

CATEGORIA 3

USO DO GROUND PENETRATING RADAR PARA INSPEÇÃO DE VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA

AUTORES

Paulo Gomes de Oliveira
Luciano Oliveira
Joabe Ruella da Silva

INTRODUÇÃO

Existem diversos meios de transportes disponíveis no mundo, sendo que os principais utilizados são o rodoviário, o ferroviário, o aéreo, o fluvial e o marítimo. A viabilidade de utilização desses modais depende de vários fatores, como finalidade do transporte, logística empregada, custos e benefícios econômicos, sociais, políticas entre outros.

HISTÓRIA DA FERROVIA

Segundo dados históricos, foi criado na Grécia Antiga, por volta de 600 A.C., o primeiro sistema de transporte que utilizou um mecanismo de carris que se movimentavam por trilhos. Com um percurso de aproximadamente 8 km, a estrada de Diolkos, região de Corinto, serviu para transportar cargas com o uso da tração animal [1].

Na Alemanha, no início do século XVI, foi desenvolvido um sistema de transporte formado a partir de trilhos de madeira e puxado por tração animal, conhecido como *wagon ways* (caminhos de vagões). Esse tipo de transporte era muito utilizado em locais de extração de minérios [1].

Os trilhos de madeira começaram a ser trocados por trilhos de ferro por volta do ano de 1776, caracterizando a *railway*, ou seja, a linha férrea, termo que acabou sendo difundido no século XIX. Foi no ano de 1804 que surgiu a primeira locomotiva movida com um motor a vapor, inovação criada pelo engenheiro britânico Richard Trevithick. Esse evento histórico ocorreu na cidade inglesa de South Wales, quando foram carregadas 18 toneladas de ferro e 70 homens por 14 km. Quando a velocidade chegou aos 8 km/h os trilhos não resistiram e quebraram [1].

No século XIX que as primeiras máquinas a vapor começaram a ser melhor aplicadas na movimentação de cargas e composições sobre os trilhos, dando origem às ferrovias.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Pouco tempo depois, as ferrovias passaram a ser desenvolvidas para o transporte de passageiros, definindo um novo padrão de transporte por via terrestre [1].

Com o avanço da tecnologia, as locomotivas ganharam mais força e velocidade, proporcionando o aumento do número de vagões e da quantidade de carga transportada. A partir dessa época foram ocorrendo diversas melhorias técnicas nos trilhos e nas locomotivas. As ferrovias estabeleceram uma perspectiva diferente sobre a ideia de transporte de cargas mais pesadas e por longas distâncias [1].

Com a possibilidade de também ser aplicada na mobilidade urbana, as linhas férreas passaram a ser uma opção para o transporte de passageiros. A Inglaterra foi o primeiro país a usar essa modalidade, inaugurando em 1812 na cidade de Leeds a primeira composição para transportar exclusivamente passageiros [1].

O ano de 1830 ficou marcado como o início da Era das Ferrovias, quando foi inaugurada a primeira linha férrea de longa distância para passageiros em escala comercial e com horários regulares, entre as cidades inglesas de Liverpool e Manchester. Em 1863 a Inglaterra criou a primeira linha subterrânea, integrando um sistema de transporte metropolitano e que mais adiante foi chamado de *metroway* [1].

Entre o final da década de 1870 e início da década de 1880 foram desenvolvidos os primeiros sistemas férreos movidos a eletricidade, criado por engenheiros alemães. A primeira linha férrea usando eletricidade, conduzida por cabos suspensos, foi no ano de 1883, entre as cidades de Mödling e Hinterbrühl Tram na Áustria [1].

O período histórico conhecido como neocolonialismo ocorrido final do século XIX, destaca o momento quando as nações europeias expandiram suas explorações coloniais. Ao contrário das nações ricas, onde as ferrovias foram construídas de maneira a integrar seus territórios, as ferrovias estabelecidas nos países explorados tiveram sua estrutura projetada para interligar as áreas produtoras de matérias-primas em direção dos portos, para facilitar o escoamento desses produtos [1].

No Brasil, as linhas férreas também tiveram essa característica, principalmente por conta do ciclo do café, principal produto de exportação do país durante a segunda metade do século XIX e início do século XX. A primeira ferrovia brasileira foi inaugurada em 1854, entre o Porto de Mauá e a cidade de Fragoso, no Rio de Janeiro, sendo idealizada pelo empresário e banqueiro Irineu Evangelista de Souza, muito conhecido pelo título de Barão de Mauá [1].

(Texto extraído de "Breve História das Ferrovias", autor Júlio César Lázaro da Silva).

E desde então, foram construídas várias ferrovias no Brasil, chegando a aproximadamente 29 mil quilômetros de extensão em 1922. Nos anos seguintes as ferrovias particulares (nacionais e estrangeiras) foram encampadas pelo governo federal e a gestão delas foi feita através dos seguintes órgãos públicos: IFE – Inspeção Federal de Estradas, posteriormente foi criado o Departamento Nacional de Estradas de Ferro – DNEF, e por último a Rede Ferroviária Federal SA – RFFSA, criada em 1957, quando

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



existiam 37 mil quilômetros de ferrovia no Brasil, sendo que a partir de 1992 ocorreu a desestatização das ferrovias, contando hoje com 15 concessões.

Neste interim, em 1902 foi criada a Companhia Estrada de Ferro Vitória a Minas, que foi absorvida em 1939 pela Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, hoje Vale SA.

A ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS – EFVM

Para melhor entendimento do estudo a ser apresentado, será realizada uma breve descrição da Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM, demonstrando sua malha e seus componentes básicos. Ela consiste basicamente de um corredor de exportação de minério de ferro e produtos agrícolas que liga o porto de Tubarão, em Vitória no Espírito Santo, à região central do Estado de Minas Gerais, até a cidade de Belo Horizonte. São aproximadamente 900 km de extensão de ferrovia com bitola métrica (figura 1) que transportam em média 128 milhões de toneladas úteis de carga e aproximadamente um milhão de pessoas por ano.



Figura 1 – Mapa Geral da Estrada de Ferro Vitória a Minas
Fonte: VALE (2010).

O objetivo inicial da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) era o transporte de minério de ferro extraído no município de Itabira até o porto de Vitória. Em 1994, a ferrovia alcançou a capital mineira, configurando-se como a única no Brasil a fornecer trens de passageiros com saídas diárias a longas distâncias.

A EFVM é dividida em linha tronco e ramais tendo as seguintes características:

- **Linha Tronco** é a linha principal que compreende o trecho entre Tubarão (TU) e Itabira (IT) e é dela que se derivam os ramais. Possui 540 km de ferrovia em linha dupla e coleta minérios dos outros ramais para exportação além de abastecer o Vale do Aço, onde estão localizadas grandes siderúrgicas, uma delas é a Usiminas.
- **Ramal de Fabrica** se refere ao trecho que liga a Linha Tronco, próximo da cidade de Nova Era (DDC), à Mina de Fábrica que fica no município de Congonhas. Este trecho possui 168 km, sendo 62 km compostos por linha dupla. Neste ramal estão localizadas as minas de Água Limpa (Rio Piracicaba), Fazendão, Alegria (Mariana), Timbopeba e Fabrica (Ouro Preto). Por ele também são transportados insumos e produtos siderúrgicos para a Açominas e faz interface com a MRS.
- **Ramal de Belo Horizonte (ou Ramal de BH)** possui 88 km de linha, onde 20 km destes são formados por linha dupla. Este ramal faz a ligação da EFVM com a região metropolitana de Belo Horizonte. Esta parte da ferrovia foi adquirida da extinta Rede Ferroviária Federal S/A no início dos anos 90. O Ramal de BH é um trecho de ferrovia que se inicia no município de Santa Bárbara e vai até o município de Santa Luzia. Neste ramal estão localizadas as Minas de Brucutu, Gongo Soco, e possui interface com a Ferrovia Centro Atlântica (subsidiária da VLI) para o transporte de grãos.
- **Ramal de Aracruz** possui 47 km de extensão, ligando a EFVM ao porto de Aracruz, o ramal é exclusivamente utilizado para o transporte de toretes de eucalipto e celulose.

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso a ser apresentado trata-se de um projeto com o objeto de mostrar os resultados do estudo de investigação das condições geotécnicas do lastro ferroviário da EFVM através de ensaio geofísico de superfície com a utilização do Ground Penetrating Radar (**GPR**) que foi desenvolvido na EFVM em parceria com as empresas ZETICA e BRFERROVIA.

Conforme Indraratna, Salim, & Rujikiatkamjorn (2011), o GPR é um método de ensaio não destrutivo que pode ser realizado mesmo em altas velocidades. Ele pode detectar sinais eletromagnéticos refletidos das camadas da subestrutura da via.

Importante salientar que a utilização do GPR para identificação das características físicas das camadas constituintes da estrutura ferroviária já está sendo usada em países da Europa e Ásia, de forma contínua, há mais de 20 anos, desde o início dos anos 90.

Diante disto, pode-se imaginar tamanha importância dessa tecnologia quando a maior linha de transporte de carvão da China adquiriu este sistema para atuar permanentemente em um trem de inspeção de alta velocidade (120 km/h).

Através da análise da propagação do sinal e da variação do seu ângulo de incidência é possível detectar a espessura de cada camada do lastro, detectar a presença de umidade, avaliar a contaminação do lastro dentre outros resultados.

As figuras a seguir demonstram um modelo teórico do seu funcionamento e exemplos de resultados que podem ser obtidos.

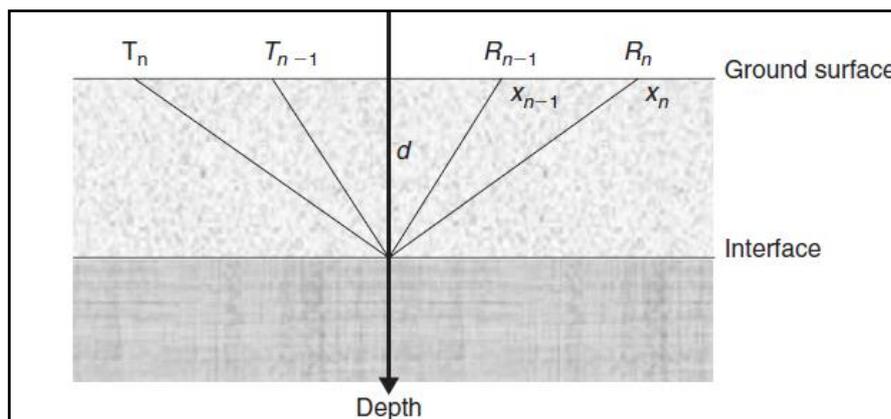


Figura 2 – Esquema representativo do funcionamento do GPR demonstrando que há as fontes do sinal eletromagnético (T_n , T_{n-1}) e os radares receptores (R_{n-1} , R_n) em um arranjo típico. (Indraratna, Salim, & Rujikiatkamjorn, 2011).

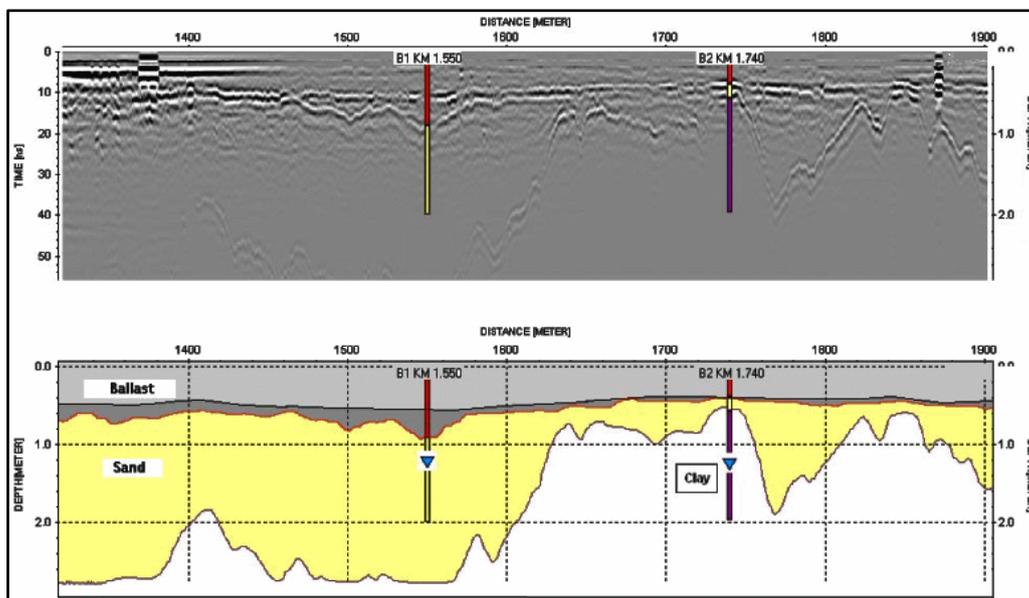


Figura 3 – Radargramas (perfis de reflexão gerados pelas ondas eletromagnéticas) obtidos por levantamentos através de GPR.

A imagem Superior demonstra os resultados de um levantamento bruto enquanto que a inferior demonstra a imagem após processamento demonstrando a espessura das camadas e a composição do subleito. (Ground Control - Geophysik & Consulting GMBH, 2011).

Geralmente, os equipamentos que compõe o GPR são de pequeno porte, podendo ser instalado em qualquer veículo ferroviário ou rodoferroviário.

Os dados gerados podem ser utilizados pelas equipes de engenharia, confiabilidade e manutenção da EFVM para auxiliar no gerenciamento da manutenção do lastro e da geometria da via permanente, além de servir para suportar as seguintes atividades:

- Gerenciamento da espessura da camada de lastro na EFVM;
- Definição da estratégia de desguarnecimento de lastro para a EFVM;
- Avaliação dos resultados dos trabalhos de desguarnecimento de lastro, correção geométrica e renovação de linha da EFVM;
- Identificação de locais com possíveis problemas de infraestrutura.

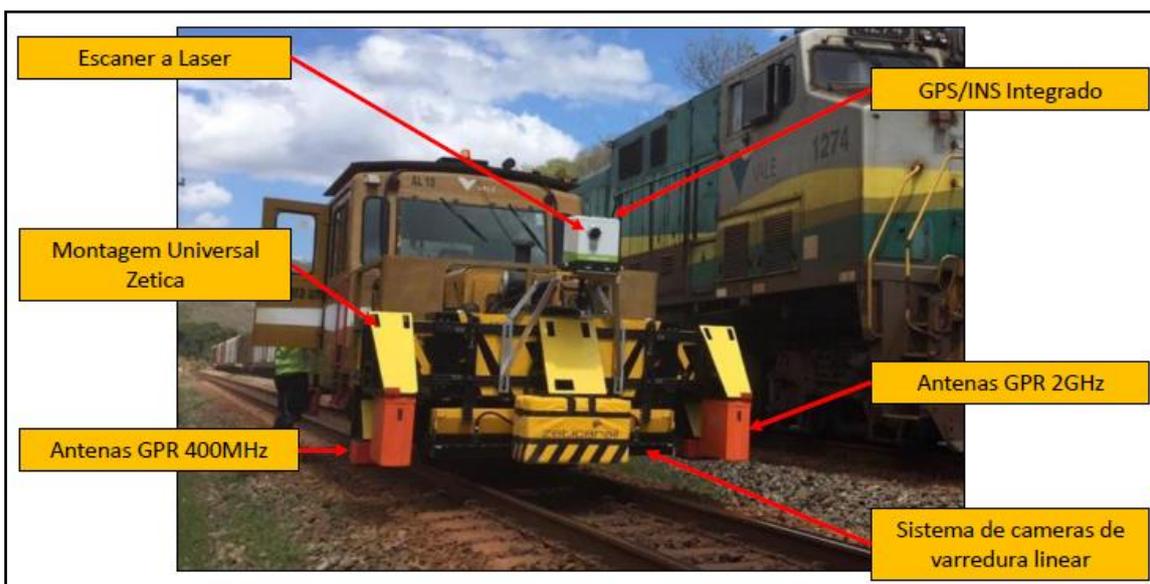


Figura 4 – Layout das instalações das antenas e sensores de GPR em um veículo auto de linha da EFVM

O objetivo específico é demonstrar os resultados preliminares da inspeção de lastro realizada na EFVM em outubro de 2019, utilizando o GPR.

O serviço contemplou a inspeção de 297 quilômetros de linha férrea com início na H 38 – km 231+000 (CONSELHEIRO PENA) e término na H 60 – km 398+000 (FREDERICO SELLOW), sendo 145 quilômetros na linha 01 e 152 quilômetros na linha 02, conforme detalhamento abaixo:

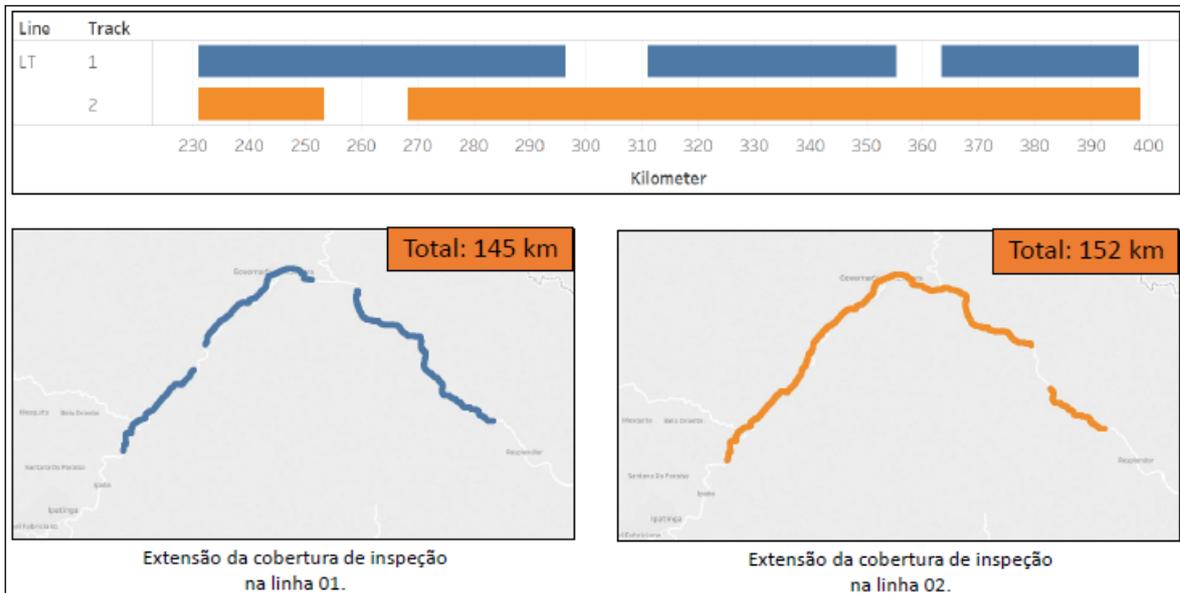


Figura 5 – Extensão dos trechos inspecionados com GPR

A inspeção foi realizada entre os dias 14 e 18 de outubro de 2019 e os relatórios finais foram entregues nos dias 09 e 10 de dezembro de 2019. Foram avaliados os seguintes parâmetros:

- Espessura de lastro limpo,
- Profundidade modelada das camadas da via,
- Índice modelado da contaminação do lastro (*Fouling Index*),
- Locais com lama na superfície,
- Drenagem da via e métricas de volume de lastro.

A inspeção foi realizada entre os dias 14 e 18 de outubro de 2019 e os relatórios finais foram entregues nos dias 09 e 10 de dezembro de 2019.

Nessa inspeção foi utilizado o sistema SIR-30 da empresa Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI), com três antenas com frequência central (fc) de 2 GHz e três antenas com frequência central de 400 MHz. Essas antenas foram instaladas suspensas a uma altura entre 30 e 45 cm acima do dormente, com o objetivo de evitar danos ao equipamento, e posicionadas sobre o eixo da linha e sobre os ombros do lastro, conforme mostrado na Figura 4.

Segundo informações da fabricante, o sinal pode penetrar até uma profundidade de 0,75m para a antena de 2 GHz e 4m para a antena de 400 MHz (GSSI, [2019]), dependendo das condições do lastro e das camadas subjacentes.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a inspeção e aquisição de dados através do GPR, foi iniciada uma análise dos dados fornecidos, onde pôde se constatar que o GPR é uma ferramenta que apresenta bons resultados para a gestão do lastro pois apresenta, de forma inovadora, uma visão geral das condições reais encontradas na ferrovia.

Outro ponto que merece destaque é que a inspeção com GPR ocorreu a uma velocidade média de 40 km/h, realizando assim, em 5 dias o que seria necessário semanas no método tradicional (coleta de amostra e ensaios laboratoriais).

O gráfico da via, mostrado na figura 7, fornece uma indicação visual simples da distribuição dos resultados por categorias, ajudando a realçar áreas de potencial interesse, organizado por tipo de métrica e segmento de linha.

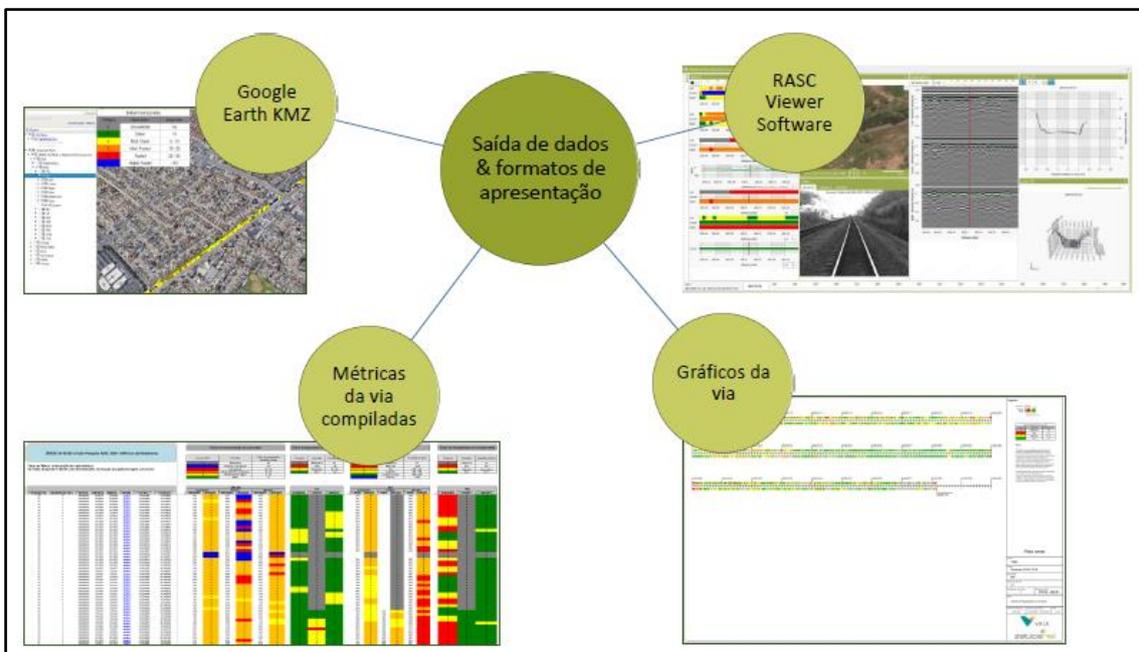


Figura 6 – Forma de entrega dos resultados da inspeção da via com GPR

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

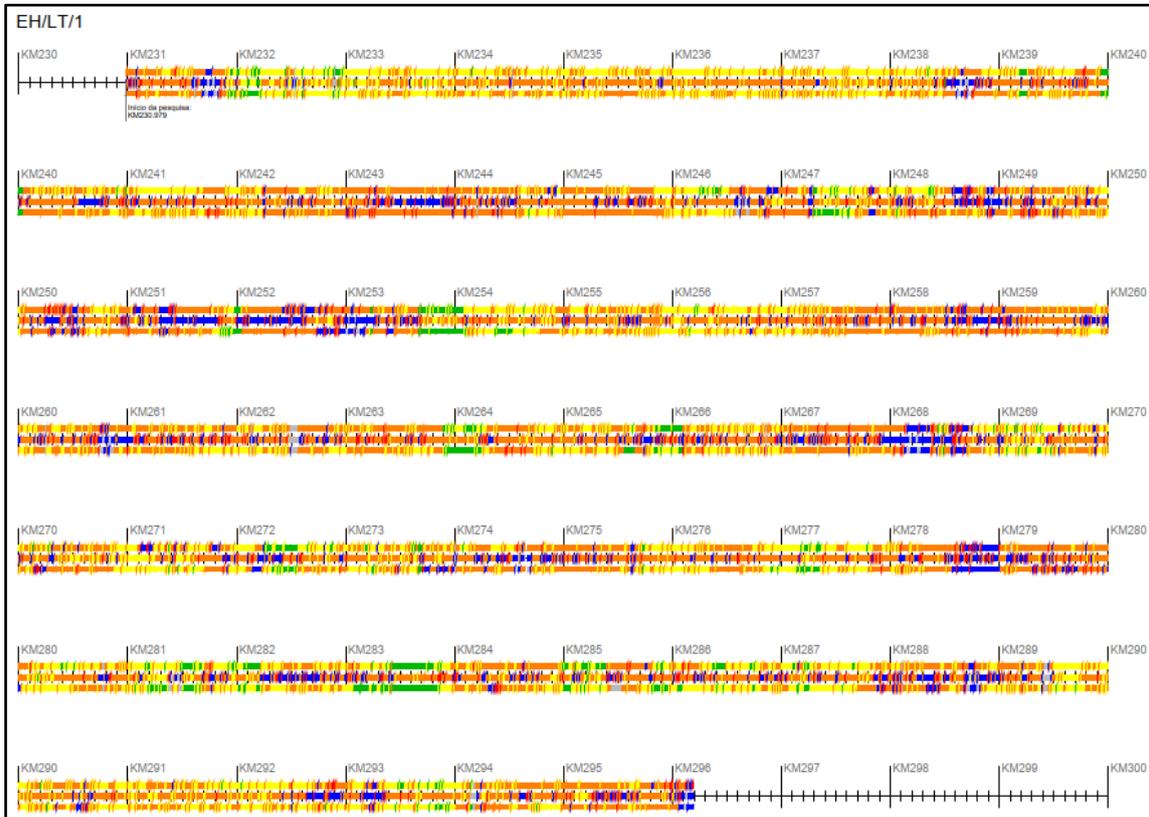


Figura 7 – Resultados com a inspeção do GPR

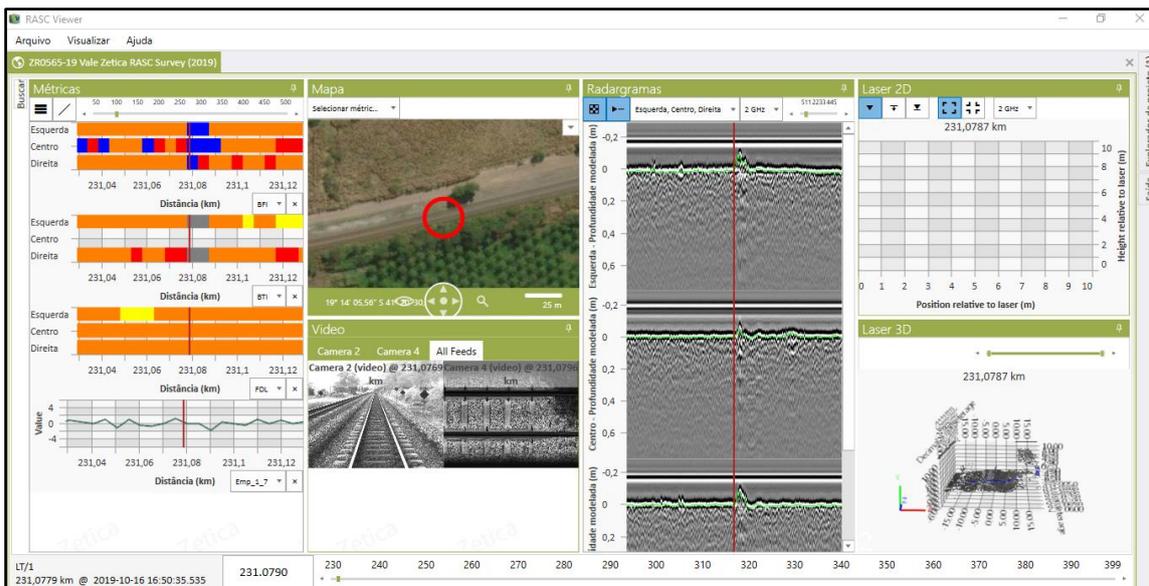


Figura 8 – Tela do Rasc Viewer (programa para visualização dos dados)

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

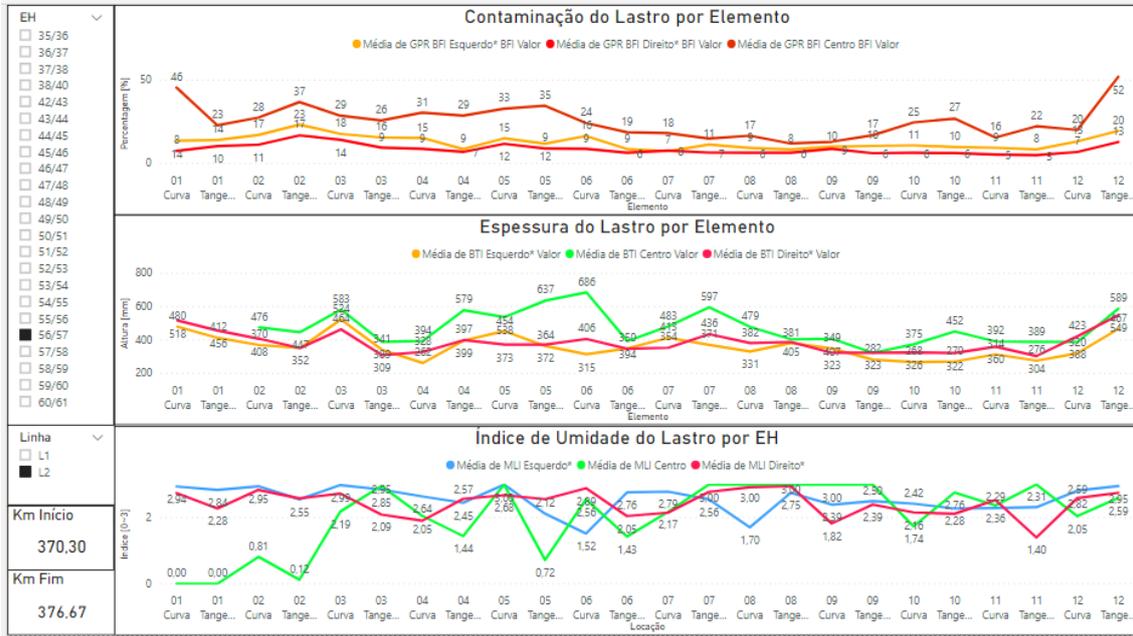


Figura 9 – Relatório via Power BI sobre o detalhamento dos resultados da inspeção do GPR por segmentos da EFVM

Um exemplo pode ser visto no gráfico abaixo onde o Índice de contaminação de lastro - Selig (BFI) nas duas linhas inspeccionadas está apresentado:

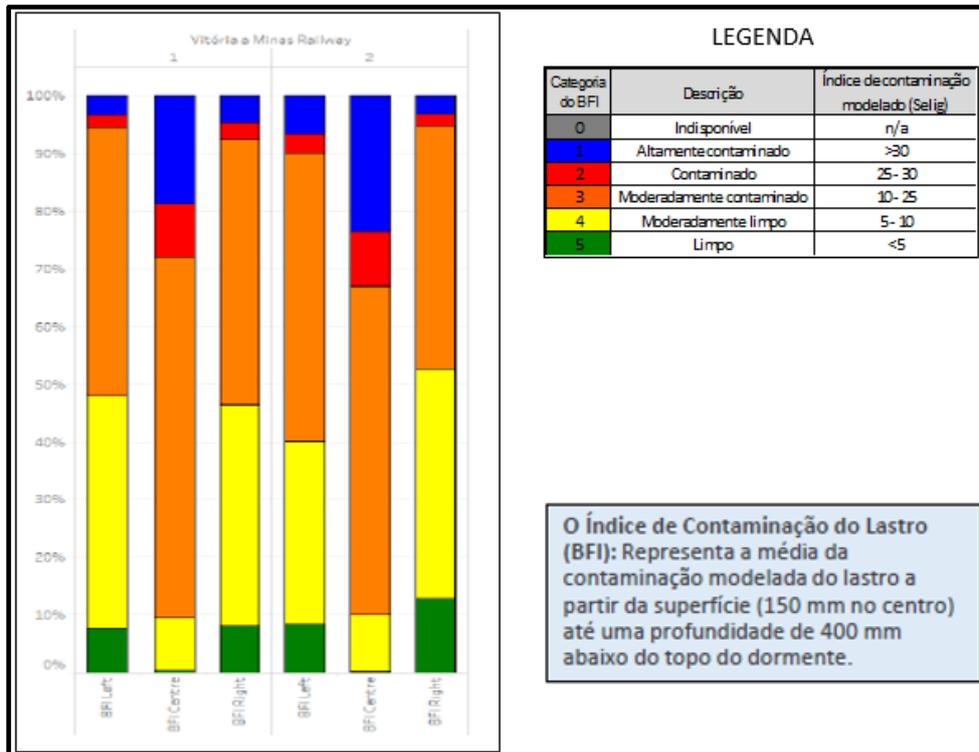


Figura 12 – Gráfico com o índice de contaminação do lastro

O gráfico acima mostra um resumo dos resultados da contaminação das linhas 1 e 2 e nele pode-se observar que:

- 30% da linha inspecionada foi classificada como contaminada a altamente contaminada no centro da via, enquanto menos de 10% foi classificada como limpa ou moderadamente limpa.
- Os ombros do lastro estão geralmente mais limpos que o centro, com ~50% tendo sido classificado como limpo ou moderadamente limpo.
- De forma geral a linha 2 é levemente mais contaminada que a linha 1.

Em alguns pontos da ferrovia onde foi realizada a inspeção de lastro com GPR foi realizada a coleta de amostra de lastro e ensaios laboratoriais para determinar o índice de contaminação do lastro e comparar com os valores obtidos pela inspeção com GPR.

Os valores encontrados nos dois métodos foram próximos, podendo assim, certificar os resultados obtidos com o uso de GPR nas inspeções de lastro ferroviário.



Figura 10 – Coleta de lastro realizada no método tradicional para obter o índice de contaminação do lastro



Figura 11 – Ensaio laboratorial de lastro realizado no método tradicional para obter o índice de contaminação do lastro

Outro aspecto importante que pode ser alcançado com esse projeto, embora intangível, é a melhoria nas condições de trabalho das equipes nas frentes de serviço, pois não será mais necessário realizar coletas manuais de lastro para a realização de ensaios laboratoriais.

Isso proporcionará maior satisfação dos colaboradores além de uma maior assertividade nos resultados devido ao fato de que esses resultados poderão ser visualizados de forma ampla e não de uma forma localizada.

CONCLUSÃO

Neste projeto foi possível avaliar a aplicabilidade da tecnologia GPR como ferramenta auxiliar à avaliação não destrutiva das condições do lastro ferroviário. Por meio da antena de 400MHz e 2 GHz foram determinados os índices de contaminação de lastro (fouling index), a espessura do lastro, o índice de umidade, dentre outros, que são parâmetros necessários para uma boa gestão da manutenção da via permanente ferroviária.

Dessa forma, baseado nos resultados apresentados, foi constatado que o uso do GPR representa uma ferramenta promissora na detecção rápida e contínua, sem interrupções de tráfego, assim como, na priorização racional e sistemática dos problemas da via relacionados a defeitos no lastro e plataforma.

Assim, os próximos passos a serem realizados dentro do projeto são:

- Realização de inspeção em toda a extensão da EFVM
- Implantação de uma rotina de inspeção bienal do lastro utilizando o GPR;
- Implantação de um sistema de gestão do lastro ferroviário na EFVM definindo a sua vida útil na estratégia de manutenção em função dos resultados do GPR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SILVA, Júlio César Lázaro da. "Breve História das Ferrovias"; Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/ferrovias.htm>>. Acesso em 26 de junho de 2020.

[2] Indraratna, Salim, & Rujikiatkamjorn, 2011

[3] Geophysyk & Consulting GMBH, 2011