

Simulação numérica do recalque de uma estrutura de solo mole reforçado com geossintéticos

Flávio Henrique de Souza e Silva

Faculdades Integradas de Araraquara, Araraquara - SP, Brasil, flaviosilva1803@gmail.com

Jean Lucas dos Passos Belo

Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos - SP, Brasil, belo.jeanlucas@gmail.com

Luiz Paulo Vieira de Araujo Junior

Faculdades Integradas de Araraquara, Araraquara - SP, Brasil, luizpoljr88@yahoo.com.br

Jefferson Lins da Silva

Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos - SP, Brasil, jeffersonlins@gmail.com

RESUMO: O objetivo desse trabalho é apresentar o uso do programa *GeoStudio/2012*, como ferramenta auxiliar, para estimativa da melhoria da capacidade de carga em solos moles, a partir do uso de geossintéticos como materiais de reforço. O estudo visa uma comparação acerca de combinações de materiais poliméricos, buscando a melhoria de capacidade de carga de solos moles, principalmente quando da inviabilidade de retirada e substituição desses por outro solo mais resistente, evitando a ruptura por colapso do solo ou recalque excessivo. O uso do *software SIGMA/W*, para fins de pesquisa, pode auxiliar os profissionais ligados à área de melhoria de solos, demonstrando resultados semelhantes aos obtidos em laboratório e campo. A simulação numérica foi comparada com resultados experimentais encontrados na literatura, considerando uma camada de areia apoiada sobre solo mole. A camada de areia foi analisada em três situações: sem reforço, reforçada apenas com geocélula e reforçada pela combinação de geocélula e geogrelha. As geocélulas possuíam alturas de 5, 10 e 15 cm. A combinação de geocélula e geogrelha permitiu uma melhoria ainda mais significativa no desempenho do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Numérica, Solo Mole, Geocélula, Geogrelha.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido considerando observações feitas em estudos de execução de obras sobre solo mole, um grande desafio para a engenharia geotécnica, devido à baixa capacidade de carga que um solo mole suporta e pelo recalque excessivo provocado ao longo do tempo.

Segundo Avesani Neto (2013), a construção de aterros e outras estruturas sobre camadas de solos de baixa capacidade de suporte é um desafio para projetistas e executores. Tal desafio demanda certa atenção no dimensionamento e utilização correta de

estruturas pertinentes ao caso, pois o recalque excessivo também traz danos muitas vezes irreversíveis para as estruturas construídas sobre este solo. Por outro lado, o avanço da tecnologia possibilitou aos envolvidos nessa área o uso de programas e ferramentas que auxiliem no estudo de soluções para os problemas recorrentes destes tipos de obra.

De acordo com Avesani Neto *et al.* (2012), para melhor entender o comportamento deste tipo de reforço, muitos autores realizaram ensaios de placa de pequena e grande escala em laboratório, outros propuseram métodos de cálculo que consideram a melhoria da capacidade de suporte devido à presença da

camada de geocélula. Ainda segundo os mesmos autores, outra forma de elevar o conhecimento dos mecanismos envolvidos neste tipo de reforço é a simulação numérica computacional. Utilizando-se de pacotes computacionais de elementos finitos (MEF), é possível simular e verificar em diferentes escalas, tanto o comportamento do reforço bem como o seu desempenho.

Devido ao longo tempo necessário na execução dos ensaios, foi utilizado, neste trabalho, o *software SIGMA/W*, pertencente ao programa *GeoStudio/2012*, tomando como base dados de ensaios obtidos no trabalho de Meneses (2004). As simulações deste trabalho utilizaram modelos semelhantes ao utilizado no estudo experimental de Meneses (2004). No entanto, alguns parâmetros dos geossintéticos utilizados nos ensaios, tiveram que ser adotados de modo a garantir resultados semelhantes aos obtidos em laboratório.

As simulações computacionais seguem o mesmo modelo de dimensão e disposição dos ensaios realizados em laboratório, simulando diversas cargas em areia apoiada sobre um solo mole. A camada de areia foi simulada em três condições: sem reforço, reforçada apenas com geocélula e reforçada com a combinação de geocélula e geogrelha. Foram utilizadas geocélulas de geotêxtil com ligações costuradas e com alturas de 5, 10 e 15 cm.

Mhaiskar e Mandal (1996) realizaram ensaios de laboratórios e simulações numéricas, a partir dos quais pôde-se perceber que por ambos os métodos, com o aumento da razão de forma (h/d), houve melhoria na capacidade de carga e redução dos deslocamentos. Ainda de acordo com as observações feitas por estes autores nas simulações numéricas, o bulbo de tensões tendeu a se concentrar na camada que recebeu o reforço.

De acordo com Meneses (2004), o desenvolvimento das geocélulas, nas suas primeiras aplicações, aconteceu por motivações militares. O U.S. Army Corps of Engineering pesquisou técnicas para a rápida construção de estradas de areia para pouso e decolagem em praias ou operações em áreas desérticas. A tecnologia foi assimilada rapidamente para fins civis, fazendo com que este produto passasse a

ser produzido comercialmente, a partir do início dos anos 80.

A técnica empregada tem uma linha de raciocínio muito simples, que é o confinamento de solo granular pelo preenchimento de pequenas células com este solo, garantindo assim, que não exista um espalhamento lateral do material e que a resistência ao cisalhamento deste solo confinado seja aumentada.

De acordo com Craig (1992), podemos definir a compactação do solo como o aumento de sua densidade pela acomodação de partículas, ficando estas muito próximas umas das outras e consequentemente, reduzindo o volume de ar (vazios) com esse rearranjo das partículas.

Segundo Lambe & Whitman (1979), a resistência ao cisalhamento dos solos deve-se a dois fatores. O primeiro fator inclui, principalmente, o índice de vazios e a tensão de confinamento a qual esse solo está submetido. Já o segundo fator, inclui os solos que possuem as mesmas condições de confinamento, mas apresentam resultados completamente diferentes, destacando-se nesse grupo a forma e granulometria do material.

Em seus estudos, Winterkorn & Hsai (1975) descreveram a relação entre o grau de compactação relativa e ângulo de atrito, mostrando que quanto maior for a compactação do solo, maior é a sua resistência.

O grau de compactação de uma camada de solo mole está diretamente relacionado à resistência da camada a qual está apoiada. Segundo Leonards (1962), quando se tem um aterro sobre solo mole, a compactação, que pode ser obtida nas três primeiras camadas diretamente posicionadas sobre o solo mole, não será tão alta quanto às obtidas nas demais camadas.

Assim, o objetivo do presente trabalho é mostrar a possibilidade do uso do *software SIGMA/W* para a estimativa da melhoria da capacidade de carga ocasionada pelo reforço de um solo mole com o auxílio de geossintéticos. Essas características devem ser levadas em consideração, quando não é possível, em determinadas obras, seja física ou economicamente, a remoção da camada de solo mole.

Este artigo é formado por 3 seções, além desta introdutória. A seção 2 apresenta os parâmetros utilizados nas simulações, como o *software* utilizado, as características dos solos e dos geossintéticos, bem como o modelo de simulação. Já a seção 3 descreve os resultados obtidos nas simulações numéricas obtidas para a metodologia descrita. Finalmente, a seção 4 mostra as discussões acerca dos resultados obtidos com as simulações numéricas.

2 MATERIAIS E MÉTODO

Visando obter simulações numéricas através do SIGMA/W e compatíveis com estudos experimentais, consideraram-se os parâmetros físicos e mecânicos dos solos e geossintéticos utilizados por Meneses (2004).

A Tabela 1 mostra os parâmetros dos solos e geossintéticos utilizados na simulação.

As simulações numéricas foram realizadas a partir dos seguintes procedimentos: para o solo sem reforço, foi adicionada uma camada com 13 cm de areia e realizada a simulação com acréscimo de carga distribuída com posterior leitura dos recalques; depois, foi simulada uma camada com 18 cm de areia e repetido o processo; por fim, uma camada com 23 cm de areia foi simulada. As camadas de areia citadas acima não foram interpostas uma sobre a outra, mas sim, simuladas separadamente, de modo que um resultado não tivesse influência sobre o seguinte.

A Figura 1 ilustra como foi realizada a disposição em camadas dos materiais e a simulação com a aplicação da carga.

Para o solo reforçado com geocélula, foi

seguido procedimento semelhante, onde a camada de areia completamente saturada e argila com limite de liquidez de 62% foram separadas por geotêxtil. A camada de areia tinha 5 cm de espessura e apoiada nessa camada foi colocada a geocélula com material confinante (nesse caso a areia), com alturas de 5, 10 e 15 cm. Sobre a geocélula foi colocada outra camada de areia de 3 cm, que serviu de cobertura para a realização da prova de carga. O procedimento de simulação com carga crescente e leitura do recalque foi semelhante à simulação do solo sem reforço.

Tabela 1. Parâmetros dos solos e dos geossintéticos.

Tipo de material	Parâmetros dos materiais				
	v	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E (kPa)
Areia seca	0,334	16,69	35,0	0,00	40.000,00
Areia saturada	0,334	16,29	35,0	0,00	50.000,00
Argila	0,334	16,29	0,0	15,25	0,00
Geotêxtil	-	-	-	-	333,33
Geocélula	5 cm	0,490	-	-	7.500,00
	10 cm	0,490	-	-	15.000,00
	15 cm	0,490	-	-	22.500,00
Geogrelha	-	-	-	-	160,00

A Figura 2 mostra como foi realizada a simulação, utilizando a areia reforçada com geocélula.

Já a Figura 3 ilustra como foram dispostas as camadas de solo e de geossintéticos.

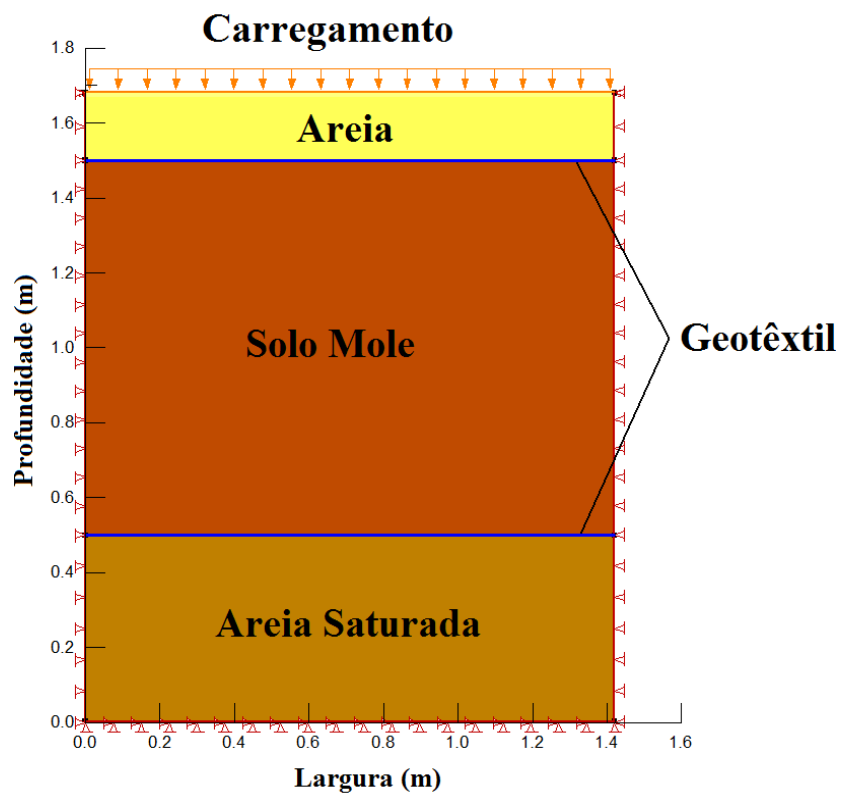


Figura 1. Modelo utilizado nas simulações sem reforço utilizando o GeoStudio/2012.

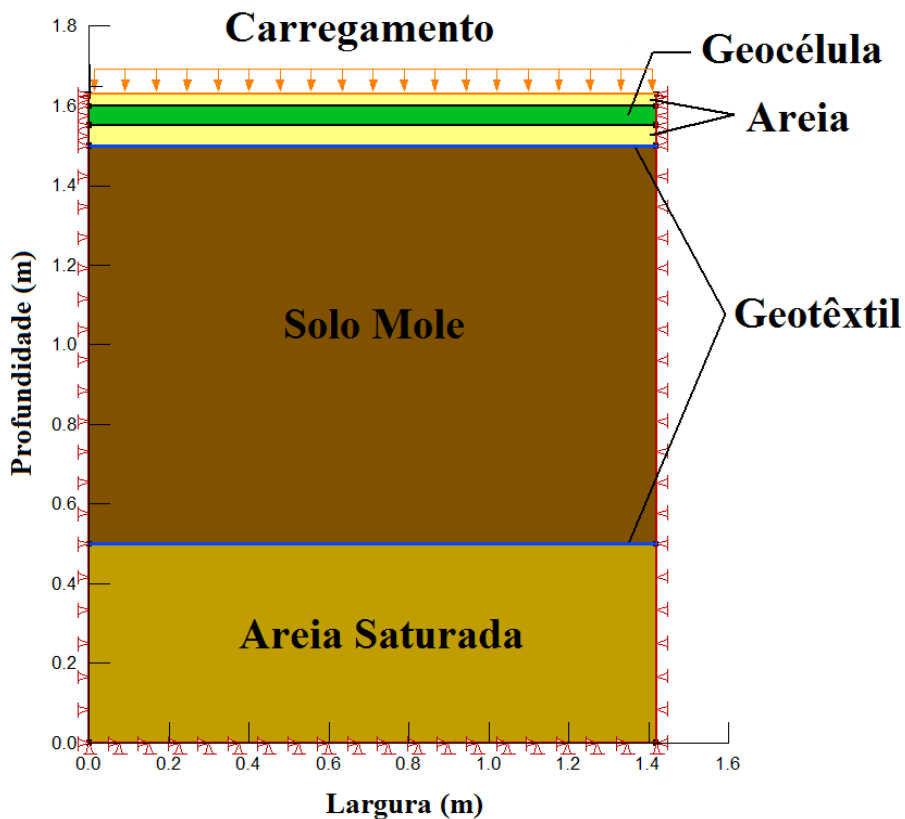


Figura 2. Reforço com geocélula.

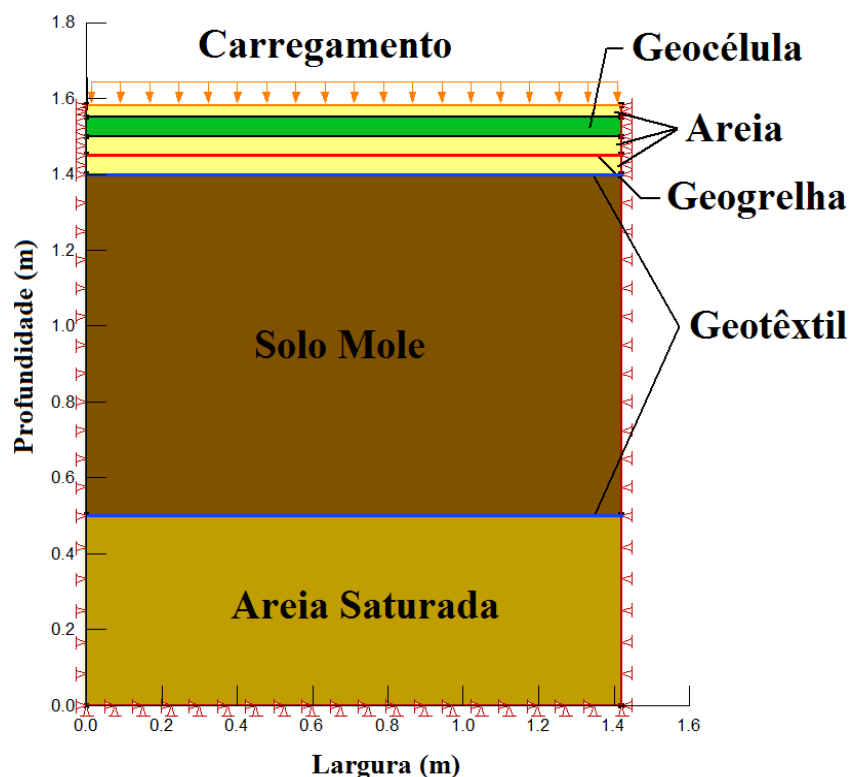


Figura 3. Reforço com geocélula e geogrelha.

Nos casos de uso de geogrelha, sobre a camada de regularização de areia com 5 cm foi colocada uma geogrelha tracionada. Sobre a geogrelha, foi colocada a geocélula com material confinante nas alturas de 5, 10 e 15 cm; e por fim, uma camada de recobrimento com 3 cm de areia.

A aplicação do carregamento foi dada de modo a obter valores de referência para a construção de um gráfico de recalque pela relação entre a carga e a coesão do solo mole. Esta relação foi adotada de modo que fosse possível comparar os resultados obtidos, através da modelagem, com os resultados experimentais apresentados por Meneses (2004) em seu trabalho, pois este autor utilizou essa relação para apresentação dos seus resultados.

Sendo assim, adotaram-se os seguintes valores para a relação de carga e coesão: 0; 2,46; 4,92; 7,38; 9,84; 12,30; e 14,75. Logo, estes valores foram multiplicados pela coesão do solo mole para determinação das cargas que deveriam ser aplicadas ao solo.

A aplicação dos carregamentos se deu de modo crescente e com carregamentos instantâneos, permitindo que fosse possível

obter uma leitura do deslocamento (recalque) ocorrido na superfície do solo para cada incremento de carga e consequentemente, para cada valor da relação carga/coesão.

Finalmente, com esses valores obtidos, foi realizada a construção dos gráficos que serão apresentados na próxima seção.

3 RESULTADOS

Feitas as leituras dos resultados das simulações, foi mais conveniente fazer uma compilação de todos os resultados num único gráfico, facilitando assim, a compreensão e análise dos dados. Em função disso, pode-se realizar uma comparação de resultados entre o solo sem reforço, solo reforçado com geocélula e solo reforçado com geocélula e geogrelha.

Para facilitar a apresentação dos resultados e a distinção entre os modelos, foi utilizado um código para cada um deles. Estes foram os mesmos adotados por Meneses (2004), sendo: “SR” para situação sem reforço, “Gpe” para reforçado com geocélula e “GGpe” para reforçado com geocélula e geogrelha, onde este

eram seguidos pela altura correspondente da geocélula (5, 10 ou 15 cm). Por exemplo, “GGpe10” corresponde ao modelo reforçado com geocélula de 10 cm de altura e com geogrelha.

Portanto, através da Figura 4 é demonstrado o gráfico com todos os resultados compilados, facilitando a leitura e interpretação dos dados obtidos nas simulações.

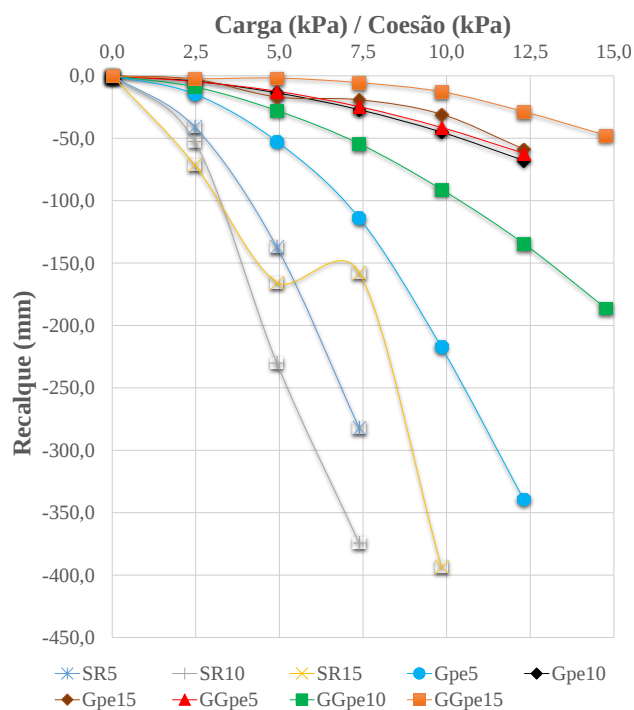


Figura 4. Resultados das simulações realizadas com o GeoStudio/2012.

Nota-se que as simulações com o solo sem reforço, foram os que apresentaram os maiores valores de recalque à medida que a sobrecarga aplicada ao solo era aumentada. Quando foi inserido o reforço apenas com a geocélula, nota-se que a altura do material utilizado para o reforço já impede que o solo mole apresente um recalque elevado. E quando é feita a combinação com outro material geossintético, no caso a combinação de geocélula com a geogrelha, o recalque do solo reduz consideravelmente.

Partindo da construção das curvas de carga/coesão por recalque, foi possível realizar comparações entre os resultados obtidos por meio das análises numéricas e dos resultados experimentais de Meneses (2004).

A comparação entre estes resultados foi

realizada por meio de gráficos, seguindo o apresentado nas Figuras 5 e 6.

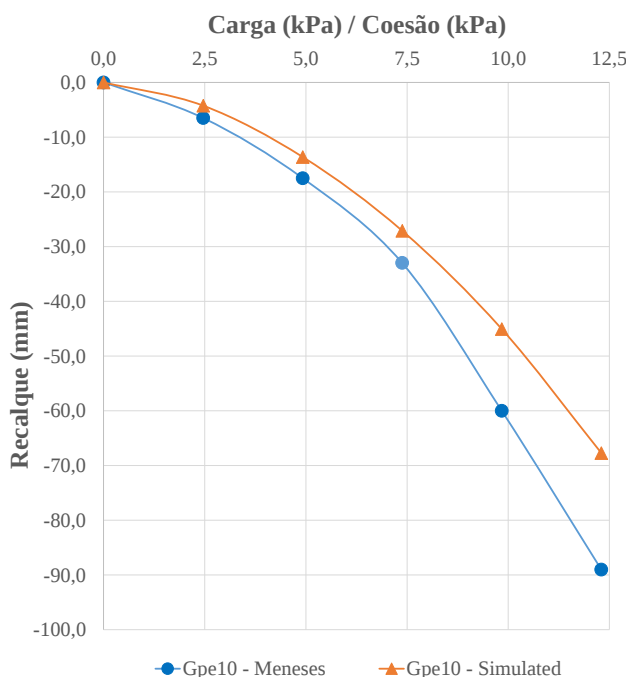


Figura 5. Comparação entre resultados experimentais e numéricos – Reforço com geocélula (10 cm).

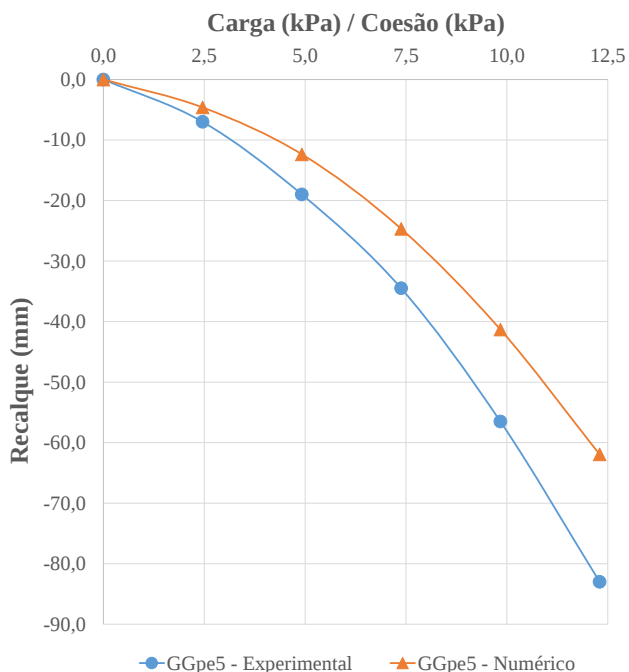


Figura 6. Comparação entre resultados experimentais e numéricos – Reforço com geocélula (5 cm) e geogrelha.

4 DISCUSSÕES

Em se tratando de resultados em curto prazo, sabe-se que os *softwares* são ferramentas muito

úteis para obter resultados de maneira segura, desde que, estes sejam utilizados de forma correta, com parâmetros reais e dados coerentes. Para que sejam realizados os experimentos em laboratório, o tempo demandado para obter os resultados, certamente, seria muito maior que o tempo utilizado para realizar essas simulações. Estima-se que para cada ensaio citado aqui, custaria ao profissional da área, aproximadamente uma semana, entre montagem de toda a estrutura envolvida e a realização do ensaio. Já com o uso da ferramenta, esse tempo pode ser bastante reduzido e trazer resultados confiáveis.

Os valores dos recalques provenientes das simulações numéricas foram compatíveis com os resultados experimentais e ambos mostraram que o solo mole, quando reforçado com geocélula, apresenta uma diminuição significativa do recalque e aumento da capacidade de carga. A combinação de geocélula e geogrelha permitiu uma melhoria ainda mais significativa no desempenho do solo quando submetidos aos esforços impostos. Na simulação numérica ainda foi possível analisar o desenvolvimento das tensões e deformações no solo com o acréscimo da carga distribuída.

Observa-se, através das Figuras 5 e 6, que o comportamento dos deslocamentos obtidos por meio numérico, muito se aproximou daquele obtido experimentalmente por Meneses (2004). Outra conclusão que se pode ter, através destes gráficos, é de que os valores encontrados foram bem representativos do modelo real, apresentando uma pequena variação de valores, que pode ter ocorrido devido a estimativa de algum parâmetro que foi considerado nas análises.

Vale ressaltar que os resultados apresentados são de uma simulação numérica, considerando como referência, parâmetros e resultados obtidos experimentalmente por Meneses (2004). Contudo, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, validando os modelos experimentais para este caso em específico.

REFERÊNCIAS

- Avesani Neto, J.O. (2013) - *Desenvolvimento de uma metodologia de cálculo e simulações numéricas aplicadas na melhoria da capacidade de carga de solos reforçados com geocélula*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, EESC – São Carlos.
- Avesani Neto, J.O., et al. (2012) - *Simulação numérica de um aterro sobre solo mole reforçado com geocélula*, COBRAMSEG 2014.
- Craig, R.F. (1992) – *Soil Mechanics*, 5th Edition, Chapman & Hall, New York.
- Lambe, T.W. & Whitman, R.B. (1979) – *Soils Mechanics*, SI Version, John Wiley & Sons, New York.
- Leonards, G.A. (1962) – *Foundation Engineering*, McGraw Hill Civil Engineering Series, McGraw-Hill Book Company.
- Meneses, A. L. de (2004) – *Utilização de Geocélulas em Reforço de Solo Mole*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, EESC-São Carlos.
- Mhaikar, S.Y., Mandalt, J.N. (1996). Investigations on soft clay subgrade strengthening using geocells. *Construction and Building Materials* 10 (4), 281–286.
- Winterkorn, F. Hans & Hsai, Y. F. (1975) – *Foundation Engineering Handbook*, New York.