



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

LETICIA ZANON CARVALHO

UTILIZAÇÃO DE REFORÇO GEOSSINTÉTICO EM VIAS
FERROVIÁRIAS

GUARATINGUETÁ
2011

LETICIA ZANON CARVALHO

**UTILIZAÇÃO DE REFORÇO GEOSSINTÉTICO EM VIAS
FERROVIÁRIAS**

Projeto Integrado apresentado na disciplina Projeto Integrado II do Departamento de Engenharia Civil da Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo de Oliveira

Co-Orientador: Eng. Msc. Cássio Alberto Teoro do Carmo

**GUARATINGUETÁ
2011**

C331u	Carvalho, Leticia Zanon Utilização de reforço geossintético em vias ferroviárias / Leticia Zanon Carvalho– Guaratinguetá : [s.n], 2011. 56 f. : il. Bibliografia : f. 41-43 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo de Oliveira Coorientador: Eng. M.e Cássio Alberto Teoro do Carmo 1. Ferrovias I. Título CDU 625.1
-------	--

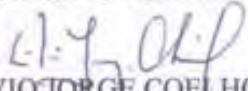
unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**UTILIZAÇÃO DE REFORÇO GEOSSINTÉTICO EM VIAS
FERROVIÁRIAS**

LETICIA ZANON CARVALHO

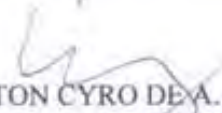
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

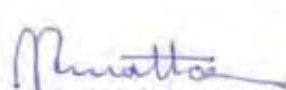
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMÕES
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE OLIVEIRA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. WELLINGTON CYRO DE A. LEITE
UNESP-FEG


Prof. Dr. JUERCIO TAVARES DE MATTOS
UNESP-FEG

Novembro de 2011

“O homem é do tamanho do
seu sonho”.
Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

- Ao prof. Luiz Eduardo de Oliveira por sua orientação prestada durante o trabalho.
- Ao co-orientador Engenheiro Cássio Alberto Teoro do Carmo, pela orientação e dedicação prestada ao longo do trabalho, e por ter permitido o acesso aos programas PLAXIS v.8 e FERROVIA 3.0.
- Ao Engenheiro Flávio Montez pela oportunidade de estágio na empresa Huesker, onde pude desenvolver este trabalho.
- Ao Engenheiro Fernando Ruiz, pela ajuda na utilização do programa PLAXIS.
- Ao meu colega Danilo Sampaio, pela ajuda na formatação do trabalho.

CARVALHO, L. Z.; **Utilização de Reforço Geossintético em Vias Ferroviárias**, 2011. 56 f. Projeto Integrado (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

RESUMO

O trabalho estuda o uso de geossintéticos em ferroviárias para reforço de subleito e separação de camadas da via. Foram estudados casos de seções testes instrumentadas feitos na Austrália (com aplicação de geocomposto), no Brasil (com aplicação de geotêxteis e geogrelhas) e na China (com aplicação de geotêxteis e geogrelhas). Também foram vistos métodos utilizados de dimensionamento com os geossintéticos.

Com base em um caso de estudo para implantação de geossintéticos em uma ferrovia na Alemanha, pôde-se simular uma estrutura ferroviária com e sem geossintéticos nos programas computacionais PLAXIS v.8 e FERROVIA 3.0, respectivamente. Com os resultados obtidos nas simulações, confirmaram-se as vantagens da implantação de geossintéticos na via.

Palavras-chave: Reforço, Ferrovia, Geossintético.

CARVALHO, L. Z.; **Use of Geosynthetic Reinforcement in Railways**. Projeto Integrado 56 p. (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

ABSTRACT

This report analyses the use of geosynthetics in railways for subgrade reinforcement and separation of the track layers. Cases of instrumented test sections were studied. These test sections were located in Australia (with geocomposite applications), Brazil (with geotextile and geodrid applications) and China (with geotextile and geodrid applications). Railway design methods using geosynthetics applications were analyzed as well.

Based on a studied case for implementation of geosynthetics in a German railway, a railway track was simulated with and without the use of geosynthetics, respectively on PLAXIS v.8 and FERROVIA 3.0 softwares. The performance benefits of the geosynthetics applications in railways were, therefore, confirmed, based on the simulation results.

Keywords: Reinforcement, Railway, Geosynthetic.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	3
3. METODOLOGIA	4
4. GEOSSINTÉTICOS.....	5
4.1. Classificação dos geossintéticos	5
4.1.1. Geotêxtil	6
4.1.2. Geogrelha.....	7
4.1.4. Geocélula	9
4.2. Propriedades dos geossintéticos.....	9
4.2.1. Resistência à tração de faixa larga ($T_{\max}$).....	9
4.2.2. Deformação nominal de ruptura ($\epsilon_{\max}$)	12
4.2.3. Resistência útil de trabalho (de longo prazo)	12
4.3. Emprego dos geossintéticos em vias ferroviárias	13
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
5.1. Pesquisa e desenvolvimento	14
5.1.1. Seções testes feitas em Taiwan, China (2005)	14
5.1.2. Trecho experimental na EFVM, Brasil (2005).....	17
5.1.3. Seção instrumentada, Austrália (2011).....	20
5.2. Métodos de dimensionamento de ferrovias com geogrelhas	23
5.2.1. Abordagem inglesa de projeto	23
5.2.2. Abordagem americana de projeto.....	25
5.3. Métodos computacionais de dimensionamento de via.....	26
5.3.1. FERROVIA (método sem aplicação de geossintéticos).....	26
5.3.2. PLAXIS v.8 (método com aplicação de geossintéticos)	26

6.	EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO PRÁTICO	28
6.1.	Dimensionamento no programa FERROVIA 3.0	29
6.2.	Dimensionamento no programa PLAXIS v.8	32
6.3.	Análise de resultados	39
7.	CONCLUSÕES.....	40
8.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Tipos de têxteis (Fonte : http://www.abint.org.br/ctg/geotexteis.php).	6
Figura 3-2 - Tipos de geogrelhas (Fonte : http://www.abint.org.br/ctg/geogrelhas.php).	7
Figura 3-3 – Tipos de geocompostos (Fonte : http://www.abint.org.br/ctg/geocompostos.php).	8
Figura 3-4 - Geocélula (Fonte : http://www.abint.org.br/ctg/geocelulas.php).	9
Figura 3-5 - Ensaio à tração faixa-larga (Fonte: http://www.abint.org.br/ctg/ensaios1.php).	10
Figura 3-6 - Resultados típicos de um ensaio à tração de geotêxteis (Fonte : ABNT NBR. 12.824/1993).	11
Figura 4-1 – (a) Projeto original da estrutura ferroviária. (b) Seção contaminada devido ao bombeamento de finos (Fonte: Kuo, C. et al., 2005 - modificado).	14
Figura 4-2 - Perfil das seções testes. (Fonte: Kuo, C. et al., 2005 - modificado).	15
Figura 4-3 - Recalque x Raiz quadrada do tempo. (Fonte: Kuo, C. et al. (2005)).	16
Figura 4-4 - metros de poro-pressão a 5 metros de profundidade. (Fonte: Kuo, C. et al., 2005).	16
Figura 4-5 - metros de poro-pressão a 10 metros de profundidade. (Fonte: Kuo, C. et al. 2005).	16
Figura 4-6 - Composição e arranjo geral das seções-teste no trecho experimental (Fonte: Palmeira G., 2005).	17
Figura 4-7 – Deformação da superestrutura para as seções 1 a 6. (Fonte: Palmeira G., 2005).	19
Figura 4-8 - Seção do leito da via (Fonte:Indraratna., 2011).	20
Figura 4-9 - Gráfico: deformação x No. de carregamentos cíclicos. (Fonte:Indraratna., 2011).	21
Figura 4-10 - Seção da via ferroviária simulada com elementos finitos (Fonte:Indraratna., 2011).	22
Figura 4-11 - Comparação dos dados de campo e os dados no PLAXIS 8.0 (Fonte:Indraratna., 2011).	23
Figura 4-12 - Espessura requerida do (lastro + sublastro) x Coesão não-drenada Cu (entre parenteses).	24
Figura 5-1 – Seção da ferrovia em estudo e planta baixa da mesma.	28
Figura 5-2 Pior caso de carregamento: truques de vagões GDT adjacentes	29

Figura 5-3 Esquema em planta de 2 vagões GDT com 32 tf/eixo;	29
Figura 5-4 – Pontos nodais (vermelho) na malha de elementos finitos do programa FERROVIA (RODRIGUES, 1993- adaptado).....	31
Figura 5-5- Modelo da estrutura ferroviária em elementos finitos.	33
Figura 5-6 – Modelagem da via férrea sem geogrelha.....	35
Figura 5-7 - Modelagem da via férrea com geogrelha na interface sublastro/subleito...36	
Figura 5-8 - Modelagem da via férrea com geogrelha na interface lastro/sublastro.....	37
Figura 5-9- Modelagem da via férrea com geogrelha nas interfaces lastro/sublastro e sublastro/subleito.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Funções dos vários geossintéticos nos projetos de engenharia. (Fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos/ VERTEMATTI, 2004).	5
Tabela 4-1 – Características gerais das seções teste. (Fonte: Fernandes G., 2005).	18
Tabela 4-2 - Características do lastro novo, lastro reciclado e materiais do sublastro (INDRARATNA et al., 2011)	21
Tabela 4-3 - Rigidez do leito.....	24
Tabela 5-1 Parâmetros das Camadas da Ferrovia	28
Tabela 5-2 - Deslocamento Máximo do Trilho e Dormente	32
Tabela 5-3 Dados do Dormente	32
Tabela 5-4 Dados do Lastro	32
Tabela 5-5 Dados do Sublastro	33
Tabela 5-6 Dados do subleito.....	33

1. INTRODUÇÃO

A infraestrutura ferroviária é composta basicamente pelo terrapleno e pelas obras relacionadas à drenagem (rebaixamento do nível de água quando necessário), terraplenagem e obras de contenções. A estrutura deve ser construída provendo estabilidade, resistência a esforços verticais, horizontais e durabilidade.

Os sistemas de drenagem, compostos por drenos, bueiros, canaletas e valas, evitam a degradação dos lastros, dormentes, e trilhos causados pelas águas pluviais, pois promovem um escoamento satisfatório das águas. As seções de terraplenagens são compostas por cortes e aterros do solo para compor a plataforma. As obras de contenções, compostas de muros de arrimo e outros muros de contenção, têm o objetivo de proteger a via ferroviária.

O terrapleno, composto pelo solo do subleito, deve ter uma espessura e capacidade de carga adequada para resistir às tensões de tráfego induzidas na interface sublastro/subleito, e evitar bombeamento de solos finos do subleito para a camada do lastro e sublastro (através da percolação da água do subleito para o topo da estrutura) proporcionando assim a estabilidade da via.

Para evitar o bombeamento de finos e reforçar subleitos instáveis, evitando a substituição dos mesmos, são aplicados geossintéticos nas camadas de estrutura da via ferroviária. Os geossintéticos, geralmente aplicados na interface lastro/sublastro e sublastro/subleito são utilizados para separação, drenagem, reforço e filtração das camadas do solo.

Para a separação das camadas de solo, podem ser aplicados geotêxteis ou um geocomposto com tamanho de abertura compatível com a granulometria das camadas a serem separadas. Assim, evita-se o bombeamento dos solos finos do subleito para a camada do lastro. Para a drenagem, são aplicados geocompostos para a prevenção do acúmulo de águas pluviais, evitando assim a deterioração das camadas de lastro e sublastro e o bombeamento de finos do subleito. Para o reforço de subleitos instáveis, aplicam-se geogrelhas ou geocélulas para aumentar a capacidade de carga desta camada, devido a uma melhor distribuição de tensões, evitando-se assim a substituição do solo do subleito. Para desempenhar a função de filtração, são aplicados geotêxteis para permitir a passagem de água do subleito, retendo apenas as partículas sólidas dos finos. Para que isto ocorra, o geotêxtil deve atender aos critérios de permeabilidade e filtro.

No Brasil, as principais empresas de geogrelhas, geotêxteis tecidos e não tecidos, e geocompostos utilizados para reforço e separação atuantes no mercado são a Huesker, Maccaferri, e Bidim.

2. OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo estudar e analisar aplicações de geossintéticos como reforço de solo em ferrovias, e os respectivos métodos desenvolvidos de dimensionamento. Com base nessa análise estudar as vantagens e desvantagens desse uso, tanto econômicas, quanto ambientais e construtivas.

3. METODOLOGIA

No seguinte trabalho, o procedimento metodológico é teórico, baseado em aplicações que foram desenvolvidas e publicadas, disponíveis na literatura.

No capítulo 4 são apresentadas as características dos geossintéticos, detalhando os principais produtos utilizados em ferrovia. São apresentados também as principais propriedades dos geossintéticos, e o principal ensaio para controle de qualidade do produto.

No capítulo 5 são estudados diferentes casos de utilização de geossintéticos em ferrovias, baseado principalmente em artigos e teses de mestrado e doutorado. Os casos estudados são de trechos experimentais e seções testes monitoradas em ensaios de campo e também simulado em softwares.

O capítulo 6 é um dimensionamento prático de uma ferrovia alemã em dois programas computacionais distintos onde são estudados e analisados os resultados obtidos.

O capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas para os casos estudados e para o caso de dimensionamento prático realizado no trabalho.

O capítulo 8 apresenta as referencias bibliográficas, que consistem nas fontes consultadas durante a elaboração do trabalho.

Alem destes capítulos, o trabalho possui um ANEXO com dados de entrada e saídas do programa FERROVIA.

4. GEOSSINTÉTICOS

4.1. Classificação dos geossintéticos

A NBR 12.553 classifica o geossintético como um produto polimérico (sintético ou natural) industrializado, desenvolvido para aplicação em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções, entre as quais destacam-se: reforço, filtração, drenagem, separação, impermeabilização e controle de erosão superficial.

Num contexto geral, os geossintéticos podem ser classificados nos seguintes tipos: geotêxteis, geomembranas, geodrenos, geocélulas, geogrelhas, georredes, geocompostos, fibrossolo, geo-espaçadores, geomantas e geocompostos argilosos. Cada um deles possui uma característica específica como pode ser observado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Funções dos vários geossintéticos nos projetos de engenharia. (Fonte: Manual Brasileiro de Geossintéticos/ VERTEMATTI, 2004).

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X	X
Geogrelha	X	-	-	-	-	X	-
Geomembrana	X	-	-	-	-	-	X
Georrede	-	X	-	X	-	-	-
Geocomposto argiloso	-	-	-	-	-	-	X
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geotubo	-	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-

Os principais geossintéticos utilizados em ferrovias, e que serão abordados nos capítulos seguintes dos trabalhos são : geogrelhas, geotêxteis, geocélulas e geocompostos. Estes produtos serão descritos a seguir.

4.1.1. Geotêxtil

A NBR 12.553 classifica o geotêxtil como um produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica. Este produto é classificado em três categorias.

- **Geotêxtil não-tecido:** composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos (NBR 12.553/2003). São divididos em três categorias:
 - **Agulhado:** fibras são interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem (NBR 12.553/2003);
 - **Termoligado:** fibras são interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento (NBR 12.553/2003);
 - **Resinado:** fibras são interligadas por meio de produtos químicos (NBR 12.553/2003).
- **Geotêxtil tecido:** oriundo do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), segundo direções preferenciais de fabricação denominadas trama (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal) (NBR 12.553/2003).
- **Geotêxtil tricotado:** produto oriundo do entrelaçamento de fios por tricotamento (NBR 12.553/2003).



Figura 4-1 - Tipos de têxteis (Fonte : <http://www.abint.org.br/ctg/geotexteis.php>).

4.1.2. Geogrelha

Segundo a NBR 12.553, geogrelha é um produto com estrutura em forma de grelha com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que está confinada, e constituída por elementos resistentes a tração. É considerada unidirecional quando apresenta maior resistência à tração em uma direção, e bidirecional quando apresenta a mesma resistência à tração nas duas direções. Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem : ser extrudadas, soldadas ou tecidas.

- **Geogrelha tecida:** Composta por elementos de tração longitudinais e transversais, tricotados ou intertecidos nas juntas, produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, e recobertos por um revestimento protetor (NBR 12553/2003).
- **Geogrelha extrudada:** Obtida através de processo de extrusão e sucessivo estiramento, que pode ser em um único sentido formando geogrelhas unidirecionais ou nos dois sentidos formando geogrelhas bidirecionais (NBR 12553/2003).
- **Geogrelha soldada:** Composta por elementos de tração longitudinais e transversais, soldados nas juntas, produzidos geralmente a partir de feixes de filamentos têxteis sintéticos, recobertos por um revestimento protetor (NBR 12553/2003).

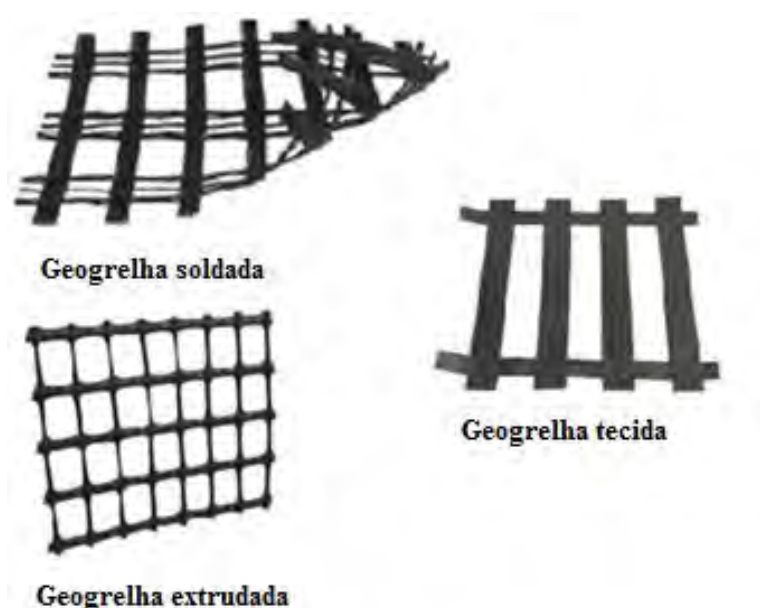


Figura 4-2 - Tipos de geogrelhas (Fonte : <http://www.abint.org.br/ctg/geogrelhas.php>).

As geogrelhas podem ser fornecidas em vários tamanhos de abertura de malha e várias resistências, tipicamente entre 20 kN/m e 2000 kN/m. A largura comuns é de 5,00 m e os comprimentos do rolo são de 100 - 300 m, de modo a minimizar as perdas por sobreposição.

4.1.3. Geocomposto

Segundo a NBR 12553/2003 geocompostos são produtos industrializados, formados pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebidos para desempenhar função específica. Este produto pode ser dividido nas seguintes categorias :geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante [GCL], geocomposto para drenagem [GCD] e geocomposto para reforço [GCR].

- **Geocompostos para drenagem [GCD]:** Produto desenvolvido para drenagem, composto geralmente de um geotêxtil atuando como elemento de filtro de uma georrede ou um geoespaçador atuando como elemento drenante (NBR 12553/2003).
- **Geocompostos argiloso para barreira impermeabilizante GCL :** Estrutura formada pela associação de geossintéticos a um material argiloso de baixa condutividade, desenvolvida para a função de barreira(NBR 12553/2003).
- **Geocompostos para reforço [GCR]:** Estrutura formada pela associação de geossintéticos não similares, desenvolvida para reforço (NBR 12553/2003).

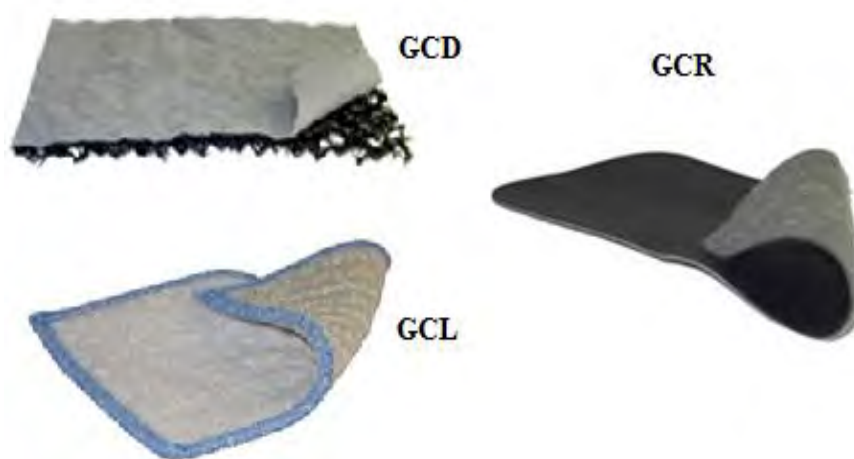


Figura 4-3 – Tipos de geocompostos (Fonte : <http://www.abint.org.br/ctg/geocompostos.php>).

4.1.4. Geocélula

As geocélulas são confeccionadas a partir de laminas de polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno (PE), ou polipropileno (PP). A ligação das células pode ser feita através de costura ou por meio de solda ultrassônica. O seu processo de fabricação possibilita a formação de elementos semelhantes a uma colméia que podem ser posteriormente preenchidos com material granular, solo, solo-cimento, ou concreto. A área da geocélula está em torno de 300 cm² geralmente, e as alturas encontradas no mercado variam de 50 a 200 mm.



Figura 4-4 - Geocélula (Fonte : <http://www.abint.org.br/ctg/geocelulas.php>).

4.2. Propriedades dos geossintéticos

A seguir serão detalhadas algumas propriedades relevantes dos geossintéticos utilizados para reforço de solos.

4.2.1. Resistência à tração de faixa larga (T_{máx})

Dentre os vários ensaios em geossintéticos, para os fabricantes de geogrelhas e geotêxteis, o principal ensaio realizado em laboratório para o controle de qualidade, é o ensaio de determinação da resistência à tração não confinada- Ensaio de tração de faixa larga (NBR 12.824/1993), que segue os padrões das normas internacionais (ISO 10.319). Através deste

ensaio em laboratório, obtêm-se os parâmetros de resistência máxima à tração (α máx.), deformação nominal (ε máx.), e por meio deles, o módulo de rigidez (J). Com os parâmetros obtidos no ensaio, pode-se dimensionar o tipo de geogrelha e/ou geotêxtil a ser utilizado.

4.2.1.1. Ensaio de tração de faixa larga (aplicado para geotêxteis, geogrelhas e geocompostos)

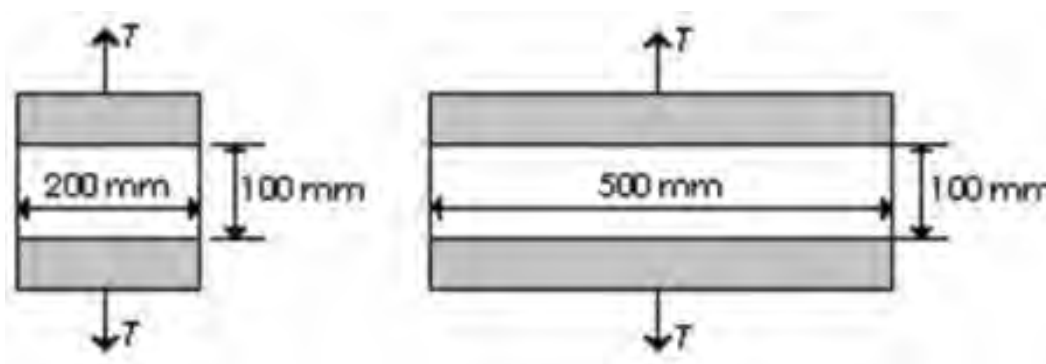


Figura 4-5 - Ensaio à tração faixa-larga (Fonte: <http://www.abint.org.br/ctg/ensaios1.php>).

O ensaio de resistência à tração, de acordo com a NBR 12.824/1993, consiste em um corpo de prova de geotêxtil (de largura de 200 mm e comprimento de 100 mm) que é fixado ao equipamento de tração (dinamômetro) por lados opostos e ao longo de toda a sua largura, por meio de um sistema de garras ou mordentes, sendo submetido a esforços longitudinais, do mínimo até a ruptura, sob condições controladas de deformações. São registrados os valores das cargas aplicadas e os alongamentos correspondentes aos diferentes estágios do ensaio, do mínimo até a ruptura. Os valores obtidos são verificados para cada ensaio, adotando os critérios para não aceitação dos resultados citados na NBR 12.824/1993. Este ensaio deve ser feito com no mínimo cinco corpos-de-prova no sentido vertical e no sentido horizontal, e todos devem ser numerados e marcados seguindo a norma NBR 12.593.

Com o resultado do ensaio, calcula-se a curva carga-alongamento, que é uma representação gráfica do ensaio, função dos valores calculados de carga aplicada α e do alongamento ε .

$$\text{Cálculo da carga, } \alpha = \frac{F}{C},$$

Onde,

α = carga aplicada(kN/m)

$C = B$ (para geotêxteis)

$C = \frac{N_s}{N_m}$ (para geogrelhas)

F = força de tração aplicada (kN)

B = largura do corpo de prova (m)

N_s = número de elementos de tração no corpo de prova.

N_m = número de elementos de tração por metro de largura de produto.

Cálculo do alongamento, $\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100$,

Onde,

ϵ = alongamento (mm)

ΔL =variação do comprimento em relação ao espaçamento-base (mm), correspondente à uma dada carga aplicada.

L = espaçamento-base (mm).

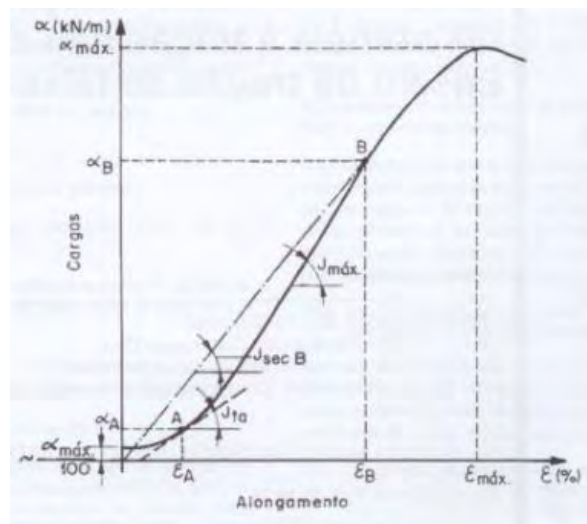


Figura 4-6 - Resultados típicos de um ensaio à tração de geotêxteis (Fonte : ABNT NBR. 12.824/1993)

Com a curva carga-alongamento, obtém-se a deformação nominal (ϵ máx.).

Para o cálculo da resistência a tração máxima (α máx.) de uma geogrelha ou geotêxtil, deve-se fazer uma média aritmética dos valores de resistência à tração máxima de cada corpo de prova ensaiado.

Para o cálculo do alongamento a carga máxima, faz-se uma média aritmética dos valores correspondentes às cargas máximas para cada corpo de prova.

O módulo de rigidez (J) mais utilizado é a rigidez secante, calculada pela equação:

$$J_{\text{sec b}} = \frac{\alpha_B}{\epsilon_B} \times 100$$

Onde,

$J_{\text{sec B}}$ = rigidez secante relativa ao alongamento ϵ_B (kN/m);

$\alpha_{\text{sec B}}$ = carga correspondente ao alongamento ϵ_B (kN/m).

Deve-se calcular o coeficiente de variação para o módulo de rigidez (J), resistência a tração máxima ($\alpha_{\text{máx.}}$), e para o alongamento a carga máxima.

Com os valores de resistência à tração máxima e o módulo de rigidez, pode-se dimensionar a geogrelha e o geotêxtil requerido.

4.2.2. Deformação nominal de ruptura ($\epsilon_{\text{máx}}$)

Por meio do mesmo ensaio de resistência a tração máxima, obtém-se a deformação nominal de ruptura ($\epsilon_{\text{máx}}$) que caracteriza a geogrelha e produtos correlatos. Uma característica relevante das geogrelhas fabricadas a partir de polímeros de alta qualidade é o baixo nível de deformação nominal de ruptura.

4.2.3. Resistência útil de trabalho (de longo prazo)

A definição da resistência útil de trabalho das geogrelhas (T_{adm}) é calculada pela equação seguinte:

$$T_{\text{adm}} = \frac{T_{\text{máx}}}{FR_{cr} \times FR_{mr} \times FR_a \times \gamma} = \frac{T_{\text{ref}}}{FR_{mr} \times FR_a \times \gamma}$$

Onde:

FR_{cr} : fator de redução parcial devido à fluência;

FR_{mr} : fator de redução parcial devido a danos mecânicos de instalação;

FR_a : fator de redução parcial devido à degradação ambiental e química;

γ : fator de redução parcial por incertezas quanto ao material e seu processo de fabricação e extrapolações de dados.

4.3. Emprego dos geossintéticos em vias ferroviárias

Como já descrito anteriormente, os principais problemas nas vias ferroviárias são os recalques devido à instabilidade do subleito, e o bombeamento de finos, devido ao acúmulo de água no solo que leva à ascensão de finos para a camada do lastro, reduzindo a resistência ao cisalhamento e simultaneamente aumentando a aceleração dos recalques.

O emprego de geossintéticos para compor a estrutura ferroviária, vem sendo utilizado para controlar o surgimento dos problemas citados ou minimizá-los.

O geotêxtil geralmente é aplicado com a finalidade de separação das camadas da via, impedindo a contaminação do lastro pela ascensão de finos. As geogrelhas, colocadas no interior do lastro, tem como principal função o reforço para subleitos instáveis. Já a geocélula, que distribui as tensões aplicadas no plano horizontal, diminui o atrito do lastro e aumenta a capacidade de suporte de solo da plataforma por confinamento.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. Pesquisa e desenvolvimento

A seguir serão descritas algumas pesquisas de estudo de casos práticos onde foram feitos trechos experimentais para observação do desempenho do uso dos geossintéticos em ferrovias.

5.1.1. Seções testes feitas em Taiwan, China (2005)

O trabalho desenvolvido por Kuo, C. é localizado no China Steel Company (CSC), que devido ao freqüente ciclo de cargas pesadas (500 a 800 toneladas) ao longo dos anos, desenvolveu sérios problemas ao longo da linha, causando desgaste dos trilhos e danos na plataforma ferroviária.

Dados de sondagem e escavação foram coletados para determinar as condições de subleito. Os resultados da investigação mostraram a contaminação da camada de suporte, e o aumento da poro-pressão da água com passagem de vagões de cargas pesadas. Para mitigar o bombeamento de finos e desgaste dos trilhos, foram propostas aplicações de geossintéticos para separação e reforço da plataforma.



Figura 5-1 – (a) Projeto original da estrutura ferroviária. (b) Seção contaminada devido ao bombeamento de finos (Fonte: Kuo, C. et al., 2005 - modificado).

Dois diferentes modelos foram adaptados para o projeto: um deles feito de geocomposto, combinando geogrelha e geotêxtil não tecido; o outro foi feito de uma combinação de geogrelha e geotêxtil não tecido separado. A fim de verificar os modelos propostos de mitigação, os autores realizaram uma seção teste para avaliar o desempenho dos diversos projetos. Quatro seções testes foram montadas. Cada seção tinha 20 m de comprimento e 4 m de largura, com um amortecedor de 10 metros de comprimento no meio.

A seção A foi projetada com geocompostos nas interfaces lastro- sub-base e sub-base-subleito. As seções B e C foram projetadas com geossintéticos na interface sub-base-subleito, usando geocomposto e geotêxteis não tecidos combinados, respectivamente. A seção D foi a seção de controle onde nenhum geossintético foi instalado, no entanto, a sub-base foi executada conforme o projeto original.

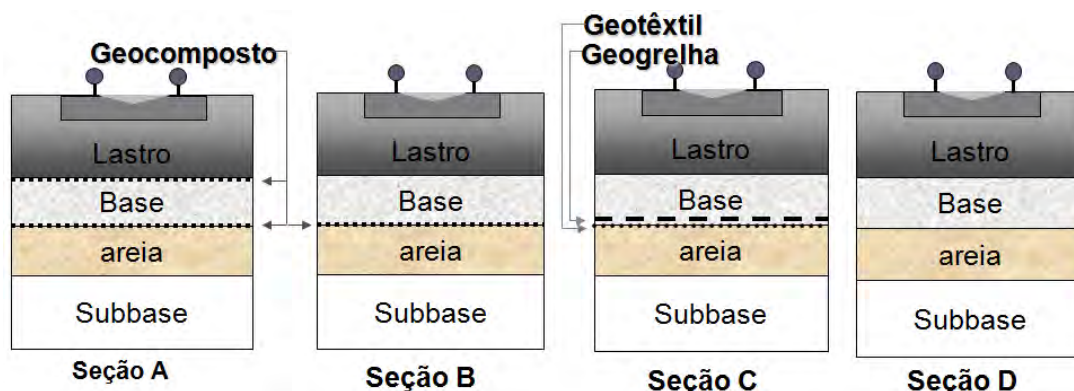


Figura 5-2 - Perfil das seções testes. (Fonte: Kuo, C. et al., 2005 - modificado).

A Figura 5-3 mostra a evolução temporal do recalque para até 74 semanas após a instalação. Como mostrado na Figura 5-3, ambas as seções B e C apresentam deformações menores que a seção de controle. Contudo, a seção A, apesar de ter sido instalada duas camadas de geocomposto, apresentou deformações maiores que as seções B e C. Razões possíveis para este desempenho pode ser a condição de drenagem da seção A, assim como o freio e a aceleração dos trens nesta seção. As seções A, B e C não apresentam problemas de bombeamento após 74 semanas da instalação, e ainda assim, a argila amarela bombeou pra fora do lastro novamente ao longo da seção controlada D.

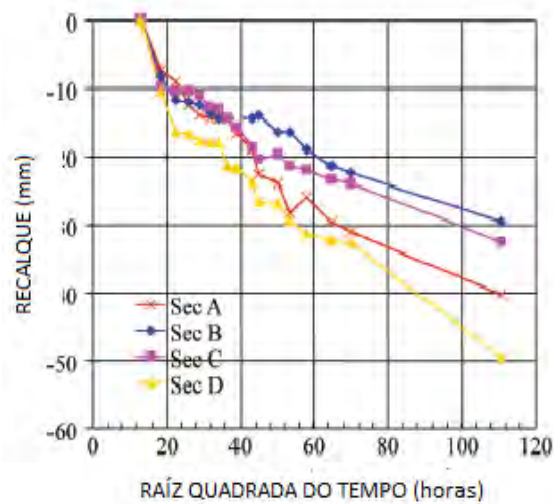


Figura 5-3 - Recalque x Raiz quadrada do tempo. (Fonte: Kuo, C. et al. (2005)).

A Figura 5-4 e Figura 5-5 mostram os resultados dos piezômetros instalados dentro da perfuração, que também apresentaram os benefícios dos geossintéticos, através da redução da poro-pressão nas seções experimentais.

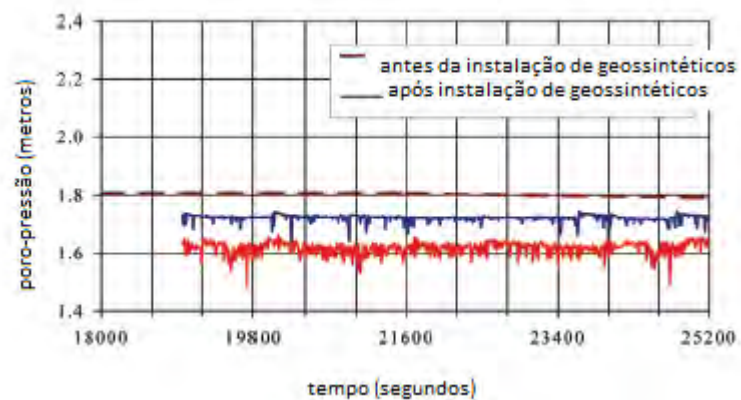


Figura 5-4 - metros de poro-pressão a 5 metros de profundidade. (Fonte: Kuo, C. et al., 2005).

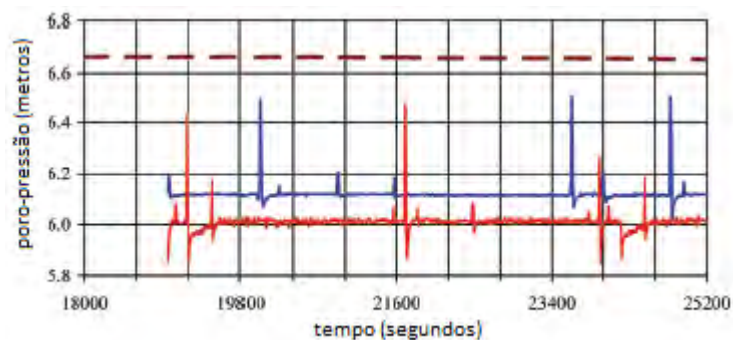


Figura 5-5 - metros de poro-pressão a 10 metros de profundidade. (Fonte: Kuo, C. et al. 2005).

Com base nos testes realizados e seus resultados, concluiu-se que as funções dos geossintéticos de separação e reforço do solo provaram ser uma medida possível para a mitigação da contaminação por finos do subleito; o modelo da seção teste se mostrou capaz de justificar os desempenhos de diferentes modelos de geossintéticos para a ferrovia de carga pesada; O geocomposto e a combinação da grelha e geotêxtil não tecido apresentaram desempenhos similares para a mitigação da contaminação da sub-base.

5.1.2. Trecho experimental na EFVM, Brasil (2005)

O trabalho desenvolvido por Fernandes G. (2005) consiste no estudo de trecho experimental instrumentado construído na Estrada de Ferro Vitória Minas, onde foram incorporados geossintéticos (tais como os geotêxteis e as geogrelhas) como reforço.

O trecho experimental construído foi dividido em sete seções teste, cada uma com diferente arranjo de materiais e comprimento, e possui 250 m de extensão, com bitola de 1,0 m, subleito com dimensões de 5,50 x 0,20m, lastro de 3,20 x 0,45m, dormentes tipo UIC 865 de 2,20 x 0,30 x 0,02m espaçados de 0,60 m, trilhos de seção-tipo 136 RE de 0,08 x 0,18 x 0,15m de fixação flexível. As características da seção teste são mostradas na Tabela 5-1.

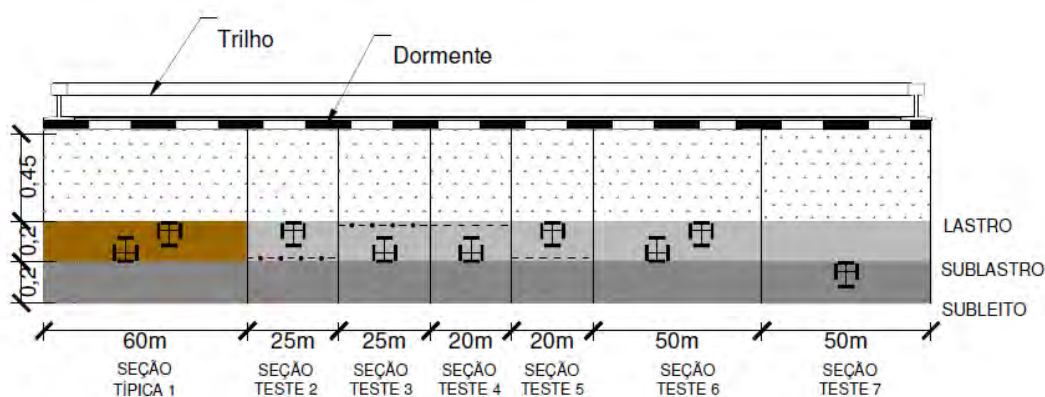


Figura 5-6 - Composição e arranjo geral das seções-teste no trecho experimental (Fonte: Palmeira G., 2005).

Tabela 5-1 – Características gerais das seções teste. (Fonte: Fernandes G., 2005).

Seção teste	Material	Sublastro(m)	Localização (estaca)	Geogrelha (posição)	Geotêxtil (posição)
1	Estéril laterita EL	4,5x0,2x60	24/21		
2	Mistura de pista MP +	5,0x0,2x25	17+10/16+5	Base da	
	geogrelha			camada	
3	Mistura de pista MP +	4,5x0,2x25	16+5/15	Topo da	
	geogrelha			camada	
4	Mistura de pista MP +	4,5x0,2x20	15/14		Topo da
	geotêxtil				camada
5	Mistura de pista MP +	4,5x0,2x20	14/13		Base da
	geotêxtil				camada
6	Mistura de pista MP	4,5x0,2x50	11+10/9		
7	Solo Granular SG	5,5x0,2x50	10+10/8		

O estéril-laterita EL utilizado no sublastro, segundo FERNANDES G., 2005, constitui um cascalho laterítico proveniente de uma rocha itabirítica, porosa, de cor avermelhada e teor médio de ferro. É uma rocha friável de granulometria variando entre areia e pedregulho (75%>2,00 mm).

FERNANDES G., 2005 classifica o solo granular SG utilizado na camada de subleito e sublastro, como um solo residual de itabirito dolomítico, com granulometria de areia siltosa, cor amarelada e baixo teor de ferro. É um material friável de granulometria entre areia e pedregulho (75%>2,00mm).

A mistura de resíduos na pista MP, usada na camada de sublastro, é classificada por FERNANDES G., (2005), como material obtido por meio de estabilização granulométrica, sendo composta por 50 % de solo granular SG, 25 % por rejeito de minério de ferro e 25 % de estéril laterita.

O rejeito do minério de ferro RF, usado na camada do sublastro, é classificado por FERNANDES G., (2005), como um resíduo de minérios hematíticos e itabirísticos, com granulometria entre areia e argila, e teor de ferro intermediário.

A camada de lastro é composta por escória de aciaria, na forma de agregados grandes e regulares com aspecto vítreo e poroso (FERNANDES G., (2005)).

A geogrelha utilizada nas seções S2 e S3 é Fortrac 65/65-30T fabricada pela Huesker. Os geotêxteis não tecidos utilizados nas seções S4 e S5, são do tipo RT16 da marca Bidim, com gramatura 300g/m².

Foram instalados sensores posicionados horizontal e verticalmente para a medição das deformações, tanto verticais quanto horizontais. Os dispositivos mediram as deformações no interior do sublastro (ou do subleito), sob o trilho e o dormente da área-teste e a diferentes profundidades, após a execução normal da via.

Ensaio com Viga Benkelman foram feitos para obtenção de respostas das camadas estruturais devido às aplicações do carregamento. As deflexões representam um indicativo do comportamento elástico a partir da mudança da configuração das camadas da via.

Para padronizar os procedimentos de comparação de comportamento estrutural entre as diferentes seções, estabeleceu-se a seguinte sistemática de aplicação das solicitações dinâmicas: uma, duas ou três locomotivas, constituídas por 2 truques com 8 eixos e peso de 1600 kN cada uma.

A Figura 5-7 mostra a deformação obtida para a superestrutura para os ensaios. Considerando que a superestrutura é a mesma para cada seção, pode-se concluir que as deflexões totais nas seções reforçadas com geogrelhas (seções 2 e 3) foram iguais ou inferiores às previstas na seção de projeto (seção 1), atestando a viabilidade do uso de geossintéticos como reforço do pavimento.

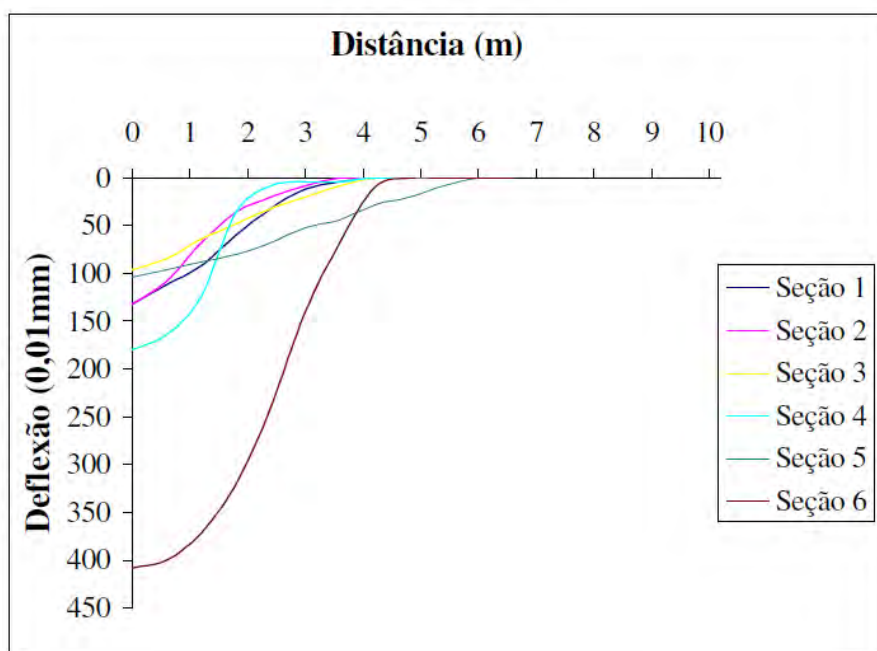


Figura 5-7 – Deformação da superestrutura para as seções 1 a 6. (Fonte: Palmeira G., 2005).

5.1.3. Seção instrumentada, Austrália (2011)

O trabalho desenvolvido por INDRARATNA (2001) trata-se da comparação entre resultados obtidos por ensaios de campo em uma seção instrumentada da ferrovia com a aplicação de geossintéticos, e uma análise com elementos finitos feita no programa PLAXIS 8.0.

Os ensaios de campo foram realizados na ferrovia na cidade Wollongong, Austrália para estudar os benefícios dos geocompostos (combinação da geogrelha bi-direcional com geotêxtil não tecido de polipropileno) instalados na interface lastro-sublastro, e para utilizar os ensaios de campo para calibração de modelos construtivos e melhoramentos sucessivos nos elementos finitos.

O comprimento total da seção instrumentada foi de 60 metros e ainda foi dividida em quatro seções, cada uma com 15 m de comprimento. Duas seções foram construídas sem a camada de geocompostos enquanto que nas outras duas foram colocadas camadas de geocompostos na interface lastro-sublastro. Para medir as deformações verticais e horizontais do lastro, medidores de recalque e transdutores de deslocamento foram instalados na interface dormente-lastro e lastro-sublastro das seções. As tensões verticais e horizontais aplicadas no subleito da via sob cargas de rodas repetidas foram medidas por células de pressão (230 mm de diâmetro) instaladas em diferentes locais na seção do novo lastro. As seções foram construídas utilizando-se lastro tradicional novo e lastro reciclado.

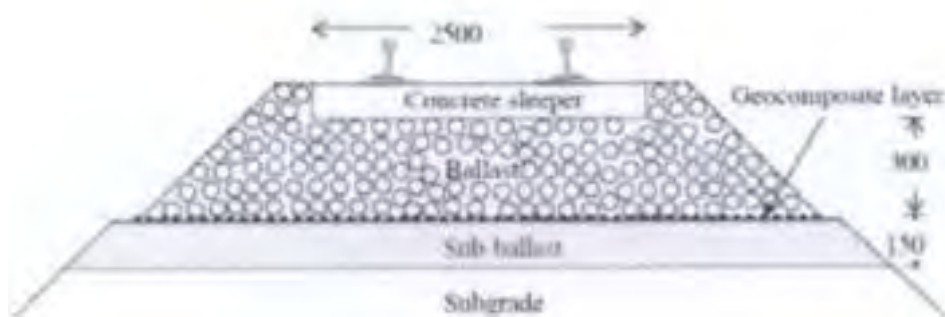


Figura 5-8 - Seção do leito da via (Fonte:Indraratna., 2011).

A Tabela 5-2 mostra as características dos tamanhos dos grãos de um lastro novo, lastro reciclado, e do sublastro usado na seção instrumentada em Bulli.

Tabela 5-2 - Características do lastro novo, lastro reciclado e materiais do sublastro (INDRARATNA et al., 2011)

Tipo de Material	Forma da partícula	d _{máx} (mm)	d _{min} (mm)	d ₅₀ (mm)	Cu	Cc
Lastro Novo	Altamente angular	75,0	19,0	35,0	1,5	1,0
Lastro Reciclado	Semi-angular	75,0	9,5	38,0	1,8	1,0
Sublastro	Semi-arredondada	19,0	0,05	0,26	5,0	1,2

Foram utilizados dormentes de concreto nos testes da via. Testes de EFCP (Penetrômetro de cone de Fricção Elétrica) mostraram que o solo do subleito é uma argila siltosa de rigidez super consolidada e tinha resistência mais que suficiente pra agüentar as cargas dos trens. A base é um arenito altamente intemperizado de resistência fraca à média.

A Figura 5-9 mostra os dados referentes à deformação lateral média do lastro em função do número de carregamentos cíclicos. Pode ser observado que as seções que apresentaram melhor desempenho foram aquelas com presença de geossintéticos.

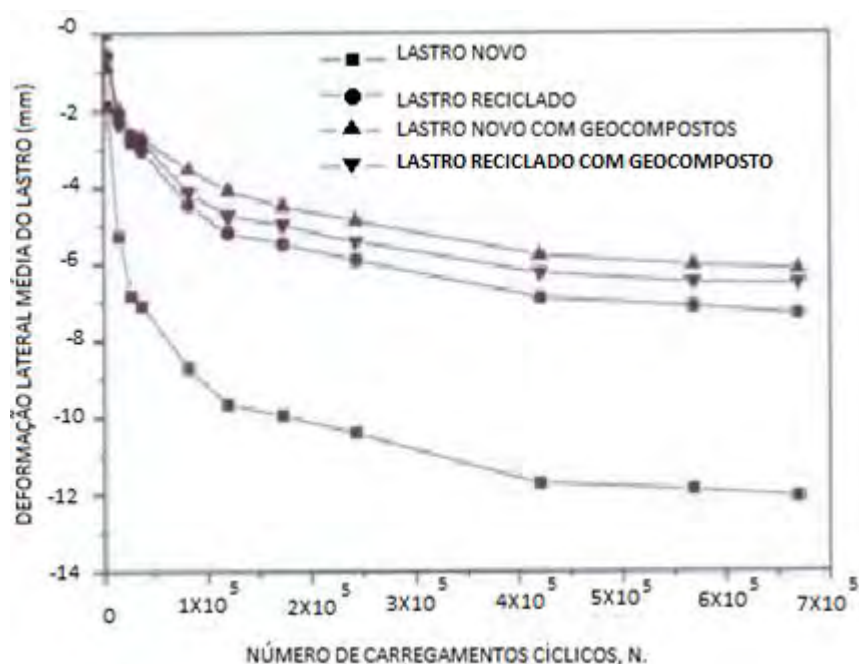


Figura 5-9 - Gráfico: deformação x No. de carregamentos cíclicos. (Fonte:Indraratna., 2011).

Para prever o comportamento da via com e sem geossintéticos, foi proposto um modelo construtivo elasto-plástico de um sistema de via composto de multicamadas incluindo trilho, dormente, lastro, sublastro e subleito. O programa PLAXIS foi utilizado para fazer as simulações numéricas utilizando a análise de elemento finito bidimensional de deformação plana.

O solo do subleito e as camadas da via foram modeladas utilizando elementos quadriláteros de tensão linear de 15 nós. Nos elementos de representação de geogrelha, foram utilizados elementos de linha de 5 nós. Uma interface especial para modelar a interação entre a geogrelha e o meio granular com elementos de 10 nós. O elemento isoparamétrico de 15 nós fornece uma interpolação de quarta ordem para deslocamento e integração numérica por integração de Gauss envolvendo 12 pontos de Gauss (pontos de tensão). A altura de 4 m e largura de 8 m de modelo de elemento finito PE discretizada para 794 elementos de 15 nós, 26 elementos de 5 nós para geogrelha e 52 elementos de 5 nós na interface.

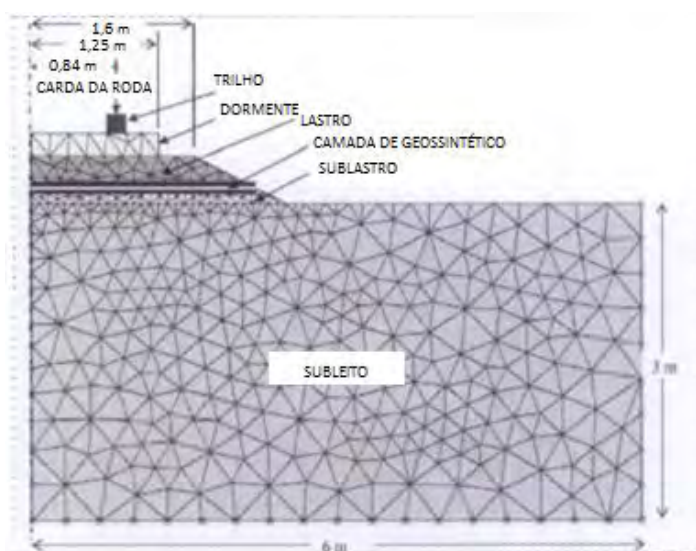


Figura 5-10 - Seção da via ferroviária simulada com elementos finitos (Fonte:Indraratna., 2011).

Foi feita uma comparação entre a análise de elementos finitos e os resultados obtidos em campo para a deformação vertical abaixo do dormente. As deformações verticais foram monitoradas nas interfaces dormente-lastro e lastro-sublastro. Os valores previstos pelas análises elasto-plásticas mostram um leve desvio em comparação com os valores medidos no comportamento real da via. Este desvio se dá pelo fato que a natureza real cíclica do carregamento da roda não é considerada e é aproximadamente representado por deformação plana dinâmica equivalente as estudadas nas análises de elementos finitos. Portando

INDRARATNA (2011) considerou essa predição aceitável para a prática de projeto.

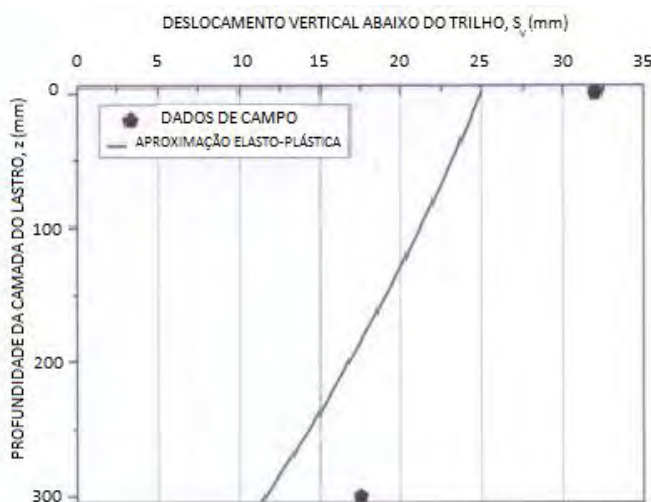


Figura 5-11 - Comparação dos dados de campo e os dados no PLAXIS 8.0 (Fonte:Indraratna., 2011).

5.2.Métodos de dimensionamento de ferrovias com geogrelhas

5.2.1. Abordagem inglesa de projeto

No Reino Unido, a autoridade nacional de ferrovias, Network Rail, vem utilizando geogrelhas em suas principais linhas férreas desde o início de 1990. Além disso, a Network Rail fez diversos testes internos, ambos em laboratórios e em de vias em funcionamentos, para quantificar os benefícios associados ao uso de geogrelhas na infraestrutura da ferrovia.

Os protocolos de projeto do leito de ferrovia são prescritos no Nerwork Rail (2005). A abordagem adotada é para atingir a rigidez requerida para o leito abaixo da via. Como é mostrado na Tabela 5-3, os valores variam e dependem, se devem ou não incluir a geogrelha dentro da infraestrutura. Uma rigidez dinâmica mínima de dormente (k) de 60 kN/mm é requerida para um subleito não reforçado, enquanto que apenas 30kN/mm é requerido para a mesma situação quando está incluída uma geogrelha no dormente.

Tabela 5-3 - Rigidez do leito

Condição da via	Rigidez dinâmica mínima de dormente, K (kN/mm/fim do dormente)	
Valor Absoluto	30	
Linhas principais existentes	Com reforço de geogrelha	30
	Sem reforço de geogrelha	60
Linha nova	até 100 mph	60
	acima de 100 mph	100

Para um dado conjunto de condições de subleito e o mesmo tipo de agregados, a rigidez de uma seção da infraestrutura é essencialmente função da espessura das camadas de lastro e sublastro. Como mostrado na Figura 5-12, o uso de geogrelhas resulta na redução da espessura do subleito de aproximadamente 200mm em relação a seção não reforçada.

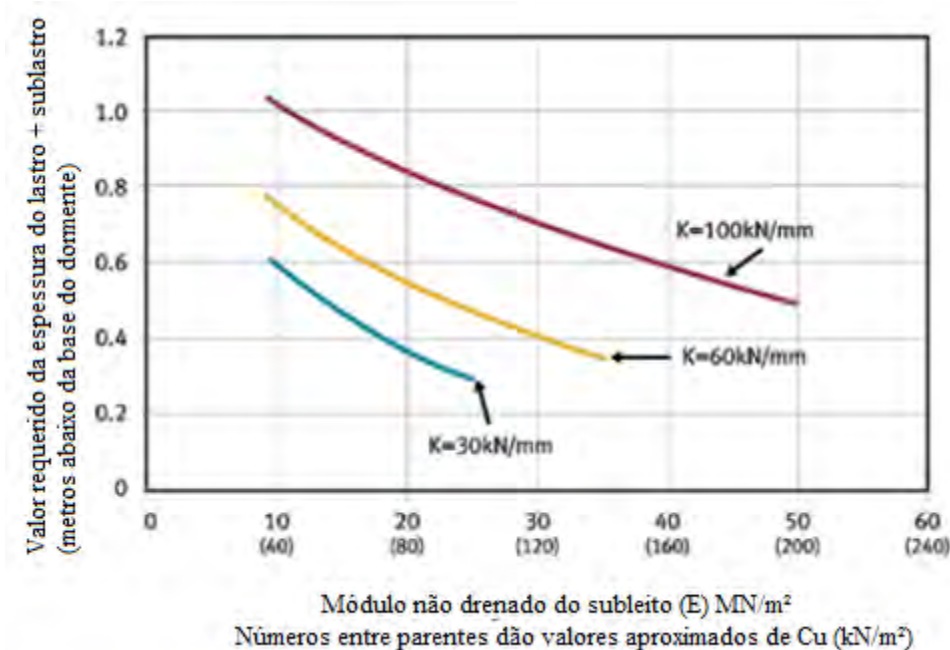


Figura 5-12 - Espessura requerida do (lastro + sublastro) x Coesão não-drenada Cu (entre parenteses).

Deve ser lembrado que apesar do protocolo de projeto da Network Rail se referir as geogrelhas genericamente, qualquer produto de geogrelha proposto para uso requer um certificado atual PADS. Esse documento é obtido pela Network Rail e só é emitido para produtos cujas características prescritas forem comprovadas em testes laboratoriais de larga escala e ensaios de campo.

5.2.2. Abordagem americana de projeto

Nos Estados Unidos, a maioria das companhias de trens de passageiros e trens de frete possui uma seção padrão de subleito para seu sistema ferroviário. Quando são encontrados condições de solos não favoráveis, melhorias extras do subleito podem ser tomadas, incluindo a aplicação de geogrelhas.

Para o projeto de via com aplicação de geogrelha, o método de Talbot é adotado com algumas adaptações. A equação básica é definida por:

$$h = \left(16,8 \times \frac{p_a}{p_c} \right)^{0,8}$$

Onde,

h = espessura requerida de lastro + sublastro abaixo do dormente (polegadas);

p_c = tensão admissível na profundidade h abaixo da linha central do dormente (psi);

p_a = pressão imposta na superfície do dormente (psi);

O parâmetro p_a é determinado pela equação

$$p_a = 2P \frac{(1 + IF / 100)(DF / 100)}{A}$$

Onde,

IF = fator de impacto (função do diâmetro da roda e da velocidade máxima do trem);

DF = fator de distribuição;

A = área da superfície do dormente (in²).

Baseado em uma larga escala de ensaios, pode ser determinado quais os benefícios de transferência de cargas para cada tipo particular de geogrelha, e assim ajustar o parâmetro de tensão admissível (p_c) de acordo com a característica de cada uma delas. Uma diminuição da pressão imposta no nível do subleito vai levar a uma redução significativa da espessura do leito (lastro+sublastro).

5.3. Métodos computacionais de dimensionamento de via

5.3.1. FERROVIA (método sem aplicação de geossintéticos)

FERROVIA é um programa computacional que simula a estrutura ferroviária e fornece o cálculo da resposta da via sob o carregamento aplicado, que inclui as tensões e deformações nas camadas do lastro, sublastro e subleito.

O programa utiliza o método dos elementos finitos e a teoria da elasticidade para simular os elementos da superestrutura da via, e o método das camadas finitas para simular os elementos da infraestrutura.

A geração de sua matriz de flexibilidade é dada pelo programa ELASTMCFM que fornece a matriz de rigidez da infraestrutura (K_F) e de superestrutura (K_s), que juntas permitem o cálculo dos deslocamentos e rotações dos pontos nodais.

Os dados de saída fornecem: as tensões de contato dormente-lastro; as tensões e deformações na fundação; os deslocamentos e rotações dos trilhos, as reações trilho-dormente; tensões de tração e de cisalhamento nos trilhões e dormentes; e esforços cortantes e momentos fletores nos trilhos e dormentes.

5.3.2. PLAXIS v.8 (método com aplicação de geossintéticos)

O PLAXIS v.8 é um programa computacional que simula as estruturas ferroviárias através dos modelos constitutivos elástico linear, elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, “hardening soil”, “soft soil”, “soft soil creep”.

Existem quatro tipos de módulos do programa: input, calculations, output e curves.

No módulo *input*, a geometria a ser analisada é definida pelo usuário, bem como as condições de contorno, as propriedades dos materiais e o carregamento. A malha de elementos finitos é gerada automaticamente, podendo-se refiná-la de acordo com o interesse do usuário e as características do problema a ser analisado. O estado inicial de tensões é também gerado nesta etapa. No módulo *calculations* define-se o tipo de cálculo a ser realizado, sendo este plástico, adensamento ou análise do fator de segurança. Além disso, é nessa etapa em que são definidas as etapas de cálculo e os valores a serem aplicados nas cargas, deslocamentos prescritos, tempo de adensamento, entre outros multiplicadores, conforme o tipo de cálculo escolhido. O módulo *output* apresenta a malha de elementos finitos deformada, deslocamentos,

deformações, tensões efetivas, totais, cisalhantes, pontos de plastificação, entre outros resultados. O módulo *curves* permite que sejam geradas curvas tensão-deformação, carga-deslocamento, poropressão-tempo, entre outros tipos de curvas de pontos nodais e pontos de tensão (pontos de Gauss) pré-selecionados na etapa de cálculo. (PIMENTEL, K.C.A (2007)).

6. EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO PRÁTICO

A partir dos parâmetros de uma ferrovia alemã e da utilização dos softwares FERROVIA 3.0 e PLAXIS V.8, será simulado e analisado seu comportamento sob solicitação de um carregamento de 32 tf/eixo.

A ferrovia estudada possui trilhos do tipo TR 68 com bitola de 160 cm e 0,61 cm de espaçamento, módulo de Young igual a 2.100.000 kgf/cm², momento de inércia de 3950,1 cm⁴, largura de 15,24 cm e área de 86,12cm².

Os dormentes são de concreto monobloco de 280 cm de comprimento, 26 cm de largura, 22 cm de altura, possuem modulo de Young igual a 201903,8 kgf/cm², momento de inércia de 23070,6 cm⁴ e área de 572 cm². Os parâmetros das camadas da estrutura ferroviária são mostrados na Tabela 6-1, e a seção transversal e a planta da estrutura podem ser vistas na Figura 6-1

Tabela 6-1 Parâmetros das Camadas da Ferrovia

LASTRO	SUBLASTRO	SUBLEITO
Espessura (cm) = 30	Espessura (cm) = 40	Espessura (cm) = 100
ν (Poisson) = 0,26	ν (Poisson) = 0,20	ν (Poisson) = 0,20
E (Kgf/cm ²) = 335,36	E (Kgf/cm ²) = 305,91	E (Kgf/cm ²) = 112,17
c (kgf/cm ²) = 0,25	c (kgf/cm ²) = 0,02	c (kgf/cm ²) = 0,01
$\phi=37.5^\circ$	$\phi=28^\circ$	$\phi=22^\circ$

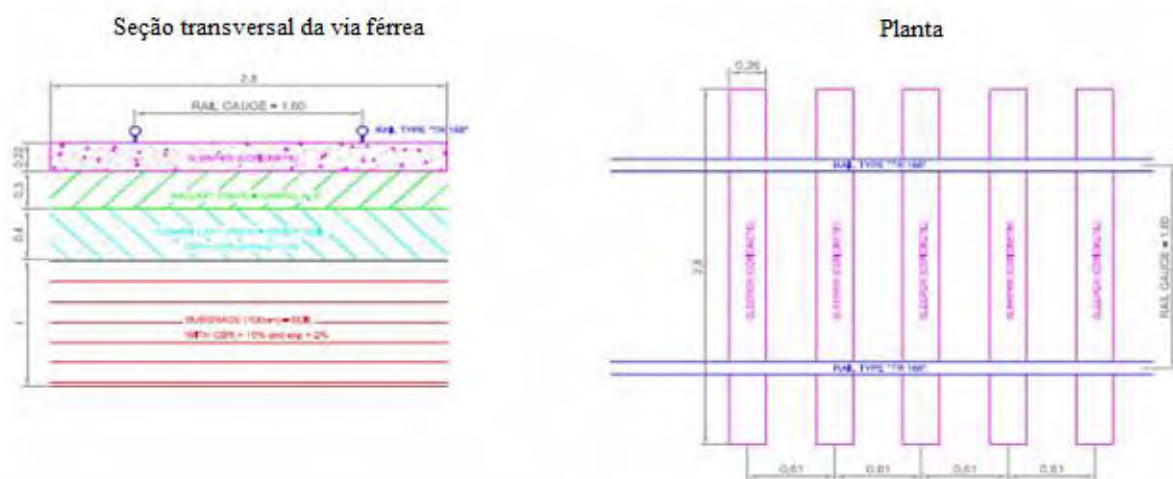


Figura 6-1 – Seção da ferrovia em estudo e planta baixa da mesma.

6.1. Dimensionamento no programa FERROVIA 3.0

Os parâmetros citados no início do capítulo foram utilizados no programa computacional FERROVIA 3.0, com as mesmas unidades de medidas.

A carga aplicada considerada foi de 32 tf por eixo. Foi considerado que o pior caso de interferência seria entre dois truques de vagões adjacentes.

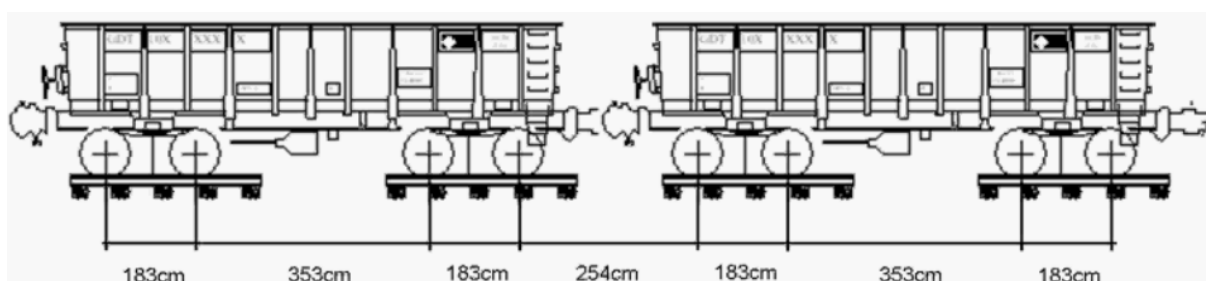


Figura 6-2 Pior caso de carregamento: truques de vagões GDT adjacentes

Para transpassar isso pra malha de elementos finitos, foi feita uma adaptação aproximada do carregamento real do campo com os espaçamentos reais dos truques para a modelagem de 61 cm de espaçamento centro a centro (Figura 6-3). Com a aproximação, foram aplicados quatro carregamentos de uma força vertical de 16 tf por roda nos seguintes pontos nodais: 134, 140, 157 e 163 (Figura 6-4).

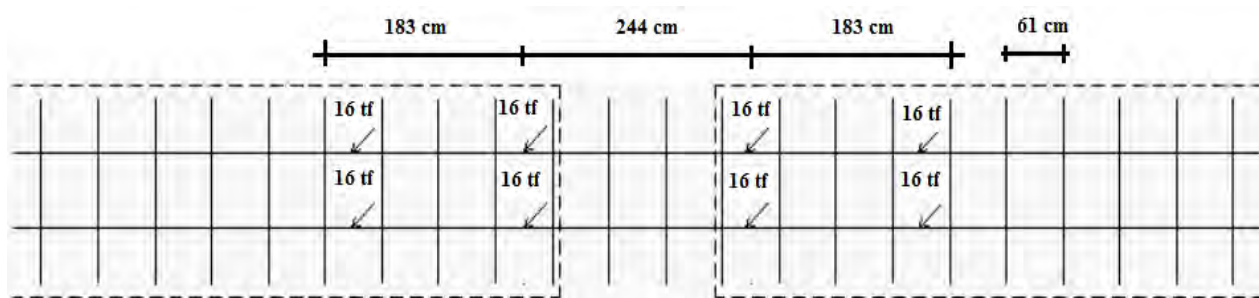


Figura 6-3 Esquema em planta de 2 vagões GDT com 32 tf/eixo;

Os dados citados acima foram utilizados a fim de obter as tensões e deformações da estrutura. Para dados de entrada do programa, foram preenchidos os dados da grade, fundação e de carga.

Após a inserção de todos os dados, o programa gera os seguintes dados de saída:

- Pressões de contato dormentes-lastro (Contato.out);
- Deslocamentos e rotações dos trilhos e dormentes (Resposta.dat);
- Tensoes e deformações na fundação (TieSai.dat);
- Módulos das camadas nos incrementos de carga (TieSai.dat);
- Tensões de tração e de cisalhamento nos trilhos e dormentes (OutFlex.dat);
- Esforço cortante e momento fletor nos trilhos e dormentes (OutFlex.dat);
- Forças de reação trilho-dormente (OutFlex.dat).

A Figura 6-4 mostra a malha de elementos finitos e os respectivos pontos nodais (circulados em vermelho) onde foram aplicadas cargas de 16 tf em cada, representando a carga por roda.

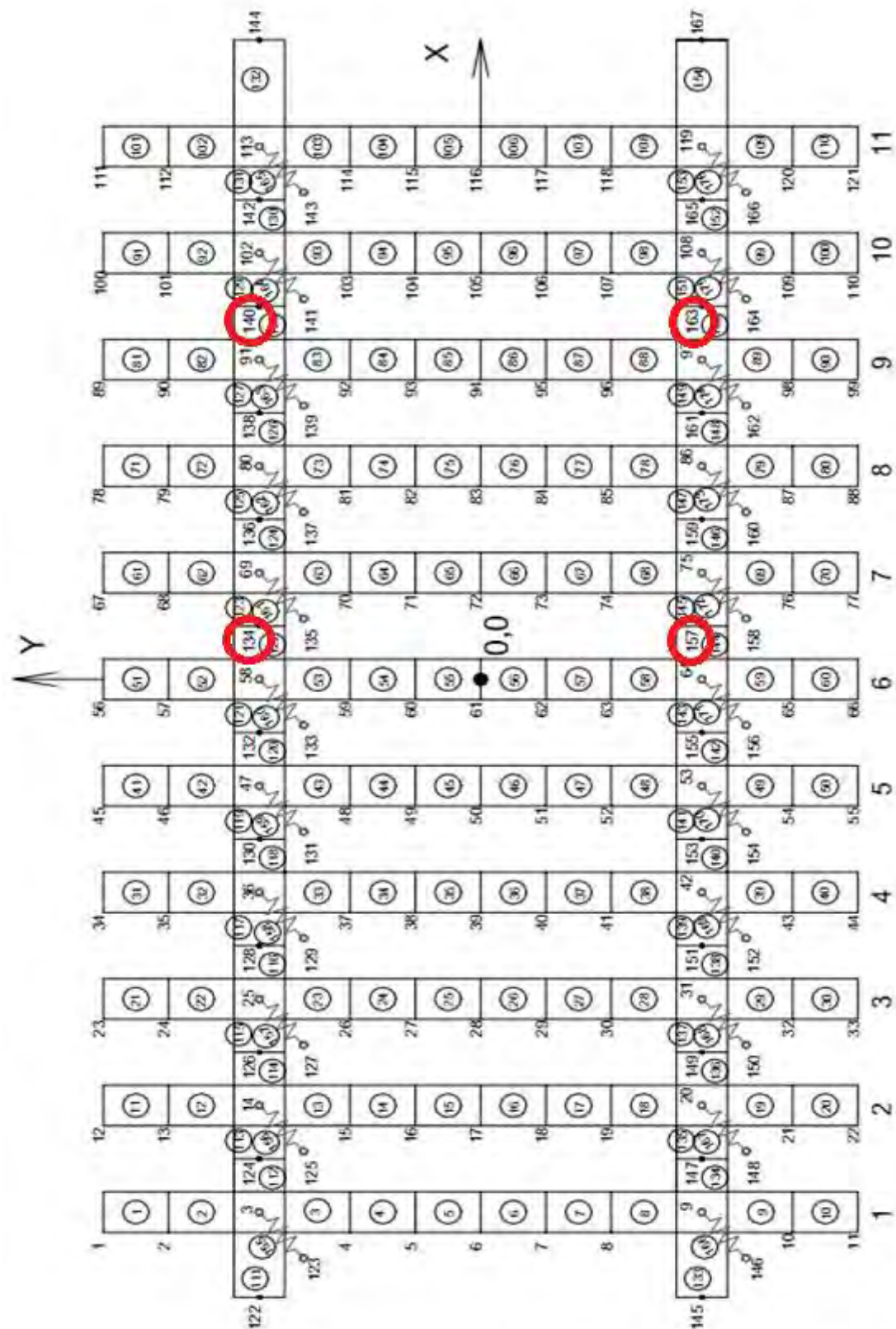


Figura 6-4 – Pontos nodais (vermelho) na malha de elementos finitos do programa FERROVIA (RODRIGUES, 1993- adaptado)

No dado de saída Resposta.dat, puderam ser retirados os deslocamentos máximos (em centímetros) para o dormente e trilho. Os deslocamentos são obtidos para cada ponto nodal da malha de elementos finitos. Como pode ser observado na figura 5.5, os pontos nodais numerados de 1 a 121 são referentes ao dormente, e os pontos nodais de 122 a 167 são referentes ao trilho. A partir do resultado, foi retirado o maior valor de deslocamento para o trilho e para o dormente.

Tabela 6-2 - Deslocamento Máximo do Trilho e Dormente

	Deslocamento Máximo (cm)
Dormente	-0,3879
Trilho	-0,4604

O deslocamento máximo do dormente é localizado no ponto 91 e o deslocamento máximo do trilho no ponto 136.

6.2. Dimensionamento no programa PLAXIS v.8

No programa PLAXIS v.8, a ferrovia foi simulada com os mesmos parâmetros utilizados no FERROVIA 3.0, porém com unidades de medidas diferentes, como pode ser observado nas tabelas 5-3, 5-4, 4-5 e 5-6 (dados de entrada do programa).

Tabela 6-3 Dados do Dormente

γ_{unsat}	γ_{sat}	ν	E_{ref}
[kN/m ³]	[kN/m ³]	-	[kN/m ²]
24,00	24,00	0,20	$1,98 \times 10^7$

Tabela 6-4 Dados do Lastro

γ_{unsat}	γ_{sat}	ν	E_{ref}	c_{ref}	ϕ	Ψ
[kN/m ³]	(kN/m ³)	[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]	[°]
20,00	20,00	0,26	$1,98 \times 10^7$	25,00	37,50	7,50

Tabela 6-5 Dados do Sublastro

γ_{unsat}	γ_{sat}	ν	E_{oed}	c_{ref}	ϕ	ψ
[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]	[°]
20,00	20,00	0,20	30000,00	2,00	28,00	0,00

Tabela 6-6 Dados do subleito

γ_{unsat}	γ_{sat}	ν	E_{oed}	c_{ref}	ϕ	ψ
[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]	[°]
20,00	20,00	0,20	11000,00	1,00	22,00	0,00

Por meio do software, que é destinado a análise geotécnica de deformação e estabilização do solo, considerando o uso de geossintéticos, modelou-se primeiramente a estrutura em elementos finitos (Figura 6-5).

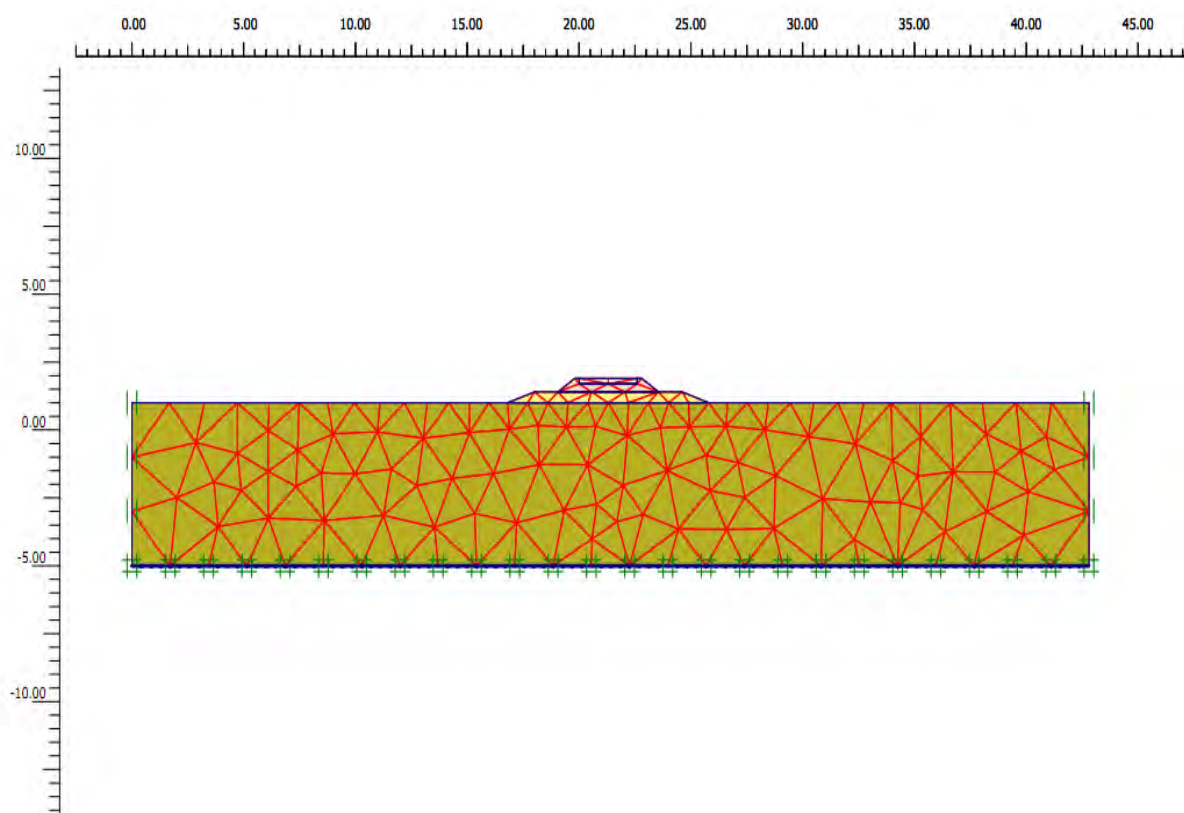


Figura 6-5- Modelo da estrutura ferroviária em elementos finitos.

Para a análise da estrutura, foi primeiramente modelada uma via ferroviária sem utilização de geogrelha, sob carregamento o carregamento de 32 tf. A segunda modelagem foi com a aplicação de geogrelha na interface subleito/sublastro. A terceira foi feita com aplicação na interface lastro sublastro. A quarta modelagem foi feita com aplicação nas 2 interfaces lastro/sublastro e sublastro/subleito.

A geogrelha utilizada é fabricada pela Huesker, modelo Fortrac 100/100-35 M, e possui módulo de elasticidade igual a 1800 kN/m.

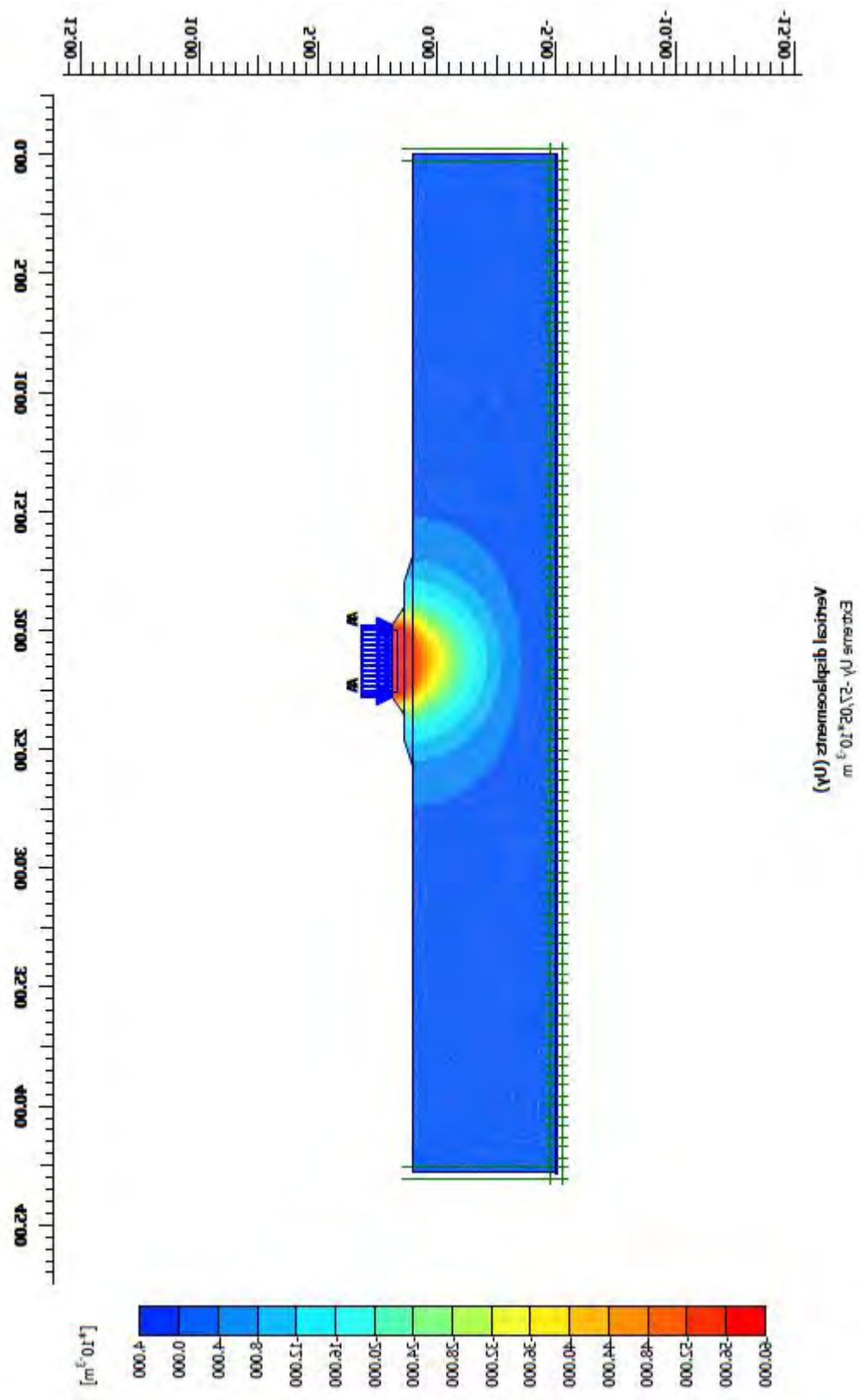


Figura 6-6 – Modelagem da via férrea sem geogrelha

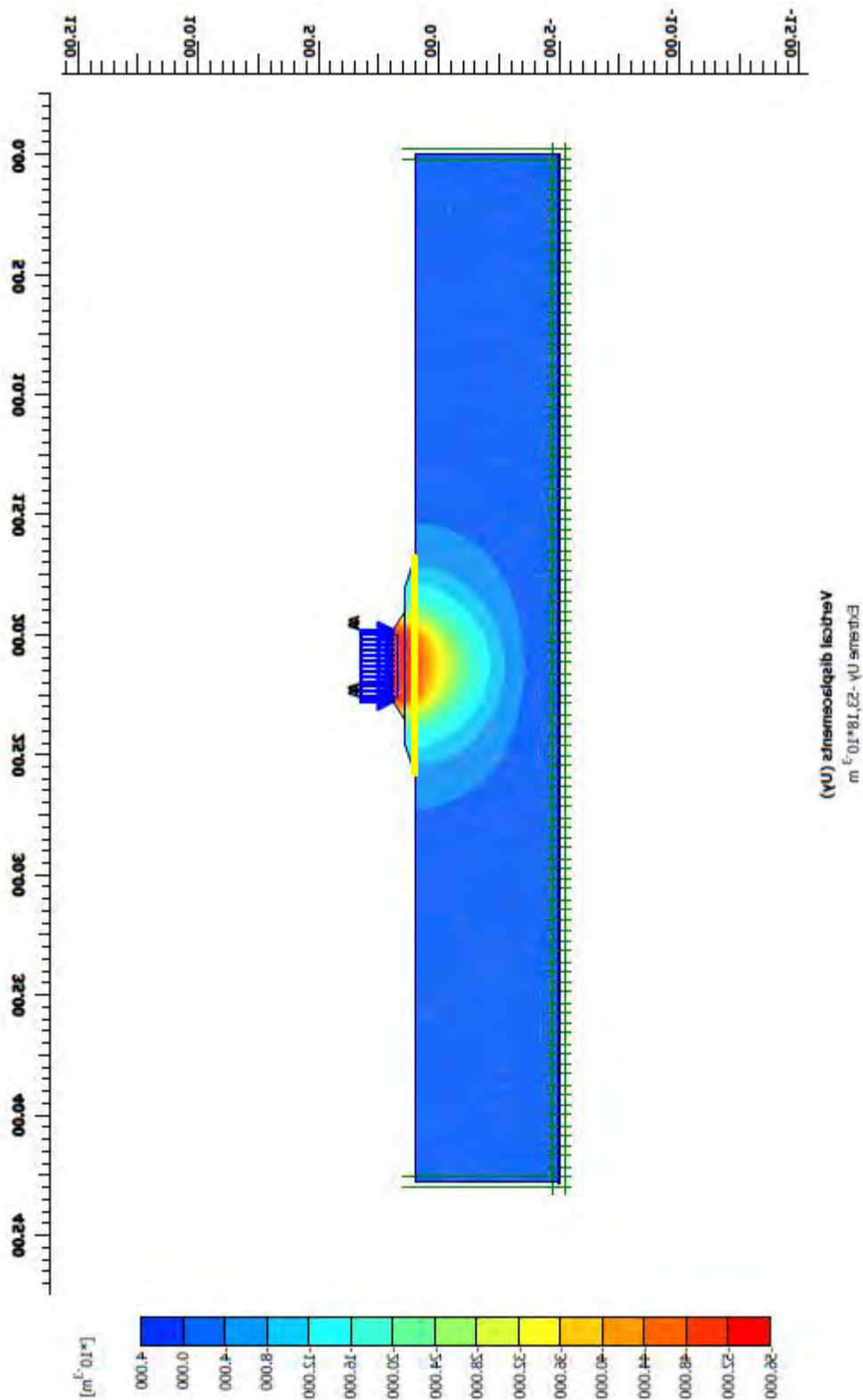


Figura 6-7 - Modelagem da via férrea com geogrelha na interface sublastro/subleito.

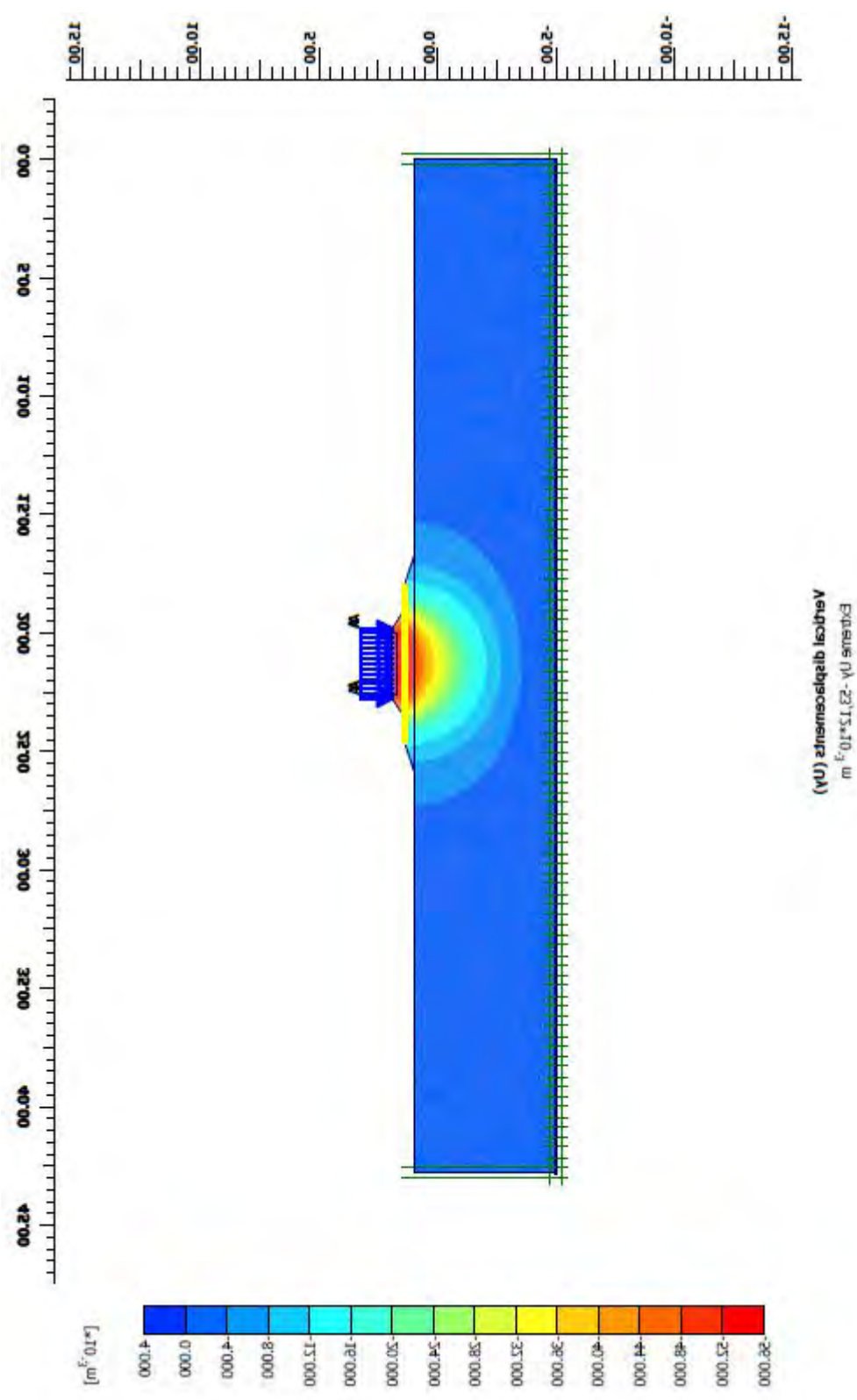


Figura 6-8 - Modelagem da via férrea com geogrelha na interface lastro/sublastro.

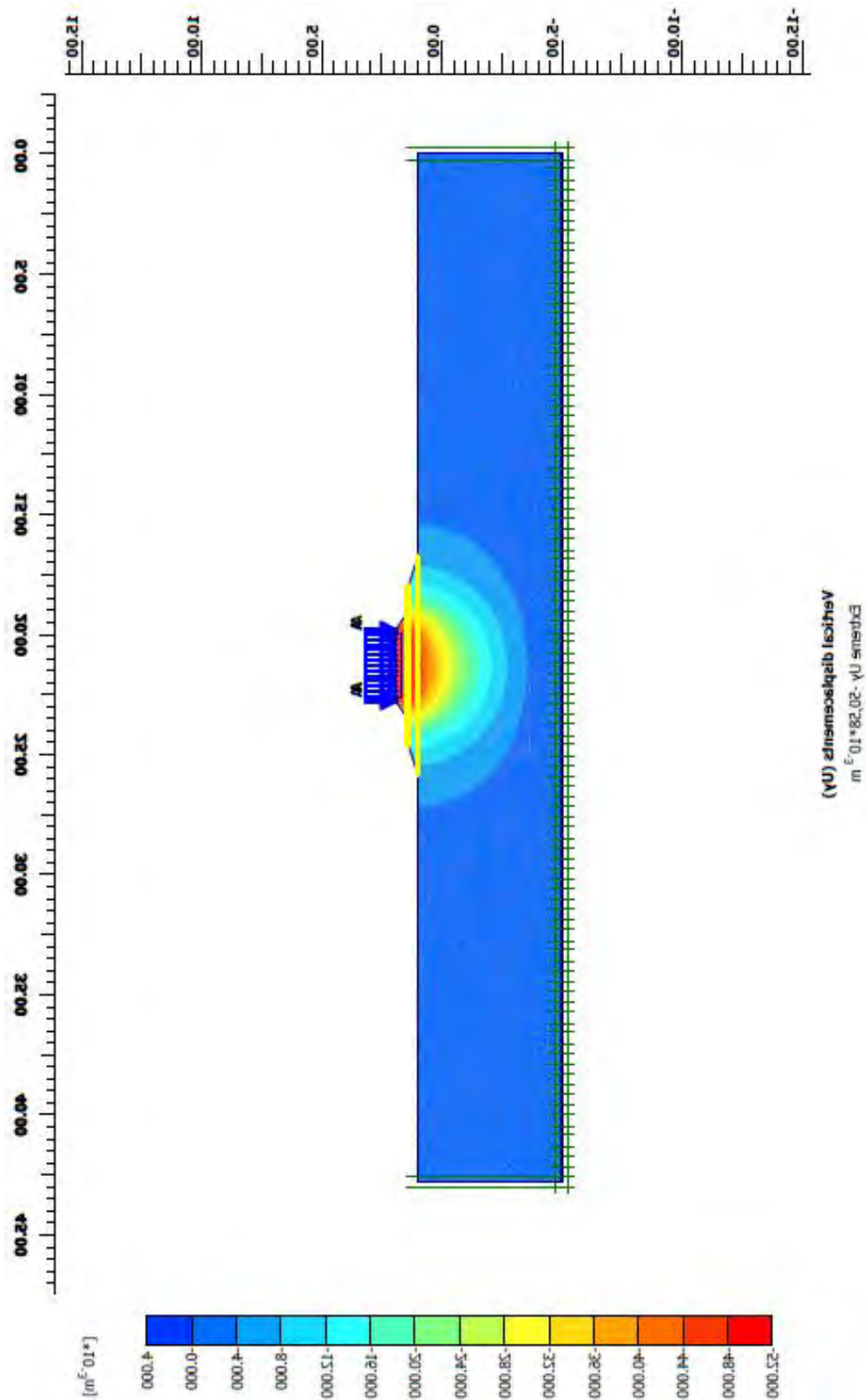


Figura 6-9- Modelagem da via férrea com geogrelha nas interfaces lastro/sublastro e sublastro/subleito.

6.3. Análise de resultados

Com a simulação feita no software FERROVIA, a deformação máxima do dormente foi de 0,3879 cm, enquanto que pelo software PLAXIS, a deformação máxima obtida para o dormente foi de 0,5705 cm. O programa PLAXIS é mais preciso, pois considera um maior numero de parâmetros, não permitindo, portanto, a comparação entre os programas.

Analisando apenas os resultados do PLAXIS, pode-se ver uma notável diminuição da deformação máxima da estrutura (no dormente) com a colocação da geogrelha. A simulação sob o carregamento de 32 tf em uma estrutura sem geogrelha fornece uma deformação máxima de 0,5705 cm. Com a colocação da geogrelha na interface sublastro/subleito, a deformação diminui para 0,5318 cm. Com a colocação da geogrelha na interface lastro/sublastro, a deformação diminui para 0,5312. Com uma aplicação de geogrelhas em ambas as interfaces, lastro/sublastro e sublastro/subleito a deformação diminui para 0,5058 cm.

Comparando-se, portanto o resultado do PLAXIS para a simulação sem geogrelha (0,5705 cm) com a simulação com duas geogrelhas nas interfaces lastro/sublastro e sublastro/subleito (0,5058 cm), obtém-se uma diferença de 0,06 cm.

7. CONCLUSÕES

Com os casos estudados durante o trabalho, puderam ser observadas as vantagens na utilização de geossintéticos em ferrovias. A aplicação dos mesmos diminui os problemas de bombeamento de finos do subleito para o lastro, evitando uma desestabilização da via e uma posterior manutenção da mesma, e serve de reforço para subleitos instáveis, diminuindo a espessura do sublastro, ou até mesmo o módulo de rigidez deste, reduzindo o custo total da ferrovia.

A utilização de geossintéticos em ferrovias para reforço e separação das camadas, também prolonga a vida útil do lastro, evitando uma constante manutenção da via e diminuindo, portanto a exploração de novas jazidas para a substituição do lastro.

Pela análise da simulação feita no programa PLAXIS no presente trabalho, pode-se concluir que com uma combinação de geogrelha na interface lastro/sublastro e sublastro/subleito fornece um melhor desempenho com uma menor deformação no dormente.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABINT - Associação Brasileira das Indústrias de Nãotecidos e Tecidos Técnicos

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.553 (2003) - Geossintéticos – Terminologia

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.824 (1993) - Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não-confinada - Ensaio de tração de faixa larga - Método de ensaio

FERNANDES, G. (2005) – Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos.

FERNANDES, G. et al. (2007) – Comportamento Mecânico de Seções Instrumentadas de Ferrovias em Escala Real de Uso com Geotêxteis e Geogrelha Intercalados entre o Subleito, Sublastro e o Lastro.

INDRARATNA, B. et al (2011) - Use of Geosynthetics in Railways including Geocomposites and Vertical Drains

KUO, C. et al. (2005) -Geosynthetics applications for heavy load railway mitigation

PENMAN, J. et al (2009) – The Use of Geogrids in Railroad Applications

PIMENTEL, K.C.A (2007) – Estradas Não Pavimentadas e Ferrovias Reforçadas com Geossintéticos

RODRIGUES, R.M., (1993a), “ Análise Estrutural da Via Permanente Ferroviária ” - São Paulo, Brasil.

VERTEMATTI, J.C. (2004), “ Manual Brasileiro de Geossintéticos”

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGUIAR, P. R. (2007) – Análise Paramétrica da Estabilidade de Plataformas Ferroviárias Degradadas.

AL SHEAR, A 2005.: “Analyse des déformations permanentes des voies ferrées ballastées – Approche dynamique”

ALIAS, J. 1984 : “La voie ferré”

AREMA – American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (2009)

BRINA, H.L. (1979), Estradas de Ferro 1 – Via Permanente

CASTELLO BRANCO, J.E., FERREIRA, R, (Coord.) - Tratado de Estradas de Ferro – Material Rodante AENFWE,

CASTRO, N.R. e LAMY, P. (1994), A Reforma e a Modernização do Setor de Transporte Ferroviário de Carga.

CORREIA, L. F. M. (2007) – Estudo de Sensibilidade dos Parâmetros de Dimensionamento de uma Via Férrea Submetida às Deformações Verticais.

FERNANDES, G. (2005)– Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados A Geossintéticos.

FERNANDES, G. (2005)– Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados A Geossintéticos.

FONTELLES, C.B. e FRÓES, M.F.V. (2000), “A Privatização da Atividade Ferroviária no Brasil”.

INDRARATNA, B. AND SALIM , W. (2005) - Mechanics of Ballasted Rail Tracks –A Geotechnical Perspective

INDRARATNA, B. AND SALIM , W. 2005: Mechanics of Ballasted Rail Tracks –A Geotechnical Perspective

JEFFS T., 1989 - Tower ballast life cycle costing

JEWELL, R.A. (1996). Soil Reinforcement with Geotextiles

RIBEIRO, L. C., FERREIRA, M. G., OLIVEIRA, N.A.C. e GARCIA, R.C.(1996), O Clube de Engenharia nos Momentos Decisivos da Vida do Brasil;

SELIG, E. T. AND WATERS, J. M., 1994. Track Technology and Substructure Management

SETTI, J. B. (2000), “História do trem”

SILVA, L. F. M. (2002) – Fundamentos Teórico-Experimentais da Mecânica Dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção da Via Permanente.

SIMEFRE – Sindicato Interestadual da Indústria de Materiais e Equipamentos Ferroviários e Rodoviários (2000), “O Novo Desafio Ferroviário Brasileiro”

STOPATTO, S (1987) – Via Permanente Ferroviária Conceitos e Aplicações

TELLES, P. C. S. (1984), História da Engenharia no Brasil; - Século XVI a XIX..

TELLES, P. C. S. (1993), História da Engenharia no Brasil; - Século XX.

ANEXO I

Dados da Grade

Heterogeneidade

Dados Gerais

Bitola (cm) = Distância entre dormentes (cm) = Módulo K (kgf/cm) =

Trilhos

E (kgf/cm²) = Largura (cm) =
 I (cm⁴) = Área de seção (cm²) =

Dormentes

E (kgf/cm²) = Área de seção (cm²) =
 I (cm⁴) = Comprimento (cm) =
 Largura (cm) = Tipo:

 Save  Close

Dados de entrada do programa FERROVIA 3.0 (Grade)

Dados da Fundação

Dados Gerais

Número de camadas = Número de incrementos de carga =  OK

Propriedades das Camadas

Camada No.:

Espessura (cm) = Código: Subcamadas =

Coef. de Poisson =

Coesão (kgf/cm²) =  Save

Ângulo de atrito (graus) =

 Close

Dados de entrada do programa FERROVIA 3.0 (Fundação)

Cargas Aplicadas

Carga No.:

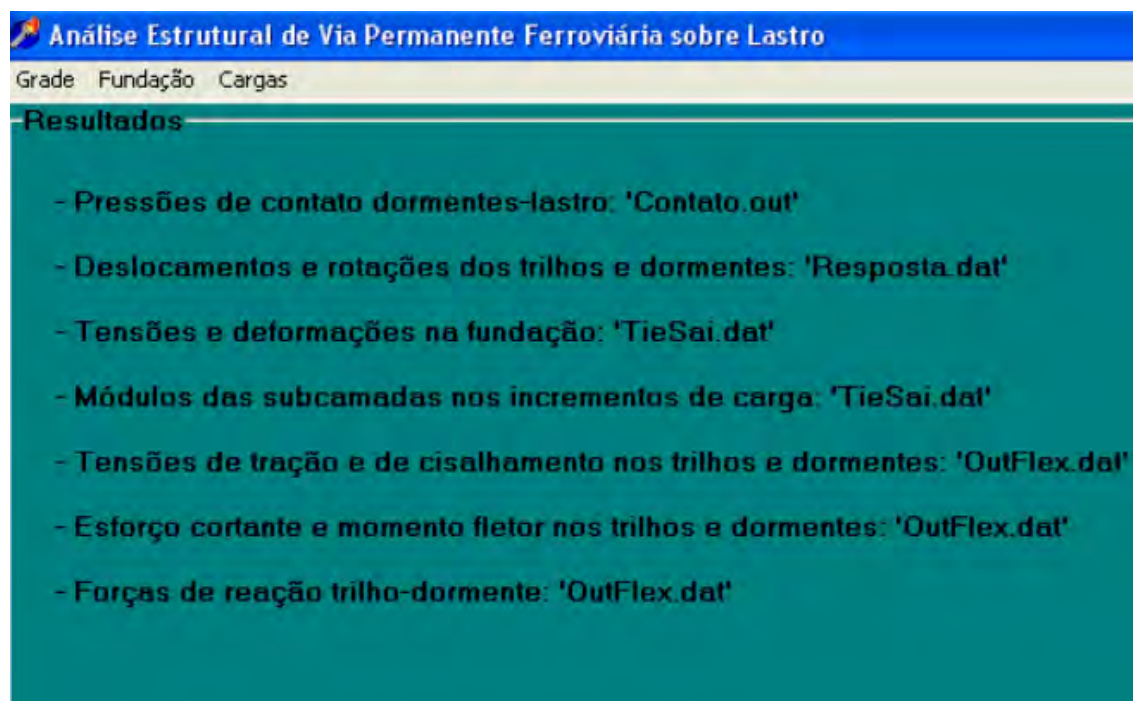
Número do ponto nodal =

Tipo de carga:

Valor =

Número de cargas aplicadas =

Dados de entrada do programa FERROVIA 3.0 (Carga aplicada).



Dados de saída do programa FERROVIA 3.0