

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.

The screenshot shows the 'Configurações' (Configurations) window in GEO5. It is divided into three main sections: 'Parâmetros do projeto' (Project Parameters), 'Design padrão' (Standard Design), and 'Opções avançadas do programa' (Advanced Program Options).
- Under 'Parâmetros do projeto': 'Tipo de projeto' is set to 'Plano de deformação' (Plane strain), 'Tipo de análise' is 'Tensão' (Stress), and 'Túneis' is unchecked. There is also an unchecked option for 'Permitir a introdução de água como resultado da análise de fluxo de água constante'.
- Under 'Design padrão': 'Estruturas de concreto' is set to 'EN 1992-1-1 (EC2)'.
- Under 'Opções avançadas do programa': 'Cálculo de tensão geostática (1ª etapa)' is selected, and 'Método de análise' is 'Tensão geostática'. The options for 'Parâmetros avançados da geração de malhas', 'Parâmetros avançados de solos', 'Modelos de solos avançados', and 'Resultados detalhados' are all unchecked.

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.

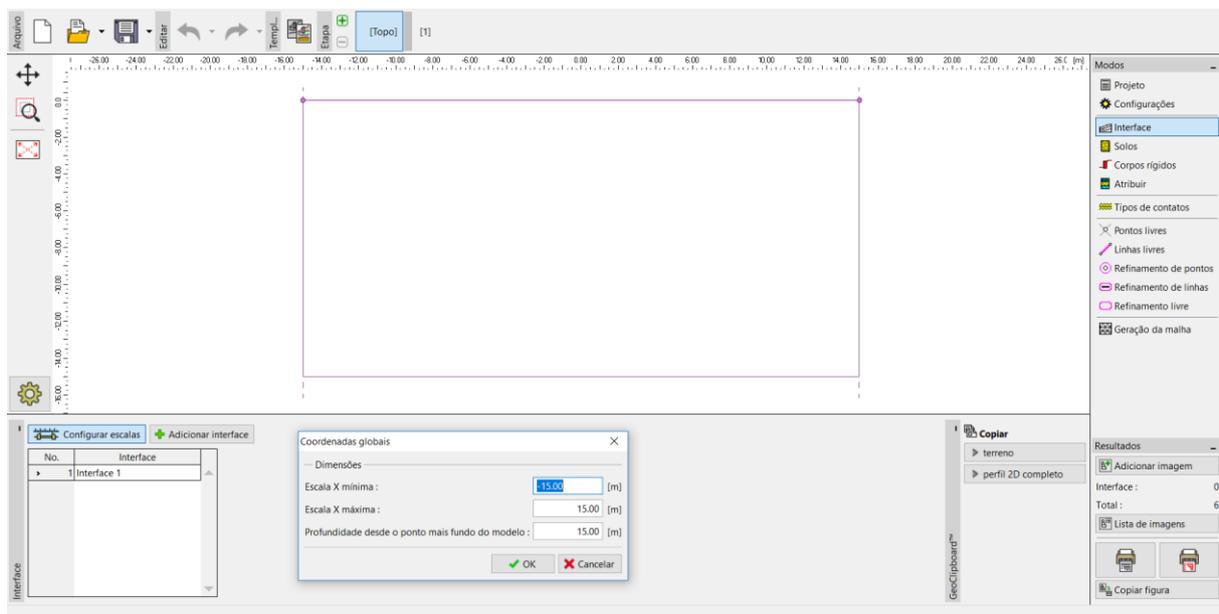
*Nota: Os **problemas planares (assumidas condições do plano de deformação)** são adequados para análises de estruturas lineares (túneis, aterros, escavações, barragens, etc.), para os quais se considera que a dimensão longitudinal da estrutura em análise é superior às dimensões laterais – são assumidas 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:

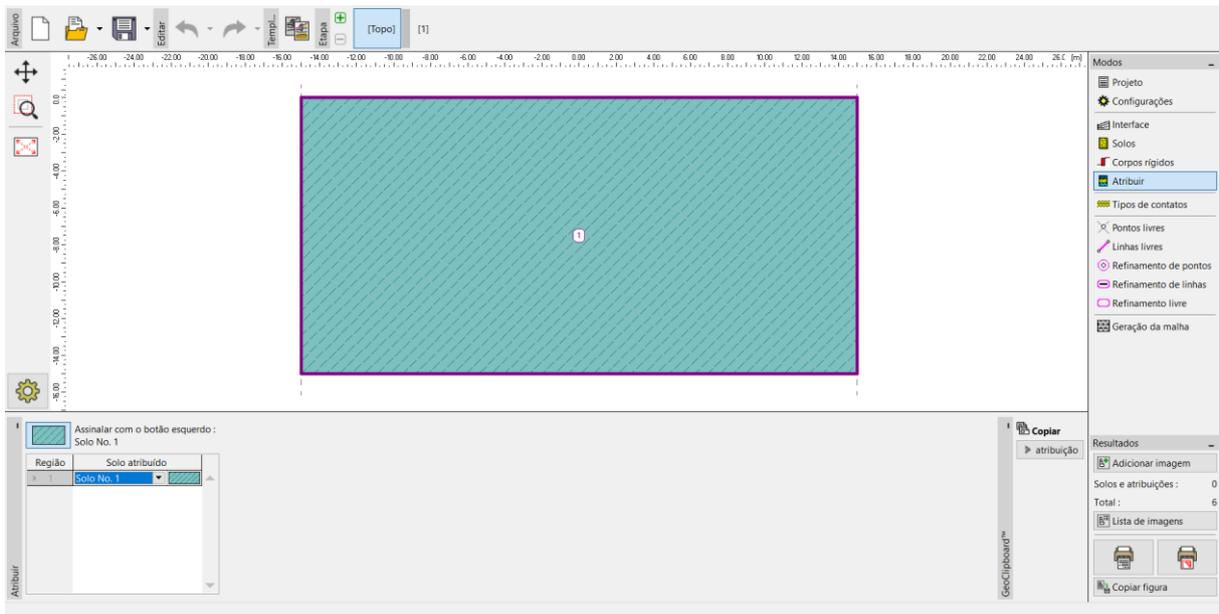
- Identificação:** Nome: Solo No. 1
- Modelo material:** Modelo material: Mohr - Coulomb
- Dados base:**
 - Peso volúmico: $\gamma = 19.00$ [kN/m³]
 - Módulo de Young: $E = 15.00$ [MPa]
 - Rigidez de acordo com a prof.: constante
 - Coefficiente de Poisson: $\nu = 0.35$ [-]
- Modelo Mohr - Coulomb:**
 - 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.

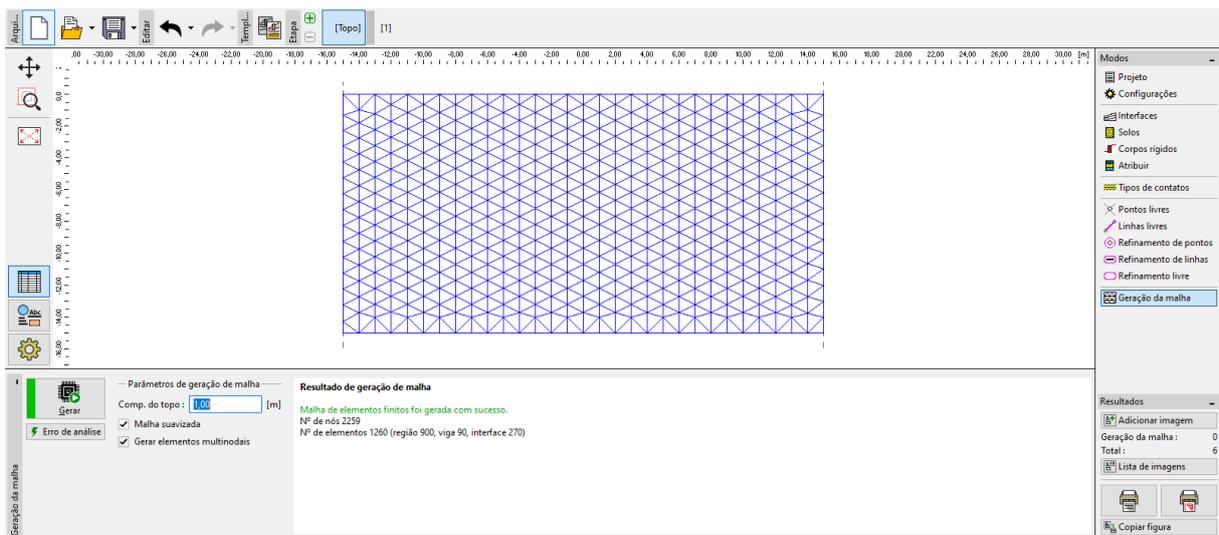
Seguidamente, vamos atribuir um solo à área criada.



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)

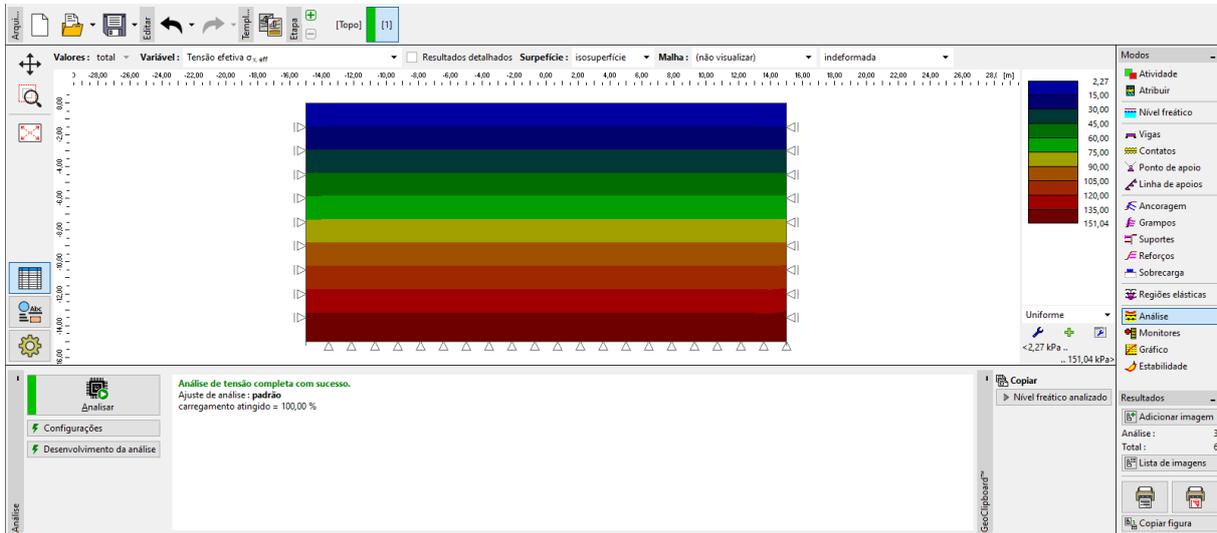
Nota: A malha triangular standard com elementos de seis nós é adequada à maioria de elementos geotécnicos. No caso do modo de introdução de dados avançado, o programa também permite gerar outros tipos de malhas (mistas, triangulares) – destinado a usuários experientes do MEF.

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

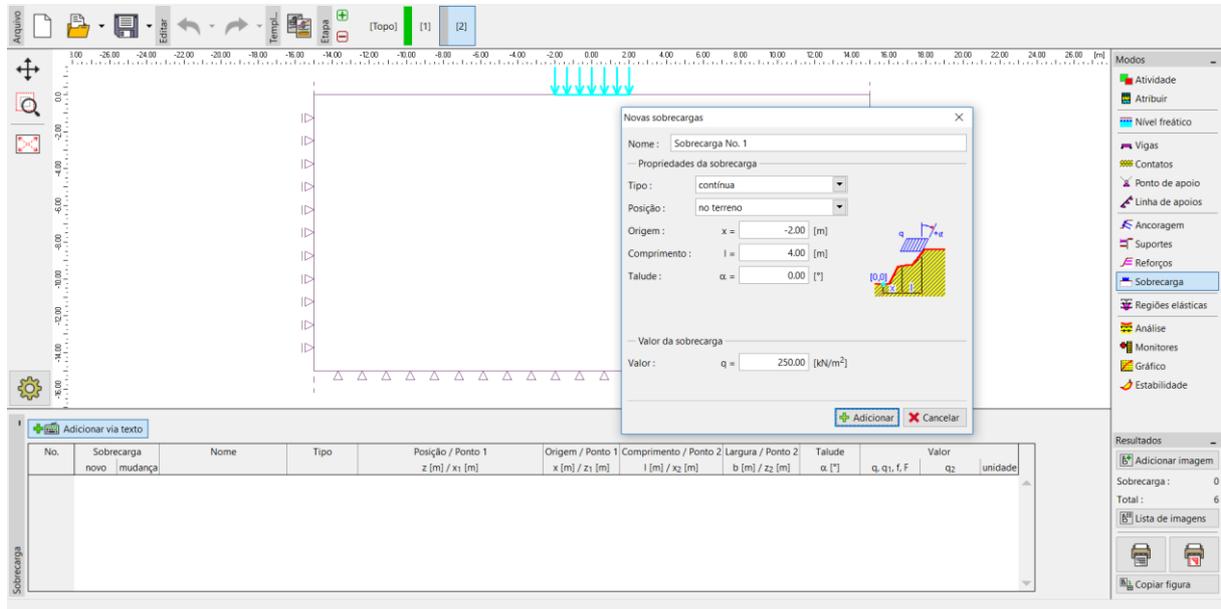
Quando a geração da malha de EF estiver concluída, passamos à Etapa 1 (através da barra de ferramentas na parte superior do ecrã) e executamos a análise da tensão geostática, ao clicar no botão **“Analisar”**. Seguidamente, vamos examinar os resultados para a tensão geostática $\sigma_{z,eff}$ [kPa].



Análise da etapa de construção 1 – tensão geostática primária

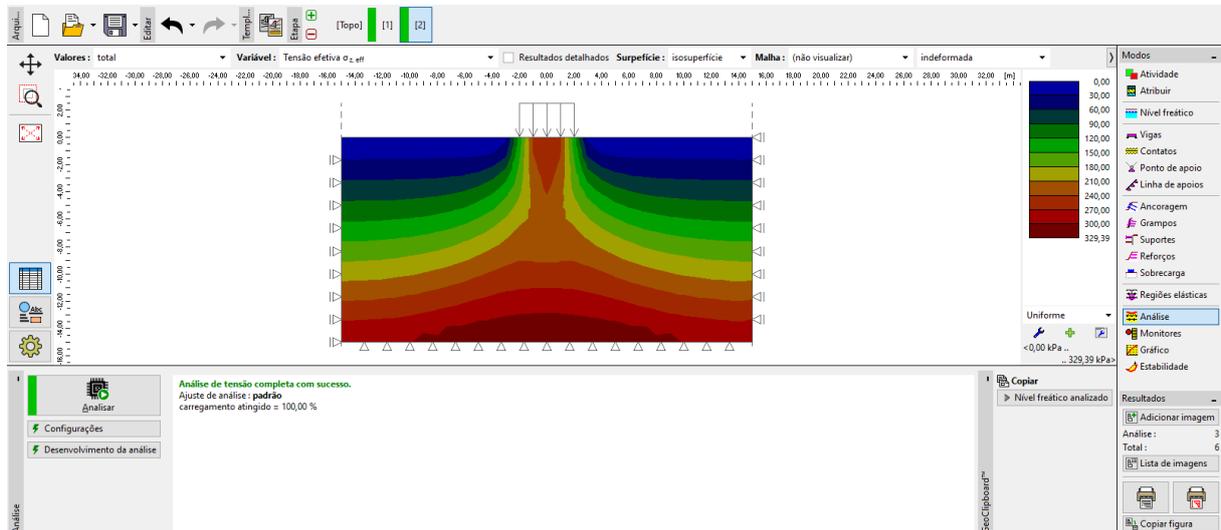
Etapa de construção 2: introdução do carregamento da sobrecarga

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.



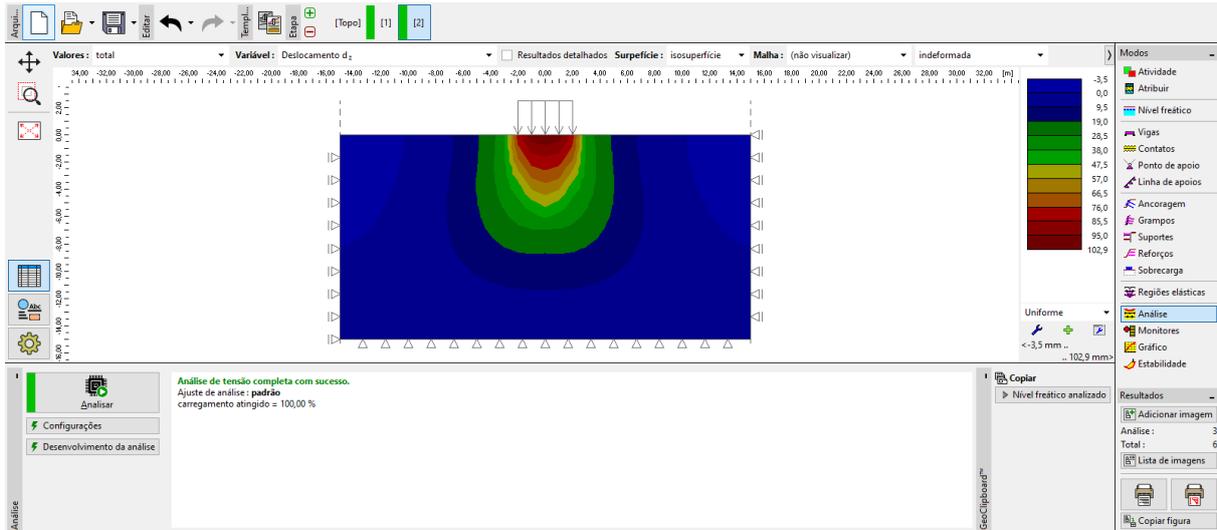
Definir novas sobrecargas

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



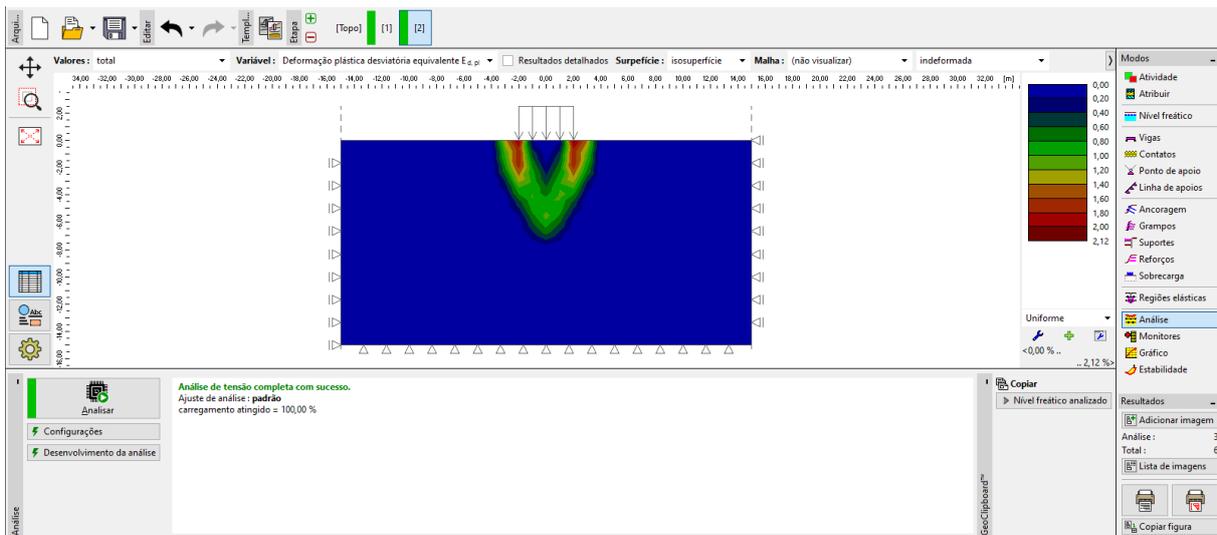
Análise da etapa de construção 2 – tensão normal vertical $\sigma_{z,eff}$ [kPa]

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]

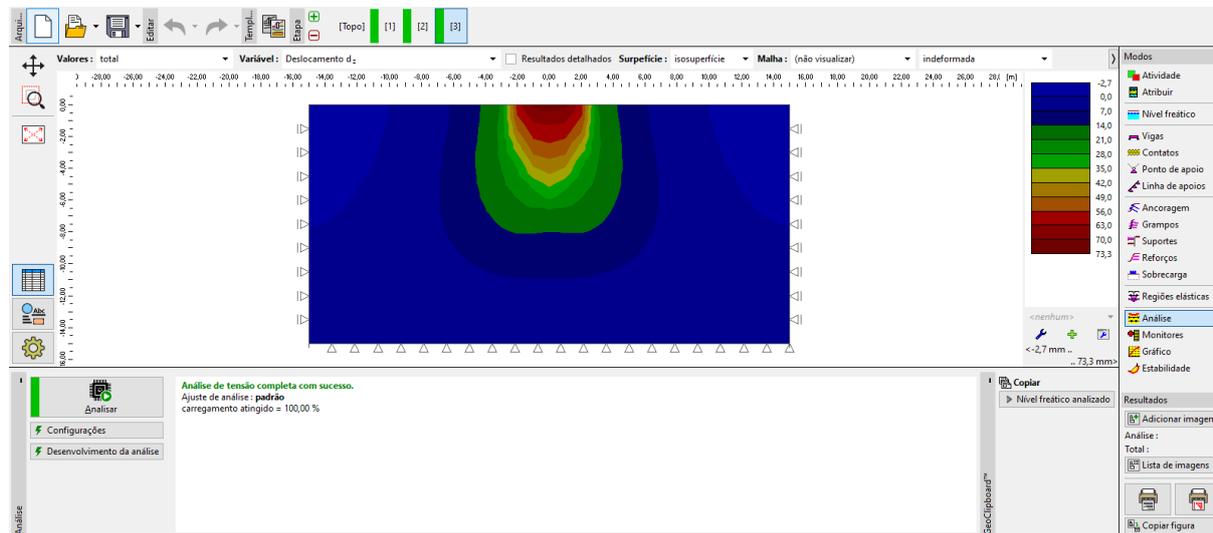
Na análise de um problema de EF, um parâmetro importante que é obtido é a deformação plástica equivalente (em modelos não lineares). As deformações plásticas equivalentes representam os locais onde a condição de cedência foi excedida, isto é, o solo está num estado de deformação plástica, exibindo deformações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



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

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 $E_{def} = 15.0$ 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.