

## **Radar de Penetração no Solo como parte de uma estratégia holística de inspeção de plataforma ferroviária**

**Asger Eriksen<sup>1</sup>, Jon Gascoyne<sup>1</sup>, and Ron Fraser<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Zetica Rail, <sup>2</sup>Railtrak Systems

### **Resumo**

Mudanças significativas podem ocorrer em diferentes estágios ao longo da vida de uma plataforma lastrada sob carregamentos repetidos. Isso inclui, mas não se limita à geração de finos que podem preencher os vazios no lastro, a defeitos no subleito que levam à penetração de finos através de bombeamento e ao abatimento localizado do subleito desenvolvendo laqueados (bolsões de água).

As estratégias tradicionais de inspeção de plataforma baseadas em inspeções visuais e medições de geometria são geralmente indicam tardiamente problemas relacionados à qualidade do subleito e do lastro. Além disso, podem fornecer diagnósticos falsos da causa raiz do problema, resultando em manutenções inapropriadas e pouco viáveis economicamente.

O monitoramento da plataforma lastrada com o radar de penetração no solo (GPR) permite ser mais assertivo na definição da intervenção de manutenção de forma rápida e economicamente eficiente. A combinação das medições de geometria de via com o GPR fornece uma informação singular, baseada em condição do componente, para planejar de forma holística a estratégia de gestão do lastro e da plataforma.

Os elementos mais significativos desta estratégia incluem:

- Integração efetiva das métricas de geometria de via (superfície) e GPR (subsuperfície), e
- Geração de relatório de defeitos na plataforma, incluindo lastro contaminado e defeito no subleito.

Os benefícios dessa abordagem são diversos:

- Priorização precisa do defeito da via e determinação da extensão dos trabalhos corretivos necessários,
- Redução do número de furos de sondagem e duração dos intervalos de circulação necessários para a investigação da qualidade do lastro,
- Direcionamento de vagões de lastro e máquinas de socaria e desguarnecimento para os locais em que são mais necessários,
- Economia de lastro devido à distribuição otimizada;
- Redução do número de intervenções durante a vida do lastro através do planejamento da manutenção por condição de degradação, e
- Monitoramento da performance das equipes de manutenção de lastro.

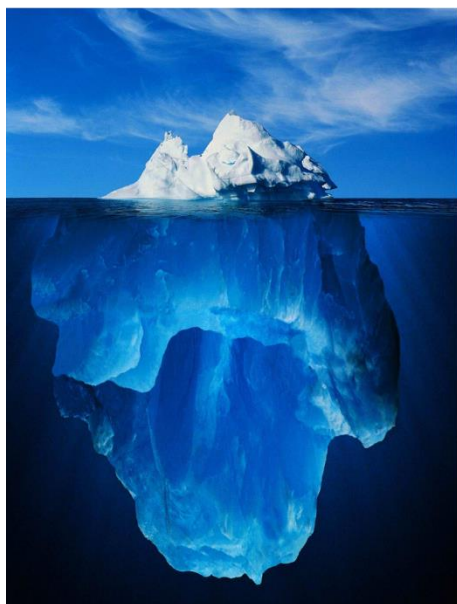
### **1. INTRODUÇÃO**

A plataforma lastrada é o tipo mais comumente usado na construção de ferrovias no mundo. A camada de lastro é dimensionada para absorver a maior parte do impacto e energia dinâmica da composição ferroviária e para distribuir os esforços de carregamento de forma homogênea ao longo da camada de subleito a fim de preservar uma circulação suave. Para tanto, é importante que a camada de lastro permaneça livre de finos. De forma geral, quanto maior a quantidade de

finos, menor a elasticidade do lastro e mais suscetível ele será a reter água, reduzindo sua capacidade de suporte. Além disso, o lastro contaminado causa uma distribuição de pressão instável no subleito.

Uma camada drenante de lastro não contaminado, com a altura necessária, é um componente crítico para manter uma plataforma estável e segura. Uma significativa discrepância dos valores geométricos de projeto indicam a presença (não a causa) de uma plataforma instável e instiga a manutenção com socaria para recuperação do alinhamento e nivelamento. Defeitos recorrentes de geometria de via demandam pontos de sondagem investigativa a fim de determinar a causa raiz do problema, o que deve ir além dos limites da anomalia medida. Inspeções visuais são geralmente utilizadas de forma complementar à geometria de via para ajudar a identificar área problemáticas mas estas também apenas visualizam manifestações superficiais de problemas na via; problemas estes que consistentemente estão associados a causas mais profundas (figura 1). Inspeções visuais são especialmente problemáticas para identificar contaminação de lastros geralmente escondidas da vista ou determinar a extensão real da contaminação.

O radar de penetração no solo (GPR) como o sistema Advanced Rail Radar (ZARR) da Zetica Rail é uma tecnologia comprovadamente eficaz para mapear mudanças na espessura real e na qualidade do lastro e nas camadas mais profundas ao longo da malha ferroviária. A combinação das medições de geometria de via com o GPR provê uma informação singular, baseada em condição do componente, para planejar de forma holística a estratégia de gestão do lastro e da plataforma.



Ponta do Iceberg detectada pelas inspeções visuais e dados de geometria de via. Geralmente levam a uma manutenção reativa

---

A maior parte do ativo está escondido, a informação pode apenas ser inferida pela geometria de via ou por pontos de sondagem. O GPR revela a condição da plataforma e as causas-raiz das falhas de via, levando a uma manutenção mais efetiva economicamente.

*Figura 1 - Analogia do Iceberg*

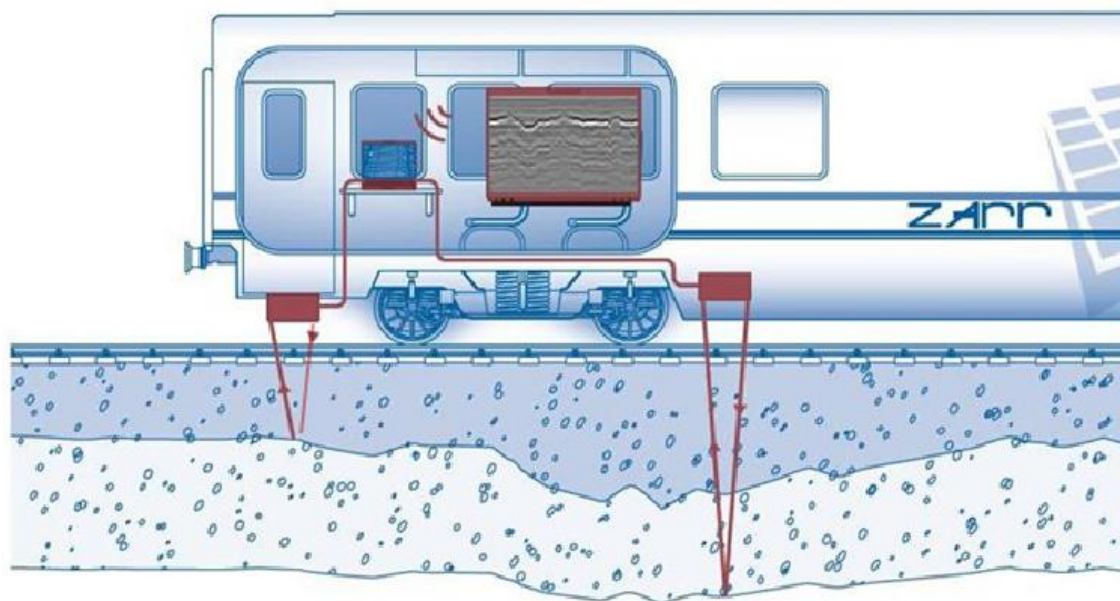


Figura 2 - Aplicação de GPR em um trem de inspeção

Os dados obtidos com o diagnóstico do GPR são, de forma resumida, as informações que podem ser obtidas da altura e profundidade das interfaces identificáveis, chamadas parâmetros de camada, e as informações de qualidade da camada de lastro, na forma de um índice de contaminação do lastro.

As interfaces da plataforma manifestam-se como uma reflexão linear em um dado de GPR e irá ocorrer apenas onde existe um contraste nas propriedades elétricas dos materiais em ambos os lados dos limites, como entre uma camada de lastro limpo e o subleito ou lastro limpo e uma camada de lastro contaminado. O Índice de contaminação de lastro do GPR é baseado no nível de dispersão do sinal dentro da camada de lastro e é independente da camada de lastro.

### 1.1. Parâmetros de camada do GPR

Exemplos de parâmetros de camada do GPR incluem o seguinte:

- Excesso de profundidade de lastro (EPL) representa a medida de quão boa está a espessura da primeira camada da plataforma conforme as especificações de projeto do cliente. Um mínimo de espessura de lastro é necessário abaixo dos dormentes de forma a fornecer o suporte correto à linha e a drenagem adequada.
- O Índice de rugosidade da camada (IRC) indica o grau de variação da espessura da primeira camada do lastro em um comprimento específico (por exemplo, 5m e 20m). O IRC é projetado para realçar áreas onde a espessura da camada muda rapidamente. Estas variações rápidas podem indicar que há uma falha no subleito ou uma camada de água aprisionada sobre o subleito.

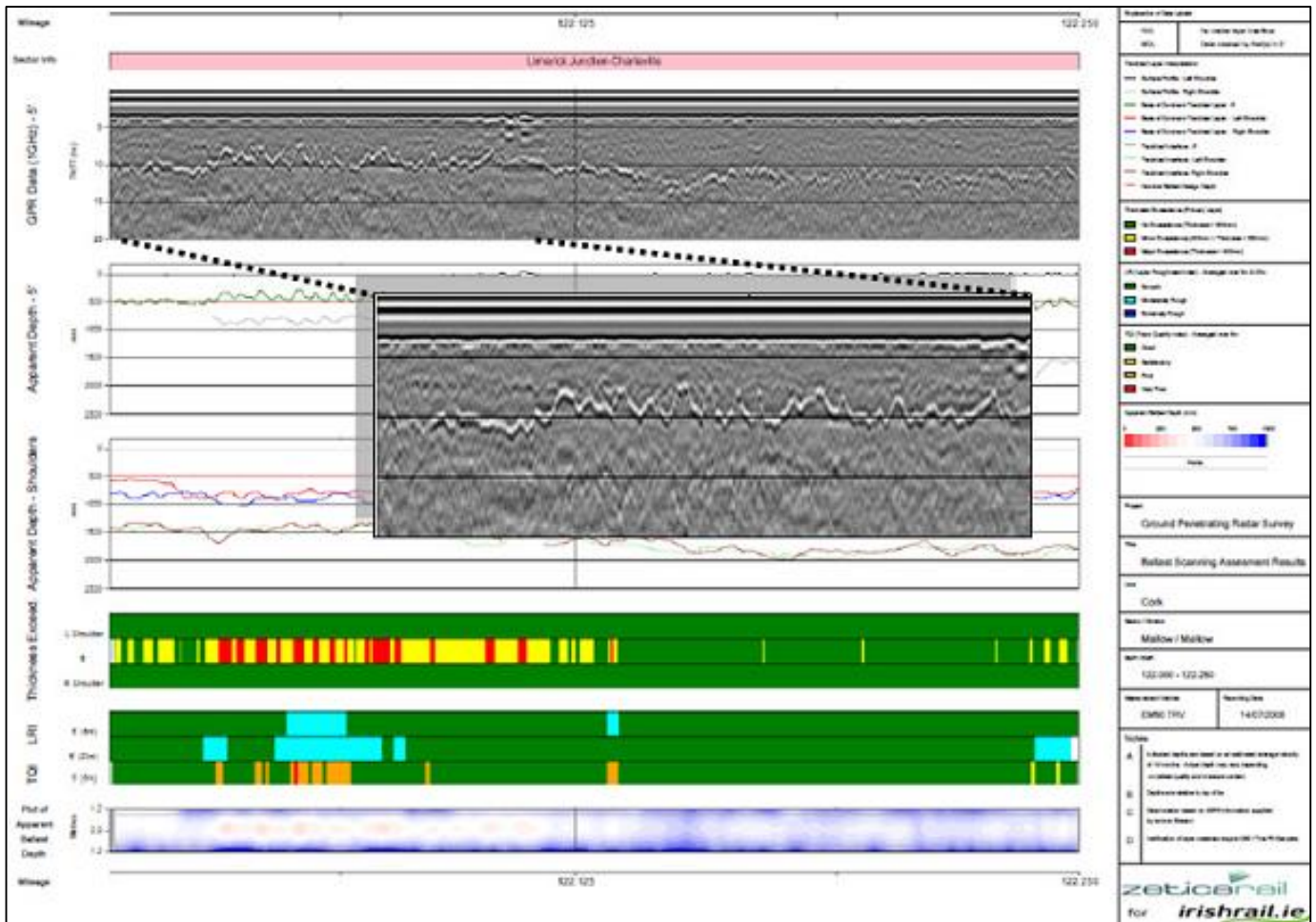


Figura 3 - Exemplo de painéis de dados mostrando (de cima para baixo) - exemplo de radargrama, camadas digitalizadas no centro da via, camadas digitalizadas nos ombros do lastro, gráfico colorido mostrando a espessura do lastro contra os limites definidos (EPL), Índice de Rugosidade da Camada (IRC), um índice combinado de espessura do lastro com rugosidade, e um mapa contornado de profundidade para lastro contaminado/subleito. Vista expandida do radargrama mostra um exemplo de erosão no subleito.

## 1.2. Contaminação de lastro do GPR

Como detalhado em Zhang et al [8], a Zetica Rail desenvolveu um método para gerar um Índice contínuo de contaminação de lastro (ICL) a partir dos dados do GPR, baseado na análise da resposta de dispersão de sinais observados usando uma antena de alta frequência (2 GHz). A calibração da saída de dados para o padrão industrial de índice de contaminação foi possível graças às análises detalhadas de amostras de lastro e distribuição de tamanho de partículas (DTP). Nos Estados Unidos, o ICL foi calibrado para o Índice de Contaminação de Selig (figura 4) e recentemente foi calibrado para o Índice de Contaminação de Porcentagem de Vazios (PVC) da Queensland National. Este último é considerado mais adequado para situações onde a contaminação de lastro é predominantemente associado a finos de carvão e pó.

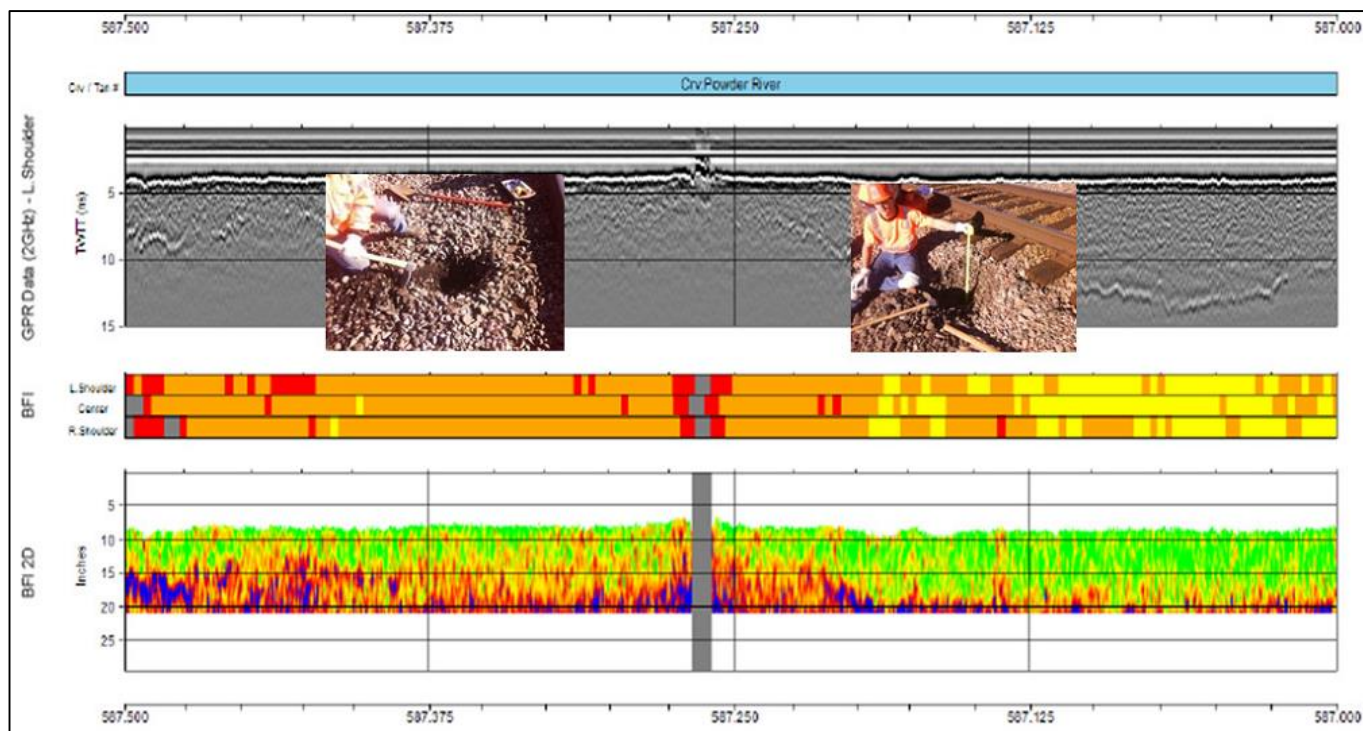


Figura 4 - Plotagem mostrando um radargrama em escala de cinza, gráficos coloridos de Índice de Contaminação de Lastro 1D para cada ombro e centro da via e um ICL 2D para o ombro direito que detalha a profundidade da contaminação. Fotos do local mostram a condição do lastro coberto.

### 1.3. Combinação de GPR e Geometria da Via

A combinação dos Índices provenientes do GPR com os dados de Geometria da Via fornecem um meio eficiente de identificar aquelas falhas de geometria da via que estão associadas com problemas mensuráveis subsuperficiais da plataforma e ajudam a determinar a extensão do problema. Sendo possível também realçar áreas com integridade moderada ou pobre da plataforma que ainda não se manifestaram como um defeito de geometria na via.

Métodos de combinação de conjunto de dados podem ser tão simples como a plotagem gráfica (figura 5), e podem ser utilizados pelo engenheiro da via para identificar manualmente correlações, ou desenvolver um índice combinado como o Índice QI2 desenvolvido pela Irish Rail a partir de diagnóstico detalhado com GPR na Dublin-Cork em 2008.

O Índice IQ2 é uma matriz de regras simples (tabela 1) que combina os resultados de índices de qualidade de geometria de via com um índice de qualidade de via (IQV) oriundo de um conjunto de parâmetros de contaminação e camada do GPR. O índice IQ2 é ponderado a favor dos resultados de geometria da via a fim de garantir que qualquer defeito de geometria de via severo pré-existente seja realçado (ex, um índice IQ de geometria de via de 1 não é afetado pelo índice CTQI). Os resultados são comumente apresentados na forma de gráficos de via, o que permite identificar facilmente trechos problemáticos da linha (figura 6).

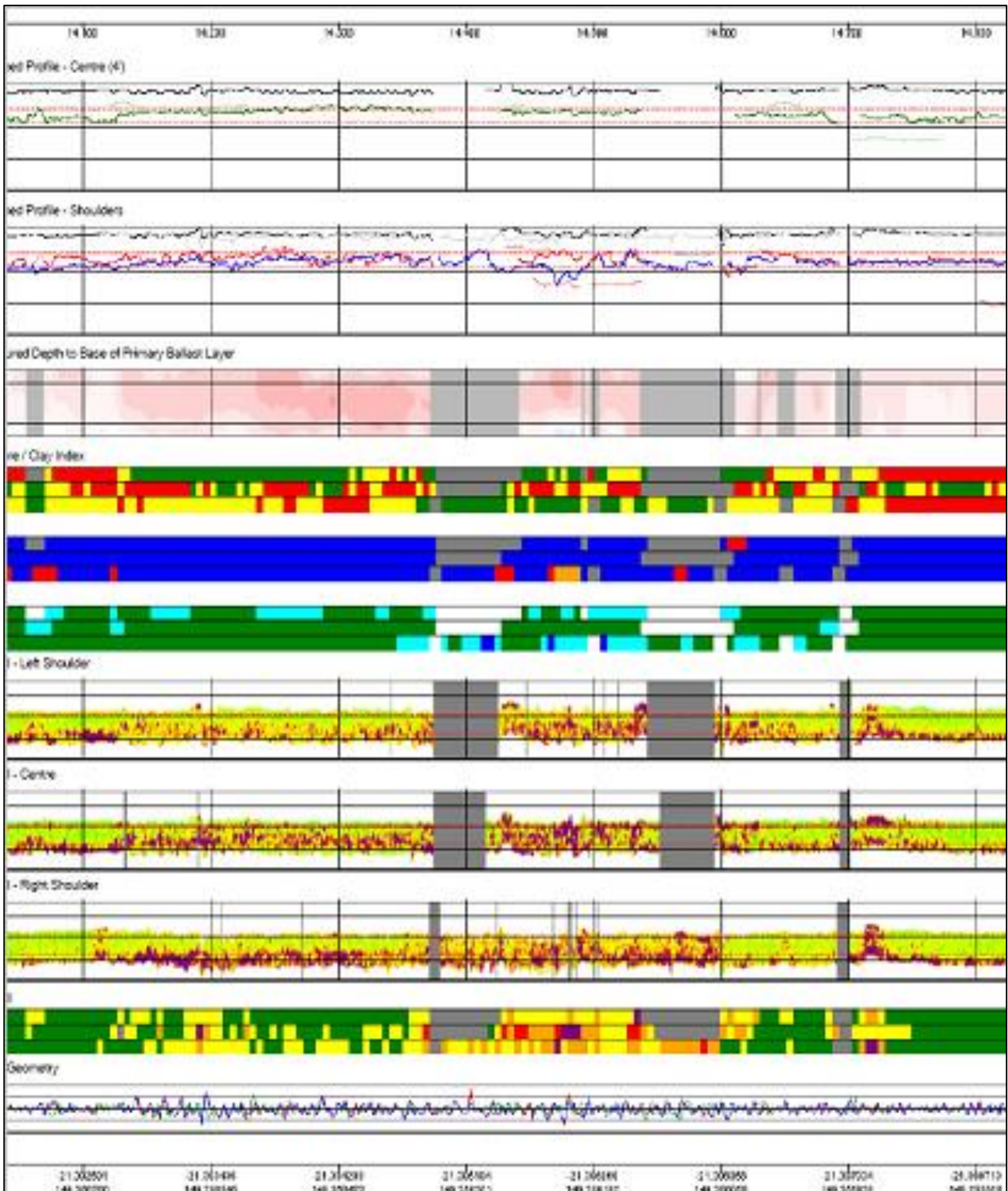


Figura 5 - Painéis de dados mostrando relatórios (de cima para baixo) - camadas no centro, camadas nos ombros, um mapa de contorno de profundidade para lastro contaminado/subleito, gráficos coloridos de linha mostrando índice de umidade, espessura de lastro contra determinados limites, e rugosidade da camada de lastro, plotagem do ICL em 2D, gráficos coloridos de linha do ICL em 1D, e geometria da via (Nivelamento longitudinal + Empeno). Metragem linear e coordenadas GPS.

Tabela 1 - Matriz de regras do IQ2

QI2 Category Matrix		GPR-derived CQTI			
		1	2	3	4
Track	1				
	2				
Geometry	3				
	4				

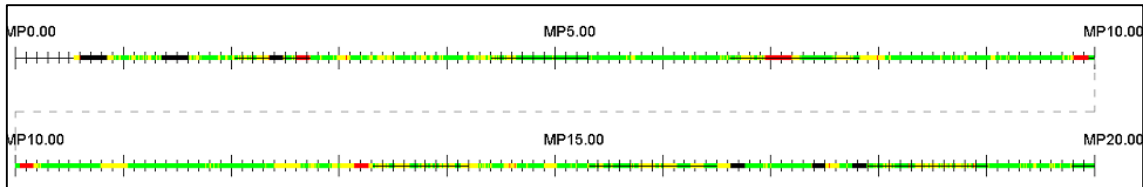


Figura 6 - Gráfico de via detalhando o resultado do IQ2 para uma seção de via de 20km. O gráfico fornece um método conveniente para identificar rapidamente aquelas áreas em que a via necessita de intervenção.

#### 1.4. Recomendação de ordem de serviço (ROS)

Este entregável singular é um método baseado em regras para determinar onde e como tratar a plataforma, baseado em parâmetros combinados oriundos de GPR (camada e ICL) com dados de geometria da via. Cada uma das matrizes de regras pode ser customizada de acordo com o método de trabalho do cliente. Customizações podem incluir a especificação de níveis de contaminação para intervenção para desguarnecedoras e as configurações de limites de excesso de profundidade de lastro para garantir que a desguarnecedora só irá trabalhar onde a espessura de camada de lastro é suficiente.

Atualmente cinco tipos de manutenção podem ser incluídos:

- Desguarnecimento
- Desguarnecimento de ombro
- Socaria
- Recondicionamento da via
- Trabalhos de drenagem

Os tipos de manutenção podem ser mutuamente independentes ou exclusivos.

Os formatos de dados de saída incluem tabelas resumidas detalhando a extensão total de cada tipo de manutenção recomendada dentro da área investigada (tabela 2), gráficos de planejamento de manutenção de via detalhados ou simplificados (figura 7, painel superior) e arquivos Google Earth KML/KMZ (figura 7, painel inferior).

Tabela 2 - Resumo da ROS mostrando total de cada tipo de manutenção

Maintenance Type	Total (km)
Undercutting	2.97
Shoulder Cleaning (left)	0.36
Shoulder Cleaning (right)	0.13
Track Reconditioning	4.71
Drainage Work	3.07
Tamping	0.35

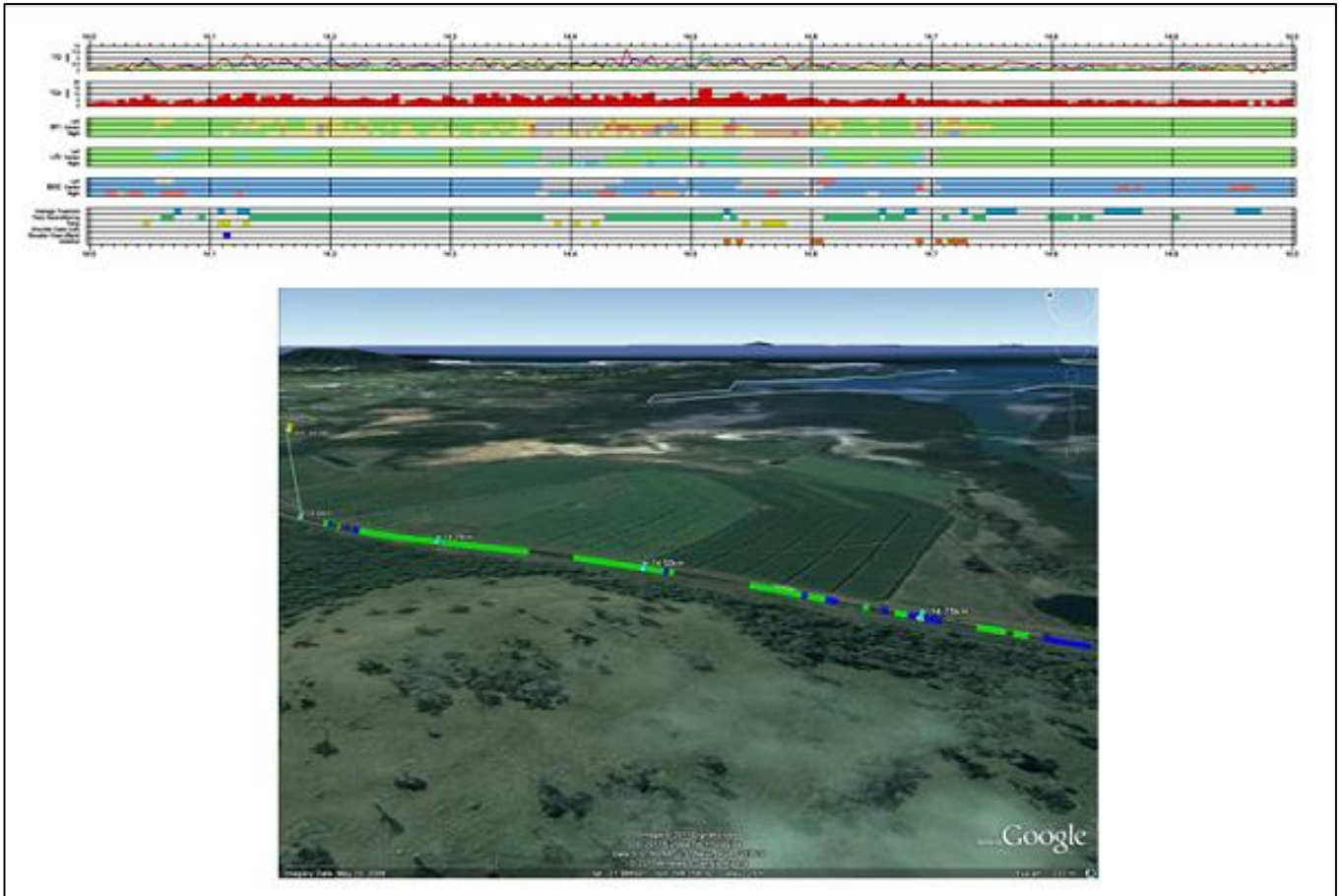


Figura 7 - Quadro de via mostrando a geometria da via e os índices do GPR juntamente com as extensões de várias opções manutenções exclusivas (painel superior). Estes são também plotados no Google Earth (painel inferior).

## 2. BENEFÍCIOS

### 2.1. Reino Unido

A Network Rail no Reino Unido reportou melhorias significativas em seu processo de renovação de via com a redução de reposição desnecessária de lastro (1 a cada 15 locais), redução no número de furos de sondagem (meta de 50% alcançada), aplicação de mais ações corretivas (figura 8) e menos falhas pre-maturas. Atualmente um trabalho vem sendo desenvolvido no sentido de utilizar o ZARR para prever taxa de retorno de desguarnecedoras e ajudar a determinar a vida residual do lastro.



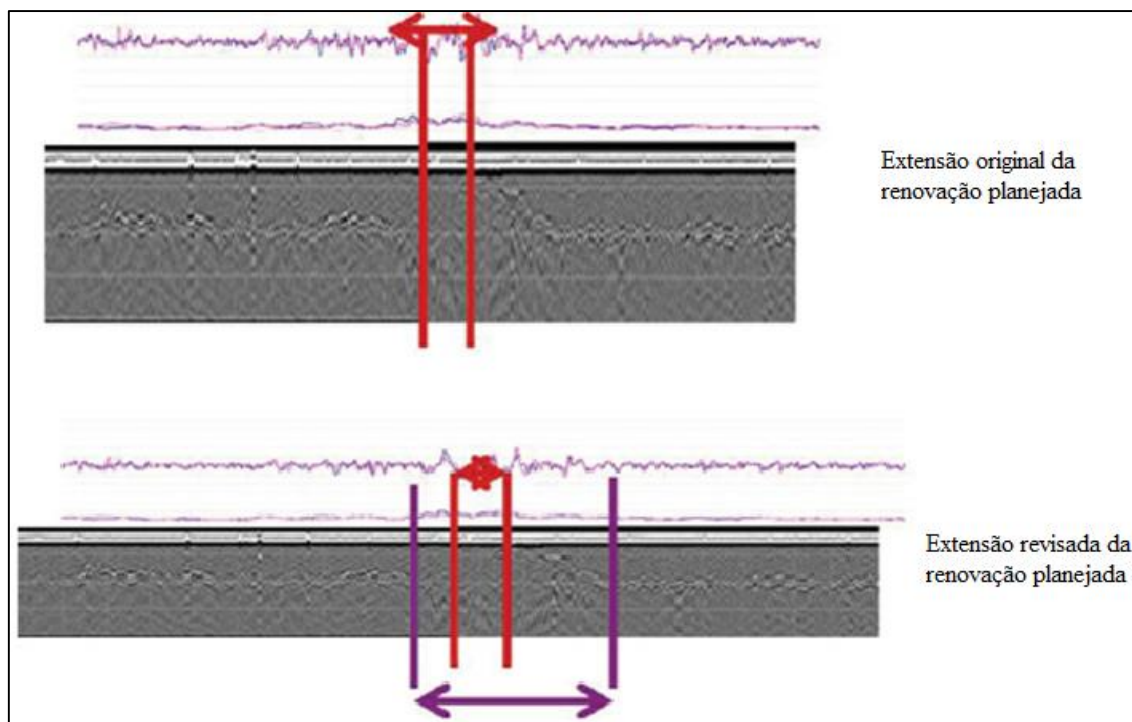


Figura 8 - REnovação como planejada utilizando apenas os dados de geometria (superior) e após a revisão utilizando os dados do GPR (inferior)

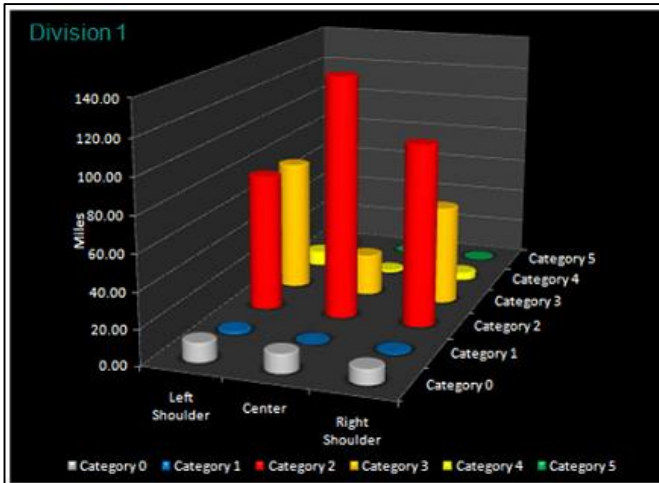
## 2.2. República Irlandesa

Para a Irish Rail, o GPR fornece uma importante ferramenta que tem sido proativamente utilizada a fim de permitir o planejamento de serviços de correção de via focado nas áreas que necessitam de reabilitação. Isto permite uma otimização do orçamento disponível e assim uma ferramenta com ótimo custo-benefício no programa de manutenção da via. A medição subsequente da qualidade da via após os serviços corretivos demonstraram resultados de significativa melhoria na qualidade da via.

A informação fornecida pelo GPR e de geometria da via também tem sido utilizada como parte de um programa de relastramento localizado precedendo o início do aumento das temperaturas locais (nos locais onde ainda não ocorreram o programa de manutenção) a fim de reduzir os efeitos do aumento de temperatura em locais com falta de lastro. No geral, o diagnóstico com GPR realizado na linha Dublin-Cork forneceu à Irish Rail informações sobre a condição do lastro e do sub-lastro que eram desconhecidas anteriormente. A continuidade do diagnóstico e os seus resultados permitem à Irish Rail gerenciar a linha de Dublin-Cork em toda a sua extensão garantindo assim a aplicação de solução eficiente de forma priorizada.

## 2.3. América do Norte

Na América do Norte o ZARR tem fornecido indicações precisas e objetivas sobre as áreas prioritárias para as desguarnecedoras ao longo de toda a malha. A combinação dos dados do GPR no centro e no ombro da via permite que sejam tomadas decisões como se é mais interessante realizar a limpeza do ombro ou tratar toda a plataforma com as desguarnecedoras totais. Os resultados foram estatisticamente resumidos por sub-divisão (figura 9) a fim de ajudar a priorizar o orçamento de manutenção em toda a malha.



**Table 1** Total Mileage per GPR-derived BFI Category

	N/A	BFI>40	BFI 20 - <40	BFI 10 - <20	BFI 1 - <10	BFI <1
	Category 0	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5
Left Shoulder	10.78	1.47	78.23	74.86	8.34	0.20
Center	10.68	0.32	137.97	23.64	1.21	0.07
Right Shoulder	8.58	0.77	103.48	56.58	4.40	0.07

**Table 1** Total Mileage per GPR-derived BFI Category

	N/A	BFI>40	BFI 20 - <40	BFI 10 - <20	BFI 1 - <10	BFI <1
	Category 0	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5
Total Mileage: 298						
Left Shoulder	3.15	0.34	10.04	85.45	167.92	31.42
Center	58.30	0.30	15.93	89.86	132.35	1.58
Right Shoulder	3.18	0.12	8.21	72.37	175.75	38.69

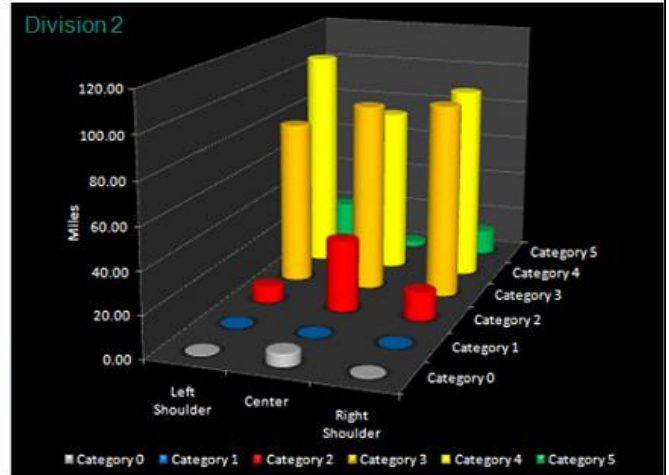


Figura 9 - Neste exemplo, a categoria 1-5 representa respectivamente lastro muito contaminado a lastro limpo para a varredura com o GPR de ambos os ombros e o centro da linha. A divisão 1 tem proporções maiores de lastro altamente contaminado (categoria 2) comparado com a divisão 2, que tem predominância de lastro moderadamente contaminado (categoria 3) a lastro moderadamente limpo (categoria 4).

A integração dos dados de geometria de via com o GPR também tem sido utilizada nos Estados Unidos a fim de permitir determinar a causa de defeitos de geometria de via. Defeitos persistentes resultam em restrições de velocidade sendo impostas em linha de alto faturamento. No exemplo abaixo (figura 10) o GPR identificou a extensão lateral e de profundidade de uma zona de depressão em um aterro. Essa informação não tem preço na definição de um programa efetivo de manutenção.

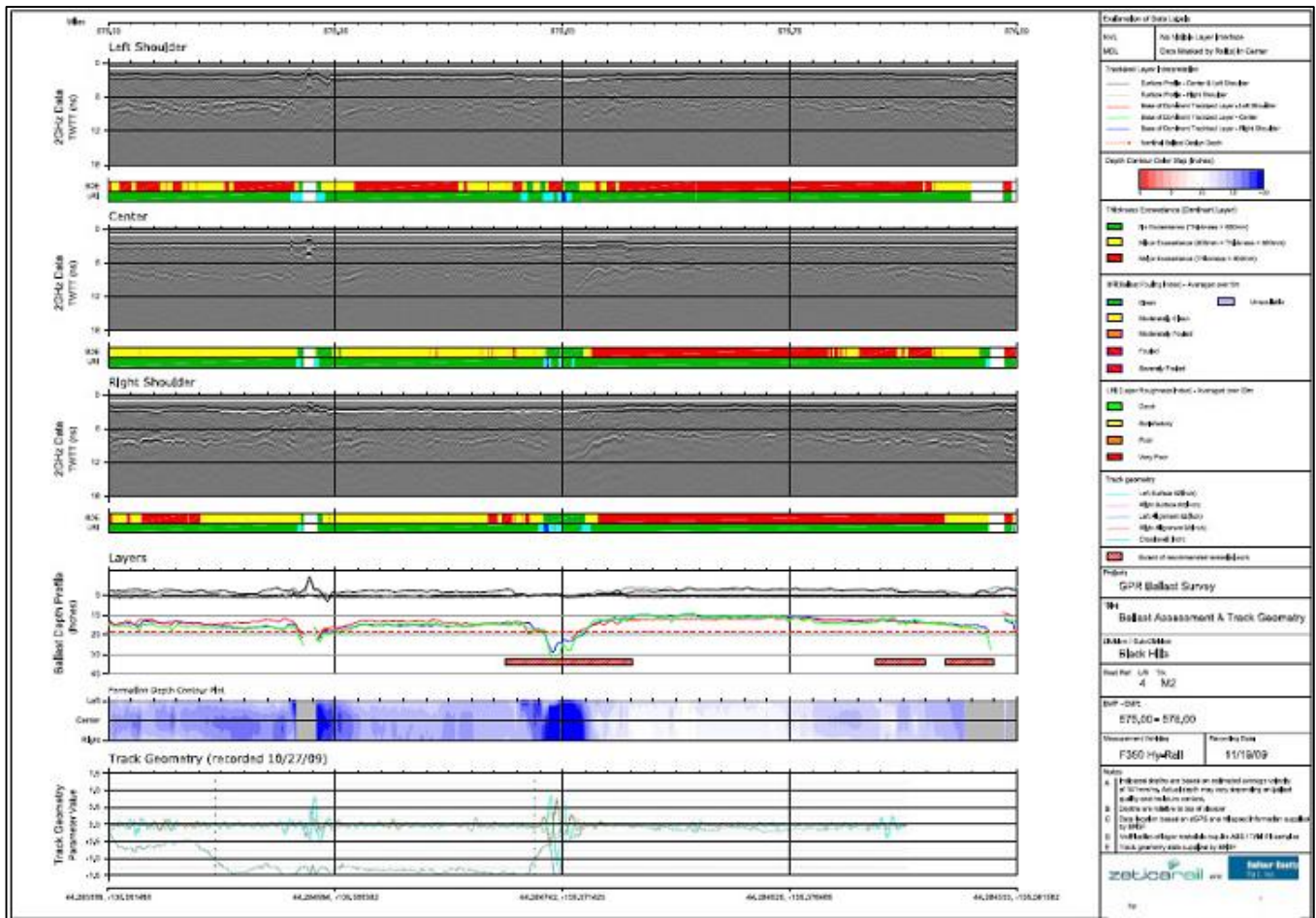
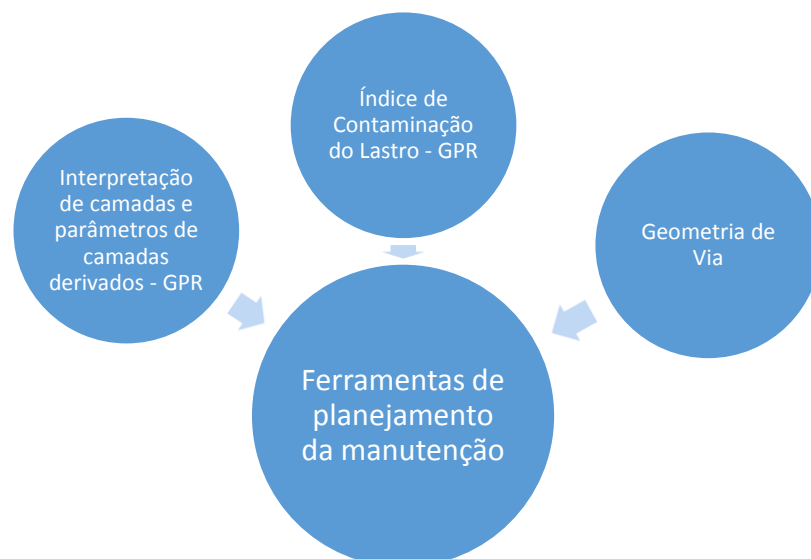


Figura 10 - Diagnóstico integrado de 3 canais com o GPR mostrando a base contornada de lastro (5ª painel) para identificar a causa de uma anomalia de curvatura na geometria da via (6ª painel) e os limites de serviços de manutenção necessários. Outras informações apresentadas incluem parâmetros de contaminação e rugosidade da camada.

### 3. CONCLUSÕES

O aumento do volume de carga transportado e o associado aumento do custo de ocupação da via para rotinas de inspeção e manutenção está engendrando uma mudança de paradigma de planejamento da manutenção. Dados de plataformas de diagnósticos multissensoriais incluindo GPR e geometria da via, quando integrado como parte de uma estratégia holística de priorização e planejamento de manutenção apropriada, tem demonstrado gerar uma informação singular baseado em condição do ativo e gerar significativas reduções de custo.



## REFERÊNCIAS

- (1) Eriksen, A., Gascoyne, J. and Al-Nuaimy, W., 'Improved Productivity and Reliability of Ballast Inspection using Road-Rail Multichannel GPR', Railway Engineering 2004, 6th – 7th, July 2004, Commonwealth Institute, London, UK.
- (2) Eriksen, A., Venables, B., Gascoyne, J., and Bandyopadhyay, S., 2006, 'Benefits of high speed GPR to manage trackbed assets and renewal strategies', PWI Conference, June 2006, Brisbane, Australia.
- (3) Roberts, R., Al-Qadi, I., Tutumluer, E., Boyle, J., and Sussmann, T., Advances in railroad ballast valuation using 2GHz horn antennas, 11th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 19-22, 2006, Columbus Ohio, USA.
- (4) Selig, E.T. and Waters, J.W. (1994). Track geotechnology and substructure management. Thomas Telford Ltd., London.
- (5) Al-Qadi, I.L., Xie, Q. and Roberts, R., 'Scattering Analysis of Railroad Ballast using Ground Penetrating Radar', Transportation Research Board 86th Annual Meeting, 2007, Washington D.C.
- (6) Zhang, Q., Gascoyne, J., Eriksen, A., Recent advances in the application of GPR for trackbed characterisation, 12th international conference on Ground Penetrating Radar, June 16-19, 2008, Birmingham, UK.
- (7) Eriksen, A., Sharpe, P., Practical Applications of Rail Radar for Trackbed Maintenance in the United Kingdom, Transportation Research Board, 89th Annual Meeting (January 10-14, 2010), Washington DC, USA.
- (8) Zhang, Q., Eriksen, A., Gascoyne, J. Rail radar – a fast maturing tool for monitoring trackbed, 14<sup>th</sup> international conference on Ground Penetrating Radar, June 21-25, 2010, Lecce, Italy.