

## O EFEITO DA COMPACTAÇÃO DOS SOLOS NA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS PELO MÉTODO VIBRO-ACÚSTICO

### **Matheus Silva Proença** <sup>(1)</sup>

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, FEIS-UNESP (2017), Mestre em Mecânica dos Sólidos (2019), com pesquisa na área de Modelagem Computacional aplicada a dinâmica de solos. Atualmente é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM-UNESP) e bolsista do programa CAPES, com projeto de pesquisa na área de detecção de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas.

### **Amarildo Tabone Paschoalini** <sup>(2)</sup>

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP (1992), mestrado (1996) e doutorado (2001) em Engenharia Mecânica pela UNICAMP. Desde 1996 é professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica e Eletrônica, com ênfase em Métodos Numéricos, Modelagem Computacional, Projeto de Máquinas, Bioengenharia e Empacotamento Eletromecânico.

### **Adriano Souza** <sup>(3)</sup>

Formado em Engenharia Civil pela UNESP de Ilha Solteira (1986), mestrado (1993) em Geotecnia pela EESC-USP de São Carlos, doutorado (2001) em Fundações pela EPUSP de São Paulo, e pós-doutorado (2018) em Geotecnia pela FEB-UNESP de Bauru. É professor doutor da Faculdade de Engenharia de Ilha-Solteira (FEIS-UNESP) na área de Geotecnia. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Fundações e Escavações.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Av. Brasil, 56 - Centro - Ilha Solteira - São Paulo - CEP: 15385-000 - Brasil - Tel: +55 (18) 3743-1038 - Fax: +55 (18) 3742-2992 - e-mail: matheus.proenca@unesp.br.

## **RESUMO**

O processo de compactação, regulamentado, no Brasil, pela norma NBR 7182, é de grande importância nas etapas de reaterro de valas e assentamento das tubulações da rede de abastecimento de água. A falta de zelo no procedimento traz prejuízos não só para o apoio da tubulação em si, mas também para uma possível futura detecção de um vazamento de água, por métodos acústicos. Conduziu-se este trabalho com o objetivo de avaliar os efeitos de diferentes níveis de compactação, em solos arenosos e coesivos, sobre a energia do sinal do vazamento que se propaga até a superfície. Os resultados demonstraram um aumento de até cinco vezes na amplitude do sinal vibro-acústico, devido a densificação do solo.

**PALAVRAS-CHAVE:** compactação do solo, detecção de vazamentos, geomateriais.

## **INTRODUÇÃO**

A água é um recurso imprescindível para o desenvolvimento ambiental, humano, social e econômico, e, junto com a sua importância, está sua finitude, logo é um dos temas de alta relevância, discutidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas em suas metas globais.

A referida organização internacional visa uma gestão sustentável do recurso hídrico, com eficiências na retirada e em seu uso. Atualmente, as perdas reais – vazamentos nas unidades operacionais – retratam uma das maiores adversidades enfrentadas pelas companhias de abastecimento de água. As perdas são inerentes a qualquer sistema de abastecimento, no entanto, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o país perde mais de um terço de sua água tratada, o que gera majoração no custo final e na exploração desnecessária do recurso hídrico [1].

Em meio a este cenário, diversas técnicas vêm sendo investigadas, nos últimos anos, para melhor estimar a presença e localização dos vazamentos. Dentre elas, os métodos acústicos vêm se destacando e mostrando boa eficiência e aplicabilidade na indústria da água [2]. Estes métodos se beneficiam, para a detecção e localização do vazamento, do próprio sinal vibro-acústico por ele emitido, que se propaga até a superfície ou em pontos de acesso da tubulação.

No entanto, diversos fatores afetam a captação deste sinal gerado, dentre eles está o tipo de solo e a compactação executada na etapa de reaterro. Estes parâmetros exercem grande influência no comportamento dinâmico do geomaterial e será o enfoque deste trabalho.

## OBJETIVOS

O objetivo deste artigo é investigar qual a influência do processo de compactação, presente na etapa de instalação dos dutos, sobre a energia do sinal do vazamento que se propaga até a superfície. O desenvolvimento numérico abordará os solos arenosos e argilosos, em diferentes estados de compactação, com a aplicação do modelo reológico, unidimensional, de Kelvin-Voigt.

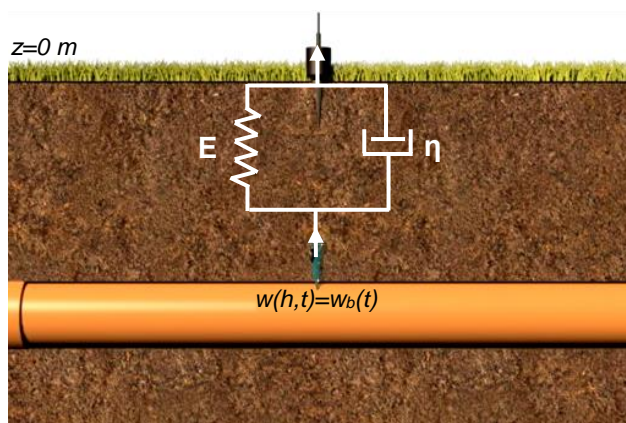
## METODOLOGIA UTILIZADA

### *Modelagem numérica*

A interação, ao longo do tempo, de diversas variáveis específicas do ambiente, como a rocha mãe, o relevo, o clima regional e o intemperismo, ditam as características morfológicas do solo [3]. Além do seu perfil, o estado em que o geomaterial se encontra – grau de compactação (GC) e umidade ( $w$ ) – protagonizam as mudanças em seu comportamento, afetando, diretamente, a captação do sinal vibro-acústico gerado, pelo vazamento, na superfície do terreno.

Os fatores de origem externa (como o padrão de carregamento, a amplitude das solicitações e a sua taxa de variação) também são importantes parâmetros neste contexto. De acordo com os níveis de deformação apresentados, Di Benedetto e Tatsuoka [4] classificaram os solos em quatro domínios diferentes. Para um estado de deformação muito pequeno, da ordem de  $10^{-5}$  m/m, como ocorre, geralmente, na presença de um vazamento [5], o comportamento dos solos pode ser considerado quase elástico linear. No entanto, é evidente a existência de forças não conservativas no problema abordado. A dependência comportamental dos geomateriais com a frequência de excitação, amplitude e taxa de deformação, umidade e índices de vazios indica, para uma modelagem mais realista, características visco-elásticas [6], sendo o sistema de dissipação de energia, predominantemente, de origem estrutural.

De uma maneira geral, o comportamento dos materiais visco-elásticos decorre da combinação da deformação elástica dos sólidos, com o fluxo viscoso dos líquidos. Portanto, as equações constitutivas destes modelos serão uma superposição dos esforços existentes [7]. No presente caso, a componente elástica é caracterizada pela Lei de Hooke, e a componente viscosa, pela Lei de Newton da viscosidade. Como é mostrado na Fig. 1, para-se obter o efeito da viscoelasticidade linear, no modelo reológico de Kelvin-Voigt, associa-se, em paralelo, os componentes mecânicos, mola-amortecedor.



**Figura 1: Representação esquemática do modelo unidimensional de Kelvin-Voigt submetido a tensões normais puras.**

Por se tratar de um modelo unidimensional, com deslocamentos relativos apenas no eixo  $z$ ,  $w(z,t)$ , a equação constitutiva do solo, caracterizado como um sólido de Voigt, é descrita como



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

na qual  $\sigma_z$  é a tensão normal no eixo z;  $E$  o módulo de elasticidade dinâmico;  $\eta$  a viscosidade longitudinal e  $\varepsilon_z$  a deformação existente. A equação de compatibilidade, que relaciona deformação-deslocamento é definida por

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2)$$

É evidente que a equação de propagação da onda longitudinal no material visco-elástico, deve satisfazer a equação de equilíbrio interno das forças, que, para o caso simplificado, é

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (3)$$

sendo  $\rho$  a massa específica do solo.

Desta forma, desenvolvendo as relações prescritas, tem-se, finalmente, na equação (4), o movimento vibratório, do maciço terroso, que será excitado na base por um deslocamento,  $w_b$ , simulando o vazamento.

Como pode ser visto, o problema é descrito por uma equação diferencial parcial de terceira ordem, no espaço-tempo, cuja solução será obtida transformando-a em uma equação diferencial ordinária de segunda ordem no domínio da frequência.

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \eta \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial t} = 0 \quad (4)$$

A solução do problema, para uma onda harmônica, pode ser escrita como

$$w(z, t) = W(z, \omega) \cdot e^{i\omega t} = w_0 \cdot e^{[-k_2 z + i(\omega t - k_1 z)]} \quad (5)$$

Sendo  $w_0$  o deslocamento na base e  $k_1$  e  $k_2$  coeficientes relacionados com as características do solo.

Para que a solução proposta na equação (5) forneça resultados com sentido físico,  $k_1$  e  $k_2$  devem ser estritamente positivos. Essa solução encontrada foi discutida também por Kolsky [8] e Kramer [9], que definiram  $k_1$  e  $k_2$  pela seguinte relação dos parâmetros

$$k_1 = \left[ \frac{\rho \omega^2}{2E(1 + 4\zeta^2)} (\sqrt{1 + 4\zeta^2} + 1) \right]^{0.5}$$
$$k_2 = \left[ \frac{\rho \omega^2}{2E(1 + 4\zeta^2)} (\sqrt{1 + 4\zeta^2} - 1) \right]^{0.5} \quad (6)$$

Durante as manipulações matemáticas,  $\eta \cdot \omega$  foi substituído, estrategicamente, por  $2 \cdot \zeta \cdot E$ , pois,  $\zeta$ , fator de amortecimento viscoso, diferentemente da viscosidade,  $\eta$ , não possui dependência com a frequência de excitação, ao assumir um modelo de amortecimento histerético ideal.

Para a determinação das propriedades dinâmicas do solo, existem diversos métodos geofísicos e correlações na literatura, dos quais destacam-se os ensaios sísmicos em furo de sondagem – *cross-hole*, *up-hole* e *down-hole* – ensaios de rápida execução, não destrutivos, eficazes e que abrangem grandes volumes de maciço em uma análise [10]. Por meio destes, calcula-se as velocidades de propagação das ondas elásticas de compressão,  $V_p$ , e de cisalhamento,  $V_s$ , geradas por uma excitação do solo. O módulo de elasticidade dinâmico,  $E$ , utilizado nas formulações, se relaciona com  $V_p$  como se segue

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

As mudanças no estado de compactação do solo geram alterações nas características físicas do geomaterial e, conseqüentemente, na velocidade e distância de propagação de suas ondas de corpo. Para cada grau de compactação que será abordado no presente trabalho, foi adotado um arranjo de propriedades diferentes. O módulo de elasticidade dinâmico,  $E$ , foi calculado por meio de relações empíricas encontradas pelos pesquisadores Ohsaki e Iwasaki [11] em seus estudos estatísticos. Nestes, os autores relacionaram, por métodos de regressão, o índice de resistência a penetração,  $N_{SPT}$ , obtido no popular ensaio de sondagem de simples reconhecimento (SPT), com o módulo de cisalhamento dinâmico,  $G$ , do geomaterial. Aplicado isto, para um coeficiente de Poisson  $\nu=0.3$  tem-se:

$$\text{Solos arenosos: } E = 16,573 \cdot 10^6 N_{SPT}^{0,94} \text{ [Pa]}$$

$$\text{Solos coesivos: } E = 35,696 \cdot 10^6 N_{SPT}^{0,71} \text{ [Pa]} \quad (8)$$

No Brasil, as informações técnicas sobre a sondagem de simples reconhecimento, com SPT, são prescrevidas pela Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT), na norma NBR 6484 [12]. No anexo A desta norma consta uma tabela informativa, que relaciona os estados de compacidade e consistência dos solos, com seus índices de resistência à penetração. Serão estes intervalos, a referência adotada.

### **Compactação do solo**

O processo de densificação dos solos, em campo, é executado por camadas e, para isso, utiliza-se rolos compactadores ou, em casos específicos de pequenas valas, soquetes pneumáticos ou placas manuais. As instalações prediais devem seguir as diretrizes presentes nas normas do fórum nacional de normalização, como NBR 12266 [13], NBR 9822 [14] e NBR 7182 [15].

Compactar é rearranjar, de maneira organizada e eficiente, as partículas existentes em um dado volume de solo, reduzindo o volume de vazios e eliminando, parcialmente, o ar retido. Neste procedimento, as partículas sólidas e a quantidade de água permanecem praticamente constantes. O primeiro estudo na área, que é utilizado até hoje, foi publicado pelo norte americano Proctor [16], que constatou, para uma certa energia de compactação, a relação entre a densidade final do maciço com a umidade.

Em situações em que a umidade do solo é baixa, grande parte da energia aplicada para a densificação é dissipada pelo alto atrito entre as partículas. Com o aumento da umidade, ocorre um melhor deslocamento e acomodação dos grãos, pois o aumento da pressão neutra, proveniente da água, reduz a tensão efetiva e, assim, a resistência ao cisalhamento, o que proporciona um arranjo final mais compactado. Entretanto, com umidades muito elevadas, a água envolve as partículas de ar e as impede de escapar dos vazios, ou seja, para uma certa quantidade de energia, existe uma massa específica aparente seca máxima,  $\rho_d \text{ máx}$ , para uma certa umidade ótima,  $w_{ót}$  [17].

O controle de compactação, no campo, baseado nos critérios da norma NBR 7182 [15], permite uma variação de -2% a +1% da umidade ótima do solo densificado, com um grau de compactação (GC) mínimo de 95% em relação à sua máxima massa específica aparente seca, para a energia Proctor normal. Desta forma, os solos arenosos finos lateríticos (SAFL), característicos de clima quente e úmido, são protagonistas na pavimentação de baixo custo e manutenção de vias urbanas, pois possuem, além de um bom comportamento mecânico, altos valores de densidade seca e baixa umidade ótima [18, 19] o que propicia uma boa compactação.

Após a instalação de novos dutos ou em um eventual reparo, o solo para o reaterro das valas, depois de ser simplesmente manipulado, ou transportado da jazida até o local do serviço, encontra-se em um estado fofo, heterogêneo, com altos índices de vazios, com um comportamento sem padrão, pouco resistente e muito deformável. Logo, torna-se indispensável na etapa de preenchimento a aplicação do processo de compactação, o qual proporcionará um aumento da rigidez e resistência do maciço, tornando-o, assim, mais homogêneo e o contato entre os seus grãos, mais efetivo.

Como veremos na seção dos resultados, uma má execução desta etapa, será muito custosa, não só para o apoio da tubulação em si, que sofrerá com concentrações de tensão e momentos fletores [20], mas também para uma futura identificação de um possível vazamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na investigação do grau de influência do processo de densificação sobre a energia do sinal do vazamento, na superfície, utilizou-se dois tipos de solos – solos arenosos e solos coesivos – e duas profundidades de vala –  $h=0.4\text{m}$  e  $h=0.8\text{m}$ . O fator de amortecimento viscoso, nesta primeira investigação, assumiu valor constante,  $\zeta=0.3$ .

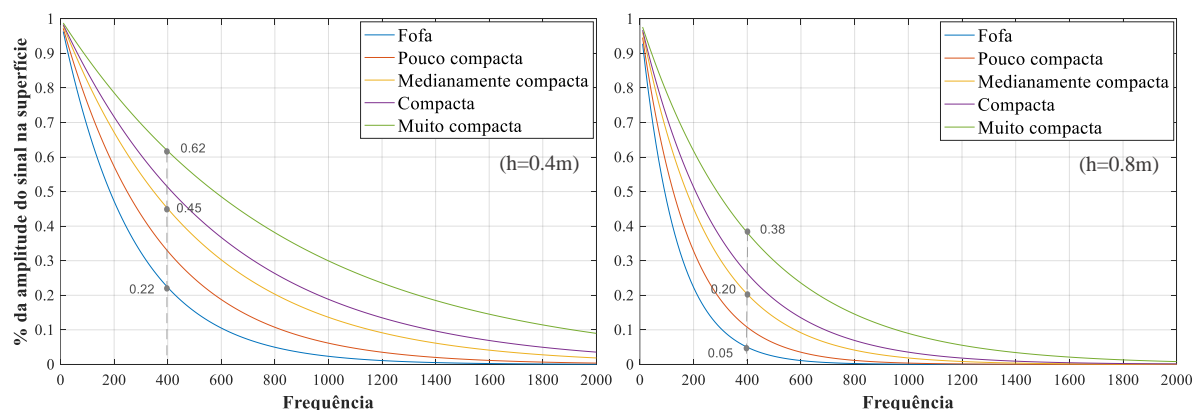
O sinal do vazamento foi simulado com um sinal chirp de 10-2000 Hz. Os cinco estados de compactidade e consistência tratados foram selecionados a partir dos índices de resistência a penetração,  $N_{SPT}$ , presentes no anexo A da NBR 6484 [12], estes índices foram, então, relacionados com o módulo de elasticidade dinâmico e densidade dos geomateriais, por equações empíricas, como apresentadas em (8). Na Tabela 1 encontra-se os arranjos utilizados nas simulações.

**Tabela 1: Arranjos de propriedades utilizados na investigação.**

SOLO	DESIGNAÇÃO	ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO [ $N_{SPT}$ ]	DENSIDADE [ $\text{kg/m}^3$ ] [21]
ARENOSO	Fofa	3	1700
	Pouco compacta	6	1800
	Medianamente compacta	13	1900
	Compacta	20	2000
	Muito compacta	40	2000
COESIVO	Muito mole	1	1700
	Mole	4	1800
	Média	8	1900
	Rija	15	1900
	Dura	20	2000

Os resultados obtidos para os 5 estados de compactidade do solo arenoso estão na Fig. 2. Estes valores apresentados se referem a porcentagem do sinal inserido na base que chega a superfície. A comparação entre os sinais foi feita a partir de seus valores *RMS*.

É visível a grande influência dos estados de compactação na propagação do sinal vibro-acústico ao longo do maciço. Como exemplo, para uma frequência selecionada de 400 Hz e profundidades  $h=0.4\text{m}$  e  $h=0.8\text{m}$ , a amplitude do sinal na superfície, respectivamente, dobrou e quadruplicou do solo fofo para o solo medianamente compacto, enquanto que entre os dois últimos estados a variação foi de 19% e 45%, mesmo com uma diferença de 20  $N_{SPT}$ .



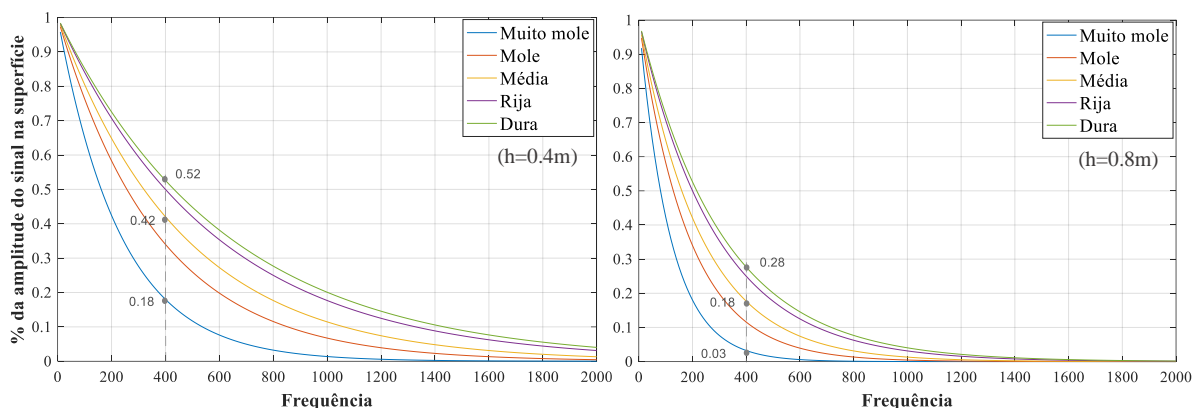
**Figura 2: Influência da compactidade no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície. a)  $h=0.4\text{m}$ . b)  $h=0.8\text{m}$ .**

Como já mencionado, a compactação torna o contato, entre os grãos, mais efetivo, pois diminui os vazios existentes entre eles, expulsando o ar que ali estava retido e que é um grande dissipador da energia do sinal.

Com este processo, o maciço se torna mais rígido, resistente e homogêneo – o que reduz também as perdas de transmissão pela heterogeneidade.

É claro que as diferenças climáticas existentes no país contribuem para certas peculiaridades na taxonomia local, no entanto, no interior do Estado de São Paulo, este primeiro perfil de solo observado – areia média e fina – predomina e compõe cerca de 60% das camadas superficiais da região [22, 23, 24].

Na Fig. 3, por sua vez, estão os resultados obtidos com os solos coesivos. Selecionando novamente a frequência de 400 Hz como referência, para as profundidades  $h=0.4\text{m}$  e  $h=0.8\text{m}$ , é possível notar, na superfície, uma variação de amplitude, respectivamente, de 133% e 500% entre o solo muito mole e o solo de consistência média, enquanto que entre os dois últimos estados a variação foi de 4% e 12%.

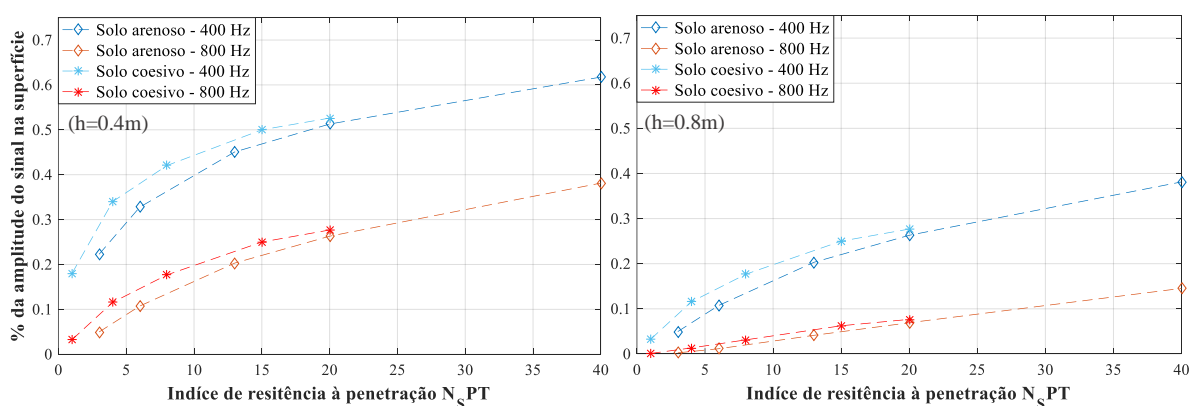


**Figura 3: Influência da consistência no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície. a)  $h=0.4\text{m}$ . b)  $h=0.8\text{m}$ .**

Como observado também, o sinal da excitação que se propagou até superfície, possui um conteúdo de frequências menor, com uma redução exponencial das altas frequências. Os solos se comportam, naturalmente, como um filtro passa-baixa, atenuando muito mais eficientemente estas altas frequências, desta forma, é importante destacar, que as investigações vibro-acústicas, nesta área, devem ter enfoque nas baixas frequências, em uma banda, como pôde ser visto, abaixo de 800 Hz.

Comparando os itens (a) e (b) das Fig. 2 e 3 nota-se, também, outro fator que contribuiu com o fenômeno da atenuação – o espalhamento geométrico. Este efeito ocorre devido ao aumento da área da frente de onda, o que está interligado com a profundidade da vala. A frente de onda, de formato, teoricamente, elíptico, conforme se propaga, aumenta o raio de difusão, dissipando energia no processo. Quanto maior a distância, mais a onda se espalhará.

A fim de melhor evidenciar a relação direta entre a amplitude do sinal na superfície com o índice de resistência à penetração, para os dois tipos de solos, fixou-se, na Fig. 4, duas frequências, 400 Hz e 800 Hz.

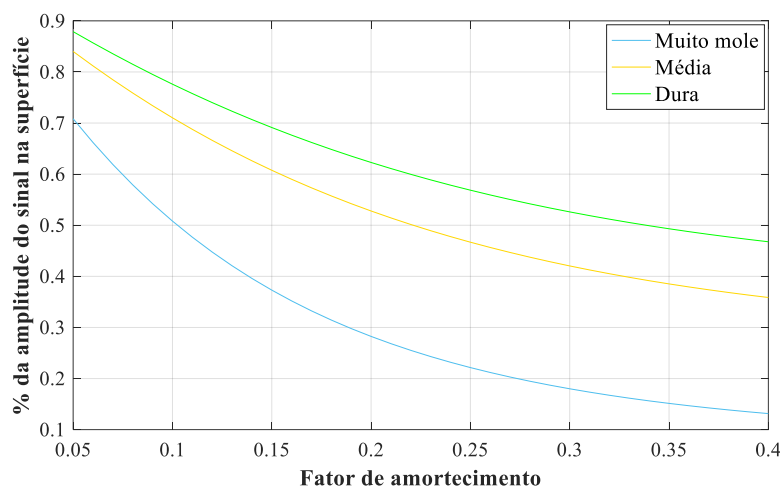


**Figura 4: Influência da compactação sobre o nível de energia do sinal da superfície. a)  $h=0.4\text{m}$ . b)  $h=0.8\text{m}$ .**

Em condições adequadas de trabalho, para o preenchimento e assentamento das valas, é indiscutível a importância de um bom controle e compactação das camadas. Como pôde ser visto, o processo de densificação do solo contribuiu, nestas simulações, com um aumento de até cinco vezes na amplitude do sinal.

O fator de amortecimento,  $\zeta$ , naturalmente, exerce, também, uma grande influência no processo de atenuação, pois está ligado à dissipação viscosa do geomaterial. O atrito interno entre os grãos e a mudança de viscosidade do meio é uma atenuação anelástica, intrínseca ao solo, que envolve suas características granulométricas, porosidade e umidade.

A ação do fator de amortecimento nos solos coesivos foi verificada na Fig. 5. O parâmetro variou em um intervalo de 0.05 a 0.4, para uma profundidade de vala  $h=0.4\text{m}$ , e uma excitação de 400 Hz. O intervalo adotado para  $\zeta$  está baseado em resultados experimentais de alguns pesquisadores da área [25].



**Figura 5: Influência do fator de amortecimento no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície.**

Para o solo coesivo com consistência média, o fator de amortecimento promoveu, na superfície, variações em torno de 130% da amplitude do sinal. Nestes solos é importante destacar que o processo de atenuação é regido pela força de coesão. Este mecanismo está ligado às forças eletroquímicas de atração do meio, que lutam para manter a estabilidade física deste, resistindo aos esforços solicitantes [17, 26]. Os efeitos de atenuação mencionados neste trabalho podem ser melhor estudados no trabalho de Bjorlykke e Mondol [27].

É óbvio que, na presença de um vazamento, o sistema real tubo-água, não envolverá apenas ondas compressoriais. O sinal na superfície será constituído de uma associação de ondas primárias, secundárias e até de ondas superficiais, do tipo Rayleigh. Entretanto, este fato não inviabiliza a investigação aqui feita, ainda mais para o ponto na superfície logo acima do vazamento, como foi adotado, no qual predomina a contribuição das ondas P.

## CONCLUSÕES

As investigações feitas mostraram a importância de um bom controle de compactação das camadas do solo na etapa de reaterro de valas e assentamento de tubulações da rede de abastecimento de água. Como pôde ser visto, em solos arenosos, o processo de densificação contribuiu com um aumento de até três vezes da amplitude do sinal na superfície, já nos solos coesivos, com um aumento de até cinco vezes. Estas altas variações encontradas têm grande relevância na detecção e precisa localização de vazamentos, pelo método vibro-acústico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO - SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018. Brasília, DF: Ministério das cidades, Dez. 2019.



2. FUCHS, H.V., RIEHLE, R. *Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. Applied Acoustic (United States)*, v.33, n.1, p.1-19, 1991.
3. JENNY, H. *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Dover Publications (New York)*, p 281, 1941.
4. DI BENEDETTO, H., TATSUOKA, F. *Small strains behavior of geomaterials: modelling of strain rate effects. Soils and Foundations (Tokyo)*, v.37, n.2, p. 127-138, 1997.
5. PROENÇA, S. M. Aplicação do modelo constitutivo viscoelástico de Kelvin-Voigt e do método dos elementos finitos para a determinação da influência das propriedades do solo na detecção de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas. Ilha Solteira, 2019. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, 2019.
6. MERIBOUT, F. *Analyse de la transmission au sol des vibrations a partir d'une structure vibrante. Constantine*, 2008. Tese de doutorado – *Faculté des sciences de l'ingénieur – Université Mentouri Constantine*, 2008.
7. MARCATTO, I.B.T. Otimização do comportamento vibratório de uma estrutura de treliças visco-elásticas através do método de otimização topológica. São Paulo, 2011. Trabalho de formatura – Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, 2011.
8. KOLSKY, H. *Stress waves in solids. Sound and Vibration (United Kingdom)*, v.1, n.1, p.88-110, 1964.
9. KRAMER, S.L. *Geotechnical earthquake engineering. New Jersey: Prentice-Hall*, 1996. 653 p. (*International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*).
10. GIACHETI, H.L. *et al.* Ensaio de campo na investigação geotécnica e geoambiental. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 13., Curitiba. ABMS, 2006. p. 25.
11. OHSAKI, Y., IWASAKI, R. *On dynamic shear moduli and poisson's ratios of soil deposits. Soils and Foundations (Japan)*, v.13, n.4, p. 61-73, 1973.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6484: solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001. 17 p.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12266: projeto e execução de valas para assentamento de tubulação de água, esgoto ou drenagem urbana – procedimento. Rio de Janeiro, 1992. 17 p. (Publicada confirmação: 11/2018).
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9822: manuseio, armazenamento e assentamento de tubulações de poli (cloreto de vinila) não plastificado (PVC-U) para transporte de água e de tubulações de poli (cloreto de vinila) não plastificado orientado (PVC-O) para transporte de água ou esgoto sob pressão positiva. Rio de Janeiro, 2012. 18 p. (Publicada confirmação: 10/2016).
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7182: solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.
16. PROCTOR, R.R. *Fundamentals principles of soil compaction. Engineering News Record (New York)*, v.11, n.9, p. 148-156, 1933.
17. PINTO, C. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 3 ed. 367 p.
18. NOGAMI, J.S., VILLIBOR, D.F., BELIGNI, M., CINCERRE, J.R. Pavimentos com solos lateríticos e gestão de manutenção de vias urbanas. São Paulo: ABPv, 2000.
19. VILLIBOR, D.F., NOGAMI, J.S., CINCERRE, J.R., SERRA, P.R.M, ZUPPOLINI NETO, A. Pavimentos de baixo custo para vias urbanas. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 2 ed. 194 p.
20. EL DEBS, M.K. Projeto estrutural de tubos circulares de concreto. São Paulo: IBTS, 2003.
21. JOBERT J.I. Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução. São Paulo: PINI, 2007. 222 p.
22. MACHADO, S.L. Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados. São carlos, 1998. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, 1998.
23. SOUZA, A. Utilização de fundações rasas no solo superficial colapsível de Ilha Solteira (SP). São Carlos, 1993. Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP, 1993.
24. MENEZES, S.M. Análise do comportamento de estacas pré-moldadas em solo de alta porosidade do interior do Estado de São Paulo. São Paulo, 1997. Tese de doutorado – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 1997.
25. SUN, J.I., GOLESORKHI, R., SEED, H.B. *Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils. Califórnia: Earthquake Engineering Research Center*, 1988. 48 p.
26. HAMILTON, E.L. *Compressional wave attenuation in marine sediments. Geophysics (Oklahoma)*, v.37, n.4, p. 620-646, 1972.
27. BJORLYKKE, K., MONDOL, N.H. *Petroleum geoscience: from sedimentar environments to rock physics. New York: Springer-Verlag*, 2010. p. 375-402.