

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Influência do Aquecimento Global em Projeto de Fundações

Lucas Marques Pires da Silva

Mestrando, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, lucas.silva@coc.ufrj.br

Gustavo Vaz de Mello Guimarães, D.Sc.

Docente, UFRJ, Macaé, Brasil, gvmg@poli.ufrj.br

Letícia Mendonça Cardoso

Discente, UFRJ, Macaé, Brasil, leticiamendoncac@gmail.com

RESUMO: Diversas obras existentes nas regiões litorâneas podem estar correndo riscos antes não considerados em seus projetos originais devido ao aumento do nível do mar associado ao aquecimento global. Para solos de comportamento drenado é possível, através de dados disponíveis de monitoramento no nível dos oceanos, verificar a influência da umidade na sucção do solo e empregar modelos simplificados de ascensão capilar obtendo, assim, a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb com ênfase na queda da resistência ao cisalhamento. Já para solos com comportamento não-drenado, utiliza-se a teoria dos estados críticos para verificar como a variação da umidade afeta sua resistência. Neste trabalho, com o caso analisado, verificou-se que as resistências tendem a reduzir com o aumento da posição do nível d'água.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecimento Global, Projeto de Fundações, Nível d'Água.

ABSTRACT: Several existing works in coastal regions may be running risks not considered before in their original projects due to the rise in sea levels associated with global warming. For soils with drained behavior, it is possible, through available monitoring data at ocean level, to verify the influence of moisture on soil suction and to employ simplified models of capillary rise, thus obtaining the Mohr-Coulomb resistance envelope with emphasis on drop in shear strength. As for soils with undrained behavior, the critical state theory is used to verify how moisture variation affects its resistance. In this work, with the case analyzed, it was found that the resistances tend to reduce with the increase of the water level position.

KEYWORDS: Global Warming, Foundation Design, Water Level.

1 Introdução

O aquecimento global é uma realidade que pode gerar diversos transtornos em diferentes esferas. Alguns desses problemas podem ocorrer a curto prazo, outros a médio prazo e também a longo prazo. O aumento do nível dos oceanos, possivelmente associado ao aquecimento global, é um fato que já vem sendo observado há décadas. Naturalmente, o nível d'água nas regiões litorâneas é diretamente afetado. Com as crescentes taxas de aquecimento global verificadas recentemente, e considerando que uma edificação tem uma vida útil de 50 anos a 100 anos, pode-se afirmar que, nesse intervalo de tempo, o nível d'água possivelmente irá aumentar. Como consequência, a sucção e o peso específico do solo serão reduzidos, alterando fatores de segurança e podendo trazer problemas de instabilidade em diversos tipos de estrutura, como, por exemplo, nas fundações.

Como as obras têm um prazo que seu desempenho deve atender requisitos impostos por normas (e.g.; NBR 6122/2019), é necessário que os projetos atuais contemplem essa elevação no nível d'água associado ao aquecimento global. Neste sentido, uma nova abordagem nos projetos de fundações (e em obras de geotecnia de uma forma em geral) em regiões litorâneas é fundamental para os anos vindouros.

O presente artigo tem como proposta a revisão bibliográfica necessária para entender conceitos de mecânica dos solos e geotecnia que envolvem a base dessa análise. Além disso, considerando que o aquecimento global é uma realidade e, cada vez mais, parece que existe a necessidade de se lidar com isso, deve-se acender “um alerta” sobre esse tema que, infelizmente, ainda é pouco abordado e, naturalmente, deveria ser objeto de mais estudos nos próximos anos.

2 Aquecimento Global



Observado ao longo dos anos, o aquecimento global é um fenômeno pelo qual nota-se o aumento das temperaturas médias dos oceanos e da atmosfera terrestre. Em decorrência desta alteração climática, a *“World Wildlife Fund”* atenta para um possível crescimento no número de eventos críticos, como secas ou tsunamis. Entretanto, outro acontecimento desperta grande preocupação dos pesquisadores atuais: a elevação do nível do mar, consequência do derretimento das calotas polares e da expansão térmica das moléculas de água, que ocorre a partir de 4°C. Este aumento do nível do mar, já caracterizado como um fato, pode ser responsável pelo desaparecimento de ilhas e cidades costeiras. Lima (2021) aponta que, no Brasil, até sete cidades poderiam ser inundadas, dentre elas, municípios populosos como Rio de Janeiro (RJ) e Fortaleza (CE). A figura 1(a) apresenta a proposta do impacto que seria gerado em Fortaleza (CE) considerando essa problemática. Entretanto, o país não é o único ameaçado. Estima-se que o acréscimo de 3°C na temperatura mundial seria capaz de submergir 50 cidades em todo o planeta, causando transtornos para até 10% da população global, sem mencionar os ecossistemas.

Este receio sobre o futuro das regiões litorâneas levou a equipe de mudança do nível do mar da *“National Aeronautics and Space Administration”* (NASA) a criar uma ferramenta, mostrada na figura 1(b), que fornece ao usuário uma estimativa do nível d’água para os próximos anos em qualquer lugar do mundo. Esta projeção é realizada fundamentando-se no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Assim, objetiva-se identificar o grau dos impactos gerados e as comunidades por eles afetadas, viabilizando a busca por recursos que mitiguem os problemas fomentados pelo aquecimento global.

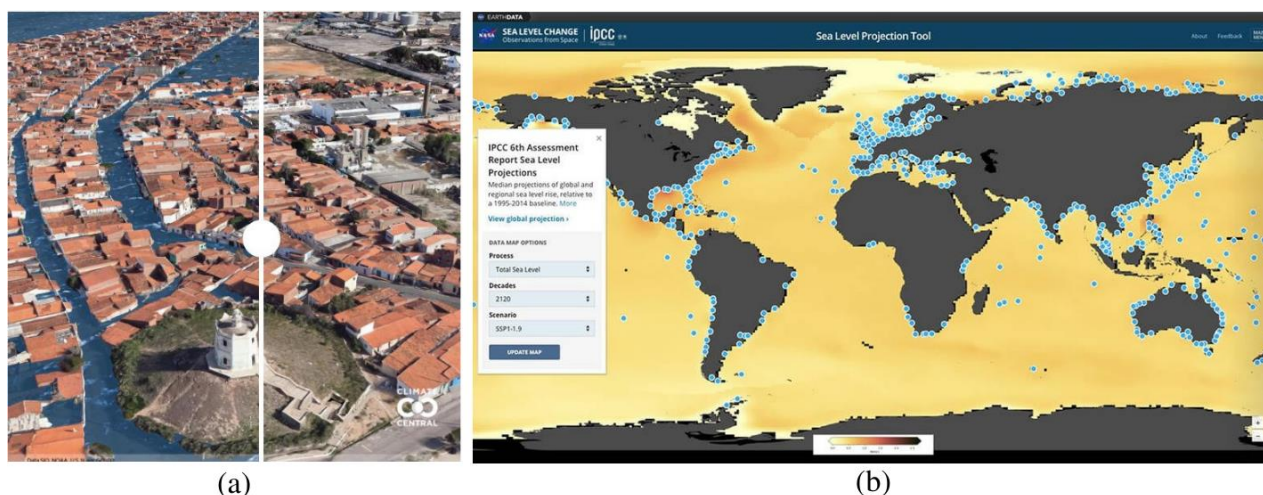


Figura 1 - (a) Prognóstico do impacto do aquecimento global em Fortaleza (CE). (Fonte: *Climate Central*) e (b) “Captura de tela” da Ferramenta de Projeção do Nível do Mar, da NASA. (Fonte: NASA)

2.1 Efeito da Temperatura versus Tempo

Uma comprovação simples, porém notória, do aquecimento global é a temperatura média dos oceanos e dos continentes. A *“National Oceanic and Atmospheric Administration”* (NOAA) observa as temperaturas médias terrestres desde 1880, combinando os números associados a variação dos níveis das águas e da atmosfera para a confecção da tendência, que está exposta na figura 2(a). As médias anuais são comparadas à registrada no século XX e as barras em azul indicam a dimensão do resfriamento, enquanto as barras em vermelho representam o aquecimento da terra para a mesma circunstância. Nota-se que, desde a década de 1980, as médias anuais globais superam a temperatura média do século XX. O mapa mundi da figura 2(b) apresenta as tendências da temperatura média para as regiões, por década, de 1990 a 2020. Os lugares em amarelo sinalizam baixa variabilidade, já os tons de laranja e vermelho representam aquecimento, e finalmente, tem-se em azul as zonas que arrefeceram-se. Essas tendências ilustram uma idéia sobre as regiões que serão (ou já são) mais afetadas pelo aquecimento global.



Figura 2 - (a) Variação da temperatura média anual global em relação à média do século XX. (Fonte: adaptado do NOAA) e (b) Tendências recentes de temperatura no mundo. (Fonte: adaptado do NOAA)

2.2 Efeito do Nível d'Água versus Tempo

Dados analisados pela NASA revelam que o aumento do nível do mar não tem comportamento linear. Observa-se que nas últimas décadas este aumento é mais rápido do que em três mil anos. Além disso, estima-se que houve uma elevação de 20 cm no período compreendido entre 1901 e 2018, sendo que 8 cm foram acrescidos em um período de 25 anos (1993-2018), como mostra o gráfico da figura 3(a). Este banco de informações viabilizou também a criação de modelos que projetam a alteração do nível do mar para o próximo século e, conforme exibido na figura 3(b), o crescimento tende a ser maior que um metro.

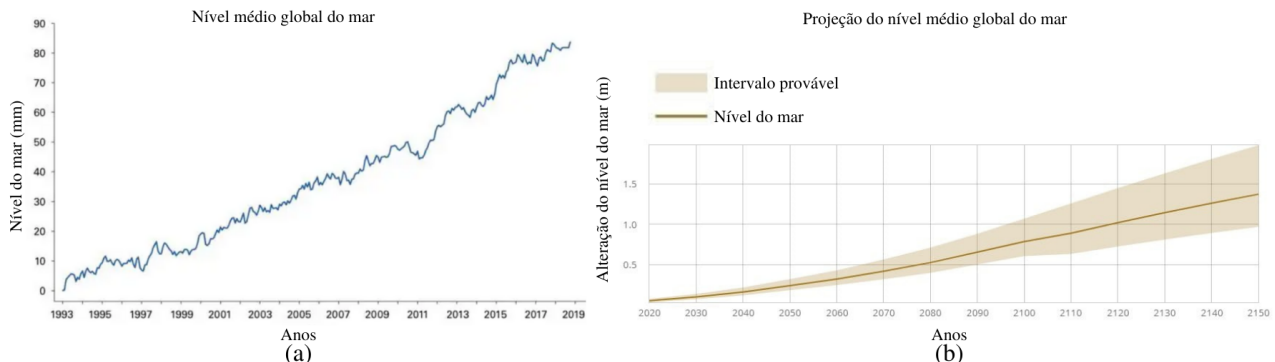


Figura 3 - (a) Aumento médio do nível global do mar nos últimos anos. (Fonte: adaptado da *World Meteorological Organization*) e (b) Projeção do aumento médio do nível global do mar para o próximo século. (Fonte: adaptado da NASA)

3 Influência do Nível d'Água na Resistência do Solo

Em solos com comportamento drenado, a resistência do solo pode ser interpretada à luz do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Este critério indica que a resistência ao cisalhamento do solo é função dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (ângulo de atrito e coesão) e da tensão efetiva normal ao plano de ruptura.

Com efeito, a engenharia de fundações, principalmente em zonas tropicais, corriqueiramente é obrigada a lidar com solos parcialmente saturados. Assim, é muito importante quantificar a resistência ao cisalhamento destes tipos de solo. Além disso, deve-se ser capaz de mensurar as variações dessas resistências associadas à alteração do nível de água. A equação 1 apresenta a resistência ao cisalhamento do solo considerando o estado de tensão variável proposta por Fredlund e Morgenstern (1977).



$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1)$$

onde,

- τ_{ff} - resistência ao cisalhamento;
- c' - intercepto de coesão;
- σ_f - tensão total;
- Φ' - ângulo de atrito efetivo do solo;
- Φ^b - ângulo de atrito considerando a sucção matricial;
- u_a - pressão nos poros do solo devido ao ar;
- u_w - pressão nos poros do solo devido a água.

A tensão efetiva normal ao plano de ruptura é afetada pela variação do peso específico e da poro-pressão de acordo com o princípio das tensões efetivas de Terzaghi. Cabe lembrar que este princípio básico da mecânica dos solos diz que a tensão transmitida para o arcabouço sólido do solo, em uma determinada direção, é a tensão total, naquela mesma direção, descontada da poro-pressão. A equação 2 apresenta o princípio das tensões efetivas de Terzaghi.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2)$$

onde,

- σ' - tensão efetiva;
- σ - tensão total;
- u - poro-pressão.

Para ilustrar a variação da tensão total associada ao processo de saturação devido ao aumento do nível do mar, toma-se como exemplo um caso comparando os pesos específicos seco e saturado de uma areia considerada perfeitamente esférica. Martins (2019) exemplifica que o índice de vazios de uma areia com estas características varia entre 0,35¹ e 0,61¹. Admite-se então, que a massa específica real do grão (G_s) desta areia é de 2,65¹. Obtém-se o peso específico da areia seca variando entre 13,8 kN/m³ a 19,6 kN/m³. Já o peso específico da areia saturada ficaria entre 18,6 kN/m³ e 22,2 kN/m³.

Pode-se considerar, de uma forma mais completa, que a coesão total é composta por três parcelas: coesão verdadeira, coesão aparente e intercepto de coesão. Assim, naturalmente, qualquer alteração em uma dessas três parcelas vai modificar a coesão total.

Cabe lembrar que a coesão verdadeira varia conforme o grau de intemperismo da rocha que gera um determinado tipo de solo. Por sua vez, o intercepto de coesão depende do estado de tensão a que está submetido aquela massa de solo. Já a coesão aparente varia conforme o grau de saturação do solo. Assim, fica claro que a coesão aparente é a parcela² mais sensível às variações do nível do mar, impactando diretamente no valor da coesão total.

Para ilustrar esse fenômeno apresenta-se na figura 4(a), para três tipos de solos (argila siltosa, silte arenoso e solo arenoso), que o aumento do teor de umidade (relacionado ao aumento do nível do mar) resulta na redução da sucção (proporcional a coesão aparente). Cabe destacar que a argila siltosa não apresentou uma variação significativa da sucção para a amplitude de variação do teor de umidade dos ensaios realizados.

A figura 4(b) mostra, a partir da envoltória de resistência ao cisalhamento, que quanto maior a sucção maior seria a coesão total, pois a parcela de coesão aparente também é maior neste caso. Nota-se que para o valor de sucção nulo, a coesão total é a menor de todas devido a inexistência da parcela de coesão aparente (solo seco ou completamente saturado).

¹ Grandeza adimensional.

² Embora com menor intensidade, ressalta-se que, a parcela do intercepto de coesão também poderia sofrer variações de acordo com o aumento dos níveis dos oceanos.

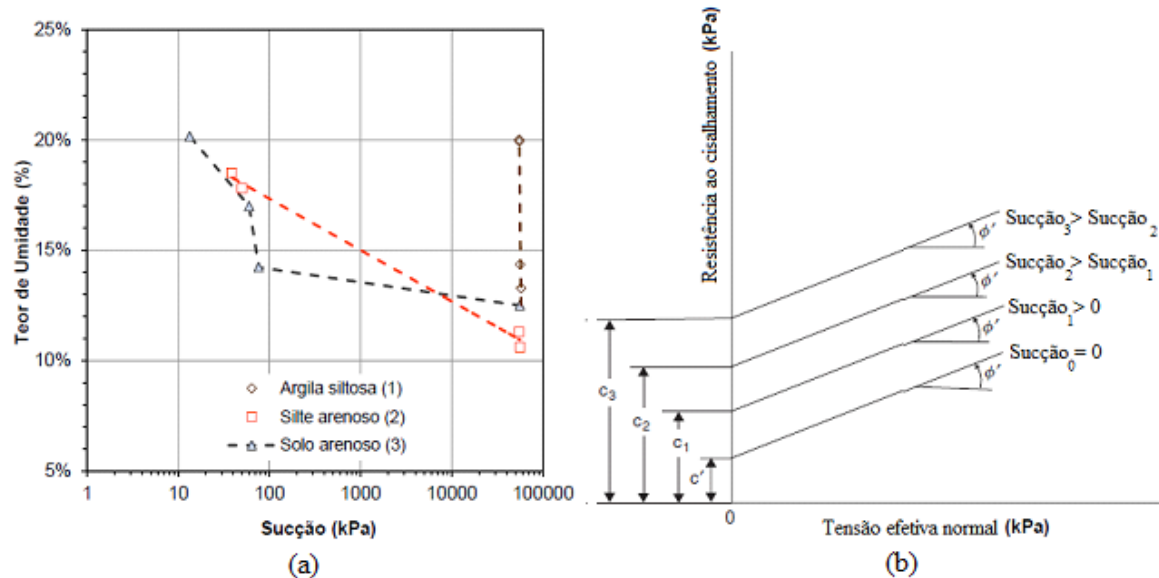


Figura 4 - (a) Aumento do teor de umidade e variação da sucção (adaptado do ANTT, 2017) e (b) Variação da sucção e da coesão total, representada nas envoltórias de resistência ao cisalhamento.

No caso dos solos com comportamento não-drenado a influência pode ser estudada à luz da teoria dos estados críticos onde a resistência não-drenada pode ser obtida através da equação 3.

$$s_u = 0,22 \cdot \sigma'_v \quad (3)$$

onde,

s_u - resistência não-drenada;
 σ'_v - tensão vertical efetiva.

Com efeito, a resistência não-drenada também é alterada devido a variação das tensões efetivas através da alteração de peso específico e poro-pressão das diversas camadas de solo.

4 Estudo de Caso

Com o objetivo de comparar a capacidade de carga à ruptura geotécnica de uma estaca hipotética, com 40 cm de diâmetro e 10 m de comprimento, utilizou-se um perfil típico da costa brasileira, apresentado por Barata e Danziger (1986). A figura 5(a) apresenta o perfil original de Barata e Danziger (1986), onde o nível d'água está a 3 metros de profundidade e foi arbitrada, no estudo de caso, como “condição 1”. Já a figura 5(b) apresenta o mesmo perfil com a adaptação da variação do nível de água, que nesta situação, denominada “condição 2”, está a 2 metros de profundidade. Cabe ressaltar que este aumento do nível do mar estaria associado ao aquecimento global em um período de 100 anos.

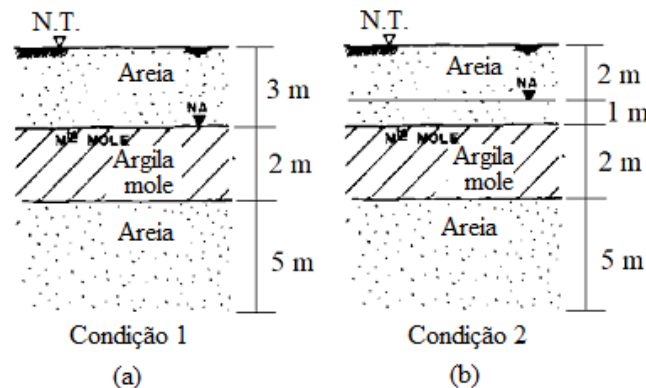


Figura 5 - (a) Perfil de solo para a condição 1 e (b) Perfil de solo para a condição 2. Ambos adaptados de Barata e Danziger (1986).

Na condição 1, nos 3 primeiros metros, a areia está completamente seca e o peso específico estimado foi de 17 kN/m^3 . O peso específico dos 2 metros de argila subsequentes foi estimado em 14 kN/m^3 . A última camada, com 5 metros de areia saturada, o peso específico estimado foi de 20 kN/m^3 . Já para a condição 2 valem as mesmas considerações, exceto para a camada superficial de areia que entre 2 m e 3 m de profundidade o peso específico estimado foi de 19 kN/m^3 . A figura 6(a) sintetiza as hipóteses dos pesos específicos adotados para as condições 1 e 2.

O ângulo de atrito, tanto para as condições 1 e 2, foi estimado em 30° para as camadas de areia e 0° (condição não-drenada) para a camada de argila. A figura 6(b) apresenta o perfil do ângulo de atrito em relação a profundidade.

Independente da condição, a coesão verdadeira foi estimada igual a zero para areias, no trecho de areia não saturada foi estimada coesão aparente igual a zero no nível do terreno e no nível d'água. Para ambas as condições 1 e 2, a coesão aparente é máxima no centro das respectivas camadas não saturadas, ou seja, no trecho de areia não-saturada a coesão total é diferente de zero e no trecho de areia saturada a coesão total vale zero. Já no trecho de argila, a resistência não-drenada foi estimada pela equação 3. Todas as considerações, sobre a coesão e a resistência não drenada em relação a profundidade, estão apresentadas na figura 6(c).

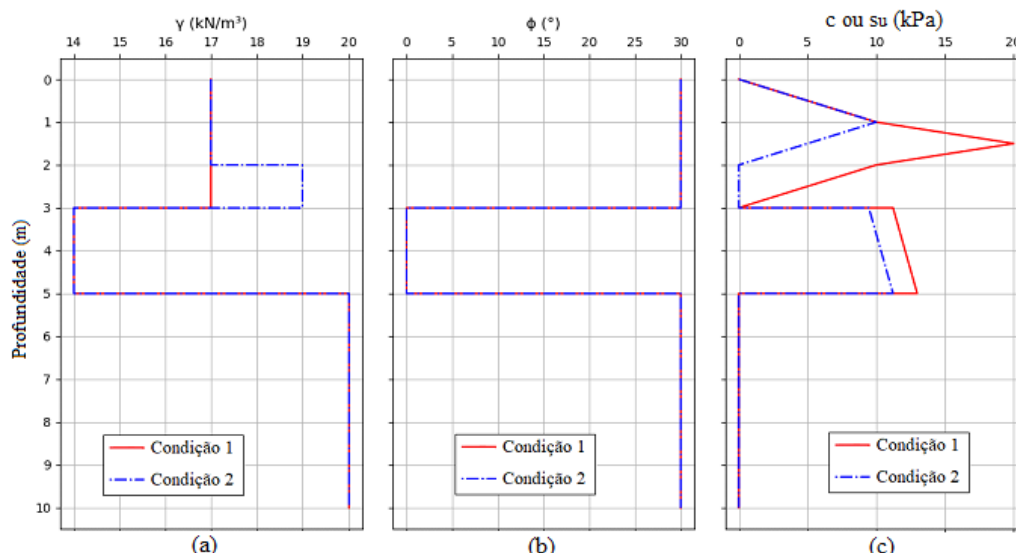


Figura 6 - (a) Pesos específicos versus profundidade para as condições 1 e 2, (b) Perfil do ângulo de atrito versus profundidade para as condições 1 e 2 e (c) Coesão ou resistência não-drenada versus profundidade para as condições 1 e 2.

A figura 7(a) apresenta o perfil da tensão total vertical em relação a profundidade, a figura 7(b) a poro-pressão em relação a profundidade, a figura 7(c) a tensão vertical efetiva em relação a profundidade, a figura



7(d) apresenta o coeficiente de empuxo no repouso (k_0^3) em relação a profundidade. A figura 7(e) apresenta a tensão horizontal efetiva em relação a profundidade e a figura 7(f) a resistência ao cisalhamento no plano vertical ao longo do perfil nas condições 1 e 2.

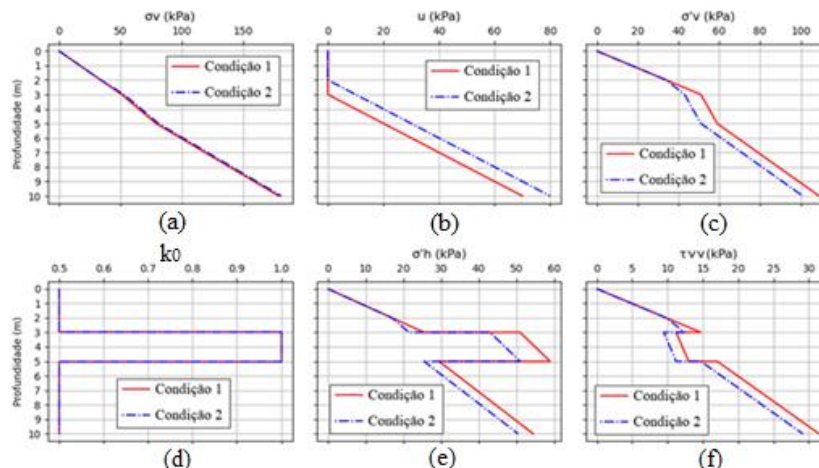


Figura 7 - (a) Tensão total vertical versus profundidade, 7(b) Poro-pressão versus profundidade, 7(c) Tensão vertical efetiva versus profundidade, 7(d) k_0 versus profundidade, 7(e) Tensão horizontal efetiva versus profundidade e 7(f) Resistência ao cisalhamento no plano vertical versus profundidade.

A partir dos resultados obtidos anteriormente e da geometria da fundação faz-se uma integral da resistência ao cisalhamento através do comprimento da estaca. Assim, a capacidade de carga à ruptura geotécnica do fuste da estaca, na condição 1, é de 242 kN e, na condição 2, é de 203 kN. Com efeito, observa-se uma redução de capacidade de carga geotécnica do fuste de 16%, associada simplesmente à elevação do nível d'água da condição 1 para a condição 2.

5 Considerações Finais

O aumento do nível do mar devido ao aquecimento global, ao longo dos anos, é uma questão que pode estar colocando a segurança adequada com relação à ruptura em risco de diversas fundações de obras no litoral que não contemplaram essa hipótese durante a concepção do projeto.

A partir de um estudo de caso, em um mesmo perfil de solo típico da costa brasileira composto por camadas de areia e argila, em que foi suposto duas condições distintas de nível de água – condição 1: nível d'água a 3 metros de profundidade e condição 2: nível d'água a 2 metros de profundidade –, que houve uma redução da capacidade de carga geotécnica do fuste de uma mesma estaca hipotética (40 cm de diâmetro e 10 m de comprimento) em 16%. Esse valor em termos de fator de segurança corresponderia a 0,16. Cabe lembrar que este aumento do nível d'água foi suposto para ocorrer naquele perfil devido ao aquecimento global em um período de cerca de um século.

Desta forma, ao dimensionar fundações para obras em regiões sujeitas ao aumento do nível do mar, como a extensa costa brasileira, com fatores de segurança à ruptura muito próximos a 2,0, corre-se o risco de não atender um dos requisitos básicos da NBR 6122/2019: a segurança adequada com relação a ruptura. Com efeito, muitas vezes os projetos geotécnicos de fundações profundas possuem fatores de segurança à ruptura próximos aos mínimos exigidos pela norma NBR 6122/2019, ou seja, 2,0.

³ Grandeza adimensional e, nestes casos, estimado como 0,5 no trecho de areia e 1 no trecho de argila



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6122. (2019) Projeto e execução de fundações. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, Brasil.
- ANTT. (2017) Sistema de Gerência Geológico-Geotécnico de Encostas e Taludes da Rodovia BR-116/RJ – km 2 ao km 144,5 FASE 3. Disponível em <<https://portal.antt.gov.br/relatorios-de-pesquisa-rdt>> Acessado em <21/12/2021>
- Barata, F.E. e Danziger, B. R. (1986) Compressibilidade de Argilas Sedimentares Marinhas Moles Brasileiras. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Porto Alegre, Brasil*, 99-112
- Bressan, D. (2021) Mapa online da Nasa mostra como o aumento do nível do mar impactará a humanidade. *Forbes*. Disponível em <<https://forbes.com.br/forbeseg/2021/08/mapa-online-da-nasa-mostra-como-o-aumento-do-nivel-do-mar-impactara-a-humanidade/>> Acesso em: 18 de dez. de 2021.
- Climate Central. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2021/10/14/regiao-do-farol-do-mucuripe-em-fortaleza-deve-inundar-com-aumento-da-temperatura-global-projeta-pesquisa-internacional-veja-video.ghtml>> Acesso em: 27/03/2022.
- Fredlund, D.G. e Morgenstern, N.R. (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, 447-446
- Lima, C. (2021). Sete cidades brasileiras podem sumir com o aquecimento global. *O Essencial*. Disponível em: <<https://www.diariodocentrodomundo.com.br/essencial/aquecimento-global-cidades-brasileiras/>> Acesso em: 18 de dez. de 2021.
- Lima, K. e Rignes, R. (2021) Ferramenta da Nasa mostra quanto o mar vai subir em qualquer lugar do mundo; saiba como usar. Disponível em: <<https://olhardigital.com.br/2021/08/09/ciencia-e-espaco/ferramenta-da-nasa-permite-ver-o-quanto-o-mar-vai-subir-em-qualquer-lugar-do-mundo/>> Acesso em: 18 de dez. de 2021.
- Lindsey, R.; Dahlman, L. (2021) Climate Change: Global Temperature. Disponível em <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>> Acesso em: 18 de dez. de 2021
- Martins, I.S. (2019) Notas de aula de mestrado UFRJ COPPE.
- NASA. Disponível em: <<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>> Acesso em: 27/03/2022.
- NOAA. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>> Acesso em: 27/03/2022.