

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES RASAS FRENTE À GÊNESE DE UM SINKHOLE

Rayane C. R. S Mattos

Nayara T. Belfort

Igor F. Gomes

rayane_crs@outlook.com

ntbelfort@gmail.com

gomes@ufpel.br

Universidade Federal de Pernambuco

Av. Professor Moraes Rego, 50670-901, Recife/PE, Brasil

Resumo. Sinkholes são depressões que ocorrem na superfície da Terra, devido ao colapso de uma cavidade subterrânea. Essas cavernas são comuns em ambientes cársticos os quais possuem um terreno propício à erosão e à lixiviação, podendo formar túneis e galerias no subsolo em função do processo de dissolução carbonática. Nesse sentido, cavernas instáveis podem se estabelecer abaixo de estruturas ou infraestruturas, o que pode causar perdas econômicas e gerar situações de risco para o ser humano, pois essas cavernas podem sofrer um colapso, gerando deformações da ordem de 5 cm/ano no entorno. Diante dessa motivação, o presente trabalho tem como objetivo apresentar a influência de uma construção com tensão vertical equivalente a 15 MPa em um ambiente cárstico a partir da modelagem numérica. No primeiro cenário a estrutura está representada por uma carga equivalente distribuída, simulando uma fundação em radier, e no segundo cenário a estrutura está representada por tensões equivalentes distribuídas em sapatas. Através dessa modelagem numérica, foi possível avaliar a influência do tipo de fundação no comportamento do terreno, que apresentou uma subsidência do terreno, aproximadamente, 3 vezes maior para o cenário das sapatas, 1.21 m, em comparação com o cenário com radier, 0.37 m. Além disso, foram observadas que zonas de cisalhamento próximo ao carste e à construção foram mais intensas no segundo cenário. Dessa maneira, esse trabalho alerta para a avaliação cuidadosa da estabilidade de cavernas em ambientes cársticos e da segurança das construções.

Palavras-chave: Sinkhole, Fundações rasas, Geomecânica, Modelagem numérica, Subsidência.

Abstract. Sinkholes are depressions on Earth's surface due to underground cavities collapse, and they are commonly found in karstic fields in which soil is susceptible to erosion and leaching, because, both erosion and leaching can create tunnels and galleries in carbonatic soil due to dissolution process. By this sense, unstable caves can be formed below structures or infrastructures, and it can cause economic losses and generate dangerous situations for human beings, as these caves can collapse, plus lead field deformations of about 5 cm/year. Following this motivation, the present work aims to present the influence of a construction with vertical stress equivalent to 15 MPa over a shallow foundation on a karstic field through numerical modeling. In the first scenario, the structure is represented by a distributed equivalent load, simulating a raft foundation, and in the second scenario, the structure is represented by equivalent load distributed by strip footings. By analyzing the numerical modeling, it was possible to evaluate the influence of both shallow foundations on the behavior of the field, which allowed to verify that on the surface the footing scenario presented subsidence higher than 1.21 meter, approximately 3 times the subsidence of the raft scenario, 0.37 m. It was also observed that shear zones near karst and construction were more intense in the second scenario. In this way, this work alerts to careful evaluation of cave stability and buildings safety in karstic environments.

Keywords: Sinkhole, Shallow foundation, Geomechanics, Numerical modeling, Subsidence.

1 Introdução

A presença de construções sobre feições cársticas no subsolo é um problema extremamente complexo e de alto risco para a vida humana. Nesse sentido diversos autores têm investigado o comportamento geomecânico dos solos e rochas na presença dessas estruturas cuja ocorrência tem sido observada em diversos países como Brasil [1], Itália [2], Estados Unidos [3], México [4], Iraque [5], entre outros.

Quanto maiores as cavidades nos subsolos, maiores os problemas geotécnicos, além de suas dimensões variarem com diversos parâmetros. No México, por exemplo, o aquífero da península do Yucatán, possui cerca de 165,000 km² incluindo o México, a Guatemala e Belize, sendo um dos maiores aquíferos cárstico do mundo [4].

Essas cavernas, quando localizadas próximas à superfície, podem ser nomeadas Sinkholes, caracterizadas pelo diâmetro e pela profundidade em torno de um até centenas de metros. Essas estruturas podem ser formadas em diversas localizações, mas quando surgem abaixo de fundações de construções elas podem não ser facilmente detectadas [2]. Ainda, essas cavidades podem representar possíveis riscos a fundações de edificações ao passo que as estruturas de sustentação do subsolo são reduzidas [5].

Nesse sentido, quando os sinkholes aparecem nas cidades, eles podem colapsar gerando grandes desastres [2], [6]–[8]. Dessa maneira, os impactos nas fundações devido a formação de sinkholes próximos à essas estruturas é extremamente importante no intuito de preservar as cidades e a vida dos seres humanos.

Assim, vários métodos de mapeamento de sinkhole vêm sendo estudados, sabendo-se que há uma prevalência em formas circulares na sua geometria [9]. Além disso, é importante realizar a investigação sobre a formação e evolução do sinkhole em modelos reduzidos, o que permite observar que antes do sinkhole colapsar existe um cone de depressão que se forma no lençol freático. Dessa maneira, sugere-se que esse cone que se forma no lençol freático pode ser utilizado como um potencial sinal para identificar a localização de sinkholes [10].

Não só através de estudos de campo e de laboratório, mas também através de simulações numéricas esse tema tem sido vastamente investigado por diversos autores [5], [11], [12]. Quando a presença de sinkhole é detectada no subsolo, abaixo de uma fundação rasa em radier, o comportamento desse tipo de fundação depende da estrutura presente no subsolo. Dessa maneira, diante da formação de um sinkhole, com diâmetros variados abaixo do centro de um radier é possível verificar que o máximo deslocamento e concentração de tensões se mostraram tanto maior no centro quanto maior for o sinkhole, enquanto que, sem a presença do sinkhole esses resultados são maiores quanto maior for a proximidade às bordas da fundação [5].

Seguindo esse motivador, esse trabalho tem como objetivo investigar numericamente o comportamento de dois tipos de fundação rasa, incluindo a influência da formação de um sinkhole abaixo da parte central da fundação. O sinkhole foi projetado com 5 metros de diâmetro para uma estrutura de formato irregular e a edificação foi projetada de maneira que representasse uma tensão vertical de 15 MPa.

2 Modelo Numérico

Nesse trabalho está apresentada uma investigação numérica da mecânica de um cenário de formação de um sinkhole. Para isso, foi utilizado um algoritmo de escavação para representar a gênese do sinkhole, cujo algoritmo foi validado por Mattos et al. (2019).

Para isso, foi utilizada uma ferramenta em elementos finitos, CODE-BRIGHT (COupled DEformation, BRIne, Gas and Heat Transport), que é uma ferramenta que permite representar o comportamento de solos e rochas em problemas térmico-hidro-mecânicos e químicos a partir de modelos constitutivos adequados a cada física envolvida (Olivella, 1995).

Dessa maneira, com o intuito de representar o comportamento elastoplástico do subsolo, diferentes modelos constitutivos têm sido construídos fundamentados nas observações em campo e em ensaios de

laboratório, um deles é o modelo de Drucker-Prager (LIU & CHEN., 2016; MAGALHÃES et al., 2018; PEREIRA et al., 2014), que foi utilizado no presente trabalho.

2.1 Modelo constitutivo de Drucker Prager

Segundo Souza Neto et al (2008), o modelo constitutivo apresentado por Drucker-Prager é uma suavização do modelo de Mohr-Coulomb, onde o parâmetro de ângulo de atrito é introduzido no comportamento do material de Von Mises.

Nesse modelo a plastificação tem início quando o invariante de tensão desviadora (J), e a tensão média (p) alcançam valores críticos que tocam a superfície de fluência (BESERRA, 2010), que tem sua função definida pela Eq. 40.

$$f(\sigma, h) = J + \eta p - \xi c' \quad (1)$$

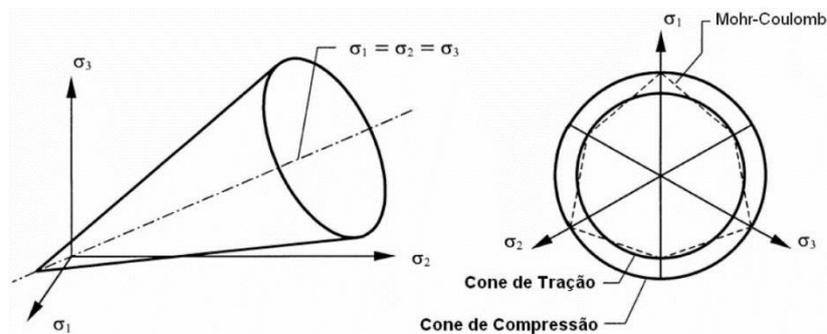
Sendo:

$$\eta(c, \varphi); \xi(c, \varphi) \quad (2)$$

Em que a coesão (c) e o ângulo de atrito (φ) são parâmetros do material.

A superfície de fluência (Figura 1) de Drucker-Prager tridimensional consiste num cone cilíndrico que poderá circunscrever o hexágono de Mohr Coulomb, inscrevê-lo ou coincidir com seus vértices para superfície de ruptura plana (Sousa, 2004).

Figura 1 - Superfície de Fluência de Drucker-Prager.



Fonte: Sousa, 2004.

Conforme Beserra (2010), as aproximações mais utilizadas são quando os valores de η e ξ levam o modelo de Drucker-Prager a coincidir com os vértices internos ou externos da superfície de Mohr-Coulomb.

A coincidência com os vértices internos da superfície de Mohr-Coulomb ocorre através do cone de expansão da superfície de Drucker-Prager, onde os valores de η e ξ são representados pela Eq. 3 e pela Eq. 4, respectivamente.

$$\eta = \frac{6 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{6 \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} \quad (4)$$

2.2 Algoritmo de escavação

Em elementos finitos, a implementação do processo de escavação envolve aplicação de uma força

nodal equivalente à tensão aplicada pelo material antes de ser escavado. Essa força (f_i) é representada pela função da Eq. 5, na qual γ representa uma rigidez que permite um deslocamento à medida que as tensões evoluem no tempo. Enquanto que os nós do interior da região escavada são fixados e o elemento perde as propriedades de resistência [14].

$$f_i = f_i^0 + \gamma(\dot{u}_i^0 - \dot{u}_i)\Delta t \quad i=x,y,z \quad (5)$$

Sendo f_i o termo de condição de contorno mecânica para a direção coordenada i , sendo a força/tensão prescrita, \dot{u}_i^0 é a taxa de deslocamento nodal prescrito na direção mesma coordenada i e \dot{u}_i é a taxa de deslocamento nodal em um determinado tempo (Δt).

Sendo assim, ao passo que o material foi escavado para formar o sinkhole, forças nodais foram aplicadas no contorno da estrutura simulando sua tensão antes da escavação. Esse é um artifício numérico realizado para que seja representada a formação de karst, poços, ou outras estruturas que sofram o processo de anulação das forças de corpo dos elementos presentes.

3 Simulação Numérica

Este trabalho apresenta a influência da construção de uma estrutura com 15 Mpa de tensão vertical sendo aplicada no solo em um ambiente com a presença de uma feição cárstica, por meio da modelagem numérica de dois cenários.

No primeiro cenário a edificação está representada por uma carga equivalente distribuída, simulando uma fundação em radier com geometria de 16m x 16m (Largura x Comprimento) e secção de 16 m, Figura 1, e no segundo cenário a estrutura está representada por tensões equivalentes distribuídas em sapatas isoladas quadradas com geometrias de 2m x 2m (Largura x Comprimento) e secção de 2 m, Figura 2. Em ambos os cenários essas estruturas estão localizadas acima de duas camadas de solos, na qual a camada mais superficial (solo 1) possui 5 metros e a camada mais profunda (solo 2) possui 45 metros, cujos parâmetros geomecânicos estão apresentados na Tabela 1. Nesses cenários, o sinkhole tem sua gênese na camada 2.

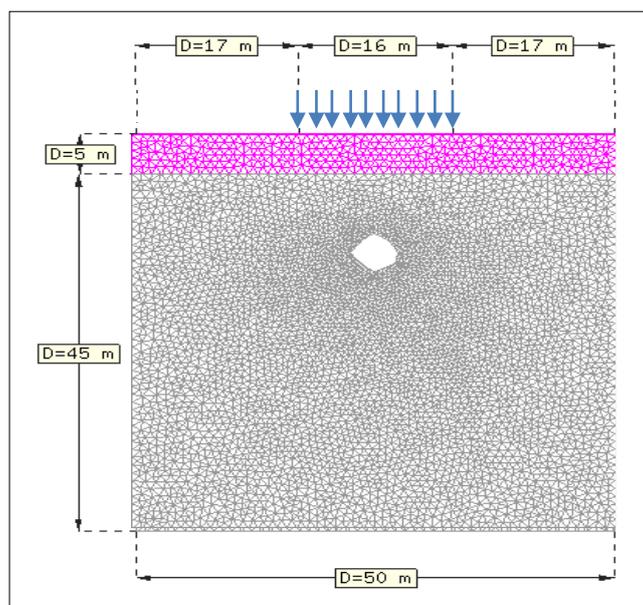


Figura 1. Cenário radier, dimensões e localização da aplicação da tensão vertical.

Assim sendo, foi empregada uma malha de elementos finitos tipo triângulo linear, não estruturada, com 4852 nós e 9502 elementos nos dois casos. O domínio é submetido a uma condição edométrica, ou seja, as faces laterais e base são restringidas (Figura 3), quanto ao deslocamento na direção normal e na face superior é prescrita uma tensão vertical de 15 MPa representando a edificação. A gênese da caverna

foi desenvolvida por meio do algoritmo de escavação já apresentado nesta pesquisa, em que foi formada uma cavidade com 5 metros de diâmetro para uma estrutura de formato irregular, Figura 3.

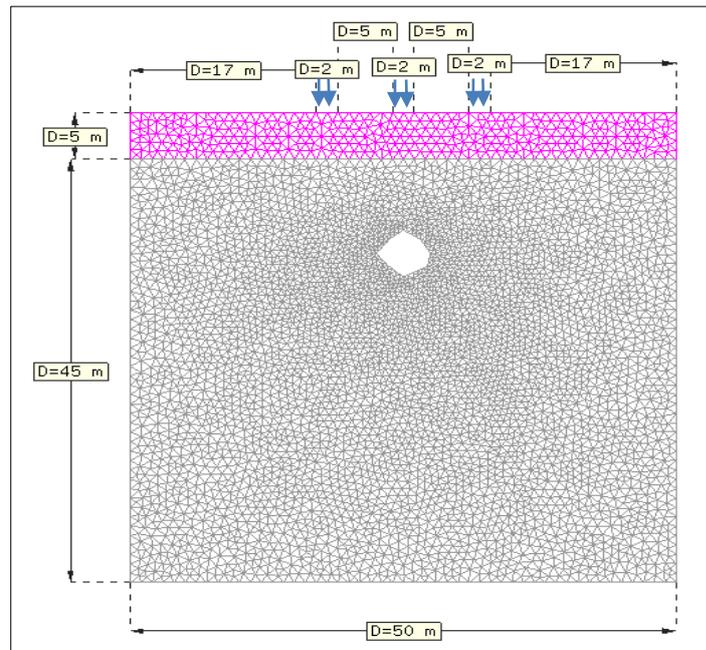


Figura 2. Cenário sapatas, dimensões e localização da aplicação da tensão vertical.

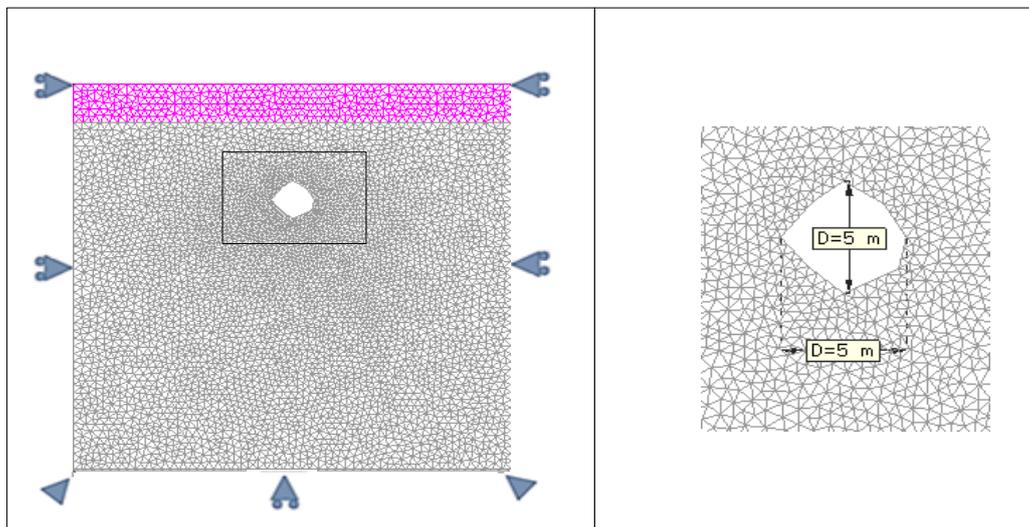


Figura 3. (a) Condições de contorno edométricas e (b) detalhe de dimensões da feição cárstica.

Tabela 1 - Parâmetros Geomecânicos das Rochas.

Solo	c (MPa)	ϕ ($^{\circ}$)	E (MPa)	ν	η (%)
1	0,5	28	40,0	0,28	43
2	0,5	18	80,0	0,15	47

4 Resultados

Neste artigo foi realizada a modelagem numérica de dois cenários, no primeiro a simulação correspondente possui uma fundação em radier e no segundo a fundação é em sapatas isoladas.

Nas duas simulações foi formada uma feição cárstica abaixo da fundação, para que fosse possível avaliar os impactos devido a formação dessa estrutura em cenários com dois tipos de fundações rasas.

4.1 Cenário de fundação em radier

Observou-se por meio da Figura 4(a), que o cenário com fundação em radier produz deslocamentos horizontais abaixo da fundação e também ao redor do sinkhole. Já nos resultados de deslocamentos verticais, Figura 4(b), notou-se que os maiores valores se concentraram no centro da fundação e acima do sinkhole, atingindo um valor máximo de 36.6 cm abaixo do centro do radier.

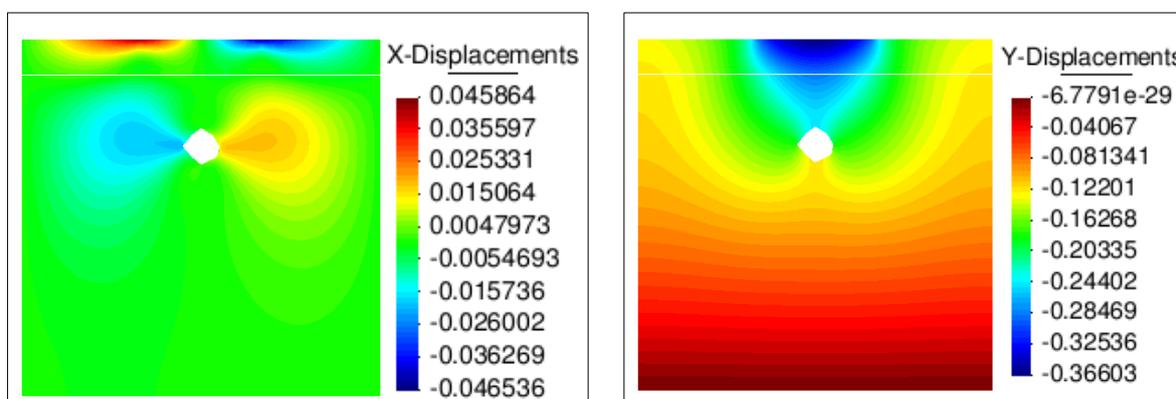


Figura 4. Deslocamentos (a) horizontais (m) e (b) verticais (m).

Os deslocamentos no terreno foram combinados com uma interferência no estado de tensões ao redor da cavidade e próximo à fundação, Figura 5. Notou-se que, para a região sobre o teto e sob base da cavidade há uma concentração tensões horizontais, bem como na lateral da cavidade, Figura 5(a). De maneira semelhante se observou uma concentração de tensões verticais ao redor do sinkhole, Figura 5(b).

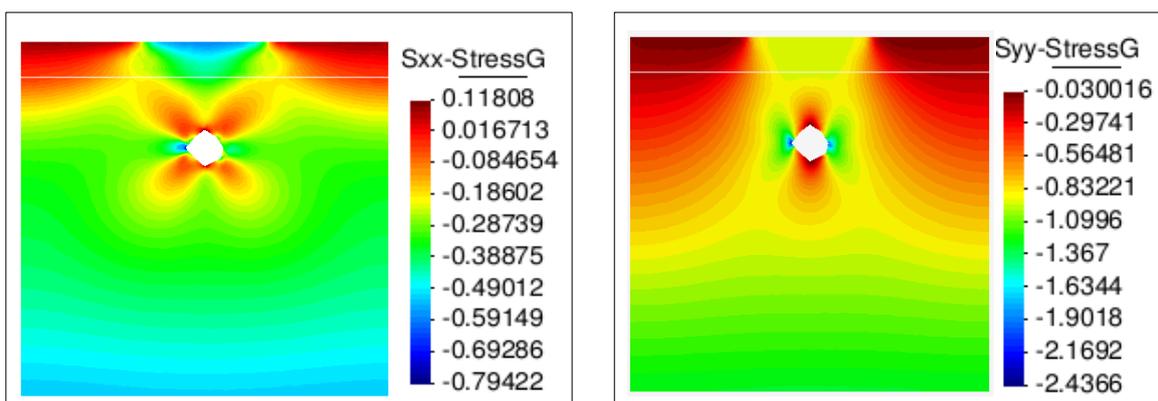


Figura 5. Tensões (a) horizontais (Mpa) e (b) verticais (Mpa).

Na Figura 6 são apresentados os resultados de deformações plásticas, Figura 6(a), e porosidade, Figura 6(b), o que permitiu constatar que as deformações plásticas ocorreram ao redor da cavidade, bem como o aumento da porosidade, especialmente no topo e na base da mesma.

Também foram analisados os resultados de tensões verticais ao longo do tempo da simulação em três pontos no topo da superfície, Figura 7. Nessa figura, pode ser observado que no ponto P2 as tensões verticais foram superiores do que os pontos P1 e P3, essa diferença torna-se evidente a partir do tempo de 200 segundos, quando a construção é finalizada. Em seguida as tensões permaneceram constantes até o final da simulação.

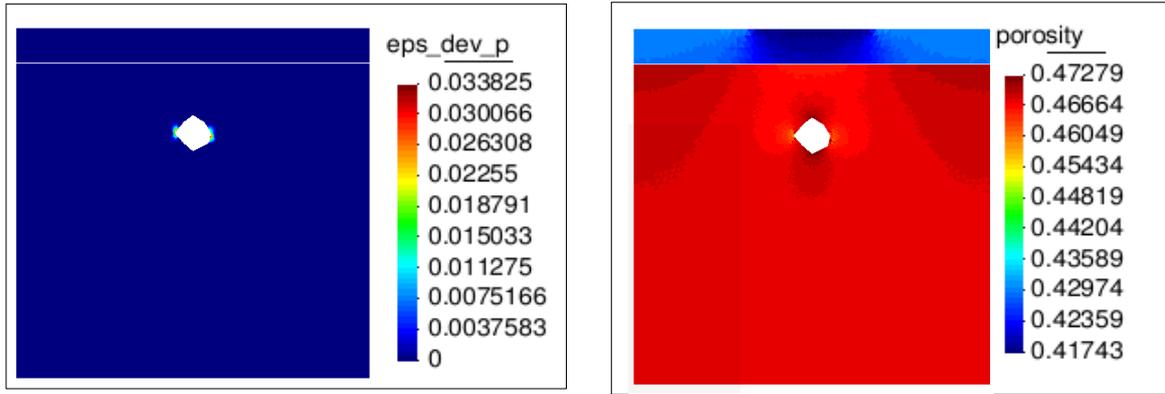


Figura 6. (a) Deformações plásticas e (b) porosidade.

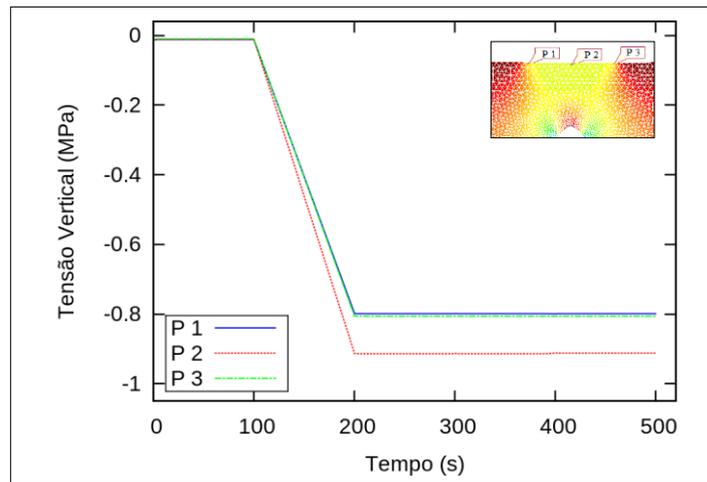


Figura 7. Tensões verticais pelo tempo.

De maneira semelhante, foram analisados os deslocamentos verticais ao longo do tempo de simulação para os mesmos três pontos na superfície, Figura 8. Notou-se que, o ponto P2 apresentou os valores de deslocamentos superiores aos pontos P1 e P3, semelhante ao comportamento das tensões verticais, Figura 8.

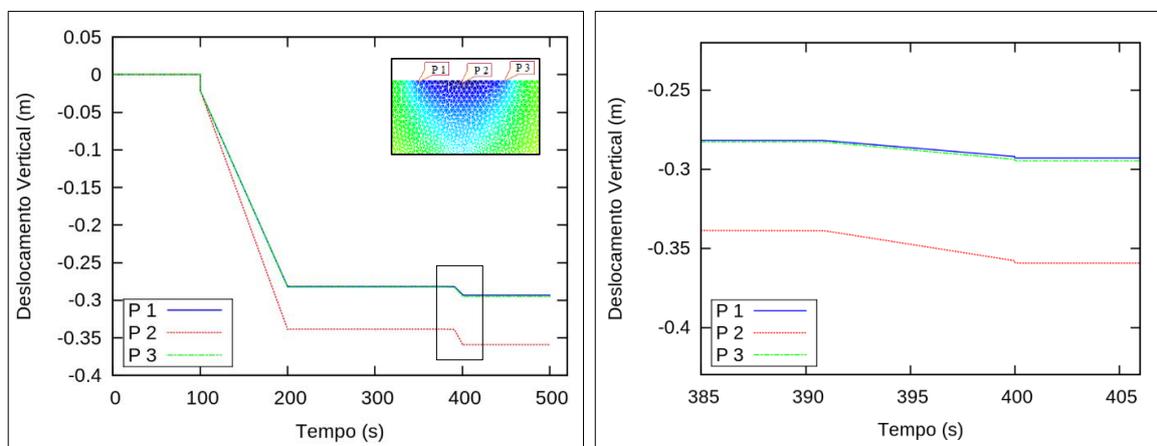


Figura 8. (a) Deslocamentos verticais ao longo da simulação e (b) no momento de finalização da escavação do sinkhole.

Porém, quando a simulação se aproximou dos 400 segundos, instante que o material que preenche o sinkhole é totalmente retirado por meio do algoritmo de escavação, notou-se uma variação de deslocamento nos três pontos, detalhe em Figura 8(a).

Na Figura 8(b), pode ser observado que os ângulos de inclinação das retas que representam o variação das deformações verticais são semelhantes para os pontos P1 e P3, com aproximadamente 7° , mas diferente para o ponto P2, aproximadamente 12° . Além disso, no instante de 400s ocorreu um crescimento nos deslocamentos verticais de aproximadamente 1 mm para os pontos P1 e P3 e de 1,5 mm para o ponto P2, o que para este cenário pode ser considerado irrelevante, no tange ao problema de estabilidade da fundação.

Assim sendo, para este cenário, o deslocamento vertical total devido a formação de sinkhole (300s até 500s) para os pontos P1 e P3 foi de aproximadamente 11 mm e para o ponto P2 foi de aproximadamente 21 mm.

4.2 Cenário de fundação em sapatas isoladas

Na Figura 9 são apresentados os resultados de deslocamentos horizontais, Figura 9(a), e verticais, Figura 9(b), do cenário com fundação em sapatas isoladas. Observou-se que os maiores deslocamentos ocorrem ao redor da cavidade e próximo a fundação, semelhante ao cenário de radier.

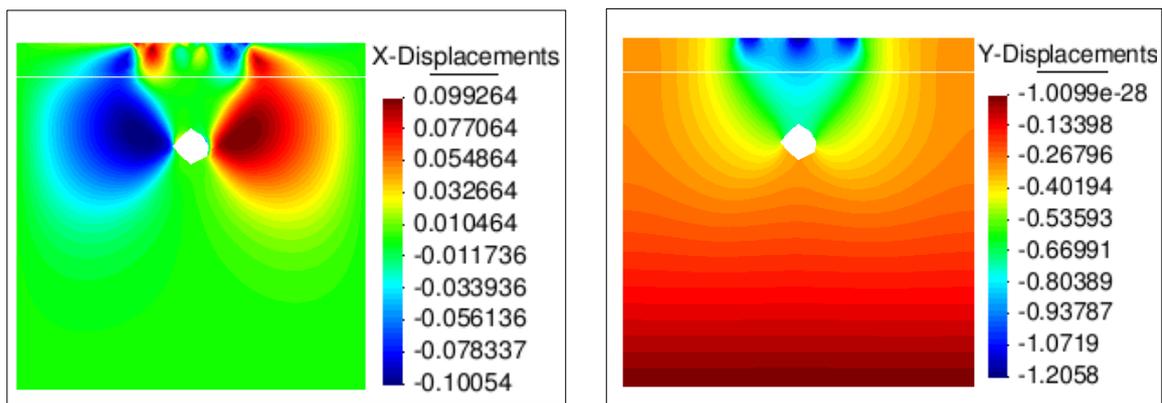


Figura 9. Deslocamentos (a) horizontais (m) e (b) verticais (m).

Além disso, foram analisados os valores de tensões horizontais, Figura 10(a), e verticais, Figura 10(b), onde observou-se que existe uma concentração de tensões ao redor da cavidade e próximo à fundação. É importante observar que esses valores são mais acentuados, quando comparados com o cenário anterior.

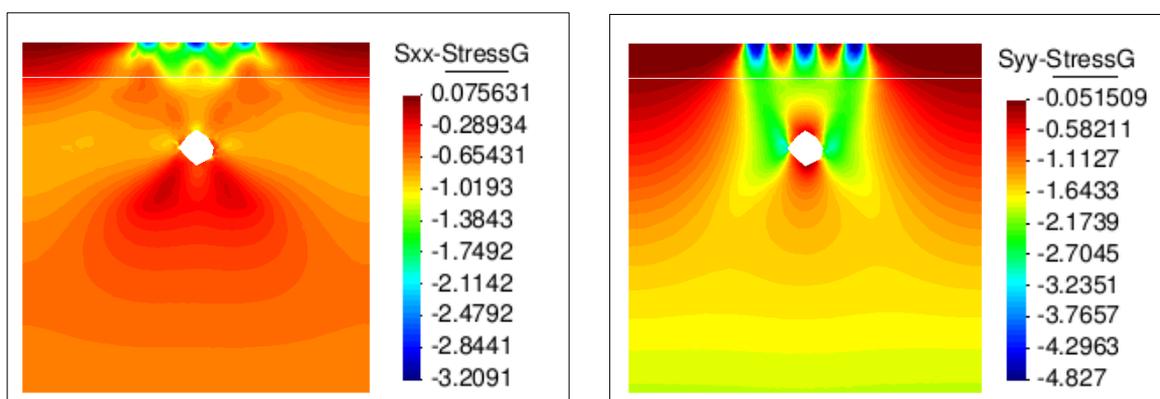


Figura 10. Tensões (a) horizontais (MPa) e (b) verticais (MPa).

Os resultados de deformações plásticas, Figura 11(a), e de porosidade, Figura 11(b), corroboraram com as discussões anteriores, pois foi possível observar que as deformações plásticas e variação de porosidade atingiram valores maiores quando comparadas com os resultados do cenário anterior.

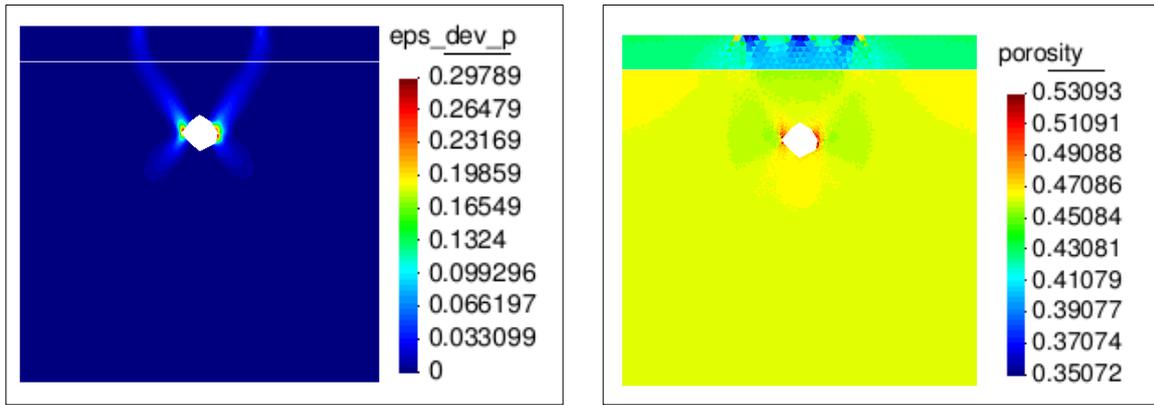


Figura 11. (a) Deformações plásticas e (b) porosidade.

Na Figura 12 pode ser observado com detalhes a evolução das tensões para os pontos que se encontram abaixo do centro da fundação, P2, e abaixo das bordas, P1 e P3. Nessa Figura 12 pode ser constatado que a partir do tempo de 200s, momento em que a finalizada a aplicação das tensões no topo da formação, as tensões permanecem constantes. Além disso, comparando os pontos das bordas com o do centro, identificou-se valores muito similares, com cerca de 2% de diferença entre eles.

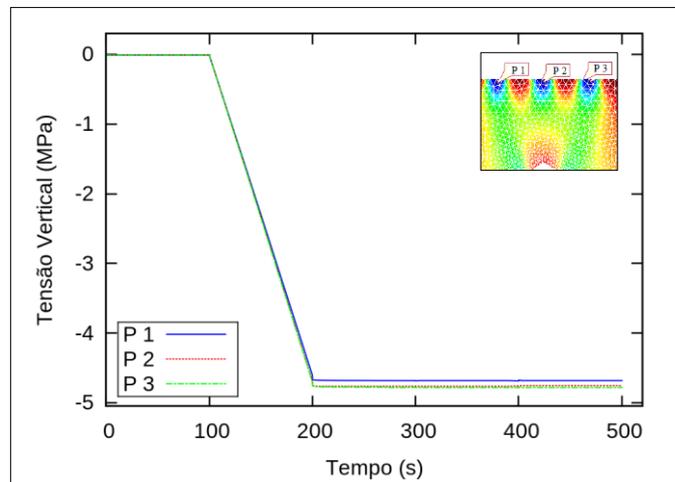


Figura 12. Tensões verticais ao longo do tempo.

Sendo assim, também são analisados os resultados de deslocamentos verticais ao longo da simulação para três pontos na superfície, Figura 13. Observou-se que, de maneira o ponto P2, possui os maiores valores de deslocamentos verticais quando comparados com os pontos P1 e P3.

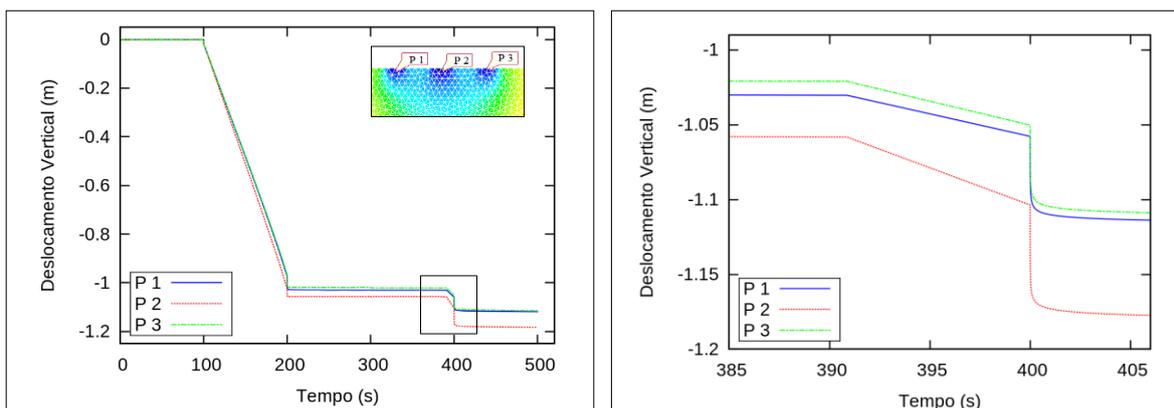


Figura 13. Deslocamentos verticais pelo tempo.

Da mesma forma, quando a simulação avançou até 400 segundos, quando o material que preenche o sinkhole é totalmente retirado por meio do algoritmo de escavação, notou-se uma variação de deslocamento nos três pontos (Figura 13). Observou-se que ao se aproximar do instante de 400s os ângulos de inclinação das retas de variação de deslocamentos verticais pelo tempo para os pontos P1 e P3 são semelhantes, aproximadamente 17° , entretanto para o ponto P2 esse ângulo foi de aproximadamente 26° . Ao atingir o instante de 400s ocorreu um incremento nos deslocamentos verticais de 53 mm para os pontos P1 e P3 e de 70 mm para o ponto P2.

Assim, para este cenário, o deslocamento vertical total devido a formação de sinkhole (300s até 500s) para os pontos P1 e P3 foi de aproximadamente 92 mm e para o ponto P2 foi de aproximadamente 126 mm. Esses deslocamentos podem não influenciar a estabilidade da fundação neste cenário, porém corroboram com tendência de subsidência na superfície do terreno devido a formação do sinkhole.

4.3 Comparação entre os cenários de fundações em radier e em sapata

Observando o comportamento de ambos os cenários avaliados, notou-se que, no caso do radier as tensões verticais se apresentaram inferiores às do cenário com fundação em sapatas. Pode ser observado que comparando a Figura 7 com a Figura 12, o incremento das tensões no cenário de sapatas foi superior ao do radier em mais de 5 vezes, comparando tanto o centro quanto para as bordas

Em relação ao campos dos deslocamentos verticais, avaliando a influência da formação do sinkhole em ambos os cenários, notou-se que no cenário de sapatas o incremento dos deslocamentos foi superior aos deslocamentos no cenário do radier em mais de 6 vezes e 8 vezes quando avaliados os centros e as bordas das fundações, respectivamente. Esse comportamento foi constatado ao se comparar a Figura 8 e a Figura 13, corroborando com o resultado das tensões.

Por fim, neste trabalho, foi realizada uma análise comparativa do perfil de subsidência no topo da formação para ambos os cenários estudados. Assim sendo, na Figura 14 é possível verificar que o maior deslocamento vertical no topo da formação para o cenário com fundação em radier foi de aproximadamente 0,37 m, e para o cenário com fundações em sapatas foi de aproximadamente 1.21 m, mais de 3 vezes maior, quando comparado com o máximo deslocamento vertical de ambos os cenários.

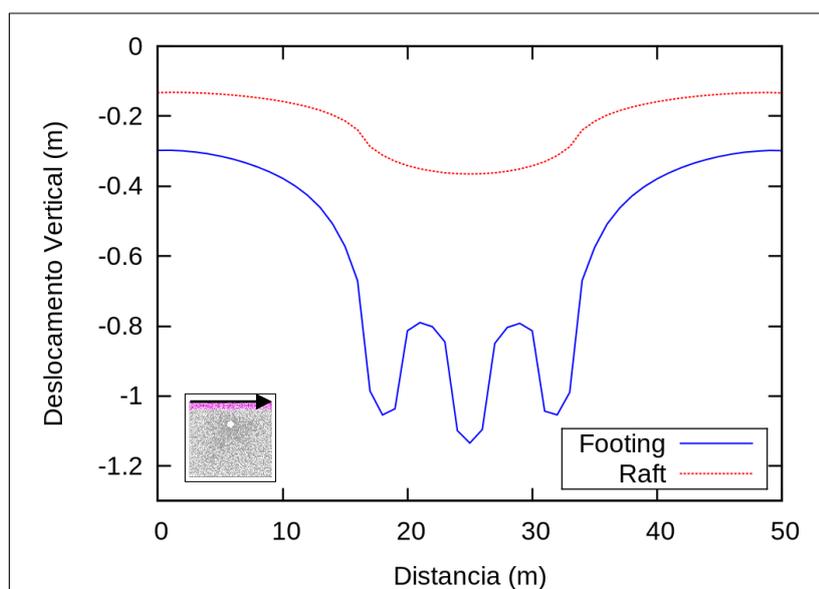


Figura 14. Subsidência no topo da formação.

5 Conclusões

Esse artigo apresentou uma investigação do comportamento de dois tipos de fundações rasas situadas acima de um terreno que apresentou a gênese de um sinkhole.

Os resultados apresentados mostraram que para o cenário de fundações em sapatas isoladas, quando na presença da formação de sinkholes, gera uma distribuição de tensões horizontais e verticais com maiores intensidades do que uma fundação em radier.

Além disso, seguindo as maiores intensidades do campo das tensões, os deslocamentos, as deformações plásticas e a variação de porosidade se mostraram mais intensos, o que permitiu afirmar que cenários com fundação em sapatas isoladas apresentaram uma maior necessidade de monitoramento das edificações do que cenários com a fundação em radier.

Também foi apresentado o perfil de subsidência do solo para ambos os cenários, e esses resultados corroboraram com os demais, pois a subsidência no terreno foi mais evidente para o cenário de sapatas isoladas. Esse cenário também apresentou maiores concentrações de deslocamentos na sapata central, o que poderia levar à ocorrência de recalques diferenciais nas edificações.

Portanto, em cenários com feições cársticas é recomendável utilizar fundações do tipo radier. Além disso, para esses cenários, é imprescindível monitorar os deslocamentos do solo.

References

- [1] A. C. Bastos, G. M. Amado-Filho, R. L. Moura, F. M. Sampaio, D. Bassi, and J. C. Braga, "Origin and sedimentary evolution of sinkholes (buracas) in the Abrolhos continental shelf, Brazil," *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 462, pp. 101–111, 2016.
- [2] S. Nisio, "2 . 10 I SINKHOLES ANTROPOGENICI NELLE CITTÀ ITALIANE," no. February, 2019.
- [3] A. L. Perez, B. Nam, M. Chopra, and A. Sallam, "Understanding Florida's Sinkhole Hazards: Hydrogeological Laboratory Study," pp. 508–518, 2017.
- [4] P. Bauer-Gottwein, B. R. N. Gondwe, G. Charvet, L. E. Marín, M. Rebolledo-Vieyra, and G. Merediz-Alonso, "Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico," *Hydrogeol. J.*, vol. 19, no. 3, pp. 507–524, 2011.
- [5] I. T. Jawad, Z. H. Majeed, and E. J. Mahan, "Riskiness of Size of Sinkhole Beneath the Center of Raft Foundation," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 22, pp. 9606–9612, 2018.
- [6] A. B. Tihansky, "Sinkholes, West-Central Florida. A link between surface water and ground water," *L. Subsid. United States*, pp. 121–40, 1999.
- [7] R. Brinkmann and M. Parise, "Karst environments: Problems, management, human impacts, and sustainability an introduction to the special issue," *J. Cave Karst Stud.*, vol. 74, no. 2, pp. 135–136, 2012.
- [8] A. A. Malinowska, A. Guzy, R. Hejmanowski, and P. Ulmaniec, "Hybrid-approach for sinkhole occurrence risk mitigation in urban areas," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 291, p. 012022, 2019.
- [9] V. Zumpano, L. Pisano, and M. Parise, "An integrated framework to identify and analyze karst sinkholes," *Geomorphology*, vol. 332, no. February, pp. 213–225, 2019.
- [10] M. Alrowaimi, H. Yun, and M. Chopra, "Sinkhole Physical Models To Simulate and Investigate," pp. 559–568, 2015.
- [11] M. Caudron, "Numerical modeling of the soil structure interaction during sinkholes," *Numer. Methods Geotech. Eng.*, pp. 267–274, 2010.
- [12] P. Strzałkowski, "Sinkhole formation hazard assessment," *Environ. Earth Sci.*, vol. 78, no. 1, pp. 1–6, 2019.