

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE NUMÉRICA DO JATEAMENTO DE UM SOLO COM INTERCALAÇÕES DE CAMADAS DE ARGILA PARA O ASSENTAMENTO DE UM REVESTIMENTO CONDUTOR

AUTORES:

Raniel Deivisson de Alcantara Albuquerque, Christiano Augusto Ferrario Várady Filho, José Luís Gomes Marinho, João Paulo Lima Santos, Rafael Dias, Fábio Sawada Cutrim

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Computação Científica e Visualização – LCCV, Centro de Tecnologia - CTEC, Universidade Federal de Alagoas – UFAL.

ANÁLISE NUMÉRICA DO JATEAMENTO DE UM SOLO COM INTERCALAÇÕES DE CAMADAS DE ARGILA PARA O ASSENTAMENTO DE UM REVESTIMENTO CONDUTOR

Abstract

In early stage of well setting, structural stability is essential because the good execution of this stage will contribute the exploration success. And, at this stage of the project, the correct settlement of the conductor casing is extremely important for its poor performance may cause excessive wear of drilling equipment or lead to the loss of the well. Moreover, conductor casing settlement can be performed in several ways: through pre-drilling, hammer driving or torpedo base, as well as by jetting the soil. Among these techniques, jetting has several advantages and one of the main benefits is greater control of the cavity dimensions. Its main challenge is the difficulty in predicting the soil state after the drilling, since its use causes disturbances, hindering the prediction of the soil's bearing capacity. Thus, we use FEA software and literature data in order to improve the knowledge about the jetting procedure. The present work models the interactions between the fluid jet and a clayey soil. The soil modeling was performed using Mohr-Coulomb's constitutive model. Case studies of the clay layers influence on jetting were carried out by analyzing fluid pressure, velocities profiles, stress distribution and soil deformations. We observed that with increasing layers, the stress distribution over the soil becomes non-uniform. We noted that in a single layer case, the stress bulb presented an elliptical shape with a higher eccentricity, while with the layers increase, the bulb shape has become more irregular.

Introdução

A perfuração de poços em águas profundas e ultra profundas apresenta diversos desafios de variadas origens, como as ações ambientais, grandes lâminas d'água além das propriedades do assoalho marinho. Na fase inicial da perfuração, as características do solo e a profundidade da lâmina d'água influenciarão diretamente na forma de realização do assentamento do revestimento condutor (ROCHA; AZEVEDO, 2009). O revestimento condutor é o primeiro revestimento assentado no poço. Este possui diversas funções e, dentre essas, destaca-se sua função estrutural de tal modo que esse é responsável por sustentar os demais revestimentos, garantindo estabilidade estrutural ao poço (HOSSAIN; AL-MAJED, 2015).

O assentamento do revestimento condutor pode ser realizado de diversas formas: perfuração tradicional seguida de cimentação, cravação por martelo, cravação por base torpedo e jateamento do solo. A técnica de jateamento consiste na perfuração do solo pelo impacto de um jato de fluido com descida simultânea do condutor (ROCHA; AZEVEDO, 2009).

O jateamento permite um maior controle do diâmetro e formato da cavidade perfurada, entretanto essa técnica gera perturbações na vizinhança da perfuração, o que pode ocasionar dificuldades na previsão da capacidade de carga do solo. O mal entendimento da distribuição das tensões no solo pode levar ao projeto de condutores com comprimentos inadequados ou a longos tempos de acomodação do revestimento (PRASERTAMPORN; CARIGALI; BHD, 2016).

Essa técnica possui grande utilização em águas profundas e ultra profundas, uma vez que o leito marinho é composto por sedimentos pouco consolidados e de baixa resistência estrutural, como as

argilas. Ademais, devido ao processo de formação do assoalho oceânico pela deposição de sedimentos em períodos distintos, intercalações de solos com diferentes propriedades podem ser formadas. Tais mudanças entre as intercalações solo podem dificultar a previsão das características da cavidade perfurada por jateamento, gerando arrombamentos ou diminuição do diâmetro da cavidade.

Dentre as abordagens para realização de estudos, a modelagem computacional apresenta diversas vantagens, permitindo a alteração de parâmetros com facilidade, melhor visualização dos resultados, menor custo comparado com testes experimentais, dentre outras (LAW; KELTON, 1991). Essa abordagem permite a análise de problemas complexos como os de *computational fluid dynamics* (CFD) – Fluidodinâmica computacional. Entretanto, devido a complexidade de alguns problemas, simplificações excessivas podem ser realizadas. Na simulação da interação fluido-solo, é comum representar o solo como um fluido não newtoniano com uma alta viscosidade.

Wang e Li (2014) avaliaram a influência da alteração das propriedades do jato no perfil de escavação do solo. O solo foi modelado como um fluido não newtoniano pelo modelo de Herschel-Bulkley. Os autores notaram que cavidades geradas sob maiores velocidades apresentarão profundidades maiores e diâmetros menores, bem como, o aumento da distância entre o orifício da broca ao solo gerará cavidades mais achatadas e rasas. Entretanto, a abordagem puramente fluidodinâmica dificulta a aplicação de parâmetros obtidos em ensaios de solos em simulações computacionais.

Nesse sentido, o presente estudo foi realizado para avaliar o efeito do jateamento em solos com intercalações de argila, realizando-se uma interação fluido-estrutura, com a representação do solo pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, por meio da análise de três estudos de caso, com diferentes intercalações de argila.

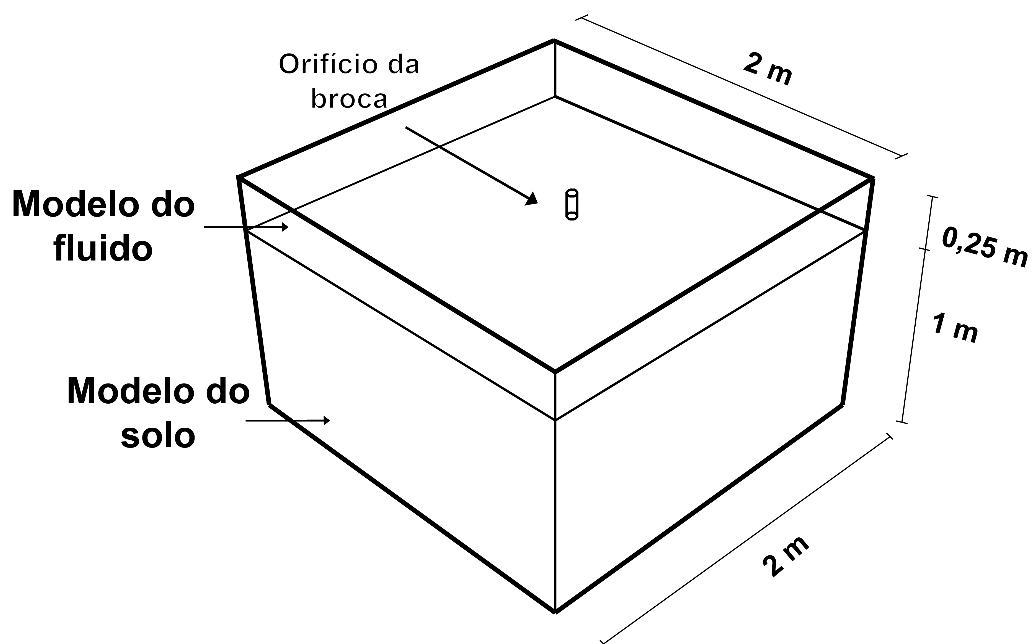
Metodologia

Para execução do presente trabalho, utilizou-se o aplicativo ABAQUS, versão 6.14 (ABAQUS, 2014). Esse *software* permite a modelagem de problemas complexos de engenharia, como a interação entre um fluido e uma estrutura. Essa abordagem é realizada por meio de uma co-simulação entre o ABAQUS/Standard e o ABAQUS/CFD. Foram elaborados dois modelos para descrever a operação de jateamento do solo. O ABAQUS/Standard analisa o modelo estrutural constituído pelo solo argiloso. Enquanto o modelo com a parcela fluida do sistema fluido é gerido pelo ABAQUS/CFD.

Na Figura 1, têm-se a geometria dos sistema fluido-solo. Ambos os modelos são hexaedros, separados por uma superfície de co-simulação. No domínio fluido, o orifício da broca está localizado no centro do modelo, possuindo 2 cm de diâmetro e está a uma distância de 20 cm do leito marinho.

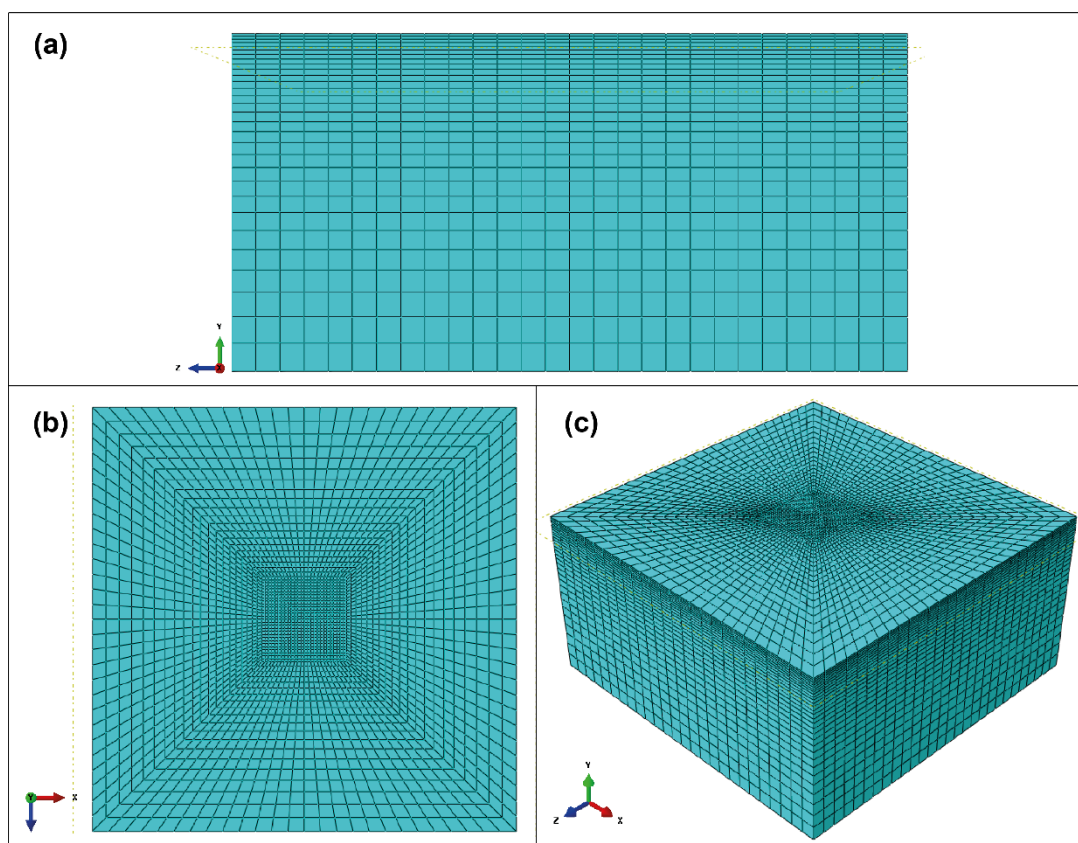
Para discretização do sistema, foram confeccionadas quatro malhas numéricas, uma para o domínio fluido, com 54.408 nós e 50.035 elemento, e três para o solo, com 91.233 nós e 86.640 elementos, do tipo C3D8R. Devido às partições realizadas no solo para a definição das camadas, cada estudo de caso contou com uma malha numérica distinta para o solo, enquanto a malha do domínio fluido foi replicada para todos os casos. Na Figura 2 têm-se uma das malhas do solo, que contou com uma maior discretização na região central da face superior do domínio, além de um aumento gradual na quantidade de elementos no topo do solo.

Figura 1 – Acoplamento entre os domínios do fluido e do solo.



Fonte: Autores (2019)

Figura 2 - Vista superior (a), lateral (b) e isométrica (c) da malha numérica do solo.



Fonte: Autores (2019)

As propriedades físicas dos solos utilizados estão presentes na Tabela 1. Para a modelagem da água, utilizou-se uma densidade de 1000 kg/m^3 e viscosidade dinâmica de $8,9 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$.

Tabela 1 – Propriedades das argilas.

	Peso específico – γ (KN/m ³)	Módulo de elasticidade – E (Pa)	Coeficiente de Poisson - ν	Ângulo de fricção – ϕ	Ângulo de atrito - τ
Argila 1	1,80	$20 \cdot 10^6$	0,49	30°	10°
Argila 2	6,8		0,33	23°	0°

Fonte: Long, Bredenberg et al. (2000), Yi *et al* (2012)

Para a modelagem matemática do problema, utilizou-se uma abordagem euleriana-lagrangiana, no regime transiente com um tempo de simulação de 5 segundos. A simulação foi realizada pelo método dos elementos finitos. Devido ao estudo tratar-se de uma interação fluido-estrutura, o esquema de acoplamento de Gauss-Seidel foi utilizado. Nesse, o sistema fluido gera um esforço sobre a estrutura, que recebe essa informação como uma condição de contorno, a estrutura sofre um deslocamento, gerando uma força sobre o fluido. Essa operação é realizada pelo ABAQUS/*Standard* e pelo ABAQUS/CFD. O *Standard* conduz a simulação, enquanto o CFD espera por uma resposta do outro módulo. Ao analisar o passo de tempo, ambos os módulos sugerem incrementos, de tal modo que o ABAQUS/CFD cumpre o maior passo de tempo (TRUONG-THI *et al.*, 2018).

O equilíbrio dinâmico da estrutura é descrito pela Equação 1, na qual M é a matriz de massa do sistema, $\mathbf{u}$ é o vetor deslocamento da estrutura, $\mathbf{P}(\mathbf{u})$ é a soma das forças externas agindo sobre a estrutura, incluindo os esforços ocasionados pelo fluido, C é a matriz de amortecimento e K é a matriz de rigidez da estrutura (CLOUGH; PENZIEN; GRIFFIN, 1977; TRUONG-THI *et al.*, 2018).

$$M \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \mathbf{P}(\mathbf{u}) - C \frac{d\mathbf{u}}{dt} - K\mathbf{u} \quad (1)$$

Para a modelagem do sistema fluido, o modelo de turbulência k- ϵ foi utilizado sob as seguintes considerações: o sistema é isotérmico sem transferência de massa e de momento e sem a ocorrência de reações químicas. Com isso, a equação de conservação de massa (Equação 2) foi utilizada, onde $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ representa a variação de massa no sistema com o tempo, e $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$ descrever os fluxos de entrada e saída no domínio (Dassault Systemes, 2010).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

A equação de Navier-Stokes (Equação 3) para fluidos compressíveis foi utilizada para descrever a conservação de quantidade de movimento. A parcela da direita agrupa as forças agindo sobre o sistema, como o diferencial de pressão do fluido (∇p), as forças de superfície ($\nabla(\nabla \cdot \mathbf{v})$) e a força volumétrica agindo sobre o fluido (Dassault Systemes, 2010).

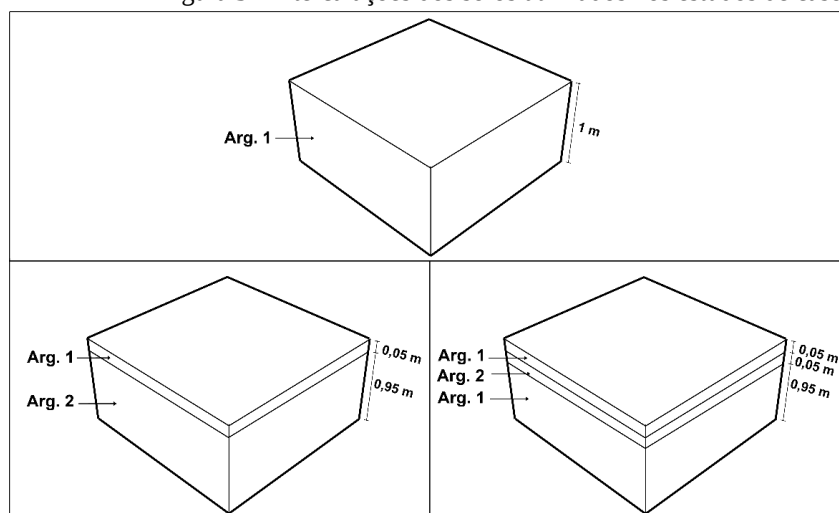
$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\mu}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{g} \quad (3)$$

O solo argiloso foi caracterizado pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, que é descrito pela Equação 4. Nessa, R_{MC} é a tensão deviatorica, q a tensão equivalente de Von Mises, p é a tensão de pressão equivalente, ϕ é o ângulo de atrito interno e c' é a coesão do solo (ABAQUS, 2014).

$$R_{mc} q - p \tan(\phi) - c' = 0 \quad (4)$$

Para analisar a influência das intercalações de argila nas tensões e deformações agindo sobre o solo, foram realizados três estudos de caso sob velocidade de jateamento de 2 m/s. Na Figura 3, têm-se as três configurações de solos modelados.

Figura 3 - Intercalações dos solos utilizados nos estudos de caso.



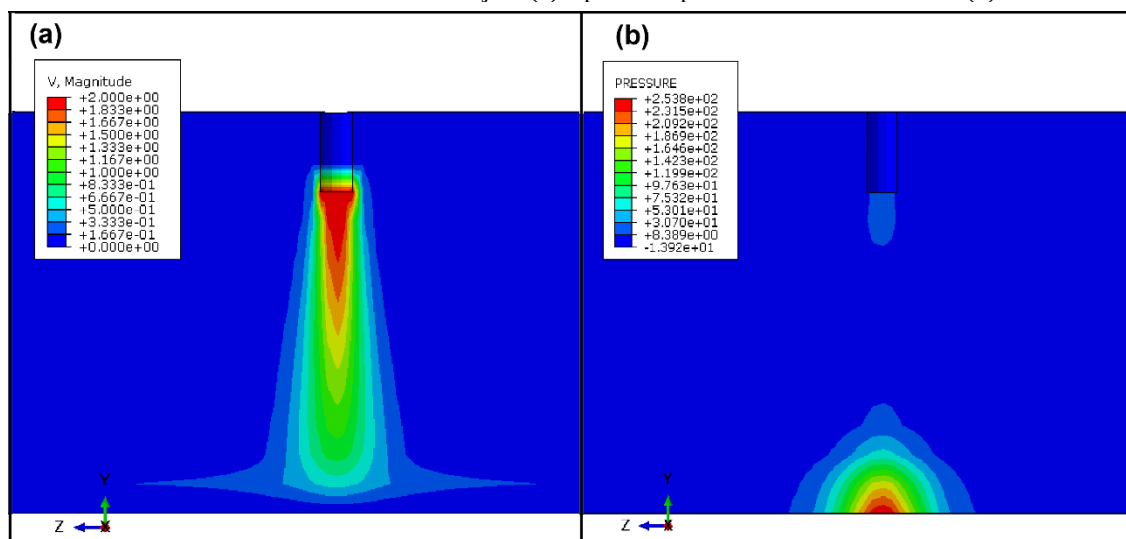
Fonte: Autores (2019)

As simulações realizadas no trabalho foram executadas numa máquina com processador Intel® Xeon® X5570, com 8 núcleos, 16 processadores e 32 GB de memória RAM, essas foram resolvidas paralelamente por 14 processadores.

Resultados e Discussão

As simulações realizadas para o desenvolvimento do estudo levaram em torno de 12 horas para serem concluídas e as respostas no domínio fluido e no solo, para os três casos, foram analisadas. Na Figura 4 (a), têm-se o perfil de velocidade do jato submerso, que apresentou o mesmo formato para os três casos. Na Figura 4 (b) pode-se observar a distribuição de pressões no domínio fluido. É importante salientar que para as três simulações as reações no domínio fluido foram similares.

4 – Perfil de velocidade do jato (a) e perfil de pressão no domínio fluido (b).



Fonte: Autores (2019)

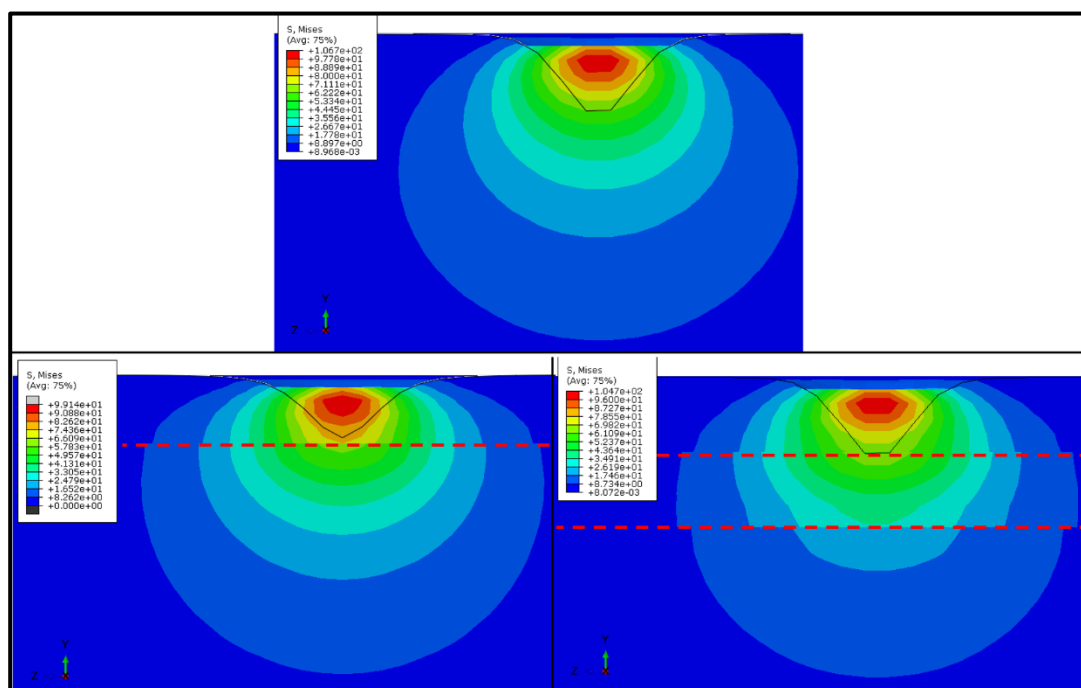
Conforme pode ser observado, a região central do jato possui uma velocidade maior que nas regiões mais periféricas, ocorrendo uma diminuição da velocidade à medida que o jato se aproxima do leito marinho. Ao se analisar a Figura 4 (b), conforme esperado, nota-se que as maiores pressões estão localizadas na região de interação entre o jato e o solo de tal modo que na linha central há uma maior

pressão, com uma redução gradual da pressão ao se aproximar das bordas. Essa distribuição de pressões se aproxima de um perfil parabólico, como pode ser observado na Figura 4 (b).

A análise combinada do perfil de velocidades e do perfil de pressão demonstra a ocorrência da perda de carga no fluxo do jato submerso, que é causado pelas interações desse com a água do mar. O comportamento aqui descrito para o jato, incluindo o formato do perfil de pressões, é coerente com a fluidodinâmica de jatos submersos, conforme descrito por Shen e Sun (1988).

Na Figura 5, têm-se a sobreposição das tensões agindo sobre o solo nos três casos, na configuração indeformada, plotada sobre a configuração deformada. Nessa, a região apresentada diz respeito a uma faixa da região superior do solo.

Figura 5 – Bulbos de tensões formados nos casos com uma camada, duas camadas e três camadas de argila, respectivamente.



Fonte: Autores (2019)

O bulbo formado no caso com uma única camada de argila apresentou um formato mais regular, elipsoidal. No caso com duas camadas de argila, o bulbo sofreu uma mudança de formato na intersecção entre as camadas, espalhando-se mais na horizontal na argila 2, e se estendendo menos na vertical, quando comparado com o bulbo formado no primeiro caso.

Devido a maior quantidade de camadas no terceiro caso, este apresentou uma distribuição de tensões mais complexa, ocorrendo uma redução das tensões na intersecção da segunda para a terceira camada. O comportamento de mudança no formato do bulbo, bem como na redução de tensões, vai ao encontro a aquele descrito por Takeste *et al.* (2009). Ademais, as deformações no primeiro e terceiro casos foram similares, havendo uma mudança no formato da cavidade e em sua profundidade no segundo caso, devido a maior resistência da camada mais inferior.

Conclusões

A partir do trabalho realizado, foi possível estudar qualitativamente o comportamento fluidodinâmico e mecânico do jateamento de um solo com intercalações de argilas. Notou-se que a

presença de intercalações de argilas torna a distribuição das tensões sobre o solo mais complexa, distanciando-se de um formato elíptico, conforme o bulbo observado no caso com uma única camada.

A previsão da capacidade de carga do solo, na fase de acomodação do revestimento condutor, pode ser dificultada pela presença de diferentes camadas. Assim, um melhor entendimento das tensões agindo sobre o solo permite a execução do assentamento do revestimento condutor com maior precisão e segurança. Entretanto, devido a escassez de trabalhos na literatura, não foi possível calibrar o modelo construído, sendo necessário a realização de estudos futuros para calibração do modelo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), e à Petrobras pelo suporte na realização desse trabalho.

Referências Bibliográficas

ABAQUS, V. 6.14 documentation. *Dassault Systemes Simulia Corporation*, v. 651, 2014.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J.; GRIFFIN, D. *Dynamics of structures*. [S.l.]: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 1977

Dassault Systemes. *Introduction to Abaqus/CFD*. 2010. 1-218 p.

HOSSAIN, M. E.; AL-MAJED, A. A. *Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

LAW, A.; KELTON, W. *Simulation Modeling and Analysis*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1991. (McGraw-Hill International Editions). ISBN 9780071008037.

PRASERTAMPORN, P.; CARIGALI, P.; BHD, S. IPTC-18738-MS Enhanced Deepwater Conductor Jetting Design for East Malaysia. n. November, p. 14–16, 2016.

ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. d. *Projetos de poços de petróleo: geopressões e assentamento de colunas de revestimentos*. Rio de Janeiro, RJ: Interciência:PETROBRAS, 2009. v. 511. ISBN 9788571932142.

SHEN, Z.; SUN, Q. Study of Pressure Attenuation of a Submerged, Nonfree Jet and a Method of Calculation for Bottomhole Hydraulic Parameters. *SPE Drilling Engineering*, v. 3, n. 01, p.69–76, 1988. ISSN 0885-9744.

TEKESTE, M. Z., TOLLNER E. W., RAPER, R. L., WAY, T. R., JOHNSON, C. E. *Non-linear finite element analysis of cone penetration in layered sandy loam soil – Considering precompression stress state*. *Journal of Terramechanics*, 46(5), 229–239, 2009.

TRUONG-THI, P. *et al.* Analysis of fluid–structures interaction problem of revetment slope thin-walled structure using abaqus. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, PartF3, p. 917–925, 2018. ISSN 21954364.

YI, J. *et al.* Eulerian finite element analysis of excess pore pressure generated by spudcan installation into soft clay. *Computers and Geotechnics*, v. 42, p. 157–170, 2012.

WANG, T.; LI, H. OTC-24937-MS Numerical Simulation of Jet Excavation in Conductor Jetting Operations. n. March, p. 25–28, 2014. ISSN 01603663.