= peso da lamela

D = carga linear

$\beta, R, x, f, d, \omega$ =parâmetros geométricos

α =inclinação da base da lamela

A variável chave N, obtida pela somatória das forças verticais (equilíbrio das forças verticais), é calculada pela equação 2.18:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \times \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (2.18)$$

onde:

F= é F_m quando N é substituído na equação do equilíbrio de momentos e F_f quando N é substituído na equação do equilíbrio de forças

X_L e X_R são forças interlamelares em cada lado da lamela.

O método do equilíbrio limite geral considera também a determinação das forças interlamelares através da equação proposta por Morgenstern e Price:

$$X_F = E_E \lambda f(x) \quad (2.19)$$

sendo:

$f(x)$ = função

λ = porcentagem (na forma decimal) da função utilizada

E_E = força normal interlamelar

X_F = força de cisalhamento interlamelar

O método ELG calcula F_m e F_f para uma faixa de valores de λ e com base nestes valores, permite o traçado de um gráfico, como o da figura 2.8, que mostra como variam estes fatores em função de λ . Nesta figura estão indicados os seguintes pontos: 1-fator de segurança calculado pelo método de Bishop; 2-fator de segurança calculado pelo método de Janbu; 3-fator de segurança

calculado pelo método de Morgenstern-Price, através do equilíbrio dos momentos e equilíbrio das forças horizontais.

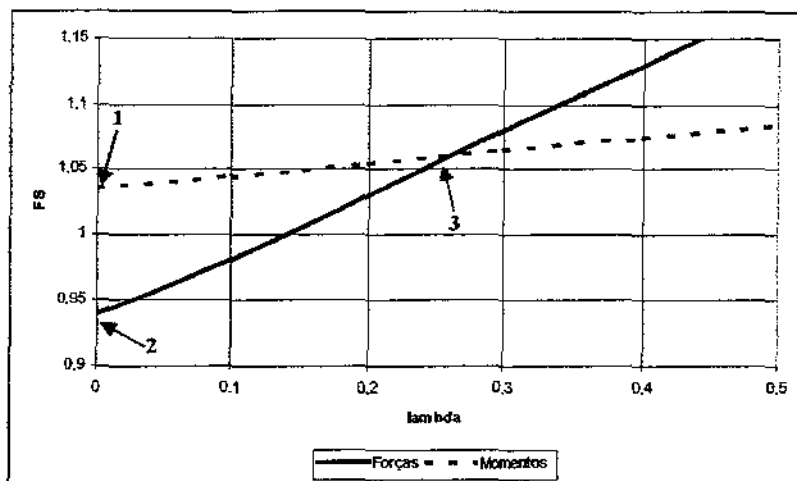


Figura 2.8: Fatores de segurança em relação ao equilíbrio de momentos e de forças versus λ

O programa Geoslope apresenta como $f(x)$ padrão a função parábola invertida ou meio-sino, podendo ser alterada de acordo com o caso em análise.

2.6. Exemplos de vias férreas degradadas existentes no Brasil

As fotos 2.1 a 2.4, apresentadas neste item, refletem o estado geral usual de algumas vias férreas existentes no Brasil. Grande parte destas vias encontram-se enterradas ou no mesmo nível da plataforma, dificultando o escoamento das águas pluviais as quais, retidas no lastro, propiciam a ocorrência de bombeamento de finos da plataforma para o lastro. Em trechos em corte, verifica-se também a ocorrência de nível elevado do lençol freático, que também favorece o bombeamento de finos. Com relação à grade, é comum encontrar fixações inadequadas, sobre dormentes de madeira podres e solicitando mais intensamente os trilhos, os quais por sua vez acabam se desgastando mais rapidamente e produzindo depressões na sua superfície de rolamento.

A foto 2.1 mostra um local onde a água ficou aprisionada em um bolsão de lastro, impedindo o seu escoamento para fora da plataforma. A foto 2.2. mostra um ponto com intenso bombeamento de finos da plataforma para o lastro, aflorando à superfície. As fotos 2.3. e 2.4 mostram pontos onde o trilho se apresenta muito desgastado e o dormente deteriorado ainda está em uso e necessitando de substituição



FOTO 2.1: Água aprisionada no bolsão de lastro contaminado

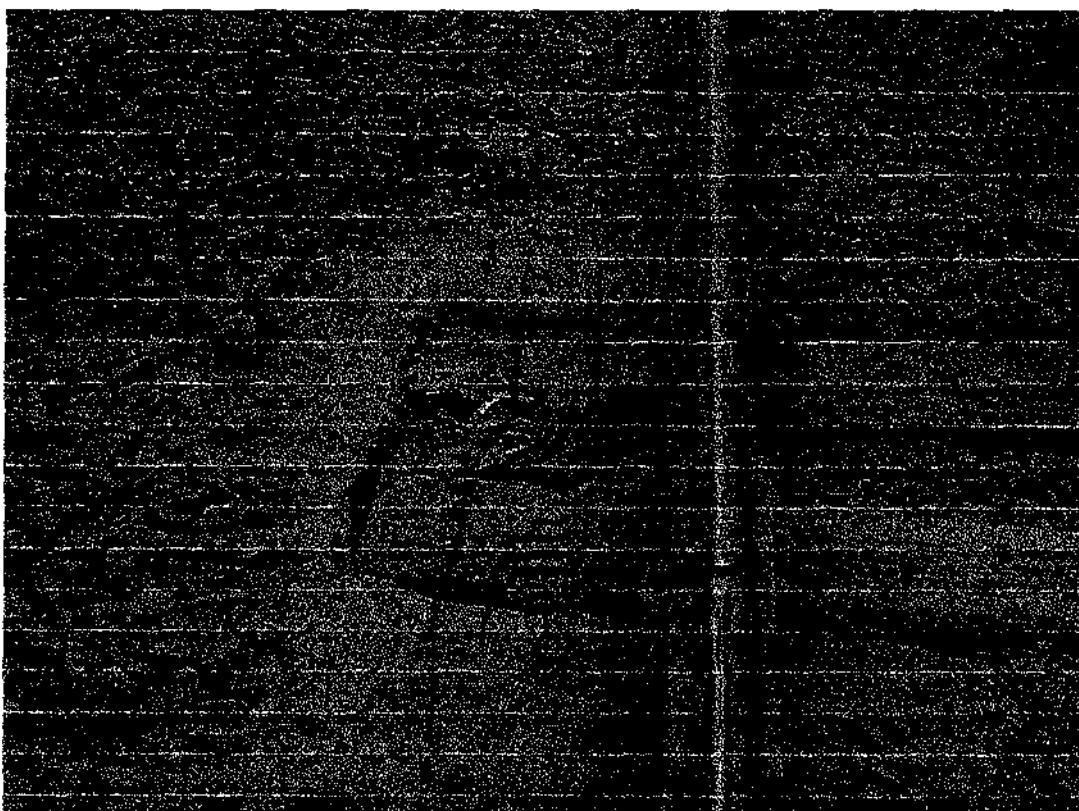


FOTO 2.2: Ocorrência de bombeamento de finos da plataforma para o lastro.

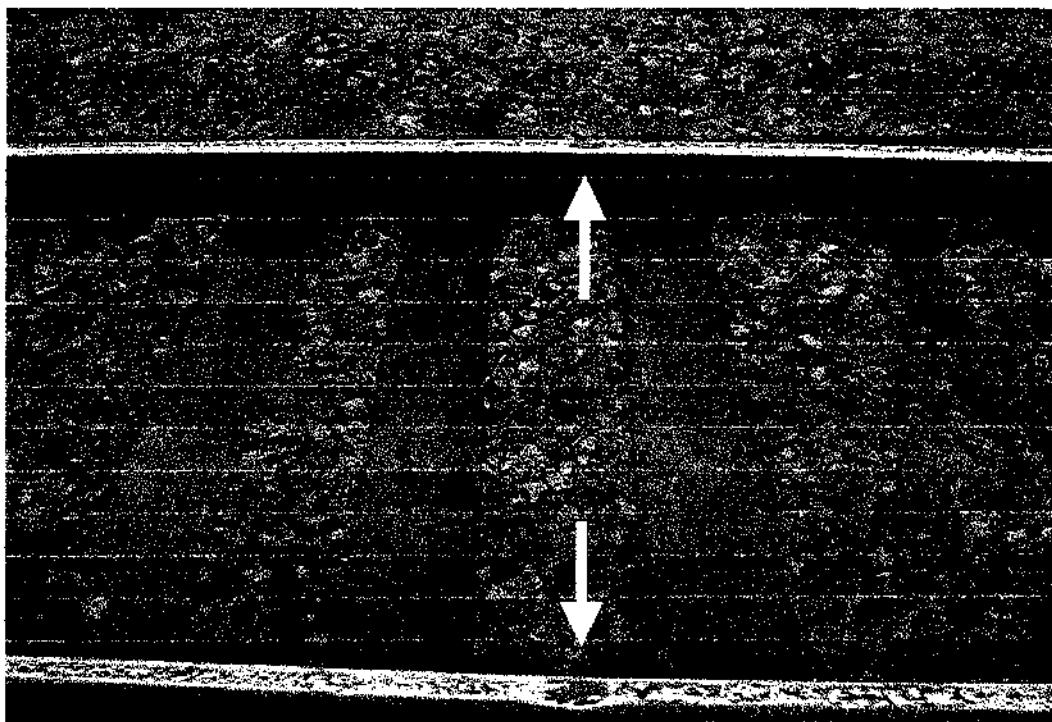


FOTO 2.3: Pontos apresentando o boleto do trilho muito deformado, e desgastado.

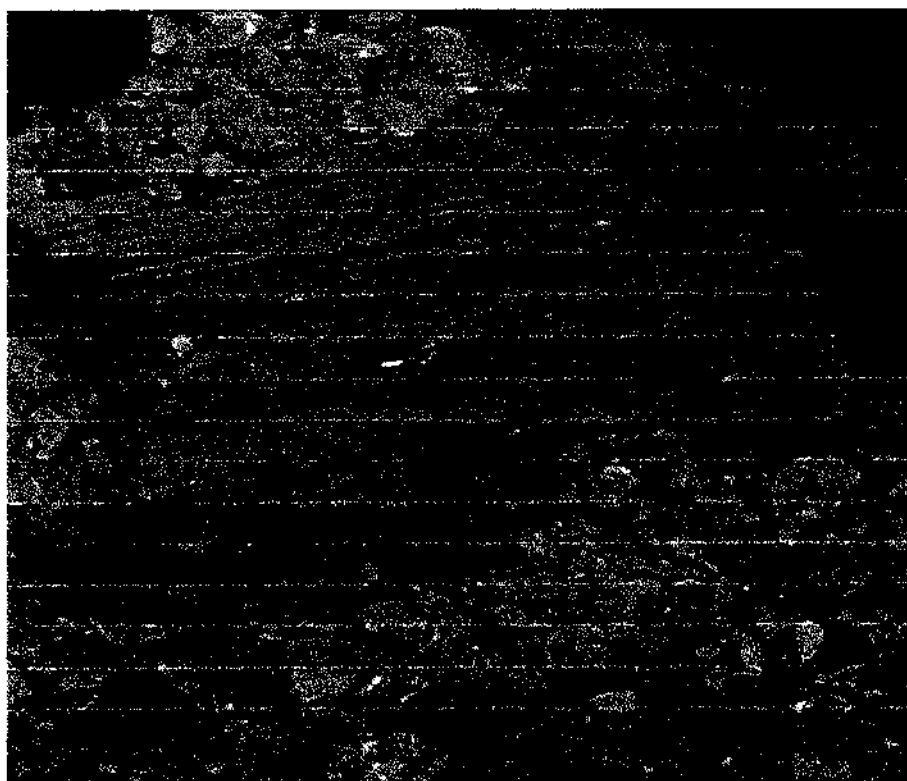


FOTO 2.4: Dormente em mal estado de conservação ainda em operação

Grande parte dos problemas existentes nas vias férreas, poderia ser resolvida com medidas eficazes de drenagem profunda e/ou superficial, levantamento da via, etc. Além destas medidas, um programa eficaz de manutenção e de restauração das vias permitiria paulatinamente a correção dos problemas existentes e melhoria geral do seu estado.

Embora o emprego do sublastro, técnica adotada há mais de 65 anos conforme relato de Howson (14), seja comprovadamente eficaz, ainda são poucas as vias férreas nacionais que a utilizam. Embora seja uma técnica que provoque uma intervenção direta na via, obrigando a remoção do seu lastro e grade, os trechos mais críticos poderiam contemplá-la.

É por esta razão que as vias férreas nacionais apresentam os crônicos problemas de deflexões excessivas, degradação da via e de seus materiais constituintes, perda de alinhamento e da bitola, e reduzida resistência à deformação lateral sob ação de forças de origem térmica e frenagem, além dos costumeiros problemas de atrasos provocados pelas restrições de velocidade, relatados por Hay (17)..

Dentro deste quadro a avaliação do comportamento de uma via férrea no Brasil deve ser dotada de recursos e técnicas de maneira a permitir a visualização do real estado da via permitindo a seleção dos trechos mais críticos para fins de uma restauração programada.

3. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UMA VIA FÉRREA DEGRADADA

O objetivo deste estudo foi o de avaliar as vias férreas nacionais, principalmente aquelas mais degradadas, segundo um critério pouco usual no meio ferroviário. Geralmente a via é avaliada segundo o eixo longitudinal, através de suas tensões, solicitações, recalques, etc, mas raramente é avaliada a sua secção transversal, através do risco de ruptura circular da plataforma.

Este método de avaliação é somente empregado durante a fase de projeto de uma via nova, mas em uma condição operacional de uma via, tal verificação não é feita. Com o passar do tempo, as vias vão se degradando, seus dispositivos de drenagem perdem sua eficiência; há a geração de pressões neutras na camada mais superficial da plataforma, surgindo bolsões de argila sob a camada de lastro; o lastro vai se contaminando e muitas vezes o talude perde sua configuração original. Nesta situação justifica-se o estudo realizado, para que possam ser identificadas as situações de risco.

3.1. Questões principais

O experimento realizado pretendeu responder a duas questões principais:

- Qual é o risco de ruptura circular de uma plataforma de pátio ferroviário com baixa capacidade de suporte, saturada, lastro contaminado, drenagem deficiente, em situação de ação de uma carga estática proveniente de veículo carregado, estacionado?
- Sob quais condições este risco de ruptura ocorre ?

Este estudo teve como ponto de partida o relato de Selig (15), já apresentado no item 2.3.5, e dos resultados de avaliações que o mesmo obteve, considerando uma carga constante aplicada na

plataforma e segundo diversas situações, tais como inclinação do talude, distância da saia do aterro à crista do talude, etc, tendo chegado a inúmeras situações de risco de ruptura. No experimento realizado procurou-se empregar uma distribuição de carga mais próxima da realidade, bem como um conjunto de parâmetros típicos das vias férreas nacionais.

3.2. Conceituação do problema proposto

As principais características relativas a uma avaliação de um aterro constituído de solos com baixa resistência, são as seguintes:

- O modelo adotado é válido para cargas estáticas (monotônicas);
- O nível de tensão na base é uniforme;
- A resistência do subleito aumenta com o tempo (com a expulsão da água de saturação);
- As deformações permanentes são geralmente acentuadas;

Já o problema proposto apresenta as seguintes características:

- Atuação de cargas estáticas (monotônicas);
- O nível de tensão na plataforma não é uniforme;
- A resistência do subleito diminui com a saturação progressiva devido ao acúmulo das águas pluviais e pelo efeito do bombeamento.
- O nível de deformações é semelhante ao de um pavimento flexível ou rígido, onde as deformações máximas admissíveis são muito inferiores ao caso de um aterro sobre solo mole.

3.3. Variáveis e avaliações realizadas

Procurou-se selecionar situações de vias em condições precárias, representativas de algumas vias férreas nacionais, bastante degradadas. Para representar uma condição estática de atuação das cargas sobre a via, foi adotado o modelo de pátio ferroviário, onde geralmente a plataforma encontra-se muito saturada, devido à precariedade do escoamento das águas superficiais, adjacente a talude de

aterro de pequena altura. Esta camada superficial da plataforma, saturada é constituída de uma composição mista de solo e lastro e onde a parcela solo encontra-se saturada, sendo aqui denominada de camada CSP. Para fim das avaliações foi definida uma seção de via externa de um pátio ferroviário, adjacente a um talude de aterro, sem dispositivo de coleta de drenagem superficial, de acordo com o esquema básico da figura 3.1 e sobre ela, um veículo carregado.

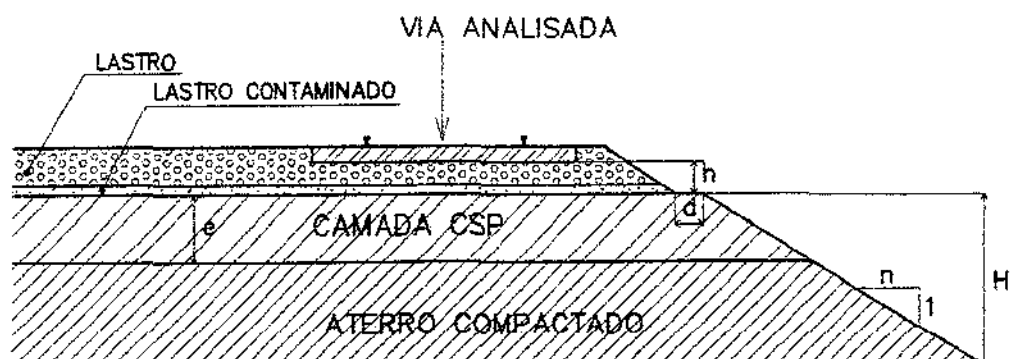


Figura 3.1 – Seção transversal da via em trecho de pátio ferroviário, adjacente a talude de aterro, utilizada para as avaliações. A camada de lastro contaminado foi considerada como tendo a espessura fixa de 0,10 m.

O carregamento escolhido é composto por um vagão gôndola estacionado, com carga até 120 T (1.176 kN), 4 eixos e cujas distâncias entre eixos são as seguintes:

- distância entre eixos de um mesmo truque 1,75 m;
- distância entre o engate e o eixo mais próximo 1,58 m

Verifica-se, portanto, que o espaçamento entre os eixos extremos de dois vagões adjacentes, de 3,16 m, é maior que o espaçamento entre eixos de um mesmo truque, que é de 1,75 m, o que proporciona um maior carregamento nos dormentes distribuídos na região central do truque. As distâncias entre eixos do vagão gôndola, está indicada na figura 3.2, onde é possível observar a distância entre os eixos extremos de dois vagões gôndola adjacentes, que é duas vezes o valor 1,58 m resultando em um distanciamento total de 3,16 m.

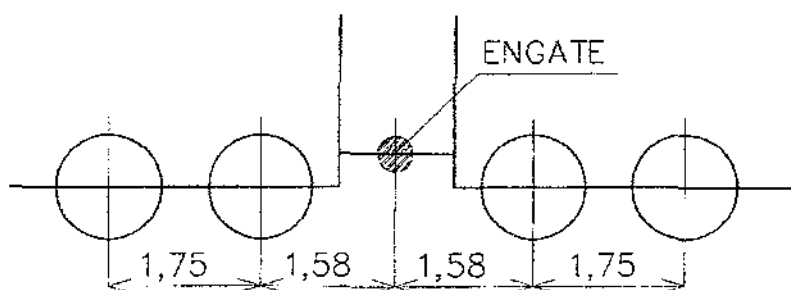


Figura 3.2 – Distância entre eixos do vagão gôndola utilizado no estudo.

As variáveis consideradas neste estudo estão relacionadas a seguir:

- a) Bitola: Larga (BL), métrica (BME) e mista (BMI)
- b) Dormentes: de madeira, com as seguintes dimensões: 2,80 x 0,24 x 0,17 (comprimento x largura x altura) – bitolas larga e mista; 2,30 x 0,22 x 0,16 – bitola métrica.
- c) Trilhos: TR-57 com desgaste do boleto de 0% ($I=2730,5 \text{ cm}^4$); TR-57 com desgaste de 25 % do boleto ($I=2255,86 \text{ cm}^4$); TR-50 com desgaste de 25 % do boleto ($I=1695,20 \text{ cm}^4$). Após consulta a engenheiros ferroviários, verificou-se que se admite um desgaste limite de 25 % do boleto, tendo sido adotado este valor no presente estudo.
- d) Camada superficial da plataforma (CSP): camada de composição mista de solo e lastro, onde a parcela solo encontra-se saturada, com espessura (e) variando desde 0,30 m a 1,10 m;
- e) Espessuras da camada de lastro (h): 0,15 e 0,35 m, sendo que 0,10 m é constituído por lastro contaminado com módulo $E=800 \text{ kgf/cm}^2$, e o restante com lastro de módulo $E=1500 \text{ kgf/cm}^2$;
- f) Taludes: avaliadas as seguintes inclinações (1:m) (V:H): 1,5:1 (1:0,66); 1:1; 1:1,5 e 1:2.
- g) Alturas de talude (H): 0,25 m; 0,50 m; 0,75 m; 1,0 m; 2,0 m; 3,0 m; e 5,0 m.
- h) Distância da saia do lastro à crista do talude (d): 0; 0,10 m; 0,20 m; 0,30 m; 0,60 m.
- i) Espaçamento entre dormentes: 0,60 m tendo sido feita uma avaliação para espaçamento 0,55 e 0,65 m.

- j) Tensão de compressão na plataforma: 0 a 280 kPa, definida a partir do estudo de distribuição das tensões na plataforma.
- k) Coeficientes de Winkler (c): 0,02 a 0,14 N/mm³ (2 a 14 kgf/cm³).
- l) Características dos solos considerados neste estudo:
 - a. Camada CSP:
 - i. peso específico: 16, 18, e 20 kN/m³
 - ii. coesão: 5, 10 e 15 kPa.
 - iii. Ângulo de atrito: 0 a 25°
 - b. Solo da plataforma (aterro compactado):
 - i. peso específico: 16, 18, e 20 kN/m³
 - ii. coesão: 5, 10, 15, 20, 30 e 60 kPa.
 - iii. Ângulo de atrito: 0 a 30°
- m) Extensão da socaria nos dormentes:
 - a. Bitola larga (BL): 113,50 cm
 - b. Bitola métrica (BME): 76,50 cm.
 - c. Bitola mista: (BMI) 80 e 140 cm. Estes valores são usuais para a malha ferroviária paulista, conforme levantamento de campo realizado pelo autor.

3.4. Sequência do desenvolvimento do estudo

O estudo foi desenvolvido de acordo com as seguintes etapas:

- Determinação das cargas nos dormentes mais carregados, calculadas a partir da carga/roda do truque considerado.
- Determinação das tensões dormente/lastro para cada tipo de bitola;
- Determinação das tensões na plataforma devidas ao dormentes central D1, e aos dormentes adjacentes (D2, D3, D4 e D5);
- Determinação das curvas de distribuição das tensões na plataforma;
- Lançamento das curvas de distribuição das tensões na plataforma no programa Geoslope;
- Pesquisa dos círculos de ruptura para as variáveis consideradas;
- Análise dos resultados obtidos.

3.5. Distribuição das cargas nos dormentes mais carregados

A determinação do dormente mais carregado foi efetuada a partir das equações de Zimmermann, determinando-se inicialmente o comprimento elástico L (equação 2.7), o qual variou em função de c (coeficiente de Winkler) e I (momento de inércia do trilho). Para o caso da bitola larga, o valor de b foi de 45,4 cm, calculado a partir da área de apoio sobre os dormentes (devido à socaria), de 2724 cm² (extensão da socaria=113,50 cm para a bitola larga, multiplicado pela largura do dormentes=0,24 m) dividido pelo espaçamento entre dormentes (adotado como sendo de 0,60 m). Os valores obtidos para o comprimento elástico estão reunidos na tabela 3.1, onde “ c ” é o coeficiente de Winkler onde, para o qual foram adotados valores de 0,02 a 0,14 N/mm³, e L o comprimento elástico, calculado pra três situações: trilho TR-57 sem desgaste do boleto, trilho TR-57 com desgaste de 25 % e trilho TR-50 com desgaste do boleto de 25 %..

Tabela 3.1: Valores do comprimento elástico (L), para os três casos avaliados de trilhos e desgaste de boleto, para a bitola larga.

c (N/mm ³)	VALORES DO COMPRIMENTO ELÁSTICO - L (cm)		
	TR-57 desg. 0%	TR-57 desg. 25%	TR-50 desg. 25%
0,02	126,07	120,19	111,91
0,04	10,6,01	101,07	94,10
0,06	95,79	91,33	85,03
0,08	89,14	84,99	79,13
0,10	84,31	80,38	74,84
0,12	80,55	76,80	71,50
0,14	77,51	73,89	68,80

Nesta tabela verificam-se valores decrescentes do comprimento elástico com o aumento do coeficiente de Winkler (c) e ao mesmo tempo valores decrescentes de L com o tipo de trilho e desgaste do boleto, para um mesmo valor de “ c ”. A situação onde ocorre o menor valor de L é para $c=0,14$ N/mm³ e trilho TR-50 com desgaste do boleto de 25 %. O cálculo da distribuição das cargas sobre os dormentes, devidas a cada uma das 2 rodas de um mesmo truque considerado, foi feito através das equações 2.8 a 2.11. O resultado obtido é a somatória dos efeitos de cada uma das duas rodas sobre cada dormente, tendo sido selecionados os 5 dormentes mais carregados para efeito de determinação das tensões na interface dormente-lastro. Este cálculo foi feito considerando-se a área de apoio do dormente sobre o lastro, que é a área do trecho do dormente que se estende no trecho de socaria (2724 cm²). A título de exemplo, são apresentadas na tabela 3.2, as cargas calculadas para o

caso de trilho TR-57 com desgaste do boleto de 0 %, carga por roda de 15 T (147 kN) e coeficiente de lastro $c=0,14 \text{ N/mm}^3$. O dormente D1 refere-se ao dormente situado ao centro do truque, e os dormentes D2 e D3, são os dormentes adjacentes ao dormente D1. Os dormentes D4 e D5, são os dormentes mais distantes de D1.

Tabela 3.2: Cargas dos 5 dormentes mais carregados, calculados para trilho TR-57 com desgaste de boleto de 0 %, carga por roda de 15 T (147 kN), e coeficiente de Winkler $c=0,14 \text{ N/mm}^3$.

Dormente mais carregado	Carga no dormente (T)	Carga no dormente (kN)
D4	5,12	50,2
D2	5,70	55,9
D1	5,03	49,3
D3	5,87	57,5
D5	4,63	45,4

A determinação das cargas nos 5 dormentes mais carregados, foi feita variando-se o valor de c , e da carga/roda. Este mesmo procedimento foi utilizado para determinar as cargas para as bitolas métrica e mista. Estes resultados, obtidos para as três bitolas consideradas, estão reunidos na tabela A.1 do Anexo A. O gráfico da figura 3.3, permite a visualização da variação das cargas no dormente central com o aumento da carga/roda. No eixo vertical estão os valores da carga no dormente central (D1) e no eixo das abscissas, os valores da carga/roda, para um mesmo valor de $c=0,14 \text{ N/mm}^3$ para as bitolas larga, métrica e mista.

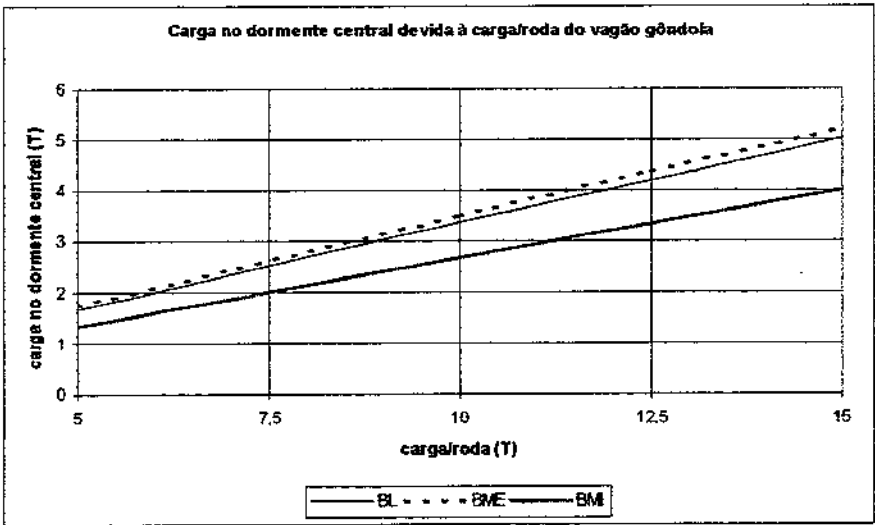


Figura 3.3 -Valores da carga no dormente central (D1), em função da carga/roda para as bitolas larga (BL), métrica (BME) e mista (BMI).

Comparando-se as duas curvas obtidas verifica-se que ocorreu um desvio médio de até 3,9 % nos valores da carga no dormente central, em relação às bitolas larga e métrica, enquanto que entre as bitolas larga e mista o desvio médio foi de 20,2 %.

Por outro lado, a figura 3.4 ilustra a evolução do somatório das 5 cargas dos dormentes mais carregados, com o aumento do coeficiente de Winkler (em N/mm^3). Neste gráfico, o eixo das abscissas representa a carga/roda do vagão gôndola em análise, e no eixo das ordenadas, está representado o somatório destas 5 cargas. As curvas ali representadas são relativas a cada coeficiente de Winkler utilizado no estudo.

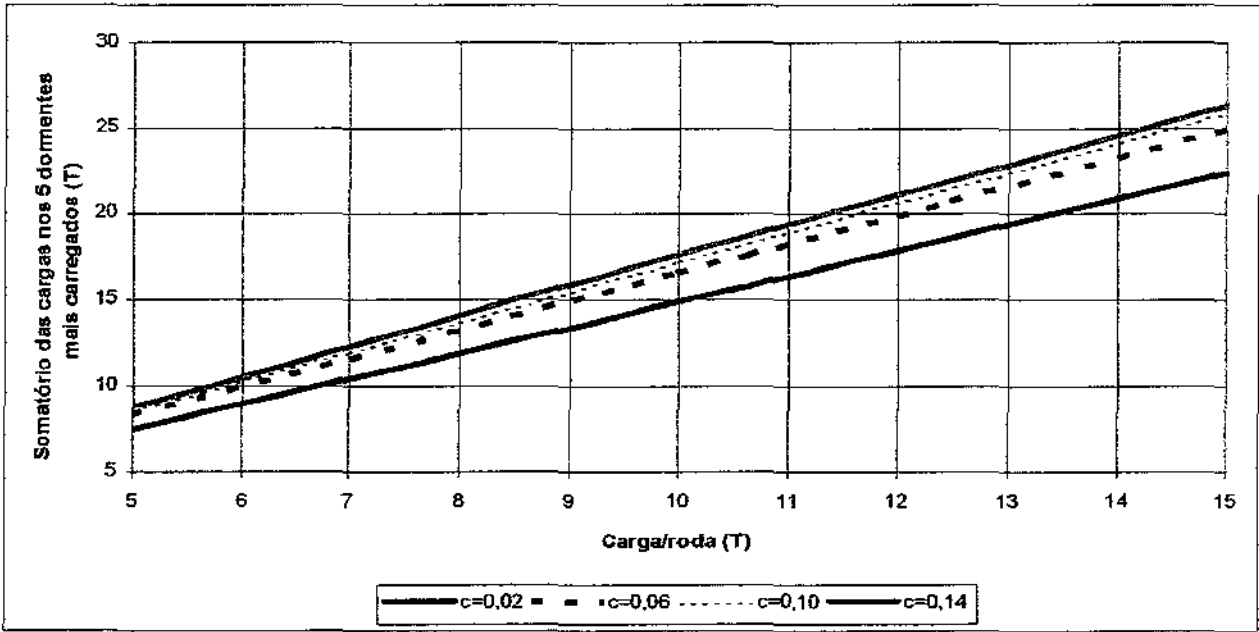


Figura 3.4 –Valores do somatório das 5 cargas dos dormentes mais carregados, para cada coeficiente de Winkler adotado, referentes à bitola larga.

Verifica-se nesta figura, como já era esperado, que o valor do somatório das 5 cargas dos dormentes mais carregados, aumenta proporcionalmente com a variação do coeficiente de Winkler. Portanto, para valores menores de “c”, os esforços mais críticos são transmitidos aos trilhos e fixações e menos ao solo que, nesta condição é ainda muito mais deformável que o conjunto da grade (trilhos, dormentes e fixações).

Para se avaliar uma condição crítica, a rigor deveria ser considerada a camada CSP com menor resistência, o que resultaria em menores cargas transmitidas à plataforma. Para fins deste

estudo, considerou-se como critério, que a situação crítica ocorreria para um solo de baixa capacidade de suporte e ao mesmo tempo em que apresentasse um alto valor do coeficiente de Winkler ($c=0,14 \text{ N/mm}^3$), de maneira a se obter o maior carregamento possível atuante na plataforma.

3.6. Distribuição das tensões na plataforma

Determinadas as cargas nos 5 dormentes mais carregados e definida a condição crítica a ser adotada ($c=0,14 \text{ N/mm}^3$; e carga/roda=15 T=147 kN), foram calculadas as tensões dormente lastro para cada dormente, a partir da distância da socaria adotada para cada bitola. A tabela 3.3 reúne as tensões dormente-lastro determinadas a partir da condição crítica acima. Na última coluna são apresentadas as tensões médias entre os dormentes D2 e D3, e D4 e D5. Para a bitola mista, são apresentados os valores correspondentes aos dois trechos sujeitos à socaria, denominados de SK1 e SK2.

Tabela 3.3: Valores da tensão dormente-lastro, determinados a partir das cargas dos 5 dormentes mais carregados, para o trilho TR-57 sem desgaste do boleto.

Bitola	Dormente	Tensão dormente-lastro (kg/cm ²)		Tensão média dormente-lastro (kg/cm ²)	
Larga	D4	1,88		1,79	
	D2	2,09		2,12	
	D1	1,85		1,85	
	D3	2,15		2,12	
	D5	1,70		1,79	
Métrica	D4	2,85		2,73	
	D2	3,30		3,32	
	D1	3,12		3,12	
	D3	3,34		3,32	
	D5	2,61		2,73	
		SK1	SK2	SK1	SK2
Mista	D4	3,20	1,83	2,93	1,68
	D2	3,03	1,73	3,23	1,85
	D1	2,09	1,19	2,09	1,19
	D3	3,43	1,96	3,23	1,85
	D5	2,66	1,52	2,93	1,68

Para efeito de determinação das tensões na plataforma, utilizou-se os valores da última coluna, para fins de simplificação do cálculo. O mesmo procedimento foi adotado para a

determinação das tensões dormente-lastro para os casos de trilho TR-57 com desgaste de 25 % do boleto, e TR-50, com desgaste de 25 % do boleto. De posse destas tensões foram determinadas as tensões na plataforma, a partir das equações 2.1 e 2.2 de Carothers-Terzaghi, calculando-se inicialmente as tensões devidas ao dormente central (D1), e sendo adicionadas a seguir as tensões devidas aos dormentes D2, D3, D4 e D5 adjacentes.

As equações de Carothers-Terzaghi têm como finalidade calcular a tensão devida a um dormente em um ponto do eixo longitudinal da via distante x deste dormente. A equação 2.1 calcula as tensões sob o dormente central, sendo uma tensão constante ao longo de toda a largura do dormente. A equação 2.2 calcula as tensões na plataforma ao longo do eixo longitudinal exceto sob o dormente central, sendo que os valores das tensões são decrescentes a partir de um valor máximo que é representativo da tensão sob o dormente central, e diminuindo proporcionalmente em função da distância do ponto considerado até o dormente central.

Tem-se, portanto uma curva composta por um trecho crescente (ou decrescente) e um trecho central (sob o dormente) em que o valor da tensão é máximo e constante. Quanto maior a largura do dormente, maior é a região de tensão constante sob o dormente. O procedimento adotado neste trabalho foi o de calcular as tensões devidas ao dormente central em pontos do eixo transversal, ao invés do cálculo usual no eixo longitudinal.

Assim a largura do dormente (b) seria equivalente neste caso à extensão da socaria e o cálculo resultaria em uma tensão constante muito extensa (todo o trecho de socaria) não representativa da realidade. Para que o resultado estivesse mais próximo das tensões reais no campo, procurou-se realizar o cálculo para uma parte “largura de dormente” (neste caso uma parte do trecho de socaria) a menor possível para que não houvesse uma região de patamar (tensão constante sob o dormente) muito grande.

Para melhor reproduzir as tensões atuantes na plataforma devidas ao dormente, o mesmo foi dividido em 20 partes iguais, tendo sido considerada a tensão dormente-lastro aplicada na área da socaria. Para ilustrar a figura 3.5 mostra uma secção transversal do dormente D1, dividido em 20 partes iguais. A área hachurada representa a extensão da socaria.

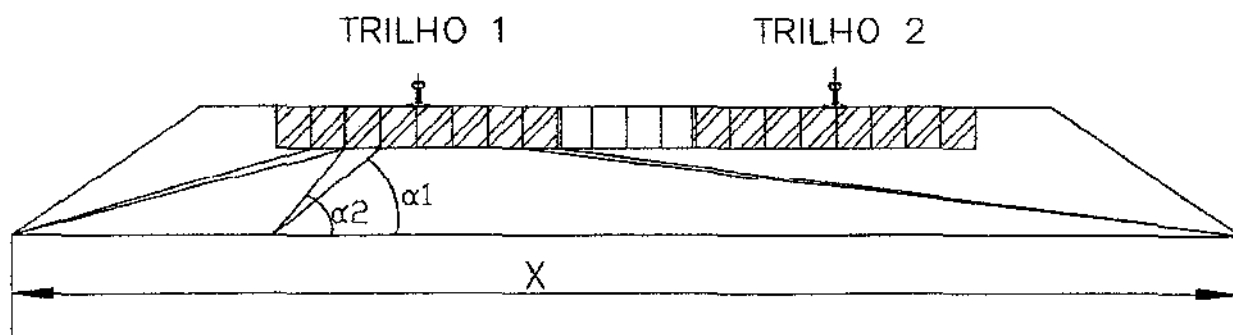


Figura 3.5: Dormente central (D1), dividido em 20 elementos. A área hachurada representa o trecho sujeito a socaria. X é a distância entre as saias do lastro.

Para cada elemento ou 1/20 do dormente D1, dentro da área carregada, determinou-se a tensão correspondente em toda a base da plataforma em que o lastro encontra-se apoiado. O resultado final, de todos os elementos carregados, do trilho 1 e do trilho 2, é o somatório das tensões devidas a cada elemento, obtendo-se então a tensão na plataforma devida ao dormente D1.

Para a determinação das tensões devidas aos dormentes D2 e D3, o procedimento foi idêntico, tendo sido divididos todos os dormentes em 20 partes iguais e para cada parte ou elemento, foi determinada a tensão na plataforma ao longo do eixo do dormente D1, correspondente a este elemento, para os trechos de socaria dos trilhos 1 e 2. O resultado obtido é o somatório das tensões de todos os elementos carregados, ao longo do eixo do dormente D1. A figura 3.6, ilustra os elementos dos dormentes adjacentes e a sua influência ao longo do eixo D1.

O cálculo foi realizado para as cargas das rodas dos dois trilhos (trilho 1 e trilho 2). A curva final das deformações obtida é a soma das tensões devidas a todos os 5 dormentes, aplicadas a cada ponto do eixo central do dormente D1. Este procedimento foi utilizado para todas as 3 bitolas consideradas, e cujos resultados e comentários são feitos a seguir para cada bitola.

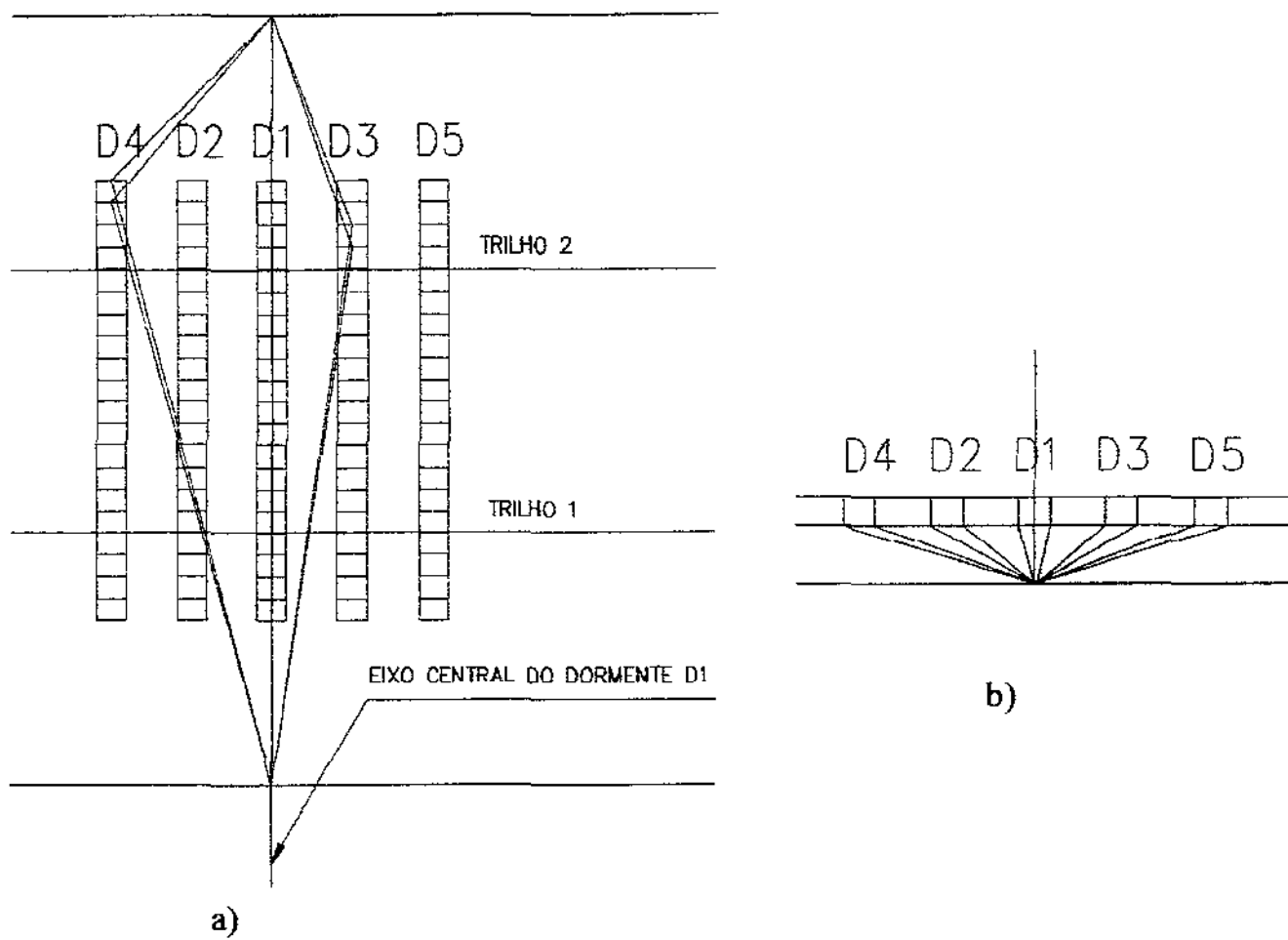


Figura 3.6: Tensões devidas às carga da roda atuantes no trilho 1, distribuídas para os dormentes D2, D3, D4 e D5, medidas ao longo do eixo do dormente central D1; a) vista superior; b) secção longitudinal à via.

3.6.1. Bitola Larga

A tabela 3.4 apresenta o conjunto de valores das cargas nos 5 dormentes mais carregados e respectiva tensão média dormente-lastro utilizada para determinação das tensões na plataforma, por tipo de trilho e porcentagem de desgaste do boleto.

A partir das tensões dormente/lastro desta tabela, foram determinadas as tensões atuantes na plataforma, devidas ao efeito dos 5 dormentes mais carregados.

Tabela 3.4 - Carga atuante no dormente e tensão dormente/lastro, calculadas em função do tipo de trilho e do desgaste do boleto, para a bitola larga.

Tipo de trilho	Desgaste no boleto (%)	Numero do dormente	Carga atuante no dormente (T)	Tensão média dormente/lastro (kPa)
TR-57	0	D4	5,12	1,79
		D2	5,70	2,12
		D1	5,03	1,85
		D3	5,87	2,12
		D5	4,63	1,79
TR-57	25	D4	5,27	1,84
		D2	5,75	2,15
		D1	4,89	1,79
		D3	5,97	2,15
		D5	4,73	1,84
TR-50	25	D4	5,52	1,92
		D2	5,82	2,20
		D1	4,61	1,69
		D3	6,15	2,20
		D5	4,91	1,92

A tabela 3.5, apresenta as tensões atuantes na plataforma em função da altura do lastro, como segue: T_{max} representa a máxima tensão calculada, considerando-se o somatório de todos os 5 dormentes; $T_{média}$, é a tensão média ao longo do eixo do dormente D1; T_{D1} , é a tensão devida ao dormente D1, T_{D2} , é a tensão devida ao dormente D2, T_{D4} , a tensão devida ao dormente D4 e T_{CP} , é a tensão de compressão na plataforma, determinada a partir das equações 2.1 e 2.2, para os 5 dormentes mais carregados, e no eixo do trilho. Trata-se portanto de uma tensão em que não é considerada a influência dos demais pontos dos dormentes neste ponto em particular.

Tabela 3.5: Tensões atuantes na plataforma para a bitola larga, trilho TR-57 e desgaste 0%.

Espessura (h) da camada de lastro (cm)	T_{max} (kPa)	$T_{média}$ (kPa)	T_{D1} (kPa)	T_{D2} (kPa)	T_{D4} (kPa)	T_{CP} (kPa)
15	197,56	87,15	84,53	2,34	0,24	137
20	194,82	89,40	83,68	5,15	0,55	116
25	197,29	93,66	83,42	9,18	1,05	101
30	202,78	99,44	83,36	14,31	1,76	91
35	209,99	106,37	83,38	20,29	2,70	85
50	235,02	130,88	83,32	40,61	6,95	78
70	264,99	164,08	82,74	65,97	15,38	75
90	287,43	191,87	81,61	84,78	25,49	72
110	303,44	212,95	80,07	97,24	35,67	69
130	316,05	227,95	78,23	104,90	44,85	65
150	326,44	237,91	76,21	109,21	52,53	61
170	331,95	243,90	74,08	111,23	58,64	57
190	333,83	246,82	71,90	111,70	63,28	53

Os resultados obtidos para a bitola larga, trilho TR-57 com desgaste de boleto 25 % e trilho TR-50 com desgaste de boleto 25 %, estão no anexo A, tabela A2. A figura 3.7 mostra a variação das tensões calculadas, em função de h (espessura da camada de lastro).

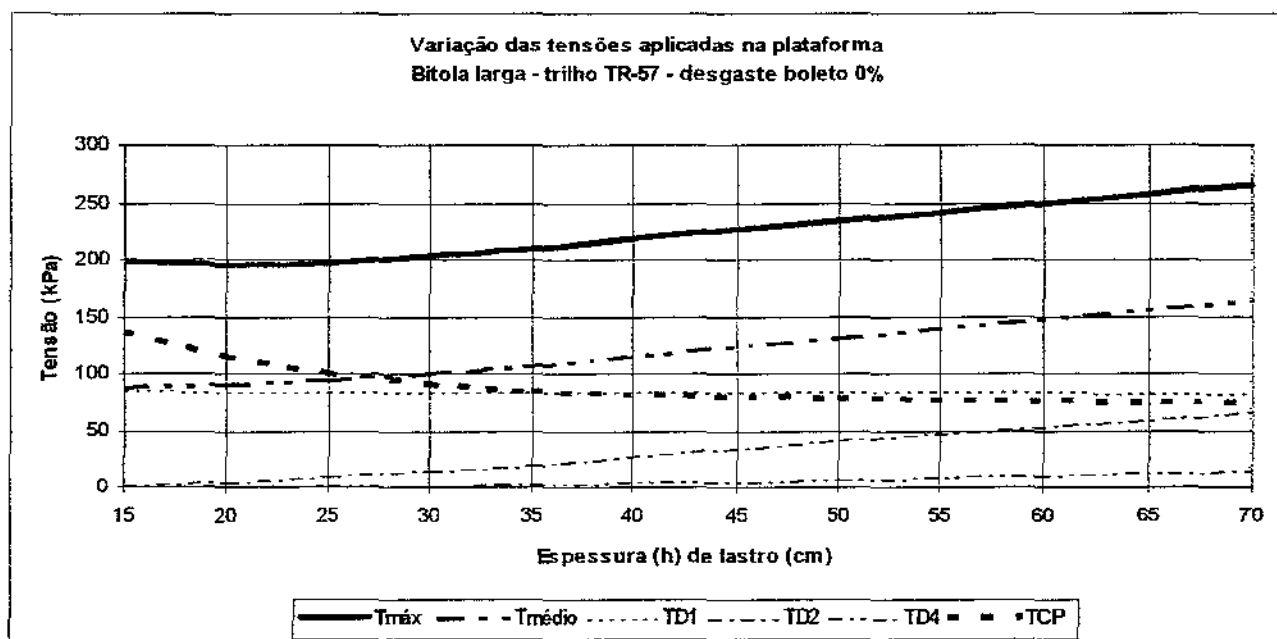


Figura 3.7: Valor das tensões aplicadas na plataforma, em função da espessura de lastro

Observa-se que o valor das tensões máximas ($T_{máx}$) e média ($T_{médio}$) são crescente com o aumento da camada de lastro para valores superiores a 70 cm. Na realidade, o valor destas tensões é decrescente com o aumento da espessura de lastro, pois caso contrário, não haveria sentido utilizar-se de maiores espessuras de lastro para se atenuar as tensões da plataforma.

Togno (39) afirma que este intervalo de validade para a carga suportada por 5 dormentes deve seguir a seguinte relação:

- Dormente D1: 0,40
- Dormentes D2 e D3: 0,20 (para cada dormente)
- Dormentes D4 e D5: 0,10 (para cada dormente)

Para melhor visualizar este intervalo de validade, foi efetuado cálculo considerando-se uma carga unitária, aplicando uma tensão máxima na plataforma equivalente a $T_{máx}$, obtido para o truque

escolhido, nas mesmas condições acima. As tensões na plataforma devidas aos dormentes D1, D2, e D4, estão relacionadas na tabela 3.6, onde é apresentada a proporção correspondente.

Tabela 3.6: Tensões nos dormentes D1, D2 e D4, calculados a partir de uma carga unitária, com tensão máxima na plataforma equivalente ao mesmo valor de T_{max} , da tabela 3.5.

Espessura (h) da camada de lastro (cm)	T_{max} (kPa)	T_{D1} (kPa)	T_{D1} %	T_{D2} (kPa)	T_{D2} %	T_{D4} (kPa)	T_{D4} %
15	197	85,4	97	1,4	2	0,1	0
25	197	87,0	88	5,5	6	0,3	0
35	210	91,0	77	12,6	11	0,7	1
50	235	98,6	63	27,4	17	1,9	1
70	265	107,3	50	48,6	23	4,5	2
90	287	113,6	43	67,2	25	8,0	3
110	303	117,3	39	81,2	27	11,8	4
130	316	119,7	36	91,6	27	15,6	5
150	326	120,3	34	98,4	28	18,9	5
170	331	119,3	33	102,3	28	21,4	6
190	333	118,9	32	104,9	28	23,5	6

Observa-se que a relação de proporção entre dormentes, proposta por Togno, não ocorre para uma determinada espessura em particular; no dormente D1, ocorre para a espessura próxima de 110 cm; no dormente D2, ocorre entre 50 e 70 cm de espessura; e no dormente D4, poderá ocorrer somente para espessuras superiores a 190 cm.

Entretanto, dentro do intervalo utilizado por este estudo, onde a altura da camada de lastro situa-se entre 15 e 35 cm, pode-se considerar que a relação proposta por Togno é satisfeita, e portanto válidas as fórmulas utilizadas.

As curvas de distribuição das tensões na plataforma para as alturas de lastro de 15 e 35 cm, para o trilho TR-57 sem desgaste de boleto, são mostradas na figura 3.8. No eixo das abscissas, está indicada a distância ao longo da transversal à via e longitudinal ao dormente D1, desde uma saia do lastro até a saia extrema do lastro, denominada de distância X, indicada na figura 3.5.

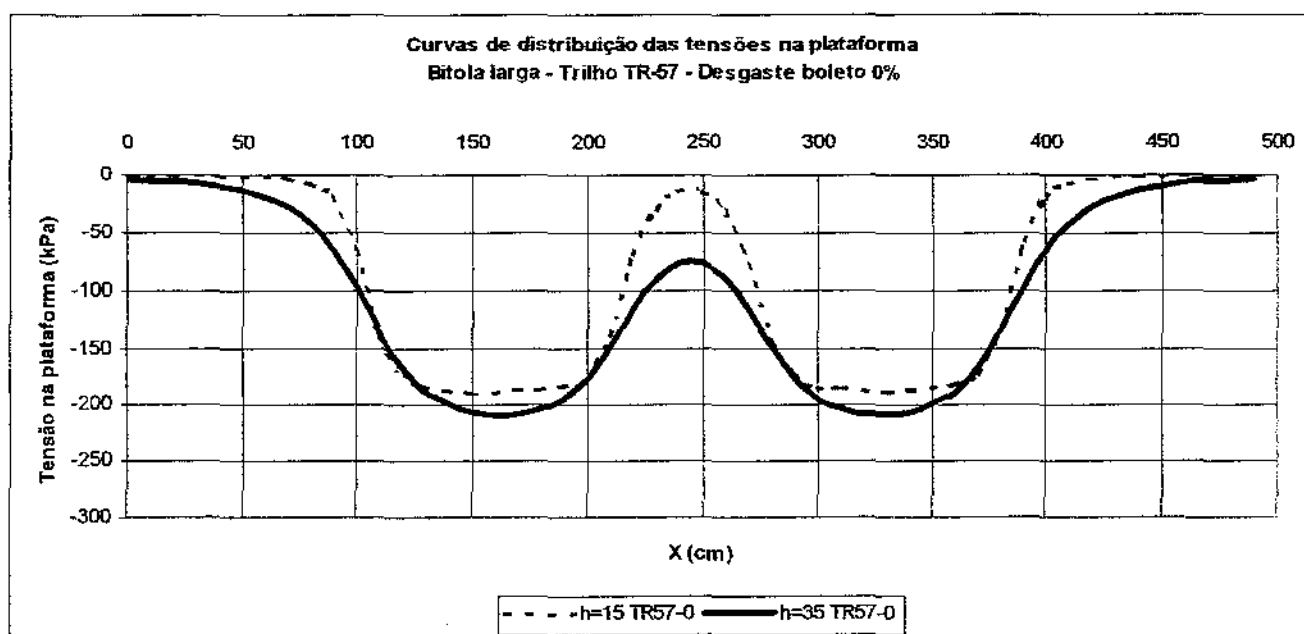


Figura 3.8: Curvas de distribuição das tensões na plataforma para a bitola larga e para as espessuras da camada de lastro de 15 e 35 cm.

Observa-se nesta figura, que para a espessura de lastro de 15 cm a curva é mais achatada, e as tensões na parte central da via, entre os dois trilhos são menores que aquelas obtidas para a curva da espessura 35 cm. Isto ocorre porque é pequena a distância vertical entre os dormentes e a plataforma, sendo praticamente toda a tensão distribuída ao longo do trecho da socaria.

Através do mesmo procedimento acima apresentado foram determinadas as curvas de distribuição para os casos de trilho TR-57 com desgaste do boleto de 25% e trilho TR-50 com desgaste do boleto de 25 %.

As curvas de distribuição das tensões na plataforma, utilizadas para a avaliação da ruptura estão resumidas na tabela 3.7, onde as mesmas estão na forma de porcentagem do valor em cada ponto do eixo transversal à plataforma, sob o dormente central D1, para permitir o lançamento dos dados no programa Geoslope.

Observa-se que, para uma mesma distância “X”, os valores dos pontos obtidos para h=15 cm, para os tipos de trilhos e desgastes avaliados, os desvios são muito pequenos, o que

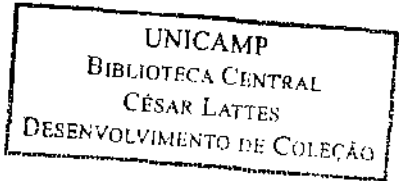
permitiu a adoção de uma única curva para a determinação dos fatores de segurança e dos respectivos círculos de ruptura.

Tabela 3.7: Pontos das curvas de distribuição de tensões (em %) ao longo do eixo transversal da via.

X (cm)	TR-57 Desgaste 0% h=15 cm	TR-57 Desgaste 0% h=35 cm	TR-57 Desgaste 25% h=15 cm	TR-50 Desgaste 25% h=15 cm
10	0,2	2,1	0,2	0,2
30	0,4	3,4	0,4	0,4
50	0,7	6,3	0,7	0,8
70	2,0	13,2	2,0	2,1
90	11,2	31,0	11,2	11,3
110	73,1	64,4	73,1	73,1
130	97,5	89,5	97,5	97,5
150	100,0	97,8	100,0	100,0
170	100,0	98,7	100,0	100,0
190	97,5	92,5	97,5	97,5
210	73,6	71,1	73,6	73,6
230	15,4	43,1	15,5	15,6
250	7,9	36,2	8,0	8,1
270	41,0	55,8	41,0	41,1
290	92,0	84,4	92,0	92,0
310	99,4	96,3	99,4	99,4
330	100,0	98,5	100,0	100,0
350	99,4	94,5	99,4	99,4
370	90,6	79,8	90,6	90,6
390	30,6	46,6	30,6	30,7
410	3,9	20,1	3,9	4,0
430	1,1	9,0	1,1	1,2
450	0,5	4,6	0,5	0,5
470	0,3	2,6	0,3	0,3
490	0,2	1,7	0,2	0,2

Este levantamento das curvas de distribuição, conforme já apresentado no item 3.3, é válido para o espaçamento entre dormentes fixado em 60 cm.

Entretanto, a fim de complementar este estudo, foi realizada uma verificação considerando os espaçamentos entre dormentes de 55 cm e 65 cm, para que os resultados obtidos por este estudo permitam a extrapolação de dados para estas duas condições. O resultado deste complemento é descrito a seguir. A variação das tensões T_{max} (tensão máxima atuante na plataforma) é apresentada nas tabelas 3.8 e 3.9, respectivamente para os espaçamentos entre dormentes 55 e 65 cm. Nestas



tabelas, o valor das tensões é referente aos casos de trilho TR-57 com desgaste de boleto de 0 % e 25 %, e trilho TR-50 com desgaste de boleto de 25 %.

Tabela 3.8: Valores das tensões máximas atuantes na plataforma, para espaçamento entre dormentes de 55 cm, por tipo de trilho e desgaste do boleto.

h (cm)	T _{max} (kPa) (TR-57 Desgaste boleto 0%)	T _{max} (kPa) (TR-57 Desgaste boleto 25%)	T _{max} (kPa) (TR-50 Desgaste boleto 25%)
15	202,70	199,63	191,39
20	199,66	196,78	189,04
25	201,87	199,18	191,85
30	207,08	204,59	197,69
35	214,00	211,72	205,28
50	238,04	236,47	231,56
70	266,65	266,04	263,16

Comparando-se os valores desta tabela, com a tabela 3.5, observa-se que para uma diminuição do espaçamento entre dormentes de 60 para 55 cm, ocorre um aumento de 1,9 % nas tensões para o trilho TR-57 sem desgaste de boleto, para h=0,35 m.

Tabela 3.9: Valores das tensões máximas atuantes na plataforma, para espaçamento entre dormentes de 65 cm, por tipo de trilho e desgaste do boleto.

h (cm)	T _{max} (kPa) (TR-57 Desgaste boleto 0%)	T _{max} (kPa) (TR-57 Desgaste boleto 25%)	T _{max} (kPa) (TR-50 Desgaste boleto 25%)
15	189,28	183,09	170,68
20	186,97	181,13	169,40
25	189,80	184,25	173,05
30	195,62	190,37	179,70
35	203,20	198,26	188,15
50	229,40	225,52	217,26
70	260,97	258,54	252,78

Comparando-se agora, os valores desta tabela, com a tabela 3.5, verifica-se uma redução de 3,2 % nas tensões para a situação de trilho TR-57 sem desgaste de boleto, e h=0,35 m. Resumindo, verifica-se uma redução de 3,2 % nas tensões aplicadas na plataforma quando o espaçamento entre dormentes aumenta em 5 cm, passando de 60 cm para 65 cm, e um aumento de 1,9 % nas tensões aplicadas na plataforma, com uma redução de 5 cm no espaçamento entre dormentes, passando de 60 cm para 55 cm.

3.6.2 Bitola métrica

Da mesma forma que para a bitola larga, foram determinadas as tensões médias dormente/lastro, tensões máximas atuantes na plataforma, para a bitola métrica. Os resultados estão apresentados nas tabelas A.3 a A.5, do anexo A. As curvas de distribuição das tensões sobre a plataforma, para a bitola métrica são apresentadas na figura 3.9.

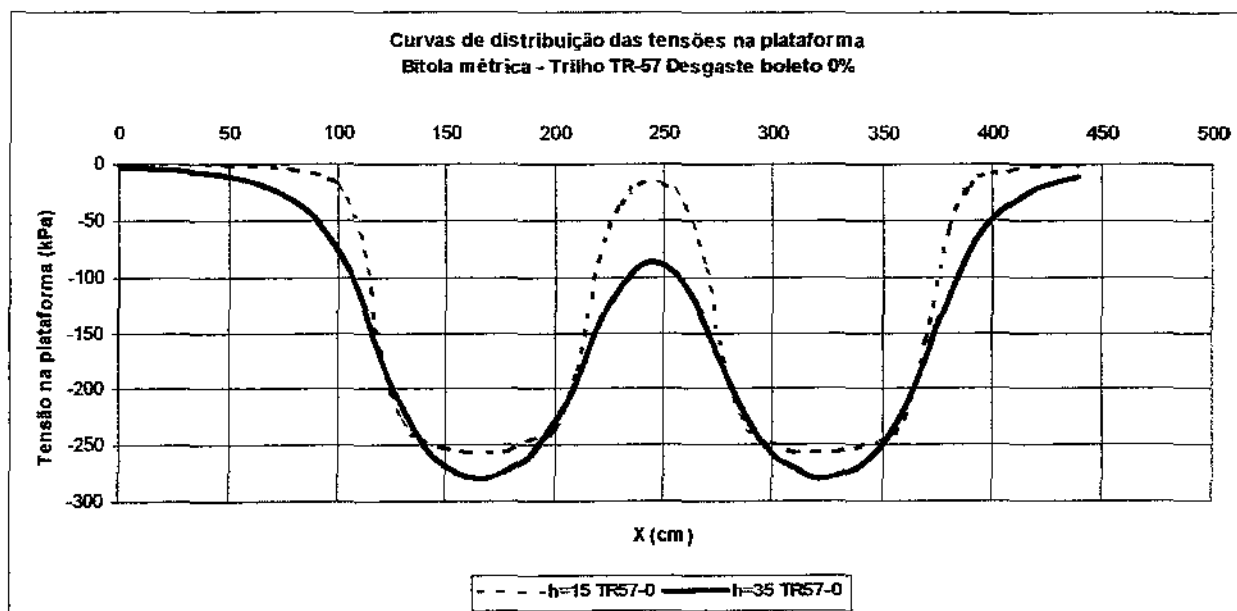


Figura 3.9: Curvas de distribuição das tensões na plataforma para a bitola métrica e para espessuras da camada de lastro de 15 e 35 cm.

O formato da curva segue o mesmo padrão da curva da bitola larga, apresentada na figura 3.8. As tensões calculadas para a bitola métrica são 33 % superiores às obtidas para a bitola larga (Trilho TR-57 sem desgaste de boleto e espessura de lastro de 35 cm). As curvas de distribuição utilizadas no programa Geoslope, estão apresentadas na tabela A.5 do anexo A.

3.6.3 Bitola mista

Para a bitola mista, determinaram-se igualmente as tensões médias dormente/lastro e tensões máximas atuantes na plataforma. A figura 3.10 mostra a secção transversal da via mista, com as duas regiões de socaria SK1 e SK2.

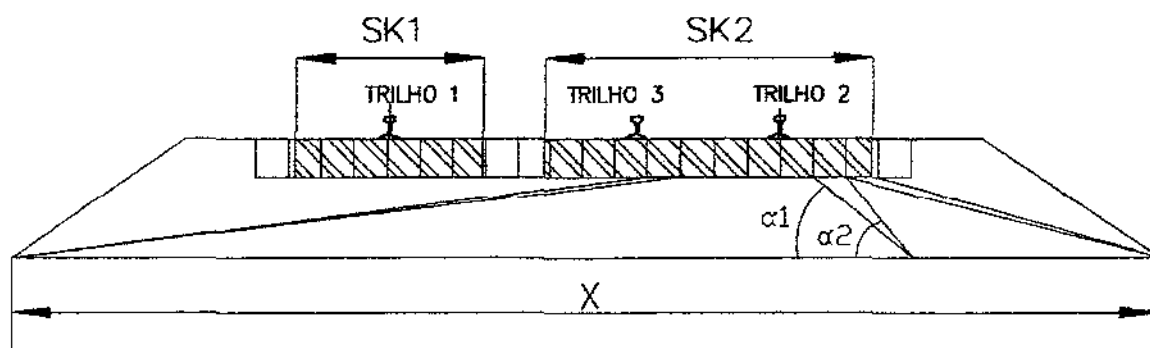


Figura 3.10: Seção transversal de via com bitola mista e identificação das regiões da socaria adotada (SK1=0,80 m; SK2=1,40 m).

O cálculo das tensões foi efetuado considerando as duas regiões de socaria aplicando tensões no lastro. Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas A.6 a A.8, do anexo A. As curvas de distribuição das tensões para a bitola mista estão apresentadas na figura 3.11.

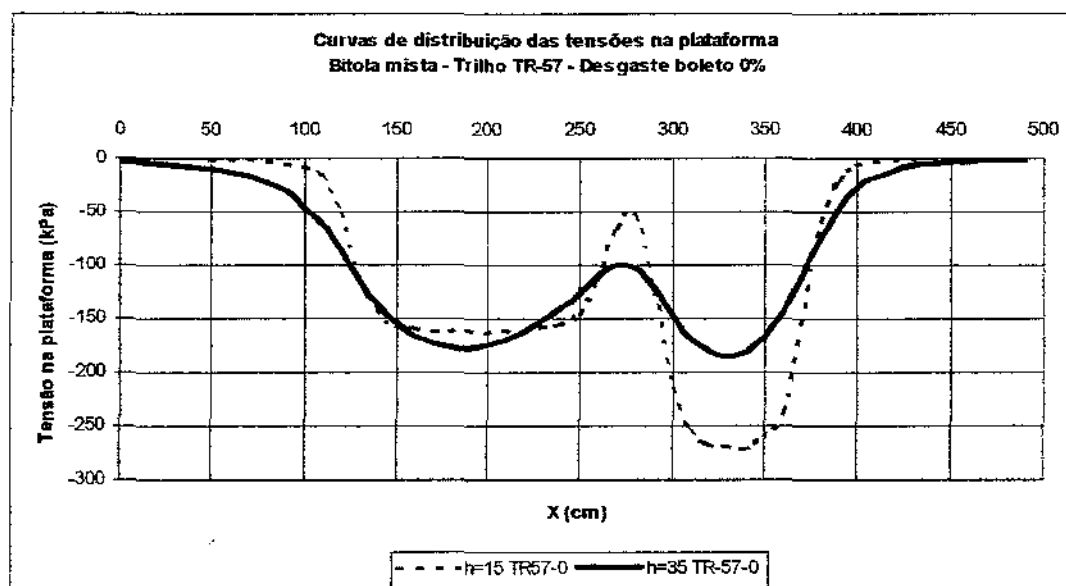


Figura 3.11: Curvas de distribuição das tensões na plataforma para a bitola mista e para espessuras da camada de lastro de 15 e 35 cm.

O formato da curva segue padrão distinto das bitolas métrica e larga, devido à diferença das extensões dos trechos de socaria, o que provoca alívio na região mais extensa e concentração de cargas na região menos extensa. Comparativamente com a bitola larga, e trilho TR-57 sem desgaste de boleto, as tensões na bitola mista, provocam um alívio de 11,7 % nas tensões aplicadas na

plataforma. As curvas de distribuição utilizadas no programa Geoslope, estão apresentadas na tabela A.8 do anexo A.

O gráfico da figura 3.12 permite a comparação entre as tensões atuantes na plataforma para cada bitola considerada, e para as espessuras de lastro de 15 e 35 cm, com trilho TR-57 e desgaste nulo do boleto.

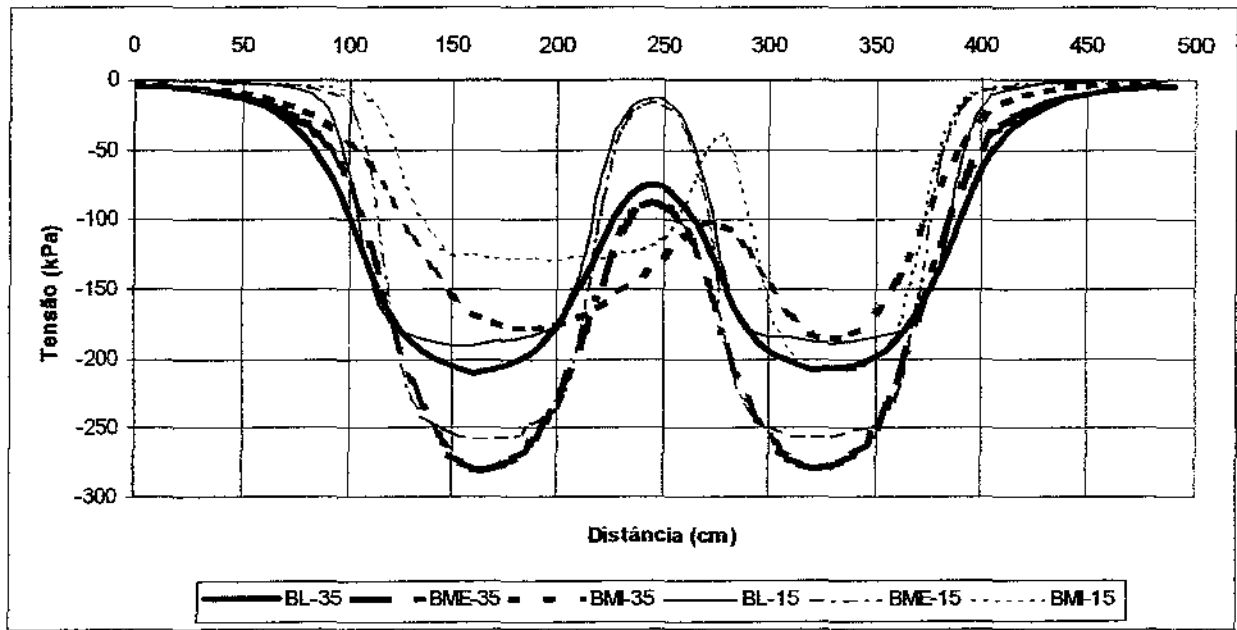


Figura 3.12 : Gráfico comparativo das tensões atuantes na plataforma por tipo de bitola e espessura de lastro.

Observa-se neste gráfico que a envoltória das curvas está muito próxima da curva da bitola métrica, no caso da espessura de lastro de 35 cm, configurando a situação de carregamento mais crítico entre as bitolas analisadas.

3.7. O lançamento das variáveis no programa Geoslope

Determinadas as curvas de distribuição das tensões na plataforma e de posse das demais variáveis já relacionadas no item 3.3, foi feito o seu lançamento no programa Geoslope. A secção transversal típica, utilizada como base para a determinação dos fatores de segurança é apresentada na figura 3.13, onde são mostradas:

- Curva das tensões sobre a plataforma, devidas ao carregamento do vagão gôndola. Esta curva apresenta a forma rebatida das curvas apresentadas nas figuras 3.8, 3.9 e 3.11 e de acordo com a tabela 3.7 para a bitola larga e as tabelas A.5 e A.8 do anexo A, respectivamente para as bitolas métrica e mista, sendo que o seu valor máximo é unitário. Através de comando específico é feito o lançamento da tensão máxima para cada bitola.
- Dos 490 pontos determinados anteriormente para a curva de tensões, foram selecionados 23 pontos (seqüência de pontos de 10 a 33 mostradas na figura 3.13, estando cada ponto distanciado do seguinte de 0,20 m), para lançamento do seu valor nesta secção transversal.
- Segmentos AB, e CD que determinam os locais onde obrigatoriamente deve passar o círculo de ruptura, não se permitindo que o círculo passe no interior da grade (conjunto trilho-dormentes-fixações). O ponto B passa na extremidade interna da grade e o ponto D no pé do talude com altura H.
- A camada 1, refere-se à camada CSP, camada superficial da plataforma, cujos dados lançados no programa foram: espessura “e” desta camada; o peso específico do seu solo constituinte; angulo de atrito e coesão.
- A camada 2 refere-se ao solo da plataforma, cujos dados lançados no programa foram o seu peso específico, angulo de atrito e coesão.
- Dimensões físicas do talude, inclinação e altura do talude (H)
- A distância “d”, da saia do lastro à crista do talude, foi lançada no programa através do deslocamento do talude na horizontal.

O formato da camada de CSP (camada 1) foi avaliado previamente através das formas apresentadas na figura 3.14, assumindo inicialmente uma forma próxima àquela do campo (figura 3.14 a e b), onde o lançamento do lastro e seu agulhamento no solo poderiam provocar.

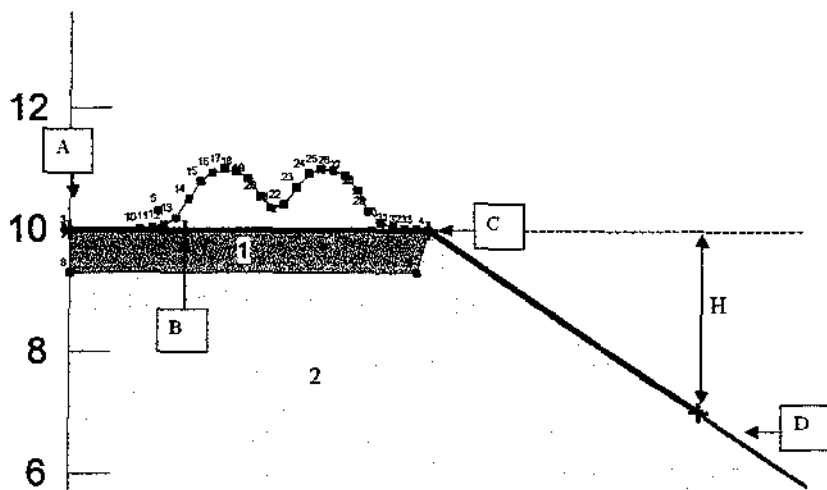


Figura 3.13: Seção transversal típica utilizada para a avaliação do círculo de ruptura.

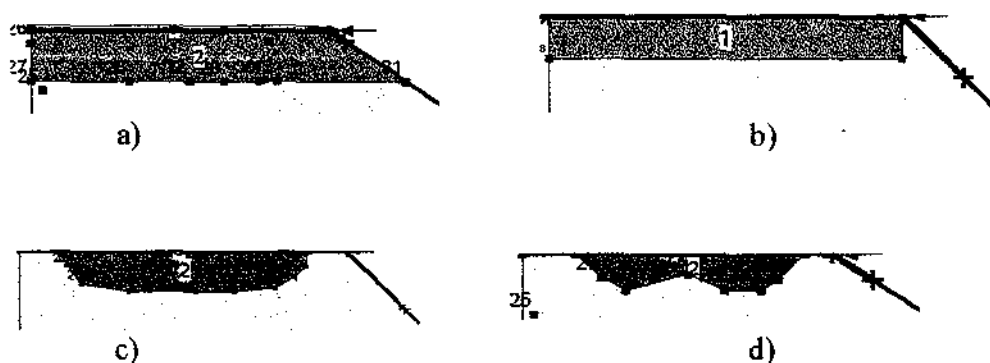


Figura 3.14: Formas da camada CSP avaliadas previamente.

Como os resultados obtidos para os fatores de segurança, para as formas a, b, c e d, da figura 3.14, foram idênticos, não tendo apresentado qualquer sensibilidade, foi definido, para efeito de simplificação, que esta camada tivesse o formato mais simples (o da figura 3.14 d). Os valores do coeficiente de segurança obtidos foram aqueles calculados através do método de Morgenstern e Price, que fornece coeficientes FS determinados a partir do equilíbrio dos momentos (FSm) e a partir do equilíbrio das forças horizontais (FSf). Finalmente, cabe ainda uma observação: a seção transversal da via não foi aplicada sobre a seção transversal mostrada na figura 3.13, devido ao fato que as tensões seriam aplicadas sobre a superestrutura da via, quando as mesmas estão efetivamente aplicadas na plataforma. Por um aspecto prático, o Geoslope somente permite a aplicação de tensões sobre a geometria desenhada, o que geraria uma incorreção no local da aplicação das tensões. Por outro lado, a não introdução da superestrutura da via não permitiu também a mensuração do seu peso próprio.

3.8. Apresentação dos resultados.

Foram realizados 2.285 experimentos, para determinação do fator de segurança a ruptura circular, sendo que deste total, 1760 experimentos foram realizados empregando-se as variáveis apresentadas na tabela 3.10. Na coluna da esquerda estão relacionadas as variáveis. Os experimentos estão separados em 3 colunas referentes a cada uma das bitolas. Os valores apresentados representam o número de vezes em que a variável foi alterada. Na última linha são apresentados o total dos experimentos por bitola e que consiste na multiplicação das linhas referentes à cada variável daquela coluna.

Tabela 3.10: Experimentos realizados por tipo de bitola

Variável	Número de valores considerados de cada variável		
	Bitola Larga	Bitola Mista	Bitola Métrica
Tensão na plataforma	7	7	8
Altura do Talude (H)	4	4	4
Distância da saia do lastro à crista do talude (d)	5	5	5
Inclinação do talude	4	4	4
Total dos experimentos por bitola	560	560	640

Nestes experimentos foram mantidos fixos:

- Espessura de lastro (h) = 35 cm (sendo 10 cm de lastro contaminado);
- Trilho: TR-57;
- Desgaste do boleto: 0 %;
- Solo da plataforma: peso específico: 18 kN/m^3 ; ângulo de atrito: 25° ; coesão: 10 kPa;
- Camada CSP: peso específico: 18 kN/m^3 ; ângulo de atrito: 15° ; coesão: 5 kPa;
- Espessura da camada CSP: 0,70 m.

Para avaliação da sensibilidade do solo da plataforma e da camada CSP, foram realizados 288 experimentos, conforme mostrado na tabela 3.11, onde o número de vezes assumido por cada uma das variáveis é apresentado separadamente por camada de solo.

Tabela 3.11: Experimentos realizados por camada de solo

Variável	Número de valores considerados de cada variável	
	Solo da plataforma	Camada CSP
Altura do Talude (H)	2	2
Peso específico	3	3
Coesão	5	3
Ângulo de atrito	6	6
Total dos experimentos por tipo de solo	180	108

Nestes experimentos foram mantidos fixos:

- Bitola: larga
- Inclinação do talude: 1,5:1
- Distância (d) entre a saia do lastro e a crista do talude: 0
- Espessura da camada CSP: 0,70 m;
- Para o solo da plataforma, mantiveram-se fixos: peso específico: 18 kN/m³; ângulo de atrito: 15°; coesão: 5 kPa;
- Para a camada CSP, mantiveram-se fixos: peso específico: 18 kN/m³; ângulo de atrito: 25°; coesão: 10 kPa
- Tensão na plataforma: 210 kPa.

Na avaliação da sensibilidade da espessura da camada CSP, 56 experimentos foram realizados, sendo as variáveis consideradas: altura do talude (H); tensão na plataforma, espessura da camada CSP e o número de vezes assumido em cada uma delas foi de: 2 (altura do talude); 7 (tensão na plataforma); 4 (espessura da camada CSP). Nestes experimentos foram mantidos fixos: o tipo de bitola (larga); o trilho (TR-57); o desgaste do boleto (0%); a espessura da camada de lastro (35 cm); a distância entre a saia do lastro e a crista do talude (d=0,0) e a inclinação do talude (1,5:1).

Para avaliação da condição do trilho e respectivo desgaste do boleto, foram realizados 88 experimentos, cujo número de valores assumidos por cada uma das variáveis é apresentado na tabela 3.12. Nestes experimentos, as variáveis foram avaliadas para a condição mais crítica de desgaste do boleto e tipo de trilho, considerado-se ainda a situação onde a espessura da camada de lastro representava o menor valor considerado neste estudo.

Tabela 3.12: Experimentos realizados por tipo de bitola, para avaliação da sensibilidade do trilho e desgaste do boleto.

Variável	Número de valores considerados de cada variável		
	Bitola Larga	Bitola Mista	Bitola Métrica
Altura do Talude (H)	2	2	2
Distância da saia do lastro à crista do talude (d)	2	1	1
Tensão na plataforma	7	7	8
Inclinação do talude	1	2	2
Total dos experimentos por bitola	28	28	32

Nestes experimentos foram mantidos fixos:

- Espessura de lastro (h) = 15 cm (sendo 10 cm de lastro contaminado);
- Trilho: TR-50;
- Desgaste do boleto 25 %;
- Características do solo da plataforma:
 - peso específico: 18 kN/m³;
 - ângulo de atrito: 25° ;
 - coesão: 10 kPa;
- Material constituinte da camada CSP:
 - peso específico: 18 kN/m³;
 - ângulo de atrito: 15° ;
 - coesão: 5 kPa;
- Espessura da camada CSP: 0,70 m.
- Distância (d) entre a saia do lastro e a crista do talude: 0

Para a avaliação da sensibilidade da variável altura do talude (H), foram realizados 146 experimentos, sendo 56 experimentos com bitola larga, 48 com bitola métrica e 42 com bitola mista. A quantidade de valores assumidos para cada uma das variáveis está relacionada na tabela 3.13, por tipo de bitola. Considerou-se a situação mais crítica correspondente ao talude com inclinação 1,5:1 e distância d=0,0, e a situação menos crítica correspondente à inclinação do talude 1:2, e distância d=0,60 m.

Tabela 3.13: Experimentos realizados por tipo de bitola, para avaliação da sensibilidade da altura do talude.

Variável	Número de valores considerados de cada variável		
	Bitola Larga	Bitola Mista	Bitola Métrica
Tensão na plataforma	7	7	8
Altura do talude (H)	4	3	3
Inclinação do talude	2	2	2
Total dos experimentos por bitola	56	42	48

Para verificação da condição mais crítica na bitola mista, com relação ao posicionamento do terceiro trilho, foram realizados 3 experimentos. Nestes experimentos observou-se que o carregamento na plataforma é mais desfavorável quando o terceiro trilho está situado mais próximo da borda do talude.

Além dos experimentos acima identificados, foram realizados mais 55 experimentos considerando-se a plataforma plana, para avaliação das condições críticas. Para tal, foram realizados 19 experimentos variando-se a tensão na plataforma, sendo 6 experimentos para a bitola larga, 7 para a bitola métrica e 6 para a bitola mista. Nestes experimentos foram mantidos fixos: espessura da camada CSP ($e=0,70$ m), características do solo da plataforma: peso específico: 18 kN/m^3 ; ângulo de atrito: 25° ; coesão: 10 kPa ; características da camada CSP: peso específico: 18 kN/m^3 ; ângulo de atrito: 15° ; coesão: 5 kPa . Para a avaliação da sensibilidade da camada CSP, foram realizados 72 experimentos, somente para a bitola larga, e os valores assumidos para cada variável foram: 3 para a variável coesão; 6 para a variável ângulo de atrito; e 3 para a variável peso específico. Foram mantidas fixas as variáveis: características do solo da plataforma: peso específico: 18 kN/m^3 ; ângulo de atrito: 25° ; coesão: 10 kPa ; espessura da camada CSP ($0,70$ m); tensão na plataforma (210 kPa).

Com relação aos resultados obtidos, e para exemplificar, apresenta-se a tabela 3.14, referente aos valores dos fatores de segurança (FS) obtidos para a bitola larga, talude 1:1, distância entre a saia do lastro e a crista do talude $d=0,0$ e espessura da camada CSP $e=0,70$ m. Nesta tabela são apresentados na primeira coluna à esquerda os valores da tensão na plataforma, variando de 0 a 240 kPa . As demais colunas à direita são referentes a cada altura de talude (H) considerada, e que variou de 1 a 5 m. Conforme já comentado no item anterior, o método de cálculo adotado foi o de Morgenstern e Price, tendo sido utilizado o coeficiente FS determinado a partir do equilíbrio dos momentos.

Tabela 3.14: Valores de FS (em relação aos momentos) determinados para a bitola larga.

Tensão na plataforma (kPa)	Altura do talude H=1 m	Altura do talude H=2 m	Altura do talude H=3 m	Altura do talude H=5 m
0	6,46	3,37	2,33	1,62
40	2,56	1,89	1,57	1,27
80	1,97	1,50	1,28	1,10
120	1,74	1,31	1,13	0,99
160	1,61	1,20	1,04	0,91
200	1,53	1,13	0,98	0,86
240	1,47	1,08	0,93	0,82

Os valores de FS em negrito são aqueles em que há risco de ruptura do talude, para as condições avaliadas. O FS mínimo (FS=0,82) obtido foi para a maior tensão aplicada na plataforma (240 kPa) e maior altura de talude (H=5,0 m). Verifica-se também que os valores dos fatores de segurança obtidos são decrescentes em função do aumento da carga atuante na plataforma e com o aumento da altura do talude. Estes valores lançados em um gráfico da tensão na plataforma x FS (figura 3.15), fornecem uma família de curvas, representativa de cada altura de talude.

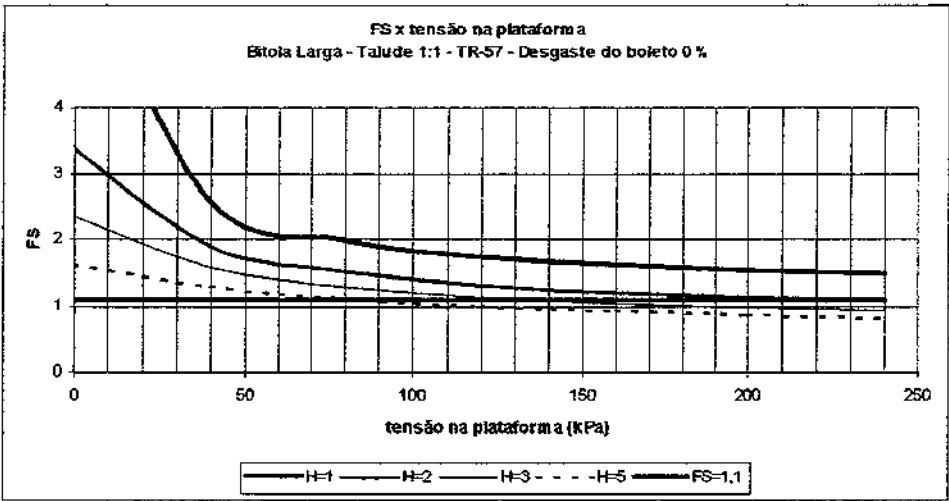


Figura 3.15: Valores de FS x tensão aplicada na plataforma para a bitola larga, e talude com inclinação 1:1

Observa-se neste gráfico que, a partir de 100 kPa e em todas as alturas de talude, FS tende a valores quase constantes, ou pouco decrescentes. A linha contínua horizontal vermelha indica o limite de segurança, considerado como sendo FS=1,1, abaixo da qual há risco de ruptura. Para a altura do talude H=1, verifica-se que há um trecho da curva, situado entre 60 e 80 kPa, onde há uma inflexão na curva entre o trecho inicial da curva e o seu trecho final. Isto se deve à maior influência da camada CSP para a altura do talude considerado.

Os demais resultados obtidos, estão apresentados no anexo B, tabelas, B.1, B.2 e B.3. Nestas tabelas os valores de FS foram determinados a partir do equilíbrio dos momentos de acordo com a equação 2.14.

Para os experimentos realizados com o solo da plataforma e da camada CSP, considerou-se apenas a bitola larga, aplicando uma tensão máxima na plataforma (210 kPa), o talude mais crítico (1,5:1), e as demais condições, espessura de lastro $h=0,35$ m, trilho TR-57, desgaste do boleto 0 %. A tabela 3.15 apresenta os resultados obtidos para o solo da plataforma, com peso específico de 18 kN/m^3 .

Tabela 3.15: Valores de FS obtidos para a bitola larga, talude 1,5:1, em função da coesão e do ângulo de atrito do solo da plataforma.

Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (graus)					
	0	5	10	15	20	25
5	0,206	0,487	0,731	0,976	1,212	1,394
10	0,355	0,608	0,849	1,093	1,315	1,465
15	0,480	0,726	0,965	1,208	1,418	1,535
30	0,831	1,068	1,306	1,523	1,691	1,742
60	1,503	1,738	1,890	1,892	1,895	1,897

As demais determinações do solo da plataforma e da camada CSP são apresentadas no anexo B, tabelas B.4 e B.5, tendo como base o talude com inclinação 1,5:1. Adicionalmente, foram realizados os mesmos experimentos para o caso de uma plataforma plana, os quais são apresentados na tabela B.6, do anexo B.

3.9. Análise dos resultados.

Os experimentos realizados tiveram como finalidade permitir o isolamento de cada variável, de modo que fosse possível a determinação da sua sensibilidade para o estudo proposto, bem como separar as variáveis mais sensíveis daquelas que apresentaram pouca ou nenhuma sensibilidade. As variáveis analisadas e que fizeram parte deste estudo, estão relacionadas na página a seguir, tendo totalizado 13 variáveis.

- Inclinação do talude;
- Distância (d) entre a saia do lastro e a crista do talude;

- Bitola;
- Altura do talude (H);
- Características geotécnicas do solo da plataforma;
 - Peso específico do solo da plataforma;
 - Ângulo de atrito do solo da plataforma;
 - Coesão do solo da plataforma;
- Características geotécnicas da camada CSP;
 - Peso específico da camada CSP;
 - Ângulo de atrito da camada CSP;
 - Coesão da camada CSP;
- Espessura (e) da camada CSP;
- Espessura (h) da camada de lastro;
- Trilho e desgaste do boleto;

Os valores de FS apresentados, conforme já comentado anteriormente, referem-se ao equilíbrio dos momentos, para fins de simplificação.

3.9.1. Inclinação do talude.

As variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.16.

Tabela 3.16: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x inclinação do talude

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Altura do talude de aterro (H)	m	5
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m ³	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m ³	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores da variável em estudo estão apresentados na tabela 3.17, onde VR é o valor de referência adotado para efeito de comparação.

Tabela 3.17: Variável em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável				
Inclinação do talude de aterro	-	1,5:1 (VR)	1:1	1:1,5	1:2	Plataforma plana
Ângulo do talude com a horizontal	rad	1,97 (VR)	1,57	1,18	0,93	0

VR: Valor de referência

Os resultados são apresentados na tabela 3.18. Da esquerda para a direita, a coluna da esquerda indica a inclinação do talude. As colunas seguintes, indicam o ângulo que o talude forma com a horizontal, expresso em radianos, e o valor determinado para o fator de segurança FS. Na coluna da direita é apresentada a razão da variação avaliada, tendo sido tomado como valor de referência o talude com inclinação 1,5:1, já explicitado na tabela 3.17.

Tabela 3.18: Valores de FS para altura de talude de 5 m, e desvios relativos à cada inclinação de talude.

Inclinação do Talude (i)	Ângulo (°)	Ângulo (rad)	FS	FS (i)/ FS 1,5:1(%)
1,5:1	56,3	1,97	0,73	-
1:1	45,0	1,57	0,85	16,0
1:1,5	33,7	1,18	1,01	38,7
1:2,0	26,6	0,93	1,16	59,3

Nesta tabela, é possível observar que somente o talude com inclinação 1:2,0 apresenta FS superior a 1,1, valor este considerado limite para um talude estável. A sensibilidade desta variável é significativa, sendo inversamente proporcional ao valor de FS.

A variação FS x inclinação do talude é também apresentada na figura 3.16, onde o eixo das ordenadas representa o fator de segurança FS à ruptura circular e o eixo das abscissas representa o ângulo do talude com a horizontal (em radianos). A linha tracejada (FS=1,1) horizontal é o limite entre a situação de estabilidade e de instabilidade.

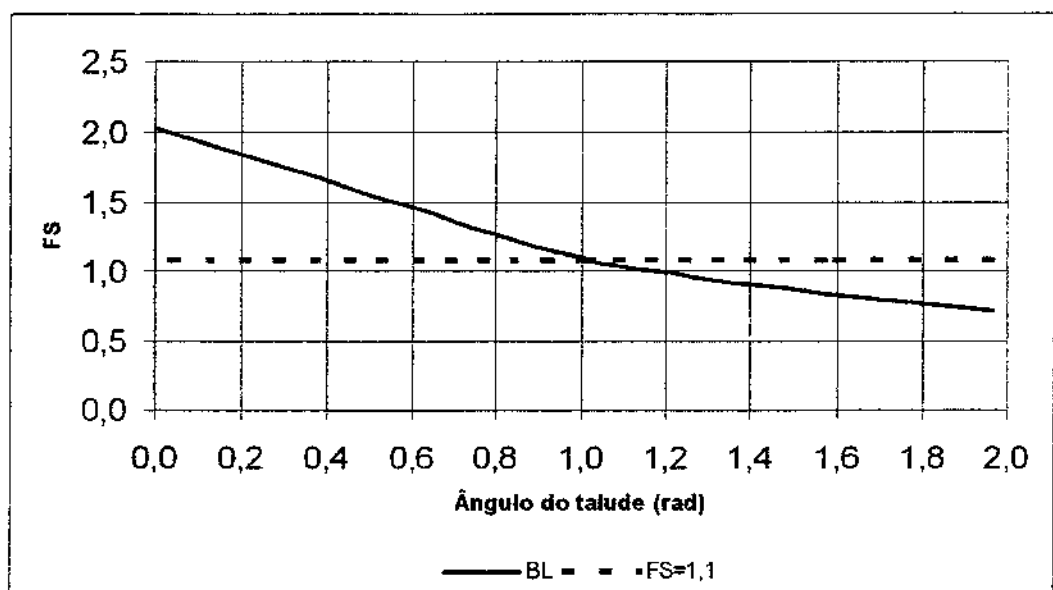


Figura 3.16: Variação de FS em função da inclinação do talude.

O trecho de curva situado abaixo da linha horizontal ($FS=1,1$) representa a situação em que o talude torna-se instável. A curva de variação de FS para a variável inclinação do talude, segue uma linha de tendência não linear e do tipo potencial.

Além dos valores das inclinações de talude já apresentadas na tabela 3.18, efetuou-se ainda uma análise complementar, considerando-se o caso de uma plataforma plana. O valor de FS obtido para esta condição, foi $FS = 2,02$, e que representa o início da curva da figura 3.16 (ângulo do talude com a horizontal=0,0).

Conclui-se que para as condições analisadas, há mais situações de instabilidade nos taludes do que de estabilidade, e que esta variável contribui muito para o valor de FS.

3.9.2. Distância “d” entre a saia do lastro e a crista do talude

Na avaliação da sensibilidade da variável “distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro”, denominada de “d”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.19, bem como a sua unidade e os valores assumidos por cada uma destas variáveis.

Tabela 3.19: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x “d”

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1:1
Altura do talude de aterro (H)	m	5
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m3	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m3	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores da variável em estudo estão apresentados na tabela 3.20. VR é o valor de referência adotado para efeito de comparação.

Tabela 3.20: Variável em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável				
Distância entre a saís do lastro e a crista do talude (d)	m	0,0 (VR)	0,10	0,20	0,30	0,60

Os resultados estão apresentados na tabela 3.21, estando na coluna da esquerda a variável “d”. Na coluna central são fornecidos os fatores FS para cada distância “d” considerada e na coluna da direita, a relação R (expressa em porcentagem) entre o valor de FS obtido para esta distância e o valor de FS obtido para a distância d=0,0. Por exemplo para d=0,10, a relação é $FS_{(d=0,10)} / FS_{(d=0,0)}$.

Tabela 3.21: Valores do fator FS x distância “d”.

d (cm)	FS	$R = (1-FS/FS_{(d=0,0)}) \times 100 (\%)$
0,0	0,846	-
0,10	0,854	0,95
0,20	0,862	1,89
0,30	0,870	2,84
0,60	0,894	5,67

Observa-se nesta tabela que o acréscimo no valor de FS é muito regular. A variável apresenta sensibilidade média e diretamente proporcional ao valor de FS. A sua variação é linear,

ocorrendo um aumento de 0,95 % para cada 0,10 m de aumento na distância “d”, para a situação analisada.

3.9.3. Bitola

As variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.22.

Tabela 3.22: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x bitola

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m3	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m3	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.23. VR é o valor de referência adotado para efeito de comparação

Tabela 3.23: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável		
		Mista	Larga (VR)	Métrica
Bitola				
Tensão na plataforma	kPa	185	210 (VR)	280
Altura do talude	m	1,0	5,0	-

Os resultados estão apresentados na tabela 3.24. Na coluna da esquerda está a altura do talude (H), e nas colunas à direita os valores de FS por tipo de bitola, e a razão R, relação entre FS obtido para a bitola em análise / FS obtido para a bitola larga.

Tabela 3.24: Valores do coeficiente FS por tipo de bitola.

Altura do do Talude (m)	Bitola Larga BL)	Bitola Métrica (BME)		Bitola Mista (BMI)	
	FS	FS	R (FS _{BME} /FS _{BL})	FS	R (FS _{BMI} /FS _{BL})
1,0	1,52	1,20	0,79	1,52	1
5,0	0,85	0,77	0,91	0,90	1,06

Os valores em **negrito** são os valores de FS inferiores a 1,1, que representam situações de risco de estabilidade à ruptura. Os valores de FS obtidos para a bitola métrica são 9 a 21 % inferiores aos valores de FS obtidos para a bitola larga, respectivamente para as alturas de talude $H=1,0$ e $H=5,0$ m. A sensibilidade da variável bitola é de modo geral significativa. Quando se trata de altura do talude superior a 1,0 m, a bitola métrica apresenta valores de FS em média 15 % inferiores aos valores de FS para a bitola larga. Quanto à bitola mista os valores de FS encontram-se muito próximos aos obtidos para a bitola larga ou ligeiramente superiores (média de 3 %).

Para que tenha na bitola métrica uma condição de segurança equivalente à da bitola larga, será necessária uma redução da tensão na plataforma de 280 kPa para um valor situado entre 135 e 200 kPa, dependendo da altura do talude considerado, o que corresponde a uma redução de 48 a 28 % também para a carga/roda, passando de 15 T (ou 147 kN) por roda para 7,2 a 10,8 T (ou 70,5 a 105,9 kN)/roda. Considerando o vagão gôndola carregado, o seu peso total deverá ser reduzido de 120 T (1.176 kN) para um valor situado entre 57 e 86 T (558 a 843 kN).

3.9.4. Altura do talude

Na avaliação da sensibilidade da variável “altura do talude”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.25.

Tabela 3.25: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x altura do talude (H)

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m ³	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m ³	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores da variável em estudo estão apresentados na tabela 3.26.

Tabela 3.26: Variável em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável							
Altura do talude (H)	m	0,25	0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.27. Os valores de FS em negrito referem-se aos casos onde há risco de ruptura do talude ($FS \leq 1,1$).

Tabela 3.27: Valores do coeficiente FS em função da altura do talude (H).

Altura do talude (m)	FS
0,25	2,09
0,50	2,09
0,75	1,64
1,0	1,47
2,0	1,07
3,0	0,88
5,0	0,73
10,0	0,62

Mesmo para um talude pouco usual nas obras civis em geral (caso desta avaliação do talude com inclinação 1,5:1) mas existente principalmente em obras ferroviárias antigas verifica-se que o risco de ruptura do talude ocorre para alturas superiores a 2,0 m. Estes mesmos valores da tabela 3.27 são apresentados em gráfico da altura do talude x FS, na figura 3.17. A linha pontilhada representa a linha em que o fator de segurança FS é igual a 1,1.

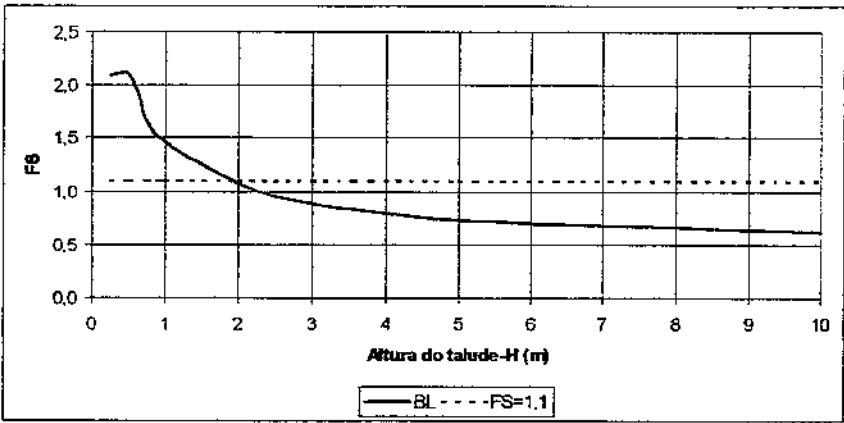


Figura 3.17: Curva de variação de FS x altura do talude.

O trecho inicial da curva reflete uma situação em que os círculos de ruptura e os respectivos coeficientes de segurança são iguais ou muito próximos, devido à homogeneidade do material do talude, e maior representatividade da camada CSP. A sensibilidade da variável altura do talude é significativa e inversamente proporcional ao aumento de FS. A sua variação é do tipo potencial, para o trecho da curva com altura do talude superior a 1,0 m, de acordo com a equação (R^2 = coeficiente de correlação=0,978):

$$FS = 1,4001 \times H^{-0,3767} \tag{3.1}$$

3.9.5. Características do solo da plataforma

Na variável “características do solo da plataforma”, foram avaliados separadamente: peso específico, o ângulo de atrito e a coesão. Para a avaliação da sensibilidade da variável “peso específico do solo da plataforma”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.28.

Tabela 3.28: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x peso específico do solo da plataforma.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saída do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola		Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Peso específico da camada CSP	kN/m3	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.29. VR é o valor de referência adotado para efeito de comparação.

Tabela 3.29: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável		
Peso específico do solo da plataforma	kN/m ³	16	18 (VR)	20
Altura do talude	m	1,0	5,0	
Coesão do solo da plataforma	kPa	5,0	60,0	

Os resultados obtidos para FS x peso específico do solo da plataforma, estão apresentados na tabela 3.30.

Tabela 3.30: Valores do coeficiente FS em função do peso específico do solo da plataforma.

Peso específico do solo da plataforma (kN/m ³)	Altura do talude-H (m)	FS (coesão 5 kPa)	FS (coesão 60 kPa)
16,0	1,0	1,39	1,90
	5,0	0,64	1,60
18,0	1,0	1,39	1,90
	5,0	0,64	1,58
20,0	1,0	1,40	1,90
	5,0	0,64	1,58

Verifica-se, a partir desta tabela que a variável peso específico não apresentou sensibilidade significativa aos experimentos realizados.

Para a avaliação da sensibilidade da variável “coesão do solo da plataforma”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.31.

Tabela 3.31: Variáveis fixas e valores para a análise de FS x coesão do solo da plataforma.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m ³	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	15
Peso específico da camada CSP	kN/m ³	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo: “coesão do solo da plataforma” estão apresentados na tabela 3.32.

Tabela 3.32: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável				
Coesão do solo da plataforma	kPa	5	10	15	30	60
Altura do talude	m	1,0	5,0	-	-	-

Os resultados obtidos para FS x coesão do solo da plataforma, estão apresentados na tabela 3.33. Na coluna da esquerda são apresentados os valores experimentados para a altura do talude. Na coluna do centro estão os valores da coesão do solo da plataforma. A coluna da direita apresenta o resultado obtido para o fator FS. Os valores em negrito representam as situações onde não ocorre estabilidade do talude.

Tabela 3.33: Valores de FS para a coesão do solo da plataforma em relação à altura do talude.

Altura do talude (m)	Coesão do solo da plataforma(kPa)	FS
1,0	5	0,98
	10	1,09
	15	1,21
	30	1,52
	60	1,89
5,0	5	0,43
	10	0,52
	15	0,60
	30	0,85
	60	1,35

Observa-se nesta tabela que para a altura do talude H=1,0 m, ocorre estabilidade para valores da coesão superiores a 15 kPa. Para a altura H=5,0 m, a estabilidade ocorre para valores da coesão situados acima de 30 kPa. Os valores apresentados na tabela 3.3 são mostrados no gráfico da figura 3.18, onde a coesão do solo da plataforma está no eixo das abscissas, e os valores de FS no eixo das ordenadas. A linha contínua horizontal representa a linha em que o fator de segurança FS é igual a 1,1. São mostradas as curvas para as alturas de talude H=1,0 e H=5,0 m.

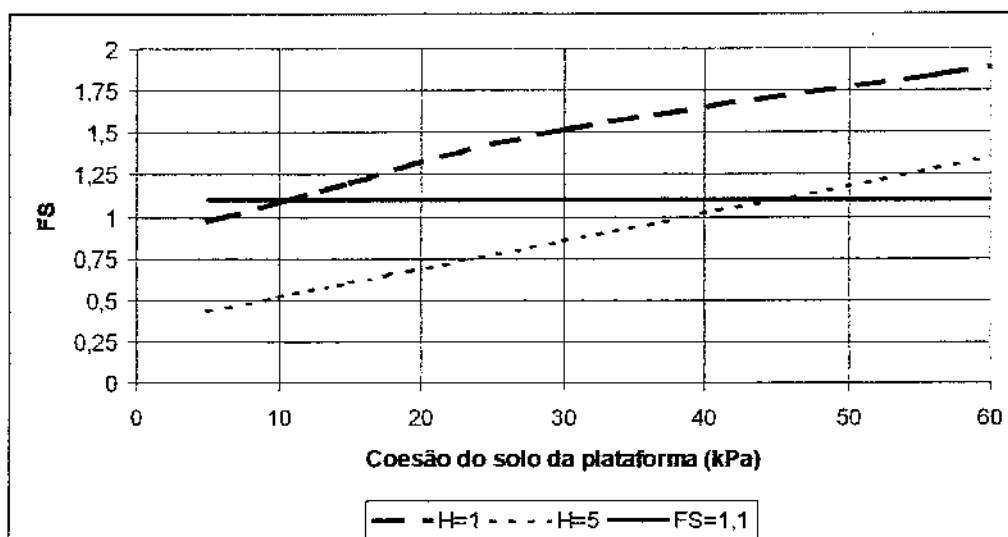


Figura 3.18: Curva de variação de FS x coesão do solo da plataforma

A sensibilidade da variável “coesão do solo da plataforma” é significativa e diretamente proporcional ao aumento de FS. Para a curva da altura $H=1,0$ m, a curva de tendência é do tipo polinomial de segunda ordem; para a altura do talude $H=5,0$ m a linha de tendência é do tipo linear.

Para a avaliação da sensibilidade da variável “ângulo de atrito do solo da plataforma”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.34.

Tabela 3.34: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x ângulo de atrito do solo da plataforma.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m^3	18
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m^3	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.35.

Tabela 3.35: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável					
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	0	5	10	15	20	25
Altura do talude	m	1,0	5,0	-	-	-	-

Os resultados obtidos para FS x ângulo de atrito do solo da plataforma, estão apresentados na tabela 3.36. Na coluna da esquerda são apresentados os valores experimentados para a altura do talude. Na coluna do centro estão os valores do ângulo de atrito do solo da plataforma. A coluna da direita apresenta os resultados obtidos para o fator FS. Os valores em negrito representam as situações onde não ocorre estabilidade do talude.

Tabela 3.36: Valores de FS para o ângulo de atrito do solo da plataforma x altura do talude.

Altura do talude (m)	Ângulo de atrito do solo da plataforma (graus)	FS
1,0	0	0,36
	5	0,61
	10	0,85
	15	1,09
	20	1,32
	25	1,47
5,0	0	0,18
	5	0,30
	10	0,41
	15	0,52
	20	0,62
	25	0,73

Observa-se nesta tabela que, para os experimentos realizados, somente em dois casos ocorreu estabilidade do talude. A sensibilidade desta variável é significativa e diretamente proporcional ao aumento de FS. A sua variação é do tipo linear.

3.9.6. Características da camada CSP

Na variável “características da camada CSP”, foram avaliados separadamente: peso específico, o ângulo de atrito e a coesão do material constituinte desta camada. Para a avaliação da sensibilidade da variável “peso específico da camada CSP”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.37.

Tabela 3.37: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x peso específico da camada CSP.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m3	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.38. VR é o valor de referência adotado para efeito de comparação.

Tabela 3.38: Variável em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável		
Peso específico da camada CSP	kN/m ³	16	18 (VR)	20
Altura do talude	m	1,0	5,0	
Coesão da camada CSP	kPa	5,0	15,0	

Os resultados obtidos para FS (relativos às coesões de 5 e 15 kPa) x peso específico da camada CSP estão apresentados na tabela 3.39.

Tabela 3.39: Valores do coeficiente FS em função do peso específico da camada CSP.

Peso específico da camada CSP (kN/m ³)	Altura do talude-H(m)	FS (coesão 5 kPa)	FS (coesão 15 kPa)
16,0	1,0	1,17	1,35
	5,0	0,70	0,73
18,0	1,0	1,18	1,35
	5,0	0,70	0,73
20,0	1,0	1,19	1,35
	5,0	0,70	0,73

Verifica-se nesta tabela, que a variável peso específico não apresentou sensibilidade significativa aos experimentos realizados, tendo ocorrido variação somente na 3ª casa decimal, provavelmente devido ao conjunto de valores analisados.

Para a avaliação da sensibilidade da variável “coesão da camada CSP”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.40.

Tabela 3.40: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x coesão da camada CSP.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m3	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m³	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15

As variáveis em estudo e os valores assumidos para cada variável estão apresentados na tabela 3.41.

Tabela 3.41: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável		
Coesão da camada CSP	kPa	5	10	15
Altura do talude	m	1,0	5,0	-

Os resultados obtidos para FS x coesão da camada CSP estão apresentados na tabela 3.42. Na coluna da esquerda são apresentados os valores experimentados para a altura do talude. Na coluna do centro estão os valores da coesão da camada CSP. A coluna da direita apresenta o resultado obtido para o fator FS. Os valores em negrito representam as situações onde não ocorre estabilidade do talude.

Tabela 3.42: Valores de FS para a coesão da camada CSP em relação à altura do talude.

Altura do talude (m)	Coesão da camada CSP(kPa)	FS
1,0	5	1,18
	10	1,26
	15	1,35
5,0	5	0,70
	10	0,72
	15	0,73

Observa-se nesta tabela que para a altura do talude $H=1,0$ m, todos os experimentos realizados apresentaram estabilidade à ruptura circular do talude tendo apresentado círculos rasos de ruptura, enquanto que para a altura $H=5,0$ m todos os experimentos realizados não apresentaram estabilidade além de círculos mais profundos.

A variável coesão da camada CSP apresenta sensibilidade regular e diretamente proporcional ao aumento de FS. Para a curva da altura $H=1,0$ m, a curva de tendência é do tipo linear; para a altura do talude $H=5,0$ m a linha de tendência é do tipo potencial.

Para a avaliação da sensibilidade da variável “ângulo de atrito da camada CSP”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.43.

Tabela 3.43: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x ângulo de atrito da camada CSP.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bítola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m ³	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m ³	18
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.44.

Tabela 3.44: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável					
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	0	5	10	15	20	25
Altura do talude	m	1,0	5,0	-	-	-	-

Os resultados obtidos para FS x ângulo de atrito da camada CSP estão apresentados na tabela 3.45. Na coluna da esquerda são apresentados os valores experimentados para a altura do talude. Na coluna do centro estão os valores do ângulo de atrito da camada CSP. A coluna da direita apresenta os resultados obtidos para o fator FS. Os valores em negrito representam as situações onde não ocorre estabilidade do talude.

Tabela 3.45: Valores de FS para o ângulo de atrito da camada CSP em relação à altura do talude.

Altura do talude (m)	Ângulo de atrito da camada CSP (graus)	FS
1,0	0	0,22
	5	0,55
	10	0,88
	15	1,18
	20	1,43
	25	1,70
5,0	0	0,20
	5	0,50
	10	0,67
	15	0,70
	20	0,73
	25	0,76

Observa-se nesta tabela que, para os experimentos realizados, somente em dois casos obteve-se estabilidade do talude. A sensibilidade desta variável é significativa e diretamente proporcional ao aumento de FS. A sua variação é do tipo linear para os resultados de FS para a altura de talude H=1,0 e do tipo polinomial de terceira ordem para a altura de talude H=5,0 m.

A camada CSP foi complementarmente avaliada para a situação em que a plataforma é plana ou horizontal. O procedimento adotado foi o mesmo já apresentado no início deste item, com o peso específico, ângulo de atrito e coesão da camada CSP avaliados separadamente. Para a avaliação

da sensibilidade da variável “peso específico da camada CSP em plataforma plana”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.46.

Tabela 3.46: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x peso específico da camada CSP em plataforma plana.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	Plataforma plana
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m3	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.47. VR é o valor de referência adotado para efeito de comparação.

Tabela 3.47: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável		
Peso específico da camada CSP em plataforma plana	kN/m ³	16	18 (VR)	20
Coesão da camada CSP	kPa	5,0	15,0	

Os resultados obtidos para FS x peso específico da camada CSP em plataforma plana estão apresentados na tabela 3.48.

Tabela 3.48: Valores do coeficiente FS em função do peso específico da camada CSP em plataforma plana.

Peso específico da camada CSP (kN/m ³)	FS (coesão 5 kPa)	FS (coesão 15 kPa)
16,0	2,02	2,13
18,0	2,02	2,13
20,0	2,02	2,13

Verifica-se, a partir desta tabela, que a variável peso específico não apresentou qualquer sensibilidade aos experimentos realizados.

Para a avaliação da sensibilidade da variável “coesão da camada CSP em plataforma plana”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.49.

Tabela 3.49: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x coesão da camada CSP em plataforma plana.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	Plataforma plana
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m³	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m³	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15

Os valores da variável em estudo: “coesão da camada CSP em plataforma plana” estão apresentados na tabela 3.50.

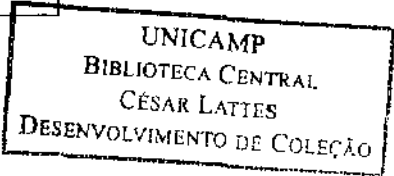
Tabela 3.50: Variável em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável		
Coesão da camada CSP	kPa	5	10	15

Os resultados obtidos para FS x coesão da camada CSP em plataforma plana estão apresentados na tabela 3.51. Na coluna da esquerda são apresentados os valores da coesão da camada CSP. A coluna da direita apresenta o resultado obtido para o fator FS.

Tabela 3.51: Valores de FS para a coesão da camada CSP em plataforma plana.

Coesão da camada CSP (kPa)	FS
5	2,02
10	2,08
15	2,13



Observa-se nesta tabela que em todos os experimentos realizados houve estabilidade à ruptura circular do talude. A sensibilidade da variável coesão da camada CSP é pouco significativa e diretamente proporcional ao aumento de FS. A curva de tendência é do tipo linear.

Para a avaliação da sensibilidade da variável “ângulo de atrito da camada CSP em plataforma plana”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.52.

Tabela 3.52: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x ângulo de atrito da camada CSP em plataforma plana.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	Plataforma plana
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m ³	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m ³	18
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores da variável em estudo: “ângulo de atrito da camada CSP em plataforma plana” estão apresentados na tabela 3.53.

Tabela 3.53: Variável em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável					
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	0	5	10	15	20	25

Os resultados obtidos para FS x ângulo de atrito da camada CSP em plataforma plana estão apresentados na tabela 3.54. Na coluna da esquerda são apresentados os valores do ângulo de atrito da camada CSP. A coluna da direita apresenta os resultados obtidos para o fator FS. Os valores em negrito representam as situações onde não ocorre estabilidade do talude.

Tabela 3.54: Valores de FS para o ângulo de atrito da camada CSP em plataforma plana.

Ângulo de atrito da camada CSP (graus)	FS
0	0,43
5	1,44
10	1,87
15	2,02
20	2,18
25	2,34

Observa-se nesta tabela, que para os experimentos realizados, somente no caso em que o ângulo de atrito é nulo não ocorreu estabilidade da plataforma. A sensibilidade desta variável é significativa e diretamente proporcional ao aumento de FS. A sua variação é do tipo polinomial de terceira ordem.

3.9.7. Espessura da camada CSP

Para a avaliação da variável “espessura da camada CSP”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.55.

Tabela 3.55: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x espessura da camada CSP

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Bitola	-	Larga
Espessura do lastro (h)	m	0,35
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Tensão máxima na plataforma	kPa	210
Peso específico do solo da plataforma	kN/m3	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m3	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.56.

Tabela 3.56: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável				
Espessura da camada CSP	m	0,30	0,50	0,70	0,90	1,10
Altura do talude	m	1,0	2,0	5,0	-	-

Os resultados estão apresentados na tabela 3.57. Na coluna da esquerda está apresentada a espessura (e) da camada CSP; nas demais colunas os valores de FS para cada altura de talude. Os valores em **negrito** representam as situações onde não ocorre estabilidade do talude.

Tabela 3.57: Valores do coeficiente FS em função da espessura da camada CSP e da altura do talude.

Espessura da camada CSP (m)	Valores de FS		
	H=1,0 m	H=2,0 m	H=5,0 m
0,30	1,70	1,18	0,76
0,50	1,62	1,17	0,74
0,70	1,47	1,17	0,73
0,90	1,32	1,16	0,71
1,10	1,18	1,16	0,70

Os valores da tabela 3.57, são apresentados em forma de gráfico na figura 3.19, da variação da espessura da camada CSP x FS, onde a espessura da camada CSP está no eixo das abscissas e o fator FS no eixo das ordenadas. A linha contínua horizontal representa a linha em que o fator de segurança FS é igual a 1,1.

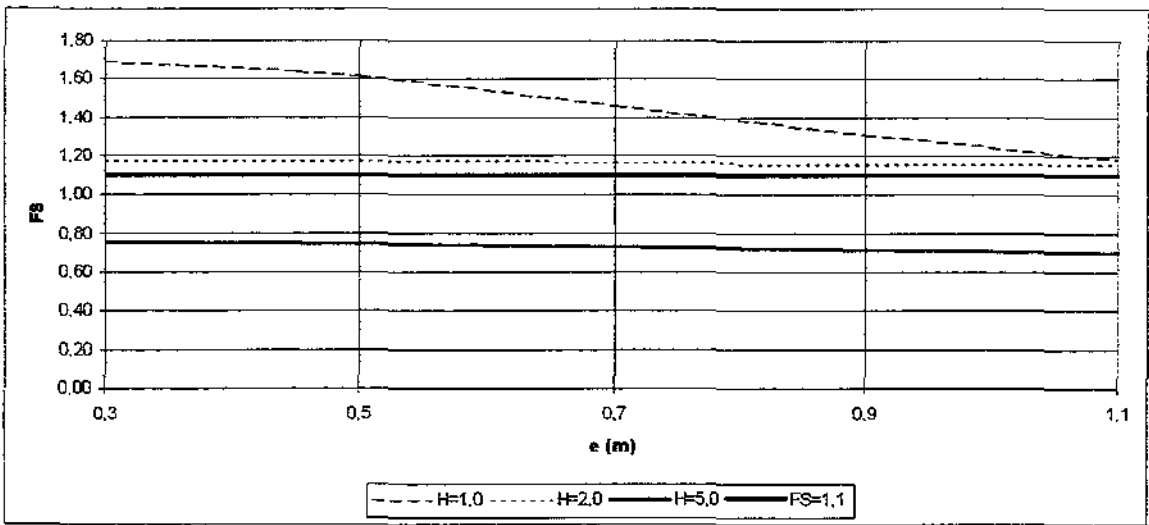


Figura 3.19:Curva de variação de FS x espessura da camada CSP

Observa-se que a estabilidade ocorre somente para taludes com alturas situadas entre 1 e 2 m. A sensibilidade da variável espessura da camada CSP é pouco significativa quando se trata de altura do talude superior a 2,0 m, sendo a sua variação do tipo linear. Para talude com altura $H=1,0$ m a variação é muito significativa, e a sua variação é do tipo polinomial de segunda ordem, resultado este já esperado, uma vez que a influência da espessura da camada CSP tende a ser mais significativa para taludes de menor altura.

3.9.8. Espessura da camada de lastro (h)

Para a avaliação da variável “espessura (h) da camada de lastro”, as variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.58. A espessura da camada de lastro contaminado (espessura total menos a espessura da camada de lastro, conforme indicado na figura 3.1) também foi mantida fixa.

Tabela 3.58: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x espessura da camada de lastro

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Trilho	-	TR-57
Desgaste do boleto	%	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m3	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m3	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.59. As variáveis avaliadas foram, além da espessura da camada de lastro, o tipo de bitola e respectiva tensão na plataforma e a altura do talude.

Tabela 3.59: Variáveis em estudo e respectivos valores.

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável				
Espessura (h) da camada de lastro	m	0,15	0,35	-	-	-
Bitola	-	Larga	Métrica	Mista	-	-
Tensão na plataforma	kPa	185	197	210	268	280
Altura do talude	m	1,0	5,0	-	-	-

Os resultados estão apresentados na tabela 3.60. Da coluna da esquerda para a direita são apresentadas: a espessura (h) da camada de lastro; a bitola considerada e a respectiva tensão na plataforma. As duas últimas colunas da direita estão os valores de FS para cada altura de talude considerada. Os valores em negrito representam as situações onde não ocorre estabilidade do talude.

Tabela 3.60: Valores de FS determinados para as duas espessuras de lastro consideradas

Espessura de lastro-h (m)	Bitola	Tensão (kPa)	FS (H=1,0)	FS (H=5,0)
0,15	Larga	197	1,47	0,75
	Métrica	268	1,21	0,67
	Mista	210	1,56	0,82
0,35	Larga	210	1,47	0,73
	Métrica	280	1,21	0,65
	Mista	185	1,55	1,08

Para a altura de talude H=1,0 m observa-se que não houve sensibilidade significativa. Para a altura de talude H=5,0 m, ocorreu pequena sensibilidade para as bitolas métrica e larga, sendo inversamente proporcional ao fator de segurança FS e apresentando pequena variação linear. Para a bitola mista, a sensibilidade foi mais significativa e diretamente proporcional, com variação linear. A razão de crescimento neste caso foi de 31,7 % ($FS_{0,35}/FS_{0,15}= 1,08/0,82$). Isto se deve ao fato de ter ocorrido um alívio das tensões na plataforma maior para a bitola mista, com o aumento da espessura de lastro de h=0,15 m para h=0,35 m, contrariamente ao ocorrido com as bitolas larga e métrica, onde houve um aumento na tensão na plataforma diretamente proporcional ao aumento da espessura de lastro.

3.9.9. Trilho e Desgaste do boleto.

As variáveis mantidas fixas estão relacionadas na tabela 3.61.

Tabela 3.61: Variáveis fixas e valores para a análise de sensibilidade FS x trilho e desgaste do boleto.

Variáveis fixas	Unidade	Valor
Inclinação do talude	-	1,5:1
Espessura da camada de lastro	m	0,15
Distância entre a saia do lastro e a crista do talude de aterro (d)	m	0
Espessura da camada CSP (e)	m	0,70
Peso específico do solo da plataforma	kN/m ³	18
Ângulo de atrito do solo da plataforma	graus	25
Coesão do solo da plataforma	kPa	10
Peso específico da camada CSP	kN/m ³	18
Ângulo de atrito da camada CSP	graus	15
Coesão da camada CSP	kPa	5

Os valores das variáveis em estudo estão apresentados na tabela 3.62. Além das variáveis trilho e porcentagem de desgaste do boleto, foram aplicados valores para as variáveis: bitola e respectiva tensão na plataforma, e altura do talude.

Tabela 3.62: Variáveis em estudo e respectivos valores

Variável	Unidade	Valores assumidos pela variável								
Trilho		TR-57	TR-50	-	-	-	-	-	-	-
Desgaste do boleto	%	0	25	-	-	-	-	-	-	-
Bitola	-	Larga	Métrica	Mista	-	-	-	-	-	-
Tensão na plataforma	kPa	169	181	191	195	197	210	258	265	268
Altura do talude	m	1,0	5,0	-	-	-	-	-	-	-

Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 3.63. Da esquerda para a direita estão as seguintes variáveis: tipo de trilho, desgaste do boleto, tipo de bitola e respectiva tensão na plataforma. Nas colunas da direita estão os valores de FS calculados para as alturas de talude H=1,0 e H=5,0 m.

Tabela 3.63: Valores de FS em função do tipo de trilho e do desgaste do boleto.

Trilho	Desgaste do boleto (%)	Bitola	Tensão (kPa)	FS (H=1)	FS (H=5,0)
TR-57	0	Larga	197	1,47	0,75
		Métrica	268	1,21	0,67
		Mista	210	1,56	0,82
TR-57	25	Larga	191	1,48	0,75
		Métrica	265	1,22	0,67
		Mista	195	1,59	0,83
TR-50	25	Larga	181	1,50	0,76
		Métrica	258	1,22	0,67
		Mista	169	1,65	0,87

Conforme já comentado no item 3.6.1, o fato das curvas de distribuição de tensões para a espessura de lastro de 0,15 m, estarem muito próximas, foi possível a adoção de uma única curva para todos os casos acima avaliados. A diferença entre eles é a tensão máxima aplicada na plataforma, para cada caso. Verifica-se dos resultados apresentados na tabela 3.63, que a sensibilidade não foi significativa em praticamente todos os casos, e quando esta sensibilidade foi diferente de zero, a variação foi muito pequena e do tipo linear, sendo ainda inversamente proporcional ao fator FS.

3.9.10. Comentários relativos aos resultados obtidos

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas no item anterior, conclui-se que as variáveis que apresentaram maior sensibilidade no fator de segurança à ruptura circular foram as seguintes:

- Inclinação do talude;
- Altura do talude;
- Ângulo de atrito da camada CSP
- Ângulo de atrito do solo da plataforma;
- Coesão do solo da plataforma;
- Tipo de bitola;

Apresentaram reduzida sensibilidade ou nenhuma influencia nos resultados as seguintes variáveis:

- Distância “d” entre a saia do lastro e a crista do talude;
- Coesão do material da camada CSP
- Espessura da camada CSP;
- Espessura da camada de lastro;
- Tipo de trilho e desgaste do boleto;
- Peso específico da camada CSP;
- Peso específico do solo da plataforma;

Para as variáveis avaliadas e para as condições avaliadas neste estudo, as situações mais críticas e que apresentam risco de estabilidade da plataforma à ruptura circular, ocorreram para:

- Bitola Larga (tensão máxima na plataforma: 210 kPa):
 - Talude 1,5:1:
 - $0 \leq d \leq 0,20 \text{ m}$, $H \geq 1,0 \text{ m}$
 - $d > 0,20 \text{ m}$; $H \geq 2,0 \text{ m}$
 - Talude 1:1
 - $d = 0$; $H > 2,0 \text{ m}$
 - $d \geq 0,10 \text{ m}$; $H > 2,0 \text{ m}$
 - Talude 1:1,5
 - $0 \leq d \leq 0,10 \text{ m}$; $H > 2,0 \text{ m}$
 - $d > 0,20 \text{ m}$; $H \geq 3,0 \text{ m}$
 - para ângulo de atrito inferior a 15° (camada CSP), e $d=0$
 - para ângulo de atrito inferior a 25° (camada CSP), e $d=0$
 - Talude 1:2,0
 - Não há situação crítica
- Bitola Métrica (tensão máxima na plataforma: 280 kPa)
 - Em todos os taludes avaliados, para qualquer valor de “d”, e $H > 1,0 \text{ m}$
 - Caso seja respeitada a redução de 25 % das tensões, conforme item 3.7.3:

- - Talude 1,5:1, mantém-se crítico em todas as situações
 - Talude 1:1, idem;
 - Talude 1:1,5: $d = 0$, $H > 1,0$ m; $0,10 \leq d \leq 0,30$ m, $H > 2,0$ m; $d > 0,30$ m, $H \geq 3,0$ m
- Bitola Mista (tensão máxima na plataforma: 185 kPa)
 - Talude 1,5:1:
 - $0 \leq d \leq 0,10$ m, $H \geq 2,0$ m
 - $d > 0,10$ m; $H > 2,0$ m
 - Talude 1:1
 - $0 \leq d \leq 0,60$ m; $H > 2,0$ m
 - $d \geq 0,60$ m; $H > 3,0$ m
 - Talude 1:1,5
 - $0 \leq d \leq 0,60$ m; $H \geq 5,0$ m
 - Talude 1:2,0
 - Não há situação crítica

Em nenhuma situação ocorreu risco de ruptura para uma plataforma plana, com bitola larga, contrariamente aos resultados obtidos por Selig (15), provavelmente por ter sido utilizado um carregamento constante e equivalente à máxima tensão na plataforma, distribuída ao longo da transversal à via, diferentemente do carregamento utilizado neste estudo.

A despeito das curvas de distribuição das tensões para a bitola larga e bitola mista terem sido diferentes, devido à diferença entre os trechos de socaria nesta última, o que provoca diferentes tensões na plataforma, os resultados finais obtidos ficaram muito próximos.

Dos resultados obtidos com as avaliações realizadas conclui-se que existem situações de risco de estabilidade de uma via adjacente a um talude de aterro, e que casos práticos semelhantes aos estudados deverão ser analisados com maior profundidade, através da realização de uma campanha de ensaios para caracterização dos solos constituintes do aterro e da camada CSP, além da determinação dos demais parâmetros ferroviários envolvidos.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O experimento realizado permitiu complementar a metodologia atual de avaliação da estabilidade de vias férreas. Embora as vias em fase de projeto sejam avaliadas segundo diversos critérios, entre eles a análise de estabilidade à ruptura circular de aterros ferroviários, tal procedimento não é adotado para uma via em fase operacional.

Entretanto, estas vias, sobretudo as mais antigas e mais degradadas, podem estar sujeitas à um risco de ruptura que sequer hoje é cogitado. O experimento realizado teve por mérito chamar à atenção para um critério que é bastante válido principalmente para vias degradadas e que por ela trafegam veículos com elevada carga/eixo. Foi válido no sentido de indicar as variáveis que mais influenciam no resultado da estabilidade à ruptura, bem como de apresentar as situações de risco para que sejam evitadas e/ou tomadas medidas no sentido de evita-las ou minimiza-las.

Não foi possível levantar histórico da ocorrência de rupturas em taludes adjacentes a vias férreas e provavelmente não existam registros que evidenciem sua ocorrência. Entretanto, a existência no Brasil de vias degradadas e que por ela trafegam veículos carregados, é um fato incontestável. É por esta razão que o experimento realizado adquire significado.

No experimento realizado procurou-se considerar uma distribuição de carga mais próxima da realidade (traduzidas em termos de tensões efetivas aplicadas à plataforma), bem como um conjunto de parâmetros típicos das vias férreas nacionais. Não há sentido, hoje, em se cogitar a construção de um talude de aterro com inclinação 1,5:1 (V:H), entretanto, considerada a antiguidade das vias férreas no Brasil, que estejam ainda em operação, não somente esta inclinação mas outras situações igualmente críticas ocorrem ao longo destas vias.

O programa Geoslope-Slope/W utilizado avaliou de maneira eficaz as situações apresentadas. O resultado obtido foi bastante satisfatório e permitiu a compreensão do estudo realizado. O objetivo do experimento foi o de associar um fator de segurança à ruptura circular para cada variável analisada. O programa Geoslope-Slope/W neste aspecto, apresentou bons resultados, que permitiram atingir o objetivo proposto.

No sentido de complementar o presente trabalho, seria interessante considerar o peso próprio da superestrutura ferroviária, procedimento este que não foi possível no programa Geoslope, pois a carga distribuída ficou sobre a seção geométrica, não permitindo a inserção de nova geometria da via sobre ela.

Outra simplificação feita neste estudo foi que a carga distribuída ao longo do eixo do dormente central (D1), transversal à via e utilizada para lançamento no programa Geoslope, é da mesma magnitude que na parte central entre dormentes. Conceitualmente, sabe-se que nesta região há um alívio das tensões. Uma futura pesquisa poderá considerar esta distribuição de cargas de maneira mais realista.

O programa Geoslope possui inúmeros recursos adicionais, além daqueles utilizados neste estudo, os quais poderiam complementar este estudo. É o caso, por exemplo da inserção da linha piezométrica na seção estudada; da avaliação da ruptura segundo outras superfícies de escorregamento que não a circular e da aplicação de parâmetros geotécnicos complementares e/ou avançados.

Além do programa Geoslope, poderia complementar este estudo o emprego do programa computacional PLAXIS, relatado por Brinkgreve e Vermeer (39) o qual, a partir das situações de risco evidenciadas neste trabalho, poderia avaliar o comportamento da via até próximo da ruptura, através do Método dos Elementos Finitos. Tal complemento seria de grande utilidade para a compreensão do problema.

Todo o estudo foi realizado para uma situação de veículo carregado estacionado em um pátio ferroviário, podendo ser estendido para um trecho de linha onde, por ocorrência de algum acidente ou impedimento, a composição ferroviária carregada necessite ficar por período prolongado estacionada na linha aguardando a sua desobstrução.

Entretanto, este estudo poderia ser futuramente realizado para uma condição dinâmica, através de programas computacionais mais avançados e com maiores recursos, para que pudessem ser determinadas novas situações de risco ao longo de uma via, com a passagem de veículo carregado à uma determinada velocidade.

5. BIBLIOGRAFIA

5.1. Referências bibliográficas

- (1) CASTELLO BRANCO, J. E., FERREIRA, R. (Coord.) *Tratado de Estradas de Ferro – Material Rodante* AENFER, Rio de Janeiro, 2000.
- (2) BRINA, H. L., *Estradas de ferro, 1 Via permanente*, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1979.
- (3) ISHIHARA, K. *Mensagem de Felitações pelo Quinquagésimo Aniversário da Associação Brasileira De Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica ABMS-Cinquenta Anos de Geotecnia*-DBA Artes Gráficas, 2000.
- (4) MOTOYAMA, S. (Coord.), *Tecnologia e Industrialização no Brasil – Uma Perspectiva Histórica* Editora UNESP –CEETEPS, 1994
- (5) CINTRA, J. P. *História Técnica das Rodovias e Ferrovias Brasileiras* –Escola Politécnica da USP – Depto. de Transportes, 2000.
- (6) PIRES, F. *Os avanços do Transporte Ferroviário de Carga no Brasil após a Privatização: Uma Análise Segundo a Perspectiva dos Usuários, Prestadores de Serviço e Governo* <www.cel.coppead.ufrj/fr-avanco.htm>
- (7) *Estatísticas* , Revista Ferroviária, Empresa Jornalística dos Transportes, março 2005, Rio de Janeiro.
- (8) *A Eletrificação nas Ferrovias Brasileiras*, Disponível em <<http://www.efbrasil.eng.br/electro/cpef.html>> Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 2005
- (9) PAIVA, C. E. L. *Avaliação do Comportamento da Via Férrea*- Relatório Interno de Consultoria – UNICAMP, 2005.
- (10) SCHRAMM, G., *Via Permanente* – Apostila do Curso ministrado na FEPASA, em Campinas, 1973.

- (11) FERREIRA, M. R., *A Ferrovia do Diabo*, Melhoramentos, São Paulo, 2005.
- (12) STOPATTO, S., *Crônicas da Ferrovia*, Sérgio Stopatto (edit.), 1984.
- (13) CEDERGREN, H. R., *Seepage, Drainage and Flow Nets*, John Wiley & Sons, 1967.
- (14) HOWSON, E. T. (Edit.) *Railway Engineering and Maintenance Cyclopedia*, 5th Edition, Simmons-Boardman Publishing Corporation, Chicago, USA, 1942.
- (15) SELIG, E. T, WATERS, J. M., *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford, 1994.
- (16) RAYMOND, G., ISMAIL, I. *The effect of geogrid reinforcement on unbound aggregates*, Geotextiles and Geomembranes Journal, vol 21, pp. 355-380, 2003.
- (17) HAY, W. W., *Railroad Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons, 1982.
- (18) UIC-719 R, *Ouvrages en Terre et couches d'Assise Ferroviaires*, 1^{re}. Edition, Union Internationale des Chemins de Fer, 1982.
- (19) SAUVAGE, R., *Obras Ferroviárias: Novo Conceito de Via Permanente*, ABMS, Tradução no. 2, 1981.
- (20) ESVELD, C. *Modern Railway Track*, MRT Productions, 1989.
- (21) RICO, A., DEL CASTILLO, H., *La Ingenieria de Suelos en las Vias Terrestres, Carreteras, Ferrocarriles y Autopistas* vol 2, Editorial Limusa, 1989.
- (22) KUULA-VAISANEN, P., KAIVOLA, T., *Technical Requirements for Railway Ballast in Finland*, Disponível em <[http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/8d461983982f539900256935003eac25/e73ebeb1bc9ae3e2800256c3e00603796/\\$FILE/Pirjo.pdf](http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/8d461983982f539900256935003eac25/e73ebeb1bc9ae3e2800256c3e00603796/$FILE/Pirjo.pdf)[www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/files/pirjo/\\$file/pirjo.pdd](http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/files/pirjo/$file/pirjo.pdd)> Acesso em: 16/junho/2005, 8:07 h.
- (23) ABNT, *NBR 5564 / EB 655 –Via férrea – Lastro padrão*, Rio de Janeiro, 1991.
- (24) PAIVA, C. E. L., GUIMARÃES, C. A. B., *Estudo das solicitações atuantes nas infraestruturas viárias*, 7^a.ANPET, São Paulo, pág 904-913, 1993.
- (25) FORTES, R. M., MERIGHI, J. V., *Aeroportos*, apostila da disciplina IC 504, Unicamp.
- (26) STOPATTO, S., *Via Permanente Ferroviária – Conceitos e Aplicações*, Editora da Universidade de S. Paulo, 1987.
- (27) LIEBERENZ, K. WEISENMANN U., “Geosynthetics in dynamically stressed earth structures of railway lines”, Seventh International Conference on Geosynthetics, Nice, vol 3, pp. 1183, 2002.
- (28) SCHRAMM, G., “Técnica e Economia na Via Permanente”, Editora Otto Elsnea, 1977.

- (29) GRÄBE, P. J., CLAYTON, C. R. I., SHAW, F. J., *Deformation measurement on a heavy haul track formation*, 8th International Heavy Haul Conference, Rio de Janeiro, 2005.
- (30) MÜLLER-BORUTTAU, F. H., BREITSAMTER, N., *Elastische elemente verringerndie Fahrwegbeanspruchung*, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, (49), vol 9, pag. 587-596, 2000.
- (31) LI, D., SELIG, E., *Method for Railroad Track Foundation Design. I: Development*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p 316, April 1998.
- (32) VOOTTIPRUEX P., ROONGTHANEE, J., *Prevention of Mud Pumping in Railway Embankment. A Case Study from Baeng Pra- Pitsanuloke, Thailand*, The Journal of KMITNB, vol 13, no. 1 Jan, 2003.
- (33) RIVES, F. O., PITA A. L., PUENTE, M. J. M., *Tratado de Ferrocarriles I- Via*, Ruedra, Madrid, 1977.
- (34) CHANG, C. S., ADEGOKE, C. W., SELIG, E., *GEOTRACK Model for Railroad Track Performance*, Journal of Geotechnical Engineering Division-ASCE, pp. 1201-1218, November, 1980
- (35) SPADA, 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, 2003.
- (36) 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.
- (37) *Polyfelt Geotextile Design*, Disponível em <www.polyfelt.com> Acesso em 17 de março de 2005, 20:56 h.
- (38) KRAHN., J, *Stability Modelling with SLOPE/W- An Engineering Methodology* , GEO-SLOPE/W Intenational, Fisrt Edition, may 2004
- (39) TOGNO, F., *Tratado de Ferrocarriles*, Representaciones y Servicios de Ingenieria S.A., reimpressão, México, 1979.
- (40) BRINKGREVE, R. B. J, VERMEER, P.A., *Plaxis-Finite element code for soil and rock analysis*, A. A. Balkema, Rotterdam, 1998.

5.2. Bibliografia de Apoio

- ASSAN, E. A. *Métodos dos Elementos Finitos*, Editora UNICAMP, 2003, 2^a. edição,
- PAIVA, C. E. L., *Apostilas do curso de Via Permanente –disciplina IC-526- UNICAMP*.

RIBEIRO, F. L. B. *Introdução do método dos Elementos Finitos*, Notas de Aula, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 27/06/2003.

BISHOP, A. W., *The use of slip circle in the stability analysis of slopes*, Geotechnique, 5, 1955, Londres.

APÊNDICES

APÊNDICE A – VIBRAÇÕES NA VIA FÉRREA

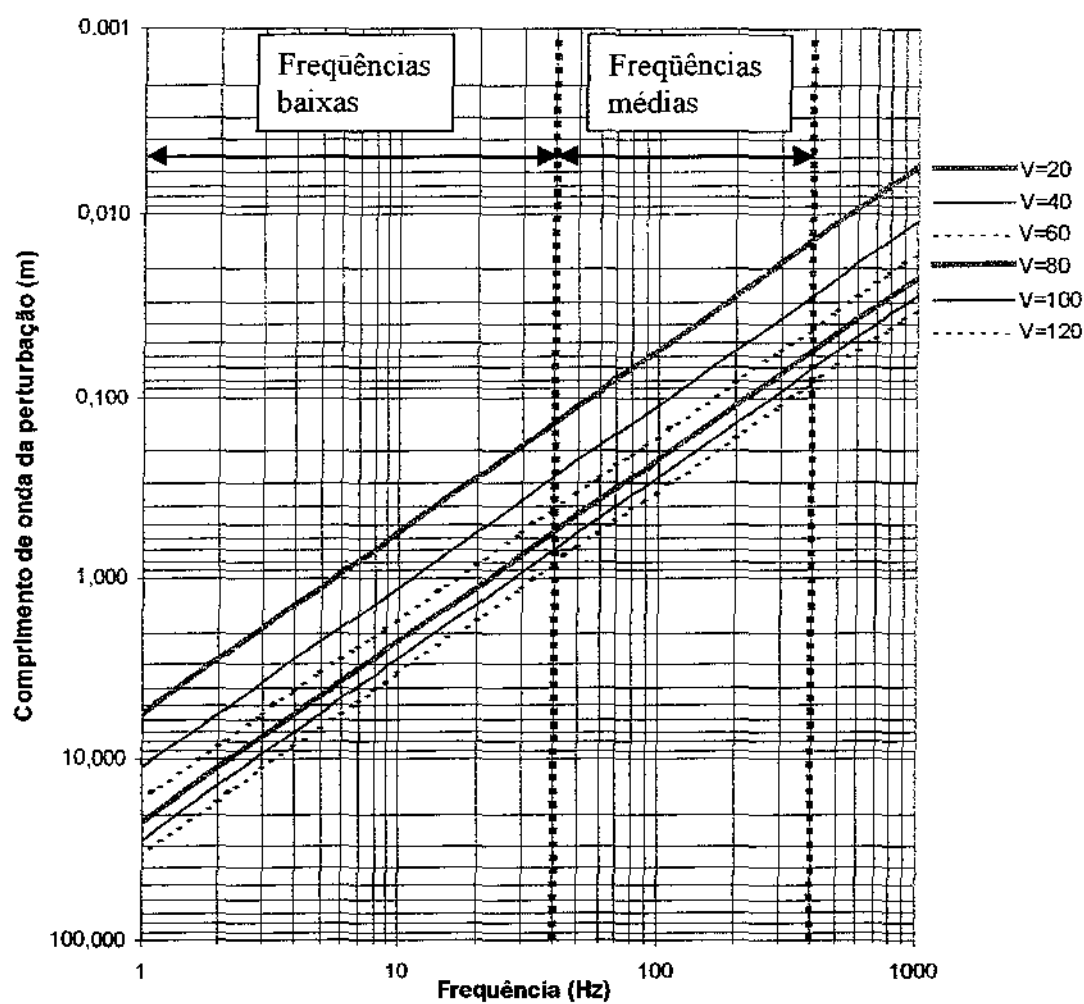


Figura A.1. Variação das frequências típicas em função da velocidade V (km/h) e distâncias típicas de eixos, adaptado de Muller-Boruttau e Breitsamter (30).

ANEXOS

ANEXO A – TENSÕES APLICADAS NA PLATAFORMA

Tabela A1: Cargas calculadas para os 5 dormentes mais carregados, em função da carga por roda, coeficiente de Winkler e tipo de bitola.

Trilho/Desgaste	Coeficiente de Winkler (N/mm3)	Carga/roda (T)	Dormente mais carregado	BITOLA LARGA		BITOLA MÉTRICA		BITOLA MISTA	
				Carga no dormente		Carga no dormente		Carga no dormente	
				(T)	(kN)	(T)	(kN)	(T)	(kN)
TR-57/0	0,02	5	D4	1,35	13,23	1,27	12,44	1,52	14,93
			D2	1,61	15,74	1,51	14,77	1,78	17,48
			D1	1,64	16,12	1,57	15,35	1,76	17,25
			D3	1,58	15,53	1,48	14,50	1,78	17,41
			D5	1,27	12,47	1,21	11,83	1,37	13,47
		10	D4	2,70	26,44	2,54	24,88	3,05	29,85
			D2	3,21	31,48	3,01	29,53	3,56	34,94
			D1	3,29	32,23	3,13	30,69	3,52	34,51
			D3	3,17	31,06	2,96	29,01	3,55	34,81
			D5	2,54	24,93	2,41	23,65	2,75	26,95
		12,5	D4	3,37	33,06	3,17	31,11	3,81	37,31
			D2	4,01	39,35	3,77	36,92	4,46	43,68
			D1	4,11	40,28	3,91	38,37	4,40	43,14
			D3	3,96	38,83	3,70	36,26	4,44	43,52
			D5	3,18	31,17	3,02	29,56	3,44	33,69
		15	D4	4,05	39,67	3,81	37,32	4,57	44,78
			D2	4,82	47,22	4,52	44,30	5,35	52,41
			D1	4,93	48,34	4,70	46,04	5,28	51,75
			D3	4,75	46,60	4,44	43,52	5,33	52,23
			D5	3,82	37,40	3,62	35,47	4,12	40,42
	0,04	5	D4	1,46	14,33	1,38	13,55	1,66	16,26
			D2	1,74	17,10	1,66	16,28	1,86	18,24
			D1	1,75	17,13	1,71	16,72	1,73	16,92
			D3	1,73	16,98	1,64	16,06	1,90	18,64
			D5	1,36	13,35	1,30	12,74	1,47	14,37
		10	D4	2,92	28,66	2,76	27,10	3,32	32,54
			D2	3,49	34,19	3,32	32,57	3,72	36,48
			D1	3,49	34,25	3,41	33,45	3,45	33,85
			D3	3,47	33,97	3,28	32,12	3,80	37,28
			D5	2,72	26,71	2,60	25,49	2,93	28,75
		12,5	D4	3,65	35,82	3,46	33,88	4,15	40,68
			D2	4,36	42,74	4,15	40,70	4,65	45,60
			D1	4,37	42,82	4,27	41,81	4,32	42,31
			D3	4,33	42,46	4,09	40,15	4,75	46,60
			D5	3,40	33,37	3,25	31,85	3,67	35,93
		15	D4	4,39	42,99	4,15	40,65	4,98	48,80
			D2	5,23	51,28	4,98	48,84	5,58	54,72
			D1	5,24	51,38	5,12	50,17	5,18	50,77
			D3	5,20	50,95	4,91	48,18	5,70	55,92
			D5	4,09	40,05	3,90	38,23	4,40	43,12
	0,06	5	D4	1,53	15,00	1,45	14,19	1,76	17,26
			D2	1,81	17,72	1,74	17,03	1,89	18,54
			D1	1,77	17,31	1,76	17,22	1,65	16,17
			D3	1,81	17,73	1,72	16,88	1,98	19,40
			D5	1,41	13,86	1,35	13,25	1,53	15,02
		10	D4	3,06	30,00	2,90	28,38	3,52	34,52
			D2	3,61	35,42	3,47	34,05	3,78	37,07
			D1	3,53	34,63	3,51	34,45	3,30	32,32
			D3	3,62	35,45	3,44	33,75	3,96	38,80
			D5	2,83	27,72	2,70	26,49	3,06	30,03
		12,5	D4	3,83	37,50	3,62	35,47	4,40	43,16
			D2	4,52	44,27	4,34	42,56	4,73	46,34
			D1	4,42	43,28	4,39	43,06	4,12	40,41
			D3	4,52	44,31	4,30	42,18	4,95	48,50
			D5	3,53	34,65	3,38	33,12	3,83	37,54
		15	D4	4,59	45,00	4,34	42,57	5,28	51,78
			D2	5,42	53,14	5,21	51,08	5,67	55,61
			D1	5,30	51,94	5,27	51,67	4,95	48,49
			D3	5,42	53,18	5,16	50,62	5,94	58,20
			D5	4,24	41,58	4,05	39,75	4,60	45,05

Tabela A1: Cargas calculadas para os 5 dormentes mais carregados, em função da carga por roda, coeficiente de Winkler e tipo de bitola. (continuação)

Trilho/Desgaste	Coeficiente de Winkler (N/mm3)	Carga/roda (T)	Dormente mais carregado	BITOLA LARGA		BITOLA METRICA		BITOLA MISTA	
				Carga no dormente		Carga no dormente		Carga no dormente	
				(T)	(kN)	(T)	(kN)	(T)	(kN)
TR-57/0	0,08	5	D4	1,58	15,52	1,50	14,66	1,85	18,10
			D2	1,84	18,07	1,78	17,47	1,91	18,71
			D1	1,76	17,22	1,77	17,38	1,57	15,35
			D3	1,86	18,22	1,78	17,40	2,04	20,01
			D5	1,45	14,25	1,39	13,60	1,59	15,54
		10	D4	3,17	31,05	2,99	29,31	3,69	36,20
			D2	3,69	36,14	3,56	34,95	3,82	37,42
			D1	3,51	34,43	3,55	34,77	3,13	30,71
			D3	3,72	36,43	3,55	34,81	4,08	40,03
			D5	2,91	28,48	2,77	27,20	3,17	31,09
		12,5	D4	3,96	38,80	3,74	36,64	4,62	45,25
			D2	4,61	45,18	4,45	43,67	4,77	46,77
			D1	4,39	43,04	4,43	43,46	3,92	38,38
			D3	4,65	45,54	4,44	43,50	5,10	50,03
			D5	3,63	35,61	3,47	34,00	3,96	38,86
		15	D4	4,75	46,57	4,49	43,97	5,54	54,29
			D2	5,53	54,21	5,35	52,41	5,73	56,13
			D1	5,27	51,65	5,32	52,15	4,70	46,06
			D3	5,57	54,65	5,32	52,20	6,12	60,04
			D5	4,36	42,73	4,16	40,80	4,76	46,63
	0,10	5	D4	1,63	15,97	1,53	15,04	1,92	18,83
			D2	1,87	18,31	1,81	17,77	1,92	18,83
			D1	1,73	17,00	1,77	17,38	1,49	14,56
			D3	1,90	18,59	1,81	17,78	2,10	20,55
			D5	1,49	14,57	1,42	13,89	1,63	15,99
		10	D4	3,26	31,93	3,07	30,08	3,84	37,67
			D2	3,74	36,62	3,63	35,54	3,84	37,67
			D1	3,47	34,00	3,55	34,77	2,97	29,13
			D3	3,79	37,18	3,63	35,57	4,19	41,11
			D5	2,97	29,14	2,83	27,77	3,26	31,99
		12,5	D4	4,07	39,92	3,84	37,60	4,80	47,09
			D2	4,67	45,77	4,53	44,42	4,80	47,09
			D1	4,34	42,50	4,43	43,46	3,71	36,41
			D3	4,74	46,47	4,54	44,47	5,24	51,38
			D5	3,71	36,41	3,54	34,72	4,06	39,98
		15	D4	4,89	47,90	4,60	45,12	5,76	56,50
			D2	5,60	54,93	5,44	53,31	5,76	56,50
			D1	5,20	51,00	5,32	52,15	4,46	43,69
			D3	5,69	55,76	5,44	53,36	6,29	61,66
			D5	4,46	43,70	4,25	41,66	4,89	47,98
	0,12	5	D4	1,67	16,36	1,57	15,37	1,99	19,49
			D2	1,89	18,48	1,83	17,98	1,93	18,94
			D1	1,71	16,73	1,76	17,29	1,41	13,81
			D3	1,93	18,89	1,85	18,09	2,15	21,05
			D5	1,52	14,85	1,44	14,13	1,67	16,38
		10	D4	3,34	32,73	3,14	30,75	3,98	38,98
			D2	3,77	36,97	3,67	35,98	3,86	37,87
			D1	3,41	33,45	3,53	34,58	2,82	27,63
			D3	3,86	37,79	3,69	36,18	4,29	42,09
			D5	3,03	29,71	2,88	28,27	3,34	32,76
		12,5	D4	4,17	40,91	3,92	38,43	4,97	48,73
			D2	4,71	46,22	4,59	44,97	4,83	47,34
			D1	4,27	41,81	4,41	43,23	3,52	34,54
			D3	4,82	47,25	4,61	45,22	5,37	52,62
			D5	3,79	37,14	3,60	35,33	4,18	40,95
		15	D4	5,01	49,10	4,70	46,12	5,97	58,48
			D2	5,66	55,45	5,50	53,96	5,80	56,81
			D1	5,12	50,18	5,29	51,88	4,23	41,45
			D3	5,78	56,69	5,54	54,27	6,44	63,14
			D5	4,55	44,56	4,32	42,40	5,01	49,15

Tabela A1: Cargas calculadas para os 5 dormentes mais carregados, em função da carga por roda, coeficiente de Winkler e tipo de bitola. (continuação)

Trilho/Desgaste	Coeficiente de Winkler (N/mm3)	Carga/roda (T)	Dormente mais carregado	BITOLA LARGA		BITOLA MÉTRICA		BITOLA MISTA	
				Carga no dormente		Carga no dormente		Carga no dormente	
				(T)	(kN)	(T)	(kN)	(T)	(kN)
TR-57/0	0,14	5	D4	1,71	16,73	1,60	15,67	2,04	20,04
			D2	1,90	18,63	1,85	18,16	1,94	19,03
			D1	1,68	16,42	1,75	17,15	1,34	13,11
			D3	1,96	19,17	1,87	18,35	2,19	21,50
			D5	1,54	15,12	1,46	14,35	1,71	16,72
		10	D4	3,41	33,46	3,20	31,35	4,10	40,18
			D2	3,80	37,25	3,70	36,31	3,88	38,05
			D1	3,35	32,85	3,50	34,31	2,68	26,23
			D3	3,91	38,33	3,74	36,69	4,39	43,01
			D5	3,08	30,24	2,93	28,71	3,41	33,43
		12,5	D4	4,27	41,82	4,00	39,18	5,12	50,22
			D2	4,75	46,56	4,63	45,39	4,85	47,57
			D1	4,19	41,06	4,37	42,88	3,34	32,78
			D3	4,89	47,92	4,68	45,87	5,48	53,75
			D5	3,86	37,79	3,66	35,88	4,26	41,79
		15	D4	5,12	50,19	4,80	47,02	6,15	60,26
			D2	5,70	55,87	5,56	54,47	5,82	57,08
			D1	5,03	49,27	5,25	51,46	4,01	39,33
			D3	5,87	57,50	5,61	55,04	6,58	64,51
			D5	4,63	45,35	4,39	43,06	5,12	50,16
TR-57/25	0,14	15	D4	5,27	51,67	4,92	48,20	6,39	62,62
			D2	5,75	56,35	5,62	55,07	5,86	57,44
			D1	4,89	47,89	5,18	50,81	3,72	36,46
			D3	5,97	58,56	5,71	55,99	6,77	66,38
			D5	4,73	46,40	4,48	43,91	5,24	51,41
TR-50/25	0,14	15	D4	5,52	54,15	5,12	50,16	6,77	66,40
			D2	5,82	57,06	5,70	55,85	5,92	58,05
			D1	4,61	45,24	5,03	49,30	3,23	31,64
			D3	6,15	60,31	5,86	57,47	7,10	69,56
			D5	4,91	48,15	4,62	45,32	5,43	53,25

Tabela A2: Valores das tensões máximas (T_{max}) atuantes na plataforma para a bitola larga, trilhos TR-57 e TR-50, com desgaste de boleto de 25 %.

Espessura da camada de lastro h (cm)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-57 desgaste boleto 25 %)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-50 desgaste boleto 25 %)
15	191,36	181,04
20	188,97	179,23
25	191,73	182,47
30	197,51	188,73
35	205,04	196,77
50	231,08	224,51
70	262,44	258,15

Tabela A.3 - Carga atuante no dormente e tensão dormente/lastro, calculadas em função do tipo de trilho e do desgaste do boleto, para a bitola métrica.

Tipo de trilho	Desgaste no boleto (%)	Numero do dormente	Carga atuante no dormente (T)	Tensão média dormente/lastro (kPa)
TR-57	0	D4	4,80	2,73
		D2	5,56	3,32
		D1	5,25	3,12
		D3	5,61	3,32
		D5	4,39	2,73
TR-57	25	D4	4,92	2,79
		D2	5,62	3,37
		D1	5,18	3,08
		D3	5,71	3,37
		D5	4,48	2,79
TR-50	25	D4	5,12	2,90
		D2	5,70	3,40
		D1	5,03	2,99
		D3	5,86	3,44
		D5	4,62	2,90

Tabela A4: Valores das tensões máximas (T_{max}) atuantes na plataforma para a bitola métrica, trilhos TR-57 sem desgaste de boleto e trilhos TR-57 e TR-50, com desgaste de boleto de 25 %.

Espessura da camada de lastro h (cm)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-57 desgaste boleto 0 %)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-57 desgaste boleto 25 %)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-50 desgaste boleto 25 %)
15	268,66	265,39	257,94
20	264,81	261,79	254,82
25	267,12	264,35	257,83
30	272,63	270,15	264,11
35	279,82	277,65	272,13
50	304,17	302,98	299,13
70	331,36	331,38	329,60

Tabela A.5: Pontos (em % da tensão máxima) das curvas de distribuição de tensões ao longo do eixo transversal da via para a bitola métrica.

X (cm)	TR-57 Desgaste 0 % h=15 cm	TR-57 Desgaste 25 % h=15 cm	TR-50 Desgaste 25 % h=15 cm	TR-57 Desgaste 0 % h=35 cm
0	0,1	0,1	0,1	1,1
20	0,2	0,2	0,2	1,7
40	0,3	0,3	0,3	2,9
60	0,6	0,6	0,6	5,5
80	1,6	1,7	1,7	11,6
100	8,0	8,1	8,1	27,4
120	65,3	65,3	65,3	61,5
140	97,5	97,5	97,5	89,3
160	100,0	100,0	100,0	99,3
180	99,4	99,4	99,4	96,7
200	91,8	91,8	91,8	81,7
220	33,8	33,8	33,8	51,9
240	6,6	6,6	6,6	31,9
260	14,9	14,9	14,9	38,8
280	75,4	75,4	75,4	68,3
300	97,5	97,5	97,5	91,9
320	100,0	100,0	100,0	99,7
340	99,4	99,4	99,4	96,0
360	88,4	88,4	88,4	77,3
380	22,1	22,1	22,1	42,3
400	3,0	3,0	3,1	17,6
420	0,9	0,9	0,9	7,9
440	0,4	0,5	0,5	4,0

Tabela A.6- Carga atuante no dormente e tensão dormente/lastro, calculadas em função do tipo de trilho e do desgaste do boleto, para a bitola mista.

Tipo de trilho	Desgaste no boleto (%)	Numero do dormente	Carga atuante no dormente (T)	Tensão média SK1 dormente/lastro (kPa)	Tensão média SK2 dormente/lastro (kPa)
TR-57	0	D4	6,15	2,93	1,68
		D2	5,82	3,23	1,85
		D1	4,01	2,09	1,19
		D3	6,58	3,23	1,85
		D5	5,12	2,93	1,68
TR-57	25	D4	6,39	3,03	1,73
		D2	5,86	3,29	1,88
		D1	3,72	1,94	1,11
		D3	6,77	3,29	1,88
		D5	5,24	3,03	1,73
TR-50	25	D4	6,77	3,18	1,82
		D2	5,92	3,39	1,94
		D1	3,23	1,68	0,96
		D3	7,10	3,39	1,94
		D5	5,43	3,18	1,82

Tabela A.7 Valores das tensões máximas (T_{max}) atuantes na plataforma para a bitola mista, trilhos TR-57 sem desgaste de boleto e trilhos TR-57 e TR-50, com desgaste do boleto de 25 %.

Espessura da camada de lastro h (cm)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-57 desgaste boleto 0 %)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-57 desgaste boleto 25 %)	T_{max} (kPa) (Trilho TR-50 desgaste boleto 25 %)
15	209,48	194,47	168,46
20	203,45	188,92	163,72
25	197,58	183,53	159,16
30	191,48	177,95	154,49
35	185,35	172,39	159,11
50	231,22	226,07	216,37
70	289,47	286,16	279,83

Tabela A.8: Pontos (em % da tensão máxima) das curvas de distribuição de tensões ao longo do eixo transversal da via para a bitola mista.

X (cm)	TR-57 Desgaste 0 % h=15 cm	TR-57 Desgaste 0 % h=35 cm	TR-57 Desgaste 25 % h=15 cm	TR-50 Desgaste 25 % h=15 cm
0	0,1	1,6	0,1	0,1
20	0,1	2,4	0,1	0,1
40	0,2	3,9	0,2	0,2
60	0,4	6,5	0,4	0,5
80	0,9	11,8	0,9	1,0
100	3,0	25,0	3,0	3,0
120	19,1	46,3	20,8	20,9
140	53,2	74,2	54,3	54,4
160	58,9	89,9	59,8	60,0
180	59,9	95,6	60,5	60,7
200	60,5	94,7	60,3	60,5
220	59,8	87,6	59,6	59,7
240	57,4	75,6	57,5	57,7
260	42,0	59,8	41,3	41,4
280	20,2	55,9	22,2	22,2
300	79,8	80,1	81,3	81,3
320	98,6	98,2	99,2	99,2
340	100,0	97,8	99,2	99,2
360	87,4	77,9	84,8	84,8
380	22,2	40,1	22,0	22,0
400	2,5	14,7	2,5	2,5
420	0,6	5,6	0,6	0,6
440	0,2	2,5	0,2	0,2
460	0,1	1,3	0,1	0,1
480	0,1	0,8	0,1	0,1

ANEXO B – RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS

Tabela B.1: Valores do coeficiente de segurança FS à ruptura circular obtidos para a bitola larga, em função da altura H (m) do talude, da distância “d” da saia do lastro à crista do talude, tensão na plataforma e para cada inclinação de talude.

BITOLA LARGA

TR 57 Desgaste 0 %
 espessura da camada de lastro: 0,35 m
 TALUDE 1:1

Tensão (kPa)	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m			
	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	
0	6,46	3,37	2,33	1,62	6,56	3,42	2,36	1,62	6,70	3,47	2,37	1,63	6,83	3,47	2,40	1,64	7,20	3,68	2,47	
40	2,66	1,89	1,67	1,27	2,81	1,92	1,59	1,28	2,87	1,95	1,61	1,29	2,72	1,96	1,63	1,30	2,90	2,06	1,69	
80	1,97	1,60	1,28	1,10	2,01	1,51	1,30	1,11	2,06	1,53	1,31	1,12	2,08	1,53	1,33	1,13	2,13	1,61	1,38	
120	1,74	1,31	1,13	0,99	1,77	1,32	1,15	1,00	1,78	1,34	1,16	1,01	1,79	1,34	1,17	1,01	1,82	1,40	1,21	
160	1,61	1,20	1,04	0,91	1,63	1,21	1,05	0,92	1,63	1,22	1,06	0,93	1,63	1,22	1,07	0,94	1,64	1,27	1,11	
200	1,53	1,13	0,98	0,86	1,53	1,14	0,99	0,87	1,54	1,15	1,00	0,87	1,53	1,15	1,01	0,88	1,52	1,19	1,04	
240	1,47	1,08	0,93	0,82	1,47	1,09	0,94	0,82	1,47	1,10	0,95	0,83	1,46	1,10	0,96	0,84	1,43	1,13	0,99	

TALUDE 1:1,5

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m			
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	
0	7,34	3,77	2,72	1,96	7,46	3,82	2,74	1,97	7,58	3,86	2,76	1,98	7,70	3,90	2,78	1,99	8,06	4,04	2,84	
40	2,76	2,10	1,82	1,56	2,81	2,13	1,84	1,57	2,85	2,16	1,86	1,58	2,88	2,18	1,88	1,59	2,99	2,27	1,94	
80	2,06	1,64	1,48	1,34	2,08	1,65	1,49	1,36	2,10	1,67	1,51	1,38	2,11	1,69	1,52	1,37	2,17	1,76	1,57	
120	1,78	1,41	1,29	1,20	1,78	1,43	1,30	1,21	1,79	1,44	1,32	1,22	1,79	1,46	1,33	1,26	1,80	1,50	1,37	
160	1,61	1,28	1,17	1,10	1,60	1,29	1,18	1,11	1,60	1,30	1,19	1,12	1,60	1,31	1,20	1,13	1,60	1,34	1,24	
200	1,50	1,18	1,08	1,03	1,49	1,19	1,08	1,04	1,49	1,20	1,10	1,04	1,48	1,21	1,11	1,05	1,48	1,23	1,14	
240	1,42	1,11	1,02	0,97	1,41	1,12	1,03	0,98	1,41	1,13	1,03	0,98	1,40	1,13	1,04	0,99	1,39	1,15	1,07	

TALUDE 1:2

Tensão (kPa)	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m		
	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3
0	8,04	4,13	3,07	2,27	8,18	4,17	3,09	2,28	8,32	4,21	3,11	2,29	8,46	4,25	3,13	2,30	8,90	4,37	3,18
40	2,87	2,31	2,07	1,84	2,90	2,33	2,09	1,85	2,94	2,36	2,11	1,86	2,97	2,39	2,13	1,88	3,08	2,47	2,18
80	2,10	1,79	1,67	1,58	2,11	1,79	1,68	1,58	2,12	1,81	1,70	1,59	2,14	1,83	1,71	1,60	2,18	1,89	1,76
120	1,76	1,50	1,44	1,41	1,77	1,52	1,45	1,41	1,77	1,53	1,47	1,42	1,78	1,55	1,48	1,43	1,80	1,59	1,52
160	1,57	1,34	1,29	1,28	1,58	1,35	1,30	1,29	1,58	1,36	1,31	1,30	1,58	1,37	1,32	1,31	1,59	1,41	1,36
200	1,46	1,23	1,18	1,18	1,46	1,24	1,19	1,19	1,46	1,25	1,20	1,20	1,46	1,26	1,21	1,21	1,46	1,29	1,25
240	1,38	1,15	1,11	1,11	1,37	1,16	1,12	1,11	1,37	1,17	1,12	1,12	1,37	1,17	1,13	1,13	1,37	1,20	1,18

TALUDE 1,5:1

Tensão (kPa)	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m			
	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	
0	5,85	2,95	2,04	1,36	6,00	2,99	2,06	1,37	6,13	3,03	2,09	1,38	6,26	3,07	2,12	1,39	6,63	3,20	2,16	
40	2,39	1,75	1,39	1,07	2,44	1,78	1,41	1,08	2,49	1,81	1,43	1,09	2,55	1,84	1,45	1,11	2,72	1,93	1,51	
80	1,87	1,40	1,15	0,93	1,90	1,42	1,16	0,94	1,94	1,44	1,18	0,95	1,97	1,46	1,20	0,96	2,08	1,52	1,25	
120	1,68	1,24	1,02	0,84	1,69	1,25	1,04	0,85	1,71	1,27	1,05	0,86	1,74	1,28	1,06	0,87	1,81	1,33	1,11	
160	1,55	1,14	0,95	0,78	1,57	1,15	0,96	0,79	1,59	1,17	0,97	0,80	1,61	1,18	0,98	0,81	1,65	1,22	1,02	
200	1,48	1,08	0,89	0,74	1,50	1,09	0,90	0,75	1,51	1,10	0,92	0,75	1,53	1,11	0,93	0,76	1,55	1,14	0,96	
240	1,43	1,04	0,88	0,71	1,45	1,05	0,87	0,71	1,46	1,06	0,88	0,72	1,48	1,06	0,89	0,73	1,48	1,09	0,91	

Tabela B.2: Valores do coeficiente de segurança FS à ruptura circular obtidos para a bitola métrica, em função da altura H (m) do talude, da distância “d” da saia do lastro à crista do talude, tensão na plataforma e para cada inclinação de talude.

BITOLA METRICA

TR 57 Desgaste 0 %
espessura da camada de lastro: 0,35 m
TALUDE 1:1

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m				60 cm	
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=6
0	5,87	3,14	2,22	1,67	5,99	3,18	2,24	1,58	6,10	3,23	2,26	1,69	6,22	3,28	2,28	1,60	6,58	3,42	2,35	1,62		
40	2,42	1,82	1,54	1,27	2,48	1,85	1,56	1,28	2,55	1,88	1,58	1,29	2,61	1,91	1,60	1,30	2,75	2,01	1,66	1,33		
80	1,84	1,43	1,25	1,10	1,86	1,45	1,27	1,11	1,89	1,47	1,29	1,12	1,91	1,50	1,31	1,13	1,99	1,57	1,36	1,16		
120	1,58	1,24	1,10	0,99	1,59	1,26	1,11	1,00	1,60	1,27	1,13	1,01	1,61	1,29	1,14	1,01	1,64	1,35	1,19	1,04		
160	1,42	1,13	1,00	0,91	1,43	1,14	1,02	0,92	1,43	1,16	1,03	0,93	1,43	1,17	1,04	0,93	1,45	1,21	1,08	0,98		
200	1,32	1,04	0,93	0,85	1,32	1,09	0,95	0,86	1,32	1,08	0,96	0,87	1,32	1,08	0,97	0,87	1,33	1,11	1,00	0,90		
240	1,25	0,98	0,88	0,80	1,26	0,99	0,89	0,81	1,25	1,00	0,90	0,82	1,25	1,01	0,91	0,83	1,25	1,04	0,94	0,85		
280	1,20	0,94	0,84	0,77	1,19	0,96	0,85	0,78	1,19	0,95	0,86	0,78	1,19	0,96	0,87	0,79	1,19	0,99	0,89	0,82		

TALUDE 1:1,5

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m				60 cm	
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=6
0	6,78	3,57	2,63	1,91	6,89	3,61	2,65	1,92	7,00	3,65	2,66	1,93	7,12	3,69	2,68	1,94	7,46	3,82	2,74	1,97		
40	2,62	2,07	1,83	1,60	2,66	2,11	1,84	1,58	2,70	2,13	1,86	1,59	2,75	2,16	1,88	1,60	2,88	2,25	1,94	1,63		
80	1,90	1,80	1,48	1,38	1,92	1,83	1,50	1,37	1,94	1,85	1,51	1,38	1,96	1,87	1,53	1,39	2,03	1,74	1,56	1,42		
120	1,69	1,36	1,28	1,22	1,60	1,38	1,30	1,23	1,61	1,39	1,31	1,24	1,62	1,41	1,33	1,25	1,66	1,46	1,37	1,28		
160	1,41	1,21	1,15	1,12	1,42	1,22	1,16	1,13	1,43	1,24	1,18	1,14	1,43	1,25	1,19	1,16	1,46	1,29	1,23	1,22		
200	1,30	1,11	1,06	1,04	1,31	1,12	1,07	1,05	1,31	1,13	1,08	1,06	1,32	1,15	1,09	1,07	1,33	1,18	1,13	1,10		
240	1,23	1,04	0,99	0,98	1,23	1,05	1,00	0,99	1,23	1,06	1,01	1,00	1,23	1,07	1,02	1,00	1,24	1,10	1,05	1,03		
280	1,17	0,99	0,94	0,93	1,17	0,99	0,94	0,93	1,17	1,00	0,95	0,94	1,17	1,01	0,96	0,95	1,18	1,04	0,99	0,98		

TALUDE 1:2

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m				60 cm	
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=6
0	7,37	3,95	2,96	2,22	7,50	3,99	2,98	2,23	7,64	4,02	3,00	2,24	7,77	4,06	3,03	2,25	8,18	4,17	3,09	2,28		
40	2,76	2,31	2,09	1,86	2,80	2,34	2,11	1,87	2,84	2,37	2,14	1,88	2,89	2,40	2,16	1,89	3,02	2,49	2,21	1,92		
80	1,95	1,76	1,69	1,62	1,97	1,78	1,71	1,63	1,99	1,80	1,72	1,64	2,02	1,82	1,74	1,65	2,09	1,89	1,80	1,68		
120	1,61	1,47	1,45	1,45	1,62	1,49	1,47	1,46	1,64	1,51	1,48	1,47	1,65	1,53	1,50	1,48	1,70	1,58	1,55	1,51		
160	1,42	1,30	1,30	1,30	1,43	1,32	1,31	1,31	1,44	1,33	1,32	1,32	1,45	1,35	1,34	1,34	1,48	1,39	1,38	1,38		
200	1,30	1,19	1,18	1,18	1,31	1,20	1,20	1,19	1,32	1,21	1,21	1,21	1,32	1,22	1,22	1,22	1,35	1,26	1,26	1,26		
240	1,22	1,11	1,10	1,10	1,23	1,12	1,11	1,11	1,23	1,13	1,12	1,12	1,23	1,14	1,13	1,13	1,25	1,17	1,17	1,16		
280	1,16	1,04	1,04	1,04	1,16	1,05	1,05	1,04	1,17	1,08	1,06	1,05	1,17	1,07	1,07	1,06	1,18	1,10	1,09	1,09		

TALUDE 1,5:1

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m				60 cm	
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=2	H=3	H=6	H=1	H=6
0	6,28	2,76	1,92	1,32	6,40	2,80	1,94	1,33	6,52	2,84	1,97	1,33	6,64	2,88	1,99	1,34	6,90	2,99	2,06	1,37		
40	2,21	1,65	1,33	1,08	2,27	1,68	1,35	1,07	2,34	1,71	1,38	1,08	2,40	1,74	1,40	1,09	2,60	1,84	1,46	1,12		
80	1,69	1,31	1,10	0,92	1,74	1,33	1,12	0,93	1,78	1,35	1,13	0,94	1,83	1,38	1,15	0,95	1,94	1,45	1,21	0,98		
120	1,48	1,14	0,97	0,82	1,52	1,18	0,99	0,93	1,55	1,18	1,00	0,84	1,59	1,20	1,02	0,85	1,64	1,25	1,06	0,89		
160	1,37	1,05	0,89	0,76	1,40	1,08	0,90	0,77	1,43	1,08	0,92	0,78	1,45	1,09	0,93	0,79	1,46	1,14	0,97	0,82		
200	1,29	0,98	0,83	0,72	1,32	1,00	0,85	0,72	1,34	1,01	0,86	0,73	1,34	1,02	0,87	0,74	1,34	1,08	0,91	0,77		
240	1,24	0,94	0,79	0,68	1,27	0,95	0,80	0,69	1,27	0,96	0,82	0,70	1,27	0,97	0,83	0,70	1,26	1,00	0,86	0,73		
280	1,21	0,90	0,76	0,65	1,22	0,91	0,77	0,66	1,22	0,92	0,78	0,67	1,21	0,93	0,79	0,68	1,20	0,96	0,82	0,70		

Tabela B.3: Valores do coeficiente de segurança FS à ruptura circular obtidos para a bitola mista, em função da altura H (m) do talude, da distância “d” da saia do lastro à crista do talude, tensão na plataforma e para cada inclinação de talude.

BITOLA MISTA

TR 57 Desgaste 0 %

espessura da camada de lastro: 0,35 m

TALUDE 1:1

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m			
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5
0	6,46	3,37	2,33	1,62	6,58	3,42	2,35	1,62	6,70	3,47	2,37	1,63	6,83	3,52	2,40	1,64	7,20	3,68	2,47	1,67
40	2,60	1,94	1,80	1,29	2,62	1,98	1,61	1,29	2,68	1,99	1,62	1,30	2,74	2,01	1,65	1,31	2,92	2,10	1,71	1,34
80	1,99	1,53	1,31	1,12	2,00	1,55	1,33	1,13	2,04	1,57	1,34	1,14	2,09	1,59	1,36	1,15	2,18	1,66	1,41	1,18
120	1,75	1,34	1,16	1,01	1,74	1,36	1,17	1,02	1,77	1,37	1,19	1,03	1,81	1,39	1,20	1,04	1,85	1,44	1,24	1,07
160	1,61	1,23	1,07	0,84	1,60	1,24	1,06	0,84	1,63	1,26	1,09	0,85	1,65	1,27	1,10	0,86	1,67	1,31	1,14	0,89
200	1,53	1,16	1,00	0,88	1,51	1,16	1,01	0,89	1,54	1,18	1,02	0,90	1,55	1,19	1,03	0,91	1,54	1,22	1,07	0,93
240	1,47	1,10	0,96	0,84	1,45	1,11	0,96	0,85	1,46	1,12	0,97	0,85	1,47	1,13	0,98	0,86	1,45	1,15	1,01	0,89

TALUDE 1:1,5

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m			
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5
0	7,34	3,77	2,72	1,96	7,46	3,82	2,74	1,97	7,58	3,86	2,76	1,98	7,70	3,90	2,78	1,99	8,06	4,04	2,84	2,01
40	2,84	2,14	1,85	1,57	2,88	2,17	1,87	1,58	2,92	2,20	1,88	1,59	2,95	2,23	1,90	1,60	3,07	2,31	1,96	1,63
80	2,11	1,69	1,51	1,38	2,12	1,70	1,53	1,37	2,14	1,72	1,54	1,38	2,16	1,74	1,56	1,39	2,22	1,80	1,61	1,42
120	1,80	1,46	1,33	1,23	1,81	1,47	1,34	1,24	1,82	1,48	1,35	1,24	1,83	1,50	1,37	1,25	1,85	1,55	1,41	1,28
160	1,64	1,31	1,20	1,13	1,63	1,32	1,22	1,14	1,63	1,33	1,23	1,15	1,63	1,35	1,24	1,16	1,64	1,36	1,27	1,18
200	1,52	1,21	1,11	1,06	1,51	1,22	1,12	1,07	1,51	1,23	1,13	1,07	1,51	1,24	1,14	1,08	1,50	1,27	1,18	1,11
240	1,43	1,14	1,05	1,00	1,43	1,15	1,06	1,00	1,42	1,15	1,06	1,01	1,42	1,16	1,07	1,02	1,41	1,19	1,10	1,05

TALUDE 1:2

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m			
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5
0	8,04	4,13	3,07	2,27	8,18	4,17	3,09	2,28	8,32	4,21	3,11	2,29	8,46	4,25	3,13	2,30	8,90	4,37	3,18	2,32
40	2,94	2,35	2,10	1,85	2,98	2,38	2,12	1,85	3,01	2,41	2,13	1,86	3,05	2,43	2,15	1,87	3,16	2,51	2,21	1,90
80	2,15	1,83	1,71	1,60	2,17	1,84	1,72	1,61	2,19	1,86	1,74	1,62	2,20	1,88	1,75	1,63	2,25	1,94	1,80	1,66
120	1,80	1,55	1,48	1,44	1,81	1,56	1,50	1,45	1,82	1,58	1,51	1,46	1,82	1,59	1,52	1,47	1,85	1,64	1,57	1,49
160	1,61	1,38	1,33	1,32	1,61	1,39	1,34	1,33	1,61	1,40	1,35	1,34	1,62	1,42	1,37	1,35	1,63	1,45	1,40	1,37
200	1,48	1,27	1,22	1,22	1,48	1,28	1,23	1,23	1,48	1,28	1,24	1,24	1,48	1,29	1,25	1,25	1,49	1,33	1,29	1,28
240	1,39	1,18	1,14	1,14	1,39	1,19	1,15	1,15	1,39	1,20	1,16	1,16	1,39	1,21	1,17	1,17	1,39	1,23	1,20	1,20

TALUDE 1,5:1

	DISTANCIA d=0,0				DISTANCIA d=0,10m				DISTANCIA d=0,20m				DISTANCIA d=0,30m				DISTANCIA d=0,60m			
Tensão (kPa)	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5	H=1	H=2	H=3	H=5
0	5,88	2,95	2,04	1,38	6,00	2,99	2,06	1,37	6,13	3,03	2,09	1,38	6,25	3,07	2,12	1,39	6,63	3,20	2,18	1,42
40	2,38	1,76	1,40	1,08	2,44	1,79	1,42	1,09	2,49	1,83	1,44	1,10	2,55	1,86	1,46	1,11	2,73	1,96	1,53	1,14
80	1,85	1,43	1,17	0,94	1,88	1,45	1,19	0,95	1,92	1,47	1,20	0,96	1,96	1,49	1,22	0,98	2,08	1,56	1,27	1,01
120	1,62	1,26	1,05	0,86	1,65	1,28	1,06	0,87	1,68	1,30	1,07	0,88	1,71	1,31	1,09	0,89	1,81	1,36	1,13	0,92
160	1,50	1,17	0,97	0,80	1,53	1,18	0,98	0,81	1,55	1,19	0,99	0,82	1,58	1,21	1,01	0,83	1,66	1,24	1,04	0,85
200	1,43	1,10	0,91	0,76	1,45	1,11	0,93	0,77	1,47	1,15	0,94	0,77	1,49	1,13	0,95	0,78	1,56	1,17	0,98	0,81
240	1,38	1,06	0,87	0,72	1,39	1,06	0,88	0,73	1,41	1,07	0,90	0,74	1,43	1,08	0,90	0,75	1,49	1,11	0,94	0,77

Tabela B.4: Valores de FS em função das características do solo da plataforma, para a bitola larga, talude 1,5:1, d=0,0 e espessura e=0,70 m da camada CSP.

H (m)	PESO ESPECIFICO (kN/m ³)	COESAO (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO (graus)					
			0	5	10	15	20	25
1	16	5	0,21	0,48	0,73	0,97	1,21	1,39
		10	0,36	0,61	0,84	1,09	1,31	1,46
		15	0,48	0,72	0,96	1,20	1,41	1,53
		30	0,83	1,07	1,30	1,52	1,69	1,74
		60	1,50	1,74	1,89	1,89	1,89	1,90
	18	5	0,21	0,49	0,73	0,98	1,21	1,39
		10	0,36	0,61	0,85	1,09	1,32	1,47
		15	0,48	0,73	0,97	1,21	1,42	1,54
		30	0,83	1,07	1,31	1,52	1,69	1,74
		60	1,50	1,74	1,89	1,89	1,90	1,90
	20	5	0,21	0,49	0,74	0,98	1,22	1,40
		10	0,36	0,61	0,85	1,10	1,32	1,47
		15	0,48	0,73	0,97	1,22	1,42	1,54
		30	0,83	1,07	1,31	1,53	1,69	1,74
		60	1,50	1,74	1,89	1,89	1,90	1,90
5	16	5	0,09	0,21	0,32	0,43	0,53	0,64
		10	0,18	0,30	0,41	0,52	0,62	0,73
		15	0,28	0,39	0,50	0,60	0,71	0,82
		30	0,54	0,65	0,75	0,86	0,97	1,08
		60	1,05	1,15	1,26	1,37	1,48	1,60
	18	5	0,09	0,21	0,32	0,43	0,53	0,64
		10	0,18	0,30	0,41	0,52	0,62	0,73
		15	0,26	0,38	0,49	0,60	0,71	0,82
		30	0,53	0,63	0,74	0,85	0,97	1,08
		60	1,03	1,13	1,24	1,35	1,46	1,58
	20	5	0,09	0,21	0,32	0,43	0,53	0,64
		10	0,18	0,30	0,41	0,52	0,62	0,73
		15	0,26	0,38	0,49	0,60	0,71	0,82
		30	0,53	0,63	0,74	0,85	0,97	1,08
		60	1,03	1,13	1,24	1,35	1,46	1,58

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

CÉSAR LATTES

DESENVOLVIMENTO DE COLEÇÃO

Tabela B.5: Valores de FS em função das características da camada CSP, para a bitola larga, talude 1,5:1, d=0,0 e espessura e=0,70 m da camada CSP.

H (m)	PESO ESPECÍFICO (kN/m³)	COESAO (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO (graus)					
			0	5	10	15	20	25
1	16	5	0,22	0,55	0,88	1,17	1,43	1,69
		10	0,36	0,69	1,02	1,26	1,51	1,73
		15	0,50	0,83	1,11	1,35	1,60	1,77
	18	5	0,22	0,55	0,88	1,18	1,43	1,70
		10	0,36	0,69	1,02	1,26	1,52	1,73
		15	0,50	0,83	1,11	1,35	1,61	1,77
	20	5	0,22	0,55	0,88	1,19	1,44	1,70
		10	0,36	0,69	1,02	1,27	1,52	1,74
		15	0,50	0,83	1,11	1,35	1,61	1,78
5	16	5	0,20	0,51	0,67	0,70	0,73	0,76
		10	0,33	0,64	0,69	0,72	0,75	0,77
		15	0,47	0,66	0,70	0,73	0,76	0,78
	18	5	0,20	0,50	0,67	0,70	0,73	0,76
		10	0,33	0,63	0,68	0,72	0,74	0,77
		15	0,47	0,66	0,70	0,73	0,76	0,78
	20	5	0,19	0,50	0,67	0,70	0,73	0,76
		10	0,33	0,63	0,68	0,71	0,74	0,77
		15	0,46	0,66	0,70	0,73	0,76	0,78

Tabela B.6: Valores de FS em função das características da camada CSP, para o caso de plataforma plana, bitola larga, espessura e=0,70 m.da camada CSP.

PESO ESPECÍFICO (kN/m³)	COESAO (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO (graus)					
		0	5	10	15	20	25
16	5	0,43	1,43	1,87	2,02	2,18	2,34
	10	0,86	1,78	1,93	2,08	2,23	2,40
	15	1,29	1,84	1,98	2,13	2,29	2,45
18	5	0,43	1,44	1,87	2,02	2,18	2,34
	10	0,86	1,78	1,93	2,08	2,23	2,40
	15	1,29	1,83	1,98	2,13	2,29	2,45
20	5	0,43	1,44	1,87	2,02	2,18	2,34
	10	0,86	1,78	1,93	2,08	2,23	2,39
	15	1,29	1,83	1,98	2,13	2,29	2,45