

Uso do *ground penetrating radar* para inspeção de via permanente ferroviária

Heloisa Moraes Treiber^{1*}, Maria Teresa Françoso¹, Nayara de Oliveira Stenico¹, Luiz Carlos de Almeida¹, Paulo Gomes Oliveira², Luciano de Oliveira², Thomas Lee³, Paulo Henrique Pires Lobato⁴

¹ Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Caixa Postal: 6143, CEP: 13083-889, Campinas – SP

² Vale - Complexo de Tubarão, Centro de Excelência – Ferrovia, Av. Dante Michelini, 5500 - Jardim Camburi, CEP 29090-860, Vitória - ES

³ Zetica Rail – Zetica House, Southfield Road, Eynsham, Oxfordshire, UK

⁴ BRFERROVIA – Rua Geraldo Faria de Souza 469, CEP 31035-510, Belo Horizonte, Minas Gerais

e-mail: heloisa.moraes@gmail.com, mteresaf@unicamp.br, nayara.stenico@gmail.com, almeida@fec.unicamp.br, paulo.gomes.oliveira@vale.com, oliveira.luciano@vale.com, thomas.lee@zetica.com, brferrovia@brferrovia.com.br

Resumo Nas ferrovias em operação há várias décadas pode haver ocorrências, isoladas ou concomitantes, de eventos como o desgaste e a quebra do lastro, as migrações ascendentes das partículas finas do solo da fundação e descendente do material proveniente dos vagões. Tais ocorrências podem resultar na colmatação, afetando seu desempenho estrutural e levando a falhas na via permanente. O conhecimento da estrutura da via permanente, e a avaliação periódica de sua condição, do tipo e nível de contaminação do lastro são essenciais tanto na tomada de decisões de planejamento, em nível gerencial, como para o desenvolvimento das soluções de restauração permitindo, assim, priorizar os trechos críticos e atuar de maneira preditiva. Na maioria dos casos, tais informações não estão disponíveis para toda a extensão do trecho de via permanente que se pretende avaliar. O *ground penetrating radar* (GPR) é um método de investigação não destrutiva (IND), cujas primeiras aplicações em infraestrutura de transportes datam da década de 1970. O objetivo deste estudo é apresentar os fundamentos do método GPR como ferramenta para investigação e monitoramento do lastro ferroviário e camadas subjacentes, desde a aquisição até o processamento e interpretação dos dados obtidos em campo. Ainda que o método tenha suas limitações e os dados adquiridos em campo requeiram processamento antes de serem avaliados, o interesse pelo GPR está crescendo pois tem sido utilizado mundialmente com sucesso por órgãos governamentais, concessionárias e empresas de consultoria para investigação das características e condições da via permanente. Seguindo esta tendência, realizou-se na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), ferrovia controlada pela VALE, um projeto piloto onde foram inspecionados aproximadamente 300 km de ferrovia utilizando o GPR tendo tido um resultado satisfatório.

Palavras-Chave: Via Permanente; Ground Penetrating Radar; Investigação Não Destrutiva; Contaminação de Lastro Ferroviário.

1. INTRODUÇÃO

O *ground penetrating radar* (GPR) é um método de investigação não destrutiva (IND) que busca contrastes nas propriedades eletromagnéticas dos materiais – permissividade dielétrica (ϵ); condutividade elétrica (σ); e permeabilidade magnética (μ) – para mapear estruturas ocultas na subsuperfície. Uma vez que tais propriedades governam a propagação e a atenuação da energia eletromagnética, quaisquer descontinuidades ou mudanças – como as que ocorrem nas interfaces entre o lastro e as camadas subjacentes ou na presença de patologias – implicam na reflexão de parte da energia para as camadas sobrejacentes em direção à superfície, que então é detectada pelo receptor do sistema e registrada; e parte continua sendo transmitida para as camadas subjacentes.

Na medida em que órgãos governamentais, concessionárias e empresas de consultoria reportam experiências bem-sucedidas com o uso do GPR para investigação das características e condições do lastro e camadas subjacentes, cresce o interesse pelo método, ainda que tenha suas limitações e os dados adquiridos em campo requeiram processamento antes de serem avaliados.

Seguindo essa tendência, a VALE contratou, dentro de um projeto piloto, a empresa *Zetica Rail* para executar a inspeção de aproximadamente 300 km da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), ferrovia sob seu controle. Foram obtidas informações sobre os seguintes indicadores das condições da via:

- Espessura de lastro limpo;
- Profundidade modelada das camadas da via;
- Índice modelado da contaminação do lastro;
- Localização de áreas de falhas da plataforma e de pontos de lama em desenvolvimento;
- Estimativa de probabilidade de umidade.

1.1 Breve histórico de uso do GPR

O uso do GPR na investigação de elementos de infraestrutura de transportes teve início na metade da década de 1970, quando a *Federal*

Highway Administration (FHWA) conduziu nos Estados Unidos os primeiros testes de viabilidade de sua aplicação em túneis e, posteriormente, para a avaliação de patologias em tabuleiros de pontes [1].

Scanlan *et al.* [2] creditam Clark *et al.* [3] como os primeiros a quantificar o nível de degradação e umidade do lastro através da permissividade dielétrica. O artigo *Electromagnetic properties of railway ballast* [3] descreve experimentos realizados com GPR para identificar e caracterizar a permissividade dielétrica e a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no lastro em diferentes condições.

1.2 Permissividade dielétrica relativa (ϵ_r)

A permissividade dielétrica é “a propriedade elétrica mais importante a afetar os resultados de levantamentos com o GPR” ([4], p. 20, tradução nossa) e influencia na velocidade de propagação da energia eletromagnética, na sua atenuação, no comprimento de onda e na propagação, reflexão e transmissão em interfaces. Ela descreve a habilidade de um material em armazenar e liberar energia eletromagnética na forma de cargas elétricas, que se relaciona à habilidade de armazenamento dos capacitores [5]. É normalmente expressa como uma relação com a permissividade dielétrica do espaço livre (expressão sinônima de vácuo utilizada pelos autores da bibliografia consultada), também denominada permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) [6]. A Tabela 1 apresenta alguns valores de ϵ_r :

Tabela 1. Valores da permissividade dielétrica do ar, da água e do lastro em diferentes condições.
Fonte: adaptado de [3] e [7].

Material	Permissividade dielétrica relativa (ϵ_r)
Ar	1
Água doce	81
Lastro limpo e seco	3
Lastro limpo e úmido (5% d'água em volume)	4
Lastro limpo e saturado	27
Lastro contaminado e seco	4
Lastro contaminado e úmido (5% d'água em volume)	8

Continuação – Tabela 1. Valores permissividade dielétrica do ar, da água e de lastro em diferentes condições. Fonte: adaptado de [3] e [7].

Material	Permissividade dielétrica relativa (ϵ_r)
Lastro contaminado e saturado	39
Lastro contaminado com carvão mineral	7
Lastro contaminado com 20% de minério de ferro	7

1.3 Propagação, reflexão e transmissão e de ondas eletromagnéticas

Para a compreensão dos fenômenos de propagação, reflexão e transmissão, modela-se a via permanente como um sistema de $n+1$ camadas planas, paralelas, com espessura finita (d_i) – exceção para o subleito, enésima camada, semi-infinita e com a camada superficial ($n = 0$) correspondendo à superfície (para o caso um sistema de transmissão pelo solo) e ondas com incidência normal [8]. Como em meios homogêneos, isotrópicos e lineares ϵ_r é constante, considera-se as camadas homogêneas, isotrópicas e lineares, os parâmetros constitutivos independentes da frequência e $\mu_r = 1$ para todas as camadas. Tx e Rx são, respectivamente, o transmissor e o receptor do sistema GPR. A Fig. 1 ilustra o modelo descrito:

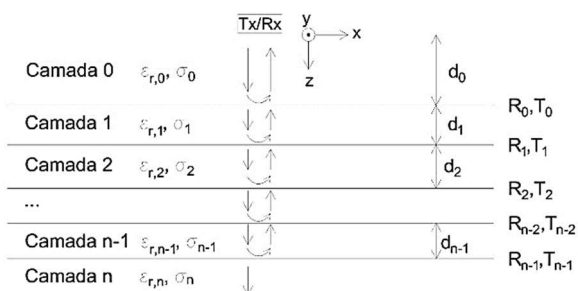


Fig. 1 Reflexão e transmissão em um sistema de $n+1$ camadas com ondas de incidência normal. Fonte: adaptado de [8].

Cabe destacar que os perfis obtidos com o GPR não são imagens propriamente ditas da subsuperfície e sim registros temporais das respostas dos materiais à propagação de pulsos de energia eletromagnética captados pela antena receptora, que registra sua amplitude; frequência e tempo de percurso em relação ao instante no qual o pulso foi

propagado pela antena transmissora. O pulso refletido é representado por uma ondaleta, denominada traço ou *A-scan*, que relaciona a amplitude do sinal com o tempo. Quanto maior o contraste entre as camadas subsequentes, maior será o coeficiente de reflexão na interface e, conseqüentemente, maior será a amplitude. A Fig. 2 ilustra esquematicamente um traço típico do GPR:

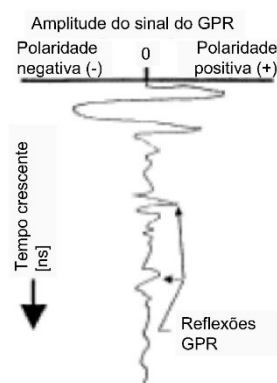


Fig. 2 Ilustração esquemática de um traço típico do GPR. Fonte: adaptado de [9].

Ao dispor os traços sequencialmente em relação à distância de deslocamento, cria-se um registro da resposta da via em forma de perfil. Ao se aplicar uma paleta de cores aos valores de amplitude registrados obtém-se uma imagem denominada radargrama ou *B-scan*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Escopo

O trecho do corredor principal da EFVM inspecionado em outubro de 2019 tem início no km 248 – em Resplendor/MG – e final no km 398 – em Perpétuo Socorro/MG – e é composto por diferentes seções da linha 1 e linha 2, totalizando 297,130 km.

2.2 Equipamento utilizados, instalação e obtenção dos dados

Para aquisição dos dados utilizou-se o sistema multicanal SIR-30 empresa *Geophysical Survey Systems Inc.* (GSSI), com três antenas com frequência central (f_c) de 2 GHz e três antenas com frequência central de 400 MHz. Uma vez que a profundidade de penetração do sinal e a resolução dos dados obtidos é diretamente

relacionada à frequência da antena transmissora – além das condições do lastro e das camadas subjacentes – a combinação de antenas de alta frequência (2GHz) e baixa frequência (400 MHz) permite a obtenção de dados com elevada resolução na superfície e até a profundidade máxima de 2 m.

Os dados obtidos com a antena de 2 GHz foram utilizados para avaliar a contaminação e a espessura do lastro; o desenvolvimento de pontos de lama e mapear ativos na superfície. Já os dados obtidos com a antena de 400 MHz foram utilizados para avaliar a erosão do subleito; a rugosidade da camada; a presença de bolsões de lastro profundos; camadas úmidas e pontos de lama e mapear ativos enterrados.

O sistema de medição da *Zetica Rail*, composto por outros instrumentos além do SIR-30 e antenas, foi instalado em um auto de linha de propriedade da EFVM. Para este levantamento as antenas foram suspensas a alturas entre 30 e 45 cm acima do dormente, com o objetivo de evitar danos ao equipamento, e posicionadas em pares sobre o eixo da linha e sobre os ombros do lastro – três canais de dados por frequência, conforme mostrado na Fig. 3:



Fig. 3 Sistema de medição da *Zetica Rail* instalado no auto de linha da EFVM. As setas azuis indicam antenas de 2 GHz e as setas verdes indicam as antenas de 400 MHz.

As três antenas de 2 GHz, indicadas por setas azuis na Fig. 3, foram afixadas na frente do auto de linha. As três antenas são idênticas e o invólucro amarelo da antena central é um isolante adicional, cujo objetivo é proteger o sinal captado de interferências provocadas pelos dormentes de aço. Observa-se, também, que a antena central está

rotacionada 90° em relação às demais. Tal mudança de orientação tem por objetivo facilitar a remoção da parte do sinal captado correspondente aos dormentes e agilizar o processamento dos dados. Além de duas antenas de 2 GHz observa-se a presença de duas antenas de 400 MHz, indicadas por setas verdes na Fig. 3. Há ainda uma terceira antena de 400 MHz, não visível na foto, posicionada sobre o eixo da linha.

O georreferenciamento dos dados foi feito com três antenas de GPS e uma unidade de medida de distância afixada à uma das rodas dianteiras do auto de linha.

2.3 Análise dos dados obtidos

Antes de utilizar os dados obtidos com o GPR para avaliar as condições da via permanente foi necessário identificar as interfaces e, em seguida, delimitar as diferentes camadas. A interface primária (ou dominante) é aquela que apresenta menores interrupções ou descontinuidades; possui maior valor de amplitude; é consistente ao longo da via permanente e costuma representar a base da camada de lastro ou base da camada de lastro limpo drenante, isto é, a interface entre o lastro limpo e o contaminado.

A interface secundária é aquela que apresenta maiores descontinuidades; possui amplitude do sinal atenuada quando comparada à interface primária; pode ser mais rasa ou mais profunda quando comparada com a interface primária e pode representar a base do sublastro/topo do subleito ou uma interface adicional dentro do lastro (p. ex. bolsão de umidade; infiltração de lama; topo de camada contaminada; etc.). A Fig. 4 apresenta um exemplo de radargrama obtido com antena de 2 GHz, com interfaces identificadas:

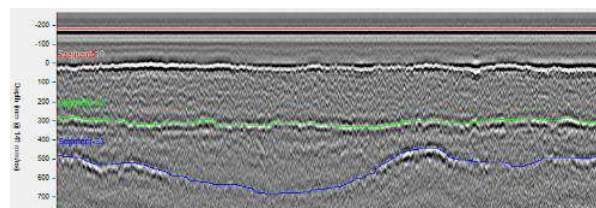


Fig. 4 Radargrama obtido com antena de 2 GHz, com superfície do lastro mostrada em branco, interface primária em verde e secundária em azul.



Com as interfaces devidamente identificadas e as camadas delimitadas, foi possível avaliar as condições subsuperficiais da via permanente por meio de um conjunto de índices, denominados métricas, cujos valores são determinados por meio dos dados adquiridos pelo GPR e apresentados na forma de valores médios para segmentos de 5 m, subdivididos em:

- Métricas de condição do lastro: índice de contaminação do lastro (*ballast fouling index* - BFI) e profundidade da camada contaminada (*fouled depth index* - FDL);
- Métricas de interface de camada: índice de rugosidade da camada (*layer roughness index* - LRI); índice de espessura do lastro (*ballast thickness index* - BTI); índice de probabilidade de umidade (*moisture likelihood index* - MLI).

O BFI representa a resposta média da contaminação do lastro, calculada a partir da superfície até uma profundidade de 0,4 m abaixo do topo do dormente. Os valores de BFI são calibrados pelo índice de contaminação de Selig e agrupados em 6 categorias, identificadas por valores que variam de 0 a 5. O valor 0 indica que o BFI não pôde ser calculado em função de níveis elevados de interferência eletromagnética (*electromagnetic interference* - EMI) ou da presença de estruturas superficiais/subsuperficiais. O valor 1 indica lastro "Altamente contaminado"; 2 indica lastro "Contaminado"; 3 indica "Moderadamente contaminado"; 4 indica lastro "Moderadamente limpo" e 5 indica "Lastro limpo".

A FDL representa o limite entre o lastro relativamente limpo e o lastro altamente contaminado e é determinada a partir da análise do BFI. Seu papel é destacar áreas nas quais a profundidade desse limite está acima ou no nível da base do dormente, casos nos quais a drenagem da plataforma pode estar significativamente comprometida. Também indica, conseqüentemente, a espessura da camada de lastro relativamente limpa. O valor 0 indica que a FDL está indisponível; valor 1 indica índice "Muito ruim", com profundidade inferior à 100 mm; 2 indica índice "Ruim", com profundidade variando

entre 100 e 175 mm; 3 indica índice "Moderado", com profundidade variando entre 175 e 250 mm e 4 indica índice "Bom", com espessura superior à 250 mm.

O LRI é um indicativo do nível de variação em profundidade da base da camada primária da via. Seu papel é realçar áreas nas quais a irregularidade da interface entre a camada primária e as camadas subjacentes é elevada, o que pode ser um indicativo de erosão no subleito; bombeamento de finos do subleito e formação de bolsões de lama. A classificação "Bom" indica variação de menos de 50 mm ao longo de 20 m de extensão; "Moderado" indica variação entre 50 e 100 mm e "Pobre" indica variação superior à 100 mm.

O BTI, calculado por meio medição da espessura da camada primária de lastro e tendo como referência o topo do dormente, é um indicativo das seções da via permanente nas quais a espessura da camada não se enquadra na faixa de especificação de projeto. Sua importância vem do fato que manter espessura adequada de lastro é crítica para a estabilidade e o bom desempenho da via permanente. O valor 0 indica que o BTI está indisponível; valor 1 indica camada "Muito fina", com espessura inferior a 250 mm; 2 indica camada "Fina", com espessura variando entre 250 e 350 mm; 3 indica camada "Reduzida", com espessura variando entre 350 e 450 mm; 4 indica camada "Conforme Projeto", com espessura variando entre 450 e 600 mm e 5 indica camada "Espessa", com espessura acima de 600 mm.

O MLI baseia-se na amplitude da reflexão na interface entre a camada primária de lastro e a camada subjacente, que é dependente do contraste entre os valores de permissividade dielétrica dos materiais de ambas as camadas. Dado o elevado valor da permissividade dielétrica da água, $\epsilon_{\text{água}} = 81$, alterações localizadas na amplitude da reflexão podem ser relacionadas às variações nos níveis de umidade dos materiais presentes na interface ou imediatamente acima dela. Tais alterações podem ser utilizadas para determinar áreas nas quais a drenagem do lastro pode ser insuficiente ou aquelas mais suscetíveis a erosão do subleito

e bombeamento de lama (desenvolvimento de bolsões/lamaçal).

O valor 0 indica que o MLI está indisponível; valor 1 indica índice “Ruim”, com amplitude relativa considerada alta; 2 indica índice “Moderado”, com amplitude relativa considerada intermediária e 3 indica índice “Bom”, com amplitude relativa considerada baixa. Cabe observar que o MLI não fornece uma medida absoluta por ser baseado na análise da distribuição dos níveis de amplitude de reflexão na interface no conjunto de dados.

Para o aprofundamento no tema discutidos nessa seção sugere-se consulta a Barret *et al.* [10].

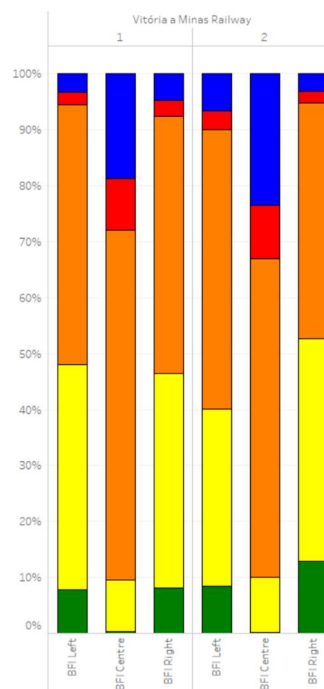
3. RESULTADOS

3.1 Índice de contaminação do lastro – Selig (BFI)

Cerca de 30% das linhas inspecionadas foram classificadas como *contaminada a altamente contaminada* no centro da via, enquanto menos de 10% foram classificadas como *limpa* ou *moderadamente limpa*. Em geral, os ombros do lastro estão mais limpos que o centro, com aproximadamente 50% tendo sido classificado como *limpo* ou *moderadamente limpo*. e a linha 1 é levemente menos contaminada do que a linha 2. A Fig. 5 apresenta um resumo dos resultados do BFI para as linhas 1 e 2:

Índice de Contaminação do Lastro		
Categoria	Descrição	Índice de Selig
0	Indisponível	n/a
1	Altamente contaminado	>30
2	Contaminado	25 - 30
3	Moderadamente contam.	10 - 25
4	Moderadamente limpo	5 - 10
5	Limpo	<5

(a)



(b)

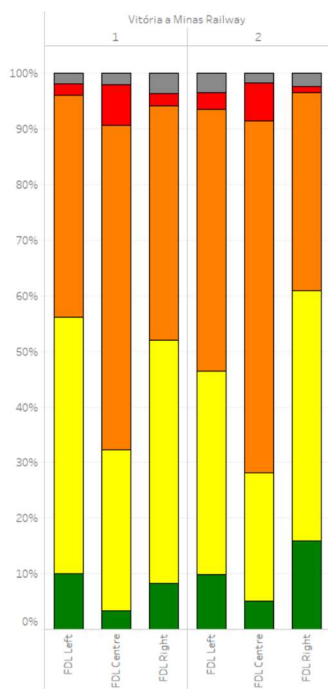
Fig. 5 Resumo dos resultados do Índice de contaminação do lastro (BFI) para as linhas 1 e 2.

3.2 Profundidade da camada contaminada (FDL)

Em geral, a profundidade detectada da camada contaminada foi maior nos ombros em comparação com o centro da via e os ombros externos estavam ligeiramente mais limpos que os internos. Via de regra, ambas as linhas mostraram profundidades similares de camada contaminada. A Fig. 6 apresenta um resumo dos resultados da FDL para as linhas 1 e 2:

Índice Nível de Profundidade de Contaminação		
Categoria	Descrição	Espessura (mm)
0	Indisponível	n/a
1	Muito ruim	<100
2	Ruim	100 - 175
3	Moderado	175 - 250
4	Bom	>250

(a)

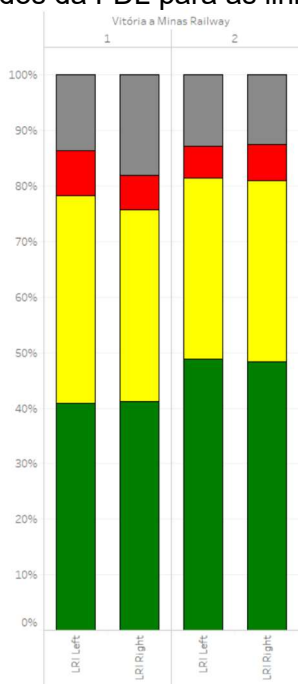


(b)

Fig. 6 Resumo dos resultados da Profundidade da camada contaminada (FDL) para as linhas 1 e 2.

3.3 Índice de rugosidade da camada (LRI)

Em geral, a linha 1 teve um percentual maior de via classificada como moderado a ruim do que a linha 2. A Fig. 7 apresenta um resumo dos resultados da FDL para as linhas 1 e 2:



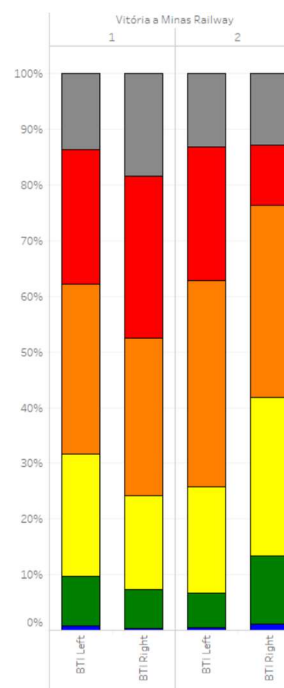
(a)

Fig. 7 Resumo dos resultados do Índice de rugosidade da camada (LRI) para as linhas 1 e 2.

3.4 Índice de espessura do lastro (BTI)

A existência de camada primária foi identificada em aproximadamente 85% da via e cerca de 60% da extensão da camada de lastro foi classificada como sendo “fina” ou “muito fina”.

A presença de segmentos com camada de lastro classificada como “fina” ou “muito fina” foi ligeiramente menor nos ombros externos. A Fig. 8 apresenta um resumo dos resultados de BTI para as linhas 1 e 2:



(a)

Índice de Espessura do Lastro		
Categoria	Descrição	Profundidade (mm)
0	Indisponível	n/a
1	Muito fino	<250
2	Fino	250 - 350
3	Reduzido	350 - 450
4	Conforme Projeto	450 - 600
5	Espesso	>600

(b)

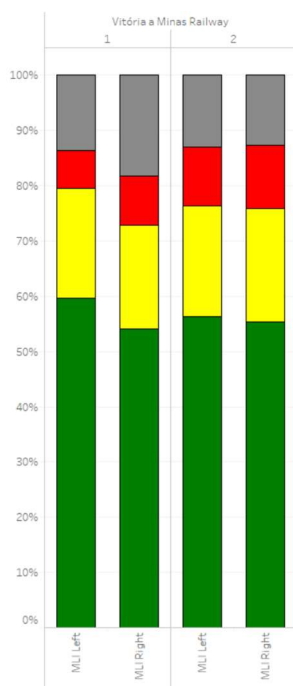
Fig. 8 Resumo dos resultados do Índice de espessura do lastro (BTI) para as linhas 1 e 2.

3.5 Índice de probabilidade de umidade (MLI)

Ambas as linhas possuíam níveis similares de probabilidade de umidade, com cerca de 8% da extensão classificada como “alta”. A Fig. 9 apresenta um resumo dos resultados de MLI para as linhas 1 e 2:

Índice de Probabilidade de Umidade		
Categoria	Descrição	Amplitude Relativa
0	Indisponível	n/a
1	Ruim	Alta
2	Moderado	Intermediária
3	Bom	Baixa

(a)



(b)

Fig. 9 Resumo dos resultados do Índice de probabilidade de umidade (MLI) para as linhas 1 e 2.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e indicam que o GPR pode ser utilizado como ferramenta para investigação e monitoramento do lastro e camadas subjacentes. Cabe destacar que informações provenientes de sondagens e poços de inspeção ajudam a melhor compreender o comportamento das ondas eletromagnéticas no meio e aumentam a precisão dos dados obtidos.

Pesquisas futuras terão como foco a compreensão da contaminação do lastro, sua influência sobre os dados obtidos com o do GPR e como esse conhecimento pode contribuir com o processo de tomada de decisões e desenvolvimento de soluções de restauração diferenciadas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] R. M. Morey, *Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities*, Washington, D. C.: National Academy Press, 1998a.
- [2] K. M. Scanlan *et al.*, A review of methods for estimating ballast degradation using ground-penetrating radar. ASTM Special Technical Publication, v. STP 1605, p. 54–76, 2018.
- [3] M. R. Clark *et al.* *Electromagnetic properties of railway ballast*, NDT and E International, v. 34, n. 5, p. 305–311, 2001.
- [4] T. Saarenketo, *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*, Tese (Doutorado) - Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Oulu, 2006.
- [5] N. J. Cassidy, *Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids*, IN: JOL, H. M. Ground Penetrating Radar Theory and Applications, 2009.
- [6] J. L. PORSANI, *Grounding Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de empregos em estudo geológico-geotécnico nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP*, [s.l.] Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita, 1999.
- [7] P. Anbazhagan, P. S. N. Dixit, T. P. Bharatha, *Identification of type and degree of railway ballast fouling using ground coupled GPR antenas*, Journal of Applied Geophysics, v. 126, p. 183–190, 2016.
- [8] S. Lahouar, *Development of data analysis algorithms for interpretation of ground penetrating radar data*, Tese (Doutorado) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2003.
- [9] ASTM. *D6432 - 11: Standard guide for using the surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
- [10] B. E. Barrett, *et al.* *Understanding the capabilities of GPR for the measurement of ballast fouling conditions*, Journal of Applied Geophysics, v. 169, p. 183–198, 2019.