

*XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP*



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudo da Influência da Condutividade Hidráulica em Solos Não-Saturados Quando Empregados no Sublastro Ferroviário

Luisa Carla de Alencar Menezes

Doutoranda, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, luisacarlaam@hotmail.com

Antonio Carlos Rodrigues Guimarães

Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, guimaraes@ime.eb.br

Carmen Dias Castro

Pesquisadora, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, carmendc14@gmail.com

RESUMO: A condutividade hidráulica tem influência sobre a capacidade do solo de permitir o fluxo de água através de seus poros alterando seu teor de umidade e por conseguinte seu desempenho mecânico uma vez que influencia o seu módulo resiliente. Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a condutividade hidráulica de dois solos tropicais distintos com vistas a verificar a viabilidade do seu emprego na camada de sublastro da plataforma ferroviária. As amostras foram coletadas ao longo da EFC objetivando analisar a sua aplicabilidade como camada de pavimento ferroviário. As curvas de condutividade hidráulica, obtidas no HYPROP a partir da curva de retenção ajustada pelo modelo de Fredlung-Xing bimodal, indicaram uma condutividade de $4,6 \cdot 10^{-6}$ cm/s na saturação e $1,2 \cdot 10^{-7}$ cm/s na umidade ótima para a amostra 1, considerada baixa para solos arenosos.

As curvas da amostra 2, ajustadas pelo modelo de Fredlung- Xing unimodal, indicaram um valor de $1,2 \cdot 10^{-6}$ cm/s para a condutividade de saturação e de $3,6 \cdot 10^{-8}$ cm/s no teor ótimo, considerado baixo para solos arenosos. Nesse caso o modelo teve um ajuste satisfatório para a curva de condutividade. Antes do ajuste o HYPROP indicou uma condutividade de $8,5 \cdot 10^{-6}$ cm/s, mais adequada para o material. Logo pode-se constatar que o modelo não ofereceu um bom ajuste. A amostra 1 apresentou mais baixa permeabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Condutividade hidráulica, solos não-saturados, sublastro.

ABSTRACT: Hydraulic conductivity influences the soil's ability to allow water to flow through its pores, changing its moisture content and therefore its mechanical performance as it influences its resilient modulus. This research had as main objective to evaluate the hydraulic conductivity of two different tropical soils in order to verify the viability of its use in the sub-ballast layer of the railway platform. The samples were collected during the EFC aiming to analyze its applicability as a railway pavement layer. The hydraulic conductivity curves, obtained in the HYPROP from the retention curve adjusted by the bimodal Fredlung-Xing model, indicated a conductivity of $4.6 \cdot 10^{-6}$ cm/s in saturation and $1.2 \cdot 10^{-7}$ cm/s at the optimum humidity for sample 1, considered low for sandy soils.

The curves of sample 2, fitted by the unimodal Fredlung-Xing model, indicated a value of $1.2 \cdot 10^{-6}$ cm/s for the saturation conductivity and $3.6 \cdot 10^{-8}$ cm/s at the optimum content, considered low for sandy soils. In this case, the model had a satisfactory fit for the conductivity curve. Before the adjustment HYPROP indicated a conductivity of $8.5 \cdot 10^{-6}$ cm/s, most suitable for the material. Therefore, it can be seen that the model did not offer a good fit. Sample 1 had the lowest permeability.

KEYWORDS: Hydraulic conductivity, unsaturated soil, sub-ballast.



1 Introdução

O modal ferroviário possui grande importância na Matriz de Transportes uma vez que apresenta o diferencial da capacidade de transportar grandes volumes por longas distâncias. Entretanto essa atividade acarreta impactos tanto ambientais quanto econômicos. A crescente demanda por aumento da capacidade de transporte e por maiores velocidades, a exemplo do mês de março de 2021 que apresentou um crescimento de 30% no transporte de cargas por ferrovias em relação ao mesmo mês de 2020, exige um aprimoramento da plataforma ferroviária e da seleção de seus materiais constituintes de modo a minimizar custos de manutenção e viabilizar um dimensionamento mais adequado.

Atualmente o modal ferroviário representa cerca de 15% da matriz de transportes e a meta do Ministério da Infraestrutura seria atingir a marca de 30% em 2025 e de 40% até 2050, de modo a se equiparar a proporção do Brasil à de outros países (Canadá, Austrália, Estados Unidos, China entre outros).

Diante desse cenário de crescimento, percebe-se que existe uma tendência de se desenvolver soluções no intuito de atender às necessidades atuais de modo a garantir a vida útil do pavimento conforme projetado. Para tal, faz-se necessário o acompanhamento adequado na seleção de materiais que irão constituir a plataforma ferroviária já no seu dimensionamento.

As camadas do pavimento ferroviário são constituídas por solos não-saturados que são expostos a ações térmicas, hidráulicas e mecânicas. Isso posto, uma modelagem adequada da subestrutura ferroviária deve integrar todos esses fenômenos em uma análise hidromecânica uma vez que seu desempenho é afetado pelas condições ambientais tais como a precipitação, a infiltração e a evapotranspiração.

Atualmente a seleção de materiais para emprego em sublastro é feita por meio de ensaios de granulometria, Índice de Suporte Califórnia (CBR) e índices físicos que não são critérios suficientes para avaliação de desempenho quando se trata de solos tropicais uma vez que eles poderiam ser descartados caso esses critérios tradicionais fossem os únicos a serem utilizados e, no entanto, apresentam bom comportamento quando aplicados no pavimento. Em 2015, MEDINA e MOTA já consideram o uso do CBR ultrapassado uma vez que não considera a deformabilidade do pavimento.

Tais critérios são adotados com base em normas e procedimentos importados tais como “American Association of State Highway and Transportation Officials” (AASHTO) ou Transportation Research Board (TRB), que são provenientes de uma realidade em que são utilizados materiais pétreos na camada de sublastro, típicos das regiões como Europa e EUA. Essa realidade não condiz com a do Brasil, onde, devido a altas temperaturas e pluviosidade, é grande a ocorrência de solos tropicais. Em muitos casos este tipo de material compõe os taludes de corte nos locais onde o pavimento será implantado, mas não podem ser utilizados por não atenderem os requisitos exigidos pelas normas atuais.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Principais características do sublastro

Quando se trata das características e funções principais da camada de sublastro existe divergência entre autores acerca de quais funções ela deveria desempenhar.

BRINA (1988) considera que o sublastro deve aumentar a resistência do leito a erosão e a penetração da água, preservando assim as propriedades do subleito. Em contrapartida, SELIG & WATERS (1994) acreditam que o sublastro deve permitir a drenagem de água que ascenda por capilaridade do subleito,



funcionando como camada drenante. FORTUNATO (2005), afirma também que ele deve obedecer ao critério de filtro de Terzaghi, com uma certa permeabilidade que viabilize a drenagem, contudo ela deve impedir o bombeamento de finos pelas camadas subjacentes. Por outro lado, PAULA (2008) *apud* SILVA FILHO (2013) indica que o sublastro deve ser impermeável com a finalidade de proteção do subleito de modo a prevenir erosões

Corroborando SELIG & WATERS, INDRARATNA (2011) afirma que a camada deve ser permeável de modo a permitir o escoamento da água e a conduzi-la para os dispositivos de drenagem laterais. Permitir a ascensão da água do subleito dissipando suas poropressões excessivas quando saturado. Para tal é necessário que o sublastro atenda ao critério de filtro de Terzaghi. Consta em AREMA (2013) que o sublastro deve ser impermeável de modo a impedir a saturação do subleito. A camada deve ainda ser suficientemente permeável de modo a permitir a capilaridade da água impedindo a saturação do subleito.

No entanto, deve-se considerar que os autores que defendem que a camada de sublastro deve obedecer ao critério de filtro de Terzaghi tem como objeto de estudo materiais pétreos. Tendo em vista que nesta pesquisa serão adotados como material da camada de sublastro, solos tropicais, deve-se considerar que, segundo NOGAMI & VILLIBOR (1995), os solos tropicais, quando classificados como lateríticos, exibem potencial interessante para o emprego na pavimentação pois possuem alta resistência e baixa permeabilidade, características de interesse em projetos de vias permanentes.

2.2 O uso de solos finos no pavimento ferroviário

Em particular, solos finos lateríticos, quando empregados na camada de sublastro, tem apresentado um bom desempenho segundo alguns autores.

DELGADO (2012) apresenta um estudo com utilização de materiais finos lateríticos coletados no oeste do Maranhão, onde obteve excelentes resultados validando inclusive a utilização deste material para sublastro, uma vez que se observou uma tendência de acomodamento das deformações permanentes da camada considerando assim o material classificado como LG` como apto a ser empregado na camada de estudo. OSTEN (2012) avaliou o desempenho de solos tropicais também da região da EFC, reprovados para utilização no pavimento ferroviário segundo critérios tradicionais, comprovando seu bom comportamento no emprego em camada de sublastro quanto aos aspectos mecânicos.

SOUSA (2016) em seu estudo, obteve o módulo resiliente de 53 amostras coletadas ao longo da Estrada Ferro Carajás e as amostras classificadas como lateríticas apresentaram em sua maioria módulo resiliente médio elevados com potencial para aplicação em sublastro. LOPES (2017) analisou a aplicabilidade de quatro tipos de solos tropicais (finos e granulares, lateríticos e não lateríticos) com o objetivo de aplicá-los como sublastro de uma via permanente ferroviária a partir do entendimento das suas características hidráulicas e mecânicas. A partir dos resultados de ensaios laboratoriais e modelagem numérica de infiltração utilizando o modelo IVFlow, a autora concluiu que os solos lateríticos estudados, apresentaram elevadas sucções, baixa permeabilidade susceptibilidade à água. MENEZES (2018) comparou o desempenho de cinco tipos de solos quando empregados na camada de sublastro, enquanto barreira capilar de proteção do subleito, de uma plataforma ferroviária submetida à ação da chuva. A autora concluiu que os solos lateríticos arenoso e a areia laterítica tiveram bom desempenho e superior aos demais tipos de solo.

GUIMARÃES *et. al* (2021) verificaram em campo o bom desempenho de um solo fino arenoso laterítico utilizado como material de sublastro em um trecho executado em 2015 e que segue monitorado e permanece em boas condições até o momento

LÓPEZ-PITA *et al.* (2007) ressaltam que quando o subleito possui propriedades mecânicas inadequadas, passa a contribuir com uma grande parcela da degradação total da geometria. Dessa forma cresce de importância que a camada de sublastro de fato funcione como barreira capilar de proteção do subleito.



Corroborando, um dos principais e cruciais fatores que ocasionam problemas no subleito ferroviário é o clima, pois aliado às elevadas cargas por eixo de ferrovias HEAVY HAUL passam a influenciar diretamente a condição de saturação do solo, induzindo à variação da sua capacidade de carga (LI e SELIG, 1995).

3 Materiais e métodos

As amostras utilizadas no presente trabalho foram coletadas ao longo da Ferrovia Estrada de Ferro Carajás (EFC), que liga os municípios de São Luís no Maranhão e Parauapebas no Pará, possui 972 quilômetros de extensão e transporta, por ano, mais de 120 milhões de toneladas de carga (Figura 1)



Figura 1. Mapa de localização EFC (Adaptado de ANTT, 2017)

A coleta foi efetuada a fim de se realizar uma análise quanto à sua aplicabilidade como camada sublastro do pavimento ferroviário. Foram analisadas duas amostras entre os materiais coletados, que visualmente, não atenderiam aos critérios de projeto caso fossem consideradas as metodologias de seleção tradicionais. Com base nesses critérios todas as amostras seriam classificadas como inaptas ao emprego na camada de sublastro uma vez que nenhuma atende ao critério de IP máximo de 6%, conforme indicava BRINA (1988). Aplicando-se o critério de granulometria previsto pela AASHTO novamente todas as amostras seriam reprovadas uma vez que não atendem as faixas preconizadas nas normas tradicionalmente adotadas. Porém, caso fossem utilizadas métodos mais modernos poderiam apresentar bom comportamento.

As amostras estudadas foram denominadas amostra 1 e 2, classificadas respectivamente, segundo a metodologia MCT, como uma areia laterítica e como solo arenoso não-laterítico e sua caracterização geotécnica realizada por SOUSA (2016). (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização geotécnica (Fonte: A autora)

Caracterização Geotécnica												
Distribuição granulométrica (%)	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	Compactação/Energia intermediária			Índices Físicos		
			Fina	Média	Grossa		W _{ótima} (%)	MEAS (g/cm ³)	DR	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Amostra 1 (LA)	9	6	9	57	9	6	6	2.07	2.65	17	NP	17
Amostra 2 (NA)	6	21	70	1	0	0	15.4	1.74	2.66	NL	NP	NP



Inicialmente, objetivando a obtenção da curva de condutividade do solo das amostras estudadas, peneirou-se o material disponível e a fração retida na peneira nº10 (abertura de 2mm) foi descartada uma vez que o equipamento HYPROP, utilizado para obtenção da função hidráulica não admite que se trabalhe com material de granulometria superior. O procedimento para execução do ensaio foi conduzido conforme preconiza o manual do aparelho. Os ensaios para obtenção das funções hidráulicas foram conduzidos no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ – Seção de Geotecnia Ambiental.

Em seguida foram moldados os corpos de prova nos anéis do equipamento HYPROP para serem submetidos à saturação que foi feita em água deionizada e deaerada. Previamente deareou-se a água deionizada com auxílio de uma bomba. Com o auxílio do programa HYPROP-FIT faz-se a aquisição de dados. São medidos em intervalos o peso e tensão em ambos os tensiômetros e a partir dos dados aferidos são derivados os valores de condutividade. São aferidos valores de tensão entre 0 cm e 1000cm de coluna d'água.

Foram então obtidas as curvas de retenção e de condutividade das duas amostras por meio de ensaio com a utilização do equipamento HYPROP e o ajuste das curvas obtidas foi realizado com o auxílio do software HYPROP-FIT, selecionando-se o modelo que melhor se ajustava dentre aqueles disponíveis.

4 Resultados

Concluídos os ensaios puderam ser obtidos, por meio do programa HYPROP, os dados elencados abaixo nas tabelas 2 e 3 referentes à amostra 1 e tabelas 4 e 5 referentes à amostra 2.

Tabela 2. Propriedades hidráulicas e informações gerais da amostra 1.

PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	
Condutividade hidráulica de saturação (cm/hr)	0.0099
Umidade de saturação (m³/m³)	0.2946
Umidade residual (m³/m³)	0.1817
INFORMAÇÕES GERAIS	
Umidade gravimétrica ótima (%)	6
Massa específica do solo seco (Kg/m³)	2070
Massa específica da água (Kg/m³)	1000

Tabela 3. Dados da curva de condutividade amostra 1.

CURVA DE CONDUTIVIDADE	
Pressão (cm)	Condutividade hidráulica (cm/h)
0	0.0099
-29.9916252	0.009995137
-36.4753947	0.0099328005
-44.874539	0.006757542
-57.0164272	0.004263721
-79.7994687	0.001948896
-126.765187	0.002040745
-245.470892	0.00165878
-515.228645	0.000954528
-805.378441	0.002136922



Tabela 4. Propriedades hidráulicas e informações gerais da amostra 2.

PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	
Condutividade hidráulica de saturação (cm/hr)	0.0074
Umidade saturada (m³/m³)	0.3662
Umidade residual (m³/m³)	0.0621
INFORMAÇÕES GERAIS	
Umidade gravimétrica ótima (%)	16,5
Massa específica do solo seco (Kg/m³)	1730
Massa específica da água (Kg/m³)	1000

Tabela 5. Dados da curva de condutividade amostra 2.

CURVA DE CONDUTIVIDADE	
Pressão (cm)	Condutividade hidráulica (cm/h)
0	0.0074
-5,0119	0.00776
-11,0917	0.00831
-41,5911	0.00812
-63,6796	0.00457
-719449	0.00513
-89,1251	0.00162
-127,9381	0.00048
-264,2409	0.00014
-642,6877	0.00003

A curva de condutividade hidráulica, obtida no HYPROP a partir da curva de retenção ajustada pelo modelo de Fredlung-Xing bimodal, (Figura 2), indicou uma condutividade de $4,6 \cdot 10^{-6}$ cm/s na saturação e $1,2 \cdot 10^{-7}$ cm/s na umidade ótima para a amostra 1, considerada baixa para solos arenosos.

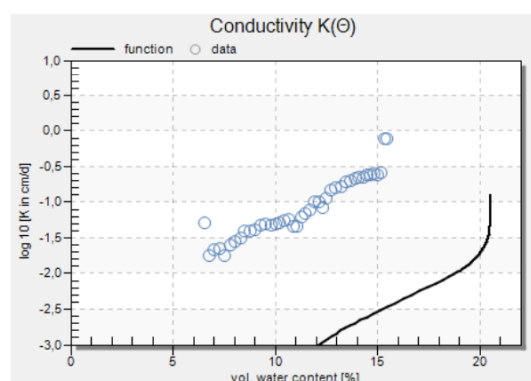


Figura 2. Curva de condutividade amostra 1.

A curva da amostra 2 (Figura 3) foi ajustada pelo modelo de Fredlung- Xing unimodal e indicou um valor de $1,2 \cdot 10^{-6}$ cm/s para a condutividade de saturação e de $3,6 \cdot 10^{-8}$ cm/s no teor ótimo, considerado baixo para solos arenosos. Nesse caso o modelo teve um ajuste satisfatório para a curva de condutividade. Antes do



ajuste o HYPROP indicou uma condutividade de $8,5 \cdot 10^{-6}$ cm/s, mais adequada para o material. Logo pode-se constatar que o modelo não ofereceu um bom ajuste.

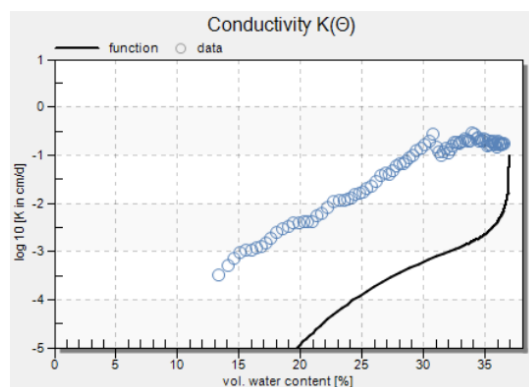


Figura 3. Curva de condutividade amostra 2.

5 Conclusão

Nenhuma das amostras avaliadas atenderam aos critérios tradicionais utilizados na seleção de materiais para compor a camada estudada por se tratarem de solos com alto teor de finos e, portanto, pela metodologia empregada atualmente seriam descartadas.

A amostra 1 apresentou ainda baixa permeabilidade, propriedade desejável para que o sublastro se comporte como camada impermeável protegendo o subleito. Seu caráter laterítico contribui para a sua aplicabilidade devido à formação de blocos rígidos, comportamento típico das lateritas, conferindo maior capacidade de suporte ao pavimento. Do ponto de vista do comportamento hidráulico pode-se concluir que o solo da amostra 1 está apto a compor o sublastro ainda que não atenda os critérios tradicionais praticados atualmente já que poderia funcionar como barreira capilar de proteção do subleito.

O resultado obtido ratifica as conclusões de trabalhos anteriores como os de DELGADO (2012), OSTEN (2012), SILVA FILHO (2013), SOUSA (2016), LOPES (2017) e MENEZES (2018) que verificaram o bom desempenho do SAFL na pavimentação ferroviária quanto ao comportamento mecânico e hidráulico. Em específico, SOUSA (2016) ao avaliar o solo da amostra 1 quanto ao seu comportamento mecânico, indica a aplicação do material em camada de sublastro bem como MENEZES ao avaliar os mesmos solos estudados no presente trabalho concluiu que seriam adequados para aplicação na camada de sublastro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Militar de Engenharia e à COPPE/UFRJ e aos profissionais que possibilitaram a execução da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREMA - American Railway Engineering Maintenance-of-Way Association. Manual for Railway Engineering. Lanham. Arema, 2009. Vol I a IV.

ANTT (2017), Agência Nacional de Transportes Terrestres. Mapa da Malha da Estrada de

*XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
técnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP*



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Brina, H. L. (1988). Estradas de Ferro. 2 ed. Belo Horizonte, Brasil: Editora UFMG.

Delgado, B. G. “Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Estrada de Ferro Carajás”. Dissertação de mestrado. UFOP, Ouro Preto, 2012.

Fredlung, D.G., Rahdarjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. 517p. New York. Willey-Interscience Publications.

Fortunato, E. M. C. Renovação de plataformas ferroviárias: estudos relativos à capa- cidade de carga. Ph.D Thesis, Universidade do Porto, Porto, 2005.

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.

Indraratna, B. S. (2011). Advanced rail geotechnology–ballasted track. 1 ed. Leida, Holanda: CRC Press.

Li, D.; Selig, E. T. Evaluation of railway subgrade problems. Transportation Research Record, n. 1489, p. 17–25, 1995.

Lopes, L.S. Análise experimental do comportamento hidráulico e mecânico de um pavi- mento ferroviário, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Ja- neiro, 2017, 135 p.

López Pita, A.; Teixeira, P. F.; Casas, C.; Ubalde, L.; Robusté, F. Evolution of track geometric quality in high-speed lines: ten years experience of the Madrid–Seville line. Proc. Inst. Mech. Eng., 221(F2), 147–155. 2006.

Medina, J., & Motta, L. G. (2015). Mecânica dos Pavimentos. 3 ed, Rio de Janeiro.

Menezes, L.C. Estudo da Influência da Água da Chuva na Plataforma Ferroviária. Dissertação de mestrado, IME, Rio de Janeiro, Brasil, 2018.

Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1995). Uma Nova Classificação de Solos para Finali- dades Rodoviárias. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHA- RIA, 1981, Rio de Janeiro, Anais. Rio de Janeiro, RJ, ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos), 1981, v.1, p 30-41.

Osten, F. B. (2012). Avaliação de Solos Tropicais para Sublastro da Estrada de Ferro Carajás. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.

Rahardjo, H.; Melinda, F.; Leong, E. C.; Rezaur, R. B. Stiffness of a compacted residual soil. Engineering Geology, v. 120, n. 1–4, p. 60–67, 2011.

Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). Track Geotechnology and Substructure Manage- ment. Londres, UK: Thomas Telford Services Ltd.

Silva Filho, J.C., Análise numérica do comportamento mecânico de um pavimento fer- roviário para diferentes tipos de veículos., Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, 2013.

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 em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016, 222 p.