

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

Dalila Carvalho de Almeida Filippetto Pires

**Avaliação das consequências da manutenção inadequada da infraestrutura de
um pavimento ferroviário**

São Paulo
2024

Dalila Carvalho de Almeida Filippetto Pires

**Avaliação das consequências da manutenção inadequada da
infraestrutura de um pavimento ferroviário**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes.

Orientador: Professor Doutor Felipe Issa Kabbach Jr.

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pires, Dalila Carvalho de Almeida Filippetto

Avaliação das consequências da manutenção inadequada da infraestrutura de um pavimento ferroviário / D. C. A. F. Pires – versão corr. -- São Paulo, 2024.

120 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Vias permanentes 2.Ferrovias 3.Infraestrutura de transportes
4.Engenharia de transportes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: PIRES, Dalila Carvalho de Almeida Filippetto

Título: Avaliação das consequências da manutenção inadequada da infraestrutura de um pavimento ferroviário

Dissertação apresentada ao Curso de Engenharia de Transportes da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Dedico este trabalho a Deus que foi um importante guia na minha trajetória. Dedico também ao meu esposo e filhos que souberam compreender minhas ausências.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Jr, Dr. Flávio Guilherme Vaz de Almeida Filho, Dr. Carlos Yukio Suzuki, Dr. Denizar Blitzkow, Dr. José Tadeu Balbo, Dra. Rosângela dos Santos Motta, Dr. Marcos Massao Futai e Dr. Faiçal Massad, que me deram muito apoio em sala de aula.

Sou grata principalmente ao Professor Doutor Felipe Issa Kabbach Jr., que foi o meu orientador, e contribuiu muito com a realização dessa pesquisa.

RESUMO

PIRES, Dalila Carvalho de Almeida Filippetto. **Avaliação das consequências da manutenção inadequada da infraestrutura de um pavimento ferroviário**. 2023. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

As camadas da infraestrutura de um pavimento ferroviário convencional podem ter seu desempenho prejudicado em razão do elevado teor de umidade do solo de subleito, ocasionado pelo acentuado grau de contaminação do lastro. O entendimento do efeito catastrófico que pode ser gerado a médio prazo a partir da manutenção inadequada do pavimento ferroviário permitirá a elaboração e implementação de planos eficientes e incremento de performance. O presente estudo tem o objetivo de dissertar sobre os principais aspectos relacionados à infraestrutura ferroviária que podem comprometer o desempenho operacional dessa modalidade de transporte. As camadas de lastro e subleito, quando não mantidas ou impactadas pela falta de manutenção de sistemas acessórios como a drenagem, perdem suas funções estruturais reduzindo a capacidade de transporte e aumentando o risco de acidentes. O presente estudo irá apresentar também uma vasta pesquisa de campo e laboratório realizada para caracterizar as condições reais de uma plataforma ferroviária em operação no Brasil e verificar os possíveis efeitos da falha de manutenção na sua capacidade de suporte instalada.

Palavras-chave: Infraestrutura de Transportes. Ferrovias. Vias Permanentes.

ABSTRACT

PIRES, Dalila Carvalho de Almeida Filippetto. Evaluation of inadequate maintenance consequences on track. 2023. 100 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

The infrastructure layers of a conventional railway may have their performance impaired due to the high moisture content of the subgrade, caused by the accentuated degree of ballast contamination. The understanding of the catastrophic effect that can be generated in the medium term from the inadequate maintenance of the railway pavement will allow the elaboration and implementation of efficient plans and increased performance. This study aims to discuss the main aspects related to the railway infrastructure that can compromise the operational performance of this mode of transport. The ballast and subgrade layers, when not maintained or impacted by the lack of maintenance of accessory systems such as drainage, lose their structural functions, reducing the transport capacity and increasing the risk of accidents. This study will also present a vast field and laboratory research carried out to characterize the real conditions of a railway in operation in Brazil and to verify the possible effects of maintenance failure on its installed support capacity.

Key words: Transportation Infrastructure. Railways. Track.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representatividade do modal ferroviário.....	15
Figura 2 - Velocidade média dos trens de carga.....	16
Figura 3 – Histórico de incidentes ocorridos nas principais malhas ferroviárias brasileiras ..	19
Figura 4 - História da ferrovia no Brasil.....	25
Figura 5 - Seção transversal da plataforma ferroviária.....	29
Figura 6 - Defeito superficial pela instabilidade de plataforma	30
Figura 7 - "GAP" na interface dormente e lastro	30
Figura 8 - Sistema de drenagem superficial.....	34
Figura 9 - Drenagem de talvegue	35
Figura 10 - Corredor Centro-Sudeste.....	42
Figura 11 - Permeâmetro UICHAP.....	47
Figura 12 - Influência da umidade na interpenetração do lastro e no bombeamento de finos para a massa específica seca de 1,4 mg/m ³	59
Figura 13 - Influência da umidade na interpenetração do lastro e no bombeamento de finos para a massa específica seca de 1,6 mg/m ³	59
Figura 14 - Valores de MR dos solos estudados nas umidades w_{ot} , w_{sat1} e w_{sat2}	60
Figura 15 - Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil	67
Figura 16 - Segmento 1	69
Figura 17 - Segmento 2	70
Figura 18 - Segmento 3	71
Figura 19 - Ensaio LWD.....	74
Figura 20 - Ensaio DCP	74
Figura 21 - Ensaio Frasco de Areia.....	75
Figura 22 - Ensaio Speedy	75
Figura 23 - Sistemas de Classificação dos solos pela granulometria	77
Figura 24 - Interface do SYSTRAIN para configuração dos materiais.....	78
Figura 25 - Modelo de pavimento no SYSTRAIN.....	79
Figura 26 - Sistema ferroviário de medição da Loram.....	80
Figura 27 – Exemplos de calibração do grau de contaminação (<i>Fouling Index</i>).....	81
Figura 28 - Exemplo de calibração de altura de camadas.....	81
Figura 29 - Validação da acurácia da metodologia de identificação da espessura das camadas	82
Figura 30 - Configuração do sistema de medição de plataforma ferroviária.....	82
Figura 31 – Exemplo de saída a partir da investigação com GPR	84

Figura 32 - Fluxograma de trabalho	84
Figura 33 - Malha ferroviária Corredor Centro-Sudeste Paulista.....	85
Figura 34 - Altura do lastro e segmentação	86
Figura 35 - Camadas do pavimento ferroviário no km 323+600 ZMM-ZMG.....	89
Figura 36 - Grau de contaminação do lastro, profundidade de contaminação e umidade	90
Figura 37 - Amostra de subleito coletada no km 195+100 ZTD3.....	94
Figura 38 - Subleito saturado kms 264+300 ZCE-ZEK (esquerda) e 193+600 ZTDD (direita)	98
Figura 39 - Sistema de drenagem comprometido no km 357+000 ZOL-ZHB.....	99
Figura 40 - Desnívelamento de via causado por baixa capacidade de suporte do subleito saturado no km 335+900 ZKR-ZOL.....	101
Figura 41 - Tensão no topo do subleito calculada no SYSTRAIN para o km 226+700 ZHI4	105
Figura 42 - Deflexão no topo do trilho calculada no SYSTRAIN para o km 410+600 ZLB-ZCB	107

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Falhas no Corredor Centro-Sudeste Paulista da VLI	43
Gráfico 2 - Natureza das falhas do Corredor Centro-Sudeste Paulista de 2013 a 2020	44
Gráfico 3 - Variação da condutividade hidráulica com a taxa de contaminação do lastro.....	46
Gráfico 4 - Velocidade de descarga para diferentes graus de contaminação de lastro	48
Gráfico 5 - Deformação plástica acumulada do lastro novo e reciclado nas condições limpo e contaminado	52
Gráfico 6 - Deformação plástica do lastro após $N = 2 \times 10^5$, em função da presença de água e o grau de contaminação	53
Gráfico 7 - Relação entre vida útil do pavimento e período de saturação.....	54
Gráfico 8 - MR Laboratório x MR calculado	57
Gráfico 9 - Influência do teor de água no Módulo resiliente e Deformação permanente da areia argilosa (esquerda) e silte (direita).....	58
Gráfico 10 - Variação do deslocamento permanente em função do número de ciclos para três diferentes massas específicas secas.....	60
Gráfico 11 - Correlações CBR x DN.....	63
Gráfico 12 - Valores de CBR relacionados à umidade e curvas de compactação para os solos típicos: a) areia siltosa bem graduada com argila, b) areia fina uniforme, c) argila densa....	63
Gráfico 13 - %CBR de acordo com a variação do tempo de saturação e do teor de umidade para solo A-4	64
Gráfico 14 - %CBR de acordo com a variação do tempo de saturação para diferentes tipos de solo.....	65
Gráfico 15 - Teor de umidade de acordo com a variação do tempo de saturação.....	66
Gráfico 16 - %CBR de acordo com a variação do tempo de saturação.....	66
Gráfico 17 - Quantidade de defeitos motivo trilho/solda quebrada e desnivelamento/torção no período de 2013 a 2020 ao longo do Segmento 1 do Corredor Centro-Sudeste Paulista	72
Gráfico 18 - Quantidade de defeitos motivo trilho/solda quebrada e desnivelamento/torção no período de 2013 a 2020 ao longo do Segmento 2 do Corredor Centro-Sudeste Paulista	72
Gráfico 19 - Quantidade de defeitos motivo trilho/solda quebrada e desnivelamento/torção no período de 2013 a 2020 ao longo do Segmento 3 do Corredor Centro-Sudeste Paulista	73
Gráfico 20 - Altura das camadas do segmento 1	86
Gráfico 21 - Altura das camadas do segmento 2	87
Gráfico 22 - Altura das camadas do segmento 3	87
Gráfico 23 - Módulo de Resiliência do Lastro no segmento 1	92
Gráfico 24 - Módulo de Resiliência do Lastro no segmento 2	92
Gráfico 25 - Módulo de Resiliência do Lastro no segmento 3	93

Gráfico 26 - Classificação HRB Segmento 1.....	94
Gráfico 27 - Classificação HRB Segmento 2.....	95
Gráfico 28 - Classificação HRB Segmento 3.....	95
Gráfico 29 - CBR ao longo do Segmento 1	96
Gráfico 30 - CBR ao longo do Segmento 2	96
Gráfico 31 - CBR ao longo do Segmento 3	97
Gráfico 32 - Umidade de campo x umidade ótima no segmento 1	99
Gráfico 33 - Umidade de campo x umidade ótima no segmento 2	100
Gráfico 34 - Umidade de campo x umidade ótima no segmento 3	100
Gráfico 35 - Correlação Umidade de campo x CBR.....	101
Gráfico 36 - Módulo de Resiliência do Subleito Segmento 1	103
Gráfico 37 - Módulo de Resiliência do Subleito Segmento 2.....	103
Gráfico 38 - Módulo de Resiliência do Subleito Segmento 3.....	104
Gráfico 39 - Tensão atuante x tensão admissível no subleito do Segmento 1.....	105
Gráfico 40 - Tensão atuante x tensão admissível no subleito do Segmento 2.....	106
Gráfico 41 - Tensão atuante x tensão admissível no subleito do Segmento 3.....	106
Gráfico 42 - Deflexão no topo do trilho no Segmento 1	107
Gráfico 43 - Deflexão no topo do trilho no Segmento 2.....	108
Gráfico 44 - Deflexão no topo do trilho no Segmento 3.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teses e Dissertações dos últimos 5 anos	22
Tabela 2 - Publicações de Engenharia no Science Direct com o descritor Manutenção de Infraestrutura Ferroviária	36
Tabela 3 - Graus de contaminação do lastro	48
Tabela 4 - Coeficientes constantes do modelo de Mousavi (2016)	56
Tabela 5 - Correlações entre DCP e CBR.....	61
Tabela 6 - Correlações entre DCP e CBR - ASTM D-6951 (2009).....	62
Tabela 7 – Fouling Index calculado em laboratório	87
Tabela 8 - Fouling Index obtido pelo GPR	88
Tabela 9 - Fouling Index médio estimado a partir do GPR.....	90
Tabela 10 - Profundidade média de retenção de umidade.....	91
Tabela 11 - Módulo de Resiliência em condição seca (MPa).....	91

SUMÁRIO

Capítulo 1

Capítulo 1	14
1- INTRODUÇÃO	15
2- A MALHA FERROVIÁRIA NO BRASIL	22
3- SUPORTE CONCEITUAL	28
3.1 Via Permanente	28
3.1.1 Superestrutura	29
3.1.2 Infraestrutura.....	31
3.1.3 Sistema de drenagem	33
3.1.4 Manutenção de infraestrutura	35
4- MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1 Trecho investigado	42
4.2 Identificação do problema	43
4.2.1 Contaminação do lastro	45
4.2.2 Teor de umidade	53
4.3 Método de pesquisa	66
4.3.1 Avaliação pedológica do trecho	66
4.3.2 Determinação dos ensaios a serem realizados	67
4.3.3 Determinação dos locais para ensaios de campo	68
4.3.4 Realização dos trabalhos de campo e amostragem.....	73
4.3.5 Realização dos ensaios de laboratório.....	75
4.3.6 Realização da modelagem computacional	78
4.3.7 Investigação com GPR.....	79
5- DISCUSSÕES E ANÁLISES	85
5.1- Camadas do pavimento	85
5.2- Grau de contaminação do lastro	87
5.3- Módulo de Resiliência	91
5.4- Classificação do material de subleito	93
5.5- CBR	95
5.6- Umidade	97
5.7- Umidade x propriedades das camadas	100
5.8- Modelagem computacional	104
6- CONCLUSÕES	109
REFERÊNCIAS	111

1- INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país está associado à sua capacidade produtiva e de transporte. A Confederação Nacional do Transporte (CNT) afirma que o transporte está presente nas etapas de produção e consumo da economia uma vez que, com exceção das pessoas que se deslocam a pé e com veículo próprio, as demais dependem do transporte para trabalhar (CNT, 2019).

Adicionalmente à função de suporte ao deslocamento de pessoas, os meios de transporte representam um papel importante no segmento industrial de fretamento de cargas. Especificamente sobre o modal ferroviário, um levantamento realizado pela Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústria de Base (ABDIB) indica que o modal ferroviário representa 81% da matriz na Rússia, 46% no Canadá, 43% na Austrália e EUA, e 37% na China (ABDIB, 2019). No Brasil, segundo a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF), a malha ferroviária representa 21,5% da matriz de transportes frente aos 67,6% do modal rodoviário. Nota-se, a partir dos dados sumarizados na Figura 1, a baixa representatividade da malha ferroviária na matriz de transportes do Brasil se comparada à de países com dimensões continentais semelhantes, denotando uma grande oportunidade para o país.



Figura 1 - Representatividade do modal ferroviário

Fonte: Adaptado de ABDIB (2019), Diário do povo online (2020) e ANTF (2022).

No que tange à verba destinada à manutenção e capacitação das ferrovias, a malha ferroviária destinada aos fretes nos Estados Unidos, composta por aproximadamente 225.300 quilômetros de extensão pertencentes a empresas

privadas, compõe uma indústria de aproximadamente 80 bilhões de dólares americanos sob um custo anual de 25 bilhões de dólares americanos divididos entre 80% para manutenção e 20% para capacitação (FRA, 2022). Essa malha é considerada a maior, mais segura e mais eficiente do mundo.

No Canadá, em 2018 foram investidos 2,38 bilhões de dólares canadenses nos 41.000 quilômetros das ferrovias de carga do país, que possuem receita operacional de 16 bilhões de dólares canadenses por ano (RAICAN, 2022).

A Rússia possui 85.500 quilômetros de ferrovia, totalizando anualmente o valor de \$34,5 bilhões de dólares americanos em receitas. O investimento reservado para o ano de 2019 foi de aproximadamente 9,5 bilhões de dólares americanos e faz parte da estratégia total de construção de pelo menos 16.017 quilômetros de ferrovia até 2030 (PAVEL, 2020).

O investimento no setor ferroviário da Austrália nos anos de 2017 e 2018 foi de aproximadamente 15 bilhões de dólares americanos para 32.894 quilômetros operacionais. Esses valores fazem parte do Plano Nacional da Indústria Ferroviária do país que engloba o montante de 100 bilhões de dólares a serem investidos até 2030 (LUICA, 2017).

Os dados apresentados demonstram que, apesar de a manutenção da infraestrutura ferroviária nos países de dimensões continentais como o Brasil consumir uma verba considerável, o retorno sobre o investimento é satisfatório. A Figura 2 apresenta dados de ROBERT (2023) e demonstra velocidade média dos trens de carga nos Estados Unidos superiores a 40km/h, na Europa superiores a 120km/h e na Ásia acima de 94km/h demonstrando a maior eficiência quando do maior investimento. O autor complementa seus dados informando que o principal aspecto que afeta a performance em velocidade de uma ferrovia é o tipo de via (infraestrutura).

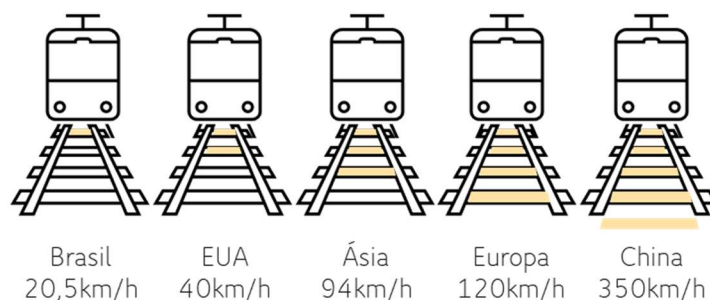


Figura 2 - Velocidade média dos trens de carga

Fonte: Adaptado de Robert, 2023.

SERACO (2019) discursa sobre as funções da via permanente de guiar e de suportar o tráfego ferroviário, e alerta para a necessidade de manutenção quando da mudança de condições de geometria e/ou degradação dos componentes estruturais por fadiga e/ou desgaste.

O autor cita ainda que, para cada tipo de degradação, pode ser realizado um formato de manutenção de acordo com o ritmo de deterioração dos componentes e as premissas adotadas pela empresa que gerencia o pavimento. Ele explica que, avaliando o Custo do Ciclo de Vida (CCV), a maior frequência de correções geométricas gera inicialmente custos elevados, mas, por outro lado, a adoção de ciclos mais espaçados implica na disseminação das cargas de forma diferente com antecipação da substituição de componentes e elevação do custo.

A história da malha ferroviária brasileira nos remete ao diagnóstico de projetos construtivos antigos e pouco eficientes, diferentemente da realidade dos países de dimensões continentais citados. Aqui, os primeiros 14 quilômetros ferroviários foram construídos pela iniciativa privada em 1854 ligando Mauá e Fragoso, no Rio de Janeiro (IPHAN).

A sequência dos fatos foi marcada por um período de crescimento da malha ferroviária para 9.583 quilômetros até 1889 impulsionado pela alta na exportação do café, crescente demanda por transporte de passageiros em longas distâncias, e benefícios prometidos pelo governo. O problema é que o crescimento ocorreu de forma desordenada, com distâncias entre estações elevadas, segmentos não padronizados, e geometria desfavorável à eficiência do transporte, o que reduziu a rentabilidade e tornou o modal antieconômico.

O período da República Velha entre 1889 e 1894 vivenciou uma crise financeira de várias empresas e a degradação das linhas existentes por falta de investimento na manutenção. Em 1957 foi criada a Rede Ferroviária Nacional S/A visando administrar uma região específica de linhas de forma mais eficiente e rentável, entretanto, durante o Regime Militar, o baixo investimento contribuiu para a degradação da via, redução da velocidade de tráfego, incremento no número de acidentes, e menor eficiência.

Em 1992 a Rede Ferroviária Nacional S/A foi incluída no Programa Nacional de Desestatização que, até então, era incipiente e sem marco regulatório. Foi contratado apoio externo para desenho do modelo próprio de outorga para exploração da malha ferroviária pela iniciativa privada que se iniciou em 1997 no Brasil. Atualmente, de acordo com a ANTF, a malha ferroviária brasileira conta com cerca de 30,8 mil

quilômetros distribuídos principalmente nas regiões nordeste, centro-oeste, sudeste e sul para permitir a conexão dos centros produtores de minério (93% do minério exportado), produtos siderúrgicos, grãos (49% dos grãos sólidos agrícolas), açúcar (53%), milho (58%), e complexo de soja (46%) aos principais portos brasileiros. Além da operação atual, estão previstas ampliações na Ferrovia Norte Sul (FNS), implantação da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO), Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) dentre outras demonstrando a tendência de crescimento.

FLLEURY (2012) aponta, em seu estudo de desempenho das ferrovias brasileiras privatizadas, que foram necessários quatro anos de elevado investimento para início da recuperação da malha ferroviária brasileira. Nesse período houve melhoria operacional com incremento de 17% no volume médio transportado e 50% no faturamento das concessionárias demonstrando que o modelo de desestatização foi adequado, entretanto, a oportunidade de melhoria é enorme frente à malha norte americana que apresenta maior velocidade média e índice de acidentes (número/milhão de trem.km) 73% menor que a brasileira.

AMORA (2018), comenta que em 2017 a velocidade média de transporte das concessionárias brasileiras (contabilizada considerando o tempo de percurso entre estações) alcançou o valor de 20,48 km/h, menor que o índice de 2016 que havia sido de 20,61 km/h. Quando se leva em consideração os tempos de parada para carga, descarga e movimentação dos vagões, a velocidade média comercial cai para 15,42 km/h em 2017.

A melhoria operacional e a garantia de desempenho dependem, prioritariamente, do investimento em manutenção das condições de geometria, capacidade de suporte da plataforma como abordado, e adequação dos sistemas de drenagem para atender às condições ambientais adversas causadas pela mudança climática e urbanização do entorno. A Figura 3 traz um resumo dos principais incidentes registrados nas principais concessionárias da malha ferroviária brasileira nos últimos anos conforme será detalhado a seguir.

Em 2009, por exemplo, a América Latina Logística (ALL) sofreu redução da sua receita líquida de 22% obtendo um prejuízo operacional de aproximadamente R\$ 274 milhões causados, dentre outros fatores, pela interdição do transporte de cargas em razão das chuvas.

RIOS (2010) destacou o prejuízo de R\$300 milhões na Ferrovia Transnordestina que passava por recuperação do incidente causado pelas chuvas de 2000, com custo estimado de R\$ 112 milhões.

Em 2022, três ferrovias do estado de Minas Gerais foram interditadas em razão das chuvas de janeiro reduzindo o volume transportado. A Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) chegou a ter 9 pontos de interdição, A Ferrovia Centro Atlântica (FCA) 25 pontos de interdição e a MRS Logística 42 pontos de interdição (LOBO, 2022).

O trem de passageiros da EFVM voltou a ser suspenso em 2023 em razão de interdições devido às chuvas (ABELHA, 2023). A RUMO paralisou as operações na malha Paulista por sete dias para realização de obras decorrentes das chuvas que atingiram a região (LAURENCE 2023).

The image displays three news snippets from Brazilian media, each with a yellow background and black text. The first snippet, titled 'AL: chuva destrói parte de ferrovia; prejuízo é de R\$ 300 mi', reports on the destruction of a railway section in Alagoas and a financial loss of R\$ 300 million. The second snippet, 'Trem de passageiros Minas-Vitória é suspenso por tempo indeterminado', reports on the indefinite suspension of a passenger train between Minas Gerais and Vitória. The third snippet, 'Chuva em Minas: situação das rodovias e ferrovias', provides a detailed list of road and railway interdictions in Minas Gerais, including specific locations like Eldorado, Divinópolis, and various branches of the Estrada de Ferro Vitória-Minas and Ferrovia Centro-Atlântica.

Figura 3 – Histórico de incidentes ocorridos nas principais malhas ferroviárias brasileiras
Fonte: Adaptado de Rios (2010), Abelha (2023), Lobo (2022), Lima (2010) e Valor Econômico (2023).

Como pode ser observado, a manutenção inadequada da infraestrutura ferroviária pode comprometer o desempenho no que tange à velocidade média de transporte, número de acidentes e disponibilidade de via. Desta feita, chega-se à pergunta norteadora deste estudo: Quais as consequências da manutenção inadequada da infraestrutura para o pavimento ferroviário?

O presente estudo tem o objetivo geral de dissertar sobre os principais aspectos relacionados à infraestrutura ferroviária que podem comprometer o desempenho operacional dessa modalidade de transporte. As camadas de lastro e subleito, quando não mantidas ou impactadas pela falta de manutenção de sistemas acessórios

como a drenagem, perdem suas funções estruturais reduzindo a capacidade de transporte e aumentando o risco de acidentes.

Como objetivos específicos podemos citar:

- Contextualização da malha ferroviária brasileira;
- Investigação de estudos realizados acerca da manutenção da infraestrutura ferroviária;
- Investigação de estudos realizados acerca do efeito da contaminação na permeabilidade e elasticidade do lastro;
- Investigação de estudos realizados acerca do efeito da umidade no Módulo de Resiliência e Índice de Suporte Califórnia dos materiais;
- Ensaio de campo e laboratório nas camadas da via permanente de um segmento de aproximadamente 600 quilômetros;
- Investigação com GPR para avaliação do grau de contaminação do lastro e susceptibilidade à retenção de umidade;
- Modelagem computacional para análise das tensões e deflexões;

Buscando sistematizar a pesquisa de forma estrutural, o presente estudo foi organizado em cinco capítulos, sendo o primeiro deles esta introdução onde é apresentado o tema da dissertação, sua importância, os objetivos gerais, e a organização dessa dissertação.

O capítulo 2 traz a contextualização da malha ferroviária no Brasil abordando aspectos sobre sua criação, ampliação, informações importantes sobre investimentos realizados, estado de conservação/degradação, e os principais estudos desenvolvidos sobre esta temática no Brasil. Essa contextualização é importante para situar o leitor da condição atual das ferrovias do Brasil e das demandas existentes associadas à manutenção.

No terceiro capítulo buscou-se esclarecer os principais conceitos, elementos do pavimento ferroviário e suas funções. São trazidas informações básicas sobre a composição da via férrea e os sistemas assessórios que contribuem para sua performance, como o sistema de drenagem. São abordados também os principais aspectos relacionados à importância da manutenção do pavimento ferroviário.

No quarto capítulo foi apresentado o método de pesquisa utilizado para a condução dos trabalhos, o trecho selecionado para os trabalhos de campo, as

variáveis consideradas e os principais problemas associados à inadequada manutenção.

Por fim, no quinto capítulo foram apresentados os resultados encontrados na investigação geotécnica e sua comparação com as referências da literatura, chegando assim, às considerações finais que corroboram sobre a importância da manutenção para o alcance da eficiência e segurança operacional.

2- A MALHA FERROVIÁRIA NO BRASIL

Para desenvolvimento deste estudo, realizou-se uma busca na base da Biblioteca Nacional, com o descritor: “Malha Ferroviária” para compreender como os estudos brasileiros inclinaram-se a investigar sobre a temática, especialmente com relação aos investimentos em manutenção. Em uma pesquisa aberta, ou seja, sem refino ou seleção por ano, encontraram-se 93 estudos. No entanto, ao se aplicar o filtro para os últimos 5 anos, pôde-se observar que apenas 24 estudos se inclinaram a investigar sobre a malha ferroviária no Brasil. Nota-se que, apesar da temática ser apontada por muitos estudiosos como importante para o desenvolvimento do Brasil, nos últimos anos o número de estudos publicados ainda pode ser considerado discreto.

Após a leitura de todos os resumos, foram constatados que apenas 11 estudos estavam direcionados a trabalhar com a temática das malhas ferroviárias diretamente. Os demais estudos estavam direcionados para artes e/ou construção histórica de um contexto e, apesar de haver o descritor “malha ferroviária” em sua estrutura textual, o foco e os objetivos dos respectivos estudos não eram direcionados. Na Tabela 1 encontram-se as caracterizações destes estudos, onde é possível observar que dos 11 estudos, 6 estão vinculados à área de engenharia, 1 na área de história, 1 em arquitetura, 1 em transporte, 1 em energia e 1 em geografia.

Tabela 1 - Teses e Dissertações dos últimos 5 anos

Autor	Título	Área	Ano	Instituição
Rubismar Galvão	Ferrovias no Ceará: suas tramas políticas e seus impactos econômicos e culturais (1870-1930).	História	2019	Universidade Federal de Campina Grande
Tiago Araújo Alvarenga	Identificação e localização de falhas em circuitos de via de ferrovias baseada em reflectometria no domínio da frequência	Engenharia	2018	Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Edmilson M. dos Santos	Novas fronteiras de expansão para o gás natural: o suprimento em pequena escala através da malha ferroviária brasileira	Energia	2018	Universidade de São Paulo

Autor	Título	Área	Ano	Instituição
Fernanda dos Santos Silva	Remanescências da arquitetura ferroviária em Minas Gerais: uma ferramenta de preservação das estações ferroviárias	Arquitetura	2019	Universidade Federal de Minas Gerais
Marcos K. R. Felix	Exploração de infraestrutura ferroviária: lições de extremos para o Brasil	Transportes	2018	Universidade de Brasília
Jean Felipe Miecowski	Avaliação do comportamento mecânico da via férrea utilizando elementos finitos considerando fadiga: estudo paramétrico	Engenharia	2019	Universidade Federal do Paraná
Marco A.P.M de Antonio	Avaliação do comportamento de pontes com tabuleiros de dupla ação mista submetidas ao tráfego de trens de alta velocidade	Engenharia	2018	Universidade Federal de Minas Gerais
Adriana K.C.O. Moller	Otimização de Investimentos no Transporte ferroviário de Soja no Estado do Mato Grosso	Engenharia	2020	Universidade de São Paulo
Ricardo P Fici	O sistema Ferroviário Mundial: O Caso brasileiro	Geografia	2017	Universidade de São Paulo
Alan Borges da Silva	Simulação do Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário pelo Método dos Elementos Discretos	Engenharia	2018	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Nielson Soares	Técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado para a prevenção de falhas em máquinas de chave	Engenharia	2018	Universidade Federal de Juiz de Fora

Fonte: Autora

Nos estudos investigados foi possível observar que as abordagens são múltiplas, sendo elas desde sua importância com relação ao contexto histórico, econômico, logístico e de infraestrutura (LIAW, 2018; GALVÃO, 2019; SILVA, 2019;

FELIX, 2018; FICI, 2017), até a expansão e melhorias da malha (SILVA, 2018, ANTONIO, 2018).

Em relação ao surgimento e desenvolvimento do setor ferroviário em uma perspectiva global, Fici (2017) ressalta que as primeiras ferrovias surgiram no século XIX, especificamente na Inglaterra. As locomotivas, naquela época, eram movidas à vapor. Para tanto, utilizavam-se do carvão mineral queimado, sendo que este era a fonte de energia disponível para o setor à época. Comenta ainda que as ferrovias acarretaram o surgimento de novas possibilidades, pois, em virtude da velocidade e grande capacidade de transporte, era possível conectar os portos aos grandes polos onde residiam as indústrias. Fici (2017) frisa que durante todo o século XIX as ferrovias atuaram como principal meio de transporte em toda a Europa, contudo, nem todos os países tinham as mesmas condições necessárias à construção de uma malha ferroviária extensa. É inegável que durante anos a indústria ferroviária corroborou com a manifestação de uma verdadeira revolução econômica e política.

Soares (2018), destaca informações sobre a primeira ferrovia no país, inaugurada no ano de 1854 no Rio de Janeiro. Galvão (2019) completa que o incentivo do governo contribuiu para o incremento ferroviário no Brasil, porém sem avaliação técnico-econômica e com interesses particulares financeiros levando à implantação de sistemas ineficientes.

Antônio (2018) disserta que, apesar das falhas construtivas, desde o século XIX o setor ferroviário exerce um papel fundamental na economia brasileira, visto que é a partir dele que as cargas são transportadas no país. Completa que a ampliação da produção do café fez com que o governo investisse na construção das ferrovias chegando, na década de 1950, em cerca de 35.000 km de extensão, porém com baixa integração de trechos pois cada segmento possuía uma bitola diferente (que corresponde à distância entre os trilhos a partir de um determinado referencial), o que demandou a criação uma sociedade anônima para administrar que ficou conhecida como Rede Ferroviária Federal S. A. (RFFSA).

Silva (2019) explica que apesar de existir a RFFSA, como não houve investimento no setor pelo governo, o objetivo da rede restringiu-se apenas a evitar a extinção da malha ferroviária e manter as condições mínimas operacionais para o transporte de carga, ainda desta dependente.

A partir de 1996 a RFFSA foi colocada à leilão ficando alvo da iniciativa privada até a sua extinção no ano de 1999. Entre os anos de 1996 e 2006, a privatização impulsionou a criação de algumas estratégias que geraram aumento no faturamento das empresas e nos investimentos feitos pelas concessionárias, e queda expressiva na quantidade de acidentes (SOARES, 2018). A Figura 4 sintetiza os fatos apresentados trazendo uma visão geral da história da ferrovia no Brasil.

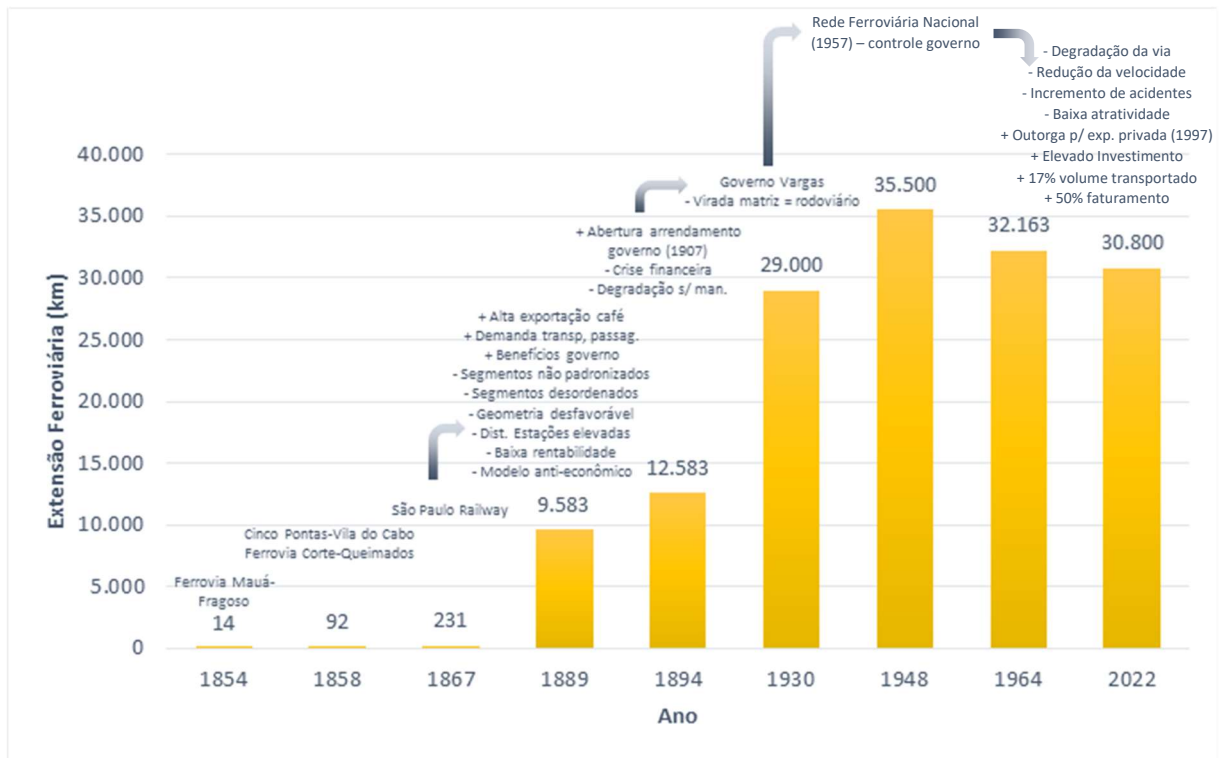


Figura 4 - História da ferrovia no Brasil

Fonte: Adaptado de CALDEIRA (1995) e ANTF (2022).

Felix (2018), por sua vez, frisa que mesmo com investimentos da iniciativa privada, no século XXI, o transporte de cargas no país é intrinsecamente "rodoviarista", pois no ano de 2015, 65% das cargas foram transportadas a partir das rodovias. Pela ferrovia foram transportadas apenas 15% das cargas, o que comprova que o setor realmente caiu em desuso. Os motivos para a escassez do transporte ferroviário no novo século não dizem respeito apenas à redução da malha ferroviária, mas também ao contexto histórico apresentado anteriormente em que podemos destacar a baixa produtividade retratada diretamente pela baixa velocidade média em razão da geometria desfavorável, despadronização dos segmentos, falta de interligação entre as linhas e, sobretudo, a queda expressiva de investimentos neste setor que gerou a degradação da via.

Santos (2018), assim como Felix (2018), descreve que o Brasil é fortemente dependente das rodovias pois o setor rodoviário no contexto nacional para o transporte a curtas distâncias de produtos de alto valor agregado foi influenciado pela instalação de montadoras multinacionais de automóveis no pós-guerra, apesar de o sistema rodoviário ser custoso e pouco eficiente. Uma amostra que considerou 105.814 km de rodovias classificou cerca de 61,8% delas como regular, ruim ou péssima devido às más condições em termos de infraestrutura que culminaram no desperdício de diesel com perda financeira de aproximadamente R\$ 2,46 bilhões.

Segundo Moller (2020), a demanda pelo transporte ferroviário para redução do frete e, conseqüentemente aumento da competitividade dos produtos brasileiros é latente, entretanto esse desenho depende de investimentos altos para construção de novos traçados que interliguem os fornecedores aos portos.

Miecoanski (2019) acrescenta que os benefícios do transporte ferroviário transcendem aos econômicos de redução do valor do transporte pois incluem o aumento da segurança, melhor conservação das estradas e a menor degradação do meio ambiente uma vez que reduz o volume de caminhões, desmatamento e emissão de poluentes. Dessa forma, a aplicação dos recursos de maneira eficiente e otimizada pode trazer muitos benefícios à sociedade.

Alvarenga (2018) reforça a argumentação de Moller (2020) quando comenta que o baixo incentivo ao transporte ferroviário está ligado diretamente ao custo elevado para a construção de linhas ferroviárias. Segundo ele, a alternativa encontrada foi a utilização de linhas em operação já existentes de uma maneira mais eficiente. O autor pontua também que as concessionárias que operam na malha ferroviária brasileira têm focado no aprimoramento dos sistemas de manutenção, controle e monitoramento para que haja o aumento do tráfego, a diminuição do intervalo entre os trens e uma maior segurança.

Silva (2018) cita os programas recentes implantados nos últimos anos para ampliação da malha ferroviária no Brasil tais como PAC 2 – Programa de aceleração do crescimento e PIL – Programa de Investimento em Logística e aponta a importância da análise do comportamento estrutural das camadas do pavimento ferroviário. Em seu projeto, o autor apresenta os resultados de análises computacionais demonstrando a complexidade desse tipo de estudo e reforça a necessidade de validação através de ensaios físicos.

Como já aludido anteriormente, a malha ferroviária no Brasil apresenta-se como uma importante opção dentro do processo logístico do país para aumento da competitividade das cargas transportadas e redução da dependência do modal rodoviário, menos eficiente. Dentre as últimas medidas adotadas para tal, podemos citar os processos de renovação da concessão, que seguem a todo vapor tendo como condicionantes a manutenção das condições de integridade estrutural, segurança operacional e eficiência através da utilização dos Cadernos de Obrigação, Cadernos de Engenharia e de Projetos, e a medida provisória nº 1.065/2021, que impulsionou novos estudos tanto no âmbito da engenharia quanto das áreas econômicas e afins visando ampliar a capacidade ferroviária no país.

3- SUPORTE CONCEITUAL

Visando discorrer um pouco sobre os elementos que compõem a malha ferroviária e suas funções para o bom desempenho do tráfego ferroviário, o presente capítulo apresentará conceitos básicos de forma sucinta.

3.1 Via Permanente

O termo Via Permanente, segundo MUNIZ DA SILVA (2002), advém do caráter de “permanência” das ferrovias, que sucederam as estradas anteriormente utilizadas pelas carroças e que não ofereciam condições de tráfego em clima adverso de chuva e neve, por exemplo.

A via permanente é composta por dois grupos de estruturas, segundo Steffler (2013):

- Superestrutura: conjunto formado pelos elementos responsáveis por receber as cargas do tráfego, distribuí-las ao longo dos seus componentes, e transmiti-las de maneira uniforme para a plataforma dissipá-las;
- Infraestrutura: composta pelas camadas de terraplenagem e/ou obras de arte que suportam as cargas, e contribuem para a drenagem.

Segundo MEDINA (1988), à luz da Mecânica dos Pavimentos, a nomenclatura “pavimento ferroviário” pode ser utilizada para o sistema estrutural de multicamadas composto pela superestrutura e infraestrutura ferroviária. Essa abordagem, adotada ao longo desse estudo, é interessante pois viabiliza uma análise semelhante à utilizada para pavimentos rodoviários em que o conjunto das camadas absorve e dissemina as cargas provenientes do tráfego à fundação, o subleito. A Figura 5 ilustra uma seção tipo do pavimento ferroviário constituída pelos trilhos, dormentes, fixações, dormentes, lastro, sublastro e subleito.

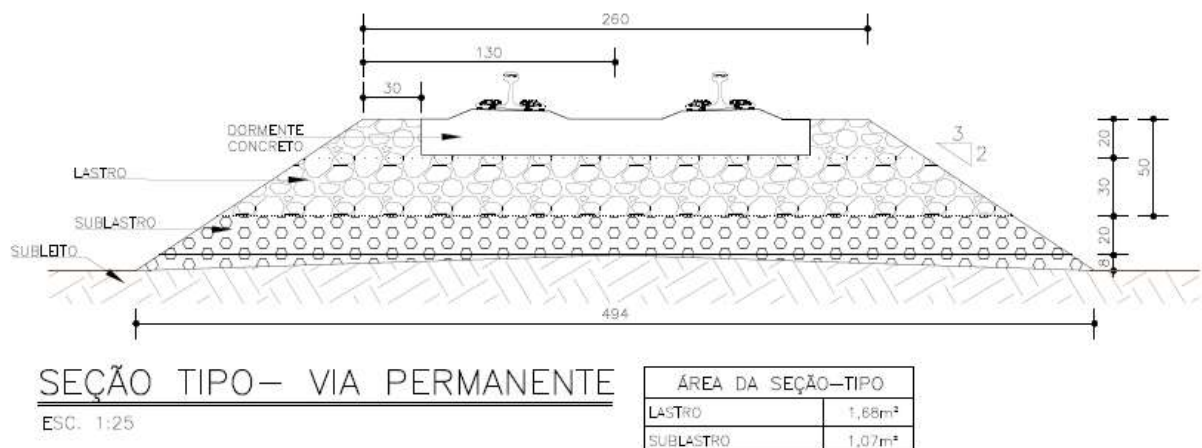


Figura 5 - Seção transversal da plataforma ferroviária

Fonte: Acervo VLI

3.1.1 Superestrutura

3.1.1.1 Trilhos

Os trilhos são aqueles que entram em contato com as rodas do veículo ferroviário durante a circulação dos trens. São compostos por aço, dispostos longitudinalmente à via, aplicados sobre placas e fixados por elementos rígidos ou flexíveis junto aos dormentes. Podem ter diversos perfis dimensionados conforme carregamento. Em alguns casos são utilizadas palmilhas entre as placas e os dormentes com o objetivo de melhorar o contato e reduzir o desgaste dos dormentes na região de apoio.

A manutenção dos trilhos deve considerar a eliminação de juntas (ponto frágil) através de soldas, manutenção do boleto (esmerilhamento), e adequada lubrificação. É importante observar, entretanto, que a existência de defeitos superficiais severos nos trilhos como o exemplo mostrado na Figura 6 pode indicar defeito da plataforma e, nesses casos, a manutenção apenas nos trilhos não será suficiente para solução do problema.



Figura 6 - Defeito superficial pela instabilidade de plataforma

Fonte: Viana (2017)

3.1.1.2 Dormentes

Os dormentes recebem as cargas dos trilhos e as disseminam para a camada do lastro. Possuem também a importante função de manter o espaçamento dos trilhos dentro dos limites aceitáveis. Podem ser confeccionados de diversos materiais como madeira, aço, concreto e plástico. Suas dimensões variam de acordo com o material, carga e a geometria da via.

Os dormentes devem estar isentos de defeitos severos e possuir adequada área de contato com o lastro para evitar *gaps* (área livre entre a superfície inferior do dormente e superior do lastro demonstrada na Figura 7) e gerar momentos negativos. É importante também manter a região de apoio do trilho saudável, dentro dos limites de tolerância, bem como a fixação em pleno funcionamento.



Figura 7 - "GAP" na interface dormente e lastro

Fonte: Acervo VLI

3.1.2 Infraestrutura

3.1.2.1 Lastro

O lastro é uma camada de material granular que recebe as cargas provenientes do dormente, absorve-as e dissemina a carga residual para as camadas de sublastro e subleito. É sua função importante também ancorar os dormentes e evitar sua movimentação.

Sua característica pedregulhosa uniforme estabelecida em norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 5564 (2011) permite que seja permeável (viabilizando a drenagem da via) e elástico (contribuindo para a melhor absorção das cargas, redução das vibrações e ruídos).

SELIG e WATERS (1994) destacam dentre as funções do lastro as seguintes:

- estrutural de absorção e distribuição de cargas cujo dimensionamento e especificação acontecem durante a fase de projeto;
- drenante para que a água de chuva percole e seja direcionada através da inclinação transversal do pavimento para os dispositivos de drenagem de plataforma.

3.1.2.2 Sublastro

Tradicionalmente a camada de sublastro possui granulometria intermediária entre o lastro e o subleito obedecendo as faixas A, B, C, D, e/ou F da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) segundo o método do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), DNER-M-80-64 de modo a funcionar como filtro para evitar a contaminação do lastro com finos do subleito e a cravação do lastro no subleito.

É sua função também absorver parte das tensões oriundas do lastro e dissipar as cargas residuais para o subleito evitando assim deformações excessivas e contribuindo para a redução da altura do lastro (DNIT 2015).

Quando composto por material granular, o Sublastro pode incorporar a função, drenante para conduzir a água lateralmente aos dispositivos de drenagem, citada por INDRARATNA et. al. (2011). Os autores citam que a redução da condutividade hidráulica das camadas pode impedir a dissipação do excesso de poro-pressão durante o descarregamento e gerar acúmulo após ciclos de carregamento. O efeito dessa condição é observado pelo bombeamento de finos.

Estudos recentes com solos finos lateríticos realizados por SILVA (2018) incluíram solo arenoso fino laterítico (SAFL) para camada de sublastro com a função de exercer barreira capilar para a infiltração da água da chuva e comprovaram a viabilidade de utilização desse tipo de material sem prejuízo ao pavimento no que diz respeito à cravação do lastro na camada e bombeamento de finos. NOGAMI e VILLIBOR (1981) definem o solo laterítico como altamente intemperizado e lixiviado, rico em óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio que quando hidratado possui propriedade cimentante, valores de *California Bearing Ratio* (CBR) que equivale ao Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Módulo de Resiliência (MR) altos, e baixa expansão na saturação se compactado na umidade ótima.

Apesar de o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2015) estabelecer como requisitos para material de sublastro a expansão máxima de 0,5% no ensaio de ISC, limite de liquidez da fração que passa na peneira # 40 inferior ou igual a 40%, e índice de plasticidade inferior ou igual a 15%, o estudo de SILVA (2018) considerou, na avaliação da aplicabilidade do material laterítico para sublastro, os valores de Módulo de Resiliência, deformação permanente em ensaios de longa duração, e presença de *shakedown*.

3.1.2.3 Subleito

O subleito é camada mais profunda, constituída por solo, e que funciona como a fundação do pavimento ferroviário. ELLIOT & THORNTON (1988) afirmam que a AASHTO associa as deflexões superficiais de um pavimento às deformações do subleito. A vida útil do pavimento é ditada pela vida útil do subleito (ROSE e KONDURI, 2006). Os pesquisadores lançaram a versão 4.0 do software KENTRACK, inicialmente desenvolvido em Kentucky para realização de modelagens computacionais, pelo método de elementos finitos, das camadas granulares do pavimento ferroviário e cálculo de vida útil.

As modelagens realizadas no estudo dos pesquisadores evidenciaram que o incremento de espessura de uma camada asfáltica de proteção do subleito de 5 para 20 centímetros reduz as tensões de compressão no subleito, aumenta a sua vida útil em cinco vezes e mais do que dobra a vida útil da camada asfáltica. Por outro lado, a redução da espessura da camada asfáltica de proteção do subleito de 20 para 5 centímetros, reduz a vida útil do subleito de forma expressiva a ponto de não se obter

o benefício da vida útil superior da camada asfáltica pois o subleito se degradaria em cerca de cinco anos.

3.1.2.4 Camadas de proteção do subleito

De acordo com as cargas previstas no projeto e a rigidez da camada de subleito existente, faz-se necessária a utilização de uma ou mais camadas de reforço ou proteção do subleito. A função dessas camadas é assegurar o espraçamento da carga proveniente do sublastro de forma que alcance o subleito em níveis adequados à sua rigidez.

3.1.3 Sistema de drenagem

Associado ao pavimento ferroviário, o sistema de drenagem tem a função de receber as águas de precipitações pluviométricas, infiltrações laterais pelos taludes, ascensão por capilaridade de lençóis freáticos e inundação por deficiência de drenagem dos fluxos de água provenientes de talvegues, e direcioná-las para fora do pavimento em um tempo aceitável para não o saturar garantindo a estabilidade do pavimento, sua vida útil e a segurança do usuário.

BORGES (1986) estudou sobre a estabilidade de solos residuais em regiões tropicais e verificou a influência da água no comportamento desses taludes. Segundo a autora, a água compromete a pressão efetiva associada ao atrito entre as partículas, reduz a coesão do solo, aumenta o peso do maciço e gera forças de percolação favorecendo erosões e potencializando escorregamentos.

Sañudo et al. (2019) citaram que 92% dos problemas de estabilidade em ferrovias na França estão relacionados à insuficiência de drenagem. Os mesmos autores trazem também a informação de que entre 2007 e 2014 foram dispendidos no Reino Unido cerca de 10MM de euros com interrupções por chuvas sendo 45% delas causadas por deficiência de drenagem.

O dimensionamento do sistema de drenagem de uma ferrovia requer uma investigação detalhada e determinação do objetivo da drenagem. Devem ser observadas as fontes e origens da água, condições climáticas da região, topografia, bacias de contribuição, locais adjacentes, acessos, possíveis saídas para a água, tipo de solo dentre outros.

3.1.3.1 Drenagem superficial

A drenagem superficial tem como principal objetivo coletar e direcionar a água para fora do pavimento auxiliando no controle de erosões dos taludes de corte e aterro da plataforma ferroviária. Pode ser classificada de maneira simplificada em valetas de contorno e bermas, e valetas de plataforma conforme pode ser observado na Figura 8.

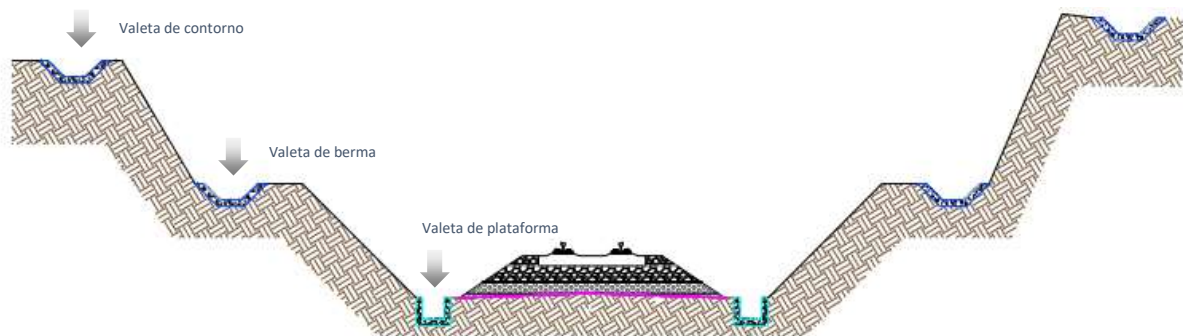


Figura 8 - Sistema de drenagem superficial

Fonte: Acervo Vale

3.1.3.2 Valetas de contorno e bermas

As valetas de contorno são dispostas na crista para interceptar a água das chuvas e impedir sua descida pela face do talude evitando o carreamento de finos, erosões e perda da estabilidade do maciço. Caso o maciço seja composto por mais de um talude, as bermas devem possuir valetas para exercer a mesma função de interceptação da água e direcionamento adequado.

Adicionalmente, pode-se citar a contribuição das valetas de contorno na redução do acúmulo de material carreado para sistema de drenagem da plataforma e suas consequências para o pavimento.

3.1.3.3 Valetas de plataforma

As valetas de plataforma ou sarjetas são confeccionadas para coletar a água de chuva que cai na face do talude inferior e na plataforma, e direcioná-la para um canal natural de deságue. Para o pleno funcionamento desse sistema é imprescindível a manutenção da permeabilidade das camadas do pavimento e inclinação transversal da via direcionado para os dispositivos existentes nas laterais.

3.1.3.4 Drenagem profunda

A drenagem profunda tem a função de coletar a água advinda de percolação lateral dos taludes e do lençol freático para evitar que ela atinja a camada do subleito do pavimento saturando-o e deteriorando sua função estrutural. Pode ser longitudinal e/ou transversal à via conforme dimensionamento.

3.1.3.5 Drenagem de talvegue

A drenagem de talvegue apresentada é projetada para permitir a transposição da água de um lado para outro do pavimento ferroviário evitando inundações, instabilidade dos taludes e erosões de grande proporção. O seu dimensionamento é realizado para viabilizar o escoamento da vazão proveniente da bacia de contribuição.

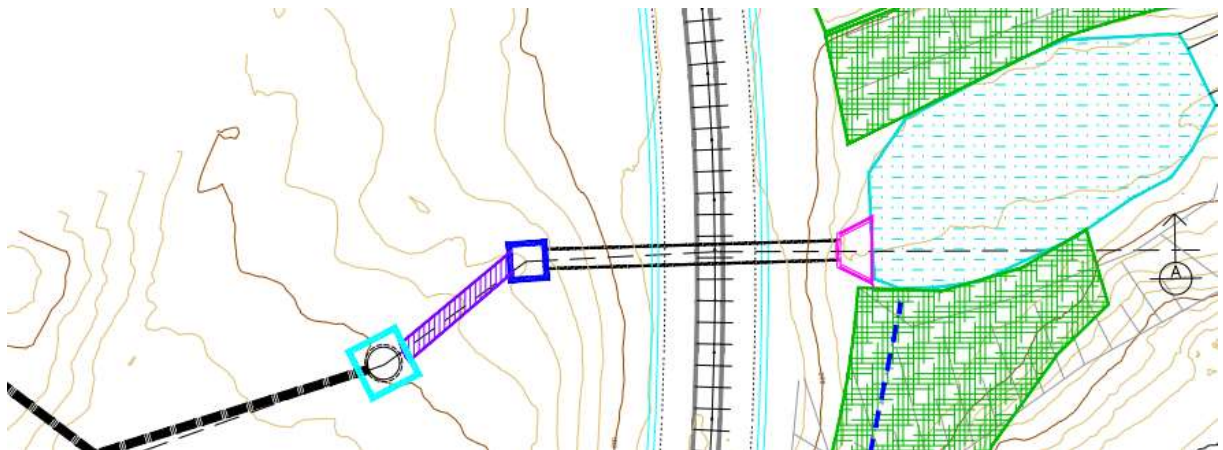


Figura 9 - Drenagem de talvegue

Fonte: Acervo Vale

3.1.4 Manutenção de infraestrutura

Para fundamentação teórica das práticas de manutenção de infraestrutura, diante da ausência de estudos nacionais contemplando a linha de pesquisa dessa dissertação, foi realizada uma pesquisa na base de dados da Science Direct com o descritor “*Infrastructure Railway Maintenance*”.

A pesquisa sem filtros apresentou 11.746 resultados levando à necessidade de refinamento. Foram então realizados os filtros da área de interesse “Engineering” e acesso “Open Access & Open archive” o que reduziu a quantidade de trabalhos para 571. A Tabela 2 apresenta um resumo dos temas encontrados após leitura dos respectivos resumos.

Tabela 2 - Publicações de Engenharia no *Science Direct* com o descritor Manutenção de Infraestrutura Ferroviária

Tema	Quantidade	%
Não abrange ferrovia	251	44,0
Tecnologia	62	10,9
Obra de Arte Especial	51	8,9
Sustentabilidade	35	6,1
Modelagem	24	4,2
Projeto	22	3,9
Superestrutura	16	2,8
Ruído/Vibração	12	2,1
Veículos/Equipamentos	12	2,1
Reforço	12	2,1
Monitoramento/Inspeção de via	11	1,9
Modelo de negócio	10	1,8
LCC	9	1,6
Roda-trilho	9	1,6
Manutenção ferroviária	5	0,9
Segurança	6	1,1
Tempo de ciclo	4	0,7
Riscos	3	0,5
Subleito	3	0,5
Transporte de passageiros	3	0,5
Travessias	2	0,4
Bueiro	2	0,4
Taludes	2	0,4
Análise dinâmica	2	0,4
Via eletrificada	1	0,2
Resiliência de via	1	0,2
Slab Track	1	0,2

Cerca de 44% dos estudos apresentados na pesquisa não contemplavam a ferrovia e, portanto, não foram analisados a exceção de um que trata da importância da Manutenção em Mega Projetos que envolvem alto capex. Dos 56% restantes, apenas 8 tratavam da manutenção de infraestrutura e/ou da camada de subleito e foram objeto de análise detalhada conforme poderá ser observado no decorrer desse tópico.

Lingegård e Svensson (2014) frisam que os projetos de construção que incorporam a manutenção da malha ferroviária têm resultado em menos gastos para

que o ciclo de vida desta malha seja prolongado pois já são concebidos visando demandar o mínimo de manutenção durante a operação para gerar menor impacto ao tráfego. A sugestão dos pesquisadores é adotar a perspectiva do ciclo de vida durante o projeto considerando a oferta integrada entre produto e serviço visando alcançar mais valor no investimento realizado.

Os autores apresentam 5 cenários de projeto ferroviário e analisam, qualitativamente, os custos de implantação e manutenção demonstrando que uma análise completa pode alterar a tomada de decisão. A manutenção e reabilitação da malha ferroviária podem ser minimizadas através da utilização de produtos de maior durabilidade ou o impacto na operação pode ser minimizado através da adoção de redundâncias. Dessa forma é possível inaugurar aquilo que tem sido designado como manutenção proativa, pois, cria-se um sistema robusto que causará a médio e longo prazo uma menor perturbação ao tráfego, pois, em virtude da rápida correção dos erros verificados, a malha ferroviária continuará funcional.

Usman et al. (2015) apontam em seu estudo que a via férrea com lastro convencional é sistema estrutural projetado para suportar os efeitos nocivos do tráfego e do meio ambiente. Para que a via férrea esteja dentro dos limites aceitáveis e não entre em colapso, o solo onde esta estrutura se firma deve estar protegido adequadamente da água que percola por meio do lastro através da existência do sistema de drenagem superficial e subsuperficial adequados, sobretudo quando a via férrea for construída em solos de granulação fina (como por exemplo as argilas).

Usman et al. (2015) reiteram que as quantidades excessivas de água na parte superior da fundação da via férrea provocam a saturação e perda da capacidade de suporte do solo, o que pode fazer com que a via fique sujeita a diversos tipos de falha, à imposição onerosa de restrição à velocidade dos trens e demande a realização de uma manutenção não planejada. Por esse motivo, os pesquisadores comentam que os gestores de ativos de tais vias férreas devem garantir que a drenagem seja adequada desde a fase do projeto à construção da via. Além disso, os sistemas de drenagem existentes devem ser inspecionados em intervalos apropriados para verificar sua capacidade drenante. A identificação de problemas deve ser gatilho para o planejamento de ações corretivas.

Bian, Jiang e Chen (2016) apontam que com o aumento dos volumes de tráfego, as cargas dinâmicas das rodas se tornaram mais altas. Elas afetam diretamente a estrutura da via e o subleito, o que pode fazer com que a via férrea seja

prejudicada à medida em que o tráfego volumoso se repete. As mudanças climáticas contínuas e a precipitação intensa se tornaram problemas recorrentes que afetam a qualidade da via férrea. Os pesquisadores reforçam as considerações apresentadas pelos autores citados anteriormente de que o sistema de drenagem precisa ser monitorado de perto para solos finos e acrescentam que no caso de vias férreas construídas com materiais permeáveis, o fluxo da água poderá causar carreamento com consequente erosão interna, prejudicando a resposta estrutural do pavimento.

Na visão de Bian, Jiang e Chen (2016), o excesso de água resulta em uma resistência mais baixa e em uma maior deformação do subleito ferroviário. Os pesquisadores pontuam também que à medida em que os trens trafegam em solos saturados, a velocidade dos veículos aproxima-se da velocidade de onda Rayleigh do solo, o que pode fazer com que haja grandes vibrações e deslocamentos dos trilhos, prejudicando a geometria da via férrea. Os autores mencionam também que a punção do lastro no subleito cria condições que desencadeiam em uma má drenagem, gerando a retenção de água. Os dormentes da via começam a se mover de cima para baixo a partir de sulcos provocados pelo movimento das cargas das rodas, o que faz com que haja a sucção de finos e o bombeamento.

Yokoyama (2015), sobre a implantação de medidas que permitem a realização de manutenções preventivas e não apenas corretivas, frisa que a base para que essas atividades sejam realizadas no momento correto norteia-se a partir da Manutenção Baseada em Tempo (TBM) e na Manutenção Baseada em Condição (CBM). O CBM consiste em um sistema de monitoramento de uma ampla quantidade de dados ao invés de realizar inspeções periódicas para a identificação da velocidade de degradação da malha ferroviária. O principal benefício desse sistema indicado pelo autor diz respeito ao fato de que permite que decisões mais assertivas sejam tomadas no momento apropriado para que os reparos sejam feitos. É este o princípio da manutenção preventiva que garante a qualidade a longo prazo.

Köllő, Puskás e Köllő (2017) desenvolveram um estudo acerca da influência relacionada à distribuição da pressão do lastro nos dormentes. Identificaram na pesquisa que sem a devida manutenção da via férrea é impossível garantir, tanto a médio quanto a longo prazo, uma infraestrutura ferroviária sustentável e de qualidade. A manutenção contínua e preventiva, portanto, na visão dos autores, é importante para a preservação da vida útil dos dormentes.

Para a resolução desses problemas relacionados à má drenagem que podem acarretar a infraestrutura precária da via férrea, Bressi, Santos e Losa (2021) propõem uma espécie de planejamento estratégico para a Manutenção e Reabilitação (M&R) da malha ferroviária. A equipe responsável pelo monitoramento da malha ferroviária precisa criar meios para que os recursos sejam utilizados de uma maneira mais positiva para esta reabilitação. Os autores pontuam que os materiais da via férrea se degradam em virtude das altas cargas, de modo que para que a malha ferroviária satisfaça aos requisitos de qualidade rigorosos, em caso de falha na manutenção, sejam impostas limitações da velocidade.

Os pesquisadores dissertam que o assentamento do lastro pode ocorrer como consequência da densificação e da degradação. Em relação à densificação, os autores pontuam que se trata de deformações caracterizadas pela consolidação progressiva e pelo deslizamento e rolo das partículas de lastro. A degradação, por sua vez, é causada pelo atrito que provoca a quebra e redução do tamanho das partículas. Há dois tipos de manutenção que podem ser feitos para que as ferrovias tenham a devida qualidade: o tipo corretivo ou preventivo. A manutenção corretiva prevê as intervenções no momento exato em que a falha na malha ferroviária foi identificada. A preventiva, por sua vez, é representada pelas intervenções que não são feitas apenas pontualmente, mas sim de maneira periódica. Como há o monitoramento das falhas, são conduzidas estratégias de manutenção ou renovação sem que a malha ferroviária seja prejudicada, especialmente o seu tráfego. Há um controle sobre os processos de manutenção e reduz-se o tempo necessário para a recuperação da qualidade.

Sedghi et al. (2021) discutem sobre as estratégias preventivas necessárias a uma boa manutenção da malha ferroviária. Reiteram que é essencial a adesão a uma política ideal de manutenção, sendo que esta decisão permitirá que o sistema execute as suas funções da maneira apropriada a longo prazo. O padrão internacional de manutenção define três tipos de políticas de manutenção: a preventiva, a corretiva e a focada na melhoria. A manutenção preventiva tem como escopo principal a realização de atividades relacionadas à inspeção, aos reparos e à substituição do ativo para que a degradação seja mitigada, bem como para que as falhas sejam reduzidas. No segundo tipo, por sua vez, as atividades de manutenção a serem depreendidas têm como objetivo o gerenciamento dos problemas que já ocorreram e não foram coibidos antes desta ocorrência. Por fim, no terceiro tipo, tem-se a

manutenção que pleiteia a realização de melhorias. As ações, portanto, visam garantir uma maior segurança e conforto, mesmo que nenhuma falha tenha sido identificada durante a análise. Contudo, nesse tipo de manutenção, as funções originais não devem ser alteradas.

Sedghi et al. (2021) destacam em seu estudo a importância da manutenção preventiva porque é ela a principal responsável por garantir que os reparos sejam feitos no momento correto, impedindo, dessa forma, catástrofes e acidentes provocados pela alta carga dinâmica das rodas e pelas mudanças climáticas, principais problemas que afetam a qualidade da malha ferroviária. Diante desse cenário, os autores chamam a atenção para o fato de que esse tipo de manutenção assume duas características principais, sendo elas a pré-determinada e a baseada em condições. Pontua-se que há intervalos de tempo pré-estabelecidos, bem como a utilização de ativos de maneira monitorada, o que faz com que, a depender da condição do ativo, os reparos sejam feitos para que esses acidentes e problemas sejam evitados. Por esse motivo, é comum que os especialistas recomendem a realização de manutenções baseadas no tempo e, também, em certas condições que apontem o estado da malha ferroviária.

Chen, Xiang e Jia (2022), diante desse cenário, discutem sobre o conceito de megaprojetos de infraestrutura (IMPs). Entendem que esses projetos são plataformas básicas necessárias ao desenvolvimento socioeconômico sustentável de um país. Na visão dos autores, trata-se de um conceito multidimensional que assume dois pilares básicos, sendo eles a infraestrutura econômica, representada pelo projeto de transporte, pela obra pública e pelo projeto de utilidade urbana, por exemplo, e a infraestrutura social, com projetos que envolvem a educação, a cultura e a saúde das instalações. Os projetos visam melhorar a qualidade de vida das pessoas, nesse caso, daquelas que fazem uso direto ou indireto.

Esses projetos, segundo Chen, Xiang e Jia (2022), estão relacionados com uma grande escala de investimento, com um longo ciclo de construção, utilização de tecnologias e com impacto de longo alcance. Por esse motivo, geralmente, esses projetos costumam ter uma vida longa, perdurando por muitos anos. A Operação e Manutenção (O&M), nesse contexto, são a base para que as estruturas sejam preservadas a longo prazo e acabam sendo positivas em virtude dos benefícios que agregam, pois permitem a criação de mecanismos para que os reparos sejam bem distribuídos ao longo dos anos, e incentivam o uso inteligente de recursos para a

realização dessas ações. Além disso, esses processos permitem que o ciclo de vida das construções seja aumentado, porém, quando não há um bom gerenciamento das atividades que envolvem tanto a operação quanto a manutenção, ao invés desses projetos serem benéficos, tornar-se-ão inviáveis.

A partir do cenário explanado pelos autores, pode-se concluir que o gerenciamento da manutenção, para que seja bem executado, demanda uma estrutura organizacional que permita o planejamento e a organização tanto das atividades quanto dos recursos necessários para que elas sejam executadas. Sedghi et al. (2021) pontuam que o planejamento da manutenção deverá ser feito e conduzido a partir de três níveis essenciais, sendo eles o estratégico, o tático e o operacional. Eles irão variar a depender do domínio e da duração das atividades listadas no planejamento. O nível estratégico analisa a vida útil e a frequência a partir da qual a manutenção e o reparo deverão ser feitos; o tático está ligado à programação de ações relacionadas à deterioração, roteirização dos veículos e agendamento da mão-de-obra; e o operacional lida com problemas que envolvem tempo de trabalho e recursos.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterizados os elementos do pavimento ferroviário, suas funções e apresentada a importância dos sistemas complementares de drenagem bem como da manutenção do pavimento, o capítulo em questão irá discorrer sobre uma vasta pesquisa de campo e laboratório realizada para caracterizar as condições reais de uma plataforma ferroviária em operação no Brasil e verificar os possíveis efeitos citados pelos autores no capítulo anterior da falha de manutenção na sua capacidade de suporte instalada.

4.1 Trecho investigado

A malha ferroviária estudada é a Ferrovia Centro Atlântica, atualmente sob concessão da VLI e que possui extensão de 7.220 quilômetros abrangendo sete estados do país (Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Sergipe, Goiás, Bahia, São Paulo).

O trecho selecionado faz parte do corredor Centro-Sudeste que liga as cidades de Paulínia (SP) e Brasília (DF) conforme pode ser observado na Figura 10. O corredor engloba as regiões produtoras de grãos do país permitindo a exportação de milho, soja e açúcar por meio do Porto de Santos e o Terminal Integrador Portuário Luiz Antônio Mesquita (TIPLAM). Outros produtos transportados no corredor são siderúrgicos, minério, derivados de petróleo, fertilizantes e container. A carga por eixo atual é de 25 toneladas e o volume anual ultrapassa 11,5 bilhões de TKU (tonelada quilômetro útil).



Figura 10 - Corredor Centro-Sudeste

Fonte: www.vli-logistica.com.br

A malha ferroviária do corredor no trecho entre Paulínia e Uberaba com extensão de aproximadamente 600 quilômetros, nomeado de Centro-Sudeste Paulista, está sendo renovada desde 2014 com substituição dos trilhos de TR-50 para TR-68, dormentes bibloco de concreto e madeira para monobloco em concreto e fixações para o tipo *fast clip*.

O objetivo desse projeto de renovação é o aumento da eficiência seja por incremento na velocidade máxima autorizada de circulação dos trens de 60 para até 80 km/h, seja no aumento da capacidade de carga para 27,5 t/eixo. O investimento plurianual que totaliza mais de R\$ 600 milhões prevê uma vida útil mínima de 40 anos para a via assegurada a correta manutenção dos ativos.

4.2 Identificação do problema

No contexto interno de uma ferrovia, a qualidade do pavimento ferroviário é avaliada pelas medições em campo e dados históricos de falhas e restrições de velocidade associadas a defeitos. O defeito é uma condição que extrapola os limites de tolerância estabelecidos para os principais parâmetros de geometria de via e compromete sua segurança operacional.

Dados de confiabilidade ilustrados no Gráfico 1 evidenciam o incremento anual de falhas (defeitos que impactam na operação ferroviária na medida em que geram interdição) na malha ferroviária do corredor em estudo podendo sinalizar a existência de defeitos precoces em trecho renovado com conseqüente redução da vida útil.

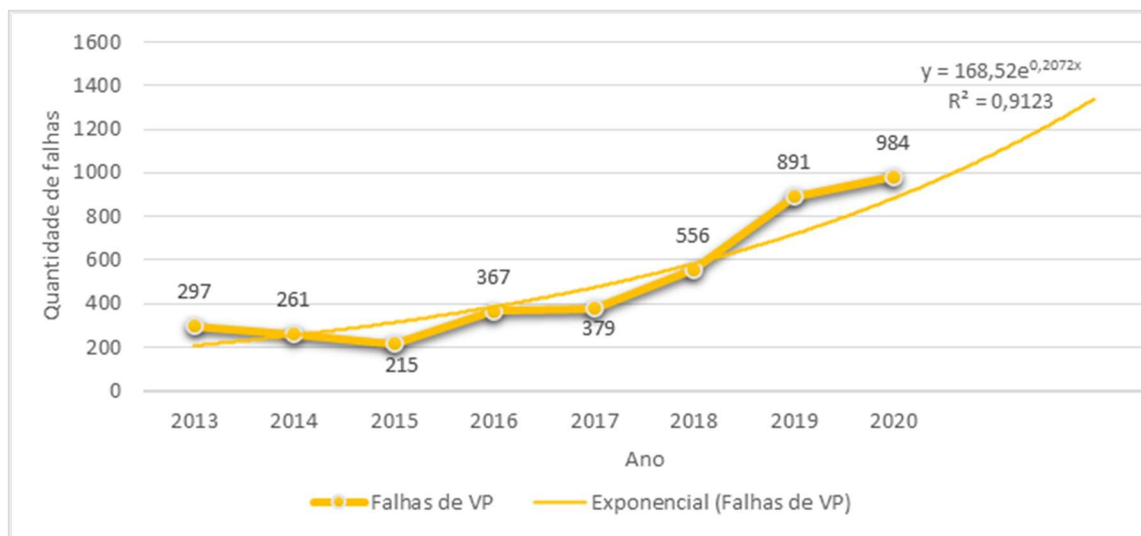


Gráfico 1 - Falhas no Corredor Centro-Sudeste Paulista da VLI
Fonte: Adaptado de Sistema de Monitoramento de Via (SMV, 2020)

O Gráfico 2 detalha os motivos das falhas relacionadas anteriormente e permite a identificação da quebra de trilho/solda como o principal deles seguido de linha desnivelada/torção.

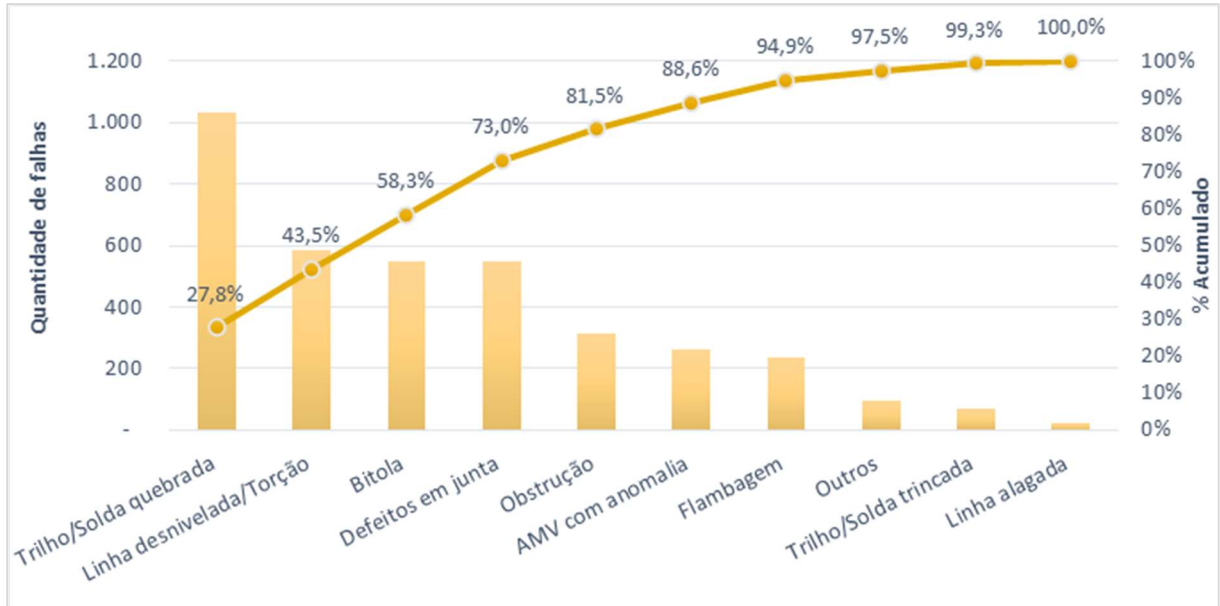


Gráfico 2 - Natureza das falhas do Corredor Centro-Sudeste Paulista de 2013 a 2020

Fonte: Adaptado de SMV (2020)

As camadas da infraestrutura de um pavimento ferroviário convencional citadas no capítulo anterior podem ter seu desempenho prejudicado em razão de diversos fatores como as características dos materiais empregados, a qualidade durante o processo construtivo e o cumprimento dos requisitos de manutenção estabelecidos em projeto.

USMAN et al. (2015) construíram um diagrama de falha de via permanente apoiada em subleito composto de material fino a partir de uma análise de causa e efeito e elencaram duas grandes causas: regime dinâmico de carregamento e ambiente natural (intemperismo).

Em se tratando do ambiente natural, chuvas com alta intensidade/duração associadas a falhas nos sistemas de drenagem geram aumento do tempo de dissipação da água acarretando o incremento da umidade do solo. A água em excesso no solo preenche os vazios reduzindo o contato entre os grãos (tensão efetiva), aumentando a tensão neutra e comprometendo a resistência ao cisalhamento do solo. Os efeitos colaterais são a geração de bolsões, ruptura por cisalhamento ou deformação plástica.

Considerando o regime dinâmico de carregamento, o principal efeito é a geração de finos que preenchem os vazios afetando seu grau de permeabilidade e elasticidade. Nesse caso também ocorre o aumento da retenção de água, incremento da umidade do solo, redução de capacidade de suporte da plataforma e demais efeitos citados no parágrafo anterior.

4.2.1 Contaminação do lastro

Segundo Selig e Waters (1994) as principais fontes de contaminação do lastro são:

- desgaste da própria camada do lastro;
- material oriundo das camadas granulares subjacentes;
- material proveniente da superfície;
- material do subleito;
- desgaste dos dormentes de concreto.

COCUNATO (1998) cita que a contaminação do lastro afeta seu módulo de elasticidade comprometendo sua função plena. ESVELD (2001) afirma que quando o percentual de material com diâmetro menor que 22mm ultrapassar 40% as consequências poderão ser:

- aumento da rigidez da plataforma, passando a mesma a funcionar como uma “laje”, potencializando o desgaste no contato roda-trilho e gerando defeitos no trilho e material rodante;
- surgimento de “gaps” alterando a área de contato do dormente com o lastro, gerando cargas diferentes daquelas para as quais a via foi dimensionada e aumentando a probabilidade de quebra dos dormentes de concreto, por exemplo;
- saturação nos locais de bolsões acelerando a degradação do dormente de madeira;
- comprometimento do nivelamento da via, aparecimento das restrições de velocidade, aumento da demanda por socaria e necessidade de reconstrução com a possibilidade de as camadas inferiores estarem colapsadas.

4.2.1.1 Efeito da contaminação na permeabilidade do lastro

Conforme citado por COCUNATO (1998), a contaminação do lastro preenche os vazios existentes entre os grãos, reduz sua capacidade drenante, aumenta o tempo

de permanência da água em seu interior podendo gerar a sua saturação e da camada de subleito.

Um estudo relacionando a contaminação do lastro com a permeabilidade conduzido por PAIVA et al. (2015) analisou em laboratório amostras de lastro contaminadas com silte inorgânico de média compressibilidade (grupo ML – M de *mo* que significa silte em sueco, e L de *low* – que significa baixa compressibilidade) disponível no campus da Unicamp em Campinas-SP em percentual volumétrico de 10%, 15%, 20%, 25% e 40%.

As amostras de solo e lastro foram inseridas em um permeômetro de 15,2 cm de diâmetro e 18 cm de altura e seladas com vaselina para evitar vazamento. O teste foi contabilizado após 24h de circulação da água pela amostra e para cada grau de contaminação foram realizadas três repetições com cinco medições cada variando a altura de água entre 14,6 cm e 20,8 cm.

Os resultados apresentados no Gráfico 3 evidenciaram a redução da condutividade hidráulica do lastro com o aumento do teor de contaminação podendo gerar desempenho abaixo do esperado.

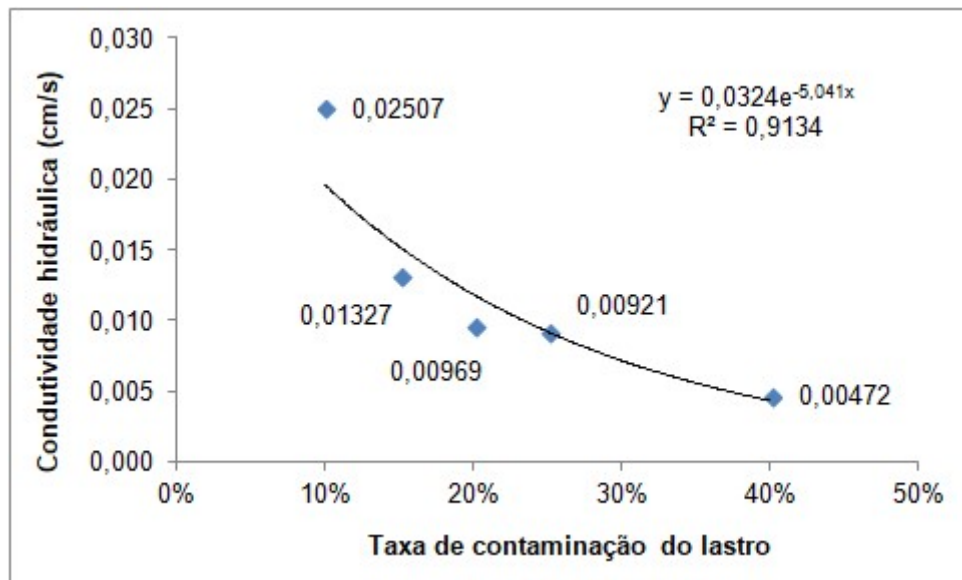


Gráfico 3 - Variação da condutividade hidráulica com a taxa de contaminação do lastro

Fonte: Adaptado de Paiva et al. (2015)

SCHMIDT et al. (2017) também realizaram estudos com um permeômetro UICHAP (University of Illinois constant head aggregate permeameter) e compararam a velocidade de descarga da água em vários graus de contaminação do lastro.

O equipamento era composto de uma torre à montante por onde entrava a água, uma seção horizontal com 61 cm de comprimento para inclusão da amostra, uma torre à jusante com um divisor, e um açude com entalhe em V por onde a água caía em uma base para ser reinserida no processo.

Em cada lado da amostra existiam piezômetros. A caixa da amostra continha uma malha em metal e um filtro geossintético para reter os agregados. A amostra foi incluída em 5 camadas compactadas por vibração e apicoadas para evitar a existência de uma superfície lisa preferencial para o fluxo.

Para vedação da superfície foi inserida uma palmilha de neoprene e aparafusada uma chapa metálica. A Figura 11 apresenta o esquema do aparelho.

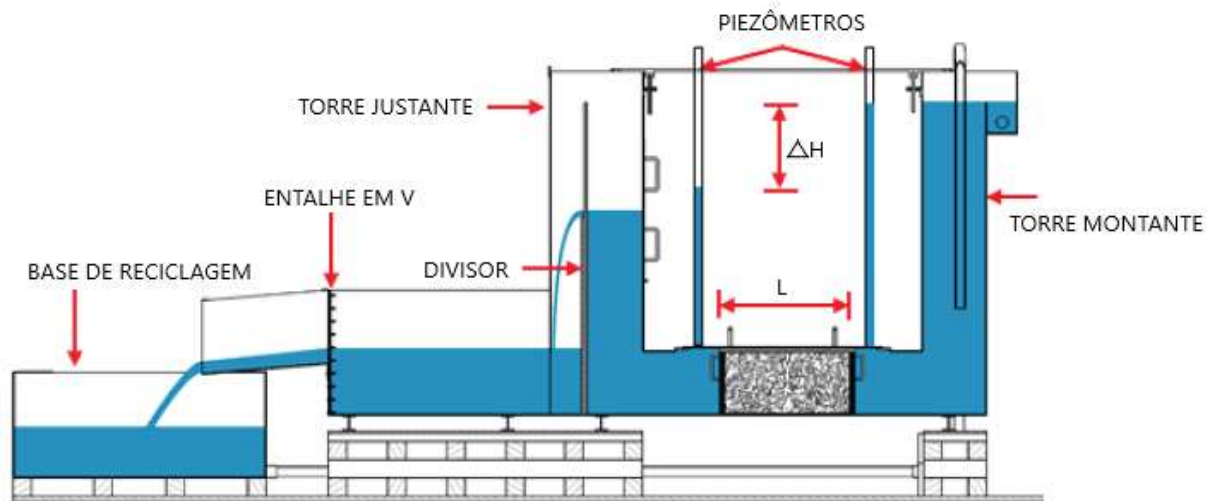


Figura 11 - Permeâmetro UICHAP

Fonte: Adaptado de SCHMIDT et al. (2017)

O ensaio foi realizado com amostras em seis diferentes índices de contaminação conforme demonstrado no Gráfico 4. Foi possível observar a redução significativa da velocidade de passagem da água com o aumento do teor de finos chegando a valores próximos aos da areia para graus de contaminação acima de 23.

Os autores identificaram que a maior perda na permeabilidade aconteceu no início do processo de contaminação e atribuíram esse comportamento ao fato de que as partículas finas livres nos vazios do lastro são empurradas pelo fluxo de água até a restrição mais próxima e se acumulam gerando um fluxo restritivo mesmo havendo vazios entre as partículas do lastro.

Esse fato pôde ser observado através da diferença entre a velocidade para um mesmo gradiente hidráulico entre as amostras com grau de contaminação de 3,1 e 7,4. A partir de determinado teor de contaminação o impacto na permeabilidade foi

reduzido e as curvas se aproximaram alcançando níveis próximos ao do material contaminante.

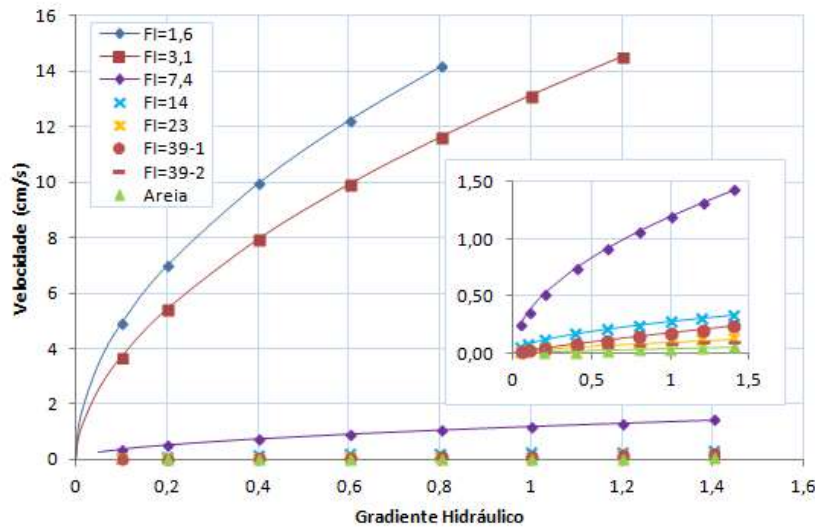


Gráfico 4 - Velocidade de descarga para diferentes graus de contaminação de lastro

Fonte: Adaptado de SCHMIDT et al. (2017)

O Fouling Index (FI), indicador utilizado por SCHMIDT et al. (2017) para avaliação do grau de contaminação considera a soma do percentual passante nas peneiras de 4,75mm (#4) e 0,075mm (#200) utilizadas no ensaio de granulometria estabelecido em norma ABNT NBR 7181 (2016).

Proposto por SELIG e WATERS (1994), o índice contempla cinco categorias que variam de limpo a altamente contaminado conforme demonstrado na Tabela 3 e retrata apenas a relação entre pesos do material fino e da amostra total podendo não representar fidedignamente a perda da capacidade drenante quando existir mais de um tipo de material contaminante com diferentes volumes nos vazios do lastro.

Tabela 3 - Graus de contaminação do lastro

Categoria	<i>Fouling Index (%)</i>
Limpo	FI < 1
Moderadamente limpo	1 ≤ FI < 10
Moderadamente contaminado	10 ≤ FI < 20
Contaminado	20 ≤ FI < 40
Altamente contaminado	FI ≥ 40

Fonte: Adaptado de Selig and Waters (1994)

FELDMAN e NISSEN (2002), da Queensland Rail (Austrália) propuseram outro índice para classificação do grau de contaminação do lastro: o Percentual de

contaminação dos vazios (PVC) cuja proposta é demonstrar a deficiência na capacidade drenante e a perda da resiliência do lastro contribuindo para o desenho da estratégia de limpeza.

O PVC é obtido a partir da relação entre o volume de contaminante passante na peneira de 9,5mm, e o volume de vazios do lastro retido na peneira de 9,5mm (calculado pela divisão entre o peso de água que preenche os vazios do material retido na peneira de 9,5mm e compactado em recipiente de aço com dimensões padronizadas, e a densidade da água) evidenciando melhor o grau de preenchimento dos vazios por material de menor granulometria.

Visando comparar os resultados do PVC com o FI e um terceiro método estabelecido na especificação do lastro da Queensland Rail (D-bar), os autores testaram em laboratório 32 amostras coletadas ao longo de toda a profundidade da camada de lastro nas condições contaminado por infiltração de carga do vagão e quebra do lastro, e limpo (após procedimento de limpeza no local).

Os resultados confirmaram a redução da permeabilidade com o aumento da contaminação e demonstraram que amostras com granulometria, D-bar e Fouling Index semelhantes apresentaram PVC diferentes retratando a maior sensibilidade desse último indicador ao tipo de contaminante, um fator importante a ser considerado.

TENNAKOON (2012) desenvolveu o Índice de contaminação dos vazios (VCI - *Void Contamination Index*) calculado a partir da relação entre o volume real de material contaminante presente nos vazios do lastro em campo e o volume de vazios do lastro padrão limpo.

O cálculo do VCI depende da escavação das camadas de lastro limpo e contaminado com medição da altura delas em campo, preenchimento do local com água em volume conhecido, secagem das amostras, separação das frações usando a peneira de 9,5mm, peso das amostras secas, cálculo da densidade relativa, e cálculo do índice de vazios das frações.

Semelhantemente à SCHMIDT et al. (2017) e PAIVA et al. (2015) os autores realizaram testes de condutividade hidráulica em laboratório com permeâmetro de larga escala utilizando amostras de lastro contaminado com carvão retirado de Rockhampton e Bellambi, lastro contaminado com argila retirado de Sydenham na Austrália, e amostras confeccionadas em laboratório simulando a contaminação de

cima para baixo (externa não uniformemente distribuída proveniente da carga) e a de baixo para cima (interna uniformemente distribuída proveniente do subleito).

Os corpos de prova possuíam 500 mm de diâmetro e 500 mm de altura e foram construídos em quatro camadas compactadas acima de uma membrana de filtro para evitar perda de finos durante o ensaio. Foi observada a redução da condutividade hidráulica com o aumento do VCI e para valores de VCI próximos a 90% de contaminação com argila e 50% de contaminação com carvão a condutividade hidráulica do lastro contaminado se assemelhou à do material contaminante.

4.2.1.2 Efeito da contaminação na elasticidade do lastro

Outro aspecto associado ao grau de contaminação do lastro além da redução da permeabilidade argumentada anteriormente é a alteração da sua elasticidade. COSTA (2016) cita dois efeitos da contaminação na propriedade elástica da camada do lastro:

- aumento das deflexões causado pela presença de finos com características plásticas quando da presença de água comprometendo o nivelamento da via e implicando em restrições de velocidade, aumento da demanda por socaria ou até a necessidade de reconstrução caso as camadas inferiores estejam colapsadas;
- aumento da rigidez devido à presença de finos não plásticos e secos que se aderem aos grãos do lastro e entre si provocando uma “cimentação” da camada que passa a funcionar como uma “laje” potencializando o desgaste no contato rodatrielho.

Para avaliação da rigidez da plataforma de maneira indireta através do módulo de via o autor propôs um dispositivo de medição do deslocamento vertical em campo sem interrupção do tráfego. Segundo TALBOT (AREA, 1918) o módulo de via consiste na força pelo comprimento unitário necessária para provocar uma deflexão unitária na via. Portanto, quanto maior o módulo de via, menos elástico é o pavimento.

O equipamento de COSTA (2016), utilizado durante 17 meses na Estrada de Ferro Carajás, é composto por perfis em alumínio de elevada rigidez com comprimento de braço de 3,5 metros para vencer a área de abrangência da carga (trata-se de um limitador na utilização em cortes com gabarito estreito) e possibilidade de instalação de até quatro LVDT's (*Linear Variable Differential Transformers*) ligados a um sistema de aquisição de dados para medição do deslocamento linear. O registro dos

deslocamentos é feito no patim do trilho de forma contínua a cada passagem de eixo no ponto de coleta.

Outro estudo, realizado por EBRAHIMI et al. (2015) demonstrou em laboratório o efeito da contaminação na deformação permanente do lastro. Foram utilizadas amostras de lastro limpo fornecidas pela *BNSF Railway* com 47% de riólito e 35% de granito, distribuição granulométrica próxima à faixa 24 da *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA), forma angular e índice de vazios de 0,62, e lastro reciclado da *WOS Railroad Company* in Madison com granulometria menor que a faixa 24 da AREMA, forma arredondada (pelo processo de atrito e erosão) e índice de vazios de 0,53.

Os materiais finos, obtidos a partir do fracionamento de amostras de lastro contaminado provenientes da *WOS Railroad Company*, continham material de sublastro, material proveniente da degradação do lastro, carvão proveniente da superfície, e argila do subleito. A mistura deles com o lastro limpo foi realizada em teores de umidade diferentes de forma a se obter FI = 6%, 12%, 24% e 30%.

O ensaio triaxial de larga escala com diâmetro de 305 mm e altura de 610 mm utilizou a frequência de carregamento de 5 Hz para simular veículos a 64 km/h e após um ciclo de carregamento de $N = 2 \times 10^5$. O estado de tensões de 90 KPa para confinamento e 300 KPa para desvio representou uma ferrovia típica com carga de aproximadamente 30 toneladas por eixo.

Os resultados obtidos elucidam a maior deformação plástica acumulada para materiais contaminados se comparada à deformação em materiais limpos sem considerar a ação da água conforme pode ser observado no Gráfico 5, o que pode ser atribuído à redução do índice de vazios.

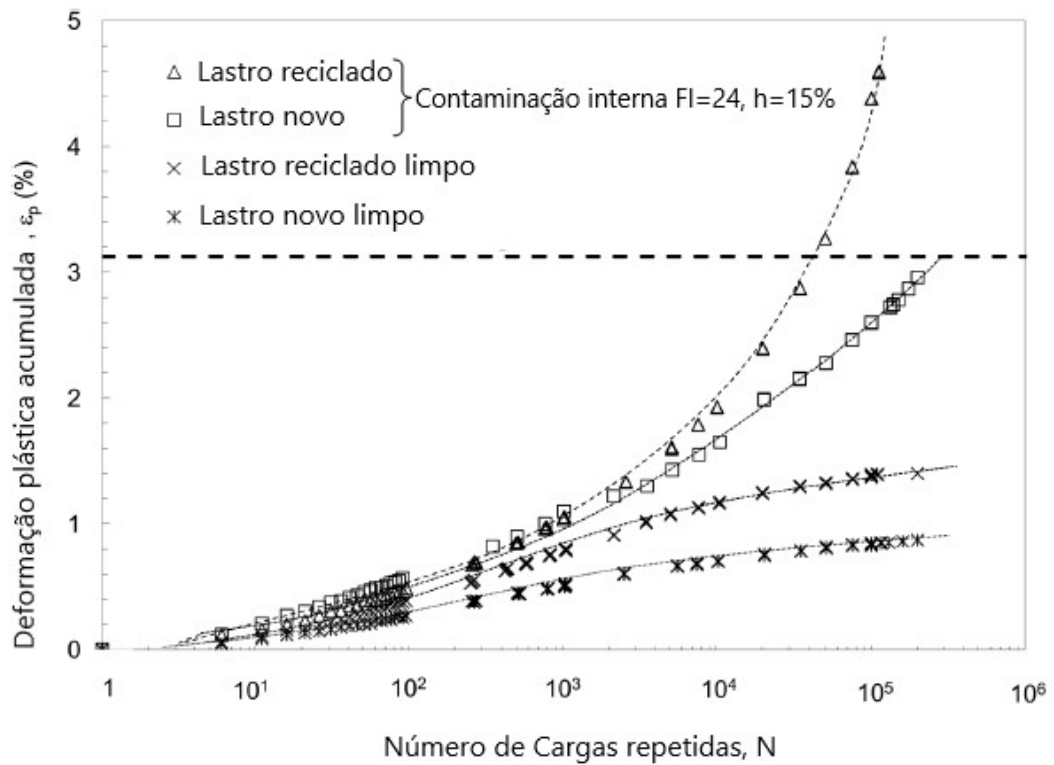


Gráfico 5 - Deformação plástica acumulada do lastro novo e reciclado nas condições limpo e contaminado

Fonte: Adaptado de EBRAHIMI et al. (2014).

Analisando o gráfico observa-se a maior susceptibilidade à deformação do lastro reciclado que possui distribuição granulométrica menor e grãos mais arredondados que o lastro novo oferecendo menor atrito entre as partículas.

Os autores apresentaram também, conforme ilustrado no Gráfico 6 o aumento da deformação plástica com o incremento no teor de umidade do material contaminante não coesivo. Esse fenômeno, também citado por COSTA (2016) é atribuído ao aumento da poro-pressão com conseqüente perda da resistência ao cisalhamento.

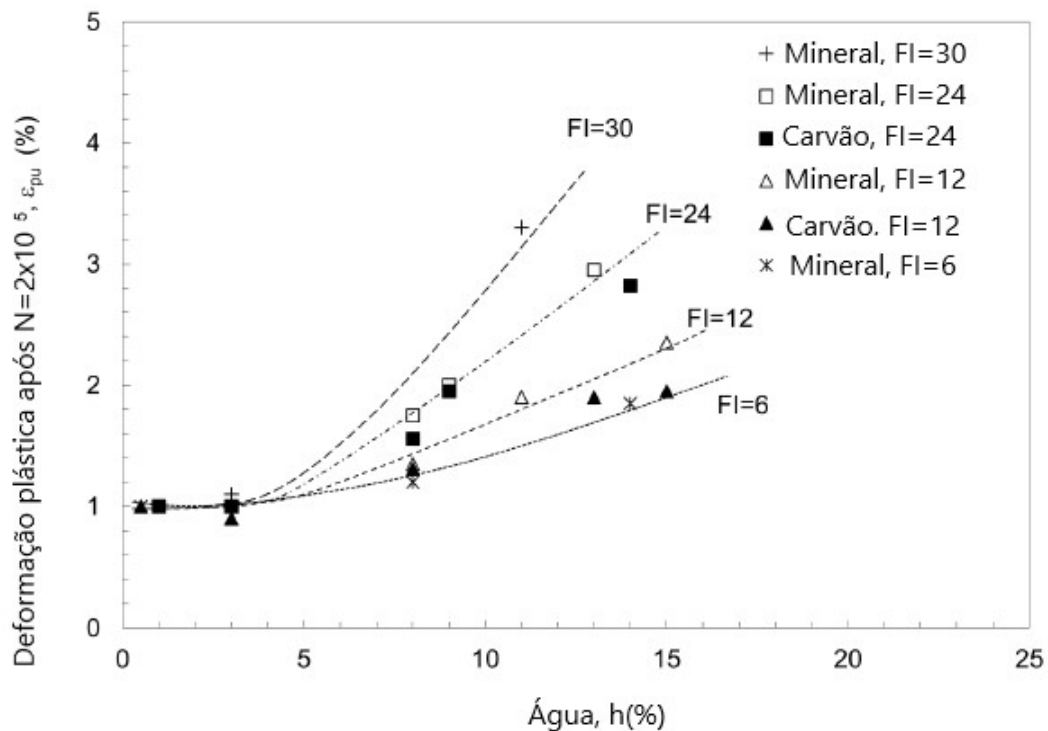


Gráfico 6 - Deformação plástica do lastro após $N = 2 \times 10^5$, em função da presença de água e o grau de contaminação

Fonte: Adaptado de EBRAHIMI et al. (2014).

4.2.2 Teor de umidade

O incremento do teor de umidade associado à contaminação do lastro pode afetar o desempenho das camadas de infraestrutura do pavimento ferroviário conforme demonstrado no estudo de EBRAHIMI et al. (2014) no capítulo anterior. OLIVEIRA (2019) cita que omissões no projeto, falhas na construção ou nos sistemas auxiliares ao pavimento (sistema de drenagem) podem afetar a resistência do subleito, o que corrobora EBRAHIMI et al. (2014). A mesma autora afirma adicionalmente, que normalmente a principal ofensora ao subleito é a água.

Suzuki, Azevedo e Kabbach Jr. (2013) afirmam que o pavimento pode se tornar rapidamente instável quando o material do subleito estiver saturado após o período de chuvas e o pavimento for submetido a elevadas cargas do tráfego. Segundo os autores o efeito é o bombeamento de finos ou até mesmo o trincamento da camada pelo aumento de vazios.

RUSHTON e GHATAORA (2012) compararam a vida útil de uma seção de pavimento rodoviário perfeitamente drenado e uma saturada e inferiram, conforme apresentado no Gráfico 7, que um pavimento saturado em torno de 10% do tempo (5

semanas no ano) tem sua vida útil reduzida em aproximadamente 45%. Os autores citam ainda que os resultados são aplicáveis para vias férreas.

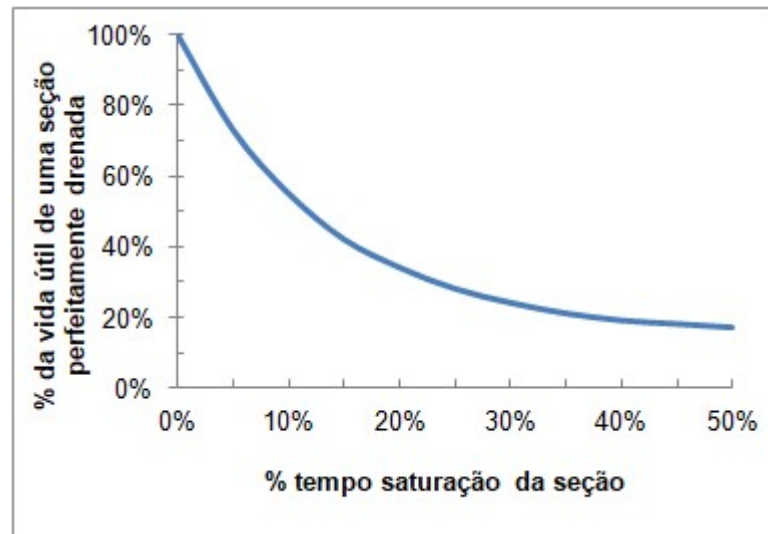


Gráfico 7 - Relação entre vida útil do pavimento e período de saturação

Fonte: Adaptado de Rushton e Ghataora (2012)

4.2.2.1 Efeito da umidade no Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência e o CBR são utilizados para avaliar a rigidez do subleito de um pavimento conforme citado por OLIVEIRA (2019). SELIG e LUTENEGGER (1991) entendem que o desempenho do subleito é avaliado por sua resistência ao cisalhamento e deformações elásticas e plásticas. Segundo CUNTO (1998), a AASHTO passou a utilizar o Módulo de Resiliência a partir de 1996 em substituição ao CBR.

PINTO E PREUSSLER (2002) utilizam a definição de resiliência como sendo a propriedade de um corpo devolver a energia armazenada após a cessão da tensão responsável pela deformação elástica. A deformação elástica é recuperável e cessa quando o carregamento é retirado, mas apesar de recuperável, ela é responsável pela fadiga a partir da repetição das cargas do tráfego (NORBACK, 2018).

O Módulo de Resiliência é um parâmetro obtido em laboratório através do ensaio triaxial de cargas repetidas conforme descrito em norma DNIT 134/2018-ME. Ele consiste na razão entre a tensão desvio aplicada repetidamente (pulsos de carregamento de curta duração) e a deformação elástica ou resiliente resultante.

O ensaio triaxial de cargas repetidas consiste em moldar um corpo de prova cilíndrico e submetê-lo a cargas cíclicas que simulam o tráfego. A primeira etapa de carregamento é chamada condicionamento e sua finalidade é eliminar deformações

permanentes iniciais. Nessa etapa são aplicadas 500 repetições da tensão desvio ($\sigma_d = 0,07$ MPa) a uma frequência de 1Hz (60 ciclos por minuto) e tensão de confinamento ($\sigma_3 = 0,07$ MPa) constante.

A sequência do ensaio inclui a variação da tensão desvio e de confinamento conforme os 12 pares estabelecidos em norma sendo no mínimo 10 ciclos de cada e repetição de pelo menos 5 com variação menor que 5% de deformação específica.

Alternativamente pode ser calculado o Módulo de Resiliência a partir de correlações com dados coletados em ensaios de campo. A determinação indireta, apesar de não representar o modelo real, tem a vantagem de utilizar as condições de campo, o que não acontece para o ensaio triaxial de cargas repetidas com a utilização de um corpo de prova de amostra deformada moldado na condição de umidade ótima e máxima densidade seca.

SANTOS (2014) propôs a obtenção do Módulo de Resiliência da camada (capacidade elástica do material de se deformar sob carga dinâmica e retornar à condição original antes da aplicação da carga) a partir de um fator de correlação aplicado ao módulo de deflexão obtido através do ensaio *Light Weight Deflectometer* (LWD) procedimentado em norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM) E2583 – 07 (2015).

O ensaio do LWD consiste na aplicação de uma força de impacto produzida através da queda de um peso de 10 quilogramas de uma altura conhecida sobre uma placa de carga de 300 mm de diâmetro. As deflexões são medidas através de três sensores posicionados em diferentes distâncias do centro da placa e posteriormente aquela obtida no centro da placa é convertida através de correlações no módulo de deflexão dinâmico da camada.

Seus estudos foram realizados no Arco Metropolitano do Rio de Janeiro, rodovia BR-493/RJ-109. Uma campanha de medições utilizando o LWD foi conduzida e os resultados foram comparados com os obtidos em laboratório através do ensaio triaxial de cargas repetidas conforme DNIT 181/2018 - ME. Segundo o autor para solos argilosos lateríticos (LG') conforme classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical) idealizada por NOGAMI e VILLIBOR (1981) para solos tropicais, o fator de correlação próximo da realidade é de $K = 2,45$.

MOUSAVI et al. (2016) realizou testes em campo e laboratório no norte da Califórnia e propôs um modelo para cálculo indireto do Módulo de Resiliência a partir da relação σ/δ fornecida pelo LWD Prima 100.

$$k_i = C_1 + C_2 \frac{\sigma}{\delta}$$

Onde:

$i = 1, 2$ e 3 ;

σ = Tensão aplicada

δ = Deflexão superficial medida

C_1 e C_2 são coeficientes constantes do modelo desenvolvido conforme Tabela

4.

Tabela 4 - Coeficientes constantes do modelo de Mousavi (2016)

	C₁	C₂
K₁	480	1040
K₂	1,0	-0,9
K₃	-3,7	2,8

O modelo é aplicável aos solos classificados utilizando os métodos AASHTO (2003) e SUCS como A-1-b (SP - S de *sand* que significa areia, e P de *poorly graded* que significa mal graduado), A-4 (ML - M de *mo*, que significa silte em sueco, e L de *low* que significa baixa compressibilidade, SM – S de *sand* e M de *mo*, CL – C de *clay* que significa argila e L de *low*), A-6 (CL-ML), e A-7-5 (MH - M de *mo*, e H de *high* que significa alta compressibilidade) e pode ser utilizado em qualquer combinação de tensões com coeficiente de determinação (R^2) de 0,83 conforme apresentado no Gráfico 8. Dados disponíveis dos estudos de WHITE et al. (2007) e MOHAMMAD et al. (2008) também foram utilizados para validação do modelo obtendo coeficiente de determinação de 0,96.

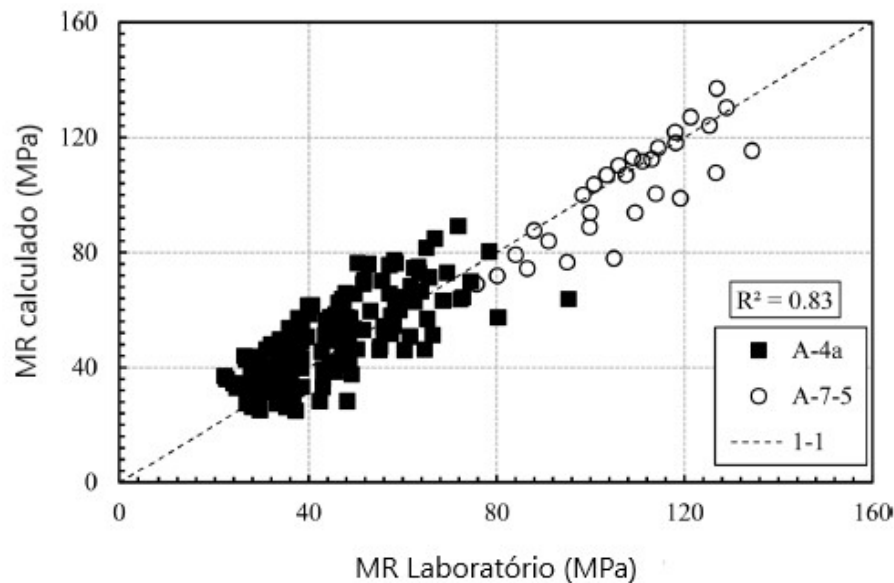


Gráfico 8 - MR Laboratório x MR calculado

Fonte: Adaptado de MOUSAVI et al. (2016).

As deformações plásticas são aquelas acumuladas durante toda vida útil do pavimento e, portanto, podem gerar defeitos geométricos na via (MCHENRY e ROSE, 2012). O DNIT estabelece através da norma DNIT 179/2018-IE a metodologia para determinação da deformação permanente de um solo através do equipamento triaxial de cargas repetidas.

O procedimento consiste na moldagem dos corpos de prova de forma análoga àqueles utilizados no ensaio triaxial de cargas repetidas para determinação do Módulo de Resiliência. Inicialmente são aplicados 50 ciclos para assegurar o correto posicionamento do pistão evitando leitura de folga como deformação. O ensaio efetivamente inicia após esse procedimento e deve contemplar a aplicação de 150 mil ciclos do par de tensões escolhido dentre os estabelecidos na norma. Devem ser registrados os deslocamentos ao longo do ensaio para entendimento da variação da deformação conforme aplicação dos ciclos de carga. O valor da deformação permanente acumulada é a razão entre o deslocamento plástico acumulado e a altura.

HORNYCH et al. (2008) avaliaram a influência do teor de umidade no Módulo de Resiliência e na deformação permanente de diferentes materiais variando o estado de tensão. Os resultados avaliados aparecem no Gráfico 9 e evidenciam a redução do Módulo de Resiliência e o aumento da deformação axial permanente com o aumento da umidade em qualquer estado de tensões.

Segundo MCHENRY e ROSE (2012) o carregamento cíclico nos solos pode gerar o aumento de poro-pressão quando o solo estiver saturado acima do teor de umidade ótima e quando o carregamento for aplicado de forma rápida (condição não drenada). Nesse caso pode haver ruptura por cisalhamento do solo uma vez que a tensão efetiva é reduzida.

A maior ou menor sensibilidade à água está associada à granulometria e mineralogia do material. Para areias argilosas o módulo reduz cerca de 4 vezes seu valor quando do incremento da umidade em 5%. Já o material silteoso, para a mesma variação da umidade tem seu módulo reduzido em 3 vezes.

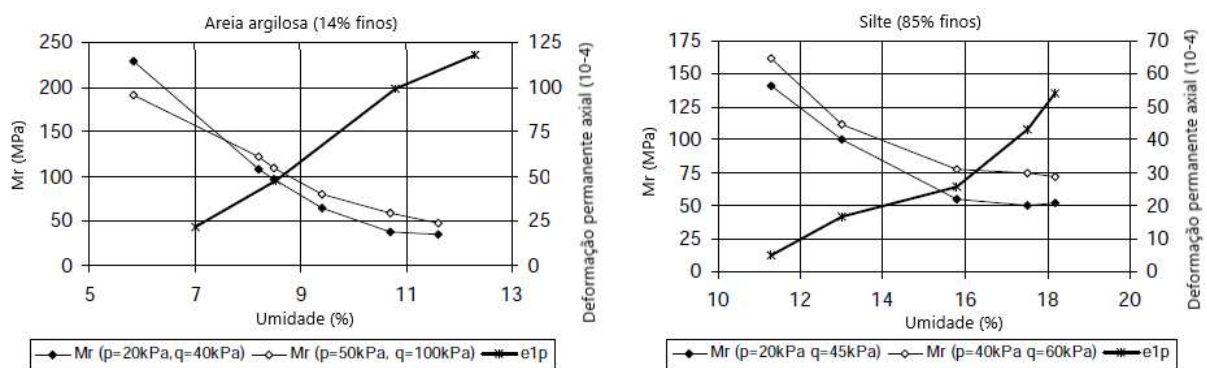


Gráfico 9 - Influência do teor de água no Módulo resiliente e Deformação permanente da areia argilosa (esquerda) e silte (direita)

Fonte: adaptado de HORNYCH et al. (2008)

DUONG et al. (2014) analisaram em laboratório o comportamento do lastro (altura de 160 mm) sobre solo compactado na umidade ótima em cinco camadas (altura total de 220 mm). Os testes foram realizados na condição não saturada até 500.000 ciclos na frequência de 5 Hz para três massas específicas secas (1,4; 1,5 e 1,6 mg/m³) seguidos de outros 500.000 ciclos (ou interrupção do ensaio caso houvesse finos na superfície do lastro) na condição saturada com altura de água 2 mm acima da interface entre os materiais.

A Figura 12 mostra o estado das camadas antes e depois do ciclo de carregamento para as condições não saturada e saturada na massa específica seca de 1,4 mg/m³. É possível verificar que para a condição saturada houve grande contaminação do lastro com o material fino do subleito em razão de dois fatores:

- a presença de água deixou o solo do subleito menos rígido facilitando a interpenetração do lastro no subleito;

- a presença de água gerou excesso de poro pressão em condições de menor massa específica seca (maior compressibilidade do solo) provocando o bombeamento dos finos durante sua dissipação.

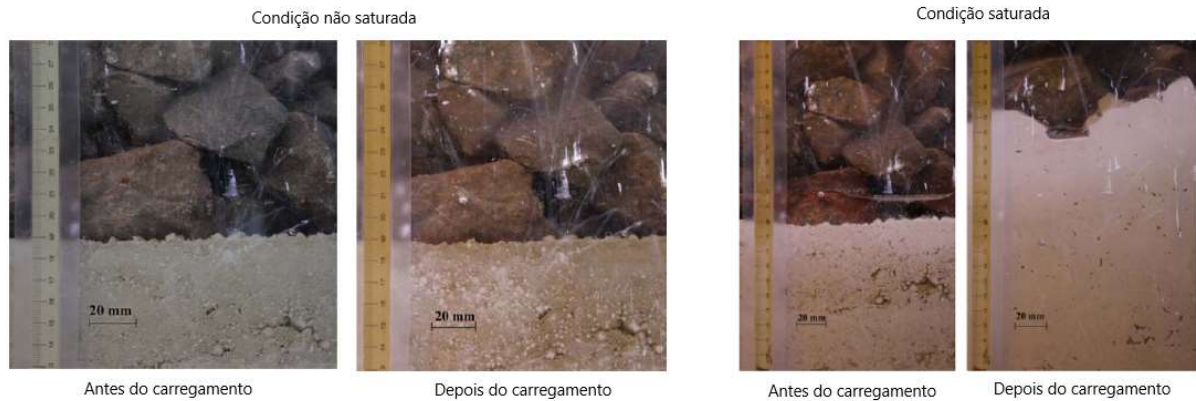


Figura 12 - Influência da umidade na interpenetração do lastro e no bombeamento de finos para a massa específica seca de 1,4 mg/m³

Fonte: adaptado de DUONG et al. (2014)

Para a massa específica seca de 1,6 mg/m³ na condição saturada apresentado na Figura 13 observou-se menor contaminação do lastro com o material fino do subleito evidenciando a influência da massa específica seca no comportamento do solo quando em condição saturada.



Figura 13 - Influência da umidade na interpenetração do lastro e no bombeamento de finos para a massa específica seca de 1,6 mg/m³

Fonte: adaptado de DUONG et al. (2014)

A comparação dos resultados obtidos para o estado não saturado e o estado saturado demonstrou a influência da água no comportamento do pavimento na medida em que os deslocamentos permanentes aumentaram significativamente na condição saturada. Conforme ilustrado no Gráfico 10 para um mesmo número de ciclos da

ordem de 10² os deslocamentos permanentes na condição não saturada para massa específica seca de 1,4 mg/m³ foram inferiores a 0,2 mm enquanto para a condição saturada foram superiores a 20 mm (100 vezes superior). É possível observar ainda a redução do deslocamento permanente quando do incremento na massa específica seca em ambas as condições de saturação.

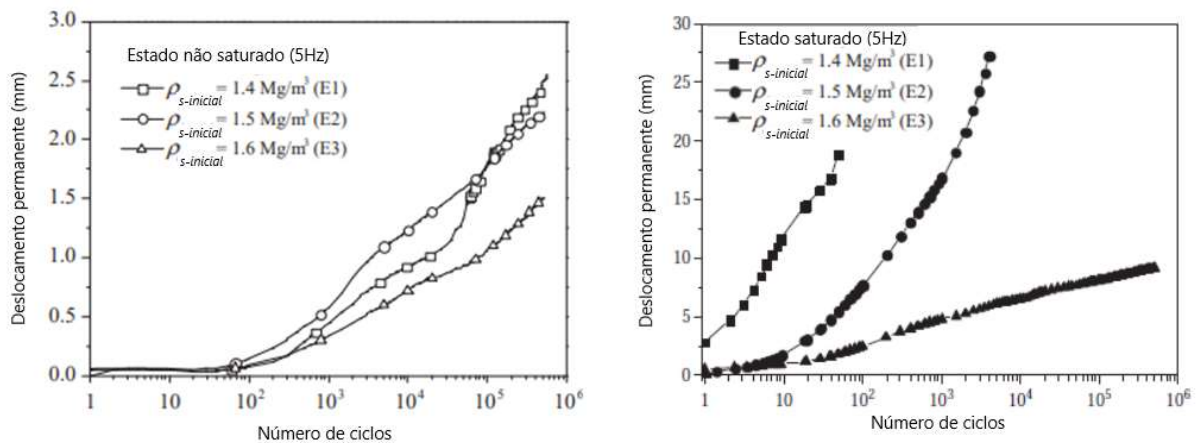


Gráfico 10 - Variação do deslocamento permanente em função do número de ciclos para três diferentes massas específicas secas

Fonte: adaptado de DUONG et al. (2014)

ROSA et al. (2021) demonstraram a redução dos valores de Módulo de Resiliência de materiais com características lateríticas a partir de ensaio triaxial de cargas repetidas na condição de umidade ótima e acima da ótima (w_{sat1} alcançada após 30 minutos dos corpos de prova uma pedra porosa imersa e w_{sat2} após 1 hora para cada extremidade do corpo de prova).

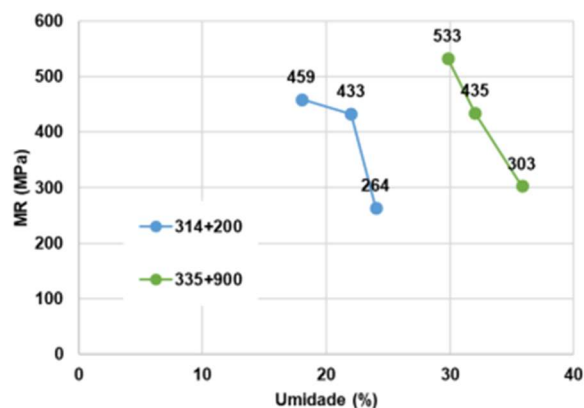


Figura 14 - Valores de MR dos solos estudados nas umidades w_{ot} , w_{sat1} e w_{sat2}

4.2.2.2 Efeito da umidade no índice de Suporte Califórnia (CBR)

O CBR de um solo é obtido em laboratório conforme Norma DNIT 172/2016 – ME. A primeira etapa consiste na moldagem padronizada de um corpo de prova que considera a aplicação do solo em 5 camadas e compactação com energia padrão (Proctor). Devem ser moldados 5 corpos de prova para obtenção da curva de CBR.

Em seguida os corpos de prova são submersos por no mínimo 4 dias visando a leitura a cada 24h da sua expansão. Por fim os corpos de prova são retirados da imersão, drenados naturalmente durante 15 minutos e submetidos à penetração de um pistão cilíndrico com velocidade padrão. O CBR é calculado através da relação entre a pressão lida no ensaio entre as penetrações de 2,54 e 5,08 mm e a pressão padrão.

A resistência do solo (CBR) pode ser obtida indiretamente por correlação com o índice de penetração DCP (DN) que consiste na relação entre a profundidade e o número de golpes. O ensaio de *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) estabelecido em norma ASTM D6951 foi projetado na África do Sul e permite a medição das propriedades dos materiais *in situ* através de golpes aplicados pela queda de um peso padrão de 8 quilogramas de uma altura conhecida de 575 mm sobre uma haste metálica em cuja ponta é conectado um cone padrão com ângulo de 30 ou 60 graus e diâmetro de base de 20 mm. O ensaio segue com a aplicação dos golpes subsequentes e registro da penetração até a cravação total da haste ou quando da aplicação de 10 golpes sequenciais com penetração inferior a 3 mm.

Diversos são os autores que estudaram essa correlação. A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam um resumo elaborado por FERNANDES (2015) para as referências da literatura e por TORRES (2017) para as recomendações da norma americana ASTM D-6951 (2009).

Tabela 5 - Correlações entre DCP e CBR

Fonte	Correlação	Tipo de solo
Kleyn e Savage (1982)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2,63 - 1,28 * \text{Log}(\text{DN})$	Solos África do Sul
Harison (1987)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2,56 - 1,16 * \text{Log}(\text{DN})$	Solos Argilosos
Harison (1987)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 3,03 - 1,51 * \text{Log}(\text{DN})$	Solos Arenosos
Harison (1987)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2,55 - 0,96 * \text{Log}(\text{DN})$	Pedregulhos
Harison (1987)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2,81 - 1,32 * \text{Log}(\text{DN})$	Todos os tipos de solo
Ponce H. et al. (1991)	$\text{Log}(\text{CBR}) = 2,89 - 1,46 * \text{Log}(\text{DN})$	Solos finos Chile

Heyn (1986)	$CBR = 443,45 * (DN)^{-1,30}$	Solos Paraná
Vertamatti e Oliveira (1997)	$Log(CBR) = 2,490 - 1,057 * Log(DN)$	Latosolos ITA Solos Santa Catarina
Trichês e Cardoso (1998)	$CBR = 512,64 * (DN)^{-1,25}$ <i>in situ</i>	Solos Santa Catarina
Trichês e Cardoso (1998)	$CBR = 151,58 * (DN)^{-1,03}$ <i>Dimensionamento</i>	Solos Santa Catarina

Fonte: adaptado de FERNANDES (2015)

Tabela 6 - Correlações entre DCP e CBR - ASTM D-6951 (2009)

Fonte	Correlação	Tipo de solo
ASTM D-6951 (2009)	$CBR = 292 / DCP^{1,12}$	Argila de alta compressibilidade (CH)
ASTM D-6951 (2009)	$CBR = 1 / (0,0170193 * DCP)^2$	Argila de baixa compres. (CL) e CBR<10
ASTM D-6951 (2009)	$CBR = 1 / (0,0028713 * DCP)$	Todos, exceto CH e CL com CBR<10

Fonte: adaptado de TORRES (2017)

Pode-se observar que a correlação depende do tipo de solo. O Gráfico 11 compara algumas dessas correlações e demonstra a proximidade dos resultados. No presente trabalho foram adotadas as equações de correlação mais genéricas de Vertamatti e Oliveira (1997), e Heyn (1986).

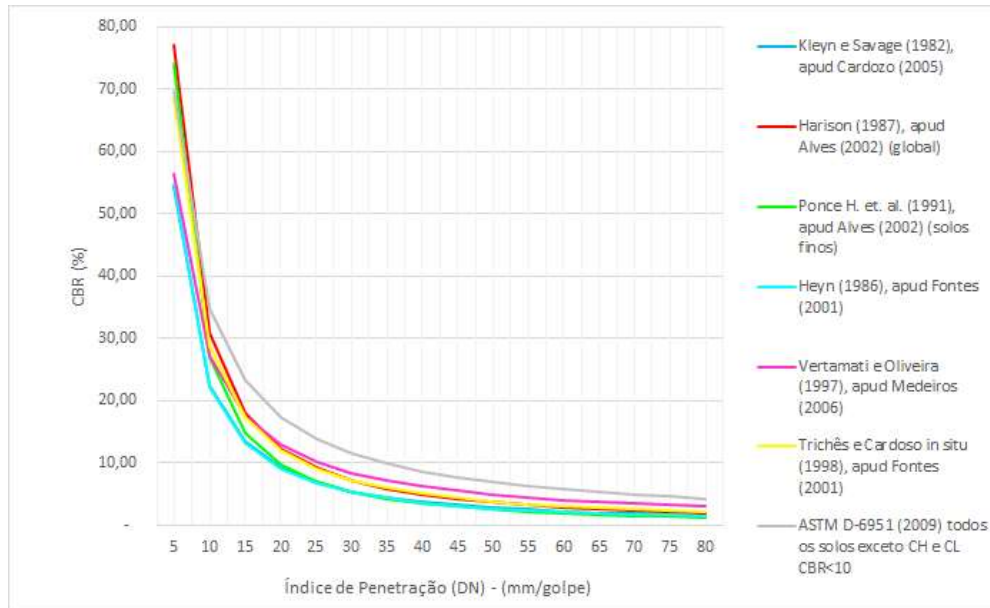


Gráfico 11 - Correlações CBR x DN

Fonte: Adaptado de FERNANDES (2015)

HORNYCH et al. (2008) apresentaram que o incremento no teor de umidade acarreta a redução da capacidade de suporte do material (expressada através do CBR) conforme apresentado no Gráfico 12 para solos típicos como areia siltosa bem graduada, areia fina uniforme e argila densa.

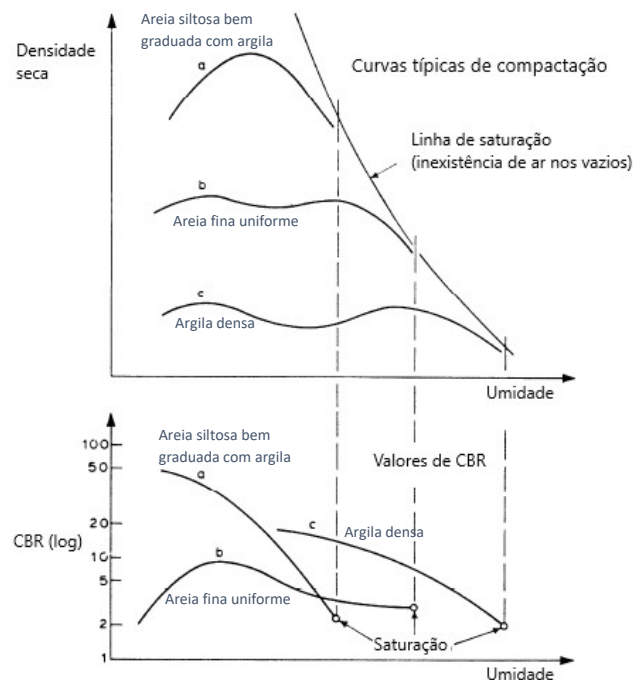


Gráfico 12 - Valores de CBR relacionados à umidade e curvas de compactação para os solos típicos:

a) areia siltosa bem graduada com argila, b) areia fina uniforme, c) argila densa

Fonte: adaptado de HORNYCH et al. (2008)

DASHO e VERNA (2019) confirmaram as afirmações de HORNYCH et al. (2008) através de uma investigação geotécnica realizada em 17 pontos do subleito de uma rodovia da Etiópia. O estudo contemplou testes em laboratório de solos finos e solos granulares variando o teor de umidade e o tempo de saturação para avaliar o efeito no índice de CBR.

Os resultados para um ponto composto por solo siltoso do tipo A-4 (classificação AASHTO) demonstraram a redução dos valores de CBR com o incremento do número de dias de saturação e do teor de umidade. Pode-se observar no Gráfico 13 que o valor do CBR reduziu aproximadamente 50% após a saturação de 6 dias.

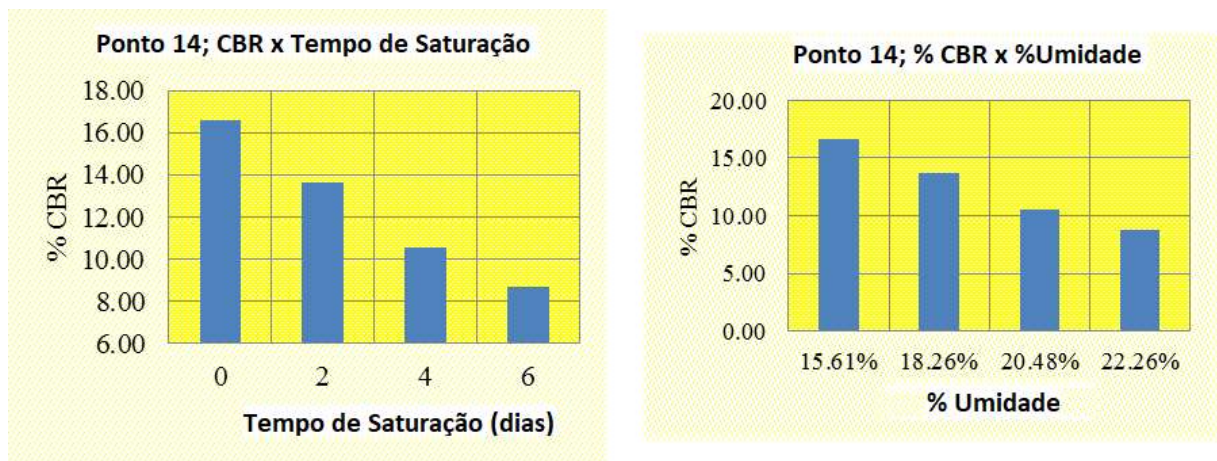


Gráfico 13 - %CBR de acordo com a variação do tempo de saturação e do teor de umidade para solo A-4

Fonte: adaptado de DASHO e VERNA (2019)

Foi evidenciado também, conforme demonstrado no Gráfico 14 que o efeito do tempo de saturação no CBR é o mesmo para outros tipos de solo (finos e grossos) variando apenas a proporção e seu efeito de acordo com o tempo.

Os autores acrescentaram que para solos mais grossos do tipo A-2-4, o efeito da redução do CBR é maior no início da saturação e para solos finos o efeito é progressivo ao longo do tempo.

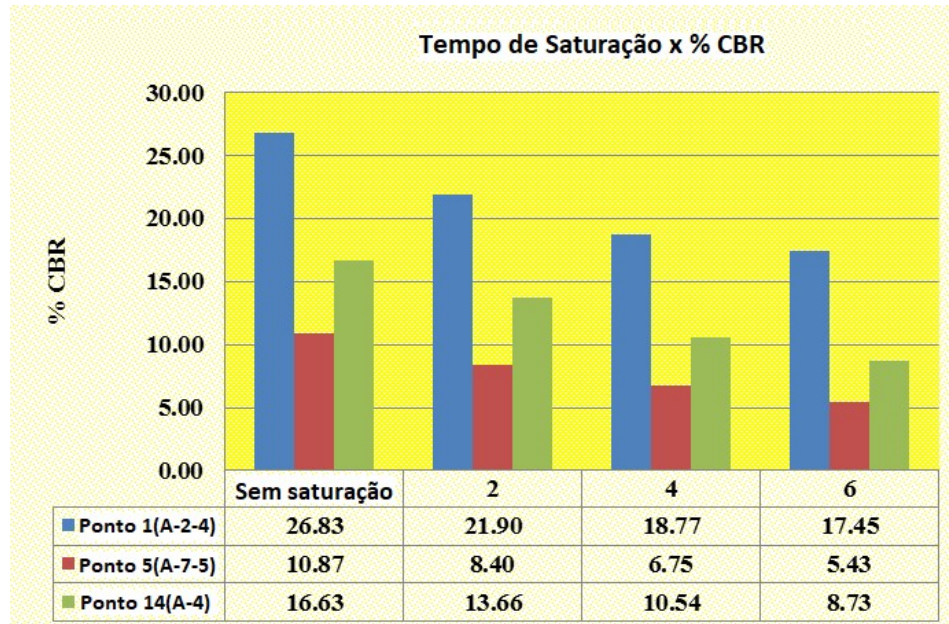


Gráfico 14 - %CBR de acordo com a variação do tempo de saturação para diferentes tipos de solo

Fonte: adaptado de DASHO e VERNA (2019)

SABRI (2015) também contribuiu para o estudo do impacto do teor de umidade na resistência do subleito através do ensaio de CBR. A autora seguiu o estabelecido na norma ASTM (1962) e submeteu 10 tipos de solo coletados em rodovia do Sri Lanka ao ensaio de CBR variando a saturação de 0 a 4 dias.

Os resultados, apresentados no Gráfico 15 e no Gráfico 16, confirmam aqueles obtidos nos outros dois estudos citados anteriormente. O aumento do tempo de saturação incrementa o teor de umidade do solo gradativamente e prejudica sua resistência. A partir da construção do gráfico e identificação do modelo estatístico mais adequado ao comportamento de cada amostra, é possível prever a resistência do subleito uma vez conhecido o teor de umidade do solo.

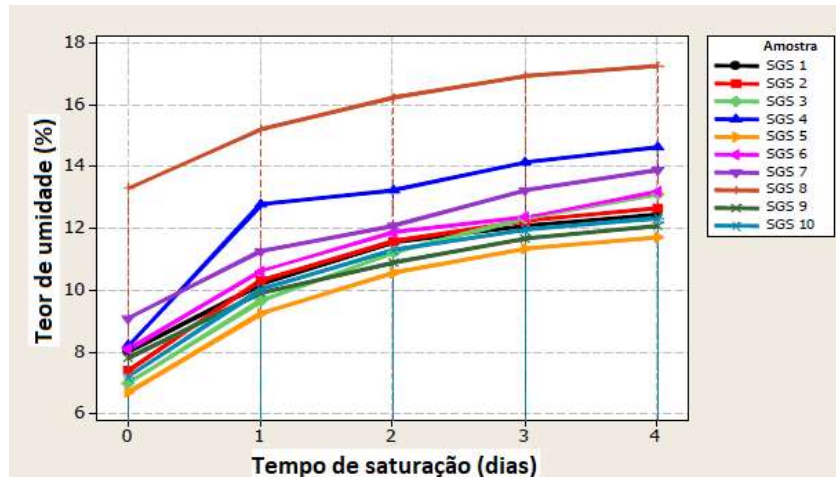


Gráfico 15 - Teor de umidade de acordo com a variação do tempo de saturação

Fonte: adaptado de SABRI (2015)

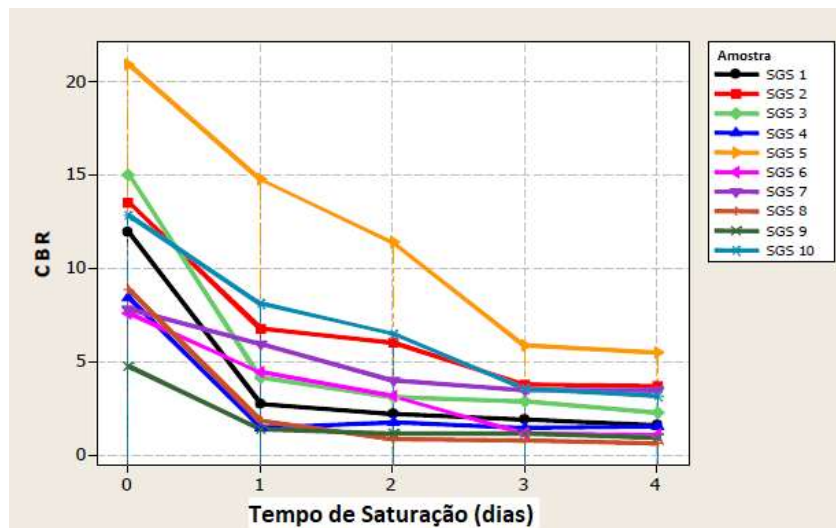


Gráfico 16 - %CBR de acordo com a variação do tempo de saturação

Fonte: adaptado de SABRI (2015)

4.3 Método de pesquisa

O estudo de caso foi conduzido através das etapas que serão detalhadas a seguir.

4.3.1 Avaliação pedológica do trecho

O primeiro passo do estudo foi a avaliação pedológica do corredor Centro-Sudeste Paulista. A Figura 15 permite verificar que o trecho ferroviário compreendido de Paulínia (região metropolitana de Campinas) a Uberaba (MG) passando por Ribeirão Preto destacado em vermelho é constituído em sua grande parte por Latossolos.

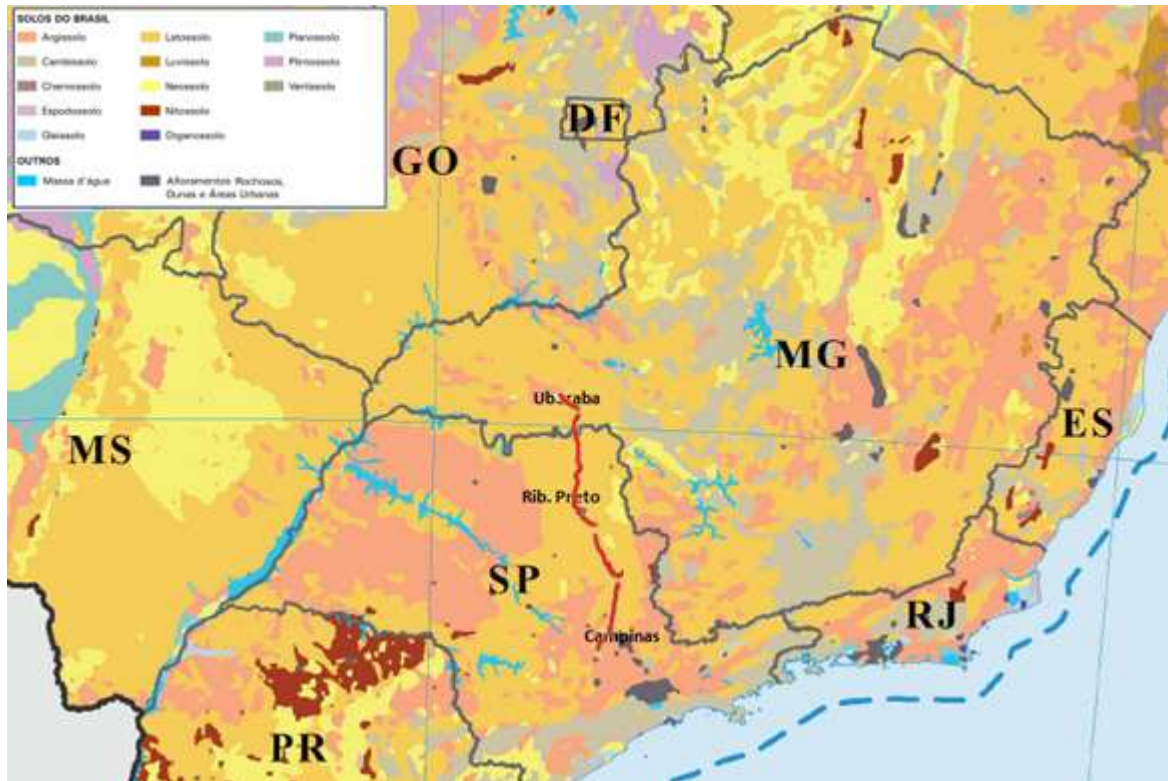


Figura 15 - Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil

Fonte: Adaptado de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Segundo o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC, 1999) os latossolos são formações de intemperismo avançado de cor variando entre vermelho e amarelo, e granulometria média a fina. Os de granulometria fina possuem característica argilosa, baixa permeabilidade, média absorção de água e elevada resiliência em condições ótimas de umidade. Os de granulometria média possuem característica arenosa com alta permeabilidade, baixa retenção de água, baixa coesão e maior susceptibilidade à erosão.

4.3.2 Determinação dos ensaios a serem realizados

Tendo sido identificado o tipo de solo predominante foram definidos os ensaios para avaliação das suas características em laboratório e propriedades no campo conforme será detalhado a seguir.

4.3.2.1 Ensaios de laboratório

Os seguintes ensaios foram selecionados para realização em laboratório:

- Densidade real dos grãos pelo método do picnômetro conforme norma DNER-084/95 - Picnômetro Aquecido para cálculo do índice de vazios, saturação e porosidade do solo;
- Granulometria por peneiramento conforme DNER-ME 080-94 e granulometria por sedimentação seguindo DNER-ME 051-94 para classificar o solo;
- Limites de consistência estabelecidos na ABNT NBR 7180:2016 e ABNT NBR 6459:2016 Versão Corrigida:2017 para entender o comportamento do solo em função da umidade;
- Compactação descrito na norma do DNER-ME 47 94 para identificação da umidade ótima e massa específica seca máxima e posterior cálculo do grau de compactação da camada;
- Triaxial de cargas repetidas especificado pela norma DNIT 181/2018 – ME para identificação do Módulo de Resiliência do solo na umidade ótima.

4.3.2.2 *Ensaio de campo*

Os trabalhos de campo contemplaram a mobilização de uma equipe para realização dos seguintes ensaios:

- LWD para determinação do módulo dinâmico da camada de lastro e topo do sublastro;
- DCP para determinação da resistência do subleito através do cálculo indireto do CBR;
- Frasco de areia para determinação da massa específica aparente do solo “in situ” e posterior cálculo do grau de compactação da camada;
- Speedy para determinação do teor de umidade em campo;
- Ground Penetration Radar (GPR) para avaliação das condições de contaminação do lastro, altura das camadas da plataforma e perfil de umidade.

4.3.3 *Determinação dos locais para ensaios de campo*

O trecho do Corredor Centro-Sudeste Paulista, entre os municípios de Paulínia e Uberaba foi subdividido em três segmentos visando permitir a implementação de melhorias nos estudos de campo subsequentes a partir das análises de laboratório e modelagem anteriores:

- Segmento 1: compreendido entre Paulínia-SP e Cravinhos-SP com extensão de aproximadamente 250 quilômetros conforme pode ser observado na Figura 16;

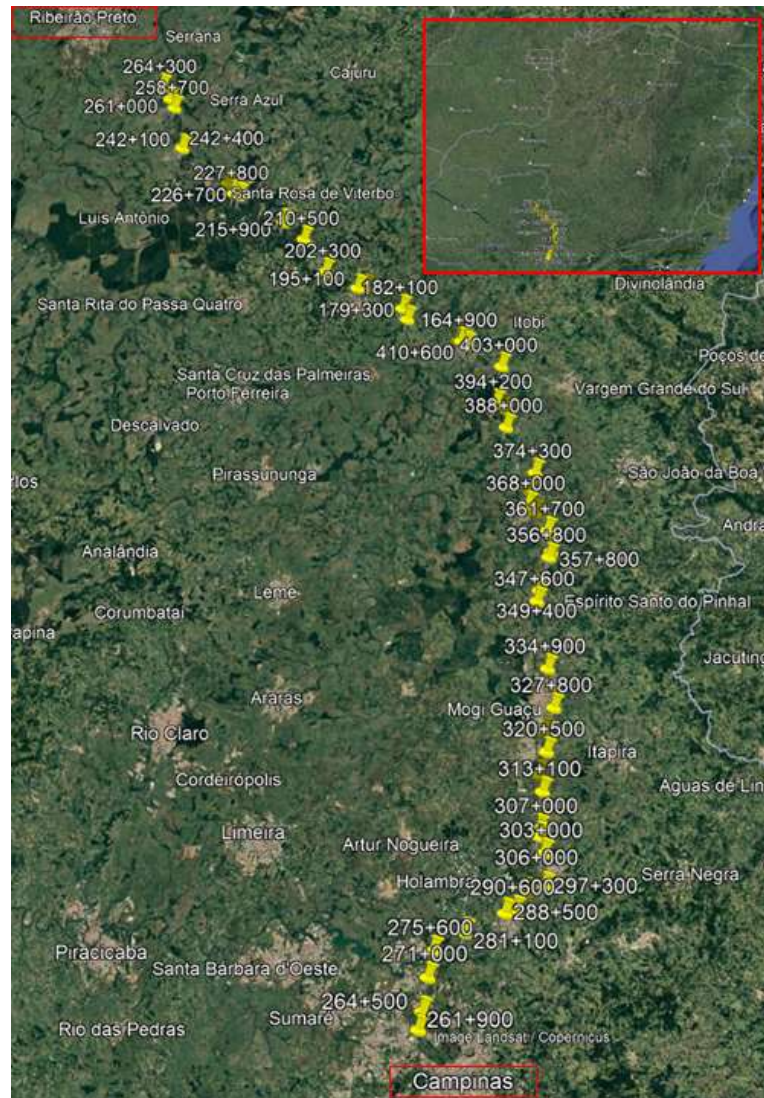


Figura 16 - Segmento 1

- Segmento 2: compreendido entre Cravinhos-SP e Ituverava-SP com extensão de aproximadamente 150 quilômetros apresentados na Figura 17;

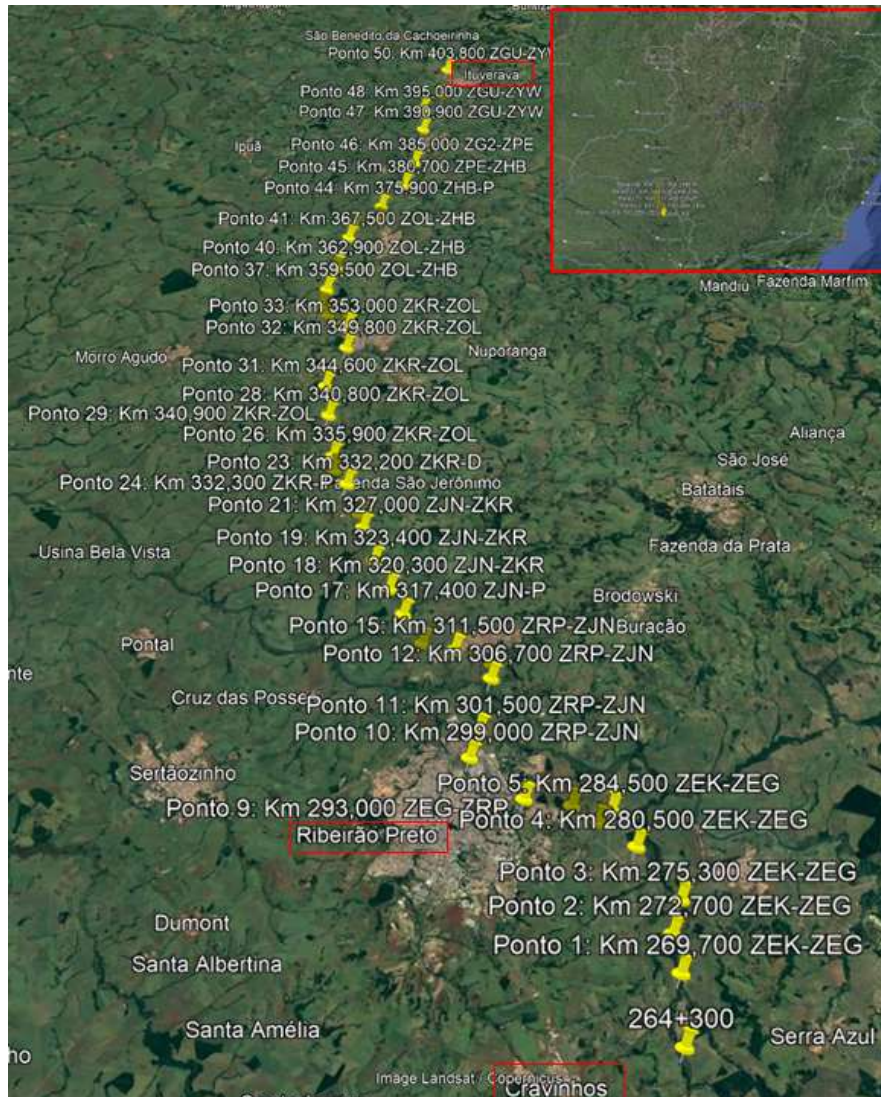


Figura 17 - Segmento 2

- Segmento 3: compreendido entre Ituverava-SP e Irara-MG com extensão de aproximadamente 200 quilômetros representados na Figura 18.

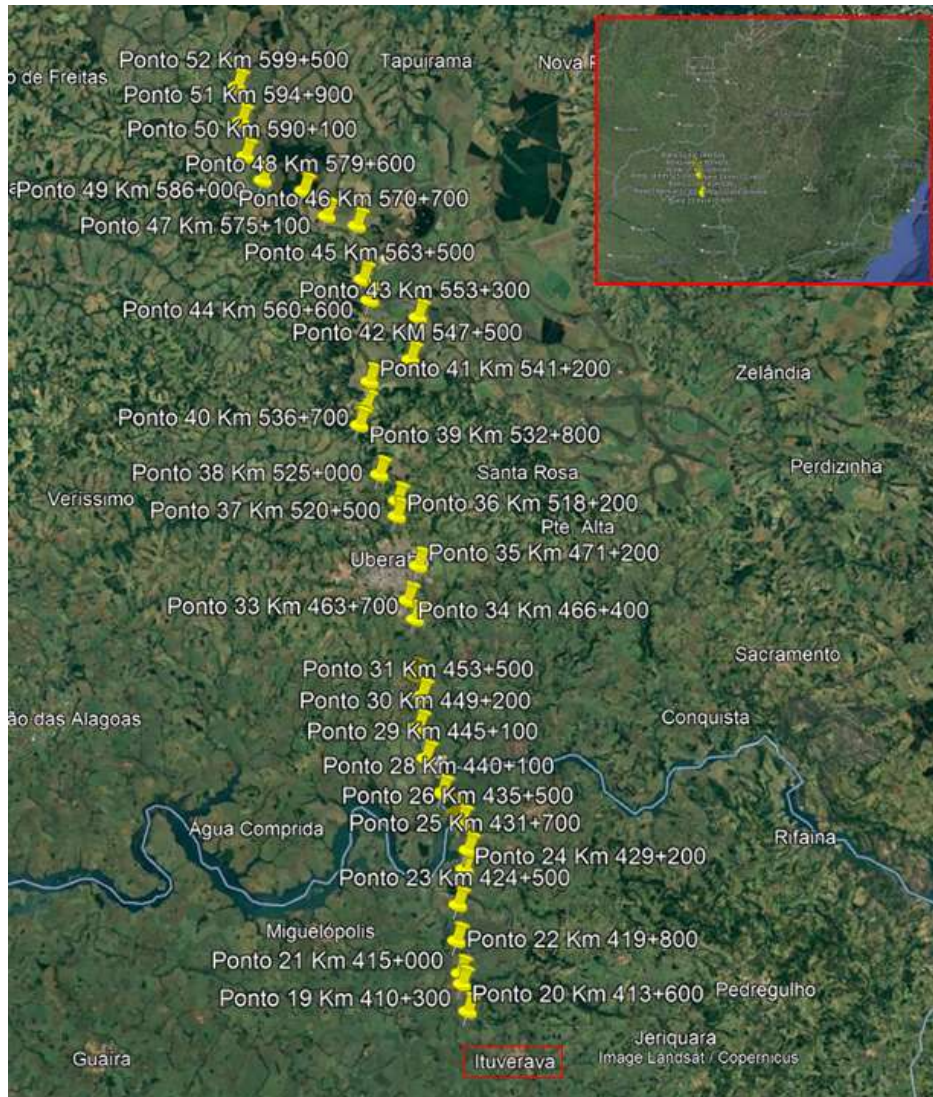


Figura 18 - Segmento 3

Os pontos priorizados para investigação de campo e laboratório foram definidos com base no histórico de defeitos. A quantidade e distribuição de defeitos ao longo da via e dos pontos selecionados para estudo organizados por pares de Estação seguem relacionados no Gráfico 17, Gráfico 18 e Gráfico 19.

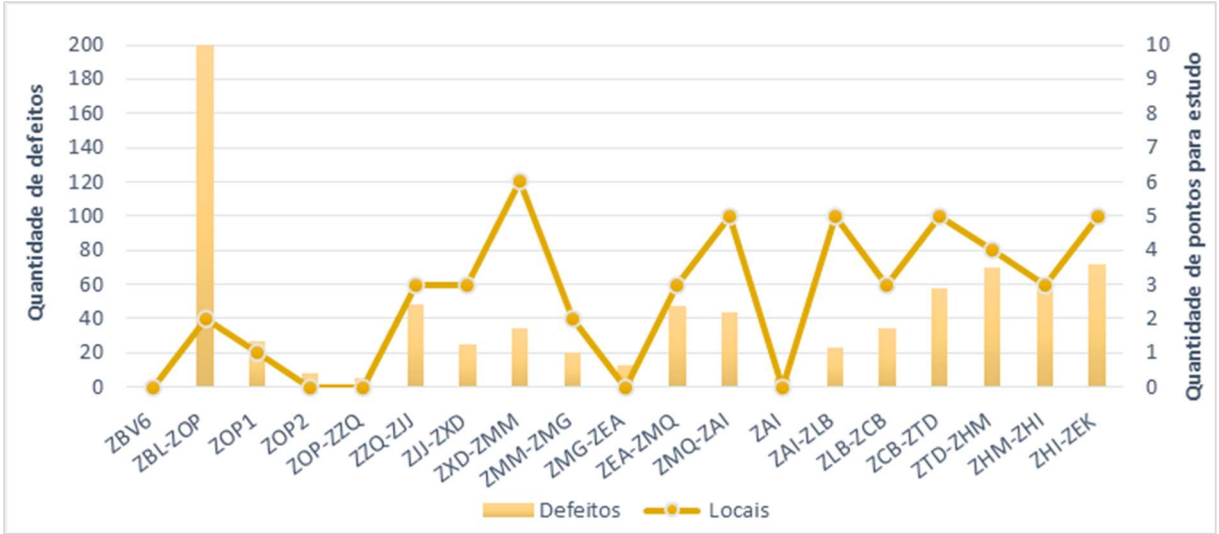


Gráfico 17 - Quantidade de defeitos motivo trilho/solda quebrada e desnivelamento/torção no período de 2013 a 2020 ao longo do Segmento 1 do Corredor Centro-Sudeste Paulista

Fonte: Adaptado de SMV (2020)

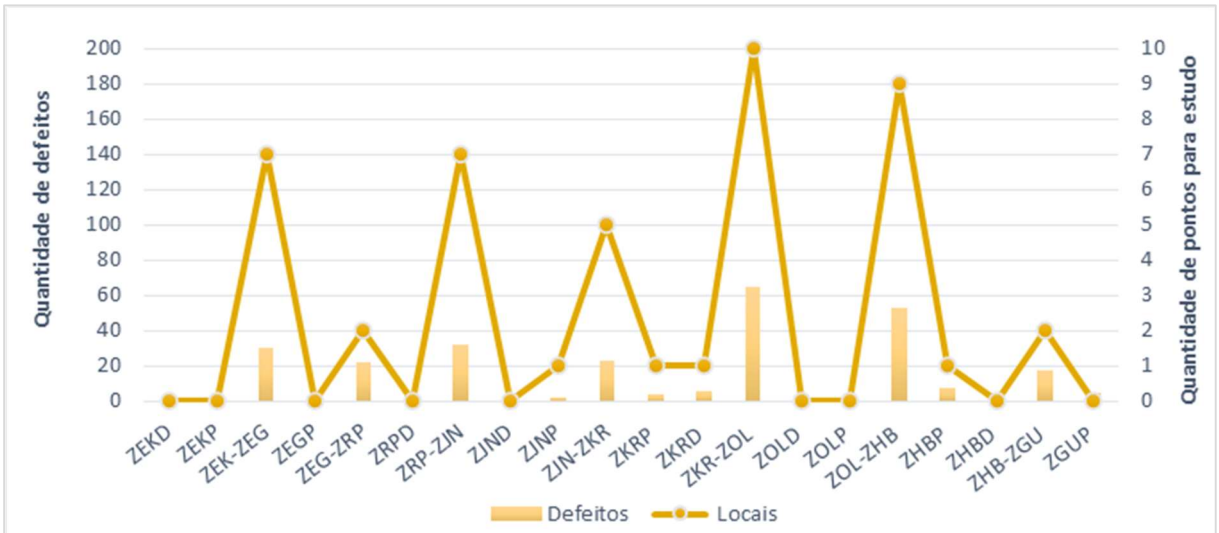


Gráfico 18 - Quantidade de defeitos motivo trilho/solda quebrada e desnivelamento/torção no período de 2013 a 2020 ao longo do Segmento 2 do Corredor Centro-Sudeste Paulista

Fonte: Adaptado de SMV (2020)

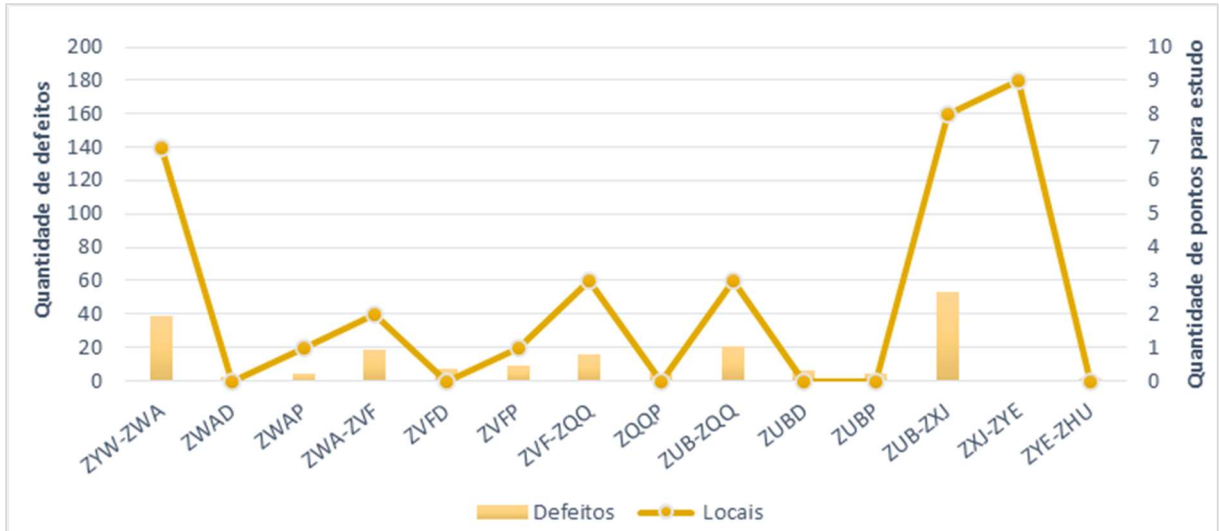


Gráfico 19 - Quantidade de defeitos motivo trilho/solda quebrada e desnivelamento/torção no período de 2013 a 2020 ao longo do Segmento 3 do Corredor Centro-Sudeste Paulista

Fonte: Adaptado de SMV (2020)

4.3.4 Realização dos trabalhos de campo e amostragem

Os trabalhos de campo contemplaram a mobilização de duas equipes para a realização dos ensaios citados anteriormente dentro do prazo de 30 dias em cada segmento.

Os ensaios de LWD foram realizados na interface dormente-lastro e no topo do sublastro. A Figura 19 demonstra alguns passos da atividade. Conforme descrito anteriormente o ensaio de LWD permite a medição das deflexões da camada e, a partir de correlações, o cálculo do módulo dinâmico.



Figura 19 - Ensaio LWD

Fonte: Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos (COPPETEC, 2018)

O ensaio de DCP para obtenção indireta do índice CBR foi realizado na superfície do sublastro. A Figura 20 ilustra o procedimento utilizado.



Figura 20 - Ensaio DCP

Fonte: COPPETEC (2018)

Para determinação da massa específica aparente do solo *in situ* é recomendado o ensaio do frasco de areia definido em norma ABNT-7185 (2016). O ensaio de frasco de areia foi realizado na mesma cava do ensaio de DCP. A Figura 21 apresenta as etapas do ensaio.

O ensaio consiste em comparar o peso do solo em estudo escavado de uma cavidade cilíndrica com profundidade de 15 cm com o peso de uma areia previamente conhecida. Tendo os pesos (areia e solo) que ocupam o mesmo volume (da cavidade) e a umidade do solo escavado em campo é possível calcular a massa específica aparente seca do solo em estudo.

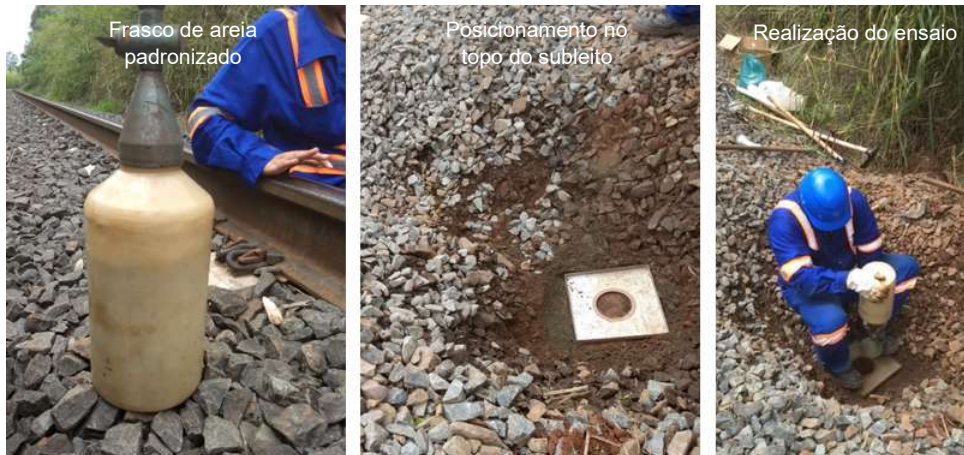


Figura 21 - Ensaio Frasco de Areia

Fonte: COPPETEC (2018)

Utilizando a amostra escavada foi determinada a umidade do solo em campo através do ensaio do *Speedy* ou Umidímetro conforme detalhado na Figura 22. Esse ensaio utiliza um aparelho constituído de uma câmara e um manômetro cujo teor de umidade é determinado pela pressão do gás resultante da reação da água contida na amostra com o carbureto de cálcio que se introduz no aparelho (NBR-16097, 2012).



Figura 22 - Ensaio Speedy

Fonte: COPPETEC (2018)

4.3.5 Realização dos ensaios de laboratório

As amostras coletadas em campo foram identificadas e embaladas hermeticamente para serem transportadas ao laboratório do Instituto Militar de Engenharia. Foram realizados ensaios de caracterização, limites de consistência, compactação e triaxial de cargas repetidas.

A análise granulométrica, realizada através do peneiramento e sedimentação, é um ensaio previsto em norma NBR-7181 importante para a classificação do tipo de solo em função das dimensões dos grãos que o compõem.

O peneiramento consiste na passagem de uma determinada amostra de solo previamente preparada (seca ao ar ou em estufa, destorroada e quarteada) e com peso conhecido em um conjunto sequencial de peneiras com aberturas nominais diferentes, em milímetros, para determinação do % retido em cada uma delas. O peneiramento é dividido em grosso (50 mm; 38 mm; 25 mm; 19 mm; 9,5 mm; 4,8 mm) e fino (peneiras de 1,2 mm; 0,6 mm; 0,42 mm; 0,25 mm; 0,15 mm; e 0,075 mm). Tendo sido concluído o processo, devem ser calculados os % de materiais que passam em cada peneira.

A sedimentação é realizada para solos com grãos menores que a abertura da peneira de 0,0075 mm e consiste na diluição do material fino do solo (passante na peneira 2,0 mm) em água e defloculante, inserção do densímetro na solução e o registro das leituras no densímetro conforme norma. A partir das leituras é realizado o cálculo do percentual de solo em suspensão no momento da leitura, diâmetro máximo das partículas em suspensão e percentual de material para cada diâmetro.

De posse das informações de peneiramento e sedimentação é possível construir a curva granulométrica e classificar o solo. A Figura 23 abaixo mostra alguns sistemas de classificação.

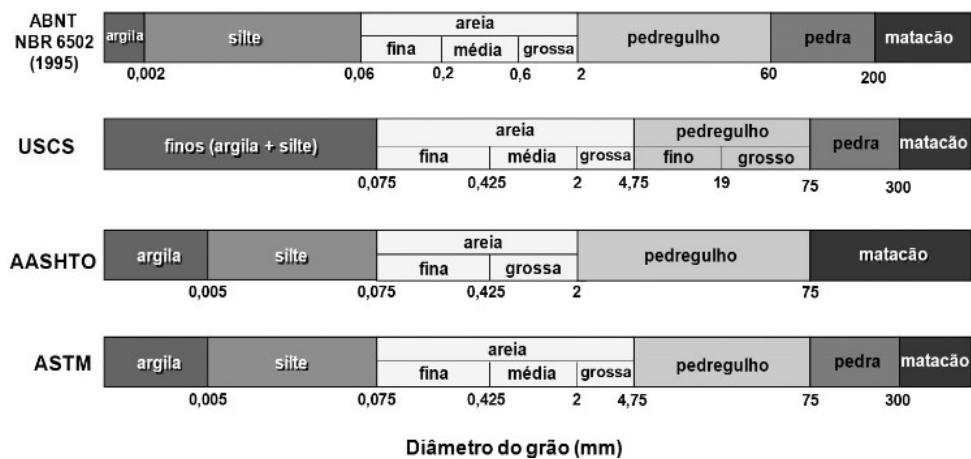


Figura 23 - Sistemas de Classificação dos solos pela granulometria

Fonte: <http://www.suportesolos.com.br/blog/analise-granulometrica-do-solo-ensaios-geotecnicos-o-objetivo-e-as-fracoes-de-solo/71/>

Outra metodologia de classificação utilizada no Brasil para solos tropicais é denominada Miniatura Compactado Tropical (MCT). Criada por NOGAMI e VILLIBOR (1981) a metodologia usa os dados obtidos nos ensaios de Mini-MCV e Perda Por Imersão para suprir a possível falha das demais quanto à classificação dos solos lateríticos como sendo saprolíticos conferindo-os comportamento inferior ao real. VIANA (2007) define os solos lateríticos como aqueles que na fração argila possuem minerais do grupo caolinita e óxidos hidratados com ferro ou alumínio tornando sua estrutura altamente estável.

Segundo a MCT os solos são distribuídos em dois grandes grupos: lateríticos (L) e não lateríticos (N). Associadas a esses dois agrupamentos são atribuídas as características de coesão e tipo de material chegando a sete classificações possíveis: LA (areia laterítica), LA' (laterítico arenoso), NA (areia não laterítica), NA' (não laterítico arenoso), LG' (laterítico argiloso), NG' (não laterítico argiloso), NS' (não laterítico siltoso).

O valor da massa específica aparente seca máxima é obtido pelo ensaio de compactação realizado em laboratório conforme norma NBR-7182. O ensaio consiste em confeccionar corpos de prova padronizados variando a umidade e traçar curva de compactação. Associado à massa específica aparente seca máxima do solo ter-se-á o teor de umidade ótima.

O grau de compactação do solo pode ser determinado pelo método de Hilf estabelecido no procedimento MB-3443 como sendo a relação entre a massa

específica aparente seca do solo compactado obtida no ensaio de frasco de areia e a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação.

4.3.6 Realização da modelagem computacional

O software Structural Analysis of Train Loads in Railways (SYSTRAIN) utilizado para análise do comportamento estrutural da plataforma foi desenvolvido por José Carlos Filho, Antônio Carlos Rodrigues Guimarães e Gabriel de Carvalho Nascimento. A partir do método dos elementos finitos são analisadas as tensões e deformações do pavimento ferroviário no topo do trilho e subleito.

A interface do software é amigável e através da barra de menus é possível configurar os materiais, as camadas do pavimento e a composição das cargas conforme pode ser observado na Figura 24.

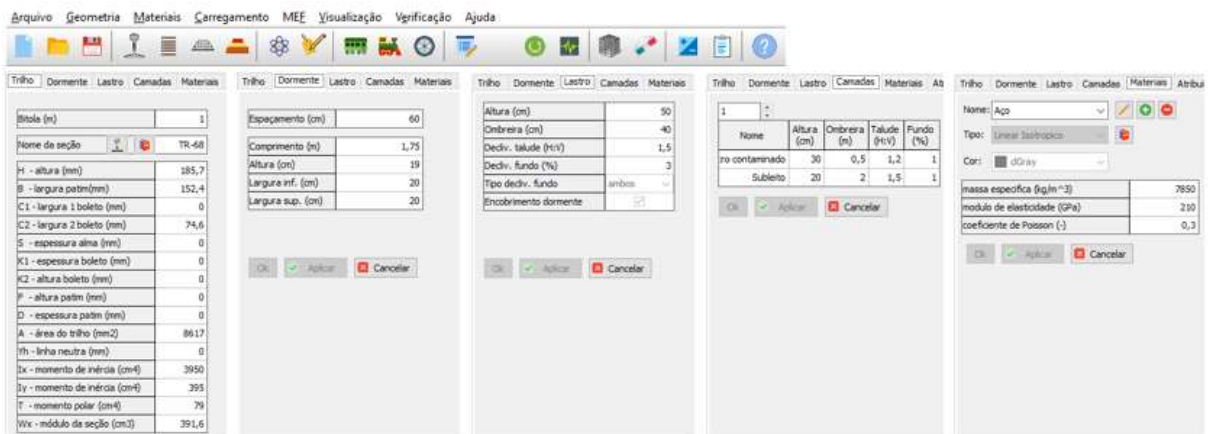


Figura 24 - Interface do SYSTRAIN para configuração dos materiais

Fonte: Adaptado de SYSTRAIN

Durante a configuração dos parâmetros e inserção dos dados de entrada é possível visualizar o pavimento e a localização das cargas conforme demonstrado na Figura 25.

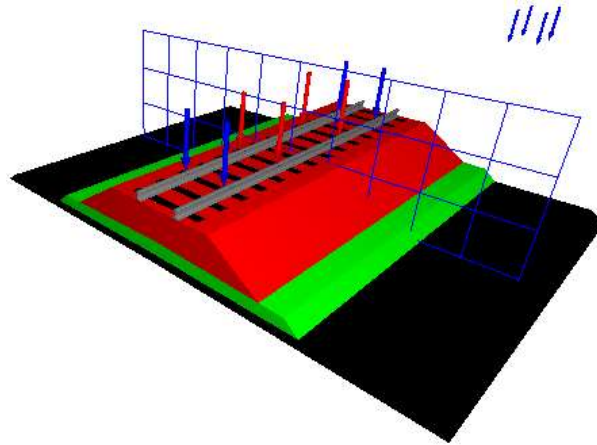


Figura 25 - Modelo de pavimento no SYSTRAIN

Fonte: SYSTRAIN

Para cálculo das tensões admissíveis em subleito ferroviário foi utilizada a equação de Yoder e Witczk (1975) para CBR de até 20% obtido por correlação conforme citado no item 4.2.2.2 Efeito da umidade no índice de Suporte Califórnia (CBR).

$$\sigma_{adm} = 3,87 * CBR^{1,5}$$

Quando o valor do CBR alcançou valores acima de 20% foi utilizada equação originada do ensaio de CBR conforme citado por RANGEL (2017).

$$\sigma_{adm} = 6,9 * CBR$$

4.3.7 Investigação com GPR

O sistema utilizado para inspeção não destrutiva do segmento de via em estudo foi o GPR GSSI SIR-30 com três antenas GSSI de 400MHz que permitem capturar informações na velocidade máxima autorizada em até 2,4 metros de profundidade de acordo com as propriedades das camadas.

As três antenas instaladas a uma altura aproximada de 30 centímetros do topo do dormente transmitem pulsos elétricos de alta frequência ao terreno e capturam o sinal refletido enviando-o para uma unidade de armazenamento. Posteriormente esses sinais são interpretados para identificar diferentes litologias subsuperficiais. A Figura 26 apresenta de forma esquemática um modelo de sistema ferroviário de medição por GPR.

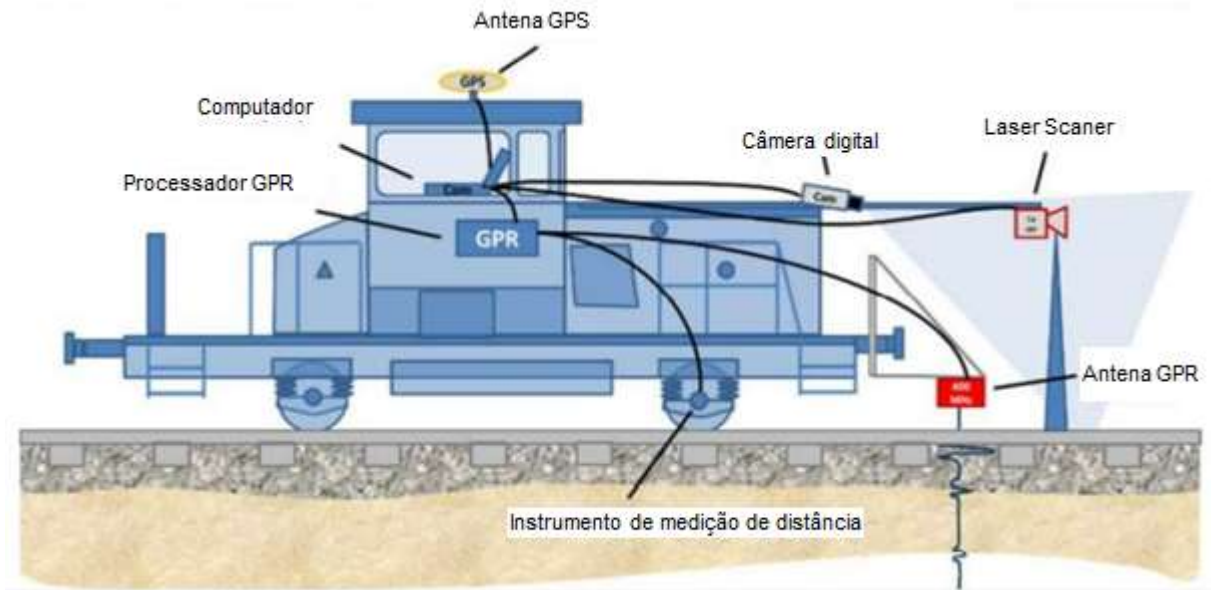


Figura 26 - Sistema ferroviário de medição da Loram

Fonte: Adaptado de Loram

Através dessa tecnologia, é possível identificar a espessura das camadas da plataforma ferroviária de forma contínua em toda a extensão inspecionada, o grau de contaminação do lastro, a classificação da camada de subleito (granular, rocha, solo), o índice de umidade relativa nas camadas granulares, e a presença de defeitos como o bombeamento de finos, desnivelamentos e bolsões.

Antenas de *Global Positioning System* (GPS) e um *encoder* ótico para medição da distância conectado ao eixo do veículo ferroviário são utilizados para controlar a coleta de dados. Adicionalmente podem ser utilizados o *laser scanner* (*Lidar*) para geração de nuvem de pontos e câmera para gravação de vídeos e/ou registro fotográfico ao longo da inspeção. A nuvem de pontos, dependendo das condições do local e da resolução, pode permitir a avaliação do gabarito ferroviário, a identificação da condição de obstrução dos sistemas de drenagem superficial, cálculo dos volumes excedentes e deficientes de lastro, dentre outros. A obtenção de vídeos e/ou fotografias permite a visualização real da condição em campo detectadas e apresentadas nos relatórios de inspeção.

A calibração do grau de contaminação do lastro fornecido pelo GPR é realizada a partir da coleta de amostras de lastro abaixo do dormente na região de assentamento dos trilhos, e realização de ensaios em laboratório para classificação dos solos, classificação granulométrica, limites de Atterberg e cálculo do *Fouling Index*. A *Figura 27* e a *Figura 28* apresentam imagens de alguns locais em uma ferrovia fora do Brasil onde foram removidas amostras para essa calibração. Através das imagens é possível observar adicionalmente, as medições realizadas nas espessuras das camadas para calibrar essa outra saída do sistema.

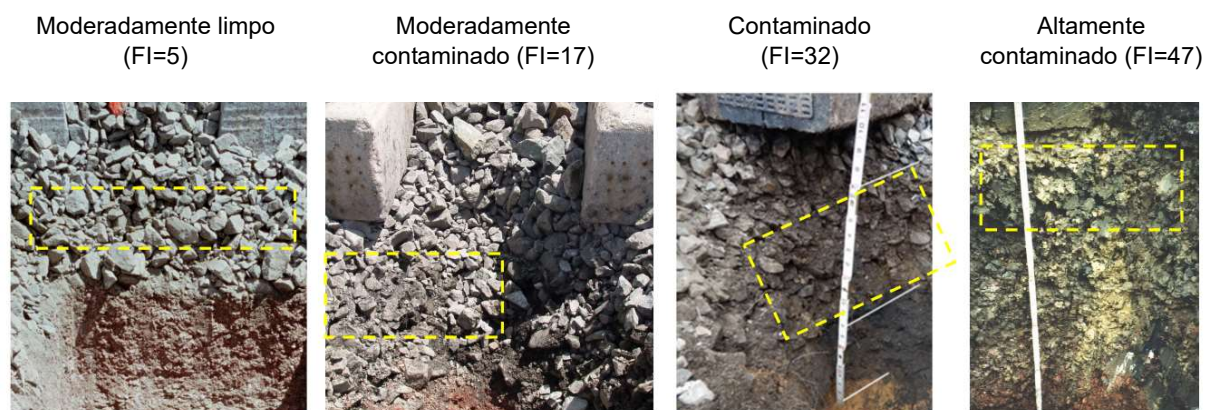


Figura 27 – Exemplos de calibração do grau de contaminação (*Fouling Index*)

Fonte: Adaptado de Loram



Figura 28 - Exemplo de calibração de altura de camadas

Fonte: Adaptado de Loram

A *Figura 29* apresenta alguns resultados comparativos entre medições de campo e medições do GPR da espessura da camada de lastro e sublastro em uma ferrovia fora do Brasil. É possível confirmar a alta precisão da metodologia empregada pela tecnologia do GPR.

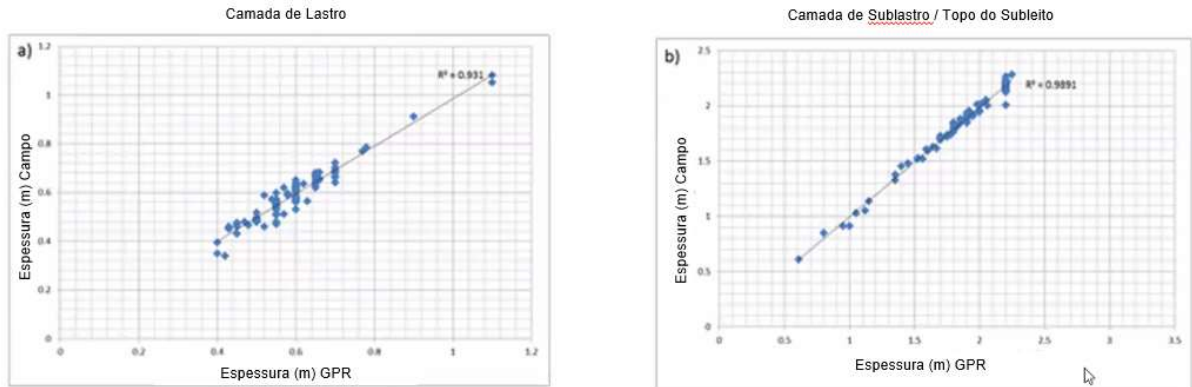


Figura 29 - Validação da acurácia da metodologia de identificação da espessura das camadas

Fonte: Adaptado de Loram

A Figura 30 apresenta o sistema de medição utilizado para investigação de plataforma ferroviária do trecho em estudo no período entre 14 e 16 de dezembro de 2021.



Figura 30 - Configuração do sistema de medição de plataforma ferroviária

Fonte: Autora

A Figura 31 apresenta um exemplo de saída a partir da inspeção realizada utilizando o GPR. A primeira barra em azul, na parte superior, sinaliza os quilômetros ferroviários que são calibrados a partir do registro do ponto de início e medições do GPR e encoder.

O primeiro gráfico, na parte superior, após os quilômetros ferroviários, contempla as espessuras das camadas de lastro, transição (sublastro, reforço ou outra), e o subleito. A identificação dessas camadas é realizada a partir do sinal obtido no retorno das ondas refletidas no terreno e considerando calibrações realizadas a partir de ensaios de laboratório em pesquisas específicas para esse fim. A visualização detalhada dessas informações permite ainda identificar a irregularidade do topo da camada de subleito podendo sugerir a existência de bolsões.

Abaixo do gráfico de camadas, é apresentado o gráfico com a diferença de altura da camada de lastro dos ombros esquerdo e direito em relação ao eixo da via. Essa informação é útil para identificação da deficiência ou excesso de lastro.

O terceiro bloco de informações apresenta em preto a média do *fouling index* e em azul, o range entre o mínimo e máximo valores encontrados. A partir dessas informações é possível identificar a variação do grau de contaminação do lastro entre eixo e ombros.

O quarto bloco apresenta o valor de contaminação do lastro, *fouling index*, para os ombros e eixo da via. Os dados são calculados pelo algoritmo e levam em consideração a presença de finos na camada do lastro identificada a partir dos sinais refletidos bem como as calibrações realizadas a partir de ensaios de laboratório em pesquisas específicas para esse fim.

O quinto bloco de dados apresenta a profundidade de contaminação do lastro. É possível, a partir dessa visualização, identificar a origem da contaminação (externa ou oriunda do subleito, por exemplo) e possíveis bombeamentos de finos.

O sexto bloco de informações apresenta a umidade relativa calculado a partir da maior ou menor susceptibilidade de retenção de água em virtude do grau de contaminação do lastro. É possível verificar também a profundidade desse perfil de umidade relativa.

O último bloco de dados contempla a identificação das estruturas existentes ao longo da via, como por exemplo AMV's, pontes, PN's, túneis, dentre outros.



Figura 31 – Exemplo de saída a partir da investigação com GPR

Fonte: Acervo VLI

O fluxograma da Figura 32 consolida as etapas da pesquisa descritas anteriormente para melhor entendimento.

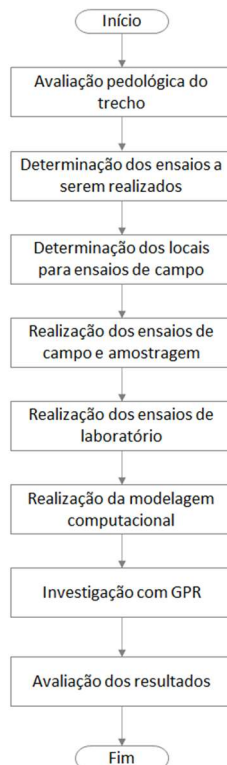


Figura 32 - Fluxograma de trabalho

Fonte: Autora

5- DISCUSSÕES E ANÁLISES

A malha ferroviária no segmento de Paulínia a Casa Branca é caracterizada pela presença de trilho TR-68, dormente monobloco de concreto ou aço e fixação do tipo *fast clip* na linha principal. A partir de Casa Branca até Cravinhos, a renovação de via não havia sido concluída no período do levantamento de campo e, portanto, os trilhos eram TR-50 e os dormentes eram de madeira com fixação do tipo *deenik* ou monobloco de concreto com fixação rígida. A Figura 33 apresenta o segmento citado.

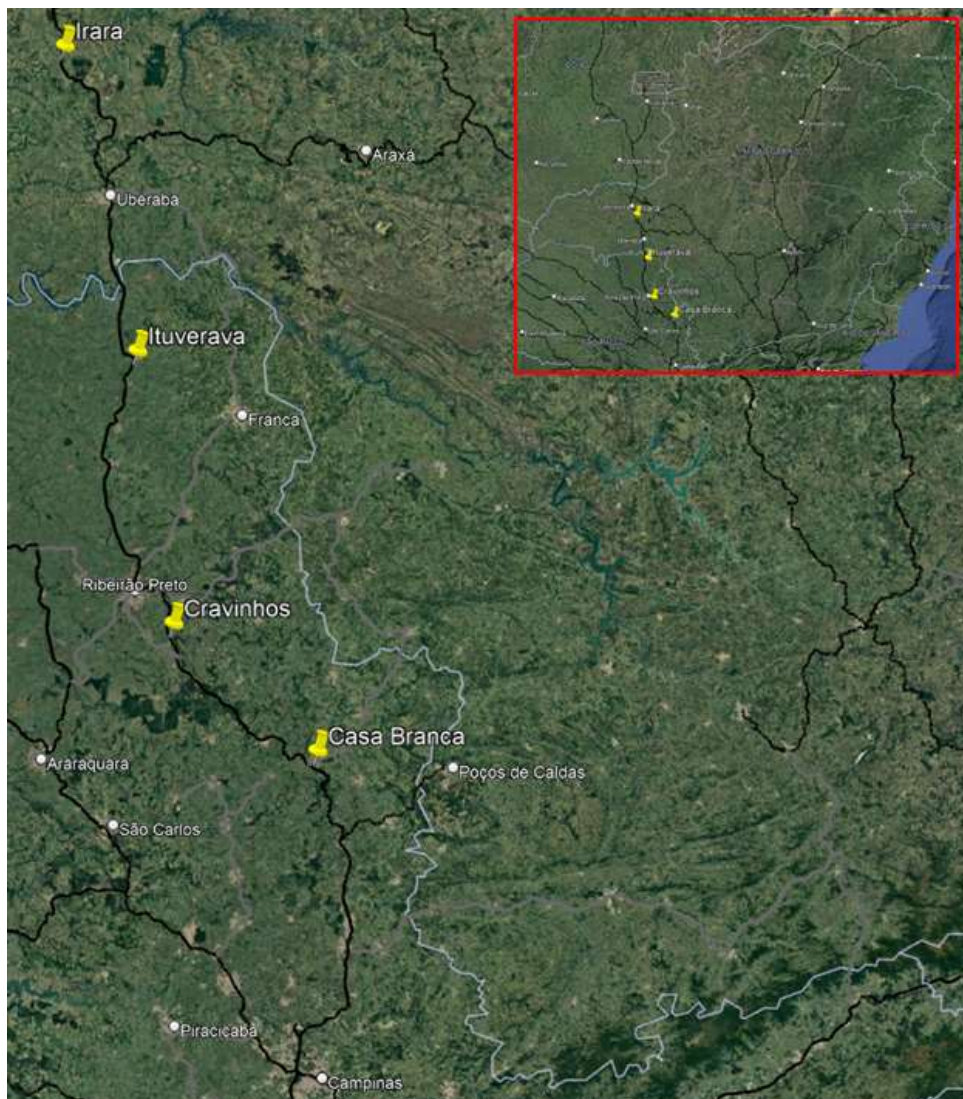


Figura 33 - Malha ferroviária Corredor Centro-Sudeste Paulista

5.1- Camadas do pavimento

A escavação do lastro para realização dos ensaios evidenciou existência de uma camada de lastro contaminado sobreposta por uma camada de lastro limpo em todos os pontos analisados conforme pode ser observado na Figura 34 e demonstrou que o lastro se encontrava em grande parte do segmento com altura superior a 60

centímetros eventualmente ultrapassando 1 metro, o que contribui muito para a instabilidade da plataforma. Os dados estão detalhados no Gráfico 20, Gráfico 21 e Gráfico 22.



Figura 34 - Altura do lastro e segmentação

Fonte: COPPETEC (2018)

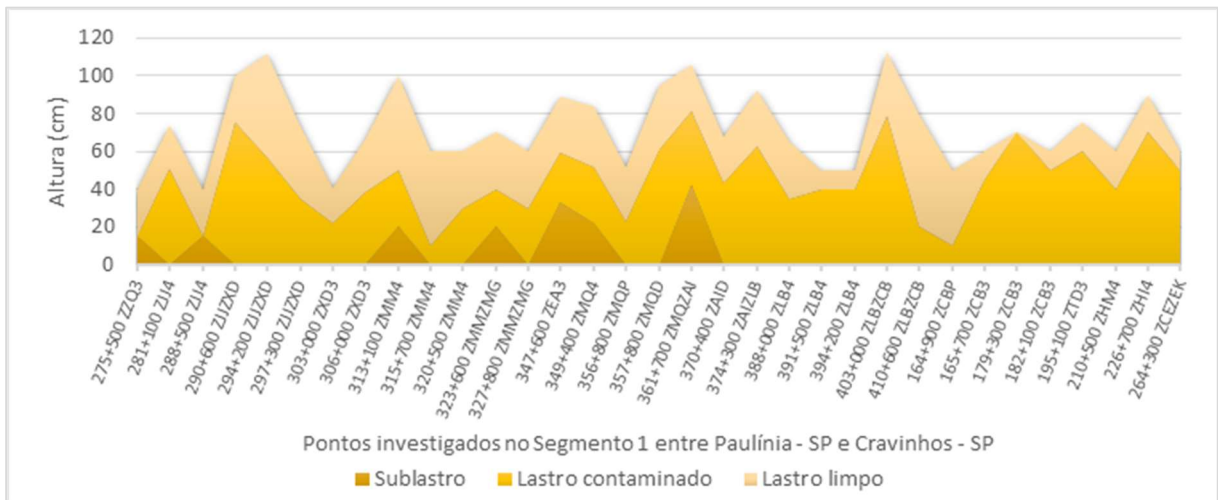


Gráfico 20 - Altura das camadas do segmento 1

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)

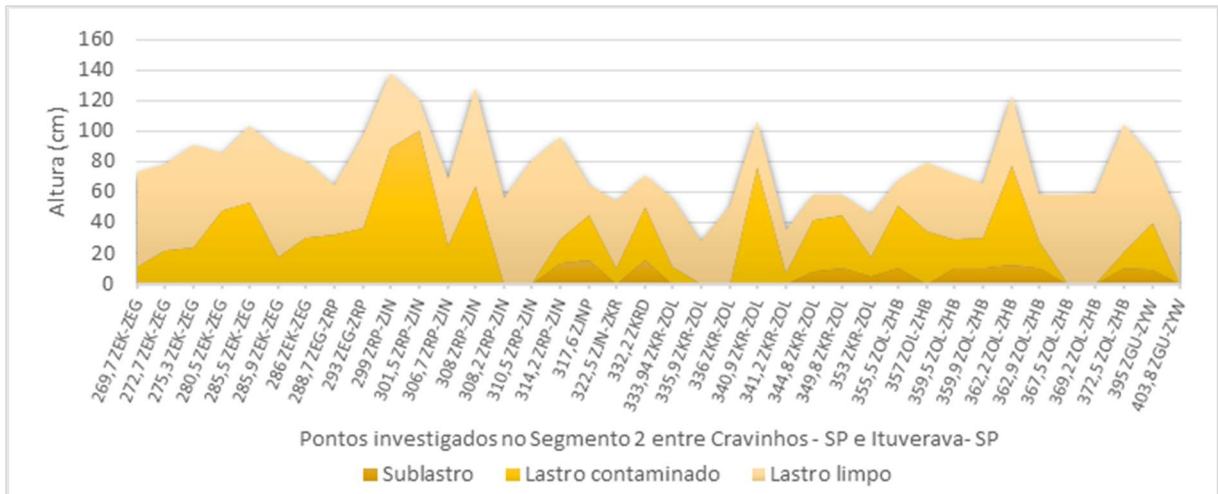


Gráfico 21 - Altura das camadas do segmento 2

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

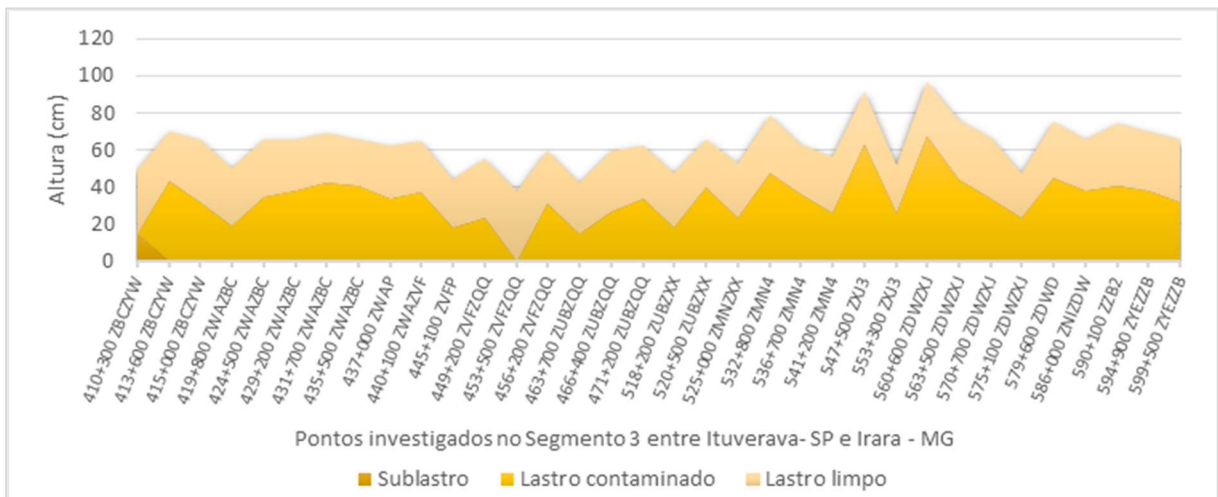


Gráfico 22 - Altura das camadas do segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

5.2- Grau de contaminação do lastro

Uma amostragem realizada em sete pontos para cálculo do *fouling index* a partir da análise granulométrica realizada em laboratório, apontou 28,6% dos pontos moderadamente contaminados, 57,1% dos pontos contaminados e 14,3% dos pontos altamente contaminados conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – *Fouling Index* calculado em laboratório

Local	FI	Classificação
195+100 ZTD3	34,00 (LE)	Lastro colmatado
179+300 ZCB3	17,22 (LE)	Lastro moderadamente colmatado
323+600 ZMMZMG	23,65 (LD)	Lastro colmatado

315+700 ZMM4	33,74 (LD)	Lastro colmatado
215+900 ZHM4	28,96	Lastro colmatado
165+500 ZCBP	56,30 (LE)	Lastro altamente colmatado
327+800 ZMMZMG	17,00 (LE)	Lastro moderadamente colmatado

Os dados de *Fouling Index* coletados pelo GPR, indicados a cada 5 m, seguem listados na *Tabela 8*. Foram utilizados, para efeito de comparação, valores das estacas com coordenadas mais próximas às indicadas na ficha de campo para cada um dos sete pontos.

Tabela 8 - *Fouling Index* obtido pelo GPR

Local	FI Esquerda	FI Centro	FI Direita
195+100 ZTD3	35,5	57,3	53,8
179+300 ZCB3	28,2	61,7	44,9
323+600 ZMMZMG	28,8	35,8	21,8
315+700 ZMM4	20,9	26,1	23,9
215+900 ZHM4	*	*	*
165+500 ZCBP	23,3	52,4	50,3
327+800 ZMMZMG	19,2	20,4	33,1

**Coordenadas indisponíveis inviabilizando identificação do FI através do GPR.

Pode-se observar, comparando-se a *Tabela 7* e a *Tabela 8*, que 4 dos 6 pontos onde foi possível realizar a comparação do *Fouling Index* (kms 195+100, 323+600, 315+700 e 327+800), a classificação do grau de contaminação do lastro pelos ensaios de laboratório foi a mesma da obtida pelo GPR demonstrando uma assertividade média de 66,67%.

Tal constatação retrata a metodologia de manutenção adotada com alteamento de via a partir da descarga de brita e socaria sem desguarnecimento conforme pode ser observado na *Figura 35*. É possível identificar acima do subleito, no km 323+600 ZMM-ZMG, a camada de sublastro não íntegra possuindo grãos de lastro interpenetrados. Acima da camada de sublastro, uma espessa camada de lastro contaminado sobreposta por uma camada de lastro limpo. Essa condição contribui para a degradação da via uma vez que conforme demonstrado por SCHMIDT et al. (2017), PAIVA et al. (2015) e TENNAKOON et al. (2012) afirmam que o aumento do teor de contaminação reduz a permeabilidade do lastro.

Outro efeito negativo da prática adotada de alteamento de via consiste no aumento da instabilidade da plataforma. A camada de lastro, com elevado índice de vazios, sofre deflexões para acomodação das partículas. Quanto mais alta a camada, maior o índice de vazios, e maior a deflexão. Adicionalmente, a maior altura de lastro sem o aumento da largura da plataforma contribuirá para a fuga de lastro, perda do ombro e redução do confinamento da superestrutura, fragilizando a via e aumentando a susceptibilidade de deslocamento lateral.



Figura 35 - Camadas do pavimento ferroviário no km 323+600 ZMM-ZMG

Fonte: COPPETEC (2018)

A análise por GPR em toda a extensão objeto desse estudo trouxe como valores médios de contaminação do lastro para cada segmento os resultados apresentados na Tabela 9. Os números para os ombros esquerdo e direito encontram-se no grau contaminado segundo SELIG e WATERS (1994). O eixo dos três

segmentos, com valores acima de 40% podem ser classificados segundo a metodologia como altamente contaminados.

Tabela 9 - *Fouling Index* médio estimado a partir do GPR

Segmento	FI Esquerda	FI Eixo	FI Direita
1	34,4	56,7	37,5
2	32,9	53,3	34,4
3	27,2	50,3	30,3

A Figura 36 demonstra, para aproximadamente 400m de via, os resultados de contaminação do lastro no eixo e ombros, a profundidade estimada de contaminação e o perfil de umidade obtidos a partir do GPR. Percebe-se que nesse segmento o grau de contaminação é elevado, acima de 25%, principalmente no eixo da via. Entre os quilômetros 192,380 e 192,600 a contaminação, proveniente do subleito, atinge seu grau mais alto e alcança a superfície do lastro gerando o bombeamento de finos. Essa condição compromete a permeabilidade do lastro e favorece a retenção de água na plataforma incrementando o teor de umidade do solo.

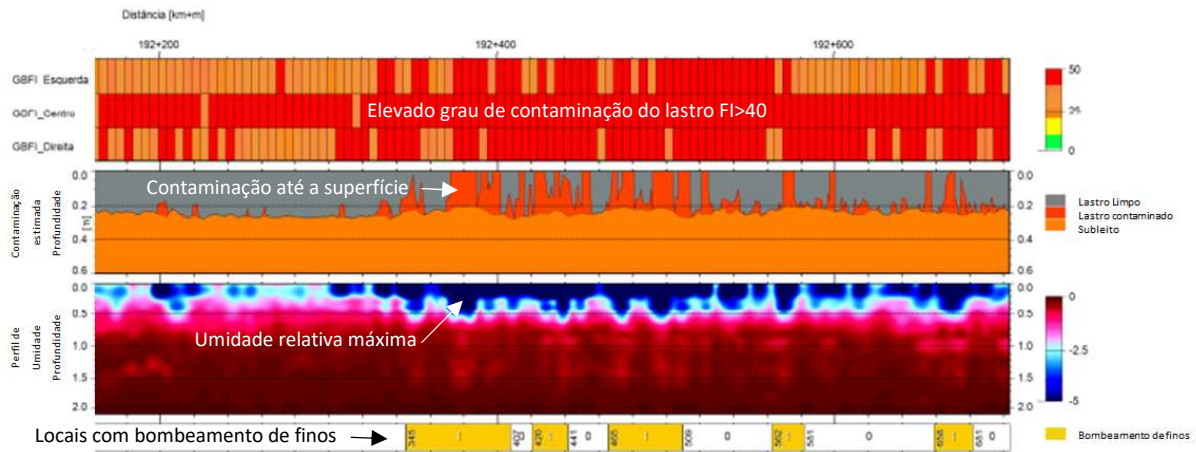


Figura 36 - Grau de contaminação do lastro, profundidade de contaminação e umidade

Fonte: Adaptado de Loram (2022)

A condição de umidade relativa, calculada a partir do topo do dormente até a profundidade média de 2,0 m, indica em uma escala entre 0 e -5, a maior ou menor susceptibilidade à presença de umidade. A partir da Figura 36 é possível observar que, no segmento em análise, o perfil de umidade atinge seu nível máximo nas regiões onde há maior contaminação gerando maior susceptibilidade à saturação do solo e conseqüentemente perda da capacidade de suporte.

Adicionalmente ao índice de umidade, os dados de GPR permitem estimar a profundidade média de retenção da água para todo o trecho investigado. A Tabela 10 apresenta a média por segmento e demonstra que a água pluvial tende a ficar retida nos 20 cm a partir do topo do dormente, o que nos leva a confirmar que nessas condições o lastro não possui mais sua capacidade drenante.

Tabela 10 - Profundidade média de retenção de umidade

Segmento	Profundidade média (cm)
1	20,4
2	20,0
3	18,8

O Gráfico 23, o Gráfico 24 e o Gráfico 25 ilustram, para os três segmentos, os valores de MR do lastro obtidos a partir do LWD (ELWD) e considerando fator de correlação igual a 2,45 conforme comentado anteriormente para uniformizar as medidas de rigidez das camadas.

5.3- Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência característico do lastro pode variar conforme sua rocha de origem e outras propriedades como granulometria, forma, litologia, densidade, textura da superfície, dentre outras. NALSUND (2014) analisou diversas amostras de lastro em laboratório através do ensaio triaxial de cargas repetidas e obteve valores de Módulo de Resiliência para a condição seca conforme Tabela 11. Os valores foram obtidos ao final de cada etapa de teste, que considerou um milhão de ciclos de carregamento. Os ensaios foram realizados com a tensão axial máxima dinâmica de 250KPa, correspondente a aproximadamente 250 KN por eixo a uma taxa cíclica de 5Hz. A tensão de confinamento adotada foi de 60KPa.

Tabela 11 - Módulo de Resiliência em condição seca (MPa)

	Lørenskog (milonita, gnaisse, gabbro)	Vassfjell (meta- gabbro, cataclástica)	Freste (monzonita)	Meraftåsen (greenstone)	Lauvåsen (arenito, argilito)	Aplitt (cataclástica, granito)	Rombak (quartzo, biotita, gnaisse, xisto)	Steinkjer (arenito, quartzito)	Sefrivatn (granito, gnaisse)
Etapa 1	616	568	534	514	436	371	356	301	282
Etapa 2	627	566	506	481	492	384	389	313	289
Etapa 3	630	623	548	466	536	393	381	324	398
Etapa 4	579	530	519	493	451	386	347	326	260

Fonte: NALSUND (2014)

Utilizando o menor valor encontrado de 260 MPa como referência conclui-se que os dados obtidos em campo através do LWD, em sua maioria, estão abaixo do desejável em todos os segmentos podendo provocar maiores deflexões quando da circulação dos trens e aumento o risco operacional. Dos 124 locais ensaiados, apenas 2 apresentaram resultado já considerando o fator de conversão superior ao valor de referência. A média dos resultados atingiu 91,6, 88,6 e 103 MPa e a mediana 80,7, 88,1 e 78,6 MPa para os segmentos 1, 2 e 3 respectivamente.

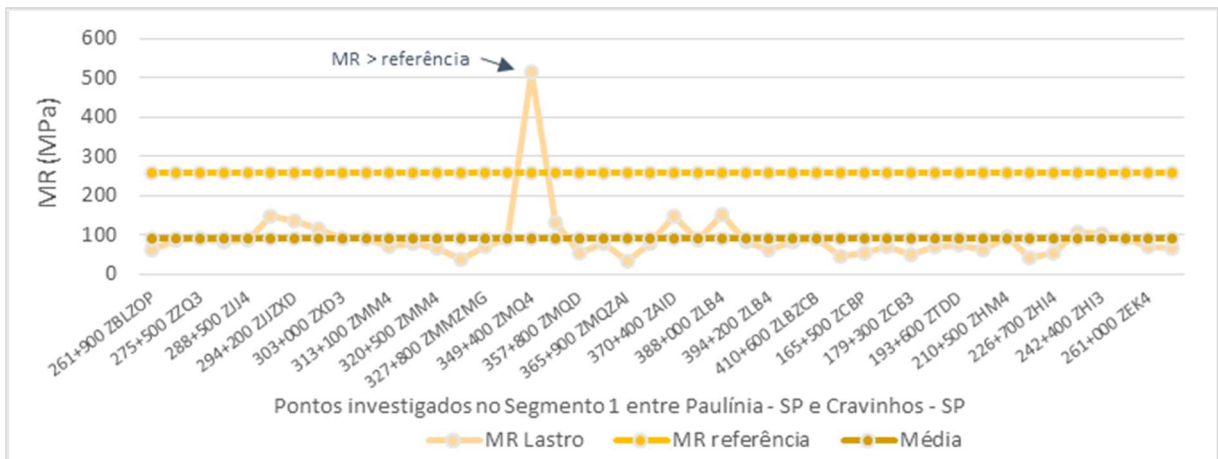


Gráfico 23 - Módulo de Resiliência do Lastro no segmento 1

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)



Gráfico 24 - Módulo de Resiliência do Lastro no segmento 2

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

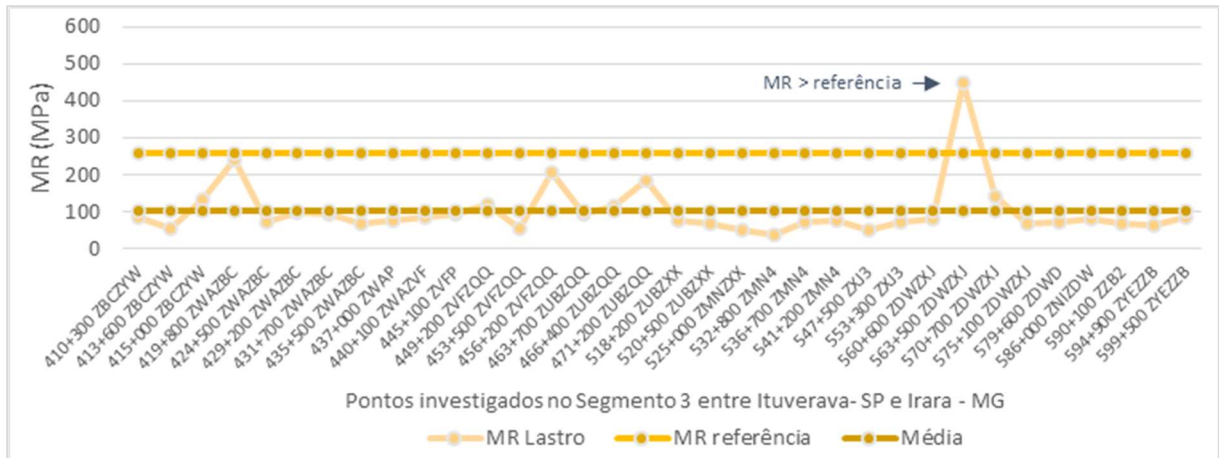


Gráfico 25 - Módulo de Resiliência do Lastro no segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

Esse fato pode ser justificado pelo grau de contaminação conforme demonstraram EBRAHIMI et al. (2014), COCUNATO (1998) e ESVELD (2001) que acrescenta como uma das consequências do alto teor de finos o comprometimento do nivelamento da via com consequente incremento das restrições de velocidade, demanda por socaria e reconstrução.

RANGEL (2017) cita que o Módulo de Resiliência do lastro se altera a partir do incremento de finos o que resulta no aumento da deformação permanente pois a distribuição de tensões entre as partículas do lastro fica comprometida. O resultado para o pavimento, acrescenta o autor, é a geração de recalques diferenciais, perda da estabilidade e segurança operacional.

Outra razão que pode justificar a resiliência insuficiente da camada de lastro é a baixa capacidade de suporte da camada de subleito conforme será demonstrado a seguir. Associa-se o desempenho da camada de lastro ao da camada de subleito pois entende-se a via como um conjunto em que cada camada possui uma função no todo.

5.4- Classificação do material de subleito

A identificação tátil e visual do material de subleito se assemelhou à pedologia do solo apresentada anteriormente: cor amarelada/avermelhada e granulometria média a fina. A Figura 37 apresenta um exemplo de material de subleito com essas características identificado em campo.



Figura 37 - Amostra de subleito coletada no km 195+100 ZTD3

A caracterização em laboratório utilizando o método HRB – Highway Research Board, adotado pela AASHTO segue detalhada no Gráfico 26, Gráfico 27 e Gráfico 28 e comprova a predominância de material fino nas camadas de subleito em todos os segmentos, indicando maior susceptibilidade à perda de capacidade de suporte por retenção de água em razão da sua menor permeabilidade.

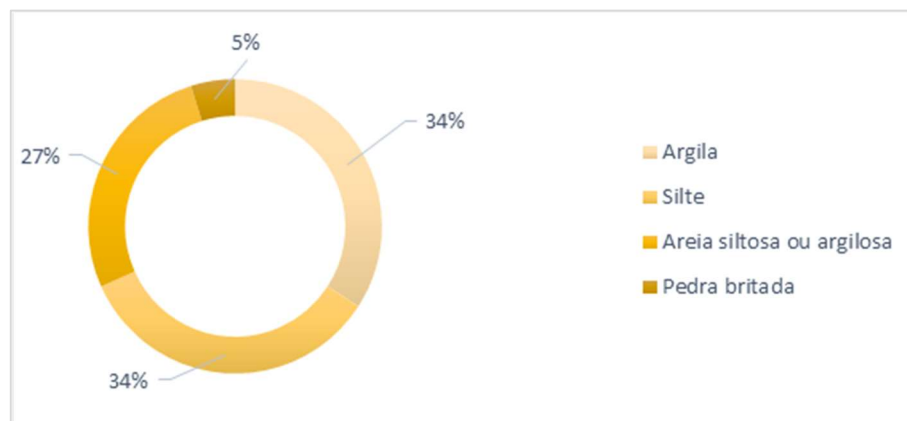


Gráfico 26 - Classificação HRB Segmento 1

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)

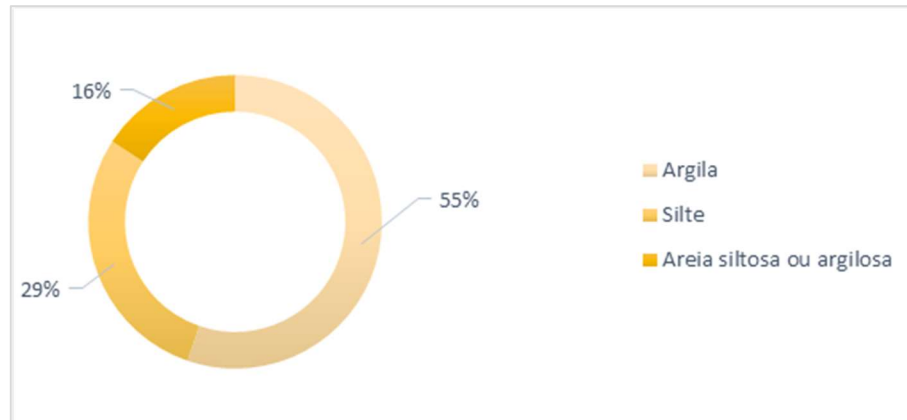


Gráfico 27 - Classificação HRB Segmento 2

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

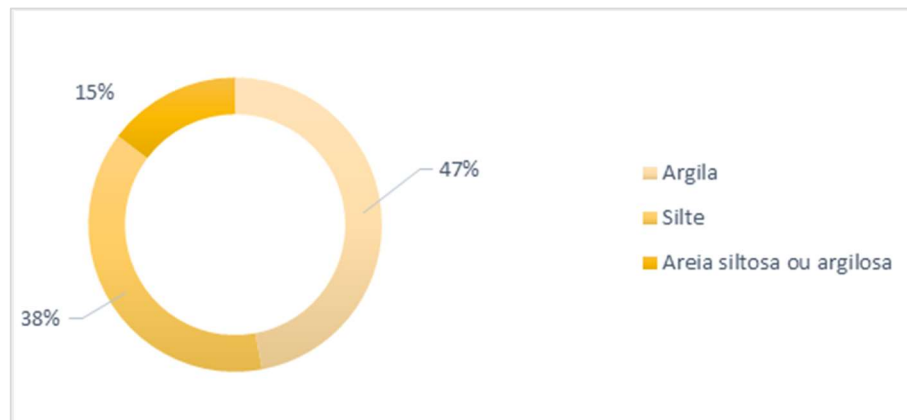


Gráfico 28 - Classificação HRB Segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

5.5- CBR

Os dados de CBR obtidos por correlação através do ensaio DCP utilizando as equações de Vertamatti e Oliveira (1997), e Heyn (1986) apresentadas na Tabela 5, foram consolidados no Gráfico 29, Gráfico 30 e Gráfico 31 visando fornecer uma visão geral do trecho estudado. Considerando que não foi possível identificar uma camada de reforço de subleito e uma regularidade na presença da camada de sublastro, e adotando o CBR de 20% indicado através da Instruções de Serviços Ferroviários - ISF-207: Estudos Geotécnicos como requisito mínimo para a camada subjacente ao lastro, os resultados demonstram a baixa capacidade de suporte da plataforma na maioria dos pontos ensaiados.

Para o segmento 1, sete locais de um total de 42 pontos alcançaram índices superiores a 20%. A média dos resultados aproximou-se dos 13,6%, porém a mediana calculada foi de 7,3%. No segmento 2, oito locais de um total de 38 pontos alcançaram

índices superiores a 20%. A média dos resultados alcançou 15,4% e a mediana 11,3%. No último segmento, seis locais de um total de 32 pontos alcançaram índices superiores a 20%. A média dos resultados atingiu 17,8%, entretanto a mediana calculada foi de 8%.

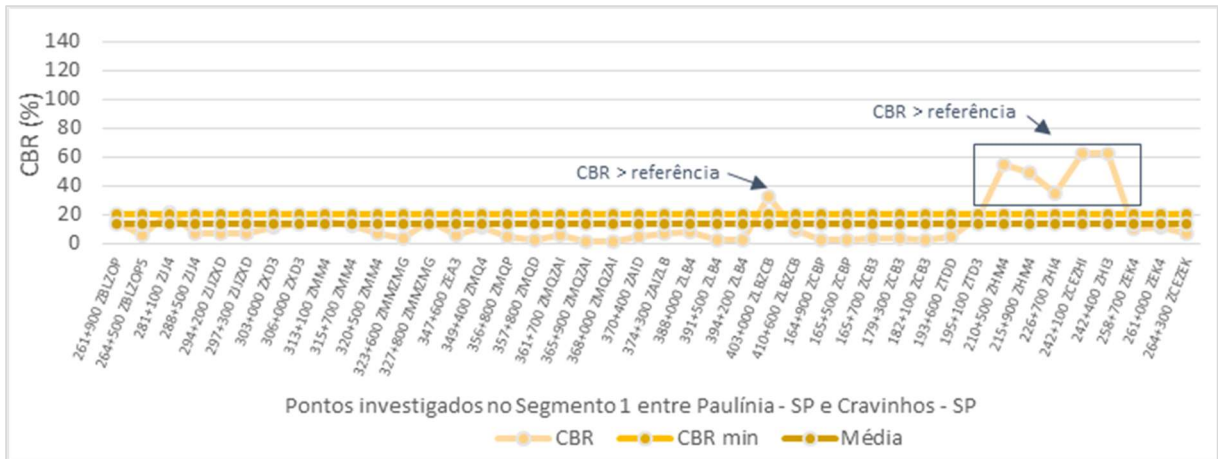


Gráfico 29 - CBR ao longo do Segmento 1

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)

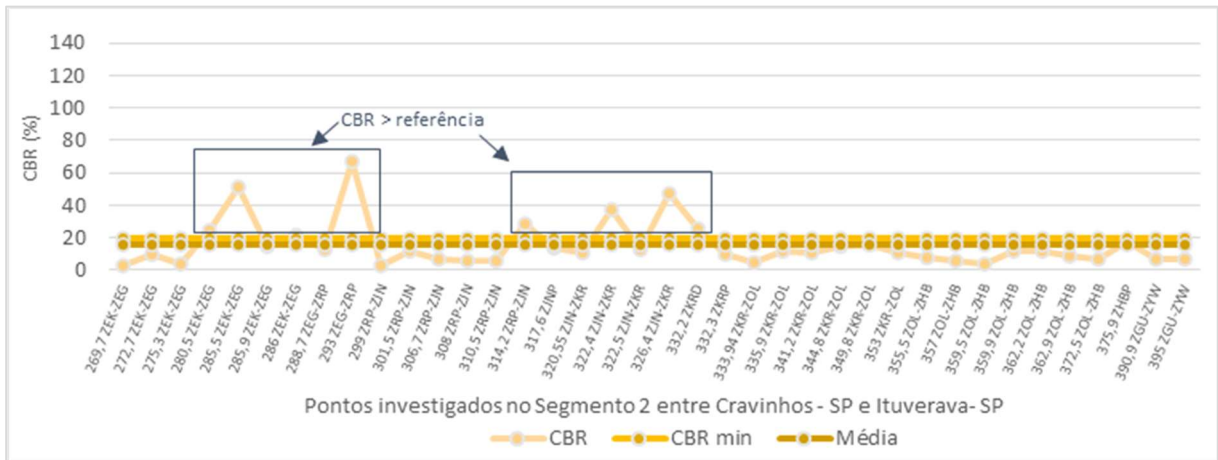


Gráfico 30 - CBR ao longo do Segmento 2

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

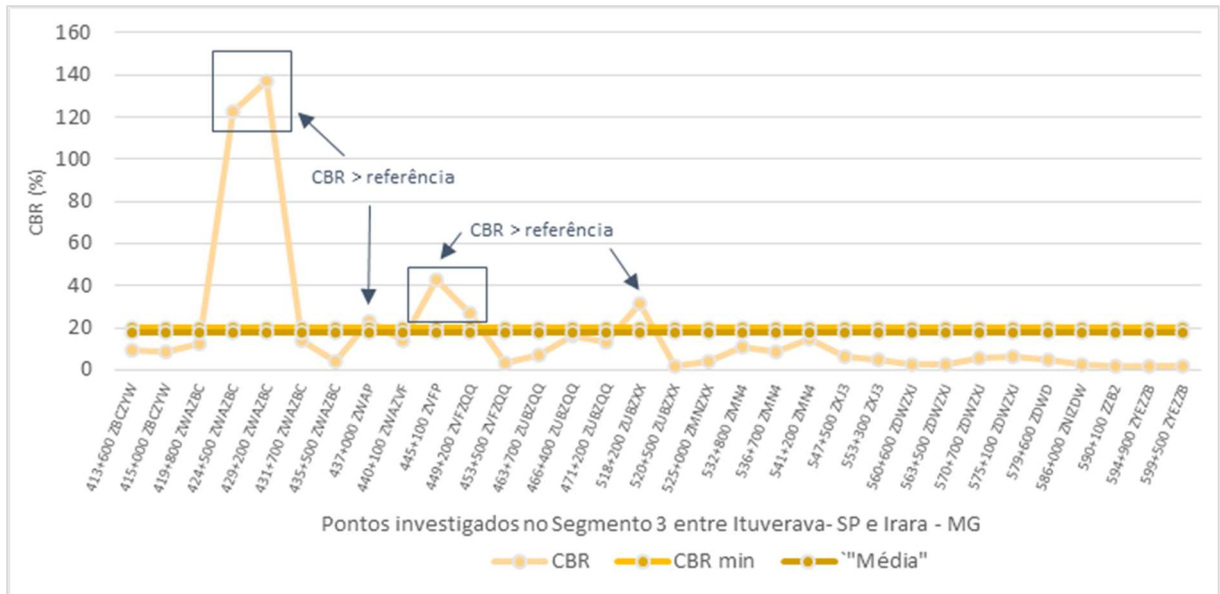


Gráfico 31 - CBR ao longo do Segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

5.6- Umidade

A avaliação do teor de umidade calculado a partir do levantamento em campo através do método *speedy* em comparação àquele ótimo obtido no ensaio de compactação permitiu verificar que mais de 50% dos locais no segmento 1 apresentaram valores acima da umidade ótima. A Figura 38 apresenta dois exemplos de subleito visualmente saturados identificados durante a realização dos ensaios em campo. Nessas condições não foi possível realizar os ensaios de umidade e LWD em campo devido a essa condição de saturação. Nesse segmento a média do valor de umidade encontrado em campo foi de 13,6% frente ao valor de 11,4% de média do teor de umidade ótimo médio obtido em laboratório. Essa condição pode ter sido gerada em razão do período de análise, realizada em novembro, durante o período chuvoso visando compreender o comportamento do pavimento quando nessas condições.



Figura 38 - Subleito saturado kms 264+300 ZCE-ZEK (esquerda) e 193+600 ZTDD (direita)

Fonte: COPPETEC (2018)

No segmento 2, o estudo foi realizado em julho, fora da época de chuva, entretanto 37% dos pontos estavam em condições saturadas. A presença de umidade acima do valor ótimo em período de seca indica saturação do solo associada à falha do sistema de drenagem superficial e/ou profunda, cuja função inclui a coleta e correta destinação da água para fora do pavimento no menor tempo possível, e/ou baixa permeabilidade do lastro que contribui para o acúmulo de água na plataforma. A Figura 39 apresenta um exemplo de região de corte com sistema de drenagem comprometido e cujo teor de umidade de campo do material de subleito estava acima do teor de umidade ótima confirmando a hipótese de que a falha na drenagem associada às características do solo, nesse caso siltiloso, favorece à retenção da água e saturação do subleito. A média do valor de umidade alcançou 18,7%, abaixo dos 20,6% encontrados em laboratório para umidade ótima.



Figura 39 - Sistema de drenagem comprometido no km 357+000 ZOL-ZHB

Fonte: COPPETEC (2019)

O último segmento apresentou apenas 16% dos pontos com valores acima da umidade ótima cujo valor médio calculado foi de 23,4%. Os dados nesse trecho foram coletados em outubro, no início do período chuvoso e indicaram valor médio de umidade de campo da ordem de 15,4%.

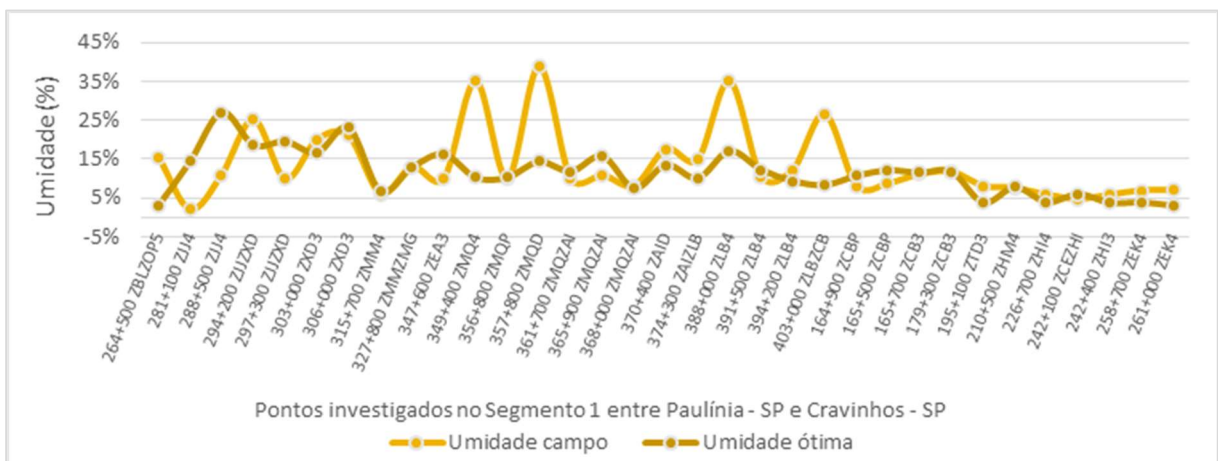


Gráfico 32 - Umidade de campo x umidade ótima no segmento 1

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)



Gráfico 33 - Umidade de campo x umidade ótima no segmento 2

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

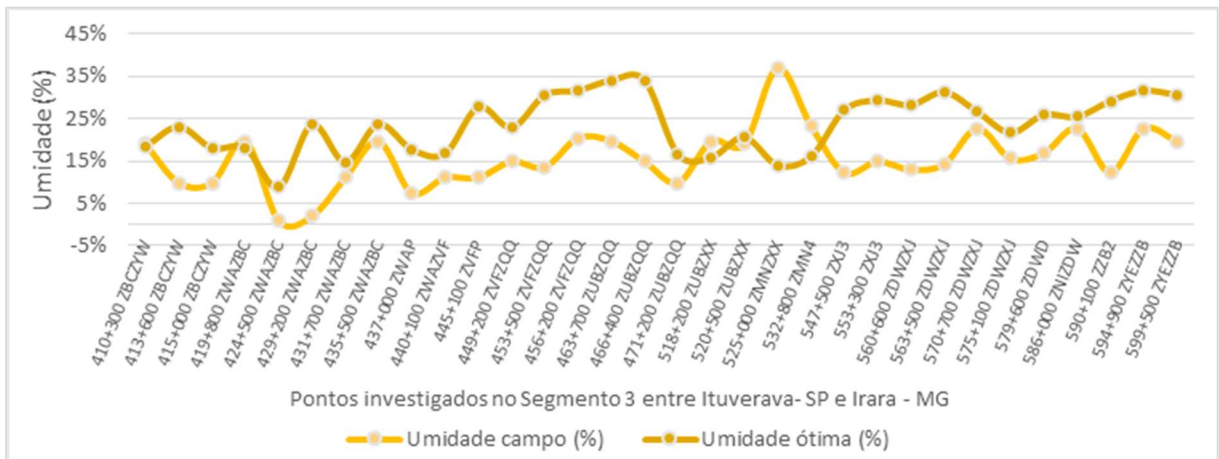


Gráfico 34 - Umidade de campo x umidade ótima no segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

5.7- Umidade x propriedades das camadas

A partir dos dados de umidade medidos de campo e CBR calculados pode-se correlacionar as duas propriedades conforme pode ser observado no Gráfico 35. Nota-se que à medida que o teor de umidade de campo se eleva, os resultados de CBR tendem a reduzir seu valor. A característica do solo e sua composição mineral podem influenciar na maior ou menor tolerância à água, mas a exposição em excesso afeta as propriedades mecânicas e a resposta do material às solicitações impostas pelo tráfego.

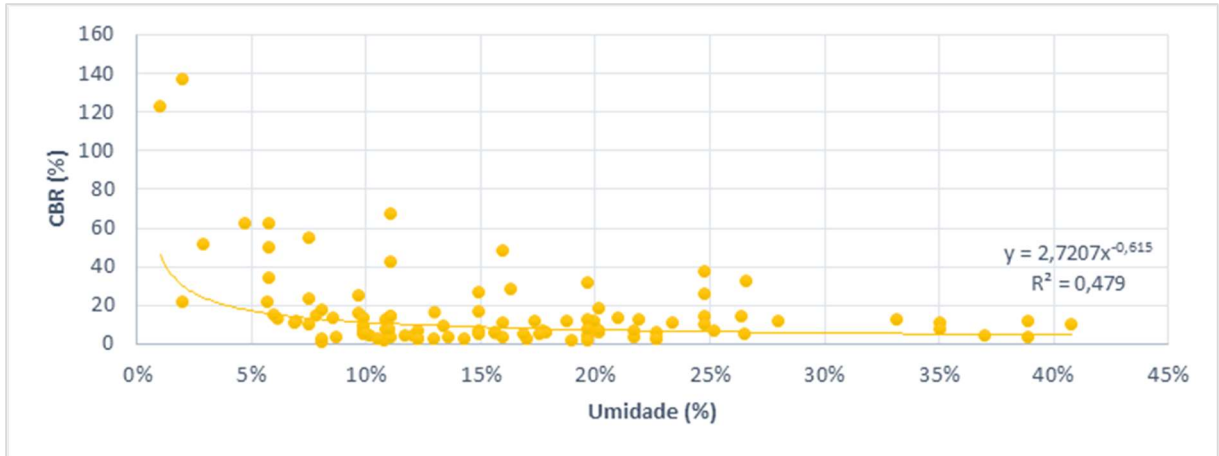


Gráfico 35 - Correlação Umidade de campo x CBR

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

Os resultados comparativos entre o Módulo de Resiliência do subleito obtido através dos ensaios de LWD em campo e em laboratório apresentados no Gráfico 36, Gráfico 37 e Gráfico 38 confirmaram a baixa rigidez da camada, contribuindo para as altas deflexões do pavimento quando da aplicação da carga, cravação do lastro no subleito, bombeamento de finos, e defeitos de via.

A Figura 40 exemplifica a perda de nivelamento da via potencializado pelo bombeamento de finos causados pela redução da capacidade de suporte da camada de subleito causada pela saturação do solo devido à deficiência do sistema de drenagem.



Figura 40 - Desnivelamento de via causado por baixa capacidade de suporte do subleito saturado no km 335+900 ZKR-ZOL

Dos 112 locais ensaiados, apenas 6 apresentaram Módulo de Resiliência de campo superior ao valor de referência. A média dos resultados atingiu 60,2, 102,9 e 56,8 MPa e a mediana 53,6, 99,7 e 36,0 MPa para os segmentos 1, 2 e 3 respectivamente.

Diante da ausência de medição ou estudo de tensões atuantes no corredor em questão uma vez que seria necessária verba orçamentária adicional para contratação de empresa especializada em instrumentação, instalação dos sensores e células de carga e medição dos resultados, foi adotado Módulo de Resiliência de laboratório referente aos pares de tensão 34 KPa de tensão confinante e 103 KPa de tensão desvio. Essa condição se aproxima àquela citada por PAIVA et al. (2008) na Estrada de Ferro Carajás (EFC) cujas tensões verticais induzidas pelo tráfego são da ordem de 140 KPa.

Considerando, entretanto o Módulo de Resiliência obtido em laboratório nas condições ótimas de umidade, os resultados médios atingiram 287,6, 419,1 e 126,8 MPa e medianos 244,5, 433,5 e 63,9 MPa para os segmentos 1, 2 e 3 respectivamente. É possível verificar que nas condições ótimas de umidade os resultados são, em sua maioria para os segmentos 1 e 2, superiores àqueles encontrados em campo e ao valor de referência adotado de 150 MPa (com base na Instrução de Projeto do DER IP-DE-P00/001 que cita como valores usuais de Módulo de Resiliência de solos de comportamento laterítico 100 a 200 Mpa), confirmando a qualidade satisfatória dos materiais empregados quando da construção da plataforma. O segmento 3, apesar de apresentar resultados abaixo da referência indicando materiais menos nobres, também confirma a redução dos valores de módulo a partir do incremento da umidade.

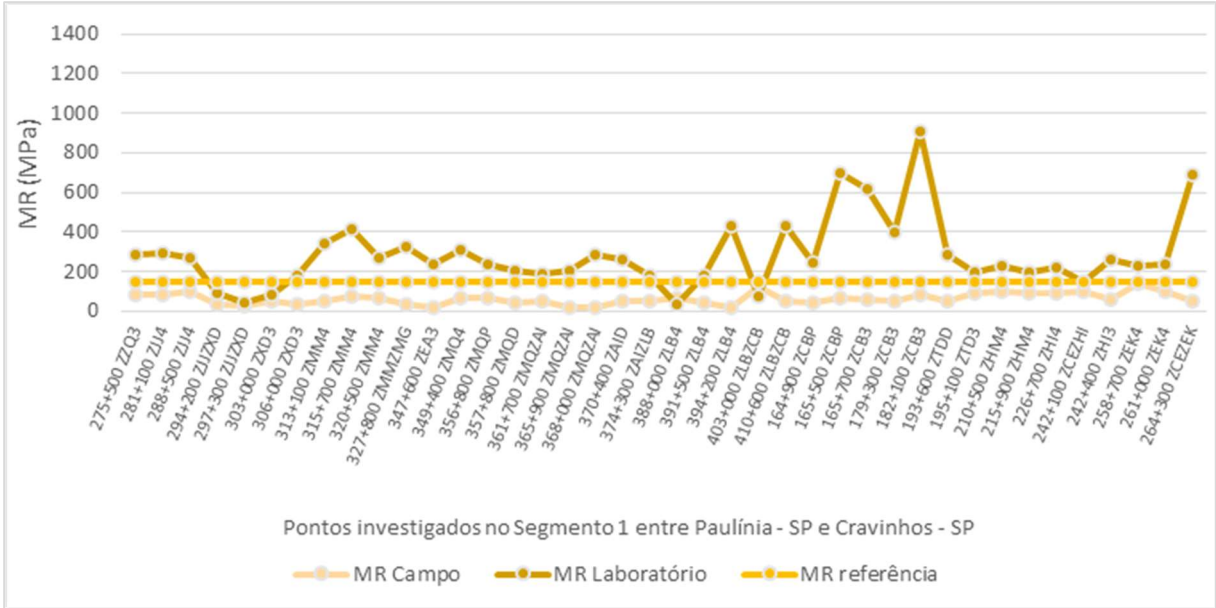


Gráfico 36 - Módulo de Resiliência do Subleito Segmento 1
 Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)

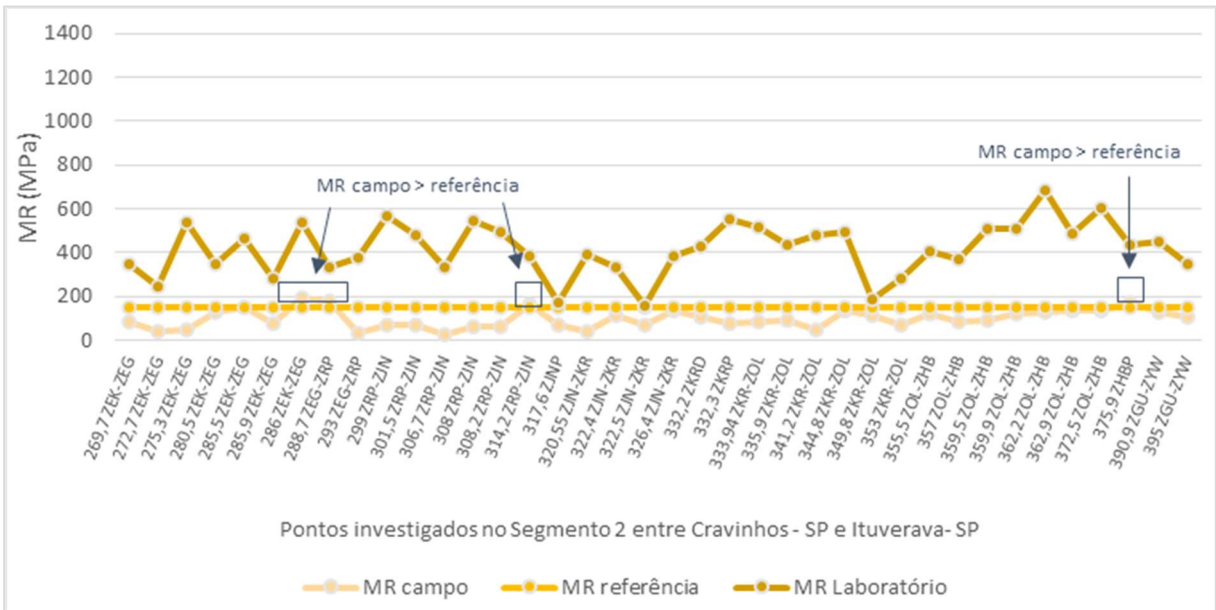


Gráfico 37 - Módulo de Resiliência do Subleito Segmento 2
 Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

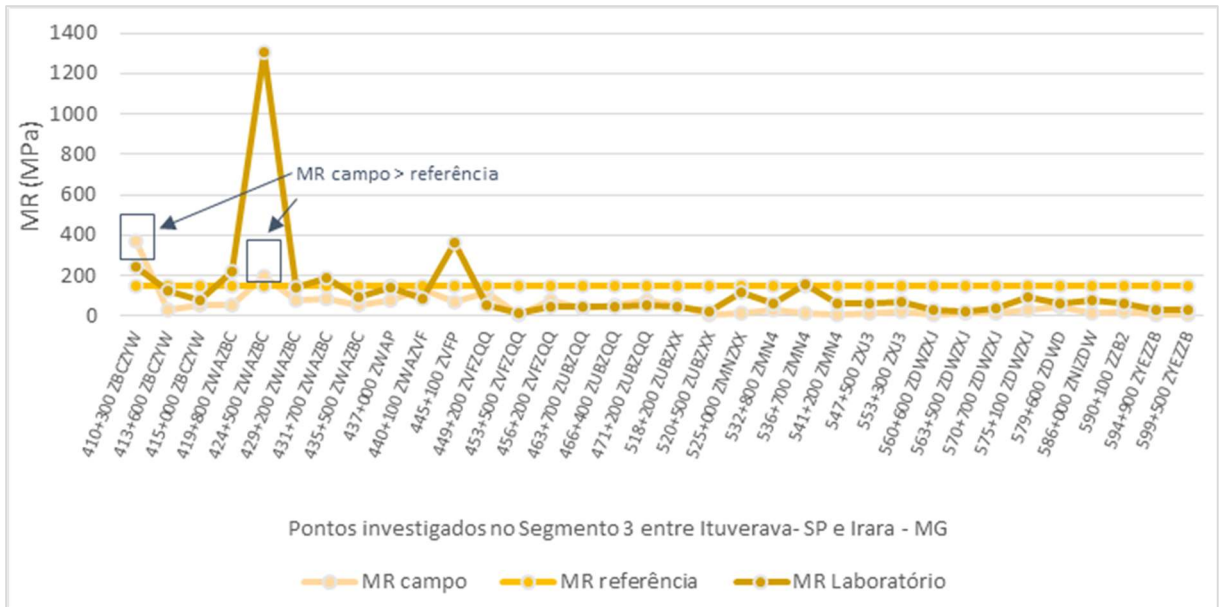


Gráfico 38 - Módulo de Resiliência do Subleito Segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

5.8- Modelagem computacional

A modelagem computacional no Sysstrain possibilitou avaliar o nível de tensão atuante no topo do subleito a partir da configuração das cargas atuantes e especificações da via, e realizar a verificação quanto à tensão admissível calculada através da equação de Yoder e Witczk (1975) para CBR até 20% e da equação do próprio ensaio de CBR para demais casos considerando o CBR obtido por correlação conforme citado anteriormente. Como saída do software também foram obtidas as deflexões no topo do trilho e topo do subleito.

O primeiro segmento possui materiais com valor médio de tensão admissível de 128,2 KPa. Cerca de 45% dos pontos apresentaram a tensão atuante superior à admissível conforme pode ser observado no Gráfico 39.



Gráfico 39 - Tensão atuante x tensão admissível no subleito do Segmento 1

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)

A Figura 41 apresenta a representação gráfica da saída do software SYSTRAIN para a tensão calculada no topo do subleito no km 226+700 ZHI.

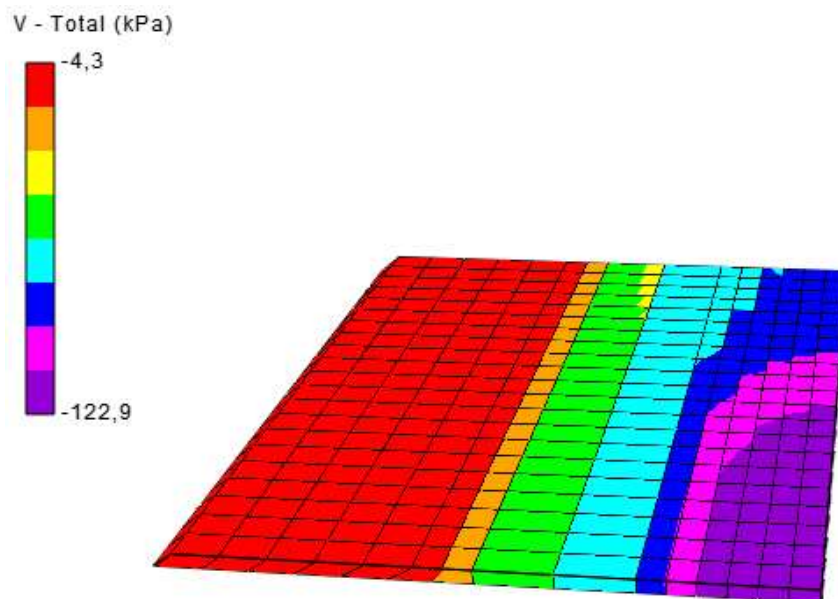


Figura 41 - Tensão no topo do subleito calculada no SYSTRAIN para o km 226+700 ZHI4

No segundo segmento, cujos resultados da modelagem computacional estão apresentados no Gráfico 40 os materiais possuem propriedades mecânicas um pouco melhores com valor médio de tensão admissível de 152,1 KPa. Nesse segmento apenas 22% dos pontos apresentaram a tensão atuante superior à admissível.

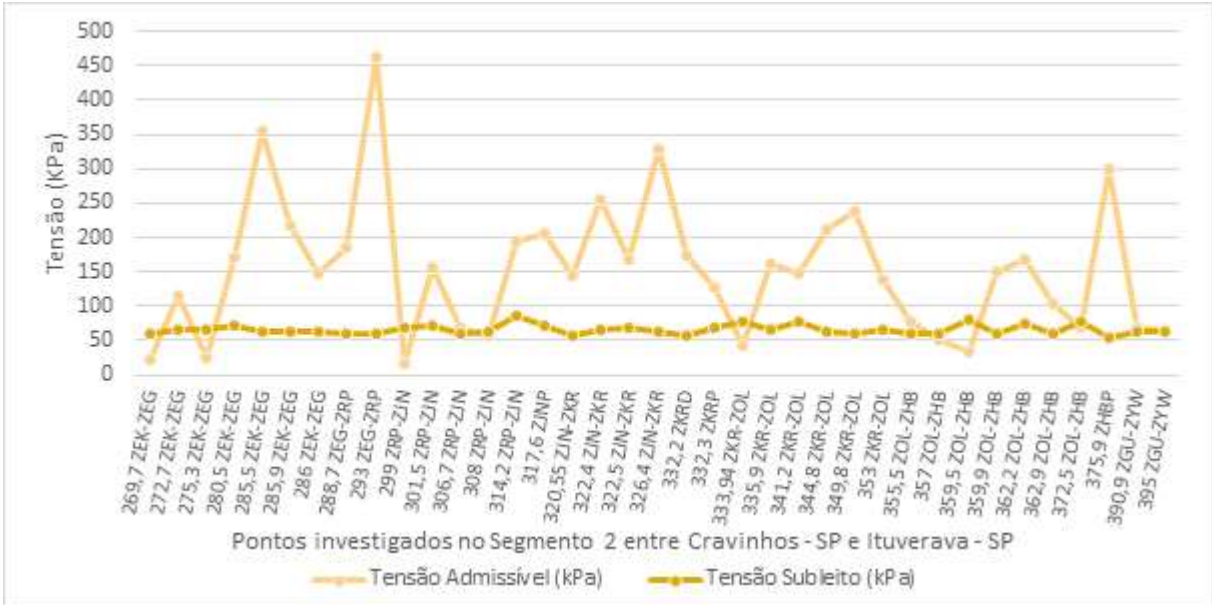


Gráfico 40 - Tensão atuante x tensão admissível no subleito do Segmento 2

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

No terceiro segmento, a tensão atuante superou a tensão admissível do solo em 53% dos pontos avaliados. O valor médio da tensão admissível para os pontos analisados foi de 101,9 KPa ratificando uma menor capacidade de suporte desses materiais conforme detalhado no Gráfico 41.



Gráfico 41 - Tensão atuante x tensão admissível no subleito do Segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

No segmento 1 as deflexões calculadas no topo do trilho mantiveram-se dentro dos limites de 6,35mm recomendados pela AREMA (2013), alcançando em média 1,1 mm. Os dados consolidados podem ser observados no Gráfico 42.



Gráfico 42 - Deflexão no topo do trilho no Segmento 1

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2018)

Um exemplo de saída do estudo de deflexões no topo do trilho a partir do software SYSTRAIN segue representado na Figura 42.

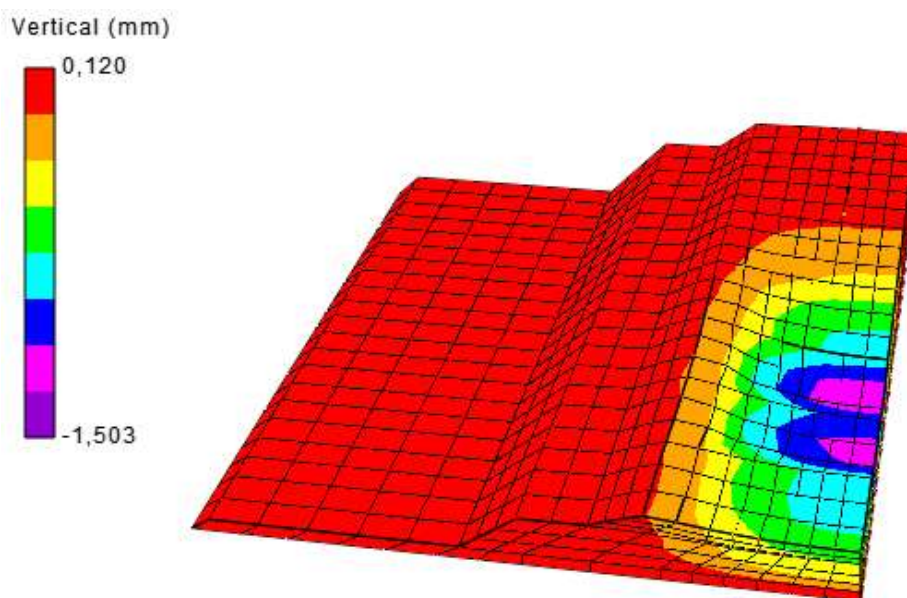


Figura 42 - Deflexão no topo do trilho calculada no SYSTRAIN para o km 410+600 ZLB-ZCB

No segmento 2, semelhantemente não foram identificadas deflexões acima do limite recomendado pela AREMA (2013) de 6,35mm estando a média da deflexão em torno de 1,3 mm.

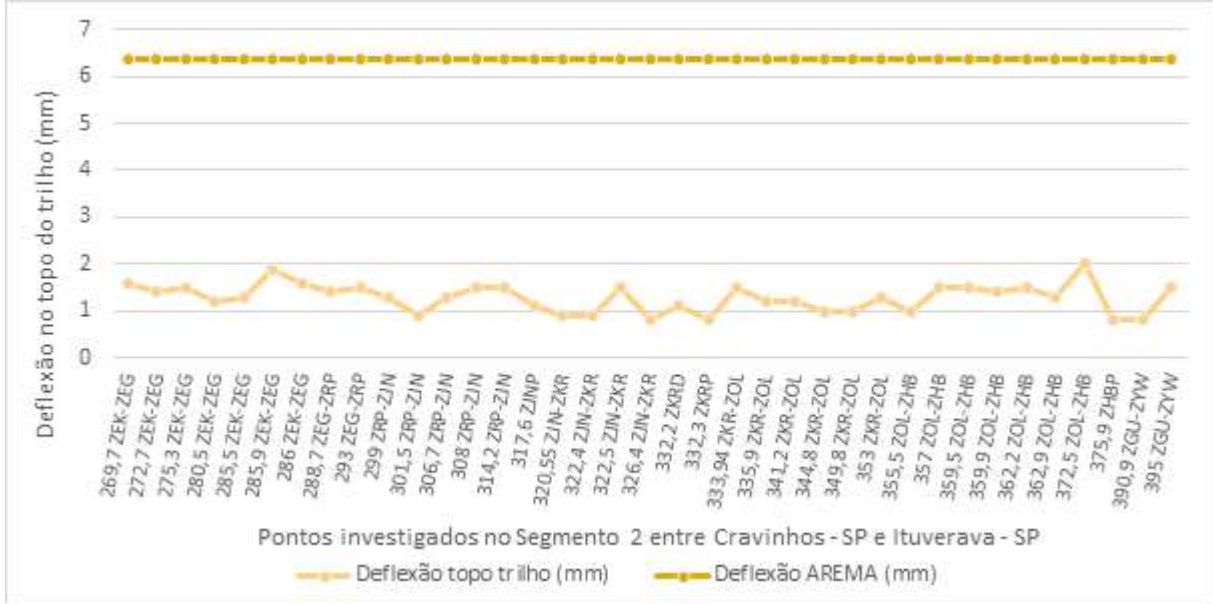


Gráfico 43 - Deflexão no topo do trilho no Segmento 2

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2019)

No segmento 3 também não foram identificadas deflexões acima do limite recomendado pela AREMA (2013) de 6,35mm estando a média da deflexão em torno de 1,6 mm.



Gráfico 44 - Deflexão no topo do trilho no Segmento 3

Fonte: Adaptado de COPPETEC (2020)

6- CONCLUSÕES

A malha ferroviária brasileira, se comparada à dos países de dimensões continentais como o Brasil, é pouco representativa e contribui com um baixo percentual na matriz de transportes do país. Uma pesquisa acerca da sua história demonstrou como principais causas da baixa atratividade: a despadronização dos segmentos, a geometria desfavorável, e a baixa aplicação de recursos para manutenção gerando a degradação da malha ferroviária.

Adicionalmente à parte introdutória de conceitos do pavimento ferroviário, inserida para nivelamento de conhecimento, foram incorporadas referências de estudos que discursam sobre a importância da manutenção do pavimento ferroviário conforme estabelecido como objetivo específico dessa pesquisa. Em linhas gerais, é possível inferir que a manutenção preventiva tem menor custo e demanda menor esforço, uma vez que normalmente não exige significativa interrupção do tráfego e/ou desmontagem do pavimento. A manutenção corretiva, por outro lado, imprime uma quantidade maior de recursos, tendendo a ser mais dispendiosa e mais restritiva ao tráfego ferroviário.

O desenvolvimento do trabalho seguiu discorrendo sobre os efeitos da inadequada manutenção do pavimento ferroviário encontrados em estudos já publicados. Foi evidenciado que a contaminação do lastro é um dos principais vilões, pois impacta na redução da permeabilidade do lastro com consequente retenção de água, saturação do solo do subleito, redução do Módulo de Resiliência e perda da capacidade de suporte da plataforma, assim como na redução da elasticidade do lastro gerando aumento das deflexões e deformações permanentes, fatores esses primordiais para a segurança operacional.

Adicionalmente aos estudos acima citados, o trabalho em voga realizou ensaios de laboratório e de campo em um segmento ferroviário de aproximadamente 600 quilômetros de extensão. Foi possível identificar o elevado grau de contaminação do lastro através de ensaios de granulometria realizados a partir de amostras coletadas em campo e resultados de inspeção com GPR. A elevada contaminação do lastro, originada majoritariamente pela própria degradação do material (a partir do tráfego ferroviário) e não reduzida/eliminada em ciclos de desguarnecimento e limpeza de lastro, contribui para a retenção de água oriunda das chuvas e dos sistemas de

drenagem ineficientes pelo elevado grau de obstrução não removido no ciclo de manutenção preventiva.

O teor de umidade do solo de subleito, analisado em campo através do ensaio *Speedy* e do lastro, identificado de forma relativa no GPR, ratificam o elevado grau de contaminação por finos, cuja condutividade hidráulica e permeabilidade é inferior. A água retida, por sua vez, satura o material de subleito, provocando redução da camada de suporte com conseqüente bombeamento de finos, aumento da contaminação do lastro, das deflexões do pavimento, e das restrições ao tráfego ferroviário através de redução de velocidade e/ou interdições para manutenções corretivas.

O Módulo de Resiliência e CBR reduzidos, indicando baixa capacidade de suporte da plataforma em uma grande quantidade de pontos avaliados, confirmam que o alto teor de contaminação do lastro, e conseqüentemente a presença de umidade em grau superior ao ótimo, além da baixa qualidade dos materiais empregados, são fatores que contribuem para essa condição.

A modelagem computacional analisou as tensões atuantes na camada de subleito e demonstrou que em grande parte dos locais analisados há tensões elevadas apesar de não terem sido encontradas deflexões acima do previsto em norma.

A pesquisa desenvolvida aplicou estudos teóricos realizados em laboratório para diversos aspectos e propriedades relacionados ao comportamento dos materiais às condições de campo ocasionadas em razão da manutenção inadequada do pavimento ferroviário. Conclui-se, portanto, que a manutenção adequada da plataforma e sistemas acessórios como a drenagem é fundamental para assegurar as condições estabelecidas em projeto e o cumprimento da vida útil dos ativos. A limpeza e desguarnecimento do lastro e a manutenção dos dispositivos de drenagem em pleno funcionamento são premissas para assegurar as propriedades elásticas e de permeabilidade do lastro, bem como da camada estrutural do pavimento ferroviário.

Como sugestão para o desenvolvimento e novas pesquisas sugere-se correlacionar os defeitos de geometria indicados no histórico de falhas de via permanente ao baixo Módulo de Resiliência do lastro e à baixa capacidade de suporte do subleito encontrado nos respectivos segmentos.

REFERÊNCIAS

ABDIB - Associação Brasileira da Infraestrutura e Indústria de Base. 2019. **Países de mesmo porte utilizam muito mais as ferrovias que o Brasil**; compare. Disponível em: <https://www.abdib.org.br/2019/03/11/artigo-paises-de-mesmo-porte-utilizam-muito-mais-as-ferrovias-que-o-brasil-compare/>. Acesso em: jan. 2020.

ABELHA, J. **Trem de passageiros Minas-Vitória é suspenso por tempo indeterminado**. 2023. Disponível em: <https://ferroviavezevoz.com/2023/01/25/trem-de-passageiros-minas-vitoria-e-suspenso-por-tempo-indeterminado/>. Acesso em: mar. 2023.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. 2020.

ALVARENGA, T. A. **Identificação e localização de falhas em circuitos de via de ferrovias baseada em reflectometria no domínio da frequência**. 2018. 123 p. Tese. (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

AMARAL, I. 2023. **Prejuízo do Brasil com chuvas em um mês é suficiente para construir 17 piscinões, aponta estudo**. Disponível em: <https://noticias.r7.com/cidades/prejuizo-do-brasil-com-chuvas-em-um-mes-e-suficiente-para-construir-17-piscinoes-aponta-estudo-09012023>. Acesso em: mar. 2023.

AMORA, D. 2018. **Velocidade média de transporte de trem não sai do lugar**. Disponível em: <https://www.agenciainfra.com/blog/velocidade-media-de-transporte-de-trem-nao-sai-do-lugar/>. Acesso em: mai. 2023.

ANTF. Associação Nacional de Transporte Ferroviário. **O setor ferroviário de carga brasileiro**. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: jan. 2022.

ANTÔNIO, M. P. M. A. **Avaliação do comportamento de pontes com tabuleiros de dupla ação mista submetidas ao tráfego de trens de alta velocidade**. 2018. 181 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ARÊDES, M. et al. Estudo comparativo dos valores de MR obtidos com equipamento LWD e em laboratório. *In: Expopavimentação*, 4, 2015, Foz do Iguaçu.

BENEVIDES, L. D. **Avaliação do uso do DCP em areias para controle da capacidade de carga em fundações diretas e controle de compactação de aterros**. 2012. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

BIAN, X.; JIANG, H.; CHEN, Y. Preliminary testing on high-speed railway substructure due to water level changes. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 769-781, 2016.

BORGES, M. S. N. **Contribuição ao estudo da drenagem interna de taludes em regiões tropicais**. 1986. 174 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.

BRESSI, S.; SANTOS, J.; LOSA, M. Optimization of maintenance strategies for railway track-bed considering probabilistic degradation models and different reliability levels. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 207, p. 107359, 2021.

CALEGARI, L. 2018. **Por que o Brasil não investe em ferrovias?** E porque deveria investir. Exame, São Paulo, 8 mai. 2018. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/brasil/por-que-o-brasil-nao-investe-em-ferrovias-e-por-que-deveria-investir/>. Acesso em: jan. 2020.

CEDERGREN, H. R. **Drainage of Highway and Airfield Pavements**. 1. ed. New York: Wiley, 1974. 285 p.

CHEN, D.; XIANG, P.; JIA, F. P Measurement of Operation and Maintenance for Infrastructure Mega-Project Based on Entropy Method and DS Evidence Theory. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 13, n. 2, p. 101591, 2022.

CNM - Confederação Nacional dos Municípios. 2022. **Prejuízos causados pelas chuvas no Brasil entre 2017 e 2022 ultrapassam R\$55,5 Bilhões, revela CNM**. Disponível em: <https://www.jornalbrasilnovo.com.br/37003-2/>. Acesso em: mar. 2023.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Análises do transporte**. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/analises-transporte>. Acesso em: jan. 2020.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. **Transporte em números**. 2019. Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/ea14e970-c1e2-455e-950b-88a956467812.pdf>. Acesso em: abr. 2023.

COCUNATO, J. M. **Estudo da Contaminação do Lastro Ferroviário e o uso de Geossintéticos no Controle do Fenômeno**. 1998. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

COLAVITE, A. S.; KONISHI, F. A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade. *In*: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 12, 2015, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. São Paulo: Fatec, 2015. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/802267.pdf>. Acesso em jan. 2020.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. 2022. **Nova estimativa aponta para uma produção de grãos na safra 2021/22 em 268,2 milhões de toneladas**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4494-nova-estimativa-aponta-para-uma-producao-de-graos-na-safra-2021-22-em-268-2-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: abr. 2023.

COPETTEC. Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. **Estudos para verificação da integridade estrutural das plataformas**

dos corredores logísticos para gestão dos pavimentos ferroviários da VLI. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2019. 252 p.

COPETTEC. Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. **Estudos para verificação da integridade estrutural das plataformas dos corredores logísticos para gestão dos pavimentos ferroviários da VLI.** Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2020. 709 p.

COPETTEC. Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. **Estudos para verificação da integridade estrutural das plataformas dos corredores logísticos para gestão dos pavimentos ferroviários da VLI.** Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2020. 137 p.

COSTA, R. C. **Proposição de dispositivo de medidas “in situ” para avaliação do comportamento mecânico de lastro ferroviário:** Estudo de caso na Estrada de Ferro Carajás. 2016. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples:** estudo de três solos do nordeste brasileiro. 1998. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DASHO, D. K.; VERMA, R. K. Geotechnical Investigation and Effect of Moisture Content on Subgrade CBR Values; Arbaminch-Chencha Existing Road; Ethiopia. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v.8, p. 347-363, 2019.

DAWSON, A. **Water in Road Structures**. 1. ed. Nottingham, UK: Series Editor. 2009. 438 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ISF-212:** Projeto de Superestrutura da via permanente – Lastro e Sublastro. Brasília, 2015.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE RODAGEM – DER. **IP-DE-P00/001:** Projeto de Pavimentação. São Paulo, 2006.

DUONG, T. V. et al. Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure. **Engineering Geology**, v. 171, p. 45-48, 2014.

DYNATEST. **Light Weight Deflectometer (LWD).** Disponível em: <http://dynatest.com.br/light-weight-deflectometer-lwd/>. Acesso em: nov. 2018.

EBRAHIMI, A.; Tinjum, J.M.; Edil, T.B. Maintenance model for railway substructure. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2014, v. 45, p. 48–55

EBRAHIMI, A.; JAMES, M. T.; TUNCER, B. E. Deformational behavior of fouled railway ballast. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 52, n. 3, p. 344–355, Mar. 2015.

ELLIOTT, R. P.; THORNTON, S. I. Resilient modulus and AASHTO pavement design. *Transportation Research Record*, Fayetteville, v. 1196, p. 116-124, 1988.

ESVELD, C. **Modern Railway Track**. 2. ed. Delft: MRT-Productions, 2001. 87 p.

FELDMAN, F.; NISSEN, D. Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage void contamination. **Conference on Railway Engineering, RTSA**, Wollongong, p. 101-109, Nov. 2002.

FELIX, M. K. R. **Exploração de infraestrutura ferroviária: lições de extremos para o Brasil**. 2018. 162 p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

FERNANDES, R. **Desenvolvimento de correlação entre os ensaios DCP e CBR: Estudo de caso: Pista de testes**. 2015. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Infraestrutura) - Centro de Engenharias da Mobilidade - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Joinville, 2015.

FICI, R. P. **O sistema ferroviário mundial: o caso brasileiro**. 2017. 220 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FRA - Federal Railroad Administration. **Freight Rail Overview**. Disponível em: <https://railroads.dot.gov/rail-network-development/freight-rail-overview>. Acesso em: fev. 2022.

FLEURY, P. 2012. **Evolução do desempenho das ferrovias brasileiras privatizadas – 1997 a 2010 – Parte 2**. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/evolucao-do-desempenho-das-ferrovias-brasileiras-privatizadas-1997-a-2010-parte-2/>. Acesso em mar. 2023.

FREITAS, J. H.; REIS, J. H.; BELINCANTA, A. 2017. Estudo da influência do teor de umidade na verificação do índice de penetração estático e dinâmico. *In: SIMPÓSIO PARAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES*, 2, 2017, Curitiba. **Anais [...]** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017. p. 512-522.

GALVÃO, R. M. **Ferrovias no Ceará: suas tramas políticas e seus impactos econômicos e culturais (1870-1930)**. 2019. 173 p. Dissertação (Mestrado em História) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

GREEN, P. P.; PLESSIS, L. D. **The use and interpretation of the dynamic cone penetrometer (DCP) test**. Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, 2009.

HASNAYN, M. M. et al. Railway subgrade performance during flooding and the postflooding (recovery) period. **Transportation Geotechnics**, Edinburgh, v. 11, p. 57-68, Jun. 2017.

HORNYCH, P. et al. Water Influence on Mechanical Behaviour of Pavements: Experimental Investigation. **Water in Road Structures**. P 217-242, 2008.

HUDSON, A. et al. Remediation of Mud Pumping on a Ballasted Railway Track. **Procedia Engineering**, Southampton, U.K, v. 143, p. 1043-1050, 2016.

IAC - Instituto Agronômico de Campinas. **Latossolos**. Disponível em: <https://solossp.iac.sp.gov.br/pdf/Latossolos.pdf>. Acesso em: abr 2023.

INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. **Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track**. 1. ed. CRC Press, 2011. 432 p.

INDRARATNA, B. 1st Proctor Lecture of ISSMGE: Railroad performance with special reference to ballast and substructure characteristics. **Transportation Geotechnics**, Australia, v. 7, p. 74-114, Mai. 2016.

INDRARATNA, B. et al. From theory to practice in track geomechanics – Australian perspective for synthetic inclusions. **Transportation Geotechnics**, Australia, v. 1, p. 171-187, Jul. 2014.

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. **História das Ferrovias no Brasil**. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/609>. Acesso em: abr. 2023.

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. 2013. **Estrada de ferro Mauá-Fragoso, no Rio de Janeiro, terá gestão compartilhada**. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/noticias/detalhes/555/estrada-de-ferro-maua-fragoso-no-rio-de-janeiro-tera-gestao-compartilhada>. Acesso em: abr. 2023.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. **Estudo de Propriedades, de Tensões e do Comportamento Mecânico de Lastros Ferroviários**. 2011. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

KÖLLÖ, S. A.; PUSKÁS, A.; KÖLLÖ, G. Influence of the maintenance work and support conditions on the optimization process of railway concrete sleepers. **Procedia Engineering**, v. 181, p. 68-75, 2017.

LAURENCE, F. 2023. **Rumo interrompe trecho ferroviário em São Carlos, no interior de SP**. Disponível em: <https://revistaferroviaria.com.br/2023/01/rumo-interrompe-trecho-ferroviario-em-sao-carlos-no-interior-de-sp/>. Acesso em: mar. 2023.

LIMA, M; PINHEIRO, L. 2010. **Excesso de chuva leva ALL a prejuízo no trimestre**. Disponível em <https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/excesso-de-chuva-leva-all-a-prejuizo-no-trimestre>. Acesso em: mar. 2023.

LINGEGÅRD, S.; SVENSSON, N. Scenarios for Resource Efficient Rail Infrastructure—Applying Integrated Product Service Offerings. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 134-139, 2014.

LIVNEH, M. In-situ CBR testing by indirect methods. *In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 12, 1989, Rio de Janeiro. **Proceedings** [...] Israel, 1989. p. 267-270.

LIAW, C. **Novas fronteiras de expansão para o gás natural: o suprimento em pequena escala através da malha ferroviária brasileira**. 2018. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Engenharia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LOBO, R. 2022. **Chuva em Minas: situação das rodovias e ferrovias**. Disponível em: <https://viatrolebus.com.br/2022/01/chuva-em-minas-situacao-das-rodovias-e-ferrovias/>. Acesso em: mar. 2023.

LUICA, P. **Australia's new budget supports massive rail investments**. 2017. Disponível em: <https://www.railwaypro.com/wp/australias-new-budget-supports-massive-rail-investments/>. Acesso em out. 2018.

MARTINS, D. Países de mesmo porte que o Brasil utilizam bem mais as ferrovias. **Jornal do Comércio**, Rio Grande do Sul, 05 abr. 2019. Disponível em: https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/cadernos/jc_logistica/2019/04/677662-paises-de-mesmo-porte-que-o-brasil-utilizam-bem-mais-as-ferrovias.html. Acesso em: jan. 2020.

MCHENRY, M. T.; ROSE, J. G. **Railroad Subgrade Support and Performance Indicators: A Review of Available Laboratory and In-Situ Testing Methods**. *In: Kentucky Transportation Center Research Report*, v. 12, 2012.

MEDINA, J. **Fundamentos da Mecânica dos Pavimentos**. Tese de Concurso para Professor Titular, COPPE/UFRJ – Área de Mecânica dos Solos, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.

MERHEB, A. H. M. **Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos**. 2014. 148 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MIECOANSKI, J. F. **Avaliação do comportamento mecânico da via férrea utilizando elementos finitos considerando fadiga: estudo paramétrico**. 2019. 145 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

MOHAMMADI, D. et al. Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils. **Engineering Geology**, Tehran, v. 101, p. 195–203, Oct. 2008.

MOLLER, A. K. C. O. **Otimização de investimentos no transporte ferroviário de soja no estado do Mato Grosso**. 2020. 67 p. Dissertação. (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

MOUSAVI, S. H. et al. Subgrade resilient modulus prediction using light-weight deflectometer data. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 54, p. 304-312, Oct. 2017.

MUNIZ DA SILVA, L. F. **Fundamentos Teórico-Experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Manutenção da Via Permanente**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, RJ, 333p., 2002.

NALSUND, R. **Railway Ballast Characteristics, Selection Criterion and Performance**. 2014. 188 p. Thesis (Doctoral in Engineering Science and Technology) – Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2014.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1981. P. 30-41.

NORBACK, C. **Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solo-brita**. 2018. 180 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEIRA, L. M. P. **Influência da resistência do subleito e intensidade do tráfego no dimensionamento de pavimentos flexíveis no Brasil**. 2019. 190 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

OTTA, L. A. Fazendeiros vão bancar a Ferrogrão. **Estadão**, São Paulo, 02 set. 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/amp/s/economia.estadao.com.br/noticias/geral,fazendeiros-vao-bancar-a-ferrograo,700024835666>. Acesso em: out. 2018.

PAIVA, C. E. L. de; GUIMARÃES, C. A. B.; CORREIA, L. F. de M. Estudo comparativo das solicitações atuantes em plataformas ferroviárias, aeroportuárias e rodoviárias. **Revista Pavimentação**, Rio de Janeiro, v. 3, p. 37-42, 2008.

PAIVA, C.; FERREIRA, M.; FERREIRA, A. Ballast drainage in Brazilian railway infrastructures. **Construction and Building Materials**, v. 92, p. 58-63, 2015.

PAVEL, L. 2020. **Keeping track of Russia's Railways**. Disponível em: <https://ridl.io/keeping-track-of-russia-s-railways/>. Acesso em jan. 2022.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 259 p. Copiarte, 2002.

POBLETE, M. V. S. et al. The influence of soil suctions on the deformation characteristics of railway formation materials. **Transportation Geotechnics**, Pretoria, v. 18, p. 111-123, Mar. 2019.

RANGEL, G. W. A. **Um método para a estimativa da deflexão do pavimento ferroviário lastreado**. 2017. 368 p. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

RAICAN - Railway Association of Canada. **Canada's Freight Railways: Moving the Economy**. Disponível em: <https://www.railcan.ca/101/canadas-freight-railways-moving-the-economy/>. Acesso em: fev. 2022.

RIOS, O. 2010. **AL: chuva destrói parte de ferrovia**; prejuízo é de R\$300mi. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/al-chuva-destroi-parte-de-ferrovia-prejuizo-e-de-r-300-mi,3beb63fc8940b310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>. Acesso em: mar. 2023.

ROBERT. **How Fast Do Freight Trains Go? Really?** Disponível em: <https://www.trainconductorhq.com/how-fast-do-freight-trains-go-really/>. Acesso em: mai. 2023.

ROSA, A. C. et al. Avaliação estrutural de pavimentos ferroviários do corredor Centro-Sudeste Paulista utilizando software Sysrain. *In: 33 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*. 2019, Balneário Camboriú. **Conference Paper** [...], 2019. p. 1004-1015.

ROSA, A. C. et al. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de um subleito ferroviário de solos tropicais**. *In: VI Encontro ANTF de Ferrovias*. 2021.

ROSE, J. G.; KONDURI, K. C. 2006. KENTRACK — A Railway Trackbed Structural Design Program. American Railway Engineering and Maintenance of Way Annual Conference, **Proceedings**... P. 17-20, 2006.

RUSHTON, K. R.; GHATAORA, G. Design for efficient drainage of railway track foundations. Institution of Civil Engineers, **Proceedings**... v. 167, p. 3-14, 2012.

SABRI, I. L. M. Study on the impact of moisture content on subgrade strength. *In: 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, 2015, Sri Lanka. **Proceedings**.... p. 71-76, 2015.

SANTOS, P. J. C. R. 2014. **Utilização de Deflectômetro de peso leve (LWD) em pavimento rodoviário**. 2014, 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

SAÑUDO, R. et al. Drainage in railways. **Construction and Building materials**, v. 210, p. 391-412, 2019.

SCHIMIDT, S. et al. Railway Ballast Permeability and Cleaning Considerations. **Journal of Transportation Research Record**, United States, v. 2607, p. 24-32, 2017.

SCHLOGEL, C. **Uso do DCP para avaliação do grau de compactação de um solo na região oeste de Curitiba – PR**. 2015. 81 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) - Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2015.

SCHWAB, K. **The Global Competitiveness Report**. 393 p. Geneva: World Economic Forum, 2018.

SEDGHI, M. et al. A taxonomy of railway track maintenance planning and scheduling: A review and research trends. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 215, p. 107827, 2021.

SELIG, E. T.; LUTENEGGER, A. J. **Assessing Railroad Track Subgrade Performance Using in Situ Tests**. Department of Civil Engineering, University of Massachusetts, 1991.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track Geotechnology and Substructure Management**. New York: Thomas Telford Services Ltd., 1994.

SERACO, I. P. **Procedimento para definição de políticas de manutenção de via permanente ferroviária**. 2019. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVA, F. H. P. **Estudo do comportamento de um lastro ferroviário sob carga repetida em modelo físico de verdadeira grandeza**. 2018. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SILVA, A. B. **Simulação do comportamento mecânico de lastro ferroviário pelo método dos elementos discretos**. 2018. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SILVA, F. S. **Remanescências da arquitetura ferroviária em Minas Gerais: uma ferramenta de preservação das estações ferroviárias**. 2019. 170 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SILVA, L. F. M. **Fundamentos Teórico-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente**. 2002. 347 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SOARES, N. **Técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado para prevenção de falhas em máquinas de chave**. 2018. 68 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem computacional) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

SPE - SECRETARIA DE POLÍTICA ECONÔMICA. **Greve dos caminhoneiros impacta a economia em cerca de R\$ 15,9 bilhões**. Brasília, 2018.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; KABBACH JR, F. I. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento**. 240 p. Oficina de Textos, 2013.

TENNAKOON, N. C. **Geotechnical Study of Engineering Behaviour of Fouled Ballast**. 2012. 257 p. Thesis (Doctorate of Philosophy) – University of Wollongong, Wollongong, 2012.

TOMAZELA, J. M. **Com safra recorde, Brasil se aproxima da liderança na soja. Estadão**, São Paulo, 13 mai. 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/amp/s/economia.estadao.com.br/noticias/geral,com-safra-recorde-brasil-se-aproxima-da-lideranca-na-soja,70002306064.amp>. Acesso em: out. 2018.

TORRES, V. **Ensaio de cone de penetração dinâmica para controle de compactação de vias urbanas da cidade de Curitiba/PR**. 2017. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UFTPR, Curitiba, 2017.

TRINDADE, T. P. et al. Estudo dos Módulos de Resiliência de Dois Solos Tropicais no Estado Natural e Quando Estabilizados com Cimento. **Revista Engenharia Civil UM**, v. 17, p. 19-30, 2003.

USMAN, K.; BURROW, M.; GHATAORA, G. Railway track subgrade failure mechanisms using a fault chart approach. **Procedia Engineering**, v. 125, p. 547-555, 2015.

USMAN, K. et al. Railway track subgrade failure mechanisms using a fault chart approach. **Procedia Engineering**, United Kingdom, v. 125, p. 547-555, 2015.

UZ, V. E.; SALTAN, M.; GÖKALP, I. Comparison of DCP, CBR, and RLT - Test Results for Granular Pavement Materials and Subgrade with Structural Perspective. *In*: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2015, Berlin. **Conference Paper** [...] Turkey: Süleyman Demirel University, 2015. p. 15-17.

VIANA, H. M. F. **Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior do Estado de São Paulo**. 2007. 321 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

WHITE, D. et al. **Field validation of intelligent compaction monitoring technology for unbound materials**. 2007. 412 p. Minnesota Department of Transportation. Minnesota, 2007.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. 1975. 728 p. New York: John Wiley & Sons, v. Second Edition.

YOKOYAMA, A. Innovative changes for maintenance of railway by using ICT–to achieve “smart maintenance”. **Procedia CIRP**, v. 38, p. 24-29, 2015.