

CARACTERIZAÇÃO DA VIA-FÉRREA COM GEORADAR. AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DOS MATERIAIS

Eduardo Fortunato¹, Simona Fontul¹, Francesca De Chiara², Rui Burrinha³, Marco Baldeiras³

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Dep. de Transportes, Avenida do Brasil, 1700-066 Lisboa, Portugal

email: efortunato@lnec.pt <http://www.lnec.pt>

²Sapienza University of Rome, Piazzale Aldo Moro, 5, 00185 Roma, Itália

³Infraestruturas de Portugal, Dep. de Inspeção e Diagnóstico, Estação de Santa Apolónia, 1100-105 Lisboa, Portugal

Sumário

Neste trabalho são discutidos resultados de um estudo experimental que tem vindo a ser realizado em Portugal com vista a determinar os valores das propriedades dielétricas dos materiais utilizados nas camadas de apoio das vias-férreas, e a forma como esses valores variam em função de diversos fatores. Através do ensaio de vários modelos físicos construídos em laboratório, analisou-se a influência da quantidade de partículas finas e do respetivo teor em água, nos valores das propriedades dielétricas do balastro, recorrendo a antenas de diversas frequências. São ainda apresentados resultados de ensaios realizados na via-férrea, de forma a validar os obtidos em laboratório.

Palavras-chave: Via-férrea; Georadar; Balastro; Constante dielétrica.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a exploração ferroviária evoluiu no sentido de permitir a circulação de comboios a velocidades mais elevadas e com maiores cargas por eixo. Por outro lado, é necessário manter elevados requisitos relacionados com o conforto e a segurança dos passageiros, a qualidade de serviço e a eficiência económica e ambiental [1]. No entanto, velocidades de operação mais altas, mais composições em circulação e cargas por eixo elevadas conduzem a um aumento da degradação da via. Para além disso, os efeitos atmosféricos, em particular os resultantes das alterações climáticas, podem também potenciar o aparecimento de anomalias que se podem traduzir em danos estruturais e redução do desempenho funcional.

As ações de monitorização da infraestrutura, em particular de avaliação da qualidade geométrica da via, são habitualmente levadas a cabo por veículos de inspeção que, em muitos casos, circulam a velocidades semelhantes às de operação comercial [2,3]. Este procedimento permite solicitar a estrutura de forma semelhante ao que acontece em serviço e avaliar a respetiva resposta, em contínuo, com poucas ou nenhuma restrições à operação. Em Portugal é atualmente utilizado um veículo de inspeção de via com a designação comercial “Plasser and Theurer EM 120”, que circula a uma velocidade máxima de 120 km/h. Este veículo permite avaliar, nomeadamente: a evolução dos parâmetros geométricos da via, recorrendo a um sistema inercial; o desgaste e ondulação dos carris, através de sistemas laser independentes; os parâmetros geométricos da catenária; e a bitola da via, através de um sistema laser. No entanto, esta abordagem não permite detetar as causas das anomalias da via, em particular no que se refere às alterações da sua qualidade geométrica, que podem ter origem na alteração das características do apoio da superestrutura da via-férrea. Essas alterações podem resultar, entre outros aspetos: da alteração da granulometria da camada de balastro, quer por quebra das partículas, quer por contaminação com partículas finas que ascendem da fundação; da alteração da rigidez da camada de sub-balastro ou da fundação, em particular devido a modificações do estado hídrico dos materiais, que podem ter origem em problemas que ocorram nos sistemas de drenagem; de assentamentos da fundação associados a fenómenos de consolidação dos terrenos; e da variação das condições de apoio da superestrutura, por exemplo em zonas de transição entre terraplenagens e obras de arte e em zonas em que existem singularidades na via [4–8].

Assim, no âmbito da gestão da manutenção é essencial conhecer, ao longo do ciclo de vida da infraestrutura, as características da camada de balastro e da subestrutura da via, para definir e calendarizar ações de manutenção. Os métodos não destrutivos podem ser eficientes nessa análise, em particular aqueles que permitem a avaliação da infraestrutura de forma contínua, como é o caso do Georadar [9,10]. Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos sistemas de Georadar, utilizando antenas de elevada frequência, com melhores sistemas de aquisição de dados e recorrendo a *software* de análise de dados mais fáceis de utilizar, tem proporcionado maior utilização deste método, incluindo no âmbito da análise das vias-férreas. Em diversos países as administrações ferroviárias têm recorrido a este método para detetar zonas com problemas quer na camada de balastro quer na fundação da via. Alguns dos resultados obtidos nessas análises evidenciaram que o Georadar pode ser uma ferramenta adequada para a determinação das causas das anomalias registadas ao nível da geometria dos carris [11–16].

Em Portugal têm-se desenvolvido estudos relacionados com a aplicação do Georadar na via-férrea, desde há cerca de 10 anos [17]. Alguns desses estudos permitiram concluir que é possível determinar a espessura da camada de balastro e detetar a variação das características das camadas subjacentes [7]. No entanto, a qualidade dos resultados obtidos e a facilidade de utilização deste método depende do conhecimento das propriedades dielétricas dos materiais ensaiados. Estas propriedades influenciam a propagação das ondas eletromagnéticas, a sua reflexão e a resolução obtida. Assim, é importante analisar quais os fatores que mais influenciam os valores das constantes dielétricas, o que pode ser feito através de ensaios laboratoriais ou de estudos *in situ* [17–23]. A empresa Infraestruturas de Portugal e o LNEC têm vindo a desenvolver em conjunto estudos laboratoriais com diversos equipamentos de Georadar com o objetivo de melhorar o procedimento de calibração e o processo de interpretação dos dados, considerando, nomeadamente, as características das vias-férreas existentes em Portugal.

Nesta comunicação são apresentados e discutidos alguns resultados de um trabalho experimental que tem vindo a ser realizado em Portugal com vista a determinar os valores das propriedades dielétricas dos materiais utilizados nas camadas de apoio das vias-férreas, e a forma como esses valores variam em função de diversos fatores. Através do ensaio de vários modelos físicos construídos em laboratório, analisou-se a influência da quantidade de partículas finas (grau de contaminação) e do respetivo teor em água (w), nos valores das propriedades dielétricas da camada de balastro, recorrendo a antenas de diversas frequências. São ainda apresentados os resultados de ensaios realizados com o Georadar na via-férrea, de forma a validar as conclusões obtidas em laboratório. A informação obtida deverá contribuir para uma melhor interpretação dos dados do Georadar, com vista a produzir informação relevante para o planeamento das ações de conservação da via-férrea.

2 ESTUDOS LABORATORIAIS

2.1 Construção dos modelos físicos

No âmbito deste trabalho foram construídos vários modelos físicos que foram ensaiados com o objetivo de determinar os valores das constantes dielétricas de materiais que existem em diversas vias-férreas de Portugal. Procedeu-se a diversos ensaios para avaliar a influência naquelas constantes do grau de contaminação do balastro, do teor em água dos materiais e da frequência das antenas de ensaio. Foram analisados nesses modelos vários tipos de materiais, nomeadamente um balastro ferroviário granítico limpo, um solo siltoso e diversas misturas destes dois materiais, para simular vários graus de contaminação do balastro. Para avaliar a contaminação do balastro foi considerado um índice designado por “Relative Ballast Fouling Ratio”, proposto por Indraratna et al. [21], que representa a razão entre o volume do material fino contaminante e o volume das partículas de balastro, assim calculado:

$$R_{b-f} = \left(\frac{G_{b-f}}{G_{s-f}} \right) \frac{M_f}{M_b} \times 100 \quad (1)$$

sendo: G_{b-f} e G_{s-f} o peso específico das partículas do material fino (inferiores a 9,5 mm) e do balastro limpo (superiores a 9,5 mm), respetivamente; e M_f e M_b a massa seca do material fino e do balastro limpo, respetivamente. Em função do valor de R_{b-f} , aqueles autores classificam assim o balastro: limpo (< 2); pouco contaminado (2 a 10); moderadamente contaminado (10 a 20); contaminado (20 a 50); muito contaminado (≥ 50).

Na construção dos modelos físicos utilizaram-se dois moldes distintos e dois compactadores manuais, capazes de aplicar distintos valores de energia. Na base dos modelos foram colocadas folhas de alumínio, com o objetivo de melhorar a reflexão, obtendo assim uma elevada amplitude nos registos das ondas eletromagnéticas.

O balastro limpo foi caracterizado em laboratório e seco em estufa. Com este material foram espalhadas e compactadas, durante 15 minutos, num molde de $1,10 \times 0,94 \times 0,47 \text{ m}^3$, sucessivas camadas de cerca de 0,10 m, até se obter uma espessura total de 0,388 m, valor este que foi considerado adequado para ensaio, tendo em conta que normalmente a espessura desta camada nas linhas férreas modernas varia entre 0,30 a 0,40 m. Este material viria a ser ensaiado em estado seco, saturado e, posteriormente, durante a secagem.

O solo siltoso foi ensaiado num molde com $0,53 \times 0,41 \times 0,40 \text{ m}^3$. Atendendo a que um dos objetivos deste estudo era analisar a sensibilidade da constante dielétrica à presença de água, foram construídos em laboratório quatro modelos com valores distintos de teor em água do solo (6%, 8%, 10% e 12%), nomeadamente dois abaixo e dois acima do teor em água ótimo do ensaio Proctor Normal ($w = 8,4\%$), o qual foi previamente determinado. Antes da colocação do material no molde, o solo foi devidamente misturado com água e homogeneizado. De forma a obter uma espessura final da camada de solo de cerca de 0,30 m, foram espalhadas e compactadas seis subcamadas, cada uma delas compactada durante seis minutos. Após compactação, cada subcamada foi escarificada na superfície antes da colocação da seguinte, para evitar criar interfaces que perturbassem a análise que viria a ser realizada com o Georadar. A compactação foi controlada através de ensaios com equipamento nuclear (gama densímetro), e após a realização dos ensaios com o Georadar foi executado um ensaio de garrafa de areia em cada um dos modelos.

Os modelos físicos de balastro contaminado foram construídos num molde com um volume de $0,50 \times 0,75 \times 0,52 \text{ m}^3$. Foram construídos cinco modelos com distintos níveis de contaminação (valores de R_{b-f}), nomeadamente: 1, 6, 15, 35 e 55. Também nestes casos foram adotados quatro valores do teor em água para o solo siltoso (6%, 8%, 10% e 12%), com exceção do modelo construído com o nível de contaminação mais reduzido. De facto, neste caso, foi ensaiado apenas um modelo com o teor em água de 8,4%; assumiu-se que, tendo em conta que a quantidade de solo adicionada ao balastro foi muito reduzida, a quantidade de água adicionada teria pouca influência nas propriedades dielétricas da mistura. Nos outros quatro modelos, a mistura de balastro e solo foi compactada com solo com 6% de teor em água. Para reduzir a duração do programa experimental, os distintos valores de humidade de cada modelo foram obtidos por aumento sucessivo do teor em água. A construção foi realizada em subcamadas de 0,075 m, compactadas durante dez minutos cada, de forma a obter uma espessura final de 0,30 m. No modelo com contaminação mais elevada ($R_{b-f} = 55$) foi necessário aumentar o tempo de compactação para doze minutos e a espessura final foi de 0,357 m.

2.2 Equipamento de Georadar utilizado

Nos estudos que agora se apresentam foram utilizados três sistemas distintos de Georadar, no que se refere ao tipo de antenas. Um era composto por dois pares de antenas (emissora e recetora) suspensas da marca “Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI)” com 1,0 GHz e 1,8 GHz de frequência. As antenas foram colocadas a cerca de 0,45 m de altura da superfície do material a ensaiar, de forma a proporcionar a sua correta configuração. Outro sistema era composto por duas antenas de contacto da marca GSSI, de 500 MHz e 900 MHz de frequência. O último sistema, que é usado na monitorização da rede ferroviária nacional, é composto por uma antena da marca “Ingegneria de Sistemi” (IDS), com frequência de 400 MHz (Fig. 1).

Foi estudada a configuração da antena IDS em termos de orientação e elevação em relação à superfície a ensaiar. Para analisar a influência da orientação na superfície do material (x-y), a antena foi colocada em duas posições diferentes, desfasadas de 90° , e foi avaliada para os distintos moldes utilizados no estudo. No que se refere à elevação da antena, foram testadas diferentes alturas de colocação, de forma a detetar melhor o sinal refletido. A antena foi colocada diretamente sobre a superfície a ensaiar e a cerca de 0,30 m, de forma semelhante ao que acontece durante a monitorização da via-férrea.

Para cada ensaio realizado com as antenas suspensas foram efetuadas três medições distintas de forma a melhorar a deteção do topo e da base da camada ensaiada. Inicialmente foi colocada uma placa metálica no topo dos modelos e foram registadas as ondas refletidas. Trata-se de um procedimento típico de calibração das antenas suspensas. Num segundo teste, foi utilizada uma placa de metal de menores dimensões para detetar as reflexões de topo e da base no material ensaiado. A terceira medição foi realizada de acordo com o procedimento levado a cabo na via-férrea, sem placa metálica no topo do modelo.

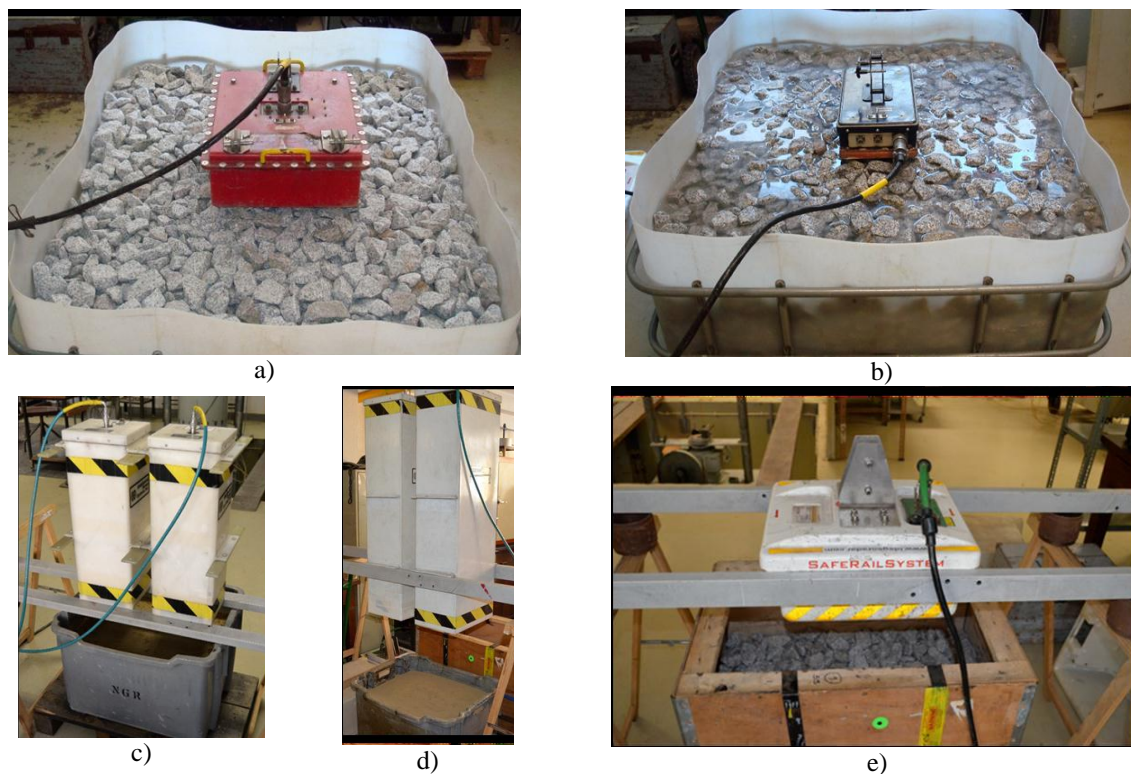


Fig. 1. Aspeto dos ensaios com as diversas antenas: a) GSSI 500 MHz; b) GSSI 900 MHz; c) GSSI 1,8 GHz; d) GSSI 1 GHz; e) IDS 400 MHz.

2.3 Aspectos da interpretação dos resultados

Uma das dificuldades observadas durante a interpretação dos dados é a identificação do sinal da superfície do balastro, designado por definição do nível “zero”, no sinal das antenas *ground-coupled*, principalmente no que se refere à antena IDS. Nas medições in situ, o nível zero corresponde à superfície do balastro. No estudo realizado em laboratório, a sua deteção foi distinta, em função do sistema de Georadar. Para as antenas suspensas GSSI, a reflexão positiva máxima foi escolhida como sendo o nível zero. Para as antenas de contacto GSSI e IDS o zero foi considerado como sendo coincidente com a onda de transmissão direta entre antenas. No caso da antena suspensa IDS ocorreram dificuldades em identificar claramente a superfície de reflexão. Assim, com base nas recomendações dos fabricantes, foi estabelecida uma nova metodologia para a definição do zero e para uma correta interpretação dos dados. O procedimento pode ser assim descrito (Fig. 2a): a) mediu-se o tempo da transmissão direta entre antenas (t_c); b) conhecendo a distância entre a antena e superfície, determinou-se o tempo de percurso da onda no ar (t_A), recorrendo à constante dielétrica do ar; c) o nível zero (S) é dado pela soma das duas parcelas referidas anteriormente.

Ainda no caso da antena suspensa IDS, foram identificadas diversas reflexões múltiplas nos registos, o que tornou difícil detetar a reflexão da base. No entanto, o problema foi ultrapassado por comparação com os registos da antena IDS no modo de contacto, para o qual a reflexão da base foi claramente identificada.

Uma vez estabelecido o nível zero, os valores da constante dielétrica foram determinados a partir da espessura do material, que era conhecida, e do tempo de percurso da onda (ns) desde a superfície até à base do material ensaiado (Fig. 2b), recorrendo à expressão:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot h} \right)^2 \quad (2)$$

em que ε_r é a constante dielétrica relativa, c é a velocidade da onda no espaço (3×10^8 m/s), t é o tempo de percurso da onda e h é a espessura da camada.

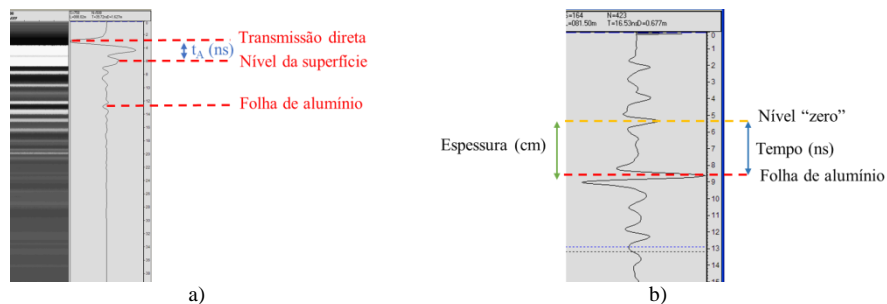


Fig. 2. Esquemas elucidativos dos procedimentos de interpretação dos resultados do Georadar

2.4 Análise e discussão dos resultados laboratoriais

2.4.1 Balastro limpo

No caso do balastro limpo foram realizados diversos ensaios em etapas sucessivas, nomeadamente com o material seco em estufa, saturado e durante a secagem. Depois das primeiras medições com o Georadar, o molde foi preenchido com água até ao topo do balastro, o qual foi deixado imerso durante 48 horas. Constatou-se um aumento significativo da constante dielétrica, como tem sido reportado por outros autores [17, 22], dado o teor em água elevado do material ensaiado. De seguida, foi esvaziada a água do molde do balastro limpo e o valor da constante dielétrica diminuiu rapidamente. Fizeram-se medições nos sete dias seguintes, até a constante dielétrica estabilizar para valores perto dos medidos inicialmente.

Na Fig. 3 apresentam-se alguns registos obtidos com o Georadar durante esses ensaios, sendo visíveis as alterações no tempo de resposta devido à presença da água, em particular aquando da saturação.

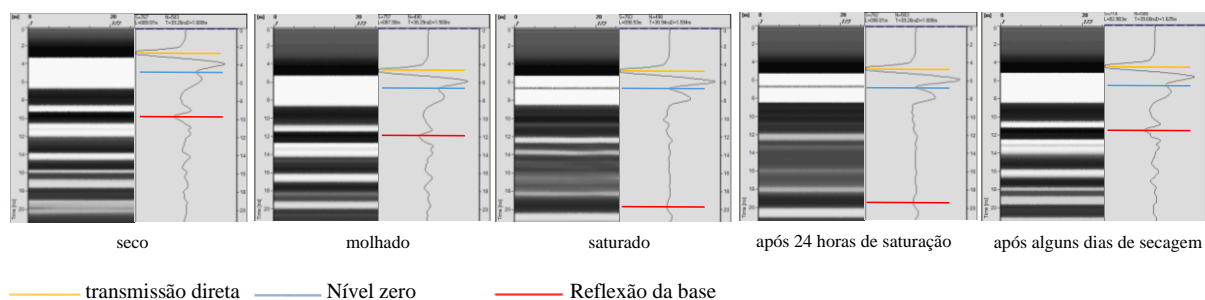


Fig. 3. Registos efetuados no balastro em diferentes estados com a antena IDS de 400 MHz suspensa

Na Fig. 4 são apresentadas as gamas de variação dos valores obtidos para a constante dielétrica do balastro limpo, para todas as antenas utilizadas. Os valores variam entre cerca de 2,0 e 4,4 no caso do balastro seco e entre 28 e 31 no caso do balastro encharcado.

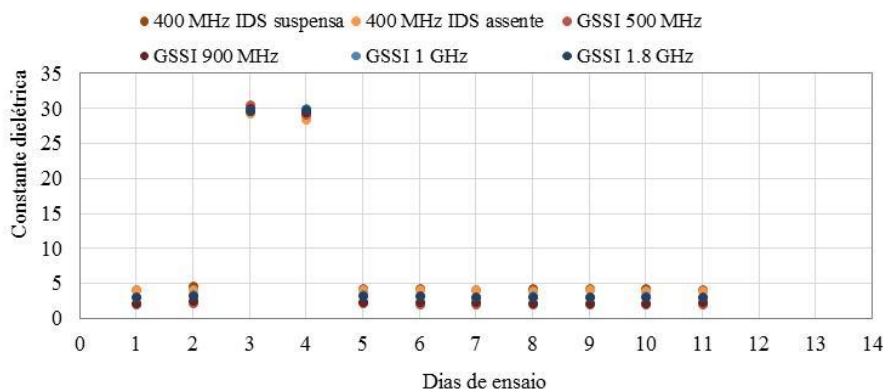


Fig. 4. Evolução das constantes dielétricas obtidas para o balastro limpo (distintos teores em água)

No Quadro 1 apresentam-se os valores da constante dielétrica, obtidos com as várias antenas, no balastro limpo e seco, após colocação no molde (dia zero), nos dois dias seguintes antes de o molde ter sido preenchido com água (dias 1 e 2) e após o esvaziamento do mesmo (dias 5, 6, 7, 11).

Quadro 1. Valores da constante dielétrica do balastro limpo obtido com as várias antenas

Antena	Dia de ensaio						
	0	1	2	5	6	7	11
IDS (assente)	4,20	4,10	4,10	4,00	4,10	4,00	4,00
IDS (suspensa)	4,40	4,40	4,20	4,40	4,30	4,40	4,20
GSSI 500MHz	2,20	2,10	2,10	2,00	2,00	2,00	2,00
GSSI 900MHz	2,50	2,40	2,40	2,30	2,30	2,30	2,40
GSSI 1GHz	3,40	3,30	3,10	3,20	3,10	3,20	3,10
GSSI 1,8GHz	3,30	3,20	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10

Pode concluir-se que existe uma tendência de aumento dos valores da constante dielétrica com o aumento da frequência das antenas GSSI, de 500 MHz, 900 MHz e 1 GHz; no entanto, os valores obtidos com a antena de 1,8 GHz são semelhantes aos obtidos com a antena de 1 GHz. A antena IDS conduziu a valores mais elevados do que os obtidos com as antenas GSSI, independentemente da configuração com que foi utilizada. É de referir que na via-férrea, mesmo para o balastro seco limpo, os valores da constante dielétrica poderão ser superiores aos obtidos no laboratório, devido à normal deterioração do balastro e à presença de algumas partículas finas.

2.4.2 Solo fino

No caso do solo fino foram realizadas várias determinações dos valores da constante dielétrica (uma a duas vezes por dia) para cada teor em água, de forma a avaliar com rigor a variação que podia ocorrer. Em geral, para cada antena, o valor da constante dielétrica aumentou com o teor em água (Fig. 5), de acordo com o que tem sido reportado por outros autores [19]. Valores do teor em água baixos (cerca de 5 a 6%) conduzem a valores da constante dielétrica que variam entre 7 a 10; valores mais elevados do teor em água, da ordem de 13 a 15%, conduzem a valores da constante dielétrica da ordem de 14 a 19. Os valores da constante dielétrica obtidos para valores do teor em água próximos do ótimo ($w=8,4\%$) são superiores aos que corresponderiam a uma aproximação quase linear entre a variação das duas grandezas. Este comportamento pode estar relacionado com o facto de a máxima compacidade (máximo peso volumico seco), ser atingida para aquele valor do teor em água.

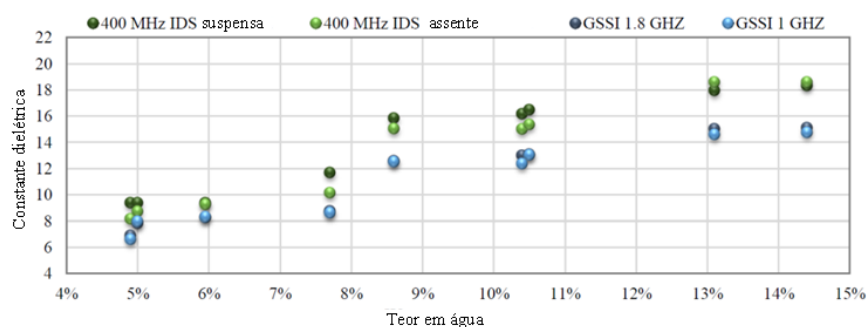


Fig. 5. Constantes dielétricas obtidas para o solo fino com diversos teores em água

Também neste caso a antena IDS conduz a valores superiores aos obtidos com as antenas GSSI de 1 GHz e de 1,8 GHz, as quais apresentam valores muito próximos entre si. A diferença entre os valores obtidos com as antenas IDS e GSSI aumenta com o aumento do teor em água. Não se apresentam valores relativos às antenas GSSI de baixa frequência devido ao facto de ter ocorrido uma avaria do sistema de aquisição durante os ensaios.

2.4.3 Balastro contaminado

No caso do índice de contaminação mais baixo ($R_{b-f} = 1$), foram realizadas duas medições com todas as antenas: a primeira imediatamente após a construção do modelo e a segunda após 72 horas. Os valores obtidos para a constante dielétrica foram semelhantes aos obtidos para o balastro limpo. Em geral, para os restantes valores do índice de contaminação foram realizadas duas medições para cada valor do teor em água: uma após a construção ($w = 6\%$) ou depois de se ter adicionado água ($w = 8\%$, $w = 10\%$ e $w = 12\%$); e outra após 2 horas, depois de ter

havido percolação em todo o modelo. No caso do índice de contaminação mais elevado, para cada teor em água procedeu-se a várias determinações, espaçadas no tempo, para atender à menor permeabilidade do modelo.

Na Fig. 6 apresenta-se um exemplo da variação da amplitude das ondas eletromagnéticas com o grau de contaminação do balastro. É notório que para o balastro pouco contaminado a amplitude é superior à registada para o balastro muito contaminado; este comportamento está relacionado com a presença do solo fino e com o respetivo aumento da condutividade que produz uma mais rápida dissipação de energia do sinal. A reflexão da superfície é maior no caso do balastro muito contaminado devido ao aumento da diferença entre a constante dielétrica do ar e a superfície do modelo (meio mais denso devido à presença de finos que preenchem os vazios).

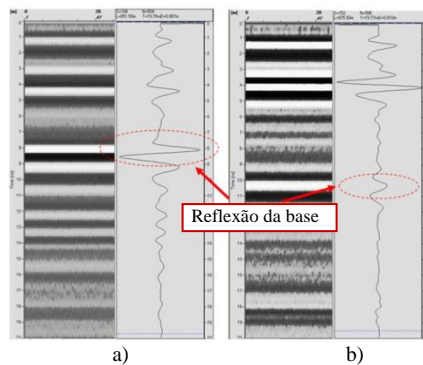


Fig. 6. Reflexão com a antena de 1 GHz: a) balastro pouco contaminado; b) balastro muito contaminado

Constatou-se que o teor em água e o índice de contaminação influenciam significativamente os resultados. Por exemplo, para a antena IDS suspensa (Fig. 7), que conduziu a valores da constante dielétrica do balastro contaminado mais elevados dos que as outras, esta grandeza varia entre 4,9 (para 6% de teor em água e balastro pouco contaminado) e 9,5 (para 12% de teor em água e balastro muito contaminado). Para um teor em água baixo ($w = 6\%$) a constante dielétrica varia cerca de 50%, quando se compara o valor correspondente ao índice de contaminação do balastro pouco contaminado ($R_{b-f} = 6$) com o do balastro muito contaminado ($R_{b-f} = 55$); para um teor em água mais elevado ($w = 12\%$) esta variação atingiu 80%. No caso do balastro com maior índice de contaminação ocorre um incremento de cerca de 28% quando o teor em água aumenta de 6% para 12%.

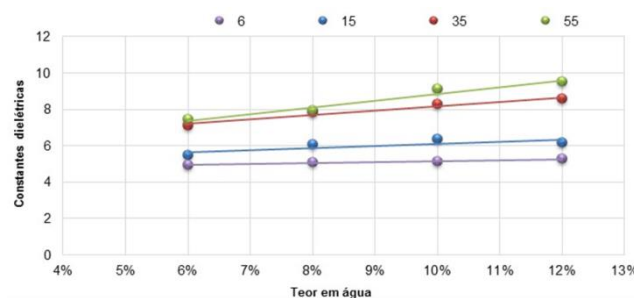


Fig. 7. Constante dielétrica em função do teor em água, para cada valor de R_{b-f} (antena IDS suspensa)

3 ENSAIOS COM GEORADAR NA VIA-FÉRREA

3.1 Linha de mercadorias com balastro muito contaminado

No âmbito deste estudo foi acompanhada uma rebalastagem manual de uma secção com cerca de 12 m de extensão, na Linha de Sines, a qual apresentava uma camada de balastro com contaminação, junto a uma passagem de nível. Recolheram-se amostras de balastro contaminado, as quais foram ensaiadas em laboratório para obter o respetivo índice de contaminação. Foram determinados índices de contaminação de 19 e de 54, que correspondem a balastro moderadamente contaminado e muito contaminado, respetivamente.

Foram analisados os registos do georadar obtidos em três campanhas distintas, realizadas com o veículo de inspeção de via EM 120, equipado com a antena IDS 400 MHz suspensa, com o objetivo de avaliar a evolução

da eventual contaminação do balastro nessa zona. Foram, assim, calculados os valores da constante dielétrica em vários pontos ao longo da seção intervencionada, para as três campanhas de medição. Para tal, foi adotado o valor de 0,35 m para a espessura da camada, para todos os pontos a analisar, tendo em conta as medições feitas no local, na altura da rebalastagem. No entanto, atendendo à dificuldade em medir a espessura desta camada, pode daí resultar algum erro no cálculo dos valores da constante dielétrica.

Os valores obtidos para a constante dielétrica, ao longo da secção, em várias campanhas, são apresentados no Quadro 2. Consta-se que nas zonas com balastro muito contaminado não só os valores da constante dielétrica são superiores, como também o aumento destes valores ao longo do tempo, entre 2011 e 2013, é mais importante, quando comparado com o que acontece na zona com balastro menos contaminado.

Quadro 2. Valores da constante dielétrica em diferentes pontos e em diferentes campanhas de medição

Localização	Constante dielétrica			Nível de contaminação
	Outubro 2011	Abril 2012	Mai 2013	
Km (161+)				balastro muito contaminado ↑
743,00	11,78	12,84	13,39	
743,50	10,28	11,27	12,85	
744,00	10,28	12,30	13,39	
744,50	9,34	12,30	12,85	
745,00	7,59	11,27	12,85	
747,00	8,01	8,01	10,78	
749,00	6,78	7,18	6,79	balastro moderadamente contaminado
750,00	6,02	5,30	6,03	
755,00	6,39	5,66	5,67	

É de salientar que os valores da constante dielétrica obtidos a partir das medições em campo são mais elevados do que os medidos em laboratório, o que poderá ficar a dever-se à presença de partículas de balastro calcário, que têm valores de constante dielétrica superiores aos do granítico [17].

3.2 Linha de mercadorias recentemente renovada

Foram também realizados poços numa linha de mercadorias recentemente renovada, com balastro novo, que apresentava camadas inferiores com alguma contaminação, correspondendo a um balastro mais antigo, contendo vestígios de balastro calcário. Devido a questões relacionadas com a programação dos trabalhos, não foi possível realizar os poços na mesma data da realização da campanha de medição com o Georadar.

A partir da espessura identificada nos poços e dos resultados obtidos com o Georadar, determinaram-se os valores da constante dielétrica do balastro novo/limpo (granítico) para três campanhas distintas. A Fig. 8 apresenta os resultados obtidos para os valores da constante dielétrica, nos três poços realizados, nas diferentes campanhas. Como se pode observar, os valores obtidos nos diferentes poços são próximos dos valores obtidos em laboratório, sendo, no entanto, ligeiramente superiores, o que poderá ficar a dever-se à presença de finos e eventuais vestígios de balastro calcário. A variação dos valores da constante dielétrica entre as campanhas foi reduzida (4,4 a 5,9) e sem tendência a aumentar ao longo do tempo.

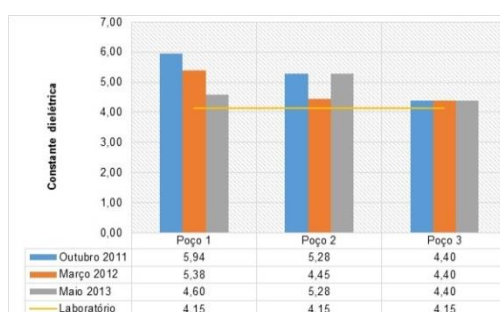


Fig. 8. Valores da constante dielétrica do balastro obtidos com base na espessura identificada nos poços

3.3 Linha de tráfego misto com balastro contaminado

Foram também executados ensaios numa linha de circulação de tráfego misto, com balastro contaminado. Dado o facto de os 12 poços realizados não terem sido executados na mesma altura em que foi feita a medição com o equipamento EM 120, e tendo em conta a influência que o teor em água e a contaminação têm sobre os valores da constante dielétrica, optou-se por interpretar só a camada de balastro limpo. Os valores da constante dielétrica do balastro limpo obtidos a partir das espessuras observadas nos poços variaram entre 3,9 e 6,2, conduzindo a um valor médio de 4,8. Em geral, os valores obtidos são superiores aos medidos em laboratório para o balastro granítico limpo, sendo da ordem de grandeza dos do balastro pouco contaminado.

Atendendo aos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e nos ensaios de campo, recomenda-se que, para a interpretação das medições de Georadar realizadas com a antena IDS de 400 MHz utilizada atualmente na rede ferroviária nacional, se adote uma constante dielétrica de 4,8 para o balastro granítico. O valor é ligeiramente mais alto do que o obtido nos ensaios de laboratório (4,2), dado que a presença de partículas finas no balastro da via em exploração, ainda que em quantidade reduzida, pode levar a um ligeiro aumento da constante dielétrica.

4 CONCLUSÕES

Os ensaios não-destrutivos têm vindo a assumir um papel cada vez mais importante na avaliação das características das camadas de apoio das infraestruturas de transporte. O Georadar, em particular, é um método com grande potencial para avaliação da via-férrea, pois permite proceder a uma caracterização em contínuo, com a mínima perturbação na operação ferroviária. No entanto, para que o método conduza a resultados fiáveis é necessário que se conheçam os valores das constantes dielétricas dos materiais e a forma como variam em função das condições de estado desses materiais e do equipamento em uso.

Neste trabalho apresentaram-se alguns resultados de estudos laboratoriais e de campo que têm vindo a ser realizados em Portugal com vista a aumentar a eficiência do processo de avaliação das camadas da via-férrea com recurso ao Georadar.

Para determinação dos valores da constante dielétrica do balastro limpo e do balastro contaminado foram realizados ensaios em laboratório em várias condições de teor em água e de contaminação e com diversas antenas de frequências distintas. Concluiu-se que, em geral, o valor da constante dielétrica pode variar significativamente em função do teor em água dos materiais e da quantidade de material fino presente na camada de balastro contaminado. Para os valores testados, o valor da constante dielétrica foi mais influenciado pela variação do índice de contaminação do que do teor em água. No entanto, é de salientar que se fez variar o teor em água do material fino apenas entre 6% e 12%.

De acordo com os resultados obtidos concluiu-se que é recomendável calibrar sempre os valores da constante dielétrica a adotar na interpretação dos ensaios, com base nas medições realizadas com a antena utilizada nos estudos, dado que, antenas de frequências semelhantes, mas de fabricantes diferentes, têm respostas distintas no que concerne à constante dielétrica medida.

Foram realizadas também medições em campo com a antena IDS de 400 MHz utilizada atualmente na rede ferroviária nacional, e os resultados do Georadar foram calibrados com recurso a abertura de poços. Com base nos resultados obtidos concluiu-se que o valor a adotar para a constante dielétrica do balastro granítico limpo deve ser ligeiramente superior ao determinado em laboratório, tendo em conta a presença de partículas finas no balastro da via em exploração, ainda que em quantidade reduzida.

5 AGRADECIMENTOS

Parte deste estudo foi desenvolvido no âmbito da atividade dos Grupos de Trabalho 4 e 5, respetivamente “Subestrutura da via-férrea, incluindo zonas de transição” e “Métodos não destrutivos no diagnóstico de infraestruturas de transporte - da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT) da Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

O trabalho é do interesse da Ação COST TU1208 “Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar”.

6 REFERÊNCIAS

1. INNTRACK: *Concluding Technical Report*. Ed. Anders Ekberg and Björn Paulsson, UIC, Paris, 2010.
2. C. Esveld, *Modern Railway Track*, MRT-Productions, Zaltbommel, 2001.
3. B. Lichtberger, *Track compendium*. Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG, Hamburg, 2005.
4. E. T. Selig e J. M. Waters, *Track Geotechnology and Substructure Management*; T. Telford, London, 1994.
5. G. P. Gallagher; Q. Leiper; R. Williamson; M. R. Clark; M.C. Forde, The application of time domain ground penetrating radar to evaluate railway track ballast. *NDT E Int.*, 32, 463–468, 1999.
6. G. Manacorda; D. Morandi; A. Sarri; G. Staccone, Customized GPR system for railroad track verification. *Proc. of the GPR2002*, pp. 719–723, Santa Barbara, CA, USA, 29 April–2 May 2002.
7. S. Fontul; E. Fortunato; F. de Chiara, Non-destructive tests for railway infrastructure stiffness evaluation, *Proc. of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Topping, Y., Ed., Paper 16, Chania, Crete, 6–9 Sep. 2011. Civil-Comp Press: Stirlingshire.
8. J.P Hyslip; S. Chrismer; M. LaValley; J. Wnek, Track quality from the ground up, *Proc. of the AREMA Conference*, Chicago, IL, USA, 16–19 September 2012.
9. M. Brough; A. Stirling; G. Ghataora; K. Madelin, Evaluation of railway trackbed and formation: A case study. *NDT E Int.*, 36, 145–156, 2003
10. S. Fontul, *Structural Evaluation of Flexible Pavements Using Non-Destructive Tests*. Ph.D. Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2004.
11. R. Jack; P. Jackson, Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar. *NDT E Int.*, 32, 457–462, 1999.
12. J. Hugenschmidt, Railway track inspection using GPR, *J. Appl. Geophys.*, 43, 147–155, 2000.
13. T.R. Sussmann; E.T. Selig; J.P. Hyslip, Railway track condition indicators from ground penetrating radar, *NDT E Int.*, 36, 157–167, 2003.
14. A. Smekal; E. G. Berggren; M. Silvast, Monitoring and substructure condition assessment of existing railway lines for upgrading to higher axle loads and speeds, *Proc. 7th WCRR*, Montreal, 5–7 June 2006.
15. C. Plati; A. Loizos; V. Papavasiliou, Inspection of railroad ballast using geophysical method. *Int. J. Pavement Eng.*, 11, 309–317, 2010.
16. M. Silvast; A. Nurmikolu; B. Wiljanen; M. Levomaki, An inspection of railway ballast quality using ground penetrating radar in Finland. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 224, 345–351, 2010.
17. E. Fortunato, *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Ph.D. Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Fac. Eng. Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2005.
18. Clark, M.R.; Gillespie, R.; Kemp, T.; McCann, D.M.; Forde, M.C. Electromagnetic properties of railway ballast. *NDT E Int.* 2001, 34, 305–311.
19. T. Saarenketo, *Electrical Properties of Road Materials and Subgrade Soils and the Use of Ground Penetrating Radar in Traffic Infrastructure Surveys*. Ph.D. Thesis, University of Oulu, Oulu, Finland, 2006.
20. E. Fortunato; A. Pinelo; M. Matos Fernandes. Characterization of the fouled ballast layer in the substructure of a 19th century railway track under renewal. *Soils Foundations*, 50, 55–62, 2010.
21. B. Indraratna; L. Su; C. Rujikiatkamjorn, A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling. *Can. Geotech. J.*, 48, 322–326, 2011.
22. P. Anbazhagan; L. Su; B. Indraratna; C. Rujikiatkamjorn, Model track studies on fouled ballast using ground penetrating radar and multichannel analysis of surface wave, *J. Appl. Geophys.*, 74, 175–184, 2011.
23. F. de Chiara, *Improving of Railway Track Diagnosis Using Ground Penetrating Radar*. Ph.D. Thesis, Sapienza University of Rome, Rome, Italy, 2014.