



USO DE ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS COM CAL EM PAVIMENTOS FERROVIÁRIOS NA REGIÃO DE CURITIBA-PR

Rafael Witiuk¹; Beatriz Pozzebon²; Mayara Gomes³ e José Carlos Silva Filho⁴

¹ Engenharia de Projetos, Rumo - rafael.witiuk@rumolog.com, beatriz.pozzebon@rumolog.com, mayara.gomes@rumolog.com, jose.filho@rumolog.com

RESUMO

A perspectiva de investimento no setor ferroviário poderá atingir R\$ 67 bilhões em obras de aumento de capacidade, construção de novas ferrovias e solução de conflitos ferroviários urbanos. Deste modo, tem-se a expectativa de aprofundamento dos estudos de soluções construtivas para obras de infraestrutura. Nesse sentido, o presente trabalho apresentou o estudo de caso de um projeto de ampliação de um pátio em Curitiba/PR, no qual foi realizada a estabilização química de solos com cal para viabilizar a exploração das jazidas locais como material de sublastro e corpo de aterro. Para a avaliação da estrutura do pavimento foi utilizado o software Systrain. Os resultados da mistura de solo com cal à 3,5% viabilizaram a redução da expansão em 30% e aumento do módulo de resiliência em aproximadamente 20%. Foram demonstrados os ganhos estruturais decorrentes da aplicação da cal hidratada e evidenciaram a pertinência do software Systrain para a referida análise.

PALAVRAS-CHAVE: Systrain, estabilização química, pavimento ferroviário.

ABSTRACT

The investments perspective in the railway sector could reach R\$ 67 billion in capacity expansion, new railways construction and conflicts between urban and railway traffic. Thus, it is expected deeper constructive solutions studies for infrastructure works. In this sense, the present paper presented the case study of a yard extension project in Curitiba / PR, in which the chemical stabilization of soils with lime was carried out to enable the exploration of local deposits as sub-ballast material and landfill body. Systrain software was used to evaluate the pavement structure behaviour. The results of mixing soil with lime at 3,5% made it possible to reduce the expansion by 30% and increase the resilience module by approximately 20%. The structural gains resulting from the application of lime demonstrated and showed the relevance of the Systrain software for that analysis.

KEYWORDS: Systrain, chemical stabilization, railroad track

1. INTRODUÇÃO

A década de 2020 será marcada pelo início de um novo ciclo de investimentos, que poderá atingir R\$ 67 bilhões em obras de aumento de capacidade, solução de conflitos urbanos e expansão da malha ferroviária (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2019). O referido processo está condicionado à criação de novas concessões e à renovação dos contratos de concessão vigentes. Tais contratos foram criados pelo Plano Nacional de Desestatização (PND), nos anos 1990, com vigência de 30 anos e prorrogáveis por mais 30 anos (DOS SANTOS, 2011). Ao longo desse período, as concessionárias promoveram um



aumento de 197% na produção do sistema de transporte ferroviário nacional, que em 1996 foi de 137 giga toneladas-quilômetro útil (Gtku) e, em 2018, atingiu 407 Gtku (ANTT, 2020).

Nesse sentido, o Governo Federal prevê um aumento ainda maior na participação do modo de transporte ferroviário para os próximos anos, podendo atingir 30% de participação na matriz de transporte nacional até 2030 (EPL, 2015). Em última instância, entende-se que a necessidade de aumento de capacidade do setor ferroviário incidirá em obras de infraestrutura que implicarão no desenvolvimento de estudos e projetos de engenharia ferroviária. Dentre os principais objetos de estudo tem-se o subleito da ferrovia e os solos disponíveis para a realização das obras de pavimentação e terraplenagem.

Deste modo, é evidente o interesse em estudar soluções de engenharia que viabilizem o emprego de solos de baixa capacidade de suporte e, principalmente, elevados níveis de expansão, para seu uso na infraestrutura ferroviária. Notadamente, pode-se considerar o uso de estabilização físico-química como uma das propostas de tratamento dos solos expansíveis a serem empregados em obras de pavimentação (DE SOUZA, 2019). Nesse sentido, o presente artigo tem por objetivo apresentar um estudo de caso envolvendo solos expansíveis na região de Curitiba, no Estado do Paraná, no qual foi realizado o tratamento de estabilização química para viabilizar o emprego destes solos no pavimento ferroviário.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

No intuito de demonstrar os estudos desenvolvidos serão trabalhados inicialmente os conceitos de pavimento ferroviário e estabilização química.

2.1. Pavimento ferroviário

Segundo Spada (2005), o pavimento compreende uma camada compactada, constituída de material que apresenta resistência a deformação, apoiada sobre o subleito, sendo este de rigidez inferior e com maior suscetibilidade às deformações permanentes.

Em relação ao sublastro, vale frisar que uma das principais funções é a redução dos esforços transmitidos pelo lastro a um valor minimamente igual à pressão admissível no subleito. Ademais, atua como camada de bloqueio evitando processos erosivos no subleito e a contaminação do lastro com finos, provocando assim sua cimentação.

Segundo Brina (1979), o material a ser selecionado para o sublastro deve obedecer às seguintes especificações: índice de grupo (IG) igual a 0; limite de liquidez (LL) máximo de 35; índice de plasticidade (IP) máximo de 36; classificação pela tabela da *transportation research board* TRB, grupo A; expansão máxima de 1%; índice de suporte Califórnia (CBR) mínimo de 30.

Senço (2007) salienta ainda que, somente a camada mais próxima da superfície pode ser nomeada como subleito, uma vez que à medida que se aprofunda no maciço, as pressões exercidas são minoradas até se tornarem desprezíveis. Segundo Heukelon e Klomp (1962), para definir as tensões admissíveis no subleito, deve ser considerada a Equação 3.

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 * M_R}{1 + 0,7 * \log N} \quad (3)$$

Nesta expressão, M_R é o valor do Módulo de resiliência e N é o número de ciclos ou repetição de eixos que Eisenmann (1974) considerou, para ferrovias da 1ª categoria como sendo $N = 2,2 \times 10^6$.

2.1.1. Métodos numéricos aplicados a simulação do pavimento ferroviário

No que se refere a análise do pavimento ferroviário, os métodos empírico-mecanísticos partem da definição de um modelo matemático que permite determinar a tensão e a deformação do pavimento, associado a parâmetros empíricos que definem as condições de contorno para aceitação dos resultados. Ao longo dos últimos 40 anos diversas ferramentas de análise do pavimento foram desenvolvidas, notoriamente o Geotrack, Illtrack, Kentrack, Ferrovia e Systrain, além de outras ferramentas computacionais para análise de estruturas, como o ABACUS e ANSYS (SILVA FILHO, 2018).

2.2. Estabilização química

Em função dos elevados índices de expansão dos solos estudados, o emprego de tratamentos de estabilização química de solos expansivos pode ser considerado uma solução de engenharia potencial para o referido problema de projeto. Tal solução tem sido empregada para obras de infraestrutura possibilitando a viabilização de emprego de materiais que, de outro modo, seriam descartados (DE SOUZA ALMEIDA, 2019)

No caso particular dos solos argilosos, a estabilização química com adição de cal provoca reações de troca iônica, mudanças das estruturas cristalinas, recarbonatações e, sobretudo, a formação de novos minerais capazes de cimentar as partículas e/ou preencher



os espaços intercristalinos (GUIMARÃES 1985). De imediato, a cal hidratada provoca elevação da alcalinidade do solo, tornando instáveis alguns dos seus constituintes, permitindo um possível ataque ao silício e ao alumínio presente nos minerais do solo e a recombinação desses íons com o cálcio, formando compostos estáveis, tais como silicatos e aluminatos hidratados de cálcio. Desse modo, em função da nova estrutura cristalina, a mistura solo-cal tende a apresentar níveis inferiores de expansão quando comparada ao material não estabilizado.

3. METODOLOGIA

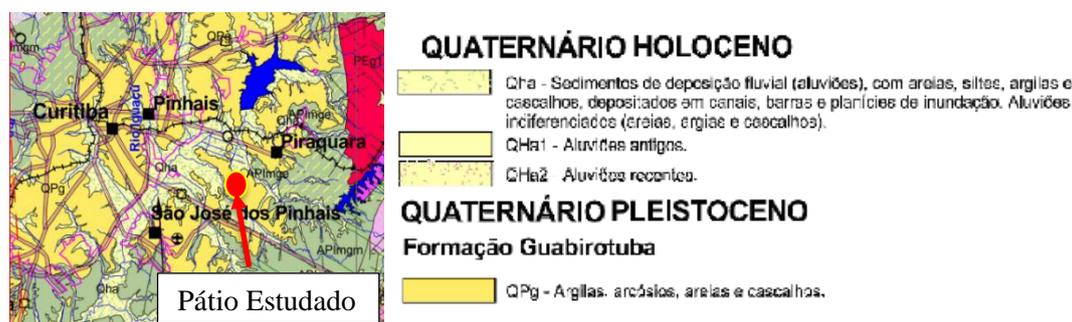
3.1. Projeto de engenharia para ampliação do pátio

A obra objeto do presente estudo consiste na ampliação de um pátio de manobra e cruzamento existente na região de Curitiba/PR. A locação da ampliação de um pátio ferroviário, envolve o estudo de diversas aspectos de um projeto, sendo o aspecto ambiental, regulatório, econômico e de prazo, os principais variáveis para a tomada de decisão (WITIUK *et al.*, 2019). Nesse sentido, o conceito da ampliação do pátio em questão buscou minimizar os riscos associados às quatro dimensões apresentadas.

Para viabilizar o aumento de capacidade de processamento de composições ferroviárias, foi proposta a ampliação de duas linhas do pátio que totalizam 1.000m de construção de ferrovia. Em função desta ampliação, houve a necessidade de expansão da plataforma de terraplenagem do pátio existente.

Para o desenvolvimento do projeto executivo da obra, notadamente as disciplinas de pavimentação e terraplenagem, foram realizadas visitas de campo, estudos geológicos e estudos geotécnicos de modo a obter as informações necessárias para a definição das melhores soluções de engenharia. Em seguida, foram realizadas campanhas de sondagem, e coletas de amostras de solos locais para estudos em laboratório.

3.1.1. Estudos geológicos



Mapa geológico da região com indicação do local de ampliação do pátio.

Fonte: Mineropar (2020)

A partir dos mapas geológicos, constatou-se que o segmento de projeto está situado integralmente na Região Geomorfológica denominada Bacia Sedimentar de Curitiba. A bacia sedimentar de Curitiba é constituída por uma capa de rochas sedimentares posicionada sobre um substrato rígido e firme que, em geral, torna o terreno estável. Essa característica estratificada permite que sejam individualizadas pelo menos duas unidades geológicas fundamentais: a primeira contempla um conjunto de rochas cristalinas denominado de Complexo Atuba, enquanto a segunda representa uma cobertura sedimentar, constituída pela Formação Guabirota e depósitos aluvionares atuais, os quais são da região em estudo. A Figura ilustra as situações observadas no local de implantação da ampliação do pátio.

Após a conclusão da visita em campo com a realização do mapeamento geológico tátil-visual, foi possível constituir um plano de sondagem e de coleta de amostras considerando os pontos geológicos críticos identificados na região do pátio tal qual apresentado nas Figuras 1 e 2.



Figura 2: Vegetação característica de solos aluvionares com presença de água
Fonte: O autor (2020)

3.1.2. Estudos geotécnicos

No que se refere aos estudos geotécnicos da região do pátio, foram realizadas coletas de amostras deformadas, para execução de ensaios de caracterização, CBR, expansão e ensaios triaxiais em laboratório. No total, foram coletadas seis amostras deformadas na região do projeto. A seguir, a Figura 28 e a Figura 29 apresentam planta com o local de realização dos ensaios e coletas de amostras.



Figura 28: Localização dos ensaios, sondagens e coletas de amostra (AM)
Fonte: O autor (2020)



Figura 29: Localização dos ensaios, sondagens e coletas de amostra (AM)

Fonte: O autor (2020).

Para as seis amostras deformadas coletadas, foram realizados os seguintes ensaios: granulometria completa, Limites de Atteberg, compactação energia intermediária, ensaio triaxial dinâmico de módulo de resiliência e de deformação permanente.

Durante a abertura dos poços de inspeção para a coleta de amostras deformadas, foi possível observar que a camada superficial é caracterizada como aterro de argila arenosa, com aproximadamente 50 cm de espessura, seguida de camada de sedimento, composta por argila, ora com característica siltosa, ora arenosa. Além disso, observou-se nível d'água a 5 m de profundidade, aproximadamente. As Tabela 23 e Tabela 24 apresentam o quadro resumo dos resultados dos ensaios executados.

Tabela 23: Resultados – Análise granulométrica e Limites de Atterberg.

Amostra	Análise Granulométrica - ABNT - NBR-7181						Limites		
	Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	LL (%)	LP (%)	IP (%)
AM-01	2%	9%	12%	12%	26%	39%	64	38	26
AM-02	4%	11%	7%	9%	18%	51%	61	30	31
AM-03	12%	17%	10%	10%	14%	37%	42	21	21
AM-04	6%	14%	7%	8%	17%	48%	57	27	30
AM-05	5%	12%	14%	16%	27%	26%	46	25	21
AM-06	4%	6%	7%	9%	26%	48%	52	32	20

Fonte: Os autores, 2020.

Tabela 24: Resultados - Classificações, Compactação Proctor Intermediário, ISC e expansão.

Amostra	Classificação		Compactação Proctor Intermediário		ISC (%)	Expansão (%)
	HRB AASHTO (IG)	U S C S	γ_s (kN/m ³)	hot (%)		
AM-01	A-7-5(16)	MH	15,71	18,22	3	6,3
AM-02	A-7-6(19)	CH	16,97	15,68	3	8,5
AM-03	A-7-6(8)	CL	18,67	13,18	11	3,7
AM-04	A-7-6(17)	CH	16,15	20,08	1	9,7
AM-05	A-7-6(9)	CL	16,61	17,84	14	4,4
AM-06	A-7-5(14)	MH	15,1	22,68	15	3,7

Fonte: Os autores, 2020.



Assim, os resultados dos ensaios de caracterização indicam que o eixo a ser implantado estará assente, majoritariamente, sobre solo de composição argilosa, classificado segundo T.R.B. (Transportation Research Board) como A-7-5 e A-7-6. Além disso, observa-se a predominância da fração de argila em todas as amostras, com teores de 26% a 51%, seguida pela fração de silte, com teores de 14% a 27%. O limite de liquidez variou de 42% a 64% e o de plasticidade de 21% a 38%. Os valores de ISC das amostras ensaiadas figuram entre 1% e 15% no Proctor Intermediário, enquanto os resultados de expansão figuram entre 3,7% e 9,7%.

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. O ensaio triaxial dinâmico de módulo de resiliência é de grande importância para a caracterização da capacidade de suporte das camadas do pavimento, uma vez que obtém parâmetros para identificar a resposta elástica do pavimento frente à aplicação de cargas repetidas que provem dos veículos.

Segundo Silva Filho (2018), o módulo de resiliência varia em função da constituição, da composição mineralógica, da textura e da plasticidade da fração fina. Outros fatores que devem ser considerados nessa variação são: umidade, densidade e estado de tensões.

O módulo de resiliência, MR, é definido pela equação (1) de Medina e Motta (2015).

$$M_r = k_1 * \sigma_3^{k_2} \quad (1)$$

sendo: k1, k2 as constantes de regressão do modelo obtidas com os resultados do ensaio triaxial dinâmico; σ_d a tensão desviadora; e σ_3 a tensão confinante.

A Tabela 25 apresenta os valores obtidos para os ensaios realizados com as amostras coletadas. É apresentado também o módulo de resiliência médio (MRmédio), contudo, não é o valor mais significativo.

Tabela 25: Parâmetros experimentais obtidos dos ensaios triaxiais de módulo de resiliência

Amostra	MRmédio (MPa)	MR=f(sd)	
		k1 (MPa)	k2
AM-01	285	67,861	-0,577
AM-02	218	61,07	-0,518
AM-03	412	170,96	-0,363
AM-04	211	58,12	-0,528
AM-05	284	64,745	-0,593
AM-06	423	118,93	-0,514

Fonte: O autor (2020)

A equação (2) apresenta a expressão matemática utilizada para definir a deformação permanente, ϵ_p .



$$\varepsilon_p = A * N^B \quad (2)$$

sendo: A, B as constantes de regressão do modelo obtidas com os resultados do ensaio triaxial dinâmico; e N, número de ciclos de carga.

A Tabela 26 apresenta os valores obtidos para os ensaios realizados com as amostras coletadas.

Tabela 26: Parâmetros experimentais obtidos a partir dos ensaios triaxiais de deformação permanente.

Amostra	A	B
AM-01	0,7453	0,0666
AM-02	0,4593	0,0401
AM-03	0,1704	0,0534
AM-04	0,6644	0,0714
AM-05	0,6789	0,0563
AM-06	0,3196	0,0774

Fonte: O autor (2020)

Com relação a deformação permanente, foi observado os valores se mantiveram baixos para todas as amostras, sendo a 2 mm.

Por fim, os ensaios de CBR mostraram uma expansão elevada, conforme apresentado na Tabela 24, indicando valores entre 3,7% e 9,7%. Assim, apesar do material presente no pátio possuir valores elevados de módulo de resiliência (especialmente para as Amostras 3 e 6) e baixos valores de deformação permanente, deve-se levar em consideração os valores de expansão elevados, os quais são atingidos na presença de água. Desse modo, estes solos não poderiam ser empregados como sublastro do pavimento ferroviário, pois o limite de expansão para esse material é de 1%.

Conforme apresentado no presente estudo, as condições dos solos da região da ampliação do pátio apresentaram limitações quanto a disponibilidade de material competente para constituir o pavimento ferroviário em função dos elevados níveis de expansão destes materiais, superior ao limite de 1%.

Deste modo, foi proposta a adição de 3,5% de cal para promover a estabilização química de uma das amostras (Amostra 6) de solo estudadas para verificar a possibilidade de emprego deste material tratado como sublastro do pavimento ferroviário. Para tanto, foi reensaiada a referida amostra para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), expansão e ensaio triaxial dinâmico para definição do módulo de resiliência e deformação permanente. A partir dos resultados obtidos, foram realizadas simulações da estrutura do pavimento ferroviário por meio do software Sysrain de modo a determinar se a referida

solução apresenta resultados satisfatório em termos de tensão deformação que permita o emprego do material estudado a referida obra.

Para a realização destas simulações foram consideradas a geometria da ferrovia estudada, as características do trem-tipo ferroviário real e as propriedades de todas as camadas conforme estudado em observância ao referencial bibliográfico pertinente.

4. RESULTADOS

No que se refere aos ensaios de expansão da amostra com adição de 3,5% de cal, tem-se que a medida no ensaio de CBR na mistura com zero dias de idade apresentou expansão de 1,65 % após cerca de apenas 24 horas de imersão em água, fechando o ensaio com 2,63%. Desse modo, os resultados obtidos a partir da mistura de solo da amostra 6 com um teor de 3,5% de cal hidratada, permitiu a diminuição da expansão final do solo em 30%, porém os resultados de expansão ainda se mantiveram superiores à 1% para a amostra estudada

Para o valor do módulo resiliente com adição de cal, tem-se que a média obtida para zero dias foi de 286 MPa, enquanto que após sete dias aumentou para 519 MPa, representando um aumento de 20%. Em relação ao ensaio de deformação permanente é possível observar que a curva apresentou valores acumulados muito baixos, inferiores a 1,00 mm, e uma clara tendência à acomodação destas deformações. Ao inserir os resultados dos ensaios realizados após adição de cal no software Sysrain como material de sublastro foram obtidos os resultados gráficos apresentados na Figura 5.

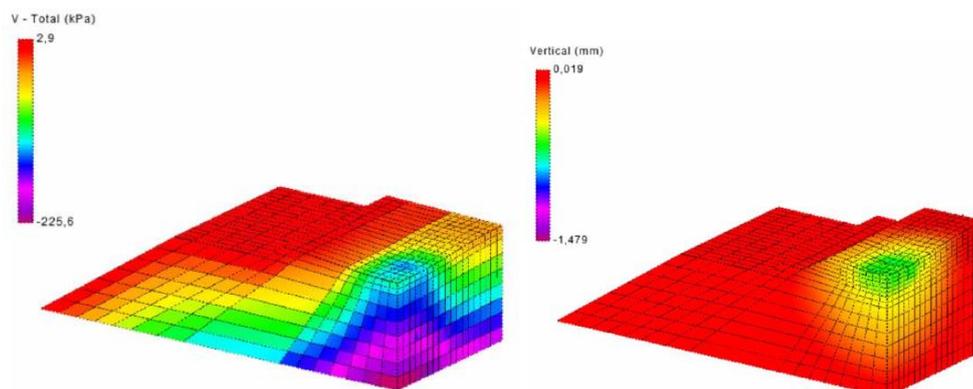


Figura 30: Resultados de deformação total e tensão vertical no subleito.

Fonte: O autor (2020)

O valor obtido para a deformação total do pavimento foi 1,45mm, estando inferior à deflexão admissível segundo a AREMA (2013) de 6,35 mm para ferrovias tipo B. A tensão



cisalhante no dormente foi de 1880 kPa, a tensão normal no lastro foi de 189 kPa, a tensão máxima normal do sublastro e subleito foram de 225 kPa, esta última permaneceu abaixo da tensão admissível para o subleito conforme a Equação 3 foi de 570kPa.

Em função dos resultados dos ensaios de expansão e visando aproveitamento dos materiais de terraplenagem, foi projetado o envelopamento do solo expansivo com material competente em uma camada de 1,50 m de espessura. Ainda em observância aos resultados obtidos, foi proposto que, para o pavimento ferroviário, o material fosse escavado em uma espessura de 30 cm e recompatado utilizando mistura de solo com teor de 3,5% de cal hidratada, de modo a reforçar a camada de subleito.

6. CONCLUSÕES

Ao longo dos estudos desenvolvidos na região do projeto foram constatadas condições geológico-geotécnicas que demandavam a definição de soluções de engenharia que garantissem a viabilidade técnica e econômica do projeto. Deste modo, foram realizados ensaios geotécnicos específicos para avaliar as condições do subleito da região.

Conclui-se que, com a realização dos ensaios de estabilização química, utilizando adição de 3,5% de cal hidratada, foi observado um acréscimo significativo no módulo de resiliência do material, bem como a diminuição da expansão em 30% e manutenção dos níveis de deformação permanente.

Ainda, foi realizada uma simulação numérica utilizando os valores de módulo de resiliência obtidos nos ensaios com mistura de solo-cal. Os resultados obtidos demonstraram a pertinência do uso do software Systrain para a referida análise de modo que foi possível verificar as condições de desempenho do pavimento ferroviário, o que demonstrou ser factível o uso do referido solo como material de pavimentação uma vez que os resultados de deformação e tensão no subleito permaneceram dentro dos limites admissíveis. No entanto, em função de não atender os requisitos de norma, foi proposto o uso do referido solo como núcleo de aterro e como camada de subleito.

REFERÊNCIAS

ANTT (2020). **Anuário do Setor Ferroviário. Agência Nacional de Transportes Terrestres, Brasília, DF.** Disponível em: < <https://www.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>>. Acesso em: 16 de abr. 2018.



AREMA (2013). **Manual for Railway Engineering. American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association.** Lanham, MD

DE SOUZA ALMEIDA, L. W., DE SOUZA, L. H. P., DE SOUZA ALMEIDA, W. M., & DA SILVA JÚNIOR, F. V. (2019). **Estabilização química do solo com adição de sílica ativa e cimento, para utilização em camadas de pavimentação rodoviária.** Engineering Sciences, 7(1), 11-21.

DOS SANTOS, S. (2011) **Transporte ferroviário: História e Técnicas.** Cengage Learning, Boston, MA, EUA.

EISENMANN J. ET AL. (1974) **Forschungs arbeiten, auf dem gebiet des Eisenbahn- und strasse-nobernaues.**

EPL (2015). **Plano nacional de Logística.** Escritório de planejamento e Logística. Brasília, DF.

GUIMARÃES, J.E.P.(1985) Tijolos solo-cal. In: Reunião Aberta da Indústria da Cal, V, São Paulo. **Anais**, p. 121-130.

HEUKELOM, W.; KLOMP, A. J. G. (1962). **”Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction”.** Proceedings, 1 International Conference of Structures Design of Asphalt Pavements, 1962, Ann Arbor, University of Michigan,

MINEROPAR-MINERAIS, D. P. S. (2001). **Atlas geológico do Estado do Paraná.** Curitiba: Mineropar, 1.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. (2019) **Status dos Projetos de Parcerias. Departamento de Estruturação e Articulação de Parcerias (SFPP).** Disponível em: <https://www.mattosfilho.com.br/Documents/SFPP_PARCERIAS_MODALIS_PU%CC%81BLICO_2019_05_17.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2020.

MOTTA, L. M. G. DA; MEDINA, J. (2015). **Mecânica dos Pavimentos.** 3º ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência.

SENÇO, W. (1997) **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 1ª Edição, Pini. São Paulo,

SILVA FILHO, J. C. (2018). **Contribuição para o Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Ferroviários com Foco nos Solos Tropicais.** Tese de Doutorado. IME. Rio de Janeiro.

SPADA, J.L.G. (2003) **Uma Abordagem De Mecânica Dos Pavimentos Aplicada Ao Entendimento Do Mecanismo De Comportamento Tensão-Deformação Da Via Férrea** Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil, Coppe/UFRJ, Rio De Janeiro.

WITIUK, R. L., & FABIANA, B. Ferramenta de auxílio a tomada de decisão para locação de pátio de cruzamento ferroviário. **Anais Congresso ANPET, Balneário Camburiú.**