

# XV ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

Universidade de Fortaleza  
19 a 23 de outubro de 2015

## Acréscimo de carga no solo devido a execução de um aterro: Uma análise comparativa para estimativa do novo estado de tensões do solo

Fernando Feitosa Monteiro<sup>1</sup> (PG), Yago Machado Pereira de Matos<sup>2</sup> (IC), Guilherme Akira Feijó Hori (IC)<sup>3</sup>, Marcos Fábio Porto de Aguiar<sup>4</sup> (PQ), Francisco Heber Lacerda de Oliveira<sup>5</sup> (PQ).

*1Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza-CE;*

*2Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE*

*3Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE*

*4 Professor de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE*

*5Professor de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE .*

*engffmonteiro@gmail.com*

*Palavras-chave: Acréscimo de tensões. Modelagem numérica. Métodos analíticos .*

### Resumo

O presente artigo abrange, através de pesquisa bibliográfica, realização de análises analíticas e computacionais, a mudança do estado de tensões no solo após a construção de um aterro rodoviário. São apresentados os métodos analíticos para o cálculo do acréscimo de cargas baseados na teoria da elasticidade e dos conceitos dos métodos numéricos utilizados para a modelagem computacional do estudo de caso. Por fim, realiza-se a modelagem computacional da construção do aterro rodoviário e compara-se os métodos utilizados para a estimativa do novo estado de tensões do solo de fundação para um ponto localizado a 10 metros abaixo do aterro no solo de fundação, abaixo do ponto mais alto a esquerda na plataforma do aterro. O novo estado de tensões é composto por tensões cisalhantes com valores de 22,1 kPa e tensões normais  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  de 358 e 145,4 para a análise computacional, e tensões cisalhantes com valores de 8,52 kPa, tensões normais  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  de 363,48 e 173,84 kPa para a análise analítica, assim, apresentando diferenças de percentuais de 61%, 2% e 16% entre os métodos.

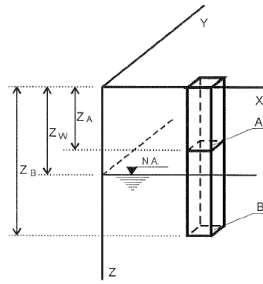
### Introdução

#### Tensões no solo

A compreensão das tensões atuantes em um maciço de terra, sejam elas advindas do peso próprio ou do efeito de carregamentos em superfície, ou ainda pelo alívio de cargas causado por escavações, é de fundamental importância no entendimento do comportamento de praticamente todas as obras de engenharia geotécnica. Há uma necessidade de se conhecer a distribuição de tensões (pressões) nas várias profundidades abaixo do terreno para a solução de problemas de recalques, empuxo de terra, capacidade de carga no solo (MARANGON 2009).

Na análise do comportamento dos solos, as tensões devidas ao peso próprio têm valores consideráveis. Visando determinar as pressões atuantes na massa de solo, nas diversas profundidades de um maciço, quando consideramos somente o peso próprio, sem cargas exteriores atuantes. Estas pressões são denominadas pressões geostáticas. Quando o solo é constituído de camadas aproximadamente horizontais, a tensão vertical resulta da somatória do efeito das diversas camadas (PINTO, 2006).

A Figura 1 mostra um plano horizontal A acima do nível d'água, em que o peso de um prisma de terra definido por esse plano, dividido pela área, indica a tensão vertical expressa pela Equação 1:



**Figura 1:** Tensões num plano horizontal

$$\sigma_v = \frac{\gamma_n \cdot Z_A \cdot \text{área}}{\text{área}} = \gamma_n \cdot Z_A \quad (1)$$

### Métodos Numéricos

Segundo Buffoni (2002), os métodos numéricos correspondem a um conjunto de ferramentas ou métodos usados para se obter a solução de problemas matemáticos de forma aproximada. A análise numérica é o estudo de algoritmos que buscam resultados numéricos de problemas das mais diferentes áreas do conhecimento humano, modelados matematicamente.

### Método dos elementos finitos

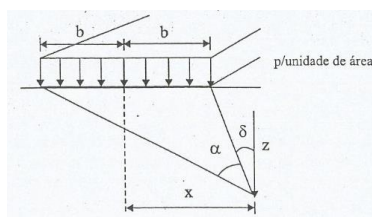
O método dos elementos finitos são uma forma de resolução numérica de um sistema de equações diferenciais parciais. Segundo Azevedo (2012), no âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e surge, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes, barragens, etc. Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares.

### Soluções analíticas baseadas na teoria da elasticidade

De acordo com Azevedo (2007), as soluções apresentadas com base na teoria da elasticidade foram obtidas supondo-se o solo como um material perfeitamente elástico, homogêneo e isotrópico. É válido, portanto, o princípio da superposição de efeitos, segundo o qual a tensão resultante de carregamentos distintos é a soma das tensões de cada carregamento atuando independentemente.

#### a) Carregamento Retangular

Na Figura 2, são exibidos os acréscimos de carga devido a um carregamento retangular distribuído em faixa infinita na superfície de um semi-espaço infinito.



**Figura 2:** Carga vertical distribuída em faixa infinita na superfície de um semi-espaço infinito

Esse tipo de carregamento ocorre, por exemplo, em fundações de muros, em sapatas de fundação (sapatas corridas), em aterros rodoviários, que transmitem ao terreno um carregamento distribuído,  $p$ , em

uma faixa de comprimento infinito. (AZEVEDO, 2007). Os acréscimos de tensão são dados pelas Equações 2, 3 e 4:

$$\Delta\sigma_y = \frac{p}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{p}{\pi} [\alpha - \sin \alpha \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (3)$$

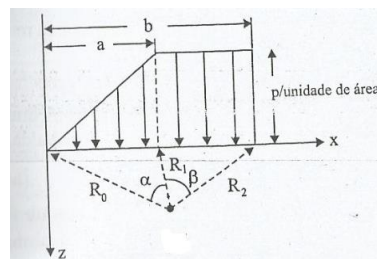
$$\Delta\tau_{xy} = \frac{p}{\pi} [\sin \alpha \cos(\alpha + 2\delta)] \quad (4)$$

Onde,

$\alpha$  e  $\delta$  : ângulos em radianos

### b) Carregamento Trapezoidal

Na Figura 3, são mostrados os acréscimos de carga devido a um carregamento trapezoidal distribuído na superfície de um semi-espaço infinito.



**Figura 3:** Carga vertical trapezoidal distribuída na superfície de um semi-espaço infinito (AZEVEDO, 2007)

Essa situação pode ocorrer no caso, por exemplo, em muro de seção retangular ou trapezoidal, sendo esta última uma combinação de um carregamento vertical uniformemente distribuído e de um carregamento vertical linearmente crescente. No último caso, os efeitos dos dois carregamentos podem ser somados de acordo com o princípio da superposição de efeitos (AZEVEDO, 2007). Os acréscimos de tensão são dados pelas Equações 5, 6 e 7:

$$\Delta\sigma_y = \frac{p}{\pi} \left[ \beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{R_2} (x - b) \right] \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{p}{\pi} \left[ \beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{R_2} (x - b) + \frac{2z}{a} \ln \left( \frac{R_1}{R_0} \right) \right] \quad (6)$$

$$\Delta\tau_{xy} = \frac{p}{\pi} \left[ \frac{z\alpha}{a} - \frac{z^2}{R_2^2} \right] \quad (7)$$

Onde,

z: profundidade do ponto analisado

$\beta$ ,  $\alpha$ : ângulos em radianos

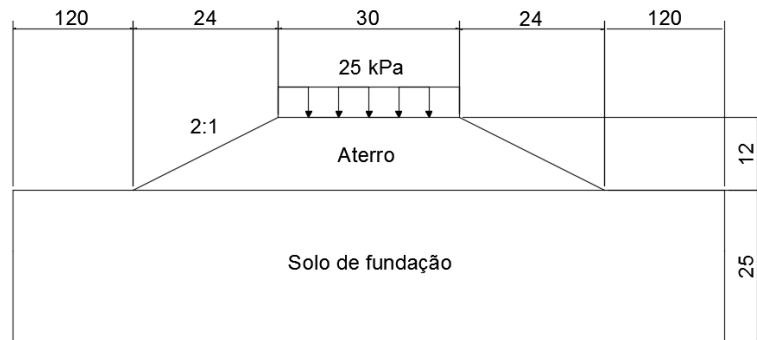
## Metodologia

A metodologia utilizada na composição deste trabalho consistiu, inicialmente de uma revisão bibliográfica feita a partir de livros, manuais e normas técnicas. Em seguida, foram realizados ensaios de caracterização, ensaios de percolação, ensaios de adensamento e ensaios de cisalhamento direto do solo do aterro e do solo de fundação no laboratório. Dessa forma, obtendo os parâmetros de resistência e deformabilidade para a realização da modelagem numérica com suas devidas condições de contorno. A

análise analítica é realizada a partir da definição da geometria do problema e a partir do ponto escolhido para o estudo do estado de tensões.

## Resultados e Discussão

A situação a ser modelada se trata de uma construção em etapas de um aterro rodoviário com altura de 12 metros e a plataforma de 30 metros com taludes de 2(H):1(V). A Figura 4 mostra uma seção típica da estrutura, onde o solo de fundação apresenta uma profundidade de 25 metros e a sobrecarga em cima do aterro correspondente a 25 kPa.



**Figura 4:** Descrição da estrutura

A análise será realizada em 8 etapas, sendo a primeira o estado geostático do solo de fundação, em seguida, são adicionadas etapas para a construção do aterro, onde cada etapa correspondente a execução de 2 metros de altura do aterro. No oitavo estágio, será acrescentada uma sobrecarga de 25 kPa uniformemente distribuída.

### Estudos Geotécnicos

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios de laboratório, foram coletados na Universidade Federal do Ceará, próximo ao Laboratório de Mecânica dos Solos, onde foi executada uma vala com profundidade de 0,5m, foram retiradas duas amostras para o solo de fundação, amostras indeformadas com os cilindros Shelby e cerca de 20 kg de amostra deformada para caracterização. O solo do aterro, foi cedido pelo o Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará. Realizou-se ensaios de caracterização com os dois solos (análise granulométrica, limites de plasticidade e liquidez, densidade real do grão), ensaios de percolação, ensaios oedométrico e ensaios de cisalhamento direto.

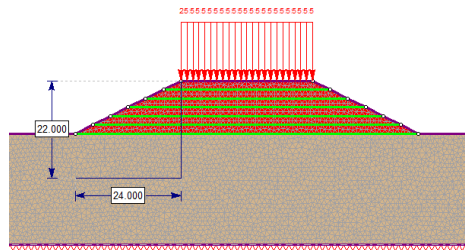
O solo de fundação é composto por: 1% de areia grossa e 1% de pedregulho, 19% de areia média, 32% de areia fina e 47% de silte e argila. Pelo fato de o solo não apresentar plasticidade, indica que grande parte da constituição dos finos é composta de silte. Para o solo do aterro, não foi identificada a presença de pedregulhos e areia grossa, possuindo a seguinte composição: 56% de areia média, 38% de areia fina e 6% de silte e argila. Na Tabela 1, são exibidos os resultados dos ensaios realizados.

**Tabela 1:** Resultados dos ensaios

| Solo     | Densidade real | Ângulo de atrito (graus) | Limites de plasticidade | Permeabilidade (cm/s) | Módulo de Elasticidade (Mpa) | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Coefficiente de empuxo |
|----------|----------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Aterro   | 2,61           | 39,19                    | NP                      | 1,57E-03              | 36,35                        | 18                                   | 0,37                   |
| Fundação | 2,62           | 35,75                    | NP                      | 1,95E-03              | 27,64                        | 16,5                                 | 0,42                   |

Define-se os estágios de análise, totalizando 8 estágios, onde o 1º estágio refere-se ao solo no repouso, ou seja, na situação geostática. No 2º estágio em diante foi considerada execução das camadas do aterro,

onde foram executados 2 metros por estágio e a aplicação do carregamento distribuído uniformemente na plataforma do aterro de 25 kPa no 8º estágio. As condições de contorno são definidas na modelagem, restringindo deslocamentos na fronteira inferior em contato com o impenetrável (rocha), onde não ocorrerão deslocamentos verticais e nas fronteiras laterais não ocorrerão deslocamentos. O ponto utilizado para a análise, está localizado a 10 metros abaixo do aterro no solo de fundação, abaixo do ponto mais alto a esquerda na plataforma do aterro, ponto de coordenadas (144,15), como mostrado na Figura 5.



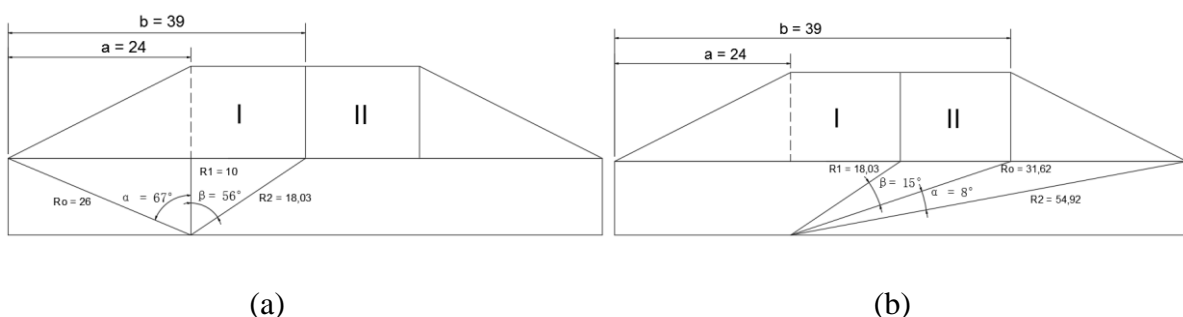
**Figura 5:** Indicação do nó analisado

### Análise das tensões utilizando o método analítico

O tensor de tensões no estado geostático calculado de forma analítica é representado pela matriz a seguir:

$$[S] = \begin{bmatrix} 69,3 & 0 & 0 \\ 0 & 165 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

Divide-se o aterro em duas partes iguais, e calcula-se a contribuição do acréscimo de tensões a partir das equações apresentadas anteriormente, onde  $p = 216 \text{ kPa}$ ,  $z = 10 \text{ m}$  e  $x = 24 \text{ m}$ . Na Figura 6a e 6b visualiza-se os parâmetros de entrada do método analítico, na Figura 6b,  $x = 54 \text{ m}$ . Assim os acréscimos de carga devido a carga trapezoidal tem valores de  $\Delta\sigma_y = 187 \text{ kPa}$ ,  $\Delta\sigma_x = 100,82 \text{ kPa}$  e  $\Delta\tau_{xy} = 4,80 \text{ kPa}$ . Após o cálculo da contribuição da carga trapezoidal, calcula-se a contribuição do carregamento retangular devido à sobrecarga, onde os ângulos  $\alpha$  e  $\delta$  tem valores de  $54^\circ$  e  $0^\circ$  respectivamente. Assim, os valores obtidos devido o acréscimo da carga retangular tem os seguintes valores:  $\Delta\sigma_y = 11,28 \text{ kPa}$ ,  $\Delta\sigma_x = 3,72 \text{ kPa}$  e  $\Delta\tau_{xy} = 3,78 \text{ kPa}$ .



**Figura 6:** Geometria do método analítico

De acordo com os cálculos realizados através das soluções básicas, o novo tensor de tensões encontrado no estágio 8 (onde ocorre a sobrecarga) é:

$$[S'] = \begin{bmatrix} 173,84 & 8,58 & 0 \\ 8,58 & 363,48 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

## Análise das tensões utilizando o método computacional

Foram realizadas análises elástico-lineares a partir da modelagem computacional do PHASE<sup>2</sup>, utilizando o módulo de elasticidade obtido a partir do, o tensor de tensões obtido é exibido a seguir:

$$[S'''] = \begin{bmatrix} 145,4 & 22,1 & 0 \\ 22,1 & 358 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

A partir dos resultados obtidos, é possível comparar os resultados do método analítico e do método computacional, na Tabela 2 são mostradas as diferenças entres os métodos utilizados.

**Tabela 2:** Comparação do método analítico com o método computacional

| Método                  | $\sigma_y$ (kPa) | $\sigma_x$ (kPa) | $\tau_{xy}$ (kPa) |
|-------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Computacional (PHASE 2) | 358              | 145,4            | 22,1              |
| Analítico               | 363,48           | 173,84           | 8,58              |
| Diferença (%)           | 2%               | 16%              | 61%               |

## Conclusão

As soluções baseadas na teoria da elasticidade têm uma grande importância, devido ao fato de terem sido as soluções precursoras nos cálculos dos acréscimos de tensões, otimizando o tempo de cálculo do engenheiro. A maioria dos solos não podem ser considerados isotrópicos e elásticos de forma satisfatória, sendo necessário um modelo mais elaborado para descrever o comportamento do solo.

No estado estágio inicial, o solo de fundação encontra-se num estado de tensões geostáticas, como verificado pelo software e por análises analíticas, onde as tensões cisalhantes são 0, e as tensões  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  possuem valores de 165 e 69,3 kPa, para um ponto localizado a dez metros de profundidade. Após a construção do aterro o solo de fundação apresenta um novo estado de tensões, composto por tensões cisalhantes com valores de 22,1 kPa e tensões normais  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  de 358 e 145,4 para a análise computacional, e tensões cisalhantes com valores de 8,52 kPa e tensões normais  $\sigma_y$  e  $\sigma_x$  de 363,48 e 173,84 kPa para a análise analítica, assim, apresentando diferenças de percentuais de 61%, 2% e 16% entre os métodos. Os valores obtidos são aproximações razoáveis, pela razão do método analítico ter sido desenvolvido para condições específicas que não são completamente simuladas pelo software.

## Referências

AZEVEDO, Álvaro F.M. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. 2003. Disponível em: [http://www.arquivoescolar.org/bitstream/arquivo-e/117/1/Livro\\_MEF.pdf](http://www.arquivoescolar.org/bitstream/arquivo-e/117/1/Livro_MEF.pdf). Acesso em: 01/07/2015

AZEVEDO, L.C.D. (2007). **Análise de Tensões e Deformações**. Universidade Federal de Viçosa.

BUFFONI, Salete Souza de Oliveira. **Apostila de Introdução Aos Métodos Numéricos**. 2002. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/salete/imn/calnumI.pdf>. Acesso em: 28/06/2015

MARANGON, M . **Tensões no solo**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009 . Disponível em <[http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2\\_unid02.pdf](http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/ms2_unid02.pdf)> Acesso em : 08 Maio, 2015

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3.ed São Paulo: Oficina de Textos, 2006

## Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pela a bolsa de <sup>1</sup>