



Avaliação temporal-espectral de tambores metálicos utilizando o método GPR

Túlio Cordeiro Bicudo e Vinícius Rafael Neris dos Santos (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

A área de avaliação de estruturas no subsolo vem crescendo com as grandes obras de engenharia, sendo necessário realizar tal tarefa de maneira rápida e de preferência não destrutiva. Em 2003 foi instalado no campus da USP o sítio controlado de geofísica rasa (SCGR) e desde então alvos metálicos, plásticos e de concreto foram mantidos instalados, sob a ação de chuvas intensas, estiagem e altas temperaturas, que podem causar algum tipo de desgaste nos materiais em subsuperfície. Tais mudanças podem ser imperceptíveis ao serem analisadas com o método GPR (*Ground Penetrating Radar*) no domínio do tempo, porém, ao realizar uma análise tempo-frequência, pode-se determinar alguma mudança da interação da onda eletromagnética com o material, indicando possíveis desgastes com o tempo como oxidação, deformação por eventos mecânicos, rachaduras ou até vazamentos. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise espectral utilizando a densidade espectral e a transformada de Fourier no tempo curto em tambores metálicos, na frequência de 200 MHz. Os dados utilizados foram adquiridos nos anos de 2005, 2007, 2009, 2014 e 2017. Os resultados preliminares mostraram uma variação da amplitude do espectro quatro anos após a instalação dos alvos, indicando uma alteração do material em subsuperfície.

Introdução

Com o crescimento de obras de engenharia nos grandes centros urbanos houve a necessidade de se realizar uma avaliação de estruturas em subsuperfície, como por exemplo, tubulações de água, gás e esgoto ou cabos elétricos, de maneira rápida e preferencialmente não destrutiva. O método *Ground Penetrating Radar* (GPR) é utilizado mundialmente em estudos geotécnicos, pois é uma ferramenta eficiente para tal fim, já que identifica as anomalias do subsolo de uma forma ágil e sem destruir o meio. Atualmente pesquisas vêm sendo realizadas visando melhorar a identificação e principalmente na avaliação para o controle de qualidade dessas estruturas.

Na área de controle de qualidade, temos estudos para análise de asfalto (Shangguan et al. 2014; Long et al., 2016), no qual é possível localizar rachaduras,

determinar espessura ou outros possíveis defeitos em pavimentos. Na engenharia civil é possível analisar estruturas de concreto em que se detecta rachaduras ou zonas de fraqueza (Hugenschmidt et al., 2010, Cheialkou and Matikas, 2016, Zheng et al., 2016) ou infiltrações (Hugenschmidt and Loser, 2008). Recentemente, o GPR também tem sido utilizado para a inspeção de tubulações onde é possível determinar vazamentos (Lai et al., 2016) ou até mesmo oxidação e deformações por eventos mecânicos (Wahaban, 2013; Zhang et al., 2015).

O estudo do sinal eletromagnético (EM) também vem sendo objeto de estudo ao longo dos anos. As pesquisas têm o objetivo melhorar a visualização de objetos enterrados ou determinar a interação eletromagnética com algum tipo de material. Lai et al. (2010) propôs um estudo sobre o conteúdo de água em barras de concreto utilizando a transformada de Fourier no tempo curto, sendo possível detectar zonas mais úmidas no concreto. van Genderen & Nicolaescu (2005) utilizaram a densidade espectral do sinal GPR para detectar pequenos objetos no subsolo, em especial minas terrestres. A densidade espectral teve a capacidade de diferenciar as anomalias geradas por minas terrestres de outros tipos, possibilitando o auxílio na interpretação dos perfis GPR. Santos et al. (2014) analisaram diferentes sinais EM em materiais metálicos, plásticos e de concreto, através da densidade espectral, transformada de Fourier no tempo curto e distribuição Wigner-Ville e mostraram a diferença de amplitude no domínio da frequência entre estes materiais, podendo haver uma diferenciação entre eles, o que não ocorre no domínio do tempo.

Neste sentido, este trabalho realizou uma avaliação dos alvos enterrados no SCGR através do estudo da amplitude de espectro do sinal EM utilizando a densidade espectral (power spectral density - PSD) e a transformada de Fourier no tempo curto (short-time Fourier transform - STFT) para checar a interação dos materiais com a onda EM em função do tempo em que os objetos estão enterrados. Os resultados obtidos nesta pesquisa, sob condições controladas de campo, contribuem para a interpretação de dados geofísicos rasos e podem ser extrapolados para áreas onde não se têm informações da subsuperfície.

Métodos

Uma sequência de amostras pode ser representada por um conjunto de coeficientes espectrais chamado de densidade espectral, que fornece uma medida significativa da distribuição da potência média em uma série de tempo. Uma estimativa PSD chama-se de

periodograma e pode ser definida da seguinte maneira (Welch, 1967):

$$PSD = \frac{X(f)X(f)^*}{2\pi} \quad (1)$$

onde $X(f)$ é a transformada de Fourier, $X(f)^*$ é o complexo conjugado da transformada de Fourier e f representa o domínio da frequência.

O periodograma sofre com alguns inconvenientes e entre eles a variação excessiva (Kanasewich, 1975). Bartlett (1948) sugeriu que a variância seria reduzida se o segmento de tempo fosse dividido em subgrupos, com o periodograma então calculado para cada subconjunto e a densidade de energia média obtida para cada frequência de forma a obter uma maior redução na variância. Isto foi aplicado sobre os dados de radar e, como resultado, a segmentação tornou-se mais sensível à presença e a localização do alvo.

Em alguns casos práticos é necessário estabelecer como varia, com o tempo, o conteúdo de frequências do sinal. Para resolver esse problema, aplica-se a transformada de Fourier no tempo curto, que corresponde a uma técnica de decomposição espectral ou decomposição tempo-frequência (Rosa, 2010).

Embora a análise de Fourier permita a passagem do domínio do tempo para o domínio da frequência, a sua utilização refere-se a sinais estacionários, cujas propriedades não evoluem com o tempo. Apenas a transformada de Fourier não permite uma combinação dos dois domínios e, em particular, a informação temporal não é facilmente acessível no domínio da frequência. Se por um lado o espectro mostra a amplitude total com a qual cada frequência está contida no sinal, por outro não fornece informação sobre a localização do tempo de componentes espectrais (Daubechies, 1990). Qualquer mudança abrupta no tempo de um sinal não estacionário é espalhada sobre o eixo da frequência na transformada de Fourier, sendo que esta é baseada na informação global o que não é adequado para o estudo de padrões compactos ou local.

Assim, uma análise adaptada para sinais não estacionários requer mais do que a transformada de Fourier (Cohen, 1995). A STFT é uma das técnicas tempo-frequências normalmente utilizadas para esta finalidade. A STFT pode ser definida da seguinte forma:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)g(t - \tau)e^{i2\pi ft} d\tau \quad (2)$$

onde $STFT(\tau, f)$ é a Transformada de Fourier no tempo curto do sinal $s(t)$ em torno do tempo τ , enquanto $g(t)$ é a função responsável pelo janelamento.

Sítio controlado de geofísica rasa - SCGR

A área do SCGR é composta por um aterro caracterizado por argila arenosa a siltosa com espessura inferior a 3 m (Borges, 2002). Os diversos objetos implantados nas linhas de estudos foram escolhidos visando simular alvos normalmente encontrados em ambiente urbano, tais como alvos geotécnicos, arqueológicos ou situações de contaminação ambiental, etc. A localização do SCGR

está mostrada na Figura 1. Detalhes sobre a instalação do SCGR e resultados geofísicos podem ser encontrados em Porsani et al. (2006) e Borges (2007), dentre outros. O sítio controlado possui uma área total de 1500 m² (30 m x 50 m) e é composto por sete linhas contendo diferentes materiais (alvos arqueológicos, tubos de PVC, manilhas de concreto, tambores e tubos metálicos, tambores plásticos e cabos elétricos).

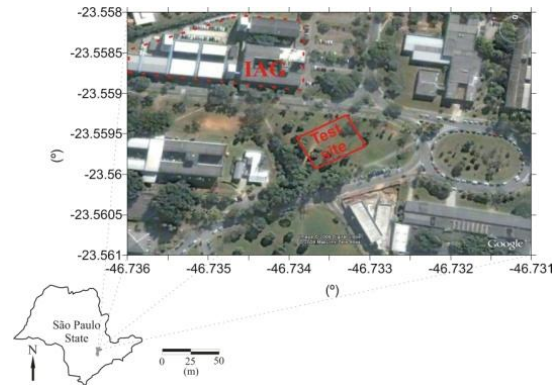


Figura 1 – Localização do SCGR.

Neste trabalho foi utilizada a linha caracterizada por tambores metálicos vazios, apresentando tambores de aço carbono de 200 litros, com 86 cm de altura e 59 cm de diâmetro externo e dispostos na horizontal e na vertical, como também individual e aos pares. Cumpre observar que, os tambores são similares aos utilizados para armazenar produtos tóxicos em fábricas, com o objetivo de simular a ocorrência de problemas ambientais.

Um esquema da linha de estudo é mostrado na Figura 2, sendo que foram analisados os alvos posicionados em 7, 11 e 24 m (em vermelho), respectivamente a 0,5, 1,0 e 1,0 m de profundidade. Para diversificar os tipos de dados, estes alvos foram escolhidos, pois dois deles estão na mesma posição, mas em profundidades diferentes (alvos 1 e 3) e dois deles estão na mesma profundidade, porém em posições diferentes (alvos 2 e 3).

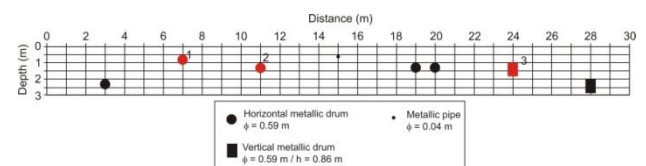


Figura 2 – Esquema mostrando a linha de estudo contendo tambores metálicos (em vermelho são os alvos estudados).

Para a aquisição de dados foi utilizado um sistema GPR da fabricante GSSI, na frequência de 200 MHz. Neste trabalho estão apresentados os dados obtidos nos anos de 2005, 2007, 2009, 2014 e 2017, onde foram

adquiridos sempre durante os meses entre Janeiro e Março. Os perfis possuem 30 m de comprimento, com um total de 1501 traços, com 512 amostras em cada e a janela temporal utilizada foi de 100 ns.

Para o processamento dos dados foi utilizado o software ReflexW 5.0 (Sandmeier, 2016), onde foram empregadas as seguintes etapas: correção do tempo zero, remoção do ganho de cabeçalho, filtro passa-banda, ganho linear com a profundidade e remoção do background. A velocidade ajustada para os perfis foi de 0,072 m/ns, com base no tempo obtido nos radargramas e a profundidade dos alvos conhecida. Um detalhe importante é que todos os dados foram adquiridos com os mesmos parâmetros, no mesmo período do ano e foram aplicadas as mesmas etapas de processamento.

Resultados

Os dados de GPR obtidos para os alvos estudados estão mostrados na Figura 3. Não é possível determinar diferenças entre as anomalias através dos radargramas. Para a análise do espectro dos sinais, os A-scans foram selecionados nas posições de cada alvo e estes podem ser vistos na Figura 4. Através dos sinais é possível determinar uma diferença de amplitude entre os anos de 2007 e 2009, possuindo as menores amplitudes.

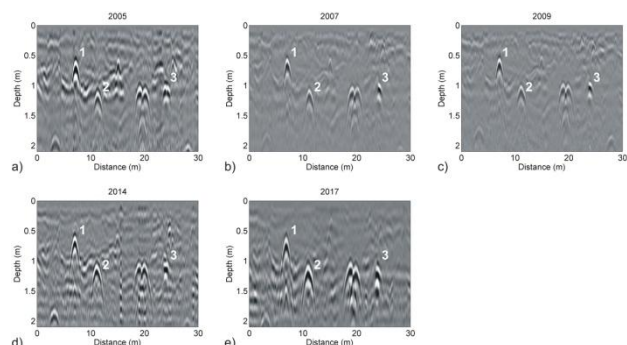


Figura 3 – Dados GPR obtidos na linha de tambores metálicos para diferentes anos de aquisição. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2014. e) 2017.

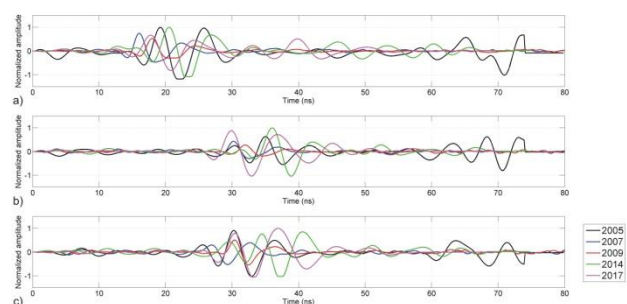


Figura 4 – Traços GPR obtidos para os três alvos estudados ao longo dos anos. a) Alvo 1: tambor metálico horizontal a 0,5 m de profundidade. b) Alvo 2: tambor metálico horizontal a 1,0 m de profundidade. c) Alvo 3: tambor metálico vertical a 1,0 m de profundidade.

Para o cálculo do PSD e da STFT foi utilizado o software GPR/SA (Ground Penetrating Radar Signal Analysis, Santos, 2017). O software foi desenvolvido em Matlab e pode executar a análise do sinal GPR na forma de A-scans ou B-scans através de diferentes ferramentas. Obtendo a distribuição PSD em função da frequência (Figura 5), temos a variação de energia do sinal. Para os três alvos estudados, os anos de 2007 e 2009 possuem os menores valores de PSD. Os picos de frequência central do alvo 1 estão posicionados em aproximadamente 150 MHz e o tambor metálico horizontal mais profundo (alvo 2) tem os picos situados entre 125 e 200 MHz. Os alvos 2 e 3 têm a amplitude PSD mais elevada na última aquisição (2017) e o pico de frequência centrado em 125 MHz, aproximadamente.

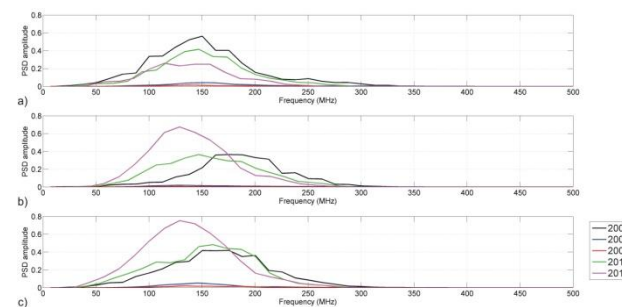


Figura 5 – Distribuição PSD para os três alvos estudados ao longo dos anos. a) Alvo 1: tambor metálico horizontal a 0,5 m de profundidade. b) Alvo 2: tambor metálico horizontal a 1,0 m de profundidade. c) Alvo 3: tambor metálico vertical a 1,0 m de profundidade.

A Figura 6 mostra a variação anual da amplitude máxima da distribuição PSD para os alvos 1, 2 e 3. Desde a instalação, em 2003, até o ano de 2007 a amplitude PSD diminuiu, para os três tambores metálicos, indicando uma possível mudança no comportamento eletromagnético do material e do meio em que ele está enterrado. Possíveis fatores para este comportamento são a compactação do solo ou a alguma alteração na composição metálica do tambor durante estes quatro anos.

Devido a infiltração de água da chuva no solo durante este tempo, pode ocorrer a oxidação do metal. De acordo com Nyvall (2002), em 1 m de solo argiloso é possível armazenar 0,2 m de água. Desta maneira, os alvos mais profundos (2 e 3) podem não sofrer alterações com a infiltração de água, porém é provável que se forme uma fina camada entre o metal e o solo modificando a interação eletromagnética da reflexão do GPR.

Entre 2007 e 2009 a variação anual mostrou-se constante e a partir de 2009 ocorre um aumento da máxima amplitude, aproximadamente linear, até os dias de hoje. Entre 2014 e 2017 o alvo mais raso (1) ocorreu uma diminuição da amplitude.

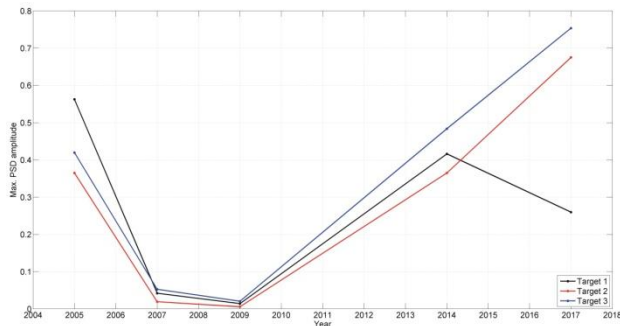


Figura 6 – Variação PSD ao longo dos anos para os três alvos estudados. a) Alvo 1: tambor metálico horizontal a 0,5 m de profundidade. b) Alvo 2: tambor metálico horizontal a 1,0 m de profundidade. c) Alvo 3: tambor metálico vertical a 1,0 m de profundidade.

O STFT fornece a distribuição tempo-frequência do espectro do sinal. Um exemplo desta distribuição pode ser vista na Figura 7, onde se tem o STFT para o tambor metálico 1 em diferentes anos. Pela figura nota-se uma diferença na forma e na amplitude de cada distribuição. É possível analisar o STFT nos domínios do tempo e da frequência, sendo que a variação para cada domínio pode ser vista na Figura 8.

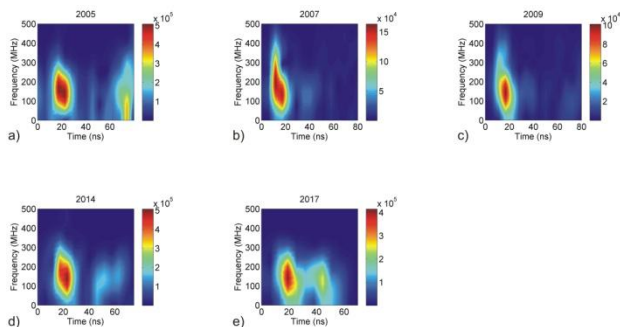


Figura 7 – Exemplo de resultado STFT para diferentes anos. a) 2005. b) 2007. c) 2009. d) 2014. e) 2017.

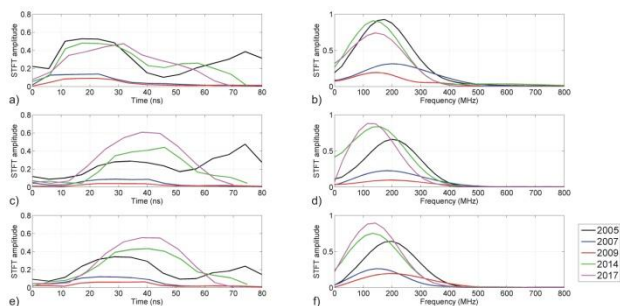


Figura 8 – Resultados STFT em diferentes anos para os três alvos estudados (alvo 1: a/b; alvo 2: c/d; alvo 3: e/f), no domínio do tempo (a, c e e) e no domínio da frequência (b, d e f).

A distribuição do STFT é semelhante ao PSD, sendo que entre os anos de 2007 e 2009 ocorre uma diminuição na amplitude nos dois domínios. Novamente, para os alvos mais profundos, a amplitude obtida em 2017 apresenta o maior pico. Da mesma maneira como apresentada para a distribuição PSD, a Figura 9 mostra a variação anual da máxima amplitude do STFT. A forma das curvas (domínios do tempo e frequência) são semelhantes ao PSD, mostrando novamente dois eventos entre 2003 e 2007 e entre 2009 e 2017.

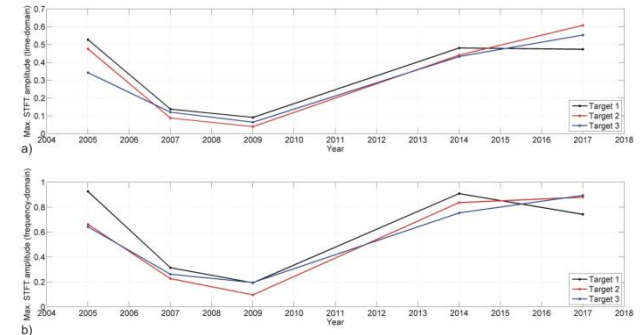


Figura 9 – Variação STFT ao longo dos anos para os três alvos estudados. a) Alvo 1: tambor metálico horizontal a 0,5 m de profundidade. b) Alvo 2: tambor metálico horizontal a 1,0 m de profundidade. c) Alvo 3: tambor metálico vertical a 1,0 m de profundidade.

Conclusões

Neste trabalho foi realizada uma avaliação de tambores metálicos instalados no sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP utilizando a densidade espectral e a transformada de Fourier no tempo curto. Esta avaliação foi feita para se determinar alterações nos tambores, como oxidação ou deformações, através do estudo do espectro do sinal eletromagnético obtido com o método GPR. Pelos radargramas não foi possível determinar nenhuma mudança, mas pela distribuição do PSD e do STFT verificou-se dois períodos de possíveis alterações, de 2003 (instalação) até 2007 e de 2009 a 2017. Preliminarmente, podemos concluir que a oxidação pode ter ocorrido no alvo mais raso devido a infiltração de água da chuva, já nos alvos mais profundos as mudanças observadas podem ter ocorrido devido a compactação do solo. Nas próximas etapas do trabalho serão observadas com maior exatidão as causas dessa variação da amplitude do espectro, relacionando-as com o desgaste dos materiais em subsuperfície.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento da construção do SCGR do IAG/USP (Processo: 2002/07509-1). TCB agradece a FAPESP pela bolsa de iniciação científica (Processo: 2016/22978-0).

Referências

- BARTLETT, M.S.** 1948. Periodogram analysis and continuous spectra. *Biometrika Trust*, Vol. 37, no. 1, p. 1-16.
- BORGES, W.R.** 2002. Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. Dissertação de Mestrado (Departamento de Geofísica), IAG/USP, 153p.
- BORGES, W.R.** 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. PhD Thesis, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP, São Paulo, Brazil.
- CHEIALKOU, E., MATIKAS, T.** 2016. Development of an advanced, high-frequency GPR technique for the assessment of concrete structures: from modeling predictions to experimental results. *Proc. SPIE 9806, Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2016*, April 1, 2016.
- COHEN, L.** 1995. Time-frequency analysis. Hunter College and Graduate Center of the City university of New York. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- DAUBECHIES, I.** 1990. The Wavelet Transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Transaction on Information Theory*, Vol. 36, no. 5, pp. 961-1005.
- HUGENSCHMIDT, J., LOSER, R.** 2008. Detection of chlorides and moisture in concrete structures with ground penetrating radar. *Materials and Structures*, 41, 785-792.
- HUGENSCHMIDT, J., KALOGEROPOULOS, A., SOLDVIERI, F., PRISCO, G.** 2010. Processing strategies for high-resolution GPR concrete inspections. *NDT&E International*, 43, 334-342.
- KANASEWICH, E.R.** 1975. Time sequence analysis in Geophysics. University of Alberta Press, Canada, second revised edition.
- LAI, W.L., KIND, T., WIGGENHAUSER, H.** 2010. A study of concrete hydration and dielectric relaxation mechanism using ground penetrating radar and short-time Fourier transform. *Journal on Advances in Signal processing*, V. 2010.
- LAI, W.L., CHANG, R.K.W., SHAM, J.F.C., PANG, K.** 2016. Perturbation mapping of water leak in buried water pipes via laboratory validation experiments with high-frequency ground penetrating radar (GPR). *Tunneling and Underground Space Technology*, 52, 157-167.
- LONG, Z.J., ZHANG, Y.X., LIU, H., WU., J.W., OUYANG, W.Z., XIA, Y.Y., LIU, Q.H.** 2016. GPR inspection of asphalt pavement using an off-ground antenna array. 16th International Conference of Ground Penetrating Radar.
- NYVALL, J.** 2002. Soil water storage capacity and available soil moisture. Resource Management Branch, Ministry of Agriculture, Food and Fisheries.
- PORSANI, J.L., BORGES, W.R., RODRIGUES, S.I., HODO, F.Y.** 2006. O sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica* 24, 49-61.
- ROSA, A.L.R.** 2010. Análise do sinal sísmico. Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf. 668p.
- SANDMEIER, K.J.** 2016. ReflexW 8.1, Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Karlsruhe, Germany.
- SANTOS, V.R.N., AL-NUAIMY, W., PORSANI, J.L., HIRATA, N.S.T., HAMZAH, S.A.** 2014. Spectral analysis of ground penetrating radar signals in concrete, metallic and plastic targets. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 100, p. 32-43.
- SANTOS, V.R.N.** 2017. Manual em português; GPR/SA - Ground Penetrating Radar Signal Analysis (INPI: BR512016001541-1).
- SHANGGUAN, P., AL-QADI, I., COENEN, A., ZHAO, S.** 2014. Algorithm development for the application of ground-penetrating radar on asphalt pavement compaction monitoring. *International Journal of Pavement Engineering*.
- van GENDEREN, P., NICOLAESCU, I.** 2005. Imaging of stepped frequency continuous wave GPR data using the Yule-Walker parametric method. *Radar Conference, 2005, EURAD, Paris*, pp. 77-80.
- WAHABAN, S.W.** 2013. Assessing the condition of buried pipe using ground penetrating radar. Thesis, The University of Birmingham, School of Civil Engineering.
- WELCH, P.** 1967. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Transaction on Audio and Electroacoustics*, Vol. AU-15, no. 2.
- ZHANG, Y., CANDRA, P., WANG, G., XIA, T.** 2015. 2-D entropy and short-time Fourier transform to leverage GPR data analysis efficiency. *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, 64(1), 103-111.
- ZHENG, H., GAN, T.H., SELCUK, C., CHEILAKOU, E.** 2016. Comparison Study on Migration Methods of GPR Scanning Images for Concrete Inspection. 8th European Workshop on Structural Health Monitoring, July 2016.