

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E APLICAÇÕES DO GEORADAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Caroline Katayama de Lima Oliveira¹; Júlio César Swartele^{2,3,3}; Ronaldo Barros Órfão^{2,4}; Mayara dos Santos Amarante^{2,5}

RESUMO

O Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetrating Radar* ou *GRP*) é um aparelho que pode auxiliar na erradicação de problemas da construção civil relativos ao monitoramento e sondagens do solo e estruturas. A partir das primeiras pesquisas relacionadas à propagação de ondas eletromagnéticas sobre e pela extensão de superfícies realizadas em 1900 e após 85 anos de desenvolvimento com aplicações de pesquisa científica e do programa espacial americano na Lua, o aparelho, inicialmente desenvolvido para comercialização no Japão nos anos 80, se tornou disponível no mercado. A técnica usada pelo aparelho consiste na emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência em superfícies e análise das diferentes reflexões da propagação dessas ondas em diferentes tipos de materiais, permitindo identificá-los a partir das equações do vetor densidade de corrente elétrica, do vetor de deslocamento elétrico e vetor densidade do fluxo magnético presentes na teoria eletromagnética. Por fim, a grande variedade de aplicações do aparelho se estende a inspecionar asfalto permitindo a retirada de amostras em quantidade e nos locais adequados além da verificação da espessura e presença de degradação subterrânea. Tais análises podem contribuir na diminuição do índice de 57% de rodovias avaliadas como regular, ruim ou péssima dos 107.161 km inspecionados pelo Conselho Nacional de Transporte. Em concreto é possível delinear as espessuras de camadas, localizar precisamente a posição de objetos embutidos tais como vergalhões, cabos elétricos e conduítes além de identificar anomalias como rachaduras profundas, vãos e deterioração. Enfim, a versatilidade e eficiência do aparelho será de grande utilidade no cenário brasileiro.

Palavras-chave: Engenharia civil, geofísica, GPR, georadar

ABSTRACT

The Ground Penetrating Radar (GRP) is a device that can aid in the eradication of construction problems related to monitoring and surveys of soil and structures. From the first researches related to the propagation of electromagnetic waves on and by the extension of surfaces realized in 1900 and after 85 years of development with applications of scientific research and of the American space program in the Moon, the device, initially developed for commercialization in Japan in the years 80, has become available in the market. The technique used by the apparatus consists of the emission of high frequency electromagnetic waves on surfaces and analysis of the different reflections of the propagation of these waves in different types of materials, allowing to identify them from the equations of the electric current density vector, the displacement vector electric and magnetic flux density vector present in electromagnetic theory. Finally, the wide variety of applications of the apparatus extends to inspect asphalt allowing the removal of samples in quantity and in the appropriate places besides the verification of the thickness and presence of underground degradation. Such analyzes may contribute to the reduction of 57% of roads evaluated as regular, poor or poor of the 107,161 km inspected by the National Transportation Council. In concrete it is possible to delineate layer thicknesses, to precisely locate the position of embedded objects such as rebar, electric cables and conduits, besides identifying anomalies such as deep cracks, spans and deterioration. Anyway, the versatility and efficiency of the device will be of great use in the Brazilian scenario.

Keywords: Civil engineering, geophysics, GPR, georadar

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a construção civil enfrenta muitas problemáticas que envolvem várias etapas da obra, principalmente quando se trata da investigação do subsolo e seu monitoramento, tais como em barragens, rastreamento de tubulações e monitoramento do lençol freático, devido aos contratempos causados pelos métodos mais invasivos, como nos ensaios de sondagem. Além disso, a falta de vistoria para efetuar a manutenção é cada vez mais negligenciada e muitas

1 BACHARELANDO do Curso de Engenharia de Civil, Centro Universitário Brazcubas, Brasil.

2 PROFESSOR Titular do Centro Universitário Brazcubas.

3 MESTRADO em Tecnologias Ambientais pelo Centro de Educação Tecnológica Paula Souza, Brasil (2011).

4 MESTRADO em Educação Matemática pela Universidade Bandeirante de São Paulo, Brasil (2012).

5 MESTRADO em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil (2014).

vezes não é realizado um diagnóstico satisfatório sobre o estado da obra, comprometendo a qualidade e a taxa de depreciação da estrutura. O Conselho Nacional do Transporte (2019), por exemplo, relatou que dos 107.161 km de rodovias avaliadas em 2018 no país, 57% delas apresentaram um estado geral com classificação regular, ruim ou péssima. Por isso, em prol da redução do tempo usado neste tipo de avaliação do solo e facilitação na realização de vistorias, o Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetrating Radar* ou *GPR*) é uma possível opção em vários casos.

Desde 1900, as primeiras pesquisas relacionadas à propagação de ondas eletromagnéticas sobre e pela extensão da superfície começaram a serem realizadas e a partir de 1956, El Said tentou obter a imagem da profundidade de um lençol freático através da emissão e reflexão de sinais transmitidos pelo ar no nível de profundidade do lençol de água. Com o desenvolvimento gradual da técnica através da ecossondagem de gelo nos anos 60, da exploração da superfície lunar durante o programa espacial americano e o aumento nas possíveis aplicações nos anos 70, o primeiro radar baseado na técnica para comercialização foi desenvolvido no Japão nos anos 80. Então, após 1985, com a perspectiva de mercado do aparelho responsável pelo mapeamento do subsolo em alta resolução, o Georadar ou *GPR*, o mapeamento do solo com o instrumento passou a ser realizado cada vez mais (ANNAN, 2003a, p.3-7).

Por sua vez, o método *GPR* visa detectar e analisar a superfícies de terra utilizando um radar que analisa e registra o comportamento de ondas eletromagnéticas de alta frequência introduzidas no solo a fim de identificar os materiais ali existentes. Tal diferenciação entre os componentes do solo é possível devido às variadas propriedades elétrica desses materiais apresentadas durante a propagação da onda inserida que geram uma reflexão específica parcial do sinal de volta à superfície que é amplificada e digitalizada para posterior análise.

Com o avanço tecnológico dos materiais e equipamentos referentes ao Radar de Penetração do Solo e consequente aprimoramento da técnica, esse mecanismo pode ser empregado em muitas áreas da geofísica e engenharia civil, especialmente nas áreas de estruturas e do monitoramento e investigação dos solos. Portanto, para aumentar a eficiência na construção, monitoramento e manutenção de empreendimentos em inúmeras áreas com economia de tempo e recursos, o *GPR* é essencial.

2 MÉTODO

A partir das definições de GERHARDT (2009, p. 37), a pesquisa em questão é de natureza bibliográfica, explorando referências teóricas acerca do objetivo proposto.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Princípio de funcionamento

Baseando-se em ALVES (2014, p. 12-14), os princípios do *GPR* estão estabelecidos a partir da teoria eletromagnética (EM), sendo as equações de Maxwell responsáveis pela expressão matemática da física dos campos EMs, enquanto que as correlações constitutivas demonstram quantitativamente as características dos materiais. Por sua vez, os sinais de *GPR* podem ser operados quantitativamente a partir dos fundamentos obtidos pela combinação destas relações constitutivas. Portanto, compreender estes conceitos é de enorme importância para se operar quantitativamente com a técnica.

Matematicamente, os campos EM associam-se pelas equações 3.1, 3.2 e 3.3 de Maxwell:

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (3.1)$$

$$\nabla \times H = J + \partial D / \partial t \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.3)$$

onde:

E : representa o vetor intensidade do campo elétrico (V/m);

q : simboliza a densidade de carga elétrica (C/m^3);

B : corresponde ao vetor densidade de fluxo magnético (T);

J : é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m^2);

D : representa o vetor de deslocamento elétrico (C/m^2);

t : é o tempo (s);

H : configura a intensidade do campo magnético (A/m).

A demonstração de quaisquer conceitos eletromagnéticos clássicos (indução, ondas de rádio, resistividade, teoria de circuitos, etc.) se associados com o formalismo adequado tornou-se possível com a compilação de vários trabalhos de diversos pesquisadores compactados nas

relações descritas acima. Assim, a caracterização das propriedades elétricas dos materiais viável.

Responsáveis pela descrição das respostas dos materiais, as equações constitutivas 3.4, 3.5 e 3.6:

$$J = \tilde{\sigma}E \quad (3.4)$$

$$D = \tilde{\epsilon}E \quad (3.5)$$

$$B = \tilde{\mu}H \quad (3.6)$$

Um detalhamento macroscópico (ou comportamento médio) da forma na qual os elétrons, átomos e moléculas reagem *en masse* perante a aplicação dos campos eletromagnéticos é descrito pelas últimas equações constitutivas. No que se refere ao que cada incógnita representa temos:

$\tilde{\sigma}$: A condutividade elétrica como característica da movimentação de cargas livres (gerando corrente elétrica) na presença de um campo elétrico, ao passo que uma dissipação energética é gerada por uma resistência ao fluxo de cargas;

$\tilde{\epsilon}$: A permissividade dielétrica $\tilde{\epsilon}$ que indica a movimentação de cargas atreladas na estrutura do material sobre a presença de um campo elétrico, resultando no acúmulo de energia no material;

$\tilde{\mu}$:A permeabilidade magnética $\tilde{\mu}$ demonstra a particularidade específica na intensidade da reação dos momentos magnéticos atômicos e moleculares à atuação de um campo magnético. Além disso, geralmente um armazenamento de energia nos materiais ocorre devido a distorção dos momentos magnéticos intrínsecos.

Sendo $\tilde{\sigma}$, $\tilde{\epsilon}$ e $\tilde{\mu}$ quantidades tensoriais, é possível que não tenham um comportamento linear ($\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(E)$). Não obstante, considerada como estando em igual direção do campo atuante independente da intensidade do deste, esta é a resposta considerada na maior parte das aplicações práticas de GPR, mesmo tais suposições sendo raramente totalmente satisfatórias. Ademais, a importância maior das grandezas σ e μ decorre da admissão de σ , $\tilde{\epsilon}$ e $\tilde{\mu}$ como constantes escalares.

Por sua vez, a permissividade dielétrica é uma grandeza imprescindível para o GPR e frequentemente, a definição do termo permissividade relativa ou constante dielétrica é: $k = \epsilon/\epsilon_0$ em que $\epsilon_0 = 8,89 \times 10^{-12} \text{F/m}$ é a permissividade do vácuo.

Outro aspecto do GPR é sua eficiência na penetração dependente das características condutivas do solo. Supondo que $\sigma = 0$, a limitação do sinal seria mínima e conseqüentemente a

efetividade do aparelho seria máxima, atingindo camadas mais profundas. Contudo, a presença de elementos causadores de baixas perdas elétricas no solo é uma exceção. Exemplificando, a presença de argila ou água subterrânea geram limitações significativas no *GPR*.

Para interpretar-se uma resposta do *GPR*, outro fator suscetível a observação da composição variada da maior parte dos materiais presentes no planeta, onde somente a água e o gelo representam uma minoria destes nos quais um único componente está presente. Tal fato pode ser observado na areia da praia, composta em cerca de 60-80% de seu volume por ar, água e íons dissolvidos em água.

Por último, algumas considerações devem ser observadas devido a influência da ausência ou presença de água na faixa de frequência mais usada no aparelho (10-1000 MHz):

- Uma permissividade na faixa de 3-8 é um é originária de minerais soltos e reunidos em misturas, sendo bons dielétricos com capacidade de condução virtualmente equivalente a zero.
- Solos, rochas e materiais de construção possuem espaço vazio no meio dos grãos (poros) podendo ser preenchidos com ar, água ou outro material.
- Alta permissividade ($k \approx 80$) é uma característica da água, o mais polarizável material de origem natural .
- Solos e rochas exibem condutividades tipicamente na faixa de 1-1000 mS/m decorrentes da mobilidade de íons presentes na água contida em locais porosos. Geralmente, este é o fator primordial na determinação da condutividade dos materiais principalmente de origem natural.

Equações concebidas empiricamente como as relações de Topp e variantes da Lei de Archie têm atestado o vínculo entre permissividade, condutividade elétrica e teor volumétrico de água para solos há muito tempo.

3.2 Aplicações

A *Sensors & Software* (2019), fabricante de georadares, detalha as aplicações do *GPR* em obras relativas à construção civil envolvendo pavimentação, pontes, inspeção de concreto e pistas de decolagem. O *GPR* é capaz de inspecionar asfalto e concreto em centímetros de intervalo, delinear as espessuras de camadas, localizar precisamente a posição de objetos embutidos tais como vergalhões, cabos elétricos e conduítes além de identificar anomalias como rachaduras profundas, vãos e deterioração (*SENSORS & SOFTWARES*, 2019a).

3.2.1 Avaliação de pavimentos

Avaliações de pavimentos são geralmente custosas, destrutivas e ineficientes. A retirada de amostras intervaladas do pavimento é realizada em grandes distâncias, ignorando a variação específica gradual da estrutura ao longo do pavimento. Por isso, com uma análise prévia através do *GPR*, torna-se possível avaliar o grau dessa variação para que a retirada das amostras ocorra nos lugares adequados, desconsiderando regiões de mesma variação e considerando regiões com prováveis anomalias (*SENSORS & SOFTWARES*, 2019b).

3.2.2 Asfalto e espessura granular

Na Universidade de Waterloo, Canadá, foi realizado um teste para investigar a espessura granular do asfalto de uma pista de testes de 700 metros. Os dados foram obtidos por um modelo de *GPR* conectado a traseira de um carro, realizando as leituras entre as velocidades de 40 e 80 km/h (*SENSORS & SOFTWARES*, 2019c).

A partir da relação entre o cálculo da velocidade de resposta do sinal emitido correlacionado com informações sobre a espessura do núcleo do pavimento, os seguintes resultados foram obtidos numa seção de 100 metros:

*Asfalto 1: Espessura média de 97 mm com desvio padrão de 5 mm obtidos com 3376 medições.

*Asfalto 2 (360 m até 364 m): Espessura média de 142 mm com desvio padrão de 3 mm obtidos com 18 medições.

*Granulado: Espessura média de 592 mm com desvio padrão de 67 mm obtidos com 3146 medições.

3.2.3 Imagens internas de rodovias

Em uma seção da estrada Hwy. 401 próxima a Toronto, Canadá, as características de juntas de dilatação presentes abaixo de uma laje de 200 mm de concreto subsuperficial foram adquiridas pelo aparelho. A ocorrência de um distúrbio observado no asfalto acima das juntas indicou a existência de movimentação na camada do asfalto, podendo ocasionar rachaduras e infiltração de água. Por fim, a anomalia em questão foi localizada devido a presença de materiais mais finos e água nas juntas citadas (*SENSORS & SOFTWARES*, 2019d).

3.2.4 Localização de cabos elétricos embutidos em concreto

Um armazém e um escritório foram construídos a partir de uma manufatureira antiga que passou por diversas reformas escassamente documentadas durante o período. Antes da construção, a falta de informação sobre onde estavam localizados os materiais embutidos na estrutura dificultou a alocação da nova estrutura devido ao longos cortes que haveriam de ser feitos no chão de concreto. Por isso, o risco de contato com cabos elétricos era alto.

Como resolução do problema, um *GPR* foi utilizado para varrer o local e localizar embutidos e especialmente cabos eletrizados. Num dos locais de corte, um cabo eletrizado foi encontrado próximo a um vergalhão, permitindo a equipe de corte uma operação mais segura e sem interferências no planejamento (*SENSORS & SOFTWARES*, 2019e).

3.2.5 Vãos abaixo de concreto

Colapsos de paredes de contenção, estradas e canais de esgoto são geralmente causados por erosão do solo abaixo ou por detrás de estruturas de concreto. Contudo, estes vãos podem ser localizados ainda no início de suas formações através do *GPR*, permitindo a tomada de ações para consertar as anomalias e evitar o agravamento delas futuramente.

Tal possibilidade foi verificada na cidade de *College Station*, no Texas, pelo Texas Transportation Institute. Uma placa de concreto com 8 polegadas de espessura e 20 polegadas de comprimento foi utilizada no teste. Após a varredura, foram detectados 3 vãos abaixo da placa, contendo respectivamente $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{2}$ e 1 polegadas de extensão. (ANNAN, 2003b, p. 245).

4 CONCLUSÃO

O estudo realizado demonstrou a versatilidade e aplicabilidade do Radar de Penetração do Solo na construção civil como ferramenta para dinamização, economia e redução de impacto de obras de construção e manutenção. Tendo em vista as diversas possibilidades do uso do aparelho, se espera que a tecnologia comece a ser utilizada no país em breve, contribuindo para a evolução da indústria construtiva. Por fim, espera-se que sejam realizadas mais pesquisas sobre os benefícios e aplicações da ferramenta no contexto brasileiro.

REFERÊNCIAS

ALVES, Ronald R. **LOCALIZAÇÃO DE DUTOS ENTERRADOS COM GPR EMPREGANDO AFASTAMENTOS FONTE-RECEPTOR CONSTANTE**. Salvador:

Universidade Federal da Bahia, 2014, Cap. 2, p. 12-14. Disponível em: <http://www.cpgg.ufba.br/gr-geof/geo213/trabalhos-graduacao/Ronald-Alves.pdf>. Acesso em: 14 Mai. 2019.

ANNAN, A.P. **Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications**. Mississauga: Sensors and Software, 2003a, p.3-7. Disponível em: <https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf>. Acesso em: 04 Abr. 2019.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias indica que 57% dos trechos apresentam problemas**. Brasília: CNT, 2019. Disponível em:

<https://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/pesquisa-cnt-rodovias-2018-indica-57-trechos-apresentam-problemas>. Acesso em: 21 Mai. 2019.

GERHARDT, Tatiana E. (Org.). **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: UAB/UFRGS, 2009, Cap. 2, p. 37. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 17 Mai. 2019.

SENSORS & SOFTWARE. **Asphalt and Granular Thickness**. 2019b. Disponível em: <https://www.sensoft.ca/case-studies/asphalt-and-granular-thickness/>. Acesso em: 15 Mai. 2019.

_____. **Construction-Practice Classifications**. 2019d. Disponível em: https://www.sensoft.ca/wp-content/uploads/2016/01/Road-Bridges_Construction-Practice-Classifications.pdf. Acesso em: 15 Mai. 2019.

_____. **Electric cable in concrete**. 2019e. Disponível em: <https://www.sensoft.ca/case-studies/electric-cable-in-concrete/>. Acesso em: 15 Mai. 2019.

_____. **Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications**. Mississauga: Sensors & Software Inc., 2003b, Cap. 10 p. 245. Disponível em: <https://geolportal.sdsu.edu/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf>. Acesso em: 15 Mai. 2019.

_____. **Pavement Structure Reports**. 2019c. Disponível em: <https://www.sensoft.ca/case-studies/pavement-structure-reports-2/>. Acesso em: 15 Mai. 2019.

_____. **Roads and Bridges**. 2019a. Disponível em: <https://www.sensoft.ca/ground-penetrating-radar/concrete-roads-bridges-inspection/>. Acesso em: 15 Mai. 2019.