

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PERFIL DA PLATAFORMA FERROVIÁRIA SUBMETIDA À ÁGUA DA CHUVA NO SEU COMPORTAMENTO ESTRUTURAL**

**Luisa Carla de Alencar Menezes**  
**Antonio Carlos Rodrigues Guimarães**  
**Carmen Dias Castro**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes  
Instituto Militar de Engenharia

### **RESUMO**

É usual a utilização da umidade ótima no dimensionamento de pavimentos baseado no método empírico Índice de Suporte Califórnia. No entanto as variações do clima podem alterar as condições do pavimento, sobretudo das plataformas ferroviárias pois não possuem revestimento ficando expostas às intempéries. Sabe-se que variações de umidade no solo podem alterar suas propriedades mecânicas, como o módulo resiliente. É objetivo deste trabalho simular o comportamento da umidade no solo da região da Estrada de Ferro Carajás, quando submetido à precipitação para diferentes perfis de plataforma. Para tanto realizou-se uma modelagem no software IVFlow utilizando-se como parâmetros de entrada dados de precipitação, curvas de retenção e condutividade hidráulica e modelo hidráulico. Verificou-se que o solo não restringiu a percolação da água e que o perfil de plataforma singela com aterro apresentou desempenho inferior em relação aos demais quanto à infiltração da água precipitada.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Plataforma Ferroviária, Umidade, Solo.

### **ABSTRACT**

It is usual to use optimum moisture in pavement design based on the empirical California Bearing Ratio. However, variations in the weather can change the conditions of the pavement, especially of the railway tracks because they do not have a coating that is exposed to the elements. It is known that variations in soil moisture can alter its mechanical properties, such as the resilient modulus. It is the objective of this work to simulate the soil moisture behavior of the Carajás Railroad region, when submitted to precipitation for different railway tracks profiles. For this purpose a modeling was carried out in the IVFlow software using precipitation data, retention curves and hydraulic conductivity and hydraulic model as input parameters. It was verified that the soil did not restrict the percolation of the water and that the simple platform profile with landfill presented inferior performance in relation to the others as to the infiltration of the precipitated water.

### **KEY-WORDS**

Railway Track, Moisture, Soil.

## **1. INTRODUÇÃO**

O conhecimento acerca da infiltração da água e o entendimento de como se dá a sua saturação é de grande importância em diversos campos da ciência, sobretudo no ramo da mecânica dos solos, mecânica dos fluidos com aplicação na engenharia civil. Fatores climáticos tais como a precipitação influenciam o comportamento mecânico dos solos, uma vez que ocasiona a variação de umidade e por conseguinte afetam sua resistência bem como seu módulo de resiliência.

Tal parâmetro é primordial no dimensionamento mecanístico e na avaliação estrutural de pavimentos. Atualmente existe a tendência de utilização do método mecanístico em substituição aos métodos empíricos de modo que se torna maior a relevância do conhecimento do comportamento de parâmetros que influenciem o módulo de resiliência, como a umidade. Nesse sentido, projetos usuais avaliam as propriedades mecânicas dos solos constituintes da plataforma considerando a umidade ótima, porém essa condicionante é altamente questionável haja vista que a plataforma fica exposta às intempéries. Assim, são admitidas as condições

originais na avaliação estrutural de pavimentos, contudo após a compactação ocorre uma variação transiente da umidade que influencia a capacidade de suporte desse solo.

As solicitações admissíveis considerando-se que as condições originais não condizem com a realidade em campo de uma plataforma exposta ao longo do tempo, o que pode ocasionar a degradação precoce desse pavimento, uma vez que a via é submetida a solicitações acima de sua capacidade.

O estudo em questão tem aplicação relevante no setor ferroviário haja vista que as vias não possuem a proteção do revestimento ficando assim mais suscetíveis à ação da precipitação. Seu efeito na degradação das vias é observado *in loco* porém pouco se conhece à respeito da forma como ocorre a variação de umidade proveniente das precipitações.

Atualmente a via ferroviária com maior volume transportado é a EFC, localizada em uma região de alta pluviosidade e altas temperaturas, ou seja, a plataforma fica constantemente exposta às intempéries o que provoca o desgaste precoce da via, uma vez que a água acelera o processo de degradação da via permanente.

Tendo em vista que em regiões tropicais é usual a aplicação de solo laterítico como material de sublastro devido à sua ocorrência nessas regiões e que a norma que norteia o dimensionamento dos pavimentos ferroviários, AREMA, não preconiza critérios voltados para esse tipo de material e sim para sublastros compostos por materiais pétreos de acordo com as características das vias ferroviárias estrangeiras, faz-se necessária a inclusão de novos critérios de escolha mais adequados a realidade das regiões tropicais.

Diferentemente dos materiais pétreos, o solo laterítico é sensível à ação da água e sua percolação pode comprometer a plataforma ferroviária causando decréscimo do módulo resiliente bem como deformações permanentes. Dessa maneira é coerente que a análise do comportamento hídrico do solo, levando em consideração sua permeabilidade, componha o conjunto de critérios para a seleção de materiais a serem empregados no pavimento ferroviário. Este estudo se justifica, portanto, uma vez que se verifica o problema existente e pouco se sabe sobre a influência do movimento das águas no pavimento ferroviário de modo que faltam informações para combatê-lo.

Desse modo, o principal objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do perfil no comportamento estrutural da plataforma ferroviária quando submetida à ação da chuva.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Infraestrutura Ferroviária

Para um melhor entendimento do assunto do presente trabalho faz-se necessária a abordagem acerca do conceito de pavimento ferroviário, em específico sobre a via permanente. A plataforma ferroviária é composta por trilho, dormente, aparelhos de fixação dos trilhos aos dormentes, lastro, sublastro, reforço do subleito e subleito. Tais camadas, segundo MEDINA(1998), compõem o pavimento ferroviário (Figura 1). Sua função é receber as cargas provenientes do tráfego ferroviário de modo a limitar as deformações a níveis aceitáveis.

Em particular o sublastro, camada estudada no presente trabalho, tem a finalidade de absorver os esforços transmitidos pelo lastro e transferir às camadas subjacentes. Ele pode ser composto por materiais pétreos ou por solo como no caso da EFC. Segundo BRINA (1979), uma de suas principais funções é aumentar a resistência à penetração da água permitindo uma boa drenagem da via.

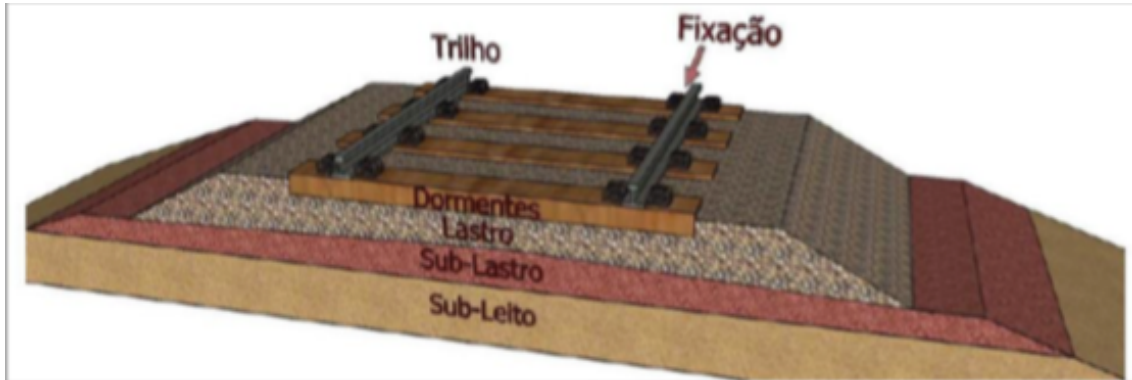


Figura 1: Componentes da via férrea. KLINCEVICIUS (2011)

## 2.2 Curva característica de umidade de um solo

A curva característica, curva de retenção ou ainda curva de sucção de um solo (Figura 2) é descrita pela relação da sucção em função do grau de saturação, teor de umidade volumétrica ou teor de umidade gravimétrica. As equações matemáticas geralmente utilizadas para as curvas de retenção são as equações de Van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980). Os coeficientes desta curva se relacionam com diferentes propriedades do solo. O conhecimento prévio da curva de retenção é de fundamental para a análise do comportamento do solo não saturado. Uma vez conhecida a curva de retenção de um determinado solo é possível se obter a curva de condutividade do material.

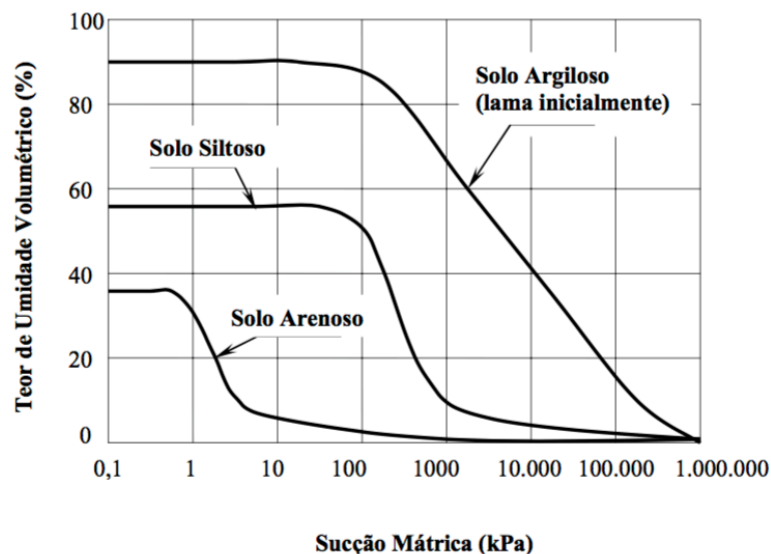


Figura 2: Diferentes formatos de curvas características de sucção de solos. (Adaptado de FREDLUNG e XING, 1994)

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Região de estudo

A região de estudo localiza-se na Estrada de Ferro Carajás, com 892 quilômetros de extensão, entre os estados do Maranhão e Pará (Figura 3).

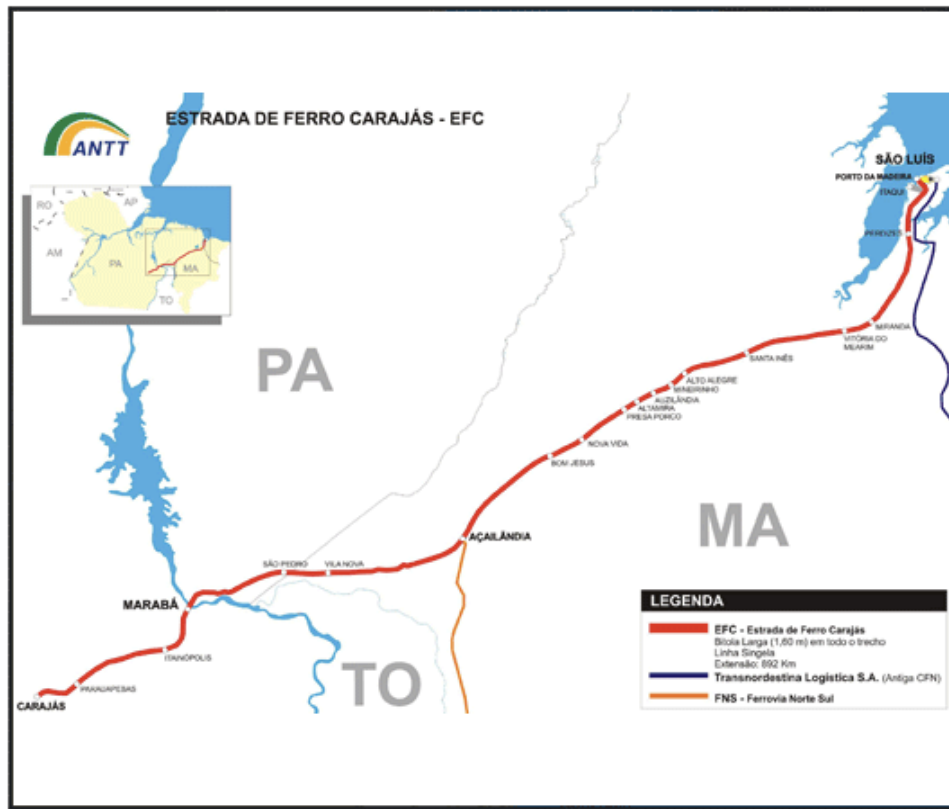


Figura 3: Mapa da Malha da Estrada Ferro Carajás. ANTT (s.d.)

A presente pesquisa é parte um projeto firmado entre o IME (Instituto Militar de Engenharia) e a VALE S.A no qual foram coletadas 53 amostras ao longo da EFC a fim de se realizar um estudo quanto à sua aplicação como camada de pavimento ferroviário. Dentre as amostras coletadas, utilizou-se para compor a camada de sublastro nas análises realizadas, a de número 26.

### 3.2 Material utilizado

A amostra coletada (Figura 4) foi identificada como uma areia laterítica (LA) segundo a classificação MCT tradicional. O solo foi caracterizado e apresentou umidade ótima de 6%.



Figura 4: Amostra coletada. GUIMARÃES & SANTANA (2014)

### 3.2 Obtenção de parâmetros

Inicialmente, de modo a obter os parâmetros necessários à simulação numérica, foi necessária a obtenção da curva característica e de condutividade do solo da amostra coletada.

Para tal realizou-se no Laboratório de Geotecnia Ambiental da COPPE, os ensaios para obtenção das curvas utilizando-se o equipamento HYPROP. Para tal foi moldado um corpo de prova com solo da amostra em questão na umidade ótima (6%) e compactou-se o solo com o auxílio de uma prensa dentro de um anel metálico. Posteriormente saturou-se o corpo de prova em água deionizada e deareada. A saturação ocorreu com 10 dias de imersão.

Neste equipamento, a sucção matricial é monitorada pelos tensiômetros posicionados em 1,25 e 3,75 cm, tendo as medidas das sucções dadas a cada minuto durante a primeira hora, seguidos de intervalos de 10 minutos até o final do ensaio; o mesmo para o peso registrado pela balança de precisão. Foram utilizados anéis de 250 mL de 8 cm de diâmetro por 5 cm de altura; e as amostras saturadas da base para o topo. A avaliação de medição HYPROP segue o método de evaporação simplificado (SCHINDLER, 1980). O método usa as mudanças de peso de amostras e as medições de potencial matricial nas amostras durante um processo de secagem, causada pela evaporação, para derivar as funções hidráulicas dos solos. A Figura 5 traz uma representação esquemática desse equipamento, constituído por uma unidade sensora onde se encontram os transdutores de pressões nos quais são acoplados os dois tensiômetros.

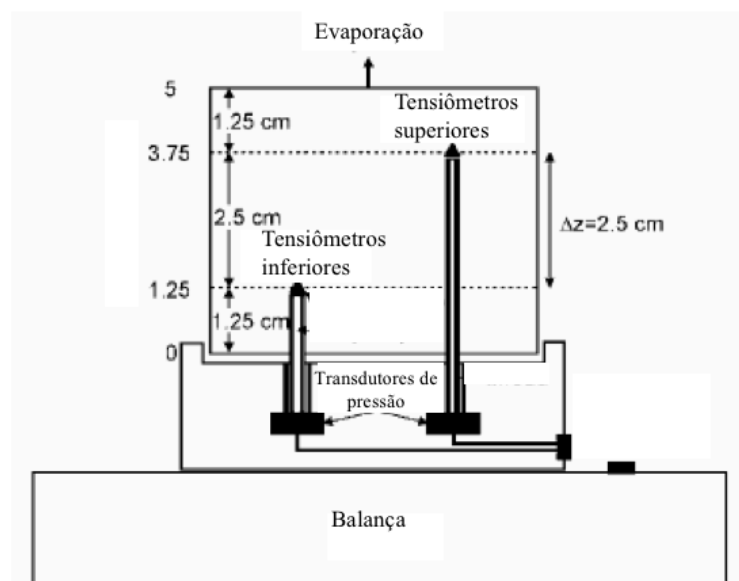


Figura 5: Representação esquemática do HYPROP. (Modificado de SCHINDLER et al, 2010).

### 3.2 Simulação Numérica

A segunda etapa deste estudo consistiu na modelagem numérica com o auxílio de um software de simulação da infiltração da água na plataforma ferroviária, IVFlow, que se utiliza do método de elementos finitos para a solução da equação de Richards, equação que governa o processo de infiltração transiente da água no solo, desenvolvido em parceria entre o Instituto Militar de Engenharia (IME) e a VALE S.A.

Para a definição do modelo considerou-se a pluviosidade do estado do Maranhão conforme banco de dados do programa. A simulação analisou o comportamento do pavimento submetido à chuva por um período de 3h. O modelo hidráulico escolhido para ajuste das curvas foi o de Van Genuchten. A simulação foi feita no modelo multilinear com base na curva de retenção e

na curva de condutividade obtidas por meio de ensaio em laboratório. Mantidos os parâmetros do ambiente, hidráulicos e do solo variou-se o perfil da plataforma segundo três classificações de perfil a saber: singela simples, singela com aterro e dupla com aterro simétrica. Para tal adotou-se os seguintes parâmetros para todas as geometrias (Tabela.1):

**Tabela 1:** Parâmetros da seção tipo

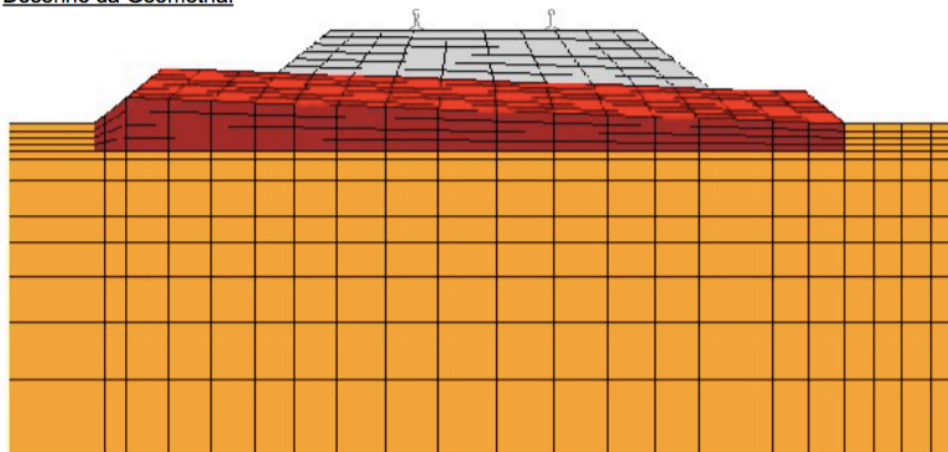
Bitola	1,6
Largura do topo do lastro (m)	3,6
Altura do lastro (central) (m)	0,5
Largura do topo do sublastro (m)	7,6
Altura do sublastro (m)	0,3
Declividade do sublastro (m/m)	1,5

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Plataforma singela simples

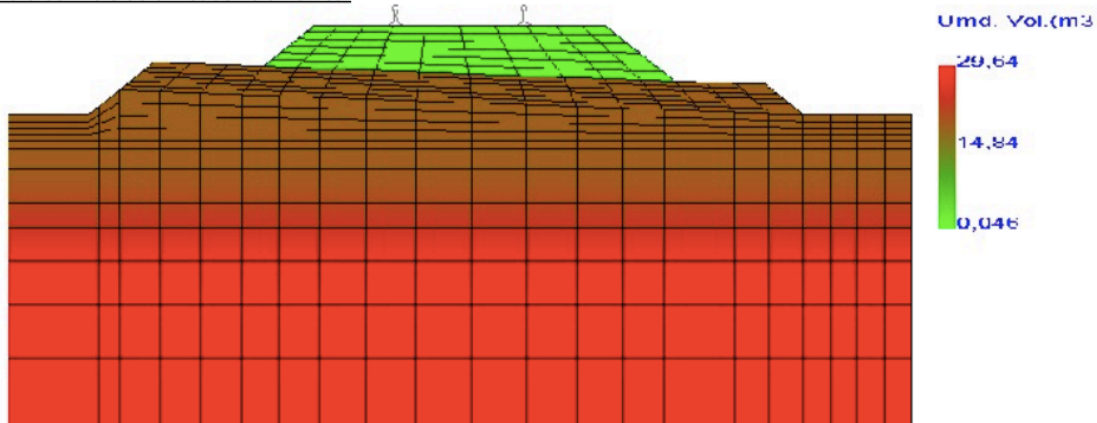
Adotado o perfil de plataforma singela simples (Figura 6) obteve-se, conforme a (Figura 7) o comportamento do fluxo da água no solo. Tal geometria permitiu a infiltração de  $0,67 \text{ m}^3$  de água precipitada por metro de via. Verificou-se ainda que a umidade do sublastro atingiu um valor de 6,9%, ou seja, apresentou um pico de variação de 16,3% acima da umidade ótima. Ainda que a coloração representada na figura de saída do software transpareça umidade uniforme no sublastro observa-se variações de umidade, considerando-se a altura da camada em questão ao longo do eixo central entre trilhos, conforme a Tabela 2.

Desenho da Geometria:



**Figura 6:** Perfil de plataforma singela simples

Valores finais de umidade volumétrica:



**Figura 7:** Umidade volumétrica na plataforma

**Tabela 2:** Variações de umidade ao longo da altura do sublastro

Z (m)	Umidade gravimétrica (%)
0	6,860
0,05	6,875
0,1	6,890
0,15	6,905
0,2	6,924
0,25	6,939
0,3	6,955

#### 4.2 Plataforma singela com aterro

Adotado o perfil de plataforma singela com aterro (Figura 8) obteve-se, conforme a (Figura 9) o comportamento do fluxo da água no solo. A geometria permitiu a infiltração de 1,09 m<sup>3</sup> de água precipitada por metro de via. Verificou-se ainda que a umidade do sublastro atingiu um valor de 6,9%, ou seja, apresentou um pico de variação de 16,3% acima da umidade ótima. As variações de umidade ao longo do sublastro podem ser observadas na Tabela 3.

Desenho da Geometria:

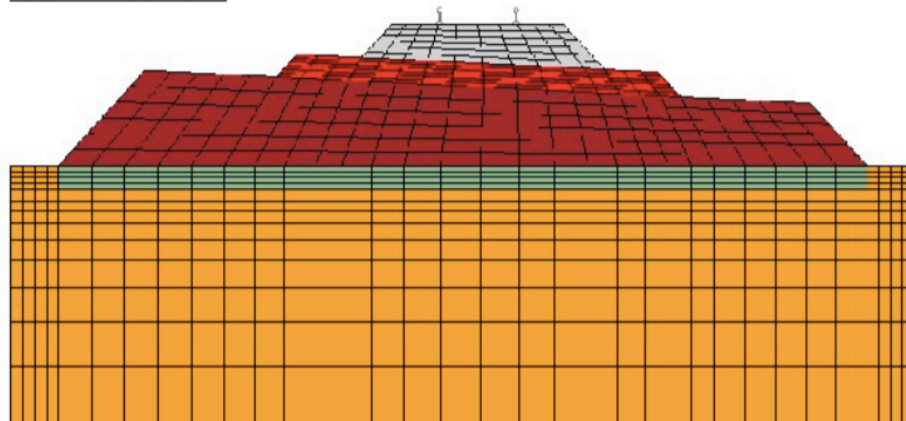


Figura 8: Perfil de plataforma singela com aterro

Valores finais de umidade volumétrica:

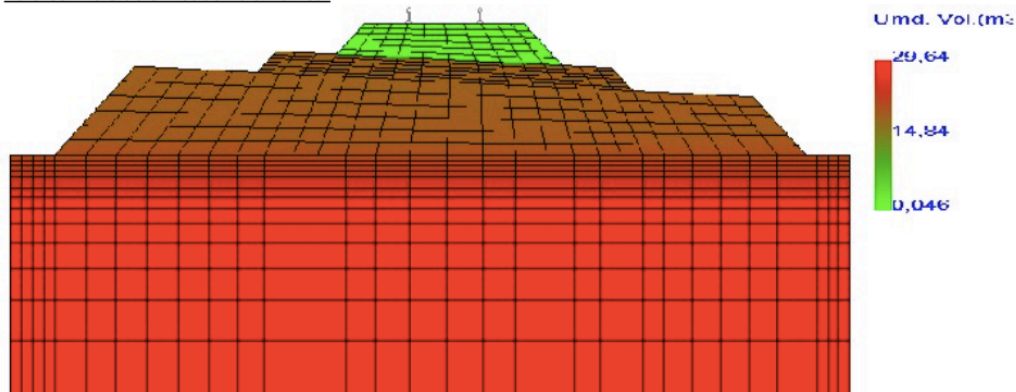


Figura 9: Umidade volumétrica na plataforma

Tabela 3: Variações de umidade ao longo da altura do sublastro

Z (m)	Umidade gravimétrica (%)
0	6,860
0,05	6,875
0,1	6,890
0,15	6,905
0,2	6,924
0,25	6,939

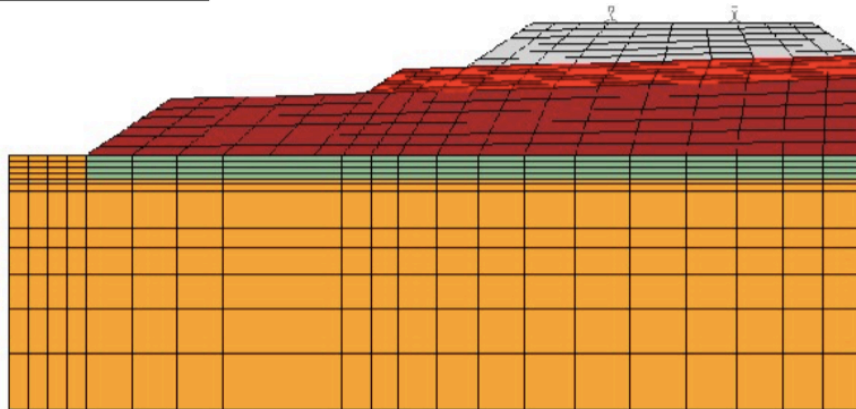


0,3	6,955
-----	-------

### 4.3 Plataforma dupla com aterro simétrica

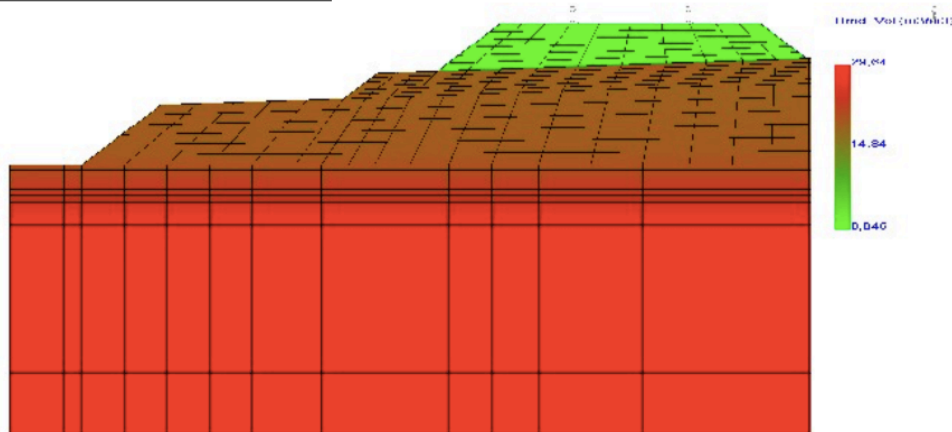
Para o perfil de plataforma dupla com aterro (Figura 10) obteve-se, conforme a (Figura 11) o comportamento do fluxo da água no solo. Foi verificada a infiltração de 0,71 m<sup>3</sup> de água precipitada por metro de via. Verificou-se ainda que a umidade do sublastro atingiu um valor de 6,9%, ou seja, apresentou um pico de variação de 16,3% acima da umidade ótima. As variações de umidade ao longo do sublastro podem ser observadas na Tabela 4.

Desenho da Geometria:



**Figura 10:** Perfil de plataforma dupla com aterro

Valores finais de umidade volumétrica:



**Figura 11:** Umidade volumétrica na plataforma

**Tabela 4:** Variações de umidade ao longo da altura do sublastro

Z (m)	Umidade gravimétrica (%)
0	6,860

0,05	6,875
0,1	6,890
0,15	6,905
0,2	6,924
0,25	6,939
0,3	6,955

## 5. CONCLUSÕES

Partindo dos objetivos inicialmente propostos, procurou-se verificar com base nos parâmetros conhecidos, a influência do perfil o comportamento da plataforma ferroviária quando submetida à ação da chuva. Com base nos resultados obtidos dos ensaios em laboratório e das simulações numéricas realizadas pode-se concluir que:

- (a) O solo arenoso laterítico analisado não restringiu de forma eficiente a percolação da água precipitada. Verificou-se em todos os perfis uma variação de 16,3% acima da umidade ótima. Diante disso não seria recomendável a utilização do solo estudado como camada do pavimento ferroviário uma vez que quando submetido à ação da chuva, estará suscetível a deformações permanentes devido ao decréscimo do módulo resiliente consequência do aumento da umidade.
- (b) O perfil de plataforma singela com aterro se mostrou o mais eficiente quanto ao critério de resistência à infiltração. Na simulação em que o perfil foi adotado observou-se uma infiltração cerca de 1,5 vezes menor quando comparado aos outros perfis estudados. Os perfis de plataforma singela simples e dupla simétrica com aterro apresentaram desempenho próximo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Seção de Pós-Graduação em Transportes do Instituto Militar de Engenharia por ter possibilitado a execução da presente pesquisa.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COELHO, C. R. B. Estudo Teórico e Experimental de Fluxo de Água e Transporte de Solutos em Equilíbrio e Não-Equilíbrio em Solos Tropicais, UFRJ/COPPE, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, 2016, 141 p.
- FREDLUND, D. G., XING, A. Q. 1994. *Equations for the soil-water characteristic curve*, Canadian Geotechnical Journal, 31(4), 521 - 532
- FREDLUND, D.G., RAHDARJO, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. 517p. New York. Wiley-Interscience Publications.
- GONÇALVES, R.F. Estudo da influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado em subleito de rodovias no interior paulista, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, USP, São Paulo, 1999, 149 p.
- GUIMARÃES, A. C. R. SANTANA, C. S. A. Relatório – primeira visita técnica à EFC. Projeto IME/Vale: Estudos para Revisão de Critérios de Projeto da Via Permanente. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2014.
- KLINCEVICIUS, M.G.Y Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, USP, São Paulo, 2011, 146 p.
- MEDINA, J., Mecânica dos Pavimentos, Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997.
- MOTTA, Laura M. G., Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Coppe/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
- SILVA, B.A, Aplicação das metodologias MCT e Resiliente a solos finos do centro-norte do Mato Grosso, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, IME, Rio de Janeiro, 2003.

- SOUSA, M. A. S. Análise geotécnica de solos tropicais de ocorrência ao longo da estrada de ferro carajás para uso como camadas de pavimento rodoviário, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016, 222 p.
- TAKEDA, M.C., Influência da variação da umidade pós compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista, Tese de Doutorado em Engenharia de Civil, USP, São Carlos, 2006.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Society of America Journal, 44, 892 – 898.

---

Luisa Carla de Alencar Menezes ([luisacarlaam@hotmail.com](mailto:luisacarlaam@hotmail.com))

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães ([guimaraes@ime.eb.br](mailto:guimaraes@ime.eb.br))

Carmen Dias Castro ([carmenc14@gmail.com](mailto:carmenc14@gmail.com))

Seção Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil.