



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

Matheus Silva Proença, Amarildo Tabone Paschoalini, Adriano Souza

UNESP-FEIS, Ilha Solteira, SP - 15385-000. e-mail: matheus.proenca@unesp.br

## 1. Introdução e Objetivos

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, entretanto, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 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.

## 2. Metodologia

A resposta dinâmica dos solos em um estado de pequenas deformações, como quando submetidos às excitações provenientes de um vazamento, foi investigada por meio de uma abordagem numérica. O comportamento dos geomateriais foi descrito mediante o modelo constitutivo, unidimensional, visco-elástico de Kelvin-Voigt. A seguir, tem-se a equação governante do problema modelado:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \eta \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial t} = 0 \quad (1)$$

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

$$w(z, t) = W(z, \omega) \cdot e^{i\omega t} = w_0 \cdot e^{[-k_2 z + i(\omega t - k_1 z)]} \quad (2)$$

Sendo  $k_1$  e  $k_2$  uma relação dos parâmetros do solo e  $\omega$ ,  $k = f(\rho, E, \zeta, \omega)$  [3; 4].

Para cada grau de compactação que será abordado, foi adotado um arranjo de propriedades diferentes para os solos. O módulo de elasticidade dinâmico, E, foi calculado por meio de relações empíricas encontradas em estudos estatísticos [5]. Para um coeficiente de Poisson  $\nu=0.3$  tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Solos arenosos: } E &= 16,573 \cdot 10^6 N_{SPT}^{0,94} \text{ [Pa]} \\ \text{Solos coesivos: } E &= 35,696 \cdot 10^6 N_{SPT}^{0,71} \text{ [Pa]} \end{aligned} \quad (3)$$

Os cinco estados de compacidade e consistência tratados foram selecionados a partir dos índices de resistência a penetração,  $N_{SPT}$ , presentes na norma NBR 6484 [6] da Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT).

Nas investigações utilizou-se duas profundidades de vala –  $h=0.4m$  e  $h=0.8m$ . O fator de amortecimento viscoso, nesta primeira investigação, assumiu valor constante,  $\zeta=0.3$ . O sinal de entrada é um sinal *chirp* com  $\omega = [10-2000 \text{ Hz}]$ .

## 3. Resultados e Discussão

Os resultados mostraram 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  $h=0.4m$  e  $0.8m$ , nos solos arenosos, a amplitude do sinal, na superfície, respectivamente, dobrou e quadruplicou do solo fofo para o solo medianamente compacto. Para os solos coesivos 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%. 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*.

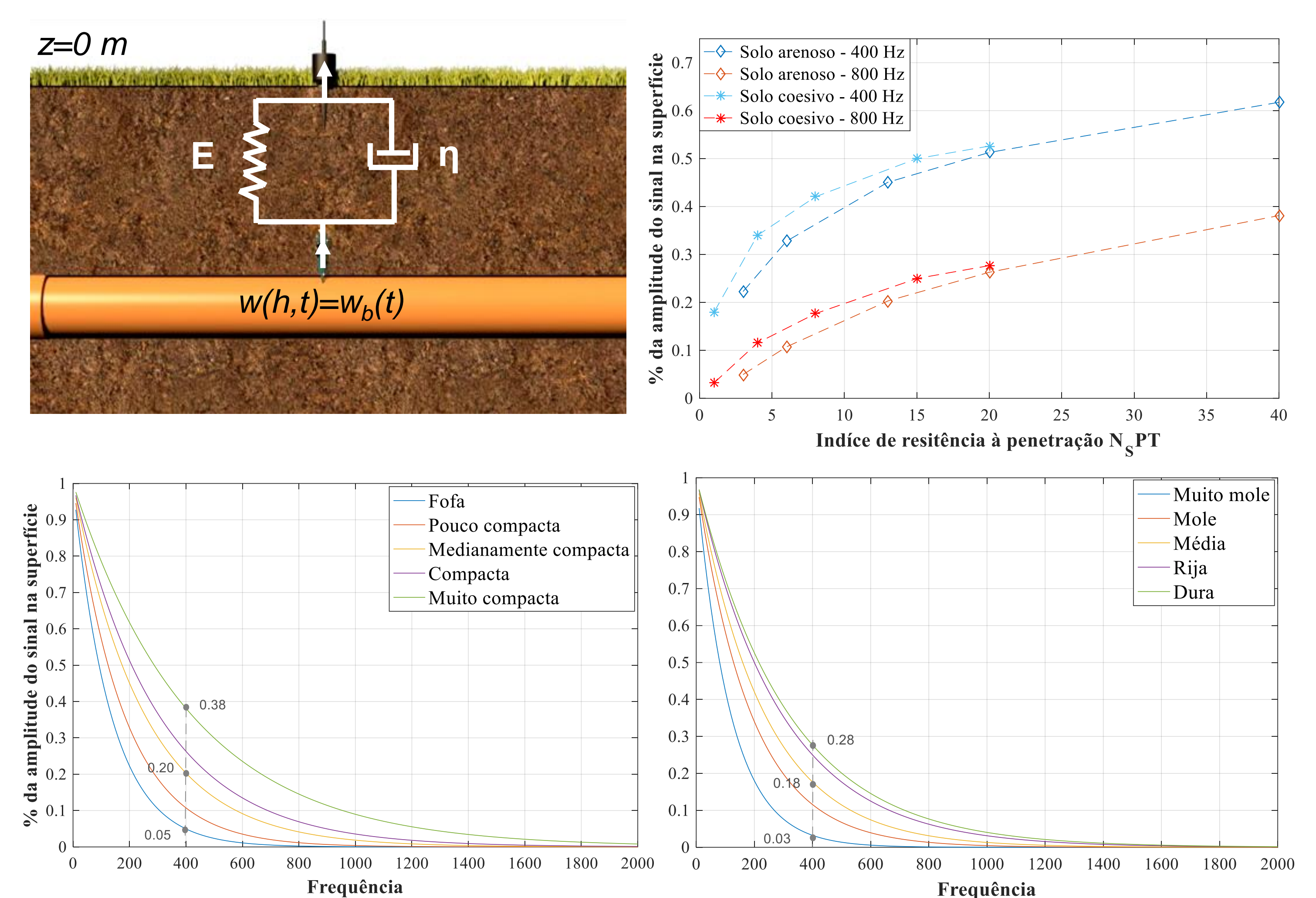


Figura 1 – a) Representação esquemática do modelo submetido a tensões normais. b) Influência da compactação sobre o nível de energia do sinal na superfície –  $h=0.4m$ . c)  $h=0.8$ , solos arenosos. d)  $h=0.8m$ , solos coesivos.

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. Como pode ser observado também, o sinal da excitação, que se propagou até superfície, possui um conteúdo de frequências menor, com uma redução exponencial das altas frequências. Desta forma, é importante destacar, que as investigações vibro-acústicas, nesta área, devem ter enfoque nas baixas frequências, em uma banda, como verificado, abaixo de 800 Hz.

## 4. 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. No estudo, 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, ao longo da rede de distribuição.

## 5. Referências

- [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] KOLSKY, H. *Stress waves in solids. Sound and Vibration (UK)*, v.1, n.1, p.88-110, 1964.
- [4] KRAMER, S.L. *Geotechnical earthquake engineering. New Jersey: Prentice-Hall*, 1996. 653 p. (*International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*).
- [5] 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.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6484: solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001. 17 p.