

Análise de assentamento do terreno

Programa: MEF

Arquivo: Demo_manual_21.gmk

Este exemplo contém a análise do assentamento do terreno sob o carregamento de uma sobrecarga, através do Método dos Elementos Finitos.

Definição do problema

Determine o assentamento do terreno induzido pelo carregamento de uma sobrecarga contínua $q = 250 \text{ kPa}$ ao longo de 4.0 m e o assentamento total após relaxamento da carga. O perfil geológico é homogêneo; os parâmetros do solo são os seguintes:

- Peso volúmico do solo: $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$
- Módulo de elasticidade: $E = 15.0 \text{ MPa}$
- Módulo de relaxamento: $E_{ur} = 45.0 \text{ MPa}$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.35$
- Coesão do solo: $c_{ef} = 8.0 \text{ kPa}$
- Ângulo de atrito interno: $\varphi_{ef} = 29.0^\circ$
- Peso volúmico do solo saturado: $\gamma_{sat} = 21.0 \text{ kN/m}^3$

Quanto ao *modelo elástico modificado*, os parâmetros do solo considerados são:

- Módulo de deformação do solo: $E_{def} = 15.0 \text{ MPa}$
- Módulo de relaxamento: $E_{ur} = 45.0 \text{ MPa}$

Compare a análise de assentamento ou o valor da deformação vertical total d_z [mm] com outros modelos materiais (não vamos considerar os modelos Clam-Clay e Hipostático para argilas porque o solo é formado por um solo não coesivo).

Nota: Os modelos de Mohr-Coulomb e de Drucker Prager são utilizados na prática da engenharia mesmo para solos coesivos, porque estes modelos baseiam-se na rotura de cisalhamento e utilizam os parâmetros comuns dos solos e rochas (φ, c).

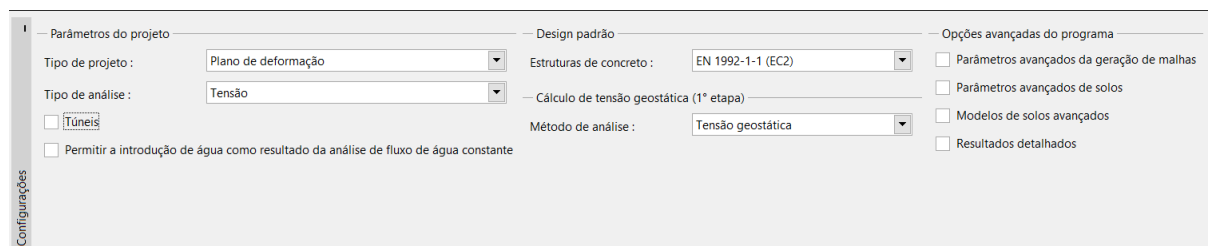
Resolução

Para esta análise, vamos utilizar o programa GEO5 MEF. Neste texto, vamos descrever a resolução deste problema passo-a-passo:

- Topologia: configuração e modelação do problema,
- Etapa de construção 1: análise da tensão geostática,
- Etapa de construção 2: introdução do carregamento da sobrecarga, análise de assentamento,
- Etapa de construção 3: relaxamento da sobrecarga aplicada na superfície do terreno, análise de assentamento do terreno,
- Avaliação dos resultados (conclusão).

Topologia: configuração e modelação do problema

Primeiro, vamos configurar o problema, onde caracterizamos o tipo de problema, o tipo de análise e o método de análise da tensão primária.



Configuração do problema – Características do problema; análise da tensão primária

Não vamos ativar as opções “Túneis” e “Introdução de dados avançada e resultados detalhados” – estas opções destinam-se a usuários experientes na utilização dos elementos finitos ou a um tipo de problemas diferente. A descrição destas opções não está incluída nos temas abordados e propósito deste manual.

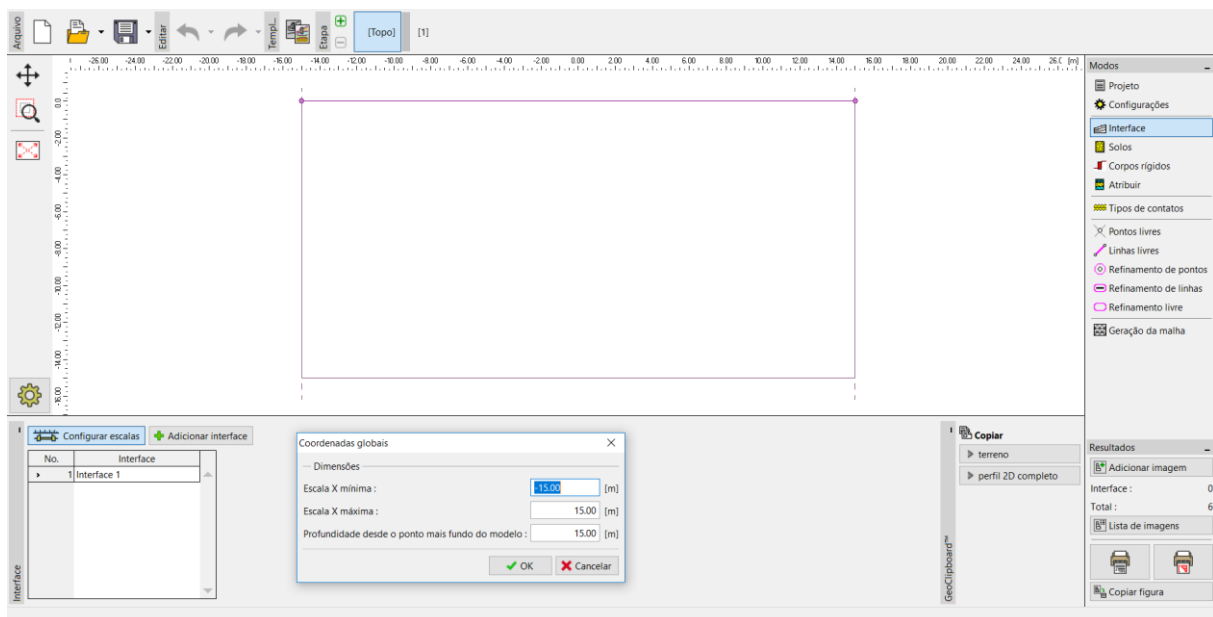
*Nota: Os **problemas planares (assumidas condições do plano de deformação)** são adequados para análises de estruturas lineares (túneis, aterros, escavações, barragens, etc.), para os quais se considera que a dimensão longitudinal da estrutura em análise é superior às dimensões laterais – são assumidas deformações nulas na direção do eixo y. A análise é realizada assumindo um plano de deformação (mais detalhes na Ajuda – F1). Nos capítulos seguintes são resolvidos outros tipos de problemas (simetria axial).*

Nota: O tipo de análise de **tensão** considera as tensões e deformações dentro da área em análise. Consiste no tipo de análise base; os restantes tipos de análise e opções (fluxo, estabilidade de taludes) são descritos à parte, em outros capítulos.

Nota: Estão disponíveis duas opções para a análise de **tensão primária** (para a etapa de construção 1):

- **Tensão geostática:** É o método standard para a análise da tensão geostática, considerando o peso morto dos solos e tensões horizontais de acordo com a teoria de elasticidade. O coeficiente de pressão lateral é dado por $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$.
- **Método K_0** (segundo Jáky, para solos sobreconsolidados, etc.).

Vamos definir as coordenadas globais (a dimensão do modelo numérico em análise) e a interface do terreno na janela “Interface”. Vamos definir as coordenadas globais de modo a que os resultados não sejam afetados pelas condições de fronteira. Para o nosso problema em particular, vamos definir os limites do modelo como $\langle -15\text{ m}; 15\text{ m} \rangle$ e definir a espessura da camada a verificar como 15.0 m. Vamos definir as coordenadas da superfície do terreno (x, z) como: [-15, 0]; [15, 0].



Janela “Interface”

Nota: Na Ajuda, são apresentados, e descritos em detalhe, valores de referência para definir os limites do modelo, de acordo com os diferentes problemas (mais detalhes na Ajuda – F1).

Quanto à presente análise, vamos escolher o modelo do solo de **Mohr-Coulomb** (no final deste exemplo é apresentada a comparação de vários modelos) e definir os parâmetros do solo específicos. Este modelo não linear permite o desenvolvimento de deformações plásticas e a distribuição de potenciais zonas de rotura.

The screenshot shows the 'Adicionar novos solos' (Add new soils) dialog box. It is divided into several sections:

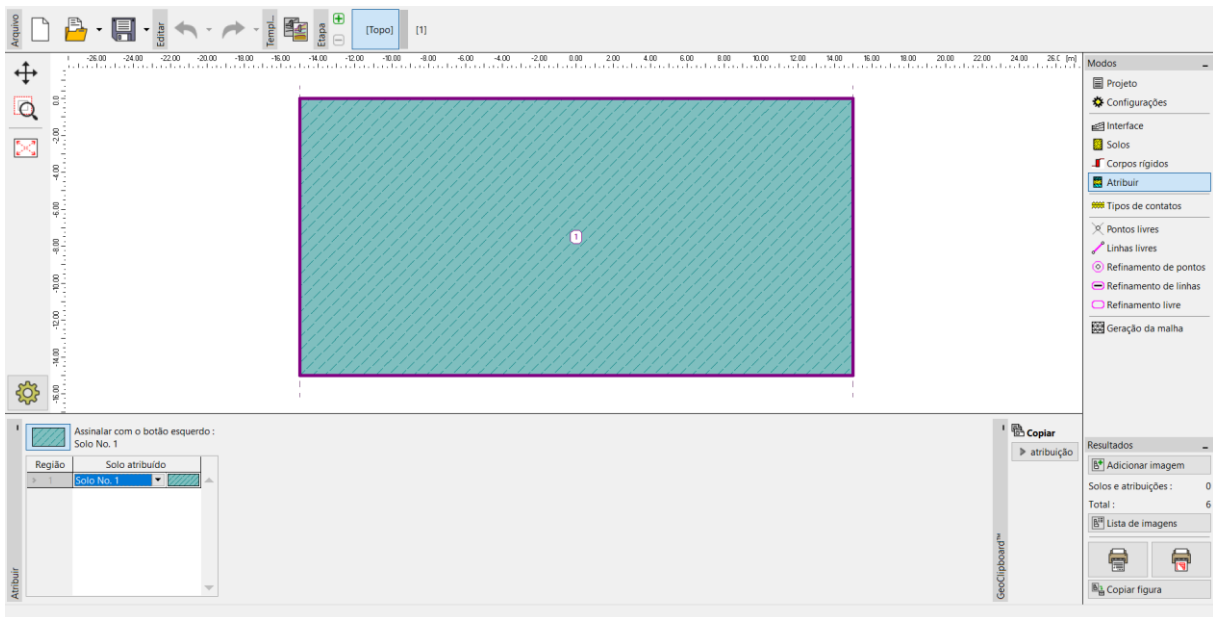
- Identificação:** Nome: Solo No. 1
- Modelo material:** Modelo material: Mohr - Coulomb
- Dados base:**
 - Peso volúmico: $\gamma = 19.00$ [kN/m³]
 - Módulo de Young: $E = 15.00$ [MPa]
 - Rigidez de acordo com a prof.: constante
 - Coefficiente de Poisson: $\nu = 0.35$ [-]
- Modelo Mohr - Coulomb:**
 - Modulo descarga/recarga: $E_{ur} = 45.00$ [MPa]
 - Ângulo de atrito interno: $\phi_{ef} = 29.00$ [°]
 - Coesão do solo: $c_{ef} = 8.00$ [kPa]
 - Ângulo de dilatação: $\psi = 0.00$ [°]
- Computação de empuxos:**
 - Cálculo da pressão hidrostática: padrão
 - Peso volúmico saturado: $\gamma_{sat} = 21.00$ [kN/m³]
- Desenhar:**
 - Categoria de padrão: GEO
 - Subcategoria: Solos (1 - 16)
 - Padrão: 1 Silte
 - Cor: [Teal color]
 - Fundo: automático
 - Saturação <10 - 90>: 50 [%]

Buttons at the bottom: Classificar, Limpar, Adicionar, Cancelar.

Definição dos parâmetros do solo

Nota: O modelo elástico assume um comportamento do solo de acordo com a lei de Hooke (material idealmente elástico). A principal vantagem deste modelo é que a análise é sempre executada até ao fim. A desvantagem é que o solo apenas assume este comportamento para um carregamento reduzido – não é adequado para estruturas reais. Por outro lado, é adequado para modelação de áreas em que a rotura plástica do material não é excedida (ex.: muros gabião, superfícies finais rígidas, etc.) ou para a verificação de modelos numéricos básicos.

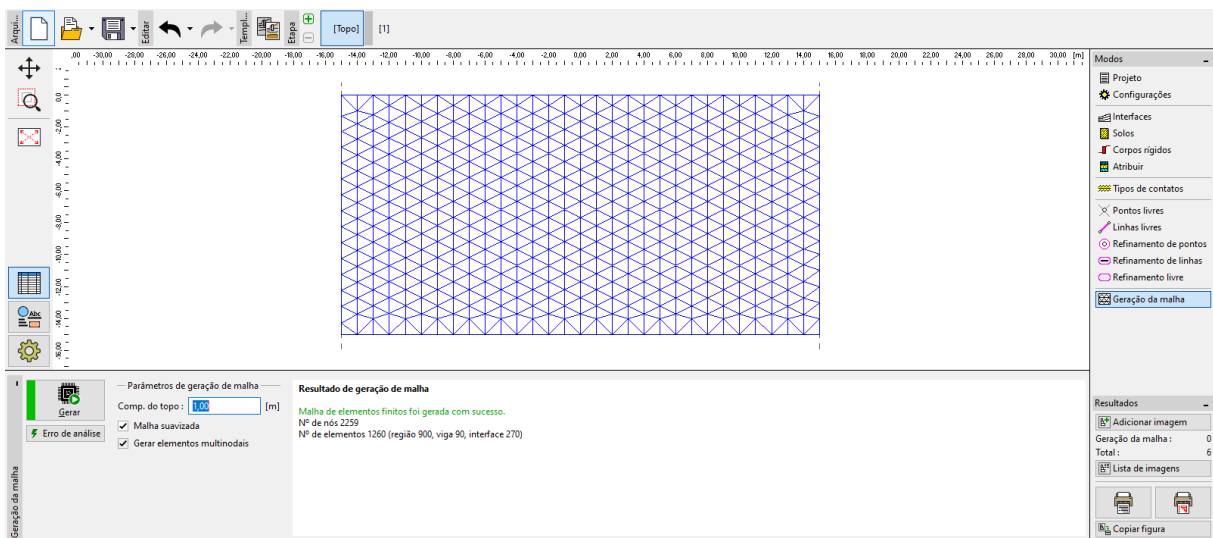
Seguidamente, vamos atribuir um solo à área criada.



Janela “Atribuir”

Não vamos utilizar as janelas para a definição dos tipos de contacto, pontos livres e linhas livres; estas não têm influencia no nosso problema.

O passo seguinte é gerar a malha de Elementos Finitos (EF). Para os parâmetros de geração da malha, vamos definir um comprimento de 1.0 m para as extremidades dos elementos (o comprimento da extremidade é escolhido de acordo com as dimensões do problema). Vamos seleccionar a opção “Suavizar malha” e clicar no botão **Gerar**. O programa irá gerar e suavizar a malha de EF automaticamente. Vamos verificar se a densidade da malha está adequada às dimensões do problema.



Gerar malha de elementos finitos – Topologia (malha triangular)

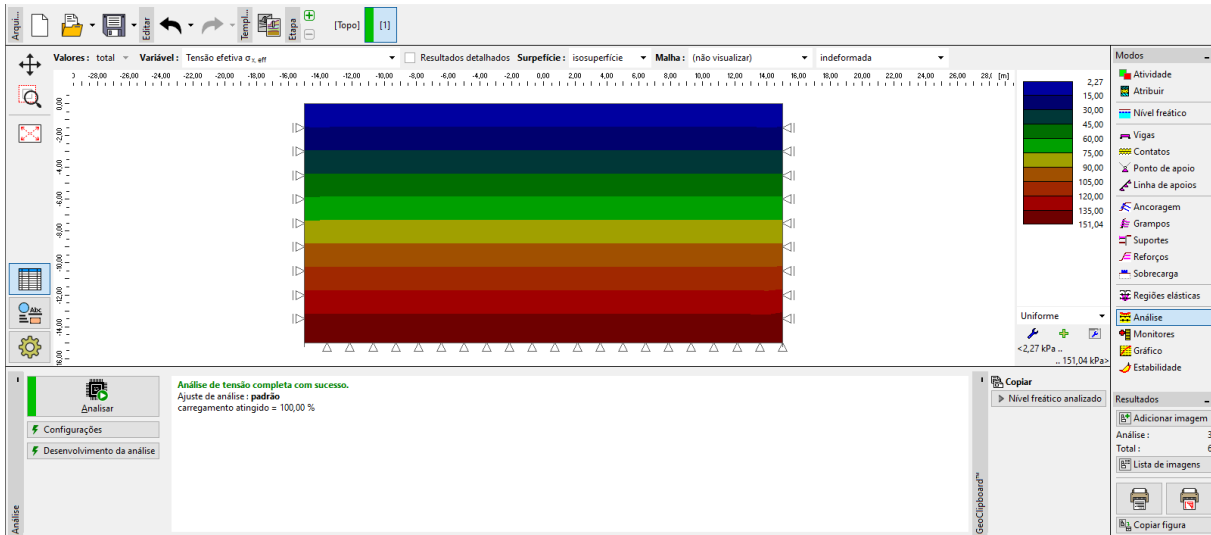
Nota: A malha triangular standard com elementos de seis nós é adequada à maioria de elementos geotécnicos. No caso do modo de introdução de dados avançado, o programa também permite gerar outros tipos de malhas (mistas, triangulares) – destinado a usuários experientes do MEF.

Nota: Uma malha de elementos finitos gerada corretamente é a condição básica para obter resultados que representem o comportamento real da estrutura de forma razoável. A malha EF influencia significativamente os valores obtidos, uma vez que a análise através do MEF começa por determinar os valores dos deslocamentos dos nós. As variáveis restantes (tensões, deformações) são derivadas a partir destes valores.

Infelizmente, é impossível formular uma regra geral para a densidade da malha correta, dado que cada problema é único. Para iniciantes em análises através do MEF, é recomendável a escolha de uma malha grosseira inicialmente, executar a análise e, posteriormente, ajustar a malha através de várias opções, que englobam a suavização da malha ou de algumas zonas da malha (também é possível refinar a densidade da malha à volta de pontos ou de linhas – podem ser encontrados mais detalhes em outros capítulos acerca do MEF). Em geral, quanto mais grosseira for a malha, mais rígido é o comportamento do modelo (o valor do assentamento resultante é menor).

Etapa de construção 1: análise da tensão primária

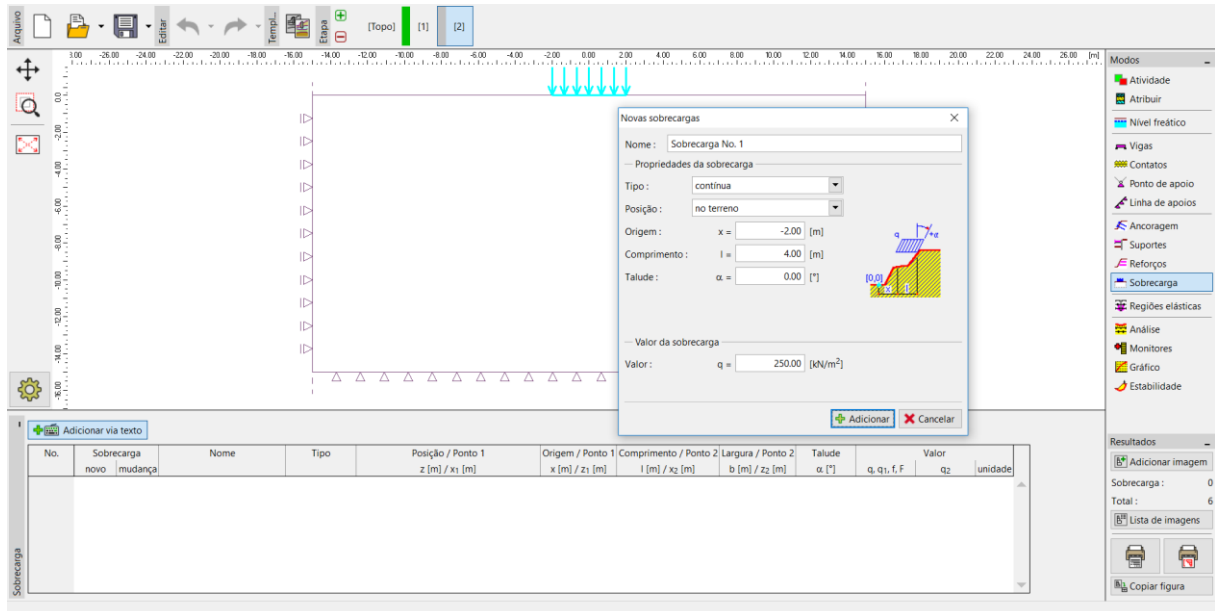
Quando a geração da malha de EF estiver concluída, passamos à Etapa 1 (através da barra de ferramentas na parte superior do ecrã) e executamos a análise da tensão geostática, ao clicar no botão **“Analisar”**. Seguidamente, vamos examinar os resultados para a tensão geostática $\sigma_{z,eff}$ [kPa].



Análise da etapa de construção 1 – tensão geostática primária

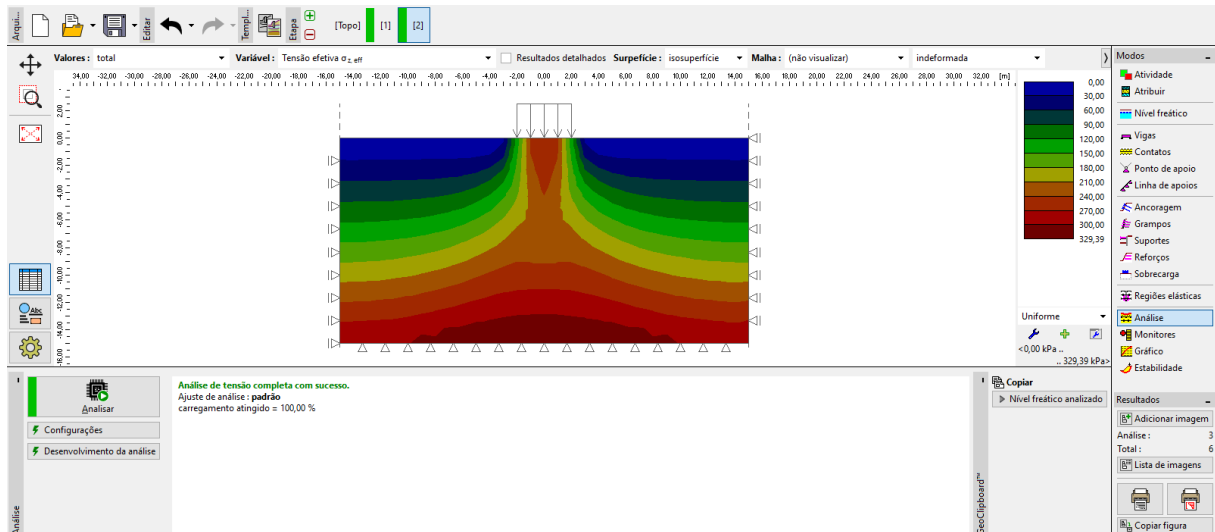
Etapa de construção 2: introdução do carregamento da sobrecarga

O passo seguinte é adicionar a etapa de construção 2. De seguida, vamos definir uma sobrecarga atuante na superfície do terreno e definir as características relevantes. O botão “Adicionar” serve para confirmar os dados introduzidos.



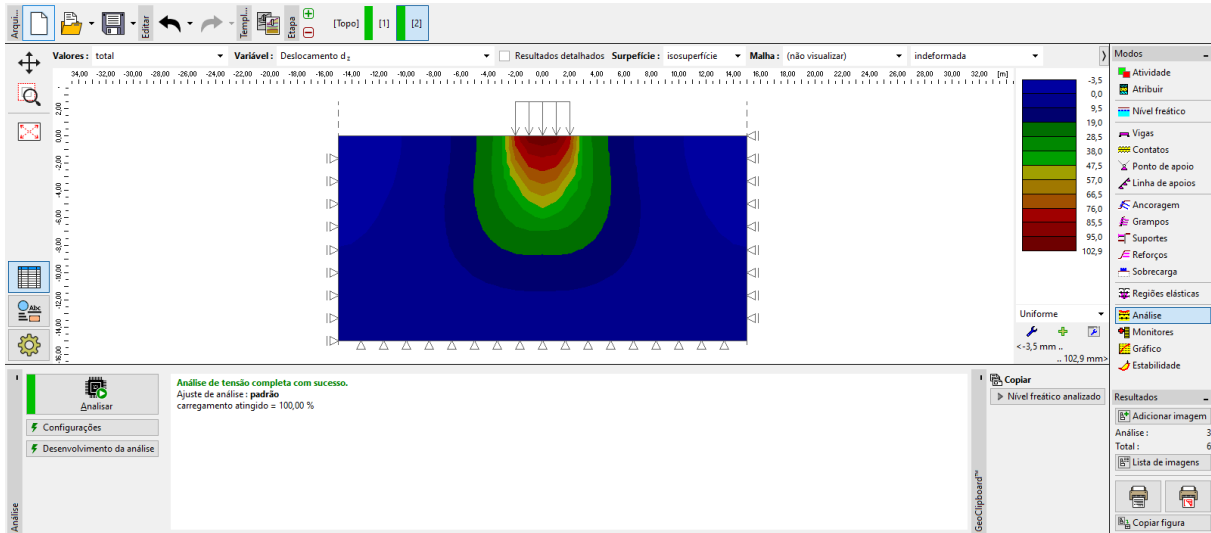
Definir novas sobrecargas

Nesta etapa de construção, vamos voltar a executar a análise e a examinar os resultados, começando pela tensão normal vertical $\sigma_{z,eff}$ [kPa].



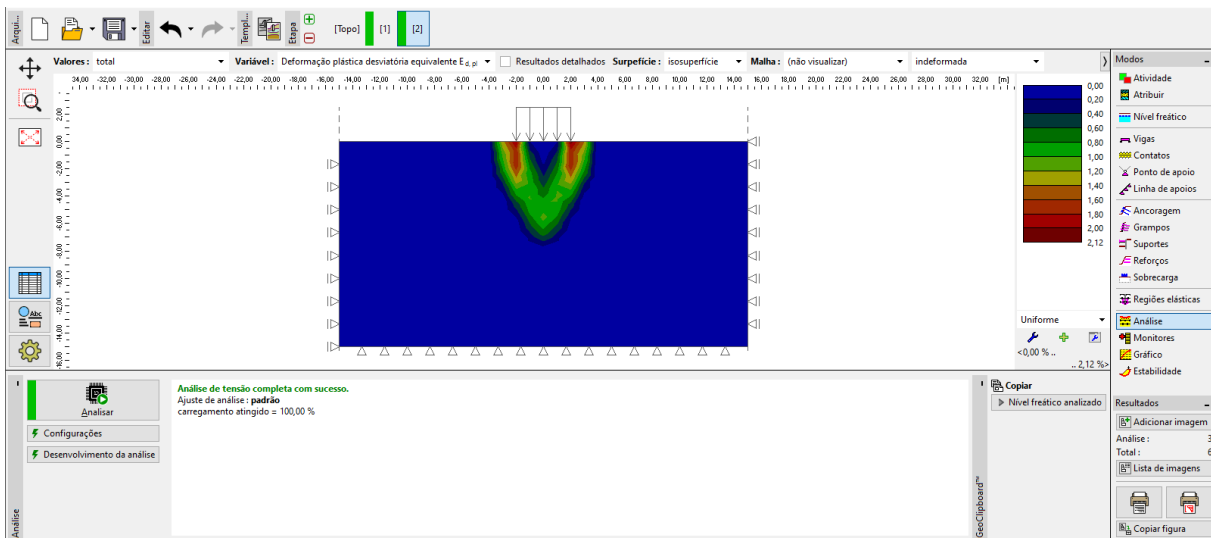
Análise da etapa de construção 2 – tensão normal vertical $\sigma_{z,eff}$ [kPa]

De seguida, vamos passar à visualização do esboço do assentamento vertical d_z [mm]. A partir da figura, é possível verificar que a deformação vertical máxima assume um valor de 102.9 mm.



Análise da etapa de construção 2 – deformação vertical devido à sobrecarga d_z [mm]

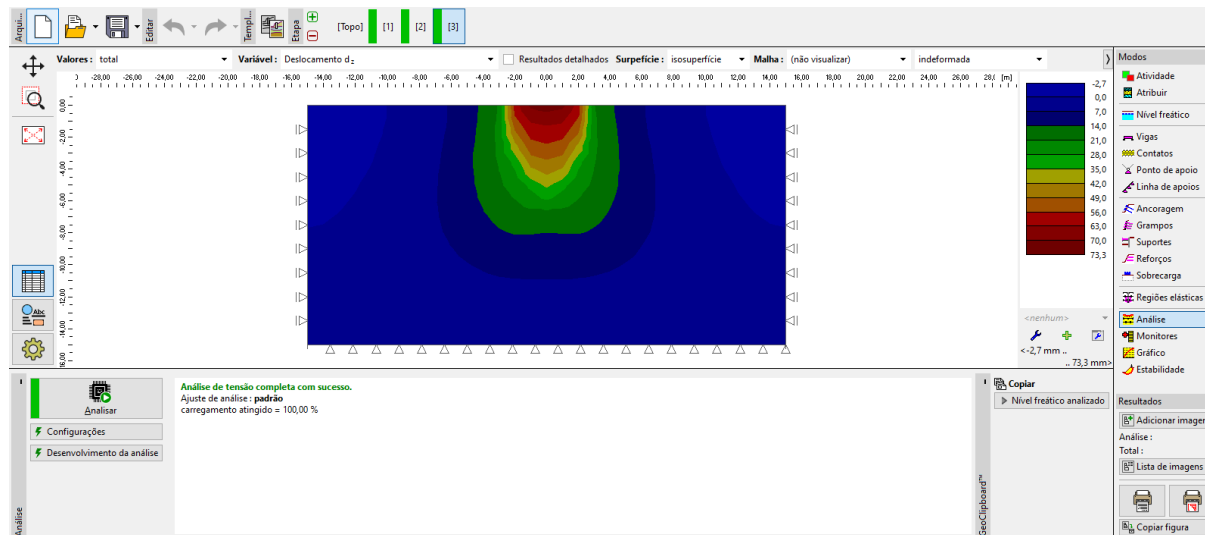
Na análise de um problema de EF, um parâmetro importante que é obtido é a deformação plástica equivalente (em modelos não lineares). As deformações plásticas equivalentes representam os locais onde a condição de cedência foi excedida, isto é, o solo está num estado de deformação plástica, exibindo deformações plásticas permanentes.



Análise da etapa de construção 2 – rácio de deformação plástica equivalente $\epsilon_{e,pl}$ [%]

Etapa de construção 3: relaxamento da sobrecarga na superfície do terreno

O passo seguinte é adicionar a etapa de construção 3. Nesta etapa de construção, não vamos considerar a sobrecarga do terreno (vamos removê-la). Vamos voltar a executar a análise e determinar os valores das tensões e das deformações. O assentamento total após o relaxamento da superfície do terreno atinge um valor de 24.1 mm (para uma malha de EF triangular).



Análise da etapa de construção 3 – deformação vertical devido à sobrecarga d_z [mm]

Isto conclui a análise base. Vamos, ainda, executar outras análises para comparar diferentes densidades da malha (com o comprimento das extremidades dos elementos finitos de 1.5 m e 2.0 m) e outros modelos materiais.

Avaliação dos resultados

A tabela seguinte apresenta os resultados do assentamento total d_z [mm] para o mesmo problema, mas utilizando os diferentes modelos materiais disponíveis no programa GEO5 MEF.

Modelo material / programa	Espaçamento da malha [m]	Etapa 2 d_z [mm]	Etapa 3 d_z [mm]	Nota
Elástico	1.0	88.3	0	---
ELM	1.0	88.2	58.8	---
DP	1.0	114.1	84.8	---
MC	1.0	102.9	73.3	---
MCM	1.0	93.5	64.0	---
Assentamento	---	73.7	---	CSN 73 1001

Resultados do assentamento total – sumário

*Nota: Para a análise analítica no programa **GEO5 Recalque**, considerámos a análise de assentamento de acordo com o módulo edométrico (de acordo com a Norma CSN 73 1001), com uma zona de influência restringida a 10% do estado de tensão geostática inicial. Definimos o módulo de deformação como $E_{def} = 15.0 \text{ MPa}$.*

De acordo com o demonstrado acima, os modelos do GEO5 MEF permitem inserir o módulo para o carregamento primário, definido como E , e o módulo para o relaxamento e carregamento secundário, definido como E_{ur} . Dado que recorreremos ao GEO5 Recalque para calcular o carregamento primário, devemos utilizar o mesmo valor para E no GEO5 MEF.

Tanto a análise no GEO5 MEF, para um modelo elástico, como a solução analítica no GEO5 Recalque baseiam-se na teoria da elasticidade linear. Assim, ambos os modelos devem obter resultados semelhantes. No entanto, existem diferenças inevitáveis que se devem:

- À zona influência no GEO5 MEF ser fixa, de acordo com a geometria do modelo, enquanto que a zona de influência do GEO5 Recalque depende do carregamento e de outros parâmetros.

- b) No GEO5 MEF a tensão é calculada para o estado de equilíbrio e respeita as direções vertical e horizontal da deformação. No GEO5 Recalque o campo de tensão é calculado à priori sem correlação com o campo de tensão existente.
- c) No GEO5 MEF o solo sob a fundação pode deformar transversalmente e verificam-se deslocamentos horizontais. A solução analítica do GEO5 Recalque utiliza o módulo edométrico e assume-se que o solo restringido horizontalmente.

Conclusão

É possível deduzir várias conclusões a partir da tabela sumário do assentamento total:

- O modelo de Drucker-Prager é, para este caso particular, mais adequado que os modelos de Mohr-Coulomb ou de Mohr-Coulomb Modificado.
- O assentamento computado através de modelos elasto-plásticos é superior ao valor obtido através do modelo linear.
- O assentamento calculado analiticamente através do GEO5 Recalque é aproximadamente igual ao valor computado através do método dos elementos finitos para um modelo elástico linear. A pequena diferença verificada nos valores obtidos pode ser explicada pelas diferentes premissas que ambos os métodos adotam.