SENSIBILIDADE DE MODELO ANALÍTICO DE INTERAÇÃO ONDA-SOLO MARINHO ATRAVÉS DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Sensitivity of analytical model of wave-seabed interaction through the design of experiments

João Paulo Chodacki Quiuqui[a], Antônio Marcos de Lima Alves[b]

[a] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
[b] Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Brasil.

RESUMO – Os fenômenos associados à interação dinâmica entre ondas e leitos marinhos porosos são objeto de intensas pesquisas ao redor do mundo. O assunto é de extrema importância para a análise da estabilidade de estruturas portuárias e offshore, dutos e taludes submarinos, por exemplo. Neste trabalho, foi conduzida uma análise de sensibilidade de um modelo analítico para representação das tensões, poropressão e deslocamentos induzidos por ondas em leitos marinhos porosos. A análise de sensibilidade foi realizada aplicando-se o método de Taguchi para planejamento de experimentos, em conjunto com uma análise de variância (ANOVA). Foi possível identificar os parâmetros do solo que mais influenciam na resposta do modelo analítico. Foi realizada ainda a otimização dos fatores do modelo analítico a fim de determinar os parâmetros ótimos para um conjunto de dados experimentais analisados.

ABSTRACT – The phenomena associated with the dynamic interaction between waves and porous seabeds are the subject of intense research worldwide. The subject is extremely important for analyzing the stability of port and offshore structures, pipelines, and submarine slopes, for example. In this work, an analytical model to represent wave-induced stresses, pore pressure, and displacements in porous seabeds was subjected to a sensitivity analysis, by applying the Taguchi method for design of experiments and analysis of variance (ANOVA). It was possible to identify the soil parameters that most influence the response of the analytical model. The optimization of the analytical model factors was also carried out to determine the optimal parameters for a set of experimental data analyzed.

Palavras Chave – interação onda-solo marinho, análise de sensibilidade, planejamento de experimentos.

Keywords – wave-seabed interaction, sensitivity analysis, design of experiments.

1 – INTRODUÇÃO

O crescimento das atividades humanas em regiões costeiras e offshore tem conduzido a esforços consideráveis de pesquisas buscando um melhor entendimento da interação entre as ondas e o leito marinho. Uma das razões para isso é a preocupação com danos em estruturas costeiras e offshore associados à instabilidade do leito marinho induzida por ondas (Christian et al., 1974; Jeng, 2013).

E-mails: joao.quiuqui@ufrgs.br (J. Quiuqui), antonioalves@furg.br (A. Alves)

ORCID: orcid.org/0000-0002-5083-413X (J. Quiuqui), orcid.org/0000-0001-5799-3304 (A. Alves)

A propagação de ondas gera um campo de pressões dinâmicas ao longo da coluna de água, chegando até o leito marinho. Essa pressão induz o surgimento de tensões, poropressões e deslocamentos no solo marinho (Moshagen e Torum, 1975). Estes efeitos podem resultar em problemas de engenharia significativos como deslocamento de oleodutos, instabilidade de taludes submarinos e rompimento de quebra-mares (Yang, 2014). A avaliação da estabilidade de estruturas submarinas, essencial para a operação normal dos sistemas, depende da obtenção das respostas do fundo marinho à propagação das ondas na superfície do mar (Fu et al., 2024).

Numerosos modelos de resposta do fundo marinho diante do carregamento cíclico de ondas têm sido desenvolvidos (Jeng, 2013), dentre os principais estão, o modelo desacoplado (Nakamura et al., 1973), modelo de adensamento (ou modelo quase estático) (Madsen, 1978; Yamamoto et al., 1978), modelo dinâmico, aproximação u-p (Zienkiewicz et al.,1980; Jeng et al., 1999; Jeng and Rahman, 2000) e os modelos poroelastoplásticos (Sassa e Sekiguchi, 2001; Sassa et al., 2001). O modelo desacoplado considera o solo e o fluido como incompressíveis, além de ignorar as acelerações do fluido e do solo. Além disso, diversos trabalhos têm utilizado abordagens numéricas para investigar a resposta do meio poroso. Por exemplo, Sui et al. (2016) apresentaram um modelo tridimensional que considerou os efeitos da reflexão e difração das ondas em um meio poroso ao redor de estacas. Lin et al. (2017) integraram modelos de ondas e de solo utilizando o OpenFOAM, validando seus resultados com dados experimentais. Zhao et al. (2021) desenvolveram um modelo elastoplástico para estudar a resposta do solo ao redor de dutos submarinos, focando nas interações entre ondas e correntes.

O modelo de adensamento é baseado na teoria de adensamento de Biot (1941), o qual fornece a resposta do solo marinho induzida pela onda, considerando o fluido contido nos poros e o solo como meios compressíveis. São ignorados os termos de acelerações do solo e do fluido. Essa abordagem foi desenvolvida inicialmente por Yamamoto et al. (1978) e Madsen (1978), que consideraram ainda a equação de armazenamento de Verruijt (1969). Yamamoto et al. (1978) consideraram o solo como um meio hidráulico isotrópico enquanto Madsen (1978) admitiu anisotropia quanto a permeabilidade.

Os modelos dinâmicos consideram as força inerciais do fluido e do solo como parte da solução, enquanto que o modelo de aproximação u-p leva em conta somente as acelerações do solo, desconsiderando, portanto, as derivadas de segunda ordem em relação ao tempo do fluido (Quiuqui et al., 2022). Jeng e Cha (2003) apontam que a inclusão de termos inerciais deve ser considerada somente em alguns casos específicos de combinação do solo marinho e características de onda, sendo os modelos quase estáticos, normalmente, suficientes para estimar os efeitos no solo induzido por ondas na maior parte dos casos. Nos exemplos numéricos apresentados, Jeng e Lee (2001) identificaram que a solução dinâmica é necessária para solos mais permeáveis, como pedregulhos e cascalhos. Por outro lado, para solos arenosos, a solução quase estática mostrou-se suficiente para representar adequadamente as tensões, poropressões e deslocamentos no interior do fundo marinho.

O objetivo deste trabalho é avaliar o modelo analítico de Yamamoto et al. (1978) para representação de tensões, poropressão e deslocamentos induzido por ondas em leitos marinhos porosos. Através do método de Taguchi, muito utilizado na área de planejamento de experimentos, o modelo analítico de Yamamoto et al. (1978) foi testado para diferentes combinações de parâmetros do solo, tendo sido realizada ainda uma análise de variância (ANOVA) com o objetivo de determinar a contribuição de cada parâmetro na resposta do modelo analítico. Por fim, através do modelo de regressão matemática desenvolvido, realizou-se um processo de otimização a fim de obter os parâmetros ótimos do modelo analítico, para um conjunto de dados experimentais testado. Desta forma, o presente estudo busca indicar quais parâmetros são mais ou menos importantes para a resposta do modelo, norteando onde devem ser concentrados mais esforços para sua determinação precisa e quais podem ser estimados de forma aproximada sem comprometer a acurácia na resposta do comportamento do fundo marinho.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 163 – março/marzo/march 2025 – pp. 09-30
https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

2 – O MODELO ANALÍTICO DE YAMAMOTO ET AL. (1978)

2.1 – Equações governantes

O modelo analítico de Yamamoto et al. (1978) está baseado na teoria de adensamento de Biot (1941), sendo o solo representado como um material poroso isotrópico, homogêneo e de espessura infinita. O fluido intersticial é considerado compressível, assim como o meio poroso. Já os grãos do solo são considerados incompressíveis. Os efeitos gerados no solo são induzidos por ondas de água periódicas, progressivas e lineares propagando-se sobre o leito marinho com profundidade constante h, sendo o modelo considerado bidimensional.

Para estas condições, a equação da continuidade pode ser escrita como:

$$\frac{k}{\gamma}\nabla^2 p = \frac{n}{K'}\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \tag{1}$$

onde k é o coeficiente de permeabilidade, γ é o peso específico do fluido, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ é o operador laplaciano, p é o excesso de poropressão, n é a porosidade, e ε é a deformação específica do meio poroso, definida por:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \tag{2}$$

sendo u e w os deslocamentos na direção x e z respectivamente. O parâmetro K' é o módulo de compressibilidade aparente do fluido, que se relaciona da seguinte forma com o módulo de compressibilidade real K (Verruijjt, 1969):

$$K' = \left[\frac{1}{K} + \frac{1 - S}{\gamma h}\right]^{-1} \tag{3}$$

sendo S o grau de saturação do meio poroso e h a distância entre a superfície do leito marinho e a superfície média do fluido em repouso.

As equações de equilíbrio em suas componentes são expressas como:

$$\frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \tag{4}$$

$$\frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial z} \tag{5}$$

De acordo com a Lei de Hooke, as tensões efetivas normais na direção horizontal ($\sigma_x{}'$) e vertical ($\sigma_z{}'$) e cisalhantes (τ_{xz}, τ_{zx}) podem ser definidas como:

$$\sigma_x{}' = 2G\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\nu}{1 - 2\nu}\varepsilon\right) \tag{6}$$

$$\sigma_z{}' = 2G\left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon\right) \quad (7)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = G\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \quad (8)$$

onde G é o modulo de cisalhamento e ν é o coeficiente de Poisson do solo.

2.2 – Condições de contorno

Na Figura 1 estão apresentados os eixos de orientação adotados na solução matemática considerando o solo homogêneo com espessura infinita. O eixo z é vertical e positivo com direção para baixo, já o eixo x é positivo com direção contrária à propagação das ondas progressivas.

Na superfície da camada de solo ($z = 0$), a tensão vertical efetiva é nula, a tensão cisalhante é desprezada e o excesso de poropressão é igual à pressão gerada pela onda:

$$\sigma_z{}' = 0 \quad (9)$$

$$\tau_{xz} = 0 \quad (10)$$

$$p = p_0 \exp\psi \quad (11)$$

onde $\psi = i(\lambda x + \omega t)$ é a função fase, sendo λ o número de onda definido por $\lambda = \frac{2\pi}{L}$, L o comprimento de onda, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ é a frequência angular, sendo T o período da onda, $i = \sqrt{-1}$, sendo considerada na solução somente a parte real, e p_0 é a amplitude da pressão dinâmica gerada pela onda, calculada através da teoria linear de ondas sendo, $p_0 = \frac{\gamma H}{2\cosh(\lambda h)}$ onde H é a altura da onda.

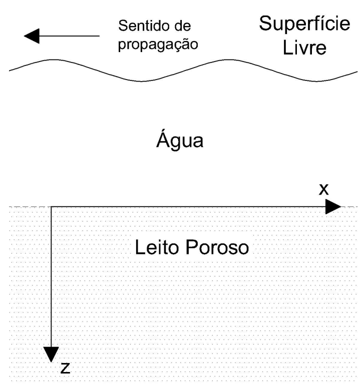

Fig. 1 – Esquema dos eixos de orientação.

Considerando a espessura do solo marinho infinita, os deslocamentos horizontais e verticais além do excesso de poropressão podem ser considerados nulos à medida que a profundidade tende ao infinito, logo:

$$u, w, p \to 0 \ \text{ em } \ z \to +\infty \quad (12)$$

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 163 – março/marzo/march 2025 – pp. 09-30
https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

2.3 – Solução analítica do problema

A linearidade das equações governantes sugere que todas as variáveis dependerão de x e t da forma dada pelo carregamento (equação 11), portanto, a diferenciação de qualquer variável em relação a x e t reduz-se à própria variável multiplicada por $(i\lambda)$ e $(i\omega)$, respectivamente. Introduzindo este conceito nas equações 1, 4 e 5, pode-se reescrevê-las, respectivamente, como:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - p\left(\lambda^2 + \frac{i\gamma n}{kK'}\right) = \frac{i\omega\gamma}{k}\left(i\lambda u + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \tag{13}$$

$$p = \sigma_x' + \frac{1}{i\lambda}\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \tag{14}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_z'}{\partial z} + i\lambda\tau_{xz} \tag{15}$$

Substituindo a equação 14 nas equações 13 e 15, pode-se obter as equações governantes do problema em função somente das tensões efetivas e deslocamentos:

$$\frac{\partial^2 \sigma_x{}'}{\partial z^2} + \frac{1}{i\lambda}\frac{\partial^3 \tau_{xz}}{\partial z^3} - \left(\lambda^2 + \frac{i\gamma n}{kK'}\right)\left(\sigma_x' + \frac{1}{i\lambda}\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}\right) = \frac{i\omega\gamma}{k}\left(i\lambda u + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \tag{16}$$

$$\frac{\partial \sigma_x{}'}{\partial z} + \frac{1}{i\lambda}\frac{\partial^2 \tau_{xz}}{\partial z^2} = \frac{\partial \sigma_z'}{\partial z} + i\lambda\tau_{xz} \tag{17}$$

Substituindo as equações 6, 7 e 8 nas equações 16 e 17, o problema passará a ser função dos deslocamentos u e w. Após as substituições e algumas manipulações algébricas, obtêm-se a equação governante para o deslocamento horizontal u:

$$\frac{\partial^6 u}{\partial z^6} - (2\lambda^2 + \lambda'^2)\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \lambda^2(\lambda^2 + 2\lambda'^2)\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \lambda^4\lambda'^2 u = 0 \tag{18}$$

onde a parâmetro λ' reúne as variáveis físicas dependentes da onda (número de onda λ e frequência angular ω), do solo (coeficiente de Poisson ν, porosidade n , módulo de cisalhamento G) e do fluido (peso específico γ e módulo de compressibilidade corrigido K'):

$$\lambda'^2 = \lambda^2 + \frac{i\gamma\omega}{k}\left(\frac{n}{K'} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)G}\right) \tag{19}$$

A equação 18 (em conjunto com a equação 19) torna-se a equação governante final para o deslocamento do solo induzido pela onda progressiva bidimensional, na direção horizontal, considerando-se condições hidráulicas isotrópicas. Através das equações 14 e 17, é possível determinar as equações governantes para o deslocamento induzido na direção vertical e para o excesso de poropressão, respectivamente, onde todas elas são equações diferenciais homogêneas de sexto grau cuja equação característica pode ser dada por:

$$(D^2 - \lambda^2)^2(D^2 - \lambda'^2)\begin{Bmatrix} u \\ w \\ p \end{Bmatrix} = 0 \tag{20}$$

onde D indica o operador $D = \frac{d}{dz}$. Como soluções da equação 20, obtêm-se:

$$u = \{a_1 \exp(\lambda z) + a_2 \exp(-\lambda z) + a_3 z \exp(\lambda z) + a_4 z \exp(-\lambda z) + a_5 \exp(\lambda' z) + a_6 \exp(-\lambda' z)\} \exp \psi \quad (21)$$

$$w = \{b_1 \exp(\lambda z) + b_2 \exp(-\lambda z) + b_3 z \exp(\lambda z) + b_4 z \exp(-\lambda z) + b_5 \exp(\lambda' z) + b_6 \exp(-\lambda' z)\} \exp \psi \quad (22)$$

$$p = \{c_1 \exp(\lambda z) + c_2 \exp(-\lambda z) + c_3 z \exp(\lambda z) + c_4 z \exp(-\lambda z) + c_5 \exp(\lambda' z) + c_6 \exp(-\lambda' z)\} \exp \psi \quad (23)$$

As constantes a_n, b_n e c_n com $n = \{1,2,3,4,5,6\}$ podem ser determinadas através das condições de contorno.

2.4 – Determinação das constantes

A aplicação da condição de contorno apresentada pela equação 12 indica que $a_n = b_n = c_n = 0$, sendo $n = \{1,3,5\}$, sendo assim, as equações 21, 22 e 23 reduzem-se a:

$$u = \{a_2 \exp(-\lambda z) + a_4 z \exp(-\lambda z) + a_6 \exp(-\lambda' z)\} \exp \psi \quad (24)$$

$$w = \{b_2 \exp(-\lambda z) + b_4 z \exp(-\lambda z) + b_6 \exp(-\lambda' z)\} \exp \psi \quad (25)$$

$$p = \{c_2 \exp(-\lambda z) + c_4 z \exp(-\lambda z) + c_6 \exp(-\lambda' z)\} \exp \psi \quad (26)$$

As constantes a_n, b_n e c_n com $n = \{2,4,6\}$ não são independentes. Esta dependência pode ser determinada substituindo as equações 24, 25 e 26 nas equações governantes do problema apresentadas pelas equações 1, 4 e 5. Sendo assim, as relações entre as constantes podem ser escritas da seguinte forma:

$$b_2 = i\left(a_2 + \frac{a_4}{\lambda} \frac{1 + m(3 - 4\nu)}{1 + m}\right) \quad (27)$$

$$b_4 = i a_4 \quad (28)$$

$$b_6 = i \frac{\lambda'}{\lambda} a_6 \quad (29)$$

$$c_2 = \frac{2G}{1 + m} a_4 \quad (30)$$

$$c_4 = 0 \quad (31)$$

$$c_6 = \frac{2G\beta\omega'}{\lambda} a_6 \quad (32)$$

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 163 – março/marzo/march 2025 – pp. 09-30
https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1

onde:

$$\omega' = \frac{\omega}{c} \tag{33}$$

$$c = \frac{k}{\gamma\left(\frac{n}{K'} + \frac{1-2\nu}{2G(1-\nu)}\right)} \tag{34}$$

$$\beta = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \tag{35}$$

$$m = \frac{n}{K'}\frac{G}{(1-2\nu)} \tag{36}$$

Por fim, a determinação das constantes a_j sendo $j = \{2,4,6\}$, se dá através da aplicação das condições de contorno restantes (equações 9, 10 e 11). As expressões gerais para o cálculo dos deslocamentos e excesso de poropressão induzidos por ondas progressivas e bidimensionais são:

$$u = \frac{ip_0}{2\lambda G}\left\{m\frac{-[1+2(1-\nu)\lambda"]+i(1-2\nu)\omega"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}exp(-\lambda z) - \left[1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right]\lambda z\,exp(-\lambda z) + \frac{m}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}exp(-\lambda' z)\right\}exp\,\psi \tag{37}$$

$$w = \frac{p_0}{2\lambda G}\left\{\left[1 + m\frac{1+(1-2\nu)(-\lambda"+i\omega")}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right]exp(-\lambda z) + \left[1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right]\lambda z\,exp(-\lambda z) - \frac{(1+\lambda")}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}exp(-\lambda' z)\right\}exp\,\psi \tag{38}$$

$$p = p_0\left\{\left[1 - \frac{im\omega"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right]exp(-\lambda z) + \frac{m\omega"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}exp(-\lambda' z)\right\}exp\,\psi \tag{39}$$

onde as constantes ω'' e λ'' são:

$$\omega'' = \beta\left(\frac{\omega'}{\lambda^2}\right) \tag{40}$$

$$\lambda'' = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} \tag{41}$$

As expressões para o cálculo das tensões efetivas podem ser obtidas substituindo as equações 37, 38 e 39 nas equações 6, 7 e 8:

$$\sigma_x{}' = p_0\left\{\left[m\frac{-[1+2(1-\nu)\lambda"]+i(1-2\nu)\omega"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"} - \frac{2m\nu}{1+m}\left(1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right)\right]exp(-\lambda z) + \left[1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right]\lambda z\,exp(-\lambda z) + \left[\left(\frac{-m}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right)\left(\frac{\lambda^2(1-\nu)-\nu\lambda'^2}{\lambda^2(1-2\nu)}\right)\right]exp(-\lambda' z)\right\}exp\,\psi \tag{42}$$

$$\sigma_z' = -p_0\left\{\left[m\frac{-[1+2(1-\nu)\lambda"]+i(1-2\nu)\omega"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"} + \frac{2m(1-\nu)}{1+m}\left(1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right)\right]exp(-\lambda z) + \left[1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right]\lambda z\,exp(-\lambda z) + \left[\left(\frac{-m}{-\lambda"+i(1+m)\omega"}\right)\left(\frac{\lambda^2\nu-(1-\nu)\lambda'^2}{\lambda^2(1-2\nu)}\right)\right]exp(-\lambda' z)\right\}exp\,\psi \tag{43}$$

$$
\tau_{xz} = -ip_0 \left\{ \left[m \frac{-[1+2(1-\nu)\lambda"]+i(1-2\nu)\omega"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"} - \frac{m(1-2\nu)}{1+m} \left(1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"} \right) \right] exp(-\lambda z) + \right.
$$
$$
\left. \left[1 - \frac{m\lambda"}{-\lambda"+i(1+m)\omega"} \right] \lambda z \, exp(-\lambda z) + \left[\frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{-m}{-\lambda"+i(1+m)\omega"} \right) \right] exp(-\lambda' z) \right\} exp\, \psi \tag{44}
$$

Vale ressaltar ainda que somente a parte real deve ser considerada como solução do problema nas equações 37, 38, 39, 42, 43 e 44. Da solução completa apresentada, a expressão que se refere ao excesso de poropressão (equação 39) será utilizada na seção 3 referentes a análise de sensibilidade do modelo adotado.

O fundo marinho real nas plataformas continentais é, geralmente, composto por várias camadas de solo com diferentes propriedades, onde estas variam de acordo com o aumento da distância da interface água-solo (Yamamoto, 1981). Um solo não homogêneo pode ser aproximado para um modelo de múltiplas camadas onde cada camada pode possuir diferentes parâmetros geotécnicos. A solução para este modelo é a extensão da solução analítica apresentada aqui acrescida de novas condições de contorno. Considerando a equação governante com anisotropia hidráulica apresentada por Madsen (1978), é possível também estender a solução para solos anisotrópicos.

2.5 – Validação por confronto com dados experimentais

Yamamoto et al. (1978) realizaram medições experimentais de poropressão em uma areia fina, a fim de validar a solução analítica desenvolvida. Os testes foram realizados em um tanque em laboratório, com espessura de água (h) igual a 0,9 m e espessura de solo (d) igual a 0,5 m. Foram medidos o excesso de poropressão em cinco profundidades diferentes. O período da onda T variou de 1 até 2,6 s.

Através do ajuste de curvas dos resultados experimentais realizados por Yamamoto et al. (1978), para diferentes períodos de onda, foram obtidos os valores de $\nu = 1/3$, $c = 0{,}02\, m^2/s$ e $m = 1$, além da estimativa do volume de ar contido nos poros (2%), resultando em um grau de saturação $S = 98\%$ (Yamamoto et al., 1978). Os demais parâmetros do solo foram estimados através das Eq. 3, 34 e 36: módulo de cisalhamento $G = 374{,}92\, kPa$, coeficiente de permeabilidade $k = 3{,}11 \cdot 10^{-4}\, m/s$ e porosidade $n = 0{,}4$. A comparação entre os dados experimentais e o modelo analítico pode ser observada na Figura 2. De acordo com a Figura 2, é possível observar visualmente que há uma razoável concordância entre os dados experimentais e as previsões do modelo analítico. As maiores diferenças são encontradas quando se consideram pequenos períodos de onda.

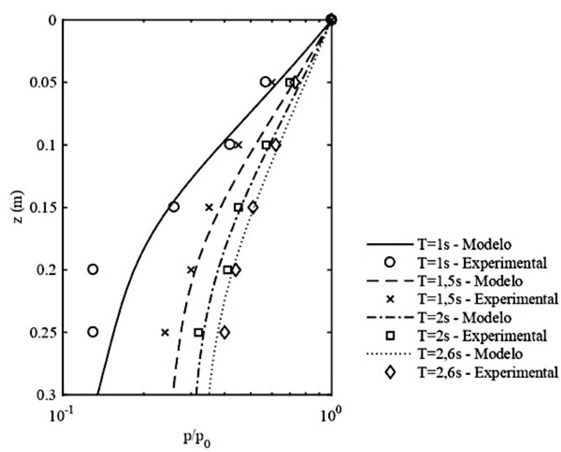

Fig. 2 – Comparação dos dados experimentais com o modelo analítico.

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 163 – março/marzo/march 2025 – pp. 09-30
https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

3 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

3.1 – Método de Taguchi para planejamento de experimentos

O planejamento fatorial completo é referido como a técnica de definição e investigação de todas as condições possíveis em um experimento, envolvendo múltiplos fatores, enquanto o planejamento fatorial fracionário investiga apenas uma fração de todas as combinações possíveis. Embora essas abordagens sejam amplamente utilizadas, elas têm certas limitações: são ineficientes no tempo e no custo quando o número de variáveis é grande, além de exigir tratamento matemático rigoroso no desenho do experimento e na análise dos resultados. Nesta abordagem, o mesmo experimento pode ter projetos diferentes e produzir resultados diferentes, além disso, a determinação da contribuição de cada fator não é permitida (Roy, 1990).

O método de Taguchi foi proposto para superar essas limitações, simplificando e padronizando o planejamento fatorial fracionário (Roy, 1990). A metodologia envolve a identificação de parâmetros controláveis e incontroláveis e o estabelecimento de uma série de experimentos para descobrir a combinação ideal dos parâmetros que tem maior influência no desempenho e a menor variação em relação ao objetivo do projeto. O método de Taguchi tem sido empregado, dentre outras aplicações, na retroanálise de parâmetros geotécnicos. Lafifi et al. (2019), por exemplo, utilizaram esse método para identificar a coesão e o ângulo de atrito com base no modelo de Mohr–Coulomb, realizando ensaios pressiométricos em solos argilosos sintéticos.

Matrizes ortogonais são frequentemente empregadas em planejamento de experimentos para estudar os efeitos dos parâmetros e seus níveis. Para construir uma matriz ortogonal, é necessário definir o número de fatores a ser estudado, nível de variação de cada fator e a interação entre os fatores, caso ela exista (Singh, 2012). Neste estudo, a análise será realizada a partir de todos os parâmetros de entrada no modelo de Yamamoto (1978), eles são: grau de saturação (S), porosidade (n), coeficiente de permeabilidade (k), módulo de cisalhamento (G) e coeficiente de Poisson (ν), com 4 níveis de cada um dos fatores. A matriz ortogonal escolhida para análise dos fatores é a L16, que permite a análise de 5 parâmetros e a definição de 4 níveis para cada parâmetro (Quadro 1). No contexto do método de Taguchi, um nível representa um valor ou uma condição específica atribuída a um parâmetro durante os experimentos.

Quadro 1 – Matriz ortogonal L16 de Taguchi.

Nº do experimento	**Parâmetro**				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

De acordo com o Quadro 1, foram calculados, através da equação 39, os excessos de poropressão para 16 diferentes combinações dos parâmetros.

Os níveis de cada um dos parâmetros foram estabelecidos com base nos valores apresentados por Yamamoto et al. (1978), e estão apresentados no Quadro 2. Os valores dos níveis foram definidos com base nos valores médios obtidos por Yamamoto et al. (1978), considerando a faixa de variação relevante para cada parâmetro em relação ao modelo analítico estudado. O Quadro 2 apresenta esses níveis e os valores associados a cada parâmetro.

Quadro 2 – Fatores e níveis adotados para a matriz ortogonal de Taguchi.

Parâmetro	**Nível 1**	**Nível 2**	**Nível 3**	**Nível 4**
S	0,97	0,98	0,99	1,00
n	0,3	0,4	0,5	0,6
k (m/s)	$2{,}1\times10^{-4}$	$3{,}1\times10^{-4}$	$4{,}1\times10^{-4}$	$5{,}1\times10^{-4}$
G (kPa)	200	300	400	500
ν	0,2	0,3	0,4	0,499

O erro entre o modelo analítico e os dados experimentais foi calculado através da seguinte função (Roy, 1990):

$$Erro = \sum_{j=1}^{n_0} \frac{\left| \frac{p_{experimental}}{p_0} - \frac{p_{modelo}}{p_0} \right|}{n_o} \tag{45}$$

onde n_o representa o número de pontos na curva, $\frac{p_{experimental}}{p_0}$ representa o excesso de poropressão adimensionalizado por p_0 medido e $\frac{p_{modelo}}{p_0}$ representa o excesso de poropressão calculado através da equação 39, também adimensionalizado pela amplitude máxima p_0. Desta forma, a função $Erro$ é adimensional.

No Quadro 3, são apresentados os fatores e seus níveis nos 16 experimentos da matriz ortogonal de Taguchi, além do erro entre os dados experimentais e o modelo analítico calculado através da equação 45, para períodos de onda de $T = 1$, 1,5, 2 e 2,6 s. A análise dos valores revela que o grau de saturação e o módulo de cisalhamento têm maior impacto na minimização do erro entre os dados experimentais e o modelo analítico, enquanto que a porosidade e a permeabilidade mostram influência menos significativa, conforme indicado por erros relativamente consistentes para diferentes níveis desses últimos parâmetros. Na Figura 3, estão a comparação entre os dados experimentais e todos os experimentos da matriz ortogonal de Taguchi para o período $T = 2\ s$.

3.2 – Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística padrão comumente usada para determinar a importância das variáveis independentes nas respostas de saída (Bouzid et al., 2014). A ANOVA tem por objetivo estimar a percentagem de contribuição de cada parâmetro em um conjunto de dados, assim como a eventual interação entre fatores.

Fazem parte da análise de variância grandezas como: a soma dos quadrados de cada fator, que pode ser calculada de acordo com a equação 46 (Roy, 1990):

$$SS_A = \left(\sum_{j=1}^{K_A} \frac{A_j^2}{n_{A_j}} \right) - \frac{R^2}{N} \tag{46}$$

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 163 – março/marzo/march 2025 – pp. 09-30
https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

onde K_A é o número de níveis do fator A, n_{A_j} é o número de experimentos do nível j do fator A, A_j é a soma de todos os experimentos do nível j do fator A, e R é a soma de todos os experimentos e N é o número de experimentos.

Quadro 3 – Resultado final da matriz de experimentos de Taguchi com o erro em cada experimento.

Exp.	S	n	k (m/s)	G (kPa)	ν	Erro			
						T = 1 s	T = 1,5 s	T = 2 s	T = 2,6 s
1	0,97	0,3	0,0002	200	0,20	0,1199	0,1855	0,1467	0,1341
2	0,97	0,4	0,0003	300	0,30	0,0456	0,0237	0,0363	0,0432
3	0,97	0,5	0,0004	400	0,40	0,1176	0,1277	0,1773	0,1830
4	0,97	0,6	0,0005	500	0,49	0,1523	0,1931	0,2662	0,2775
5	0,98	0,3	0,0003	400	0,49	0,1036	0,1476	0,1743	0,1712
6	0,98	0,4	0,0002	500	0,40	0,0877	0,0930	0,1379	0,1459
7	0,98	0,5	0,0005	200	0,30	0,0788	0,1356	0,1000	0,0943
8	0,98	0,6	0,0004	300	0,20	0,0551	0,0943	0,0550	0,0475
9	0,99	0,3	0,0004	500	0,30	0,1402	0,2147	0,1866	0,1841
10	0,99	0,4	0,0005	400	0,20	0,1558	0,2379	0,2107	0,2072
11	0,99	0,5	0,0002	300	0,49	0,1122	0,1644	0,2088	0,2069
12	0,99	0,6	0,0003	200	0,40	0,0640	0,1134	0,0758	0,0700
13	1	0,3	0,0005	300	0,40	0,2669	0,3745	0,3497	0,3418
14	1	0,4	0,0004	200	0,49	0,2670	0,3746	0,3497	0,3418
15	1	0,5	0,0003	500	0,20	0,2668	0,3745	0,3496	0,3417
16	1	0,6	0,0002	400	0,30	0,2668	0,3744	0,3496	0,3417

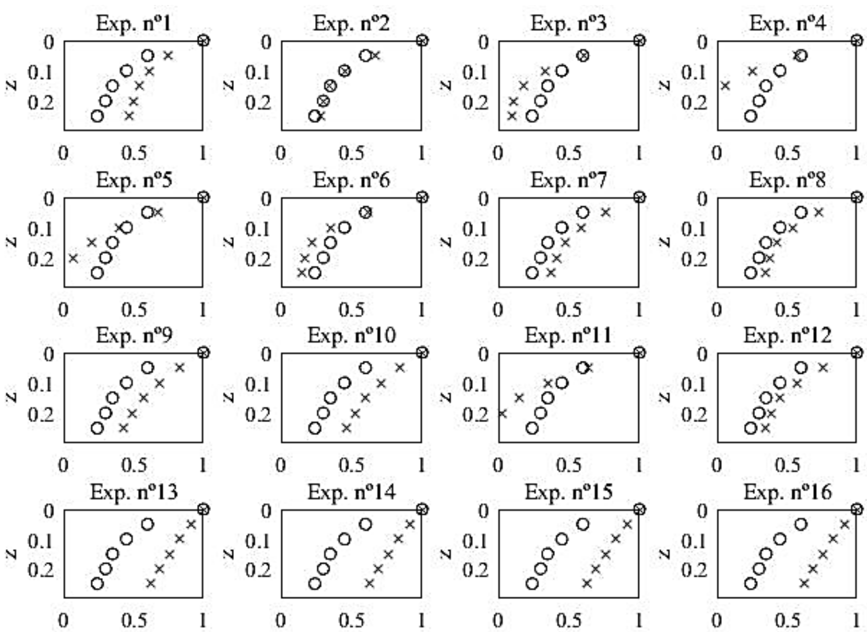

Fig. 3 – Excesso de poropressão adimensional (p/p_0): dados experimentais (o) comparados com o modelo analítico (x) para o período de onda T=2s.

A soma dos quadrados do erro pode ser calculada por:

$$SS_e = SS_R - (SS_A + SS_B + \cdots) \tag{47}$$

onde SS_R é soma dos quadrados total de todas as observações e é calculada pela seguinte equação:

$$SS_R = \sum_{j=1}^{N} y_j^2 - \frac{R^2}{N} \tag{48}$$

onde y_j é a observação de j.

O grau de liberdade (DOF_A) do parâmetro A é dado por:

$$DOF_A = K_A - 1 \tag{49}$$

A razão entre a soma dos quadrados e o grau de liberdade deste mesmo parâmetro é denominado de média quadrada:

$$MS_A = \frac{SS_A}{DOF_A} \tag{50}$$

O valor F, e a contribuição de cada um dos fatores podem ser calculados, respectivamente por:

$$F_A = \frac{MS_A}{MS_e} \tag{51}$$

$$P_A(\%) = \frac{SS_A}{SS_R} \times 100 \tag{52}$$

Os valores P são determinados utilizando a distribuição F (Montgomery, 2020). A análise de variância (ANOVA) dos períodos de onda analisados foram calculadas com o software Minitab 19.

No Quadro 4 são apresentados os resultados da análise de variância (ANOVA) para o período de onda $T = 1\ s$. A participação do grau de saturação (S) na solução do modelo foi de 54,4%, enquanto que o segundo fator mais relevante foi o módulo de cisalhamento (G) com 3,47%, seguido pelo coeficiente de permeabilidade (k) com 1,18%. A porosidade (n) e o coeficiente de Poisson (ν) apresentaram pouca relevância na contribuição do resultado do modelo.

No Quadro 5, a análise de variância para o período de onda $T = 1{,}5\ s$ mostrou um aumento na contribuição no grau de saturação do solo (S) com 63,12% enquanto a participação do módulo de cisalhamento (G) se reduziu a 1,16%.

No Quadro 6 está apresentada os resultados da análise de variância para o período de onda $T = 2\ s$. Dos resultados da contribuição de cada fator apresentado, é notável a grande influência do grau de saturação (S) com 45,65%, o módulo de cisalhamento (G) e o coeficiente de Poisson (ν) apresentaram considerável contribuição de 8,10% e 4,32%, respectivamente. A porosidade (n) e o coeficiente de permeabilidade (k) mostraram ser menos relevantes, porém, a interação entre a porosidade e o módulo de cisalhamento apresentou efeitos significantes, com 33,25% de contribuição.

A ANOVA do período de onda $T = 2{,}6\ s$ (Quadro 7) mostrou uma redução na participação do grau de saturação (42,06%) e o aumento da participação do módulo de cisalhamento (10,38%).

Quadro 4 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para T=1 s.

Fonte	DOF	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição
S	1	0,0522	0,0522	30,96	0,11	54,40%
n	1	0,0008	0,0008	0,49	0,61	0,87%
k	1	0,0011	0,0011	0,67	0,56	1,18%
G	1	0,0033	0,0033	1,97	0,39	3,47%
ν	1	0,0002	0,0002	0,10	0,80	0,18%
S*n	1	0,0006	0,0006	0,36	0,66	0,63%
S*k	1	0,0002	0,0002	0,10	0,81	0,17%
S*G	1	0,0003	0,0003	0,15	0,76	0,27%
n*k	1	0,0019	0,0019	1,11	0,48	1,95%
n*G	1	0,0308	0,0308	18,30	0,15	32,15%
n*ν	1	0,0000	0,0000	0,01	0,93	0,02%
k*G	1	0,0000	0,0000	0,03	0,90	0,04%
k*ν	1	0,0024	0,0024	1,43	0,44	2,51%
G*ν	1	0,0004	0,0004	0,23	0,72	0,40%
Erro	1	0,0017	0,0017	-	-	1,76%
Total	15	0,0959	0,0064	-	-	100,00%

Quadro 5 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para T=1,5 s.

Fonte	DOF	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição
S	1	0,1251	0,1251	27,01	0,12	63,12%
n	1	0,0017	0,0017	0,37	0,65	0,86%
k	1	0,0034	0,0034	0,74	0,55	1,73%
G	1	0,0023	0,0023	0,50	0,61	1,16%
ν	1	0,0001	0,0001	0,02	0,92	0,04%
S*n	1	0,0022	0,0022	0,47	0,62	1,11%
S*k	1	0,0010	0,0010	0,22	0,72	0,52%
S*G	1	0,0003	0,0003	0,05	0,85	0,13%
n*k	1	0,0069	0,0069	1,49	0,44	3,47%
n*G	1	0,0468	0,0468	10,10	0,19	23,61%
n*ν	1	0,0001	0,0001	0,02	0,90	0,05%
k*G	1	0,0002	0,0002	0,03	0,88	0,08%
k*ν	1	0,0035	0,0035	0,76	0,54	1,78%
G*ν	1	0,0000	0,0000	0,01	0,95	0,02%
Erro	1	0,0046	0,0046	-	-	2,34%
Total	15	0,1983	0,0132	-	-	100,00%

Quadro 6 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para T=2 s.

Fonte	DOF	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição
S	1	0,0801	0,0801	17,39	0,15	45,65%
n	1	0,0007	0,0007	0,14	0,77	0,38%
k	1	0,0018	0,0018	0,40	0,64	1,05%
G	1	0,0142	0,0142	3,09	0,33	8,10%
ν	1	0,0076	0,0076	1,65	0,42	4,32%
$S{*}n$	1	0,0012	0,0012	0,26	0,70	0,68%
$S{*}k$	1	0,0009	0,0009	0,20	0,73	0,52%
$S{*}G$	1	0,0000	0,0000	0,01	0,94	0,02%
$n{*}k$	1	0,0051	0,0051	1,11	0,48	2,91%
$n{*}G$	1	0,0583	0,0583	12,67	0,17	33,25%
$n{*}\nu$	1	0,0001	0,0001	0,02	0,90	0,06%
$k{*}G$	1	0,0000	0,0000	0,00	1,00	0,00%
$k{*}\nu$	1	0,0007	0,0007	0,15	0,77	0,38%
$G{*}\nu$	1	0,0001	0,0001	0,01	0,92	0,04%
Erro	1	0,0046	0,0046	-	-	2,63%
Total	15	0,1754	0,0117	-	-	100,00%

Quadro 7 – Resultado da análise de variância (ANOVA) para T=2,6 s.

Fonte	DOF	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição
S	1	0,0718	0,0718	18,86	0,14	42,06%
n	1	0,0005	0,0005	0,13	0,78	0,28%
k	1	0,0021	0,0021	0,54	0,60	1,21%
G	1	0,0177	0,0177	4,65	0,28	10,38%
ν	1	0,0096	0,0096	2,53	0,36	5,64%
$S{*}n$	1	0,0010	0,0010	0,27	0,70	0,60%
$S{*}k$	1	0,0007	0,0007	0,19	0,74	0,43%
$S{*}G$	1	0,0001	0,0001	0,02	0,91	0,04%
$n{*}k$	1	0,0043	0,0043	1,14	0,48	2,55%
$n{*}G$	1	0,0581	0,0581	15,25	0,16	34,02%
$n{*}\nu$	1	0,0002	0,0002	0,05	0,87	0,10%
$k{*}G$	1	0,0000	0,0000	0,01	0,95	0,02%
$k{*}\nu$	1	0,0006	0,0006	0,15	0,76	0,34%
$G{*}\nu$	1	0,0002	0,0002	0,05	0,87	0,10%
Erro	1	0,0038	0,0038	-	-	2,23%
Total	15	0,1707	0,0114	-	-	100,00%

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 163 – março/marzo/march 2025 – pp. 09-30
https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1

De acordo com os resultados apresentados nos Quadros 4, 5, 6 e 7, observa-se que o grau de saturação é o parâmetro com maior contribuição na resposta do modelo em todos os períodos de onda analisados, seguido pelo módulo de cisalhamento, no entanto, os demais parâmetros, como porosidade e permeabilidade, apresentam menor relevância nas respostas do modelo.

Na Figura 4 é apresentado o diagrama de efeitos principais para os quatro períodos de onda, no qual reforça a grande influência do grau de saturação seguido do módulo de cisalhamento, já que suas curvas apresentam grandes inclinações.

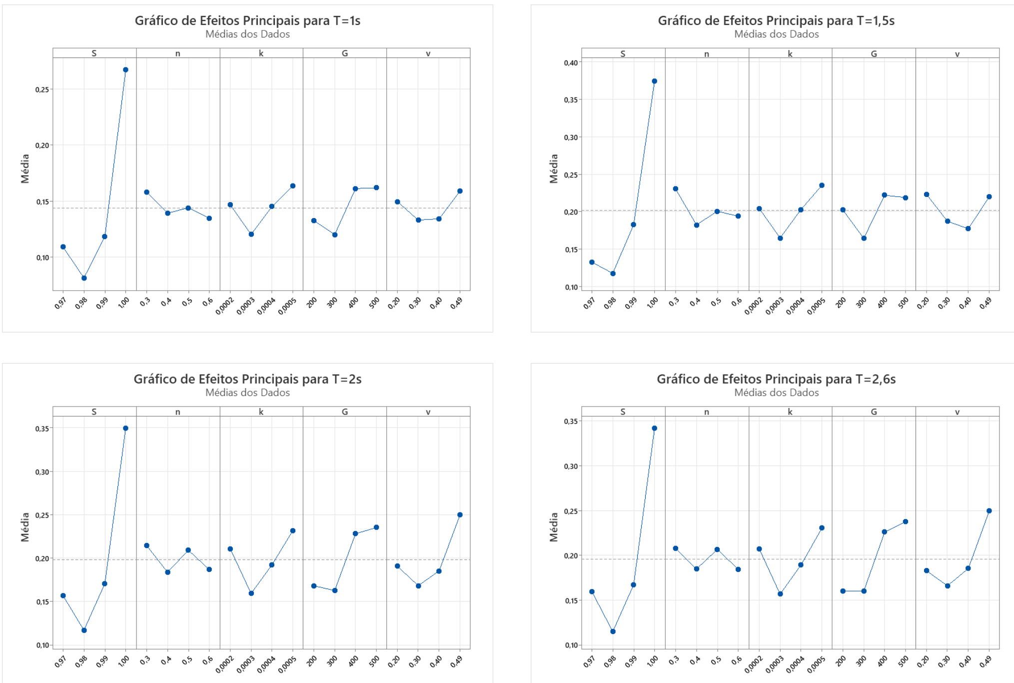

Fig. 4 – Efeitos principais para os quatro períodos de onda analisados.

3.3 – Equações de regressão

Através do modelo linear generalizado para todos os períodos de onda analisados, é obtido os coeficientes para a equação de regressão que estima o erro para a obtenção da otimização dos parâmetros. A equação 53 apresenta a equação de regressão para os períodos de onda analisados com os coeficientes disponíveis no Quadro 8.

$$Erro_T = Constante + Coef_S + Coef_n + Coef_k + Coef_G + Coef_v \quad (53)$$

3.4 – Otimização da resposta usando a abordagem da função desirability

O conceito de aproximação da função *desirability* foi introduzido inicialmente por Derringer e Suich (1980). Ele é baseado na transformação de todas as respostas obtidas de diferentes escalas de medida que varia entre 0 e 1. A *desirability* individual e composta avaliam quão bem uma combinação de variáveis satisfaz as metas definidas para as respostas. A *desirability* individual (d_j)

avalia como as definições otimizam uma resposta única já a *desirability* composta (DF) avalia como as definições otimizam um conjunto global de respostas.

Quadro 8 – Coeficientes da equação de regressão para os períodos analisados.

T		**1 s**	**1,5 s**	**2 s**	**2,6 s**
Constante		0,1438	0,2018	0,1984	0,1957
S	0,97	-0,0349	-0,0693	-0,0418	-0,0363
	0,98	-0,0625	-0,0842	-0,0816	-0,0810
	0,99	-0,0257	-0,0192	-0,0279	-0,0287
	1	0,1231	0,1727	0,1513	0,1460
n	0,3	0,0139	0,0288	0,0159	0,0121
	0,4	-0,0047	-0,0195	-0,0147	-0,0112
	0,5	0,0001	-0,0013	0,0105	0,0107
	0,6	-0,0092	-0,0080	-0,0117	-0,0116
k (m/s)	$2{,}1\times10^{-4}$	0,0029	0,0025	0,0124	0,0114
	$3{,}1\times10^{-4}$	-0,0238	-0,0370	-0,0394	-0,0392
	$4{,}1\times10^{-4}$	0,0012	0,0010	-0,0062	-0,0066
	$5{,}1\times10^{-4}$	0,0197	0,0335	0,0333	0,0345
G (kPa)	200	-0,0113	0,0005	-0,0303	-0,0357
	300	-0,0238	-0,0376	-0,0359	-0,0359
	400	0,0172	0,0201	0,0296	0,0300
	500	0,0198	0,0170	0,0367	0,0416
ν	0,2	0,0056	0,0212	-0,0079	-0,0131
	0,3	-0,0109	-0,0147	-0,0303	-0,0299
	0,4	-0,0097	-0,0247	-0,0132	-0,0106
	0,499	0,0150	0,0181	0,0514	0,0536

O processo de otimização é calculado através das seguintes equações (Hessainia et al., 2013):

$$DF = \left(\prod_{j=1}^{N} d_j^{w_j}\right)^{\frac{1}{\sum_{l-1}^{N} w_j}} \tag{54}$$

$$F(x) = -DF \tag{55}$$

onde $F(x)$ é a função objetiva, d_j é a *desirability* para a j^a resposta, w_j é importância da j^a resposta.

Se o objetivo é minimizar a função, as equações utilizadas são as seguintes:

$$d_j = 1 \quad \text{se } Y_j \ll Low_j \tag{56}$$

$$d_j = \left[\frac{High_j - Y_j}{High_j - Low_j}\right] \quad \text{se } Low_j \ll Y_j \ll High_j \tag{57}$$

$$d_j = 0 \quad \text{se } Y_j \gg Low_j \tag{58}$$

ISSN 0379-9522; e-ISSN 2184-8394 – Geotecnia nº 163 – março/marzo/march 2025 – pp. 09-30
https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

Para maximizar a resposta, emprega-se as seguintes equações:

$$d_j = 0 \quad \text{se } Y_j \ll Low_j \tag{59}$$

$$d_j = \left[\frac{Y_j - Low_j}{High_j - Low_j}\right] \quad \text{se } Low_j \ll Y_j \ll High_j \tag{60}$$

$$d_j = 1 \quad \text{se } Y_j \gg High_j \tag{61}$$

Para valores alvo:

$$d_j = 0 \quad \text{se } Y_j \ll Low_j \tag{62}$$

$$d_j = \left[\frac{Y_j - Low_j}{High_j - Low_j}\right] \quad \text{se } Low_j \ll Y_j \ll T_j \tag{63}$$

$$d_j = \left[\frac{Y_j - High_j}{T_j - High_j}\right] \quad \text{se } T_j \ll Y_j \ll High_j \tag{64}$$

$$d_j = 1 \quad \text{se } T_j \gg High_j \tag{65}$$

onde Y_j é o resultado obtido na jª resposta durante o processo de otimização, T_j é o valor alvo, Low_j é o valor mínimo dos dados para jª e $High_j$ é o seu valor máximo.

O processo de otimização, assim como a análise de variância, foi obtido através do software Minitab 19.

No Quadro 9 está resumida a otimização para os períodos de onda definidos. Os valores foram obtidos através do processo de otimização apresentado na Figura 5. Os parâmetros otimizados apresentaram valores muito próximos aos determinados experimentalmente por Yamamoto et al. (1978), além dos erros serem consideravelmente menores do que os determinados na matriz ortogonal de Taguchi para todos os períodos de onda analisados.

Quadro 9 – Resposta da otimização para os quatro períodos de onda analisados.

Fatores otimizados					**Erro**				***Desirability***
S	n	k **(m/s)**	G **(kPa)**	ν	**T=1 s**	**T=1.5 s**	**T=2 s**	**T=2.6 s**	
0,98	0,6	$3{,}1\times10^{-4}$	300	0,4	0,0148	0,0104	0,0165	0,0175	1,0

3.5 – Teste de confirmação dos fatores otimizados

A partir dos valores otimizados, pode-se verificar o excesso de poropressão através do modelo analítico de Yamamoto et al. (1978). Na Figura 6 encontram-se as poropressões geradas com o modelo analítico aplicando-se os parâmetros otimizados, bem como as poropressões medidas no modelo experimental de Yamamoto et al. (1978), para os períodos de onda $T = 1, 1.5, 2, 2.6\ s$. Os valores mostrados apresentam erros muito pequenos, demonstrando que os parâmetros foram otimizados satisfatoriamente.

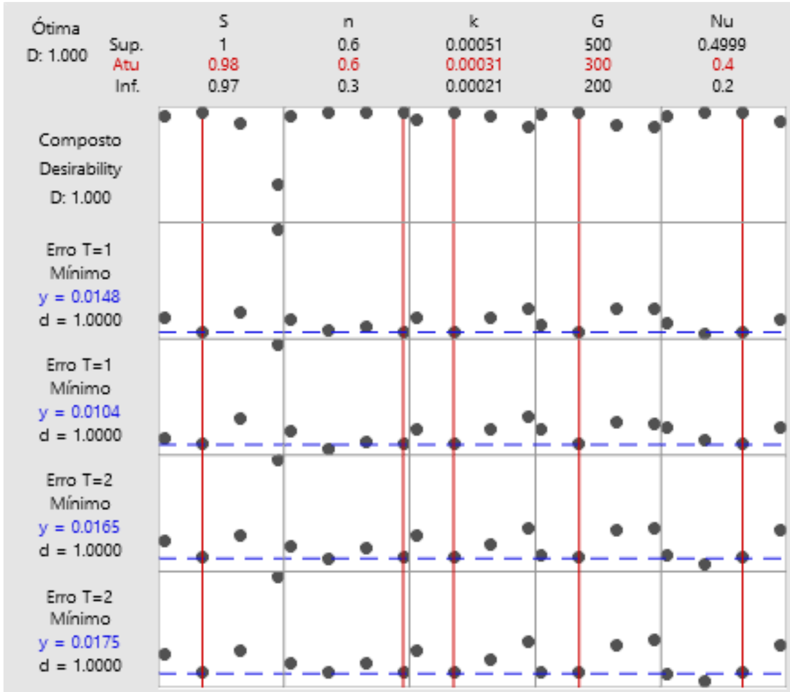

Fig. 5 – Otimização da resposta para os quatro períodos de onda analisados

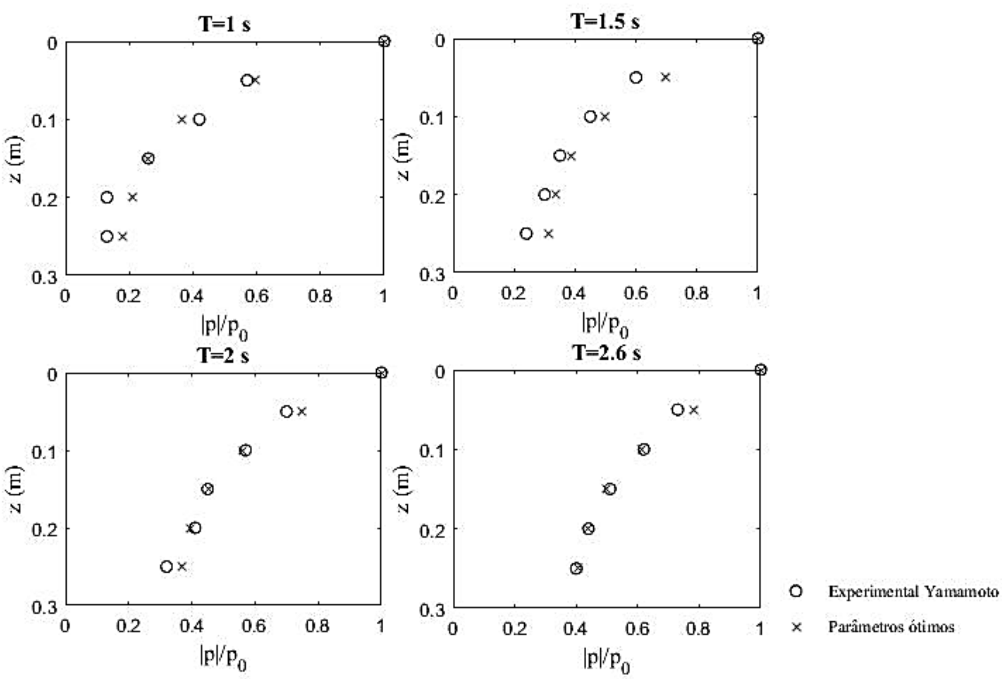

Fig. 6 – Teste de confirmação para os valores otimizados.

https://doi.org/10.14195/2184-8394_163_1 – © 2025 Sociedade Portuguesa de Geotecnia

4 – CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo são:

- A combinação dos fatores no método da matriz ortogonal de Taguchi é útil para a avaliação dos parâmetros do modelo analítico de Yamamoto et al. (1978). O modelo matemático da resposta é previsto com o número mínimo de experimentos.
- Da análise de variância, em todos os períodos de onda, o parâmetro grau de saturação apresentou ser mais relevante na resposta do modelo, seguido do módulo de cisalhamento. O coeficiente de Poisson apresentou considerável contribuição enquanto a porosidade e a permeabilidade mostraram-se menos relevantes.
- A ANOVA para os quatro períodos de onda analisado demonstrou que há uma tendência de diminuição da participação do parâmetro saturação do solo na solução do modelo analítico com o aumento do período de onda, enquanto os parâmetros módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson apresentaram tendência de aumento na participação com o aumento do período de onda.
- O processo de otimização conduziu a parâmetros ótimos próximos daqueles reportados para o modelo experimental de Yamamoto et al. (1978), o que valida o processo de otimização como ferramenta de retroanálise de parâmetros.
- O estudo da sensibilidade dos parâmetros do modelo analítico revelou que os fatores mais relevantes devem receber maior atenção na determinação experimental de seus valores, enquanto os fatores menos significativos podem ser estimados de forma aproximada, sem prejuízo nos resultados. Essa abordagem otimiza recursos experimentais e garante maior precisão no uso prático do modelo.

5 – LISTA DE SÍMBOLOS

a_n, b_n e c_n com $n = \{1,2,3,4,5,6\}$: Coeficientes definidos nas equações 21, 22 e 23, respectivamente

$D = \frac{d}{dz}$: Operador derivada em relação a z

d_j: *Desirability* individual

DF: *Desirability* composta

DOF_A: Graus de liberdade

ε: Deformação específica do meio poroso

F_A: Valor F de A

G: Módulo de cisalhamento

γ: Peso específico da água

h: Espessura da lâmina de água

k: Coeficiente de permeabilidade

K': Módulo de compressibilidade aparente

K: Módulo de compressibilidade real

K_A: Número de níveis do fator A

L: Comprimento de onda

$\lambda = \frac{2\pi}{L}$: Número de onda

λ': Número de onda modificado

MS_A: Média quadrada

N: Número de experimentos

n: Porosidade do solo

n_{A_j} Número de experimentos do nível j do fator A

n_o: Número de pontos das curvas definido pela equação 45

ν: Coeficiente de Poisson
p: Excesso de poropressão
$p_{experimental}$ e p_{modelo}: Excesso de poropressão experimental e modelado, respectivamente
P_A: Valor P de A
p_0: Pressão máxima exercida pela onda no fundo marinho
σ'_x, σ'_z e τ_{xz} : Tensões efetivas horizontal, vertical e cisalhante, respectivamente
R: Soma de todos os experimentos
S: Grau de saturação do solo
SS_A: Soma dos quadrados dos fatores
SS_e: Soma dos quadrados dos erros
SS_R: Soma dos quadrados de todas as observações
T: Período de onda
u, w: Deslocamentos horizontal e vertical, respectivamente
w_j: Importância da jª resposta
$\psi = i(\lambda x + \omega t)$: Função de fase da onda
$\omega = \frac{2\pi}{T}$: Frequência angular
ω', c, β e m: Parâmetros definidos pelas equações 33, 34, 35 e 36, respectivamente
ω'' e λ'': Parâmetros definidos pelas equações 40 e 41

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Biot, M. A. (1941). *General theory of three-dimensional consolidation.* Journal of Applied Physics 12, p. 155. https://doi.org/10.1063/1.1712886

Bouzid, L.; Boutabba, S.; Yallese, M.A.; Belhadi, S.; Girardin, F. (2014). *Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 74, pp. 879–891. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6043-9

Christian, J. T.; Taylor, P. K.; Yen, J. K. C.; Erali, D. R. (1974) (1 de janeiro). *Large diameter underwater pipeline for nuclear power plant designed against soil liquefaction*. Offshore Technology Conference.

Derringer, G.; Suich, R. (1980). *Simultaneous optimization of several response variables*. Journal of Quality Technology 12, pp. 214–219. https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968

Fu. C.; Wang, J.; Zhao, T. (2024). *Experimental investigation of pore pressure on sandy seabed around submarine pipeline under irregular wave loading*. Sensors, 24(2), 704. https://doi.org/10.3390/s24020704

Hessainia, Z.; Belbah, A.; Yallese, M. A.; Mabrouki, T.; Rigal, J. F. (2013). *On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations*. Measurement 46(5), pp. 1671–1681. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.016

Jeng, D. S. (2013). *Porous models for wave-seabed interactions.* Springer.

Jeng, D. S.; Cha, D. H. (2003). *Effects of dynamic soil behavior and wave non-linearity on the wave-induced pore pressure and effective stresses in porous seabed*. Ocean Engineering, *30*(16), pp. 2065-2089. https://doi.org/10.1016/S0029-8018(03)00070-2

Jeng, D. S.; Lee, T. L. (2001). *Dynamic response of porous seabed to ocean waves*. Computers and Geotechnics, 28(2), pp. 99-128. https://doi.org/10.1038/s41598-023-45485-6

Jeng, D. S.; Lin, Y. S. (1999). *Pore pressures on a submarine pipeline in a cross anisotropic non-homogeneous seabed under wave loading*. Canadian Geotechnical Journal, 36(3), pp. 563–572. https://doi.org/10.1139/t99-005

Jeng, D. S.; Rahman, M. S. (2000). *Effective stresses in a porous seabed of finite thickness: Inertia effects*. Canadian Geotechnical Journal, 37(4), pp. 1388–1397. https://doi.org/10.1139/t00-063

Lafifi, B.; Rouaiguia, A.; Boumazza, N. (2019). *Optimization of geotechnical parameters using Taguchi's design of experiment (DOE), RSM and desirability function*. Innovative Infrastructure Solutions, 4(1), 35. https://doi.org/10.1007/s41062-019-0218-z

Lin, Z.; Pokrajac, D.; Guo, Y.; Jeng, D. S.; Tang, T.; Rey, N.; Zhang, J. (2017). *Investigation of nonlinear wave-induced seabed response around mono-pile foundation*. Coastal Engineering, 121, pp. 197-211. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.01.002

Madsen, O. S. (1978). *Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed*. Géotechnique 1978, 28:4, pp. 377-393. https://doi.org/10.1016/0029-8018(81)90002-0

Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.

Moshagen, H.; Torum, A. (1975). *Wave induced pressures in permeable seabeds*. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 101(1), pp. 49–57. https://doi.org/10.1061/AWHCAR.0000

Nakamura, H.; Onishi, R.; Minamide, H. (1973). *On the seepage in the seabed due to waves.* Proceedings of 20th Coastal Engineering Conference, J.S.C.E., pp. 421–428 (in Japanese, translated by Mr. Oh).

Quiuqui, J. P. C.; Tamayo, J. P.; Maghous, S. (2022). *Closed-form solutions for wave-induced poroelastic response in seabed under dynamic and quasi-static regimes*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 44(1), 16. https://doi.org/10.1007/s40430-021-03300-1

Roy, R. K., (1990). *A primer on the Taguchi method*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Sassa, S.; Sekiguchi, H. (2001). *Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds*. Géotechique, 51 (2), pp. 115–126. https://doi.org/10.3208/sandf1972.24.3_85

Sassa, S.; Sekiguchi, H.; Miyamamoto, J. (2001). *Analysis of progressive liquefaction as moving-boundary problem*. Géotechique, 51(10), pp. 847–857. https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.10.847

Sui, T.; Zhang, C.; Jeng, D. S.; Guo, Y.; Zheng, J.; Zhang, W.; Shi, J. (2019). *Wave-induced seabed residual response and liquefaction around a mono-pile foundation with various embedded depth*. Ocean Engineering, 173, pp. 157-173. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.055

Singh, H. (2012). *Taguchi optimization of process parameters: a review and case study*. Int J Adv Eng Res Stud 1, pp. 39-41.

Verruijt, A. (1969). *Elastic storage of aquifers*. In *Flow Through Porous Media* (ed. R. J. M. DeWiest), Chap. 8. Academic Press.

Yamamoto, T.; Koning, H.; Sellmeijer, H.; Hijum, E. (1978). *On the response of a poro-elastic bed to water waves*. Journal of Fluid Mechanics, 87(1). https://doi.org/10.1017/S0022112078003006

Yang, S.; Kim, N. (2014). *Developing characteristics of standing wave-induced residual excess pore water pressure in the seabed.* KSCE Journal of Civil Engineering, 18(7), pp. 2019-2027. https://doi.org/10.1007/s12205-014-0506-2

Zhao, K.; Wang, Q.; Chen, S.; Zhuang, H.; Chen, G. (2021). *Dynamic response of pipelines in liquefiable seabed under nature loadings: Waves and currents*. Ocean Engineering, 230, 109051. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109051

Zienkiewicz, O. C.; Chang, C. T.; Bettess, P. (1980). *Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils*. Géotechnique, 30(4), pp. 385–395. https://doi.org/10.1680/geot.1980.30.4.385