



Remoção da onda direta no processamento de dados GPR

Stenico, N. O.¹; França, E. T.¹; Treiber, H. M.¹; Françoso, M. T.¹; Almeida, L. C.¹; Oliveira, P. G.²; Oliveira, L.³

¹Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU)-Unicamp

²Engenharia de Via Permanente EFVM, VALE S A.

³Centro de Excelência Ferrovia, VALE S. A.

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

O método GPR é uma importante ferramenta de Investigação Não Destrutiva (IND), principalmente para avaliações de elementos estruturais. Esse tipo de aplicação requer precisão na identificação dos alvos e na delimitação de camadas. Em alvos próximos à superfície, a onda direta e a onda refletida se sobrepõem, interferindo na interpretação dos dados. Um teste foi executado para isolar completamente os eventos no traço, deslocando a antena verticalmente em relação à superfície refletora. Neste caso, o levantamento foi realizado sobre uma camada de 40 cm de lastro ferroviário. Um procedimento foi aplicado em dados sintético e real para remover a onda direta. A partir disso, a espessura da camada foi calculada tomando como referência os picos positivo e negativo da primeira onda refletida. Os resultados mostraram que o procedimento realizado com os traços melhoraram a razão sinal-ruído, realçando as reflexões de interesse e que a remoção da onda direta não alterou significativamente o tempo de chegada do primeiro pico positivo.

Introdução

O *Grounding Penetrating Radar* (GPR) é um método geofísico de altas frequências, que possibilita a aquisição de dados de modo rápido e versátil, gerando resultados de imageamento da subsuperfície em alta resolução. Estes fatores tornam o método GPR uma importante ferramenta para Investigação Não Destrutiva (IND), principalmente na avaliação de condições de elementos estruturais, que requer precisão na localização de alvos e na delimitação de interfaces. Desta forma, a identificação acurada do tempo de chegada das ondas (*wavelets*) é essencial para obter um resultado satisfatório e confiável.

Nos dados do método GPR adquiridos com antenas *Ground-Coupled*, em que os alvos investigados estão próximos à superfície, as ondas direta e refletida se sobrepõem. Considerando que a onda direta é geralmente o pulso de maior amplitude do sinal, a sobreposição desses eventos prejudica a localização do tempo de chegada do sinal refletido, interferindo na precisão da interpretação dos dados (Wang & Liu, 2017). Yelf (2004) apresenta o "*Antenna Lifting Test*", um teste que consiste no deslocamento vertical da antena em

relação à uma superfície, para examinar a separação dos eventos conforme a distância do transmissor para o refletor aumenta. Diamanti & Annan (2017) utilizaram o mesmo procedimento para estudar o comportamento e o padrão das ondas, de acordo com o deslocamento da antena. Os autores observaram que a onda refletida é totalmente isolada da onda direta, quando a altura do transmissor-refletor é maior que o tamanho do pulso propagado no ar.

Este trabalho aplica o "*Antenna Lifting Test*" em uma camada de lastro, um elemento importante da estrutura ferroviária responsável, principalmente, por manter a posição dos trilhos, reduzir o estresse para as interfaces inferiores e auxiliar na drenagem da água (Clark et al., 2001). O lastro é uma camada composta por agregados de rocha dura e angular, de especificação apropriada em relação à granulometria, forma, dureza, resistência e composição (geralmente granito, basalto, calcário e cascalho) (Selig & Waters, 1994). Deste modo, o lastro configura um meio heterogêneo bifásico complexo, composto por ar e fragmentos de rocha, que podem aumentar a dificuldade de análise do sinal do método GPR.

Considerando o contexto apresentado, o objetivo desta pesquisa é remover a onda direta transmissor-receptor e reconstruir a onda refletida da interface ar-lastro para realçar os refletores de interesse, além de verificar a influência da onda direta no cálculo da espessura da camada de lastro.

Metodologia

O método GPR consiste no registro da amplitude do sinal em função do tempo duplo de viagem, quando a onda eletromagnética sofre reflexão pelo contraste de propriedade física. O comprimento de onda (λ) depende da velocidade de propagação do meio e da frequência central da antena. Neste estudo utilizou-se a antena de frequência central de 1600 MHz, cujo comprimento da *wavelet* que se propaga no ar é de 18,75 cm. Empregase a metodologia baseada no "*Antenna Lifting Test*" (Yelf, 2004), aplicada em dado sintético e em dado real. Em ambas aplicações, deslocou-se a antena verticalmente, partindo da superfície da camada de lastro (z_i) até a altura máxima (z_f), de forma que o levantamento A-Scan é adquirido a cada Δz , com a janela de tempo do sinal de t_j . Cada passo de aquisição gera um traço, e o conjunto de traços são agrupados em um radargrama. A seguir, realizaram-se os seguintes procedimentos:

1) Análise dos traços gerados pelas antenas com $z > 18,75$ cm para identificar o tempo de corte (t_c), no qual a onda

direta pode ser removida completamente do sinal;

II) Remoção dos eventos anteriores a t_c , reposicionando o tempo inicial, reduzindo a janela de tempo do traço $t_r = t_j - t_c$;

III) Reposicionamento dos traços dado pela soma no eixo do tempo de $\Delta t = 2 \times \Delta z/c$, sendo c a velocidade da luz no vácuo. Estabelecendo como cota de referência a altura máxima z_f , os traços em diferentes cotas foram deslocados no tempo em $n \times \Delta t$, sendo $n = (z_f - z)/\Delta z$;

IV) Com todos os eventos na mesma referência de tempo, os traços foram empilhados para remover a influência da onda direta e melhorar a razão sinal-ruído.

Por fim, a janela de tempo do traço empilhado tem tamanho de $t_j^* = t_r + n\Delta t$. A diferença de tempo $t_j^* - t_j$ foi removida da parte inicial do traço empilhado, dispondo-o na janela de tempo original de t_j .

Aplicação em dado sintético

Visando verificar a metodologia proposta realizou-se uma simulação computacional no *software* livre gprMax (Warren et al., 2016), que utiliza o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo para gerar o dado sintético. A forma de onda configurada foi o pulso Ricker e o tipo de antena empregada é o dipolo Hertziano, com o espaçamento transmissor-receptor de 6 cm. O modelo no plano 1D construído é composto por uma camada de 40 cm de lastro, um semi-espaço de solo sotoposto, e o espaço livre (ar). As propriedades físicas utilizadas foram baseadas na bibliografia (Clark et al., 2001; Warren et al., 2016; Françaço et al., 2020), com as camadas compostas por materiais não magnéticos, isto é, a permeabilidade magnética relativa igual 1 e, ambas com mesma condutividade, igual a 10^{-4} mS/m. As permissividades relativas do lastro e do solo (areia siltosa seca) são de 3 e 7, respectivamente.

Realizou-se a simulação com deslocamento vertical da antena, partindo de $z_i = 0$ cm até a altura máxima de $z_f = 84$ cm, com passo de $\Delta z = 6$ cm e janela de tempo do sinal $t_j = 15$ ns, gerando 15 traços.

As Figuras de 1 a 4 mostram a aplicação das etapas apresentadas na metodologia. Na Figura 1 o tempo de corte t_c é selecionado sobre o dado original e, então, todos os eventos anteriores são removidos (Figura 2). Os traços nas diferentes alturas são reposicionados no eixo do tempo, e as reflexões do topo e da base do lastro encontram-se em fase, como mostra a Figura 3, que apresenta 1/3 dos traços gerados. O sinal resultante é dado pelo empilhamento dos traços reposicionados, cujas reflexões do topo e da base do lastro apresentam forma e amplitude semelhantes (Figura 4).

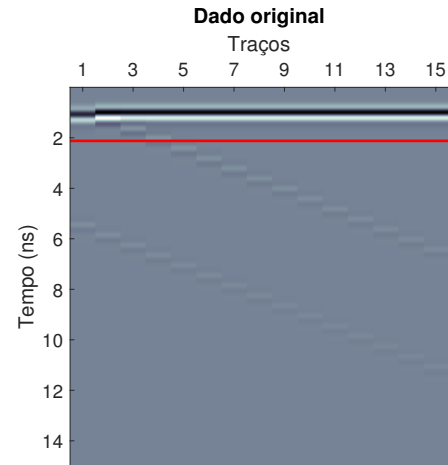


Figura 1 – Radargrama dos traços obtidos em diferentes alturas. A linha vermelha seleciona o tempo de corte ($t_c = 2,13$ ns) para remoção da onda direta.

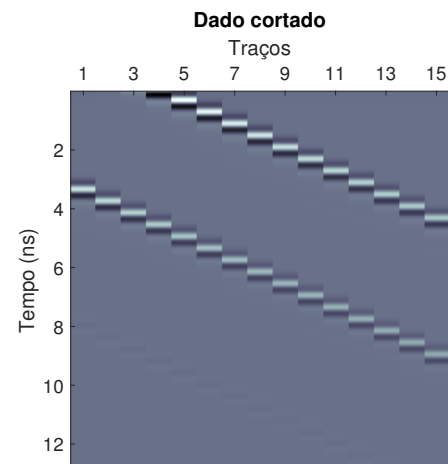


Figura 2 – Radargrama da Figura 1 cortado, removendo todos os eventos anteriores ao tempo de corte t_c .

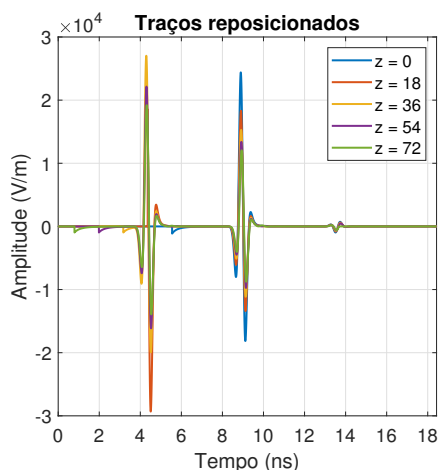


Figura 3 – Reposicionamento dos traços no eixo do tempo. Cada linha é referente ao traço obtido na altura z em centímetros.



Figura 5 – Tripé de madeira utilizado para estabilizar e deslocar verticalmente a antena de 1600 MHz.

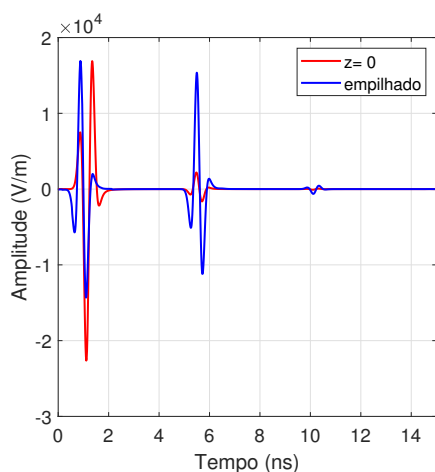


Figura 4 – Comparação entre o traço obtido em $z = 0$ (linha vermelha) e o traço empilhado (linha azul).

Aplicação em dado real

Para confirmar a metodologia proposta fez-se um levantamento em laboratório. As aquisições foram realizadas com o equipamento SIR-3000 da GSSI, pelo modo *Point* (A-Scan), em um sítio controlado constituído por uma camada de lastro de $3,7 \times 8,4$ m e 40 cm de altura, sobre um solo argiloso. Assim como no dado sintético, o passo de deslocamento da antena foi de $\Delta z = 6$ cm, partindo de $z_i = 0$ cm até $z_f = 84$ cm, e janela de tempo de $t_j = 15$ ns. Para deslocar verticalmente a antena, utilizou-se o tripé de madeira apresentado na Figura 5 com uma haste vertical que permite a variação da altura da antena.

A Figura 6 mostra 5 traços adquiridos, repositicionados no eixo do tempo, no entanto, ao contrário do resultado visto no dado sintético (Figura 3), as reflexões do topo e da base do lastro não ficam evidenciadas. Ao realizar o empilhamento dos traços a razão sinal-ruído melhora. Como pode ser visto na Figura 7, observa-se que conforme a quantidade de traços empilhados aumenta, o sinal torna-se menos ruidoso. Por fim, o traço empilhado apresenta as reflexões do topo e da base do lastro bem definidas, com certo grau de semelhança na sua forma (Figura 8), também observado no dado sintético (Figura 4).

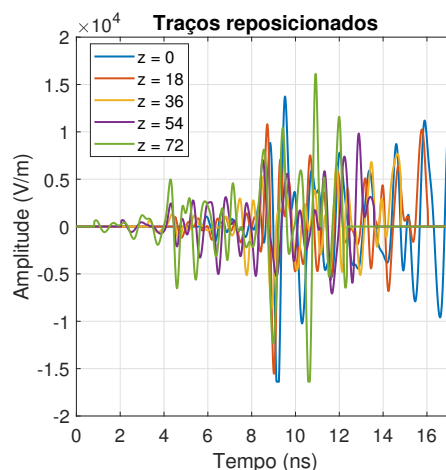


Figura 6 – Reposicionamento dos traços no eixo do tempo. Cada linha é referente ao traço obtido na altura z em centímetros.

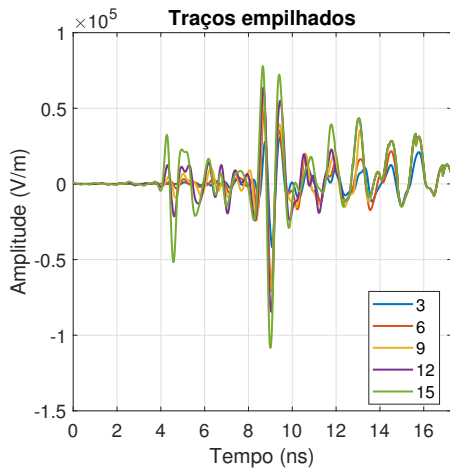


Figura 7 – Padrão de comportamento do empilhamento de acordo com a quantidade de traços utilizados. Cada linha representa a quantidade de traços empilhados.

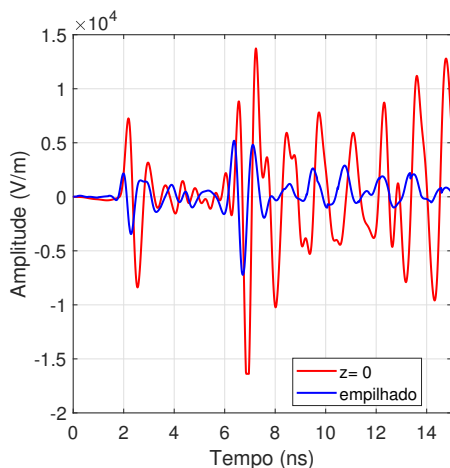


Figura 8 – Comparação entre o traço obtido em $z = 0$ (linha vermelha) e o traço empilhado (linha azul).

Resultados

Nesta seção são discutidos os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada em dado sintético e em dado real. Em ambos os casos, os resultados apresentam as reflexões do topo e da base do lastro realçadas (Figuras 4 e 8), tendo um grau de semelhança na sua forma. Isso pode evidenciar que o sinal tem pouca interferência da onda direta na reflexão da interface ar-lastro.

Para a análise de velocidade no dado real, realizou-se um levantamento B-Scan visando detectar um tubo metálico de 9 cm de diâmetro localizado a 20 cm da superfície da camada de lastro, como pode ser observado na Figura 9. Para o processamento utilizou-se o *software Reflexw*, ajustando a hipérbole de difração com a velocidade de $v = 0,185$ m/ns (Figura 10).



Figura 9 – Tubo metálico inserido na camada de lastro para realizar análise de velocidade.

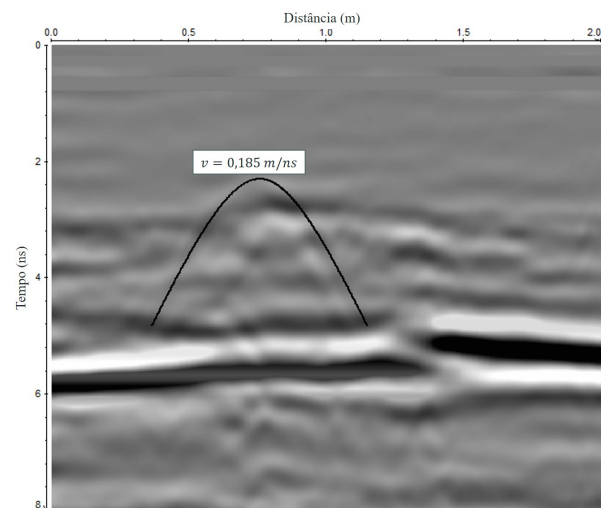


Figura 10 – Ajuste da hipérbole de difração para camada de lastro com velocidade $v = 0,185$ m/ns.

O cálculo da espessura da camada de lastro é realizado com a diferença de tempo entre as reflexões do topo e da base. Como pode ser observado na Figura 11, Yelf (2004) mostra cinco posições (A, B, C, D e E) na *wavelet* para obter essa diferença de tempo. Foram escolhidos dois desses critérios: o primeiro pico negativo (B) e o primeiro pico positivo (E). Para o dado sintético, as espessuras obtidas, usando o primeiro pico negativo, são de 35,7 cm e 39,9 cm para o traço na superfície ($z = 0$) e o empilhado, respectivamente. Adotando o critério do primeiro pico positivo, as espessuras obtidas são de 39,8 cm para o traço na superfície e 39,9 cm para o traço empilhado. Já para o dado real, utilizando o primeiro pico negativo como critério, as espessuras calculadas são de 34,4 cm para o traço na superfície e 39,6 cm para o traço empilhado e, adotando o primeiro pico positivo, a espessura obtida é de

40,5 cm, tanto para o traço na superfície como para o traço empilhado.

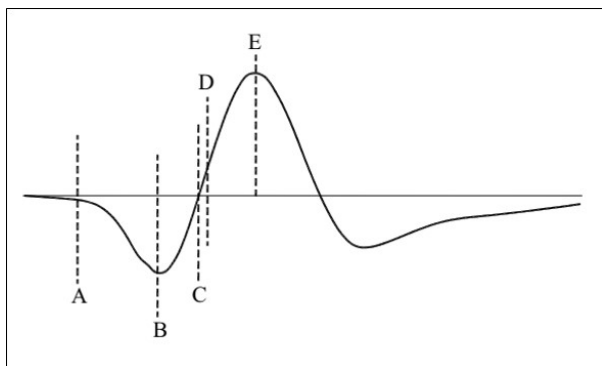


Figura 11 – Posições para considerar como critério de seleção do tempo de chegada da wavelet. Fonte: Yelf (2004).

Conclusões

Foi apresentada uma metodologia para a remoção da onda direta de dados GPR, aplicada em dados sintético e real. O empilhamento dos traços em diferentes alturas melhorou a razão sinal-ruído no dado real, ressaltando as reflexões de interesse (Figura 8). Aplicando os critérios do pico positivo e do pico negativo nos dados sintético e real, os valores de espessura calculados apresentam pouca variação utilizando o traço empilhado, evidenciando que a remoção da influência da onda direta e o procedimento realizado auxiliam na qualidade da interpretação. Para o traço na superfície ($z = 0$), os valores das espessuras calculada pelo pico negativo no dado sintético e no real diferem significativamente, enquanto que as espessuras calculadas pelo pico positivo apresentam pouca variação. Deste modo, para avaliações em camada de lastro recomenda-se utilizar o primeiro pico positivo para identificação do tempo de chegada da onda. Sugere-se que esse teste também seja realizado em outros materiais para verificar a influência da onda direta no tempo de chegada do sinal.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio da empresa Vale S.A. através do Acordo de Cooperação Científica e Tecnológica.

Referências

Clark, M., Gillespie, R., Kemp, T., McCann, D. & Forde, M., 2001. Electromagnetic properties of railway ballast, *NDT & E International*, vol. 34(5): 305–311, doi:[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00006-2).

Diamanti, N. & Annan, A. P., 2017. Air-launched and ground-coupled gpr data, in: 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 1694–1698, doi:[10.23919/EuCAP.2017.7928409](https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928409).

Françoso, M. T., Treiber, H. M., Marchena, I. J. P. & Farina, F., 2020. Modelagem numérica do uso do ground penetrating radar na investigação de defeitos em pavimentos flexíveis, *Transportes*, doi:<https://doi.org/10.14295/transportes.v28i1.1883>.

Selig, E. T. & Waters, J. M., 1994. TRACK GEOTECHNOLOGY and SUBSTRUCTURE MANAGEMENT, Thomas Telford Publishing, doi:[10.1680/tgasm.20139](https://doi.org/10.1680/tgasm.20139).

Wang, X. & Liu, S., 2017. Noise suppressing and direct wave arrivals removal in gpr data based on shearlet transform, *Signal Processing*, vol. 132: 227–242, doi:<https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.05.007>.

Warren, C., Giannopoulos, A. & Giannakis, I., 2016. gprmax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for ground penetrating radar, *Computer Physics Communications*, vol. 209: 163–170, doi:<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>.

Yelf, R., 2004. Where is true time zero ?, vol. 7, 279–282, doi:[10.1109/ICGPR.2004.179979](https://doi.org/10.1109/ICGPR.2004.179979).