A influência da compactação do solo e de revestimentos asfálticos na detecção vibroacústica de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas

The influence of soil compaction and asphalt coatings on the vibroacoustic detection of water leaks in underground distribution networks

Data de entrada: 29/08/2023
Data de aprovação: 05/12/2023

Gabriel Rodrigues Pupin[1] | **Matheus Silva Proença**[1*] | **Amarildo Tabone Paschoalini**[1]

DOI: https://doi.org/10.36659/dae.2024.062

ORCID ID
Pupin GR https://orcid.org/0009-0007-6260-5960
Proença MS https://orcid.org/0000-0002-3110-5097
Paschoalini AT https://orcid.org/0000-0003-1887-2678

Resumo

Em vários países, companhias de abastecimento de água ainda enfrentam índices de perda preocupantes. Em vista disso, diversas técnicas de detecção e localização de vazamentos vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas, e, entre elas, os métodos vibroacústicos ganham grande destaque. Nesse contexto, esta pesquisa visa contribuir para o avanço destes métodos, investigando a influência da compactação de solos arenosos e coesivos e de camadas de revestimento dos tipos brita graduada simples (BGS) e pré-misturado a frio (PMF) sobre as características espectrais do sinal vibroacústico de um vazamento de água que se propaga até a superfície. Através de análises numéricas, foram investigados os efeitos existentes e calculadas, em uma vasta gama de cenários, bandas de frequências promissoras para a etapa de monitoramento. Observou-se que, dependendo do tipo de solo e o estado de compactação praticado, o limite superior destes intervalos pode variar de 200 Hz até 1.600 Hz.

Palavras-chave: Detecção de vazamentos de água. Compactação do solo. Sinal vibroacústico. Redes de distribuição subterrâneas.

Abstract

In several countries, water supply companies still face worrying loss rates. Given this, many techniques for detecting and locating leaks have been constantly developed and improved, and, among them, the vibroacoustic methods have gained high prominence. In this context, this research aims to contribute to the advancement of these methods, investigating the influence of the compaction of sand and cohesive soils and of coating layers of the graded crushed stone (GCS) and cold mix asphalt (CMA) types on the spectral characteristics of the vibroacoustic signal of water leakage that propagates to the surface. With numerical analyses, the existing effects were investigated, and the promising frequency bands for the monitoring step were calculated for a wide range of scenarios. It was observed that, depending on the type of soil and the state of compaction practiced, the upper limit of these intervals can vary from 200 Hz to 1,600 Hz.

Keywords: *Water leak detection. Soil compaction. Vibroacoustic signal. Underground distribution networks.*

[1] Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP/FEIS) – Ilha Solteira – São Paulo – Brasil.
[*] **Autor correspondente:** matheus.proenca@unesp.br

CC BY NC

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de extrema importância para o desenvolvimento global. Sem ela, a manutenção e o progresso das áreas ambientais, sociais e econômicas se tornam impraticáveis. Apesar de as perdas serem inerentes a qualquer sistema de abastecimento, em alguns países os índices ainda são preocupantes e refletem uma exploração demasiada do recurso. No Brasil, por exemplo, as perdas médias atuais de água tratada chegam a, aproximadamente, 40%, e grande parte disso se deve aos vazamentos reais nas redes de distribuição, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022).

A fim de mitigá-las, diversas técnicas de detecção e localização de vazamentos vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas neste cenário, e, entre elas, os métodos vibroacústicos se destacam (Fuchs; Riehle, 1991). Estes métodos, postos em prática com a instrumentação correta, detectam o sinal vibroacústico emitido pelo próprio vazamento, que se propaga do subsolo até a superfície do maciço ou em pontos de acesso direto à tubulação, como hidrantes e válvulas.

Dessa maneira, a abordagem do problema pode ser realizada por várias perspectivas, como por meio da análise de transientes hidráulicos, com sensores de pressão conectados na rede (Gamboa-Medina; Reis; Guido, 2014); averiguando-se a vibração da própria tubulação (Scussel *et al.*, 2021) com hastes de escuta e correlacionadores de sinais; ou, ainda, examinando-se a superfície do maciço (Proença; Paschoalini; Obata, 2023) por meio de geofones ou acelerômetros. A norma técnica NBR 15183, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2020c), detalha o uso de algumas dessas principais técnicas.

No entanto, este trabalho apresenta contribuições para as técnicas indiretas, que fazem o sensoriamento na superfície do solo, acima da tubulação. Diversos fatores, como a profundidade da rede e seu material constitutivo, o meio de propagação do sinal – o tipo de solo e os revestimentos existentes – e a compactação executada durante o reaterro das valas, afetam a captação deste sinal na superfície e, por consequência, a eficiência desses métodos.

Tendo isso em vista, este estudo visou analisar numericamente os efeitos da compactação dos solos e da camada de base – tipo base granular simples (BGS) – e do revestimento – tipo pré-misturado a frio (PMF) – sobre o sinal vibroacústico que é emitido pelo vazamento subterrâneo. Todos os materiais foram simulados numericamente através do modelo reológico de Kelvin-Voigt. O destaque do trabalho é a apresentação das bandas de frequências promissoras em um processo de detecção/localização vibroacústico para diferentes arranjos de valas, auxiliando os colaboradores em campo na aquisição de dados.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelagem numérica

Os solos são meios trifásicos e seu comportamento complexo depende tanto de sua natureza como de seu estado presente – umidade, nível de compactação etc. –, assim como de fatores externos, como a amplitude de solicitações e sua taxa de variação, duração, e padrão de carregamentos (Pinto, 2006).

Di Benedetto e Tatsuoka (1997) classificaram o solo em quatro domínios diferentes de acordo com a amplitude de deformação existente. Para pequenas amplitudes, em intervalos de deformação na ordem de 10^{-5}, como as das excitações geradas pelos vazamentos, o comportamento dos solos pode ser considerado quase elástico linear. Proença *et al.* (2022) verificaram, então, que as forças não conservativas do problema podem ser convenientemente simuladas em uma modelagem linear viscoelástica.

De maneira geral, o comportamento dos materiais viscoelásticos decorre da combinação da deformação

elástica dos sólidos com o fluxo viscoso dos líquidos. Neste estudo, o solo foi modelado como um sólido de Voigt: um modelo constitutivo linear viscoelástico, no qual a componente elástica do meio é caracterizada pela lei de Hooke e sua componente viscosa, em paralelo, pela lei de Newton da viscosidade.

A Figura 1 apresenta, de baixo para cima, as três camadas que serão consideradas ao longo do trabalho – o solo, a base, e o revestimento PMF. Os três materiais em questão serão simulados pelo mesmo modelo constitutivo, variando apenas suas propriedades.

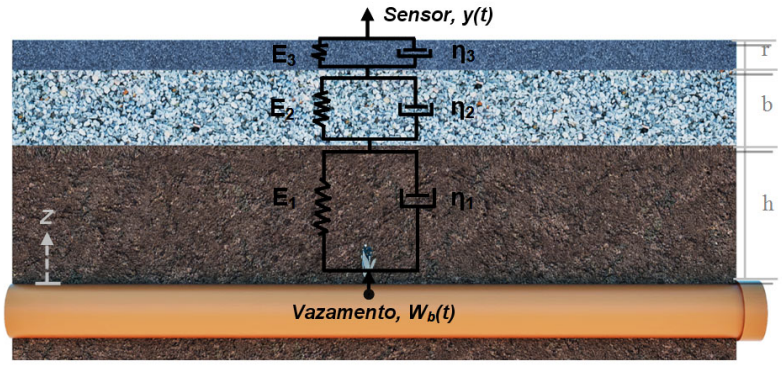


Figura 1 - Camadas dos materiais abordados nas análises numéricas.

As simulações numéricas realizadas procederam de uma análise unidimensional, com movimentos relativos apenas no eixo *Z* (eixo vertical). As fronteiras laterais das camadas do solo foram idealizadas com extensão infinita e sem influência na resposta do meio. Os vazamentos foram simulados através de excitações na base do maciço, e, devido à dimensionalidade adotada para as investigações, o sinal vibroacústico gerado se propagaria até a superfície na forma de ondas compressionais (P), gerando apenas deslocamentos verticais, com sucessivas compressões e expansões das camadas.

A equação constitutiva dos materiais caracterizados por Voigt é dada por:

$$\sigma_z(z,t) = \sigma^{elástica} + \sigma^{viscosa} \rightarrow \sigma_z(z,t) = E \cdot \varepsilon_z + \eta \cdot \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} \qquad (1)$$

Na qual, σ_z é a tensão normal no eixo *z; E*, o módulo de elasticidade dinâmico; η, a viscosidade longitudinal; e ε_z, a deformação existente.

Fazendo o uso da equação de compatibilidade, que relaciona a deformação elástica com o deslocamento das partículas do meio, e sabendo que a propagação das ondas deve satisfazer o equilíbrio de forças internas, chega-se finalmente à equação do movimento vibratório, unidimensional, estimulada por um vazamento $W_b(t)$ na base do maciço. Observa-se que a equação obtida é uma diferencial parcial de terceira ordem no espaço-tempo.

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - E \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \eta \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 t} = 0 \qquad (2)$$

Ao solucionar esta equação diferencial ordinária de terceira ordem no domínio da frequência, tem-se:

$$w(z,t) = W(z,\omega) \cdot e^{i\omega t} = w_0 \cdot e^{[-K_2 \cdot z + i(\omega \cdot t - K_1 \cdot z)]} \qquad (3)$$

Essa solução para uma onda harmônica foi também encontrada e discutida por Kolsky (1964) e Kramer (1996). Nesta, K_1 e K_2 são, respectivamente, parâmetros relacionados à defasagem

e à amplitude do sinal. Na solução proposta pelos pesquisadores, os parâmetros assumem a seguinte relação:

$$K_1 = \left[\frac{\rho.\omega^2}{2E.(1+4\xi^2)}\left(\sqrt{1+4\xi^2}+1\right)\right]^{0,5} \quad (4a)$$

$$K_2 = \left[\frac{\rho.\omega^2}{2E.(1+4\xi^2)}\left(\sqrt{1+4\xi^2}-1\right)\right]^{0,5} \quad (4b)$$

Sendo ρ a densidade do solo, ξ o fator de amortecimento e ω a frequência de excitação.

Como discutido por Kramer (1996), o valor de K_1 deve ser estritamente positivo, enquanto o de K_2 negativo, para que, assim, a equação tenha sentido físico. O termo K_2 é responsável pela atenuação da exponencial, enquanto K_1 controla o atraso do sinal.

Para a simulação do vazamento, foi utilizado um sinal *chirp* de 1-2.000 Hz. Nas primeiras simulações, as camadas asfálticas foram omitidas e, em um segundo momento, aplicadas como camadas adicionais à camada de solo, conforme apresentado na Figura 1. O asfalto e a base foram implementados como materiais viscoelásticos, e suas propriedades foram obtidas na literatura. Já as propriedades dos solos, que são fortemente influenciadas pelo seu estado de compactação, serão discutidas na seção seguinte.

2.2 Compactação do solo

A instalação dos dutos da rede de abastecimento de água deve ser feita conforme as diretrizes das normas técnicas vigentes, como a NBR 5626 (ABNT, 2020a) e a NBR 17015 (ABNT, 2022), referentes ao projeto e à execução de valas para assentamento de tubulações de água. No reaterro das valas da rede de abastecimento, a etapa de controle da compactação dos solos é de grande importância na atividade, pois proporciona o apoio adequado da tubulação, evitando concentrações de tensão e momentos fletores nela (El Debs, 2003). Em campo, o processo de compactação é normalmente realizado em camadas, e o equipamento utilizado varia de acordo com a ocasião.

Com o aumento da compactação, vemos um aumento da massa específica dos solos em razão do rearranjo de suas partículas, o que diminui os espaços vazios devido à eliminação do ar e da água que ali estavam anteriormente contidos. O processo descrito afeta diretamente a rigidez e, consequentemente, a resposta dinâmica do meio, além de alterar a velocidade de propagação das ondas, conforme apresentado na Equação 5.

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \; ; \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

Sendo V_p e V_s a velocidade das ondas de corpo compressionais e cisalhantes, respectivamente.

Para cada grau de compactação praticado teremos diferentes valores para as propriedades elásticas e viscosas dos solos. Um ensaio simples, barato e amplamente utilizado em sondagens é o *standard penetration test* (SPT), que se baseia na resistência à penetração do maciço. Esse teste consiste em contabilizar o número de golpes necessários para fincar um amostrador padronizado em uma camada de 0,15 m, sendo desprezados os 0,15 m iniciais (Pinto, 2006).

Os pesquisadores Ohsaki e Iwasaki (1973), com um conjunto representativo de dados experimentais, relacionaram de maneira empírica o módulo de cisalhamento (G) com o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) de diversos solos trabalhados. A comissão de normalização técnica da Petrobras (2008) também propõe uma correlação semelhante em sua norma N-1848.

Conhecendo, então, o coeficiente de Poisson (υ) do geomaterial, é possível relacionar de forma aproximada o módulo de elasticidade (E) com o N_{SPT}, sabendo que:

$$E = 2G.(1+\upsilon) \quad (6)$$

Utilizando um coeficiente de Poisson médio igual a 0,3, obtêm-se, então, a partir das expressões empíricas de Ohsaki e Iwasaki (1973), as seguintes expressões para os solos arenosos e argilosos que serão abordados neste trabalho:

Solos arenosos:

$$E = 16{,}573 \times 10^6 . N_{SPT}^{0{,}94} \ [Pa]$$

Solos argilosos:

$$E = 35{,}696 \times 10^6 . N_{SPT}^{0{,}71} \ [Pa]$$

Tal abordagem foi proposta também por Proença, Paschoalini e Souza (2020).

Nas simulações numéricas realizadas no trabalho, investigou-se a influência da compactação desses dois tipos de solos sobre a energia do sinal do vazamento na superfície. Os estados de compacidade e consistência estudados foram selecionados segundo os N_{SPT} apresentados no Anexo A da norma NBR 6484 (ABNT, 2020b).

Por fim, quanto ao fator de amortecimento (ξ), foram utilizados os resultados experimentais obtidos por Sun, Golesorkhi e Seed (1988). De acordo com os pesquisadores, o parâmetro pode variar, em conformidade com as amplitudes de deformação, de 0,01 a 0,32.

2.3 Revestimento asfáltico

Assim como foi feito com os solos, é necessário conhecer as propriedades mecânicas das demais camadas utilizadas no trabalho, para que os resultados das simulações se aproximem da realidade de maneira satisfatória.

Segundo Bernucci *et al.* (2010), o pavimento é uma estrutura que pode apresentar múltiplas camadas de espessuras finitas. Para este estudo, considerou-se a existência de até três camadas – o solo compactado (arenoso ou argiloso), a camada de base, do tipo BGS e a camada superior de revestimento asfáltico tipo PMF. Normalmente, a camada de PMF apresenta espessuras entre 35 e 70 mm, enquanto a camada de BGS entre 100 e 200 mm.

As misturas asfálticas usualmente têm seu comportamento mecânico definido pelo módulo de resiliência (*MR*), que, assim como o módulo de elasticidade (*E*), expressa a relação entre as deformações recuperáveis e as tensões aplicadas. A diferença entre os módulos está no tipo de carregamento aplicado, sendo o valor do *MR* obtido a partir de carregamentos repetitivos (Cunto, 1998).

Para a base granular, o *MR* varia de 100 a 500 MPa (São Paulo, 2004), e sua densidade média a seco é de aproximadamente 1.650 kg/m^3. Para a camada de PMF, o *MR* varia de 1.250 a 2.000 kg/m^3 (Autopista Fernão Dias, 2011), e sua densidade de 1.900 a 2.200 kg/m^3 (Abeda, 2010). Então, para as simulações numéricas serão utilizados os valores médios dos intervalos apresentados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de solos com diferentes níveis de compactação

Para a análise dos efeitos da compactação dos solos sobre a energia do sinal do vazamento que chega à superfície, utilizamos dois tipos de solos: os solos arenosos e os solos argilosos, para uma vala com profundidade fixa de $h = 0{,}5$ m. Além disso, utilizou-se um fator de amortecimento constante, $\xi = 0{,}3$.

Foram, então, simulados, a partir dos intervalos do ensaio *SPT* referenciados na norma NBR 6484 (ABNT, 2020b) – Anexo A, cinco diferentes estados de compactação, para cada solo. Nas simulações, relacionaram-se os valores de N_{SPT} com o módulo de elasticidade, *E*, e a densidade, ρ, dos geomateriais. Na Tabela 1 constam os arranjos utilizados nas simulações.

Para os primeiros testes as camadas asfálticas foram omitidas.

Apesar disso, verifica-se que ambos os solos têm perfil de atenuação característico, mitigando exponencialmente as altas frequências. A Tabela 2 evidencia alguns dos resultados obtidos.

Tabela 1 - Arranjos utilizados nas implementações numéricas.

Solo	Designação	Intervalo do índice de resistência à penetração [N_{SPT}]	Densidade [kg/m³]
Arenoso	Fofa(o)	1-4	1.700
	Pouco compacta(o)	5-8	1.800
	Mediamente compacta(o)	9-18	1.900
	Compacta(o)	19-40	2.000
	Muito compacta(o)	41-50	2.000
Argiloso	Muito mole	1-2	1.700
	Mole	3-5	1.800
	Média(o)	6-10	1.900
	Rija(o)	11-19	1.900
	Dura(o)	20-30	2.000

Na Figura 2, apresentam-se os resultados para os cinco níveis de compacidade do solo arenoso e os cinco níveis de consistência do solo argiloso. Os valores se referem à porcentagem do sinal inserido na base que realmente chega à superfície. Como a designação de cada estado de compactação acontece dentro de um intervalo de N_{SPT}, os gráficos foram plotados em bandas, representando, assim, todo o intervalo de uma dada designação da norma.

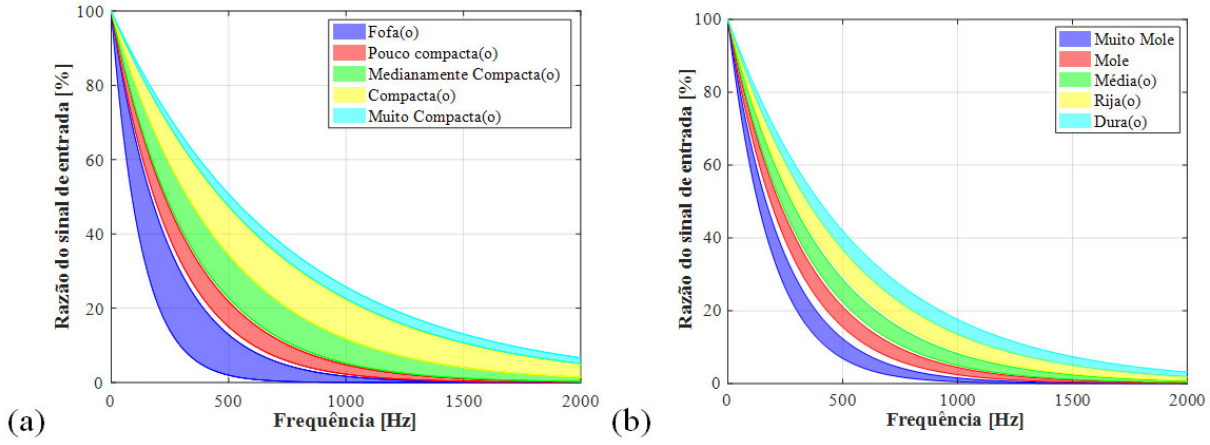


Figura 2 - Influência dos graus de compactação na amplitude do sinal na superfície: (a) Solo arenoso; (b) Solo coesivo.

A priori, o processo de compactação dos solos melhora o contato entre os grãos, tornando-os mais rígidos e, portanto, reduzindo os níveis de atenuação referentes às perdas por contato.

Como pode ser observado, entre os extremos do solo arenoso, referindo-se à frequência de 400 Hz, a amplitude do sinal apresenta uma variação de 12,5 vezes; entre os extremos do solo argiloso, essa diferença se

reduz para 3,25 vezes. Logo, as mudanças obtidas com uma boa compactação dos solos arenosos são mais significativas do que nos solos argilosos; entretanto, em casos em que o solo não é compactado, o solo argiloso apresenta melhores resultados. Ou seja, o processo de compactação tem mais efeito sobre os solos arenosos do que sobre os solos coesivos.

Tais fatos podem ser relacionados à maior densidade seca e menor umidade ótima do solo arenoso – que lhe permite melhor compactação final – e à interação especial existente entre as partículas do solo argiloso, que se dá tanto pelo atrito entre os grãos – que ocorre nos solos arenosos – quanto pela atração da coesão.

Tabela 2 - Amplitude do sinal para determinadas frequências.

Solo	[N_{SPT}]	Designação	Amplitude do sinal [%]				
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	1500 Hz
Arenoso	4	Fofa(o)	59,90	35,88	12,88	1,66	0,34
	8	Pouco compacta(o)	68,34	46,70	21,81	4,76	1,04
	18	Mediamente compacta(o)	76,55	58,61	34,34	11,79	4,05
	40	Compacta(o)	82,83	68,91	47,49	22,16	10,44
	50	Muito compacta(o)	84,40	71,24	50,75	25,75	13,07
Argiloso	2	Muito mole	59,23	35,08	12,31	1,52	0,19
	5	Mole	67,75	45,91	21,07	4,44	0,94
	10	Média(o)	73,15	53,50	28,63	8,19	2,35
	19	Rija(o)	77,96	60,78	36,94	13,60	5,10
	30	Dura(o)	80,48	64,76	41,94	17,59	7,38

Para os dois tipos de solos trabalhados, é evidente que o estado de compactação assume grande importância na propagação do sinal vibroacústico do vazamento até a superfície e, consequentemente, na sua detecção. O tipo de solo e sua compactação delimitarão o intervalo de frequências promissoras para o processo de detecção/localização do sinistro.

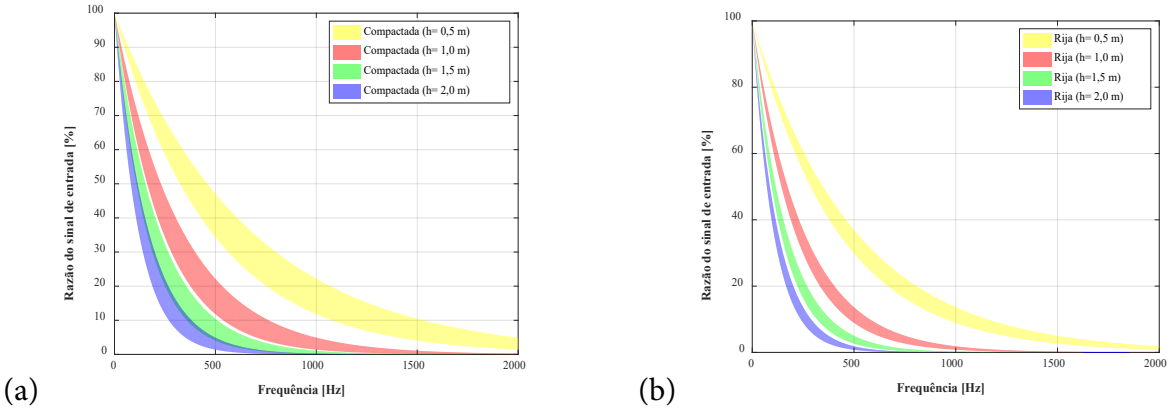
3.2 Análise com variações de profundidade da vala (h)

É intuitivo que quanto maior a profundidade da tubulação, menor o percentual do sinal que chega à superfície. No entanto, deseja-se estabelecer com as implementações o nível de influência do parâmetro sobre a amplitude do sinal vibroacústico.

Portanto, nesta segunda etapa, variou-se o parâmetro em um intervalo comum de trabalho, $0,5 \leq h \leq 2,0$ m, para cada valor de N_{SPT} praticado, a fim de contemplar também a influência da profundidade da tubulação (h) nos resultados. Para essas simulações, utilizou-se novamente um coeficiente de amortecimento médio e constante: $\xi = 0,3$.

A Figura 3 apresenta o decaimento da frequência do sinal com o aumento da profundidade para um solo arenoso em uma banda de boa compactação ($19 \leq N_{SPT} \leq 40$), e para um o solo argiloso rijo ($11 \leq N_{SPT} \leq 19$).

Os resultados evidenciam a atuação do parâmetro no perfil de decaimento do sinal do vazamento. Para o solo arenoso, com referência à frequência de 400 Hz, um acréscimo de 0,5 m na profundidade da tubulação resultou em uma redução aproximada de 45% na amplitude do sinal na superfície. Já para o solo argiloso, tal variação gerou uma redução de 55% na amplitude do sinal.

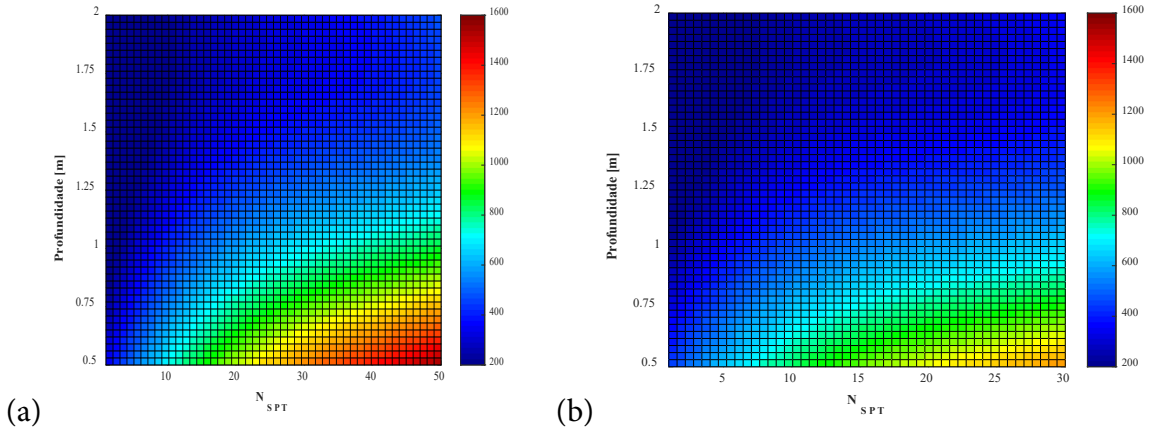


(a) (b)

Figura 3 - Distribuição do sinal para diferentes profundidades de vala: (a) Solo arenoso compactado; (b) Solo coesivo rijo.

Ao praticar diferentes estados de compactação para ambos os solos em valas com diferentes profundidades, construiu-se uma superfície polinomial representativa que encapsula todos os cenários desejados, fornecendo-se, assim, intervalos de frequências promissores para o monitoramento vibroacústico em diferentes arranjos. Na Figura 4 são apresentados tais resultados.

O ajuste do modelo foi feito pelo método dos mínimos quadrados, e o valor de referência para a delimitação da frequência máxima ($F_{máx}$) correspondeu à 10% da amplitude da excitação. As superfícies calculadas tinham grau 3 para o índice N_{SPT} e grau 2 para a profundidade, e um erro absoluto médio associado de 7,59 % para o solo arenoso e 6,60 % para o solo argiloso.



(a) (b)

Figura 4 - Superfície polinomial representativa para a frequência máxima promissora: (a) Solo arenoso; (b) Solo coesivo.

Os coeficientes das superfícies polinomiais capazes de correlacionar o N_{SPT} com a profundidade (h) são apresentadas nas expressões seguintes:

Solo arenoso:

$$F_{máx} = 6{,}02\text{x}10^{-3}.\ N_{SPT}^{3} - 0{,}88.\ N_{SPT}^{2} + 185{,}20.h^{2} + 0{,}18.\ N_{SPT}^{2}.h + 9{,}99.N_{SPT}.h^{2} - 45{,}29.N_{SPT}.h + 68{,}99.N_{SPT} - 610{,}40.h + 563{,}00\ [Hz]$$

Solo argiloso:

$$F_{máx} = 2{,}25\text{x}10^{-2}.\ N_{SPT}^{3} - 1{,}92.\ N_{SPT}^{2} + 208{,}40.h^{2} + 0{,}38.\ N_{SPT}^{2}.h + 11{,}31.N_{SPT}.h^{2} - 51{,}77.N_{SPT}.h + 82{,}21.N_{SPT} - 707{,}90.h + 687{,}90\ [Hz]$$

Através dessas superfícies, é possível predizer, por exemplo, que, para um solo arenoso bem compactado, com N_{SPT} = 43 e h = 1,0 m, o intervalo de frequência promissor para a detecção de um vazamento estaria entre 1 e 771 Hz. Já para um solo argiloso medianamente compactado, com N_{SPT} = 10 e h = 0,8 m, o intervalo de frequência promissor para a detecção de um vazamento estaria aproximadamente entre 1 e 600 Hz.

3.3 Análise com as camadas de base e asfalto

Por fim, foram adicionadas as camadas de pavimento sobre os solos retratados, visto que, em campo, as tubulações de distribuição de água estão abaixo de um solo com revestimentos asfálticos. Como ilustrado na Figura 1, esse modelo funciona como uma associação em série de três sistemas de Kelvin-Voigt.

Nas simulações foram consideradas as camadas de revestimento asfáltico tipo PMF e a base granular do tipo BGS, sem a presença de concreto ou agentes ligantes. Nas simulações, foram utilizados, para o revestimento asfáltico, valores médios de suas propriedades mecânicas obtidas em outros trabalhos (Autopista Fernão Dias, 2011, Bernucci *et al.*, 2010; Freitas, 2017), sendo eles: E = 1.500 MPa, ρ = 2.340 kg/m^3 e ξ = 0,1. A espessura média da camada foi r = 50 mm. Para a base granular, empregou-se E = 300 MPa (São Paulo, 2004), ρ = 2000 kg/m^3 e ξ = 0,12 (Seed *et al.*, 1986), com uma espessura b = 150 mm.

A Figura 5 apresenta o decaimento ocasionado pelas camadas de revestimento isoladas, e a Figura 6, as novas superfícies polinomiais representativas para a frequência máxima promissora dos arranjos com as camadas de revestimento. Utilizou-se como valor de referência para a delimitação da frequência máxima 10% da amplitude do sinal de excitação.

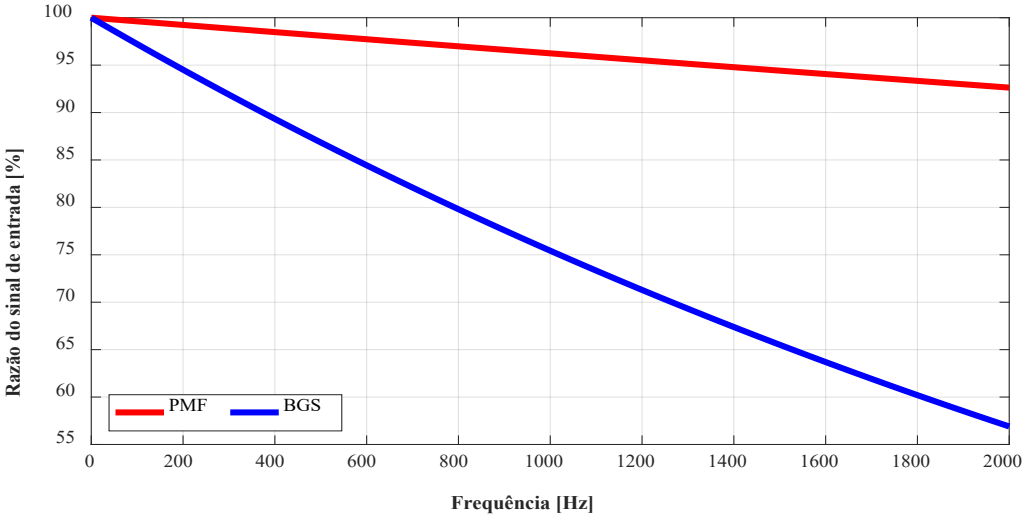


Figura 5 - Decaimento ocasionado pelas camadas de revestimento isoladas.

Os resultados demonstram que a base granular gera uma atenuação bem superior à do revestimento. Tal diferença se deve às propriedades mecânicas da camada e à sua maior espessura. Apesar disso, foi válido assumir para o intervalo de 1-2000 Hz um decaimento linear de ambas as camadas. A cada 1 kHz, o revestimento asfáltico PMF reduziu aproximadamente 4% do sinal, e a base, 21%.

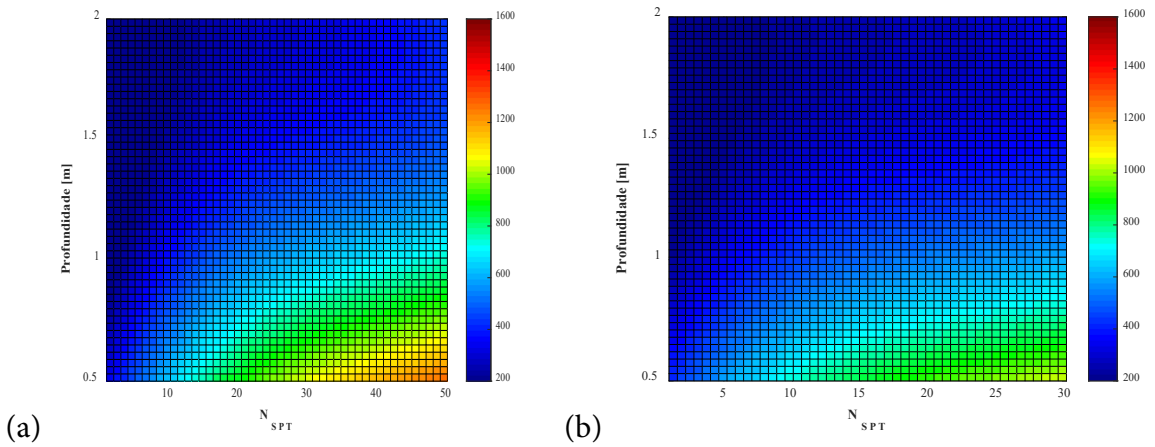


Figura 6 - Superfície polinomial representativa para a frequência máxima promissora: (a) Solo arenoso + BGS + PMF; (b) Solo coesivo + BGS + PMF.

Nos solos arenosos sem as camadas asfálticas, a frequência máxima do intervalo promissor de monitoramento pode chegar a 1.600 Hz (para h = 0,5 m e N_{SPT} = 50), no entanto, com a adição das camadas, a frequência cai para 1.300 Hz. Já nos solos argilosos sem as camadas asfálticas, a frequência máxima do intervalo promissor pode chegar a 1.280 Hz (para h = 0,5 m e N_{SPT} = 30), no entanto, com a adição das camadas, a frequência cai para 1.100 Hz.

Ademais, é importante salientar que, em campo, a presença de camadas com diferentes impedâncias acústicas gerará nas interfaces eventos de reflexão e refração que dissiparão parte da energia do sinal propagado. Além disso, considerando a umidade no contexto, tem-se que a água do vazamento retida nos vazios afeta a rigidez dos contatos (Oelze; O'Brien; Darmody, 2002). Logo, na presença de um vazamento real em solos compactados, a atenuação tende a aumentar conforme o aumento da umidade.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados, fica clara a importância de se ter um bom controle da etapa de compactação dos solos nas atividades de instalação de dutos. Uma compactação deficiente prejudica não só o apoio e o equilíbrio do sistema, como também a futura detecção e localização de um vazamento de água na rede por métodos vibroacústicos.

Os achados demonstraram que tanto o solo arenoso quanto o argiloso têm um perfil de atenuação característico, atenuando exponencialmente as altas frequências. Além disso, constatou-se que o nível de compactação praticado tem grande influência sobre a curva de atenuação espectral do sinal propagado, e que os solos arenosos, quando compactados, são melhores condutores do sinal do que os solos argilosos.

Ademais, o trabalho visou contribuir com o processo de detecção/localização de vazamentos de água subterrâneos calculando superfícies

polinomiais capazes de correlacionar o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) com a profundidade (h) das valas e fornecer as bandas de frequências promissoras para o monitoramento vibroacústico. Observou-se, com os resultados, que o intervalo de frequências promissor para os solos arenosos, sem revestimento e sem base, pode chegar até 1.600 Hz, e para solos com revestimento PMF e base BGS, até1.300 Hz. Já para os solos coesivos, sem as camadas de pavimentação, o intervalo promissor pode atingir 1.280 Hz, e na presença das camadas de pavimentação, até 1.100 Hz; enquanto para solos sem compactação, o intervalo se restringe à frequência limite de 200 Hz.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Proença MS; **Metodologia:** Proença MS, Paschoalini AT; **Software:** Pupin GR, Proença MS; **Investigação:** Pupin GR; **Visualização:** Pupin GR; **Redação:** Pupin GR, Proença MS; **Revisão:** Proença MS, Paschoalini AT; **Supervisão:** Paschoalini AT.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: Sistemas prediais de água fria e água quente – Projeto, execução, operação e manutenção. 2. ed. Rio de Janeiro, 2020a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15183**: Ensaios não destrutivos – Estanqueidade para saneamento básico – Procedimento para tubulações pressurizadas. 5. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17015**: Execução de obras lineares para transporte de água bruta e tratada, esgoto sanitário e drenagem urbana, utilizando tubos rígidos, semirrígidos e flexíveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

AUTOPISTA FERNÃO DIAS. **Avaliação de misturas a frio como solução para camadas de revestimento**. São Paulo: ANTT, 2011.

BERNUCCI, L. B. *et al*. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 4. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2010.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples**: estudo de três solos do Nordeste brasileiro. 1998. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DI BENEDETTO, H.; TATSUOKA, F. Small strains behavior of geomaterials modelling of strain rate effects. **Soils and Foundations**, Amsterdã, v. 37, n. 2, p. 127-138, 1997. https://doi.org/10.3208/sandf.37.2_127

EL DEBS, M. K. **Projeto estrutural de tubos circulares de concreto**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Telas Soldadas, 2003.

FREITAS, E. L. F. M. **Obtenção da curva mestra do módulo dinâmico com uso do ensaio de ressonância por impacto em misturas asfálticas**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2017.

FUCHS, H. V.; RIEHLE, R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. **Applied Acoustics**, Amsterdã, v. 33, n. 1, p. 1-19, 1991. https://doi.org/10.1016/0003-682X(91)90062-J

GAMBOA-MEDINA, M. M.; REIS, L. F. R.; GUIDO, R. C. Feature extraction in pressure signals for leak detection in water networks. **Procedia Engineering**, Amsterdã, v. 70, p. 688-697, 2014. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.075

KOLSKY, H. Stress waves in solids. **Jornal of Sound and Vibration**, Amsterdã, v. 1, n. 1, p. 88-110, 1964. https://doi.org/10.1016/0022-460X(64)90008-2

KRAMER, S. L. **Geotechnical earthquake engineering**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996.

OELZE, M. L.; O'BRIEN, W. D.; DARMODY, R. G. Measurement of attenuation and speed of sound in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 66, n. 3, p. 788-796, 2002. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7880

OHSAKI, Y.; IWASAKI, R. On dynamic shear moduli and Poisson's ratio of soil deposits. **Soils and Foundations**, Amsterdã, v. 13, n. 4, p. 59-73, 1973. https://doi.org/10.3208/sandf1972.13.4_61

PETROBRAS. **N-1848**: projeto de fundações de máquinas. Rio de Janeiro: Petrobras, 2008.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T.; OBATA, D. H. S. Prediction of the probabilistic water leak location in underground pipelines using Monte Carlo simulation. **Water Practice & Technology**, Londres, v. 18, n. 3, p. 522-535, 2023. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.026

PROENÇA, M. S.; PASCHOALINI, A. T.; SOUZA, A. O efeito da compactação dos solos na detecção de vazamentos pelo método vibro-acústico. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 31.; ENCONTRO TÉCNICO AESABESP, 31., 2020, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: AESabesp, 2020. p. 1-8.

PROENÇA, M. S. *et al.* The Finite Element Method applied in the viscoelastic constitutive model of Kelvin-Voigt for characterization of the soil dynamic response to water leakage simulation. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Nova York, v. 44, p 1-14, 2022. https://doi.org/10.1007/s40430-022-03773-8

SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras. **IP - 08/2004**: análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento. São Paulo: SIURB, 2004.

SCUSSEL, O. *et al.* A stochastic model for the speed of leak noise propagation in plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdã, v. 501, n. 1, 116057, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116057

SEED, H. B. *et al.* Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, Reston, v. 112, n. 11, p. 1016-1032, 1986. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016)

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico temático serviços de água e esgotos**: visão geral: ano de referência 2021. Brasília, DF: SNIS, 2022.

SUN, J. I.; GOLESORKHI, R.; SEED, H. B. **Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils**. Berkely: University of California, 1988.