

Dimensionamento de reforço com emprego de geossintéticos para fundações com probabilidade de dolinamentos: Cálculo analítico e modelo numérico de tensão-deformação



<https://doi.org/10.56238/chaandieducasc-036>

Paulo Victor Silva Avelino de Castro

Engenheiro Geotécnico, Golder Associates Brasil, Belo Horizonte, Brasil
E-mail: PVMCastro@golder.com.br

Isabelle Tanne Couto e Silva

Engenheira Geotécnica, Golder Associates Brasil, Belo Horizonte, Brasil

Paula Mello Martins

Engenheira Geotécnica, Golder Associates Brasil, Belo Horizonte

RESUMO

Zonas cársticas são definidas por sua alta solubilidade, porosidade e consequente ocorrência de subsidências no terreno. Cerca de 20% do terreno da superfície livre de gelo é composto por regiões cársticas e tais regiões estão suscetíveis a intervenções antrópicas. Considerando esse cenário o presente trabalho aborda o dimensionamento de reforço por geossintéticos de uma fundação hipotética passível de dolinamentos através da metodologia analítica de Briançon e Villard (2007) e por modelagem numérica de tensão-deformação

no software RS2 (Rocscience). Inicialmente, definiu-se uma fundação hipotética a ser reforçada em que há a presença de dolinas circulares de no máximo 3 metros de diâmetro. Para a determinação das propriedades mecânicas do reforço, foi aplicada a metodologia proposta por Briançon e Villard (2007), tendo-se como premissa uma deformação superficial de, no máximo, 5%, cujos resultados geraram ábacos de dimensionamento para definição dos parâmetros de comprimento de ancoragem e esforço de tração da geogrelha. Análises numéricas do tipo tensão-deformação foram realizadas para verificação do nível de deformação relacionado à resistência dos materiais de fundação, considerando os valores obtidos pelo método analítico. O reforço por um conjunto de geogrelha, para reforço e um geotêxtil tecido, para separação física, em regime elasto-plástico, obteve fatores de redução de resistência (SRF) correspondentes às deformações superficiais máximas de 5%. O SRF obtido foi condizente com as boas práticas. Observou-se que as deformações causadas nos geossintéticos não levaram à ruptura dos mesmos.

Palavras-chave: Zona Cárstica, Reforço por Geossintéticos, Análise Tensão-Deformação, Método Analítico.

1 INTRODUÇÃO

Todos os vazios no solo constituem elementos de fraqueza dentro de uma massa rochosa, e uma zona cárstica se distingue por ter os maiores vazios naturais, onde a falha no teto pode criar um risco geográfico significativo. A consequência natural da falha progressiva do topo é a migração ascendente dos vazios, que pode atingir a superfície onde causa subsidência instantânea devido à um colapso causado por uma cavidade (WALTHAM; BELL; CULSHAW, 2005).

De acordo com Ford e Williams (2007) as zonas cársticas surgem da combinação de alta solubilidade em rocha e porosidade secundária bem desenvolvida. Ainda segundo For e Williams (2007), aproximadamente 20% da superfície continental da Terra, com exceção das zonas polares, é



ocupada por zonas cársticas, sendo que 20 a 25% da população mundial depende dos aquíferos contidos nessas regiões.

Diante da probabilidade de formação de dolinas em fundações de estruturas, tem-se a metodologia proposta por Briançon e Villard (2007), que se resume a três etapas: determinação da carga aplicada ao geossintético, determinação do deslocamento do geossintético e determinação do assentamento do solo. Em complemento a esse dimensionamento analítico, as modelagens numéricas vem sendo ferramentas úteis para incorporar o comportamento diferencial dos elementos sujeitos à tensões e deformações.

O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento de reforço de uma fundação hipotética em que há probabilidade de dolinamentos, utilizando geossintéticos, através da metodologia analítica proposta por Briançon e Villard (2007), seguida de sua verificação por análise de tensão-deformação feita por modelo numérico no software RS2 (Rocscience).

2 METODOLOGIA ANALÍTICA

Os cálculos estruturais de dimensionamento de uma fundação hipotética, considerando a ocorrência de subsidências, foi realizado com base na metodologia analítica descrita por Briançon e Villard (2007). O procedimento geral de projeto necessário para determinar as propriedades mecânicas do reforço por geossintético inclui (BRIANÇON; VILLARD, 2007):

1. determinação da carga aplicada aos geossintéticos, dependendo da sobrecarga e das características do solo de cobertura;
2. determinação do deslocamento do geossintético, considerando seu efeito membrana e seu alongamento nas áreas de ancoragem;
3. determinação do recalque do solo, dependendo de suas propriedades físicas.

Destaca-se que, nas junções entre as malhas de geossintético, é necessário um comprimento mínimo de sobreposição. Nesta área, quando ocorre um colapso, as extremidades livres dos geossintéticos e o fraco atrito da interface levam a grandes deformações da superfície do solo e redução das forças de tração que atuam no geossintético em relação às obtidas na seção contínua. Dessa forma, o deslocamento da superfície do solo é calculado nas seções sobrepostas e as tensões máximas são determinadas em seções contínuas. Os subitens seguintes descrevem a metodologia proposta por Briançon e Villard (2007).

2.1 DETERMINAÇÃO DA CARGA APLICADA NO GEOSSINTÉTICO

A carga aplicada ao geossintético é calculada considerando o colapso cilíndrico do solo sobre a cavidade através do método proposto por Terzaghi (1943). Assim, através dos parâmetros geotécnicos para os solos de fundação e a geometria da subsidência, é calculada a carga aplicada. Os parâmetros



geotécnicos adotados para o aterro de reforço, usados para o cálculo da carga sobre a subsidência e sobre as áreas ancoradas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados de entrada da metodologia de Briançon e Villard (2007).

Geometria da subsidência	Circular	Geometria da subsidência	Circular
L [m]	3	φ [°]	35
D [m]	3	C_e	1,1
p [kN/m]	20	k_a	0,27
γ [kN/m ³]	20	Q [kPa]	47,68

2.2 COMPORTAMENTO DO GEOSSINTÉTICO SOBRE A SUBSIDÊNCIA

Os deslocamentos verticais do geossintético sobre a subsidência, ligados ao efeito membrana, resultam tanto da aplicação de carga quanto do deslocamento horizontal do geossintético nas zonas de ancoragem, gerando aumento do comprimento do geossintético. Assim, em uma seção contínua onde encontra-se a maior tensão de sollicitação, é estabelecida uma relação entre o efeito membrana do geossintético, cargas aplicadas, geometria do problema, características do solo e do geossintético. Para tal, pressupõe-se que o reforço é unidirecional e a carga aplicada é uniforme. Calcula-se então o esforço de tração sollicitado do geossintético através da Equação 1.

$$T_M = \frac{qL}{2\beta} \sqrt{1 + \left(\frac{2\beta x}{L}\right)^2} \quad (1)$$

Sendo T_M o esforço de tração em um ponto M, em N/m; q a carga vertical acima da subsidência, em kPa; L o comprimento da subsidência, em m; β o parâmetro característico da alteração de orientação do geossintético em seu ponto inicial e x a posição inicial horizontal de um ponto M, em m.

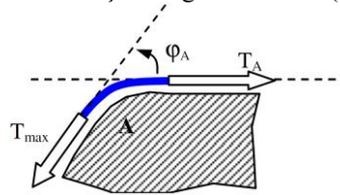
2.3 INFLUÊNCIA DA ALTERAÇÃO NA ORIENTAÇÃO DO GEOSSINTÉTICO

A alteração na orientação do geossintético na extremidade da subsidência gera uma redução do esforço de tração no geossintético, conforme ilustrado na Figura 1. Esse mecanismo, representado pelo parâmetro característico β , é calculado por interação com base na Equação 2 levando em conta a Figura 1.

$$\beta = \tan\varphi_A \quad (2)$$



Figura 1. Influência da alteração na orientação do geossintético (BRIANÇON; VILLARD, 2007).



2.4 COMPORTAMENTO DO GEOSSINTÉTICO

Na área de ancoragem são verificadas três possíveis situações em um segmento considerando o deslocamento horizontal do geossintético na extremidade da subsidência, na extremidade do geossintético e correspondente à máxima tensão de atrito.

Já nas seções sobrepostas, além do atrito entre o solo e o geossintético, considera-se o atrito entre as malhas de geossintético. Para este caso, é necessário levar em consideração as equações obtidas à esquerda e à direita da subsidência. Considerando o equilíbrio limite de uma seção e que o reforço é unidirecional e a carga aplicada é uniforme, tem-se a deformação vertical do geossintético através da Equação 5.

$$z_M = \beta \frac{x^2 - (L^2/4)}{L} \quad (3)$$

Sendo z_M o deslocamento vertical do geossintético em um ponto M; L o comprimento da subsidência, em m; β o parâmetro característico da alteração de orientação do geossintético em seu ponto inicial e x a posição inicial horizontal de um ponto M, em m.

2.5 AVALIAÇÃO DE DEFORMAÇÃO DA SUPERFÍCIE

O deslocamento da superfície é considerado menor que o deslocamento vertical dos geossintéticos, devido à expansão do solo durante o colapso ou possível arqueamento de tensões. Considerando que o maior assentamento do solo acima da subsidência é observado na condição de sobreposição do geossintético, se a deformação do solo e do geossintético são assumidos parabólicos, é possível encontrar uma relação entre o deslocamento máximo da superfície (s), deslocamento vertical máximo geossintético (s), coeficiente de expansão (C_e), e a altura da cobertura do solo (H). Essa relação é expressa pela Equação 4 para uma subsidência circular.

$$s = f - 2H(C_e | e - 1) \quad (4)$$



2.6 DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM

O comprimento ótimo de ancoragem do geossintético (L_R) é definido como o comprimento entre o meio e a extremidade do geossintético somado ao comprimento necessário para sustentar o esforço de tração e deformação do geossintético.

2.7 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento do reforço por geossintético tipo geogrelha, foi realizado seguindo o procedimento proposto por Briçon e Villard (2007) para subsidências circulares de 3 metros. Foram fixados valores variados para os seguintes parâmetros: rigidez da geogrelha, deformação da geogrelha e altura do aterro de proteção, conforme valores aceitáveis de projeto. Assim, foram calculados valores correspondentes de deformação superficial, comprimento de ancoragem e esforço de tração do geossintético. Destaca-se que o mesmo procedimento detalhado anteriormente foi feito para subsidências circulares de 2 metros e 4 metros, como avaliação de sensibilidade quanto aos parâmetros do geossintético.

Os resultados estão ilustrados da Figura 2 a Figura 6, que foram usadas como ábacos para o dimensionamento, sendo cada curva representativa de uma altura de camada de proteção.

Como premissa, definiu-se que as deformações superficiais devem ser mínimas, de maneira que foi estabelecido como ponto inicial de dimensionamento uma deformação máxima da superfície de 5 centímetros. Desse modo, na Figura 2 foi determinada uma rigidez viável economicamente do geossintético a partir da deformação superficial definida de 5cm. Foi então encontrado um aterro de proteção de 2,5 metros para uma rigidez necessária ao geossintético de aproximadamente 3.000 kN/m.

Na Figura 3 foi determinado o comprimento de ancoragem de 5,5 metros a partir da altura do aterro e da rigidez do geossintético definidos na etapa anterior. Na Figura 4 foi estabelecido um esforço de tração de solicitação ao geossintético de 130 kN/m, a partir da altura do aterro e da rigidez do geossintético conforme a primeira etapa. Por fim, na Figura 5 foi verificada que a deformação esperada no geossintético aproxima-se de 5%.



Figura 2. Determinação da rigidez do geossintético e da altura do aterro a partir da deformação superficial de 5%.

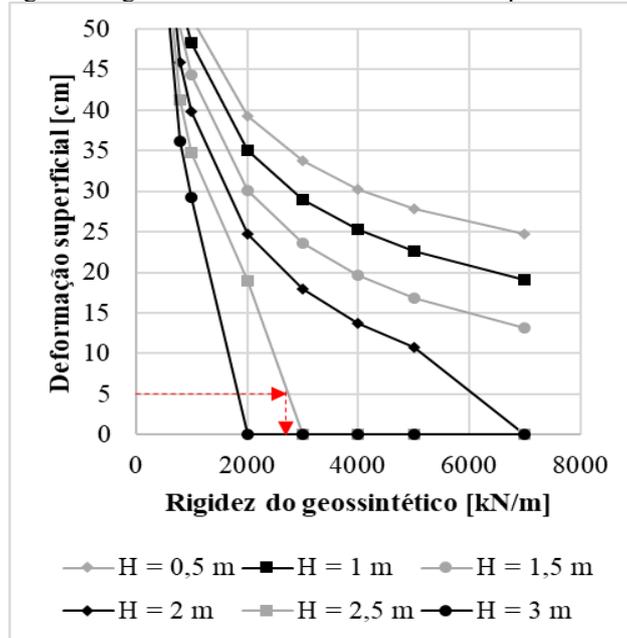


Figura 3. Determinação comprimento de ancoragem a partir da rigidez do geossintético e da altura do aterro.

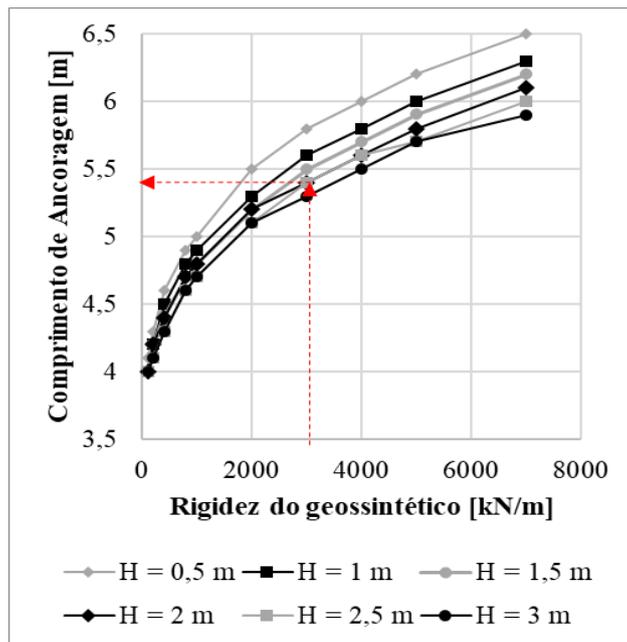




Figura 4. Determinação do esforço de tração do geossintético a partir da rigidez do geossintético e da altura do aterro.

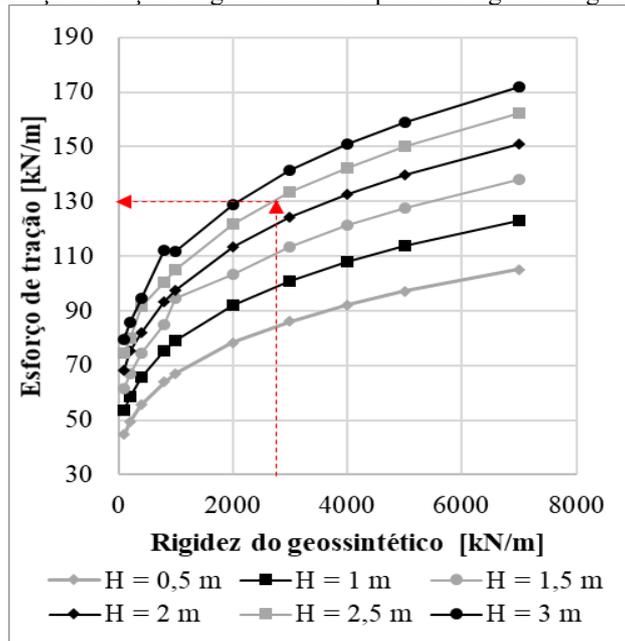
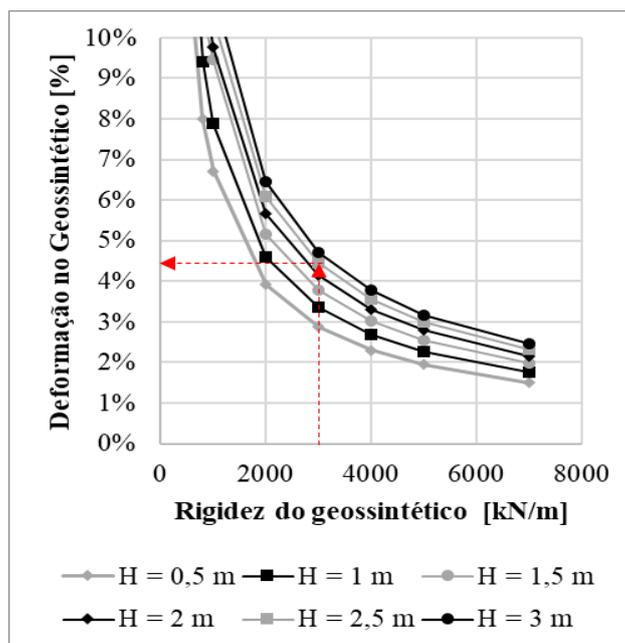


Figura 5. Determinação da deformação no geossintético a partir da rigidez do geossintético e da altura do aterro.



3 MODELAGEM NUMÉRICA

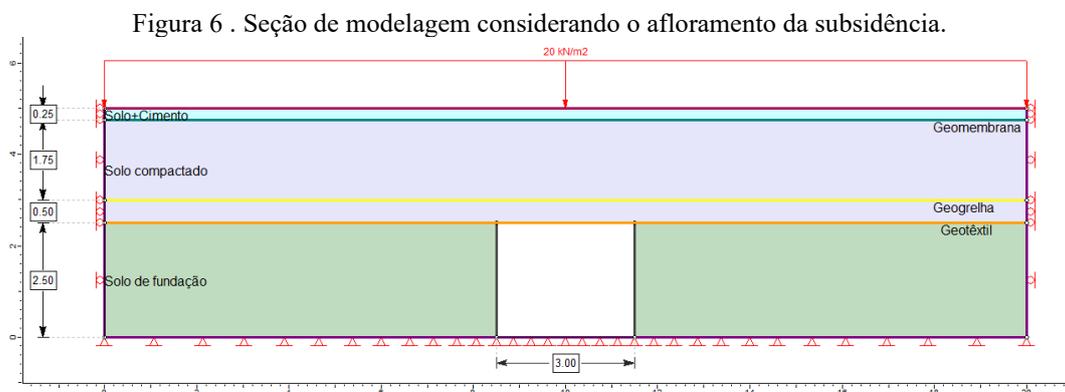
Para verificação das deformações e estados de tensão na fundação provocados pelas dolinamentos e resistidas pelos geossintéticos conforme dimensionado no item 2.4 pela metodologia de Briançon e Villard (2007), foram realizadas modelagens bidimensionais tipo tensão-deformação, por intermédio do software RS2 versão 2019 10.002 de autoria da ROCSCIENCE (2018).



3.1 PREMISSAS DA ANÁLISE

Como premissa inicial da modelagem tem-se a probabilidade de ocorrência natural de dolinamentos. A seção representativa, ilustrada na Figura 6, apresenta o arranjo de reforço por geossintéticos para estabilização de uma fundação hipotética com uma subsidência circular de 3 m.

A formação da subsidência leva à modelagem de dois instantes representativos do caso. Um primeiro instante no qual a condição in situ é prévia à dissolução da rocha, na qual a estratigrafia observada desenvolve suas tensões confinantes e carregamentos verticais. Já no segundo instante (Figura 6) a dissolução da rocha permite a inserção da subsidência nesse meio estabelecido pelos carregamentos condicionantes do primeiro instante. Destaca-se que para o modelo representativo foi desconsiderado o nível freático.



Em função da avaliação de segurança executou-se a opção Redução da Resistência ao Cisalhamento no RS2 que realiza análises da interação tensão-deformação por elementos finitos, com a finalidade de calcular um fator de redução de resistência crítica para cada seção. Portanto, o modelo não busca acessar as condições de estabilidade, mas verificar a que nível de deformação se relaciona a resistência dos materiais da fundação em contraponto à existência de subsidências.

3.2 PARÂMETROS DOS MATERIAIS

Os parâmetros e modelos constitutivos adotados para os materiais foram baseados nos adotados para o desenvolvimento da metodologia de Briançon e Villard (2007). Dessa forma, os parâmetros de resistência e o comportamento elasto-plástico dos materiais resistivos em relação aos dolinamentos foram definidos.

Para a seção representativa, considerou-se um solo de fundação onde está localizado o dolinamento. O solo compactado representa a camada de proteção e o solo cimento serve como proteção para a geomembrana, como observado na Tabela 2.



Tabela 2. Parâmetros adotados para os solos.

Solo	Modelo	Categoria dos parâmetros	E_i (MPa)	ν	c (kpa)	Φ (°)	$\square\square$ $\square^\circ\square$	Υ (kN/m ³)
Solo compactado	Plástico	Tensões efetivas	7	0,30	10,0	35	35	20,00
Solo de fundação	Elástico		20	0,30	10,5	35	-	20,00
Solo cimento	Plástico		50	0,30	20,0	35	35	20,00

Os geossintéticos foram tratados como linhas estruturais nas modelagens de tensão e deformação. Destaca-se que a interface de contato entre geossintético e solo é considerada uma zona de fragilidade. Desse modo, foi considerada uma redução de 70% de resistência nessas regiões em relação à resistência do solo em questão. Dessa forma, a Tabela 3 apresenta os parâmetros associados aos geossintéticos.

Tabela 3. Parâmetros adotados para os geossintéticos.

Solo	Modelo	Módulo de Tração (kN/m)	Resistência característica (kN/m)	Resistência residual (kN/m)
Geogrelha	Plástico	3000	130	100
Geomembrana	Elástico	100	-	-
Geotêxtil	Plástico	400	100	100

3.3 RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA

De acordo com Waltham, Bell e Culshaw (2005), em se tratando de subsidências, valores correspondentes à fatores de segurança giram em torno de 5, por analogia, o valor encontrado como SRF é condizente com o que aponta as boas práticas conforme observado na Figura 8. Para o SRF próximo à 5, tem-se deformações de 6 a 7 cm (Figura 7), próximo aos 5 cm do dimensionamento analítico (item).

Observa-se ainda os deslocamentos dos geossintéticos, representados por barras inferiores e superiores ao longo de sua extensão, ocasionados devido às solicitações de tração pela presença da subsidência. A Figura 8 ilustra o deslizamento da geomembrana, geotêxtil e geogrelha em relação aos solos de contato. Verifica-se que a solicitação de tração não levou ao rompimento desses elementos, sendo notados deslocamentos na ordem de 10 cm próximo à subsidência e milímetros nas extremidades.



Figura 7. Convergência para variação do SRF ao cisalhamento para subsidência de 3m.

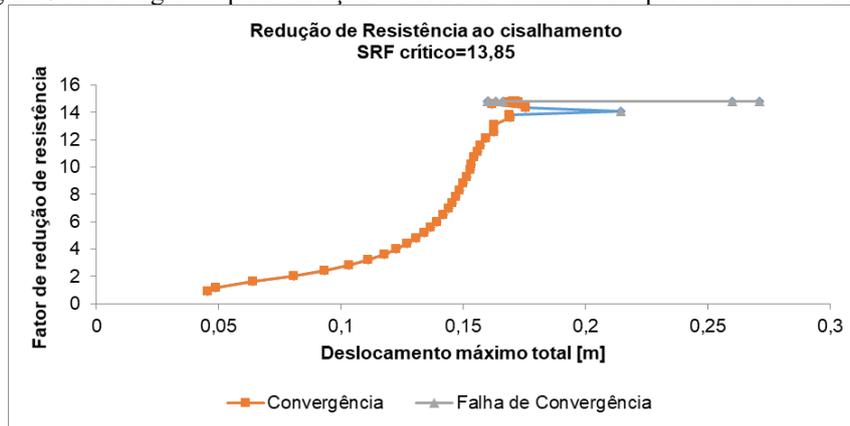
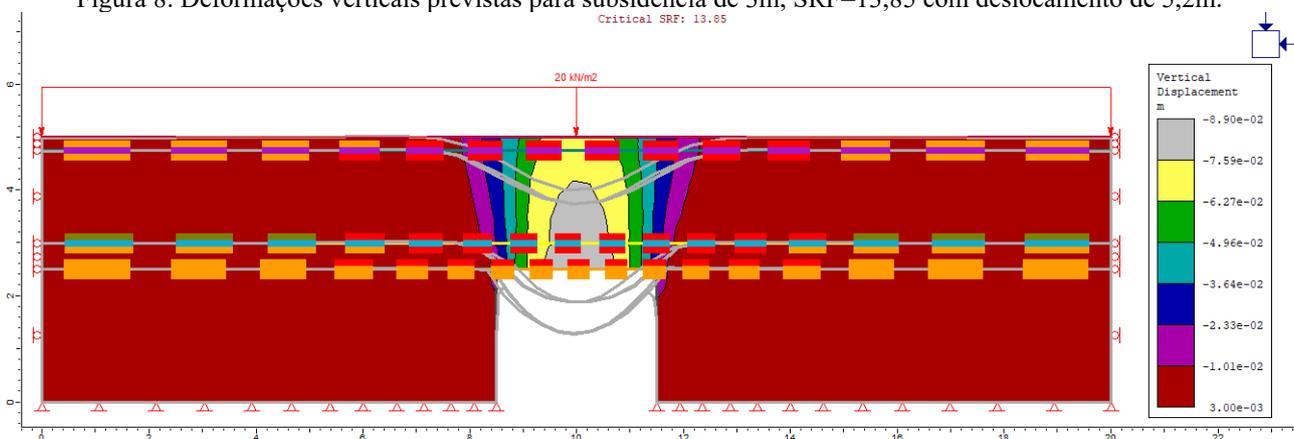


Figura 8. Deformações verticais previstas para subsidência de 3m, SRF=13,85 com deslocamento de 5,2m.



Nota: As barras ao longo dos geossintéticos representam os seus deslizamentos em relação aos solos de contato.

4 CONCLUSÃO

Foi apresentado o dimensionamento de reforço de uma fundação hipotética com probabilidade de dolinamentos, utilizando geossintéticos, através da metodologia analítica proposta por Briançon e Villard (2007). E feita verificação por análise de tensão-deformação feita por modelo numérico no software RS2 (Rocscience).

As metodologias analítica e numérica apresentaram níveis que atendem o reforço de uma fundação propícia à dolinamentos de até 3 metros de diâmetro, em relação à uma deformação superficial de 5%. Contudo, tal dimensionamento não impede afloramento de dolinas maiores. Por isso recomenda-se análise de risco que vise mapear as cavidades e validar o diâmetro esperado de subsidências em casos não hipotéticos.

Portanto, as metodologias descritas apresentam boa aderência quanto ao comportamento do sistema proposto para o no cenário do surgimento de subsidências de até 3 m de diâmetro na superfície.



REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 6484: Solos – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 17p.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE. Manual de Sondagens. 4ª Edição. São Paulo: ABGE, 1999. 73p.
- BRIANÇON, L. e VILLARD, P. Design of geosynthetic-reinforced platforms spanning localized sinkholes. *Geotextiles and Geomembranes*, v.26, n.5, p.416–428, 2008.
- CARTER, T.G. e MARINOS, V. Use of GSI for rock engineering design. In: *Proceedings 1st international conference on applied empirical design methods in mining*. Lima, 2014.
- CHARBEL, P.A., CARVAJAL, H.E.M., FARIAS, M.M e ASSIS, A.P. Caracterização Geológico-Geotécnica da Mina Subterrânea de Vazante. In: *Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR*. 2016.
- DUNCAN, J.M., BYRNE, P., WONG, K.S. e MABRY, P. Strength, Stress-Strain Movements in Soil Masses. Report No. UBC/GT/80-01. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1980.
- FORD, D., WILLIAMS, P. *Karst hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 2007.
- HOEK E. e DIEDERICHS, M.S. Estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006. 15p.
- ISGBR – Associação Brasileira de Geossintéticos. *Recomendação ISGBrasil 003 Termos e Definições Complementares*. ISGBR, 2014.
- SCHINAID, F. e ODEBRECHT, E. *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de fundações*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- ROCSCIENCE. *RS2 - 2D geotechnical finite element analysis*. Toronto: Rocscience Inc. 2018.
- WALTHAM, A.C., BELL, F.G. e CULSHAW, M.G. *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer, 2005. 300p.