

Verificação de uma parede multi-ancorada

Programa: Verificação de Contensões

Arquivo: Demo_manual_07.gp2

Neste capítulo, vamos mostrar como dimensionar e verificar uma parede multi-ancorada. Esta estrutura de contenção foi executada durante a construção da estação Prosek, na linha de metro C de Praga.

Pode encontrar mais informações acerca deste projeto nos documentos seguintes:

- [Folheto](#)
- [Relatório de investigação que compara os resultados calculados com os resultados da monitorização](#)

Introdução

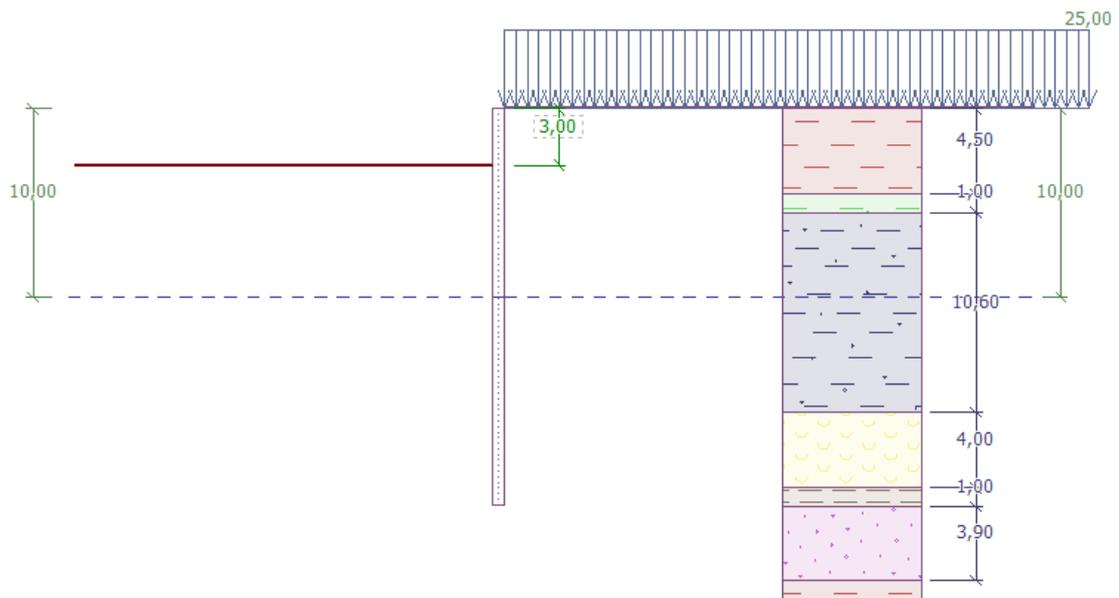
O método das pressões dependentes assume que o solo, ou rocha, na vizinhança da parede, assume um comportamento elasto-plástico ideal, de acordo com Winkler. Este material é determinado através do módulo de reação do subsolo k_n , que caracteriza a deformação da região elástica, e através de deformações limite adicionais. Quando estas deformações são excedidas, o material assume um comportamento plástico ideal.

São assumidas as hipóteses seguintes:

- A pressão atuante na parede pode atingir um valor arbitrário, entre a pressão ativa e passiva – mas não pode exceder estes valores limite.
- A pressão em repouso atua numa estrutura indeformável ($w = 0$).

Tarefa

Verificar uma parede multi-ancorada realizada em estacas soldado metálicas do tipo I 400, com $l = 21$ m de comprimento. A sua profundidade é $h = 15$ m. O terreno é horizontal. A sobrecarga atua na superfície e é permanente com um valor de $q = 25 \text{ kN/m}^2$. O nível freático atrás da estrutura está 10 m abaixo da superfície. O espaçamento entre eixos dos perfis metálicos é $a = 2$ m.



Esquema da parede ancorada em várias camadas – Etapa de construção 1

Solo	Espessura da camada de solo [m]	γ [kN/m^3]	φ_{ef} [$^\circ$]	c_{ef} [kPa]	δ [$^\circ$]	ν [-]
F6	4.5	19.5	20	16	7.5	0.4
F4	1	19.5	22	14	7.5	0.35
R3	10.6	22	40	100	15	0.25
R5 (1)	4	19	24	20	7.5	0.3
R5 (2)	1	21	30	35	14	0.25
R5 (3)	3.9	21	40	100	15	0.2

Tabelas com os parâmetros dos solos e rochas

O peso volúmico do solo γ é igual ao peso volúmico do solo saturado γ_{sat} . Considera-se o estado de tensão como **efetivo**, a pressão em repouso é calculada para solos **coesivos** e a determinação da pressão hidrostática é definida como **padrão** para cada solo.

Todas as ancoragens têm um diâmetro $d = 32 \text{ mm}$ e o módulo de elasticidade é $E = 210 \text{ GPa}$. O espaçamento entre ancoragens é $b = 4 \text{ m}$.

Ancoragem No.	Prof. z [m]	Comprimento livre l [m]	Raiz l_k [m]	Inclinação α [°]	Força de ancoragem F [kN]	Etapa de construção para a nova ancoragem
1	2.5	13	6	15	300	2
2	5.5	10	6	17.5	350	4
3	8.5	7	6	20	400	6
4	11	6	4	22.5	500	8
5	13	5	3	25	550	10

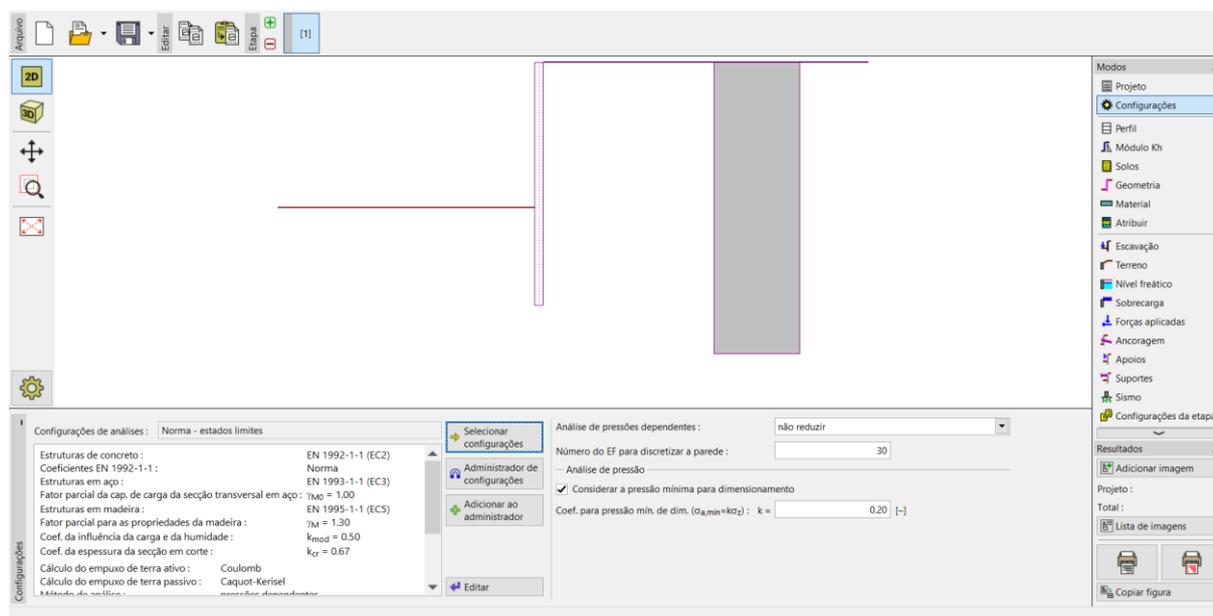
Tabela com as posições e dimensões das ancoragens

O módulo K_h é linearmente crescente com o aumento da profundidade até aos 5 m, onde atinge um valor de 10 MN/m^3 . A partir desta profundidade, o seu valor passa a ser constante.

Resolução

Para resolver este problema, utilize o programa GEO5 “Verificação de Contensões”. A análise será realizada sem redução dos dados introduzidos, para simular o comportamento real da estrutura.

Na janela “Configurações”, seleccione a opção No. 2 “Norma – estados limite”. Vamos considerar a pressão mínima para dimensionamento $k = 0,2$. O número de elementos finitos (EFs) definido para modelar a parede é 30 (ver figura).



Janela “Configurações”

Nota: Para problemas mais complexos (ex.: paredes multi-ancoradas), os autores do programa recomendam a computação das pressões limite sem redução dos parâmetros do solo e, conseqüentemente, sem redução dos empuxos de terra através dos fatores parciais correspondentes. O método das pressões dependentes sem redução dos parâmetros do solo permite uma melhor simulação do comportamento real do solo (o usuário obtém os valores reais dos assentamentos) e esta análise é semelhante à análise numérica através do MEF (ver Ajuda – F1).

Agora, abra a caixa de diálogo “Editar configurações atuais”, através do botão “Editar”, e selecione “introduzir” como método para obter o módulo de reação do subsolo. Remova, também, a seleção da possibilidade de “Considerar a redução do módulo de reação para retenções suportadas” (Mais informações na Ajuda – F1).

Editar configurações atuais: Verificação de Contensões

Materiais e Normas | **Análise de pressão** | Ancoragem

Cálculo do empuxo de terra ativo : Coulomb

Cálculo do empuxo de terra passivo : Caquot-Kerisel

Método de análise : pressões dependentes

Análise sísmica : Mononobe-Okabe

Módulo da reação do subsolo : introduzir

Considerar a redução do módulo de reação do subsolo para uma cortina escorada

Assentamento : não inserido

Metodologia de verificação : Estados limites (LSD)

Coeficiente γ_{mp} reduzir tg do ângulo de atrito interno ϕ

Situação permanente do projeto | Situação transitória do projeto | Situação acidental do projeto | Situação sísmica do projeto

— Coeficiente de redução de parâmetros do solo —

Coeficiente de redução de atrito interno : $\gamma_{m\phi} =$ 1.10 [-]

Coeficiente de redução de coesão : $\gamma_{mc} =$ 1.40 [-]

Redução do coeficiente de Poisson : $\gamma_{mv} =$ 1.00 [-]

Coeficiente de unidade de peso por trás da construção : $\gamma_{my} =$ 1.00 [-]

Coeficiente de unidade de peso na frente da construção : $\gamma_{my} =$ 1.00 [-]

Coeficiente de Redução de estabilidade interna de ancoragens : $\gamma_{Ris} =$ 1.10 [-]

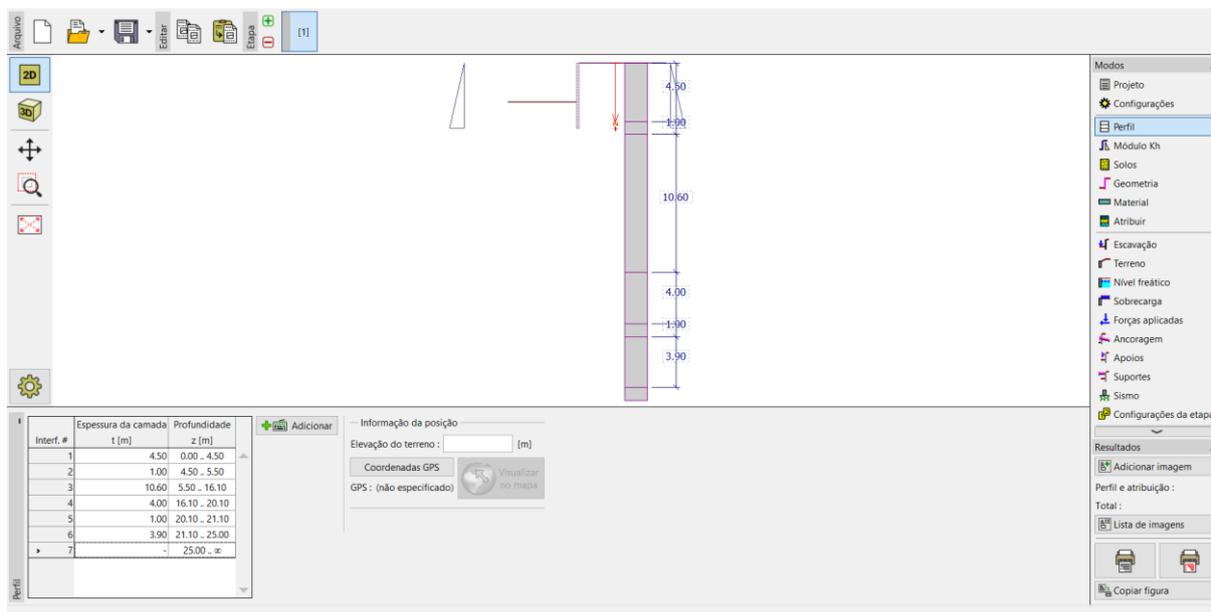
Coef. de red. de carga para elevação hid. : $\gamma_h =$ 1.30 [-]

Alterar as configurações de análise para o programa : Estabilidade de Taludes

OK Cancelar

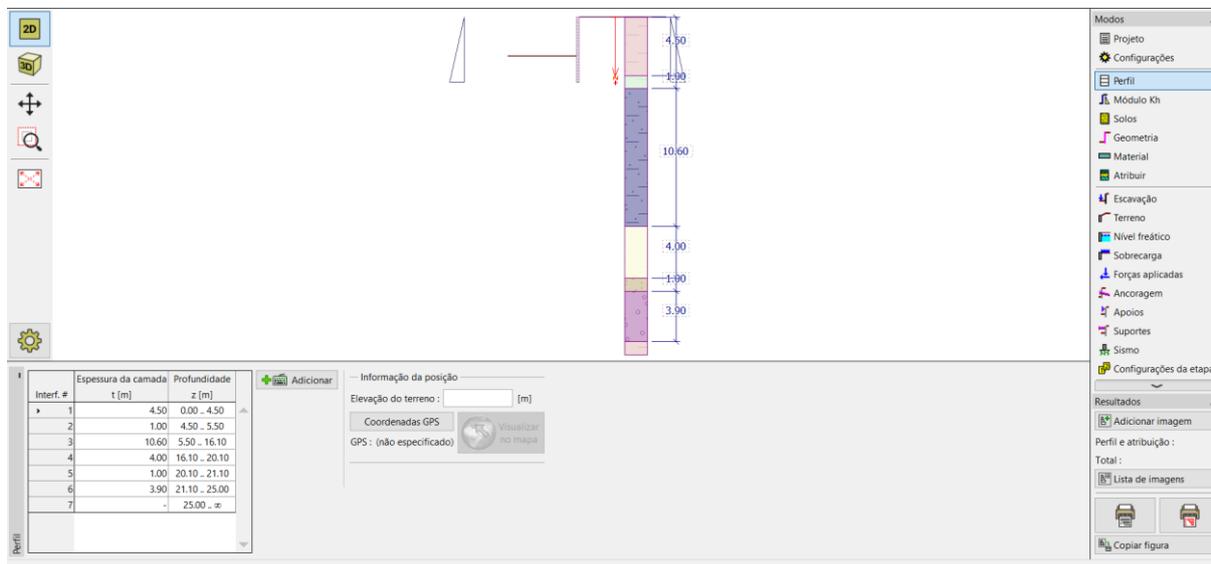
Caixa de diálogo “Editar configurações atuais”

Nas janelas “Perfil”, “Solos” e “Atribuir”, defina o perfil geológico para a tarefa, de acordo com a tabela e informação fornecidas anteriormente. Primeiro, na janela “Perfil”, adicione 4 novas interfaces com as profundidades indicadas na imagem seguinte.



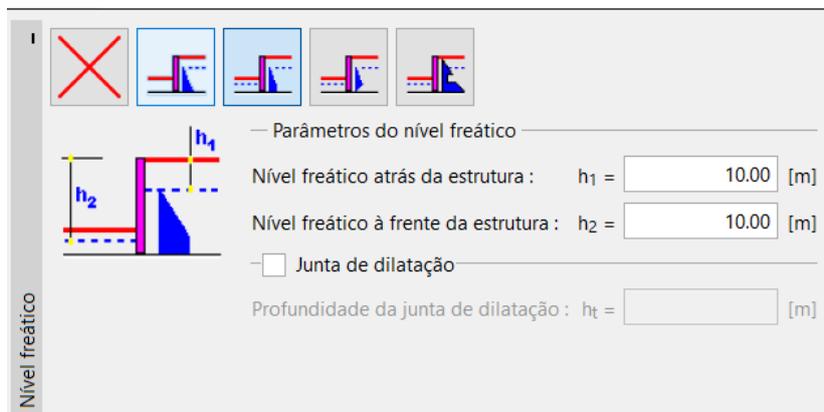
Janela “Perfil” – adicionar uma nova interface

De seguida, na janela “Solos”, adicione 6 novos solos com os parâmetros descritos na tabela anterior. Depois, na janela “Atribuir”, atribua os solos ao perfil.



Janela “Perfil” – atribuir solos ao perfil

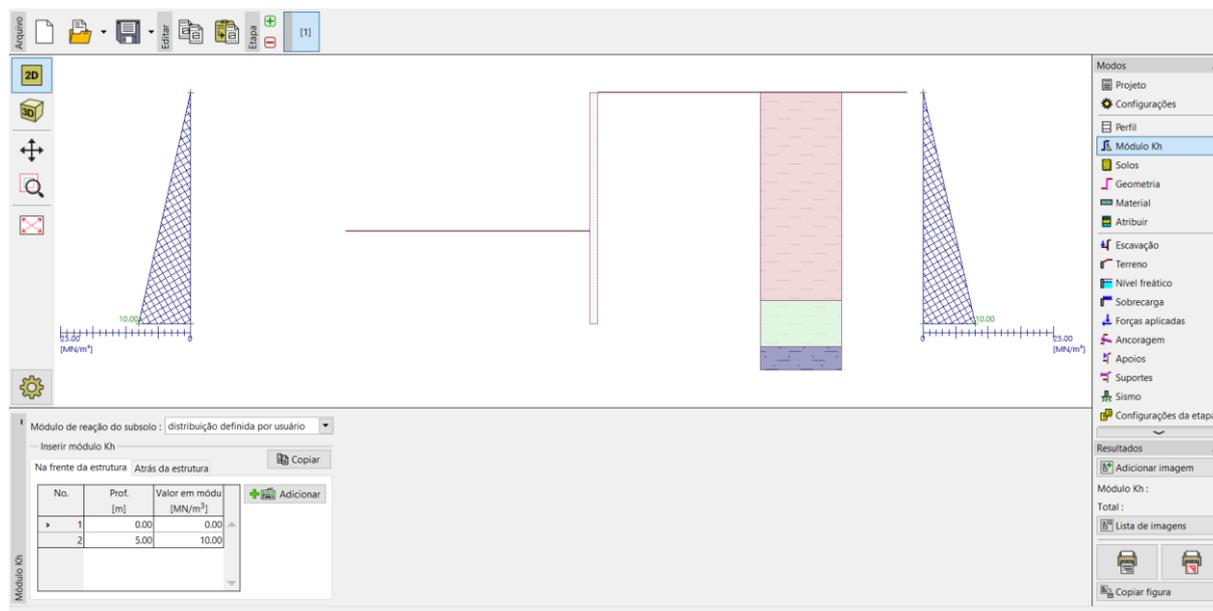
Por último, na janela “Nível Freático”, defina as condições do nível freático. Na primeira etapa de construção, os valores à frente e atrás da estrutura serão iguais a 10 m.



Janela “Nível Freático” – definir parâmetros do nível freático

Na janela “Módulo Kh”, introduza o valor de Kh através de uma distribuição – crescente linearmente até à profundidade de 5 m, onde passa a ser constante com o valor de 10 MN/m³. O módulo é definido para a profundidade da estrutura.

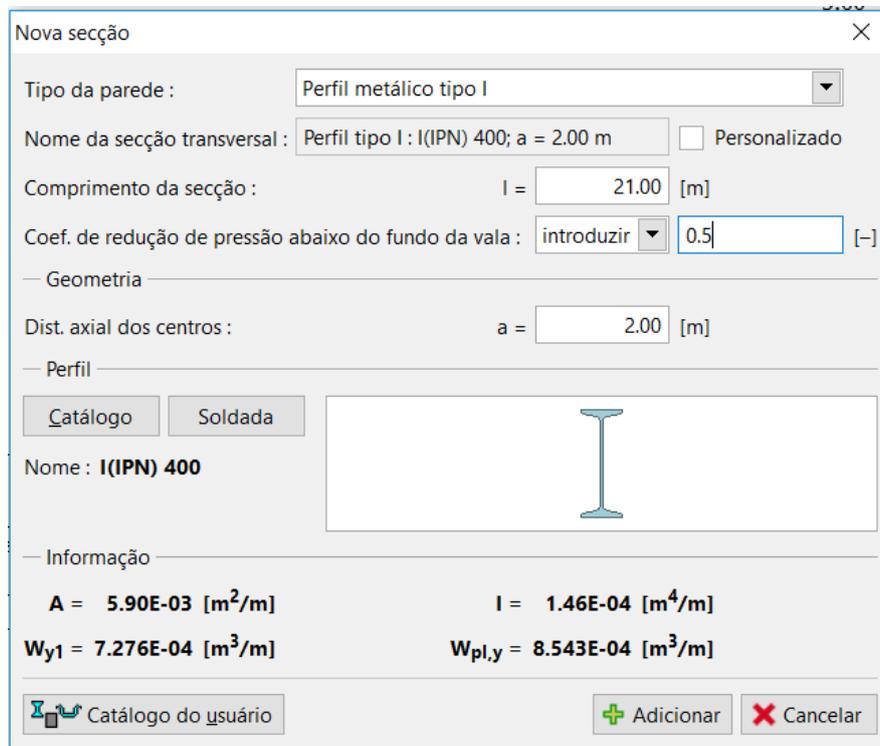
Se a profundidade for alterada, o módulo é corrigido automaticamente. Neste caso, este continuará a ser constante até à profundidade total da estrutura (21 m). Se o valor de Kh for desconhecido, é possível recorrer a outros parâmetros conhecidos do solo para calculá-lo (por exemplo, através do método de Schmitt – com base no E_{oed} ou E_{desf}). Pode encontrar mais informações acerca do módulo Kh na Ajuda do programa – F1.



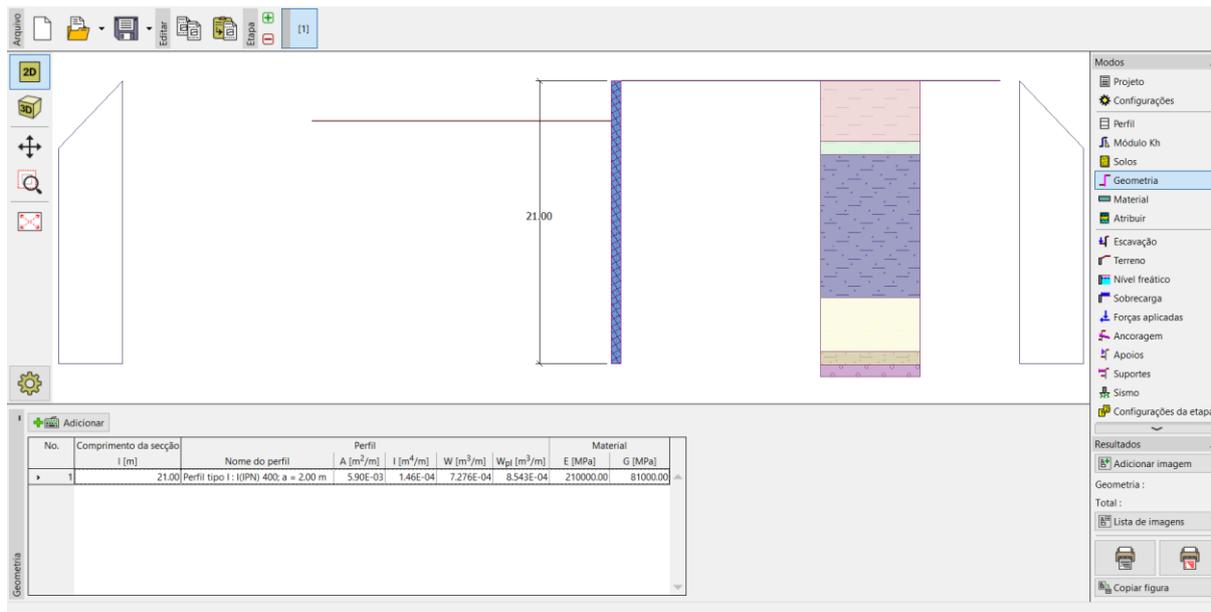
Janela “Módulo Kh”

Na janela “Geometria”, defina os parâmetros da contenção suportada – tipo da parede e comprimento da secção $l = 21$ m. Clique no botão “Adicionar” e, a partir da base de dados das secções tipo I, selecione a secção **I (IPN) 400**. O espaçamento entre eixos dos perfis metálicos é igual a $a = 2$ m. Seguidamente, defina o coeficiente de redução da pressão abaixo da base da vala como **0.5**.

Nota: O coeficiente de redução dos empuxos de terra abaixo da escavação reduz a pressão no solo. Para paredes de contenção clássicas, este parâmetro é igual a 1.0 e para contenções suportadas é menor ou igual a 1. Este parâmetro depende do tamanho e espaçamento entre suportes (Mais informações na Ajuda – F1).

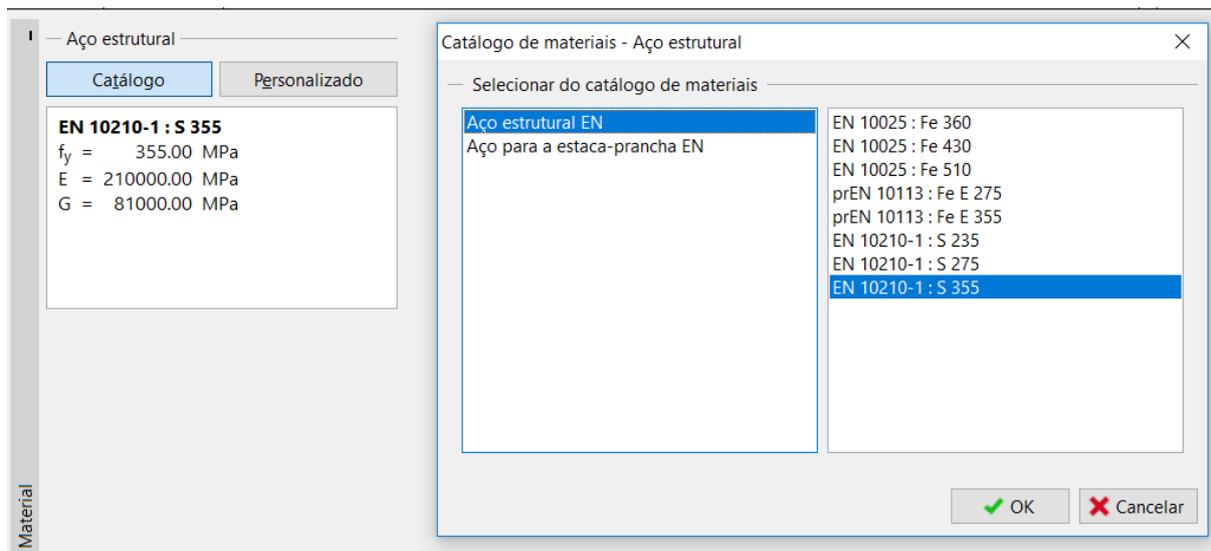


Caixa de diálogo “Nova secção”



Janela "Geometria" – adicionar uma nova secção

Na janela "Material", selecione a classe de aço apropriada para a estrutura, a partir do catálogo. Para este caso, selecione o tipo **EN 10210-1: S 355**.



Caixa de diálogo "Catálogo de materiais"

Agora, vamos descrever a construção da parede etapa-a-etapa. É necessário modelar a tarefa em etapas para simular a construção real da estrutura. Em cada etapa, é necessário observar os valores das forças internas e deslocamentos.

Se a contenção suportada não for estável em qualquer uma das etapas de construção, ou se a deformação obtida for demasiado elevada, será necessário modificar a estrutura – por exemplo, aumentar a profundidade da base da parede, tornar a vala mais rasa, aumentar as forças de ancoragem, etc.

Na primeira etapa de construção, define-se a sobrecarga superficial permanente, na janela “Sobrecarga”, como $q = 25 \text{ kN/m}^2$.

Nova sobrecarga

Nome : Sobrecarga permanente

— Propriedades da sobrecarga —

Tipo : Superfície

Tipo de ação : permanente

— Valor da sobrecarga —

Valor : $q = 25.00$ [kN/m²]

+ Adicionar X Cancelar

Janela “Sobrecarga” – caixa de diálogo “Nova sobrecarga”

Na etapa de construção 1, a vala atinge uma profundidade de $h = 3$ m. O **Nível freático** atrás e à frente da estrutura está a uma profundidade de $h_1 = h_2 = 10$ m abaixo da superfície do terreno. Execute a análise e, de seguida, adicione uma nova etapa. Na etapa 2, adicione uma nova ancoragem, na janela “Ancoragem”, à profundidade $z = 2,5$ m.

Nova ancoragem ✕

Tipo de ancoragem : não definido

Nome : Ancoragem No.1

— Parâmetros da ancoragem —

Prof. : $z =$ 2.50 [m]

Comp. livre : $l =$ 13.00 [m]

Comp. da raiz : $l_k =$ 6.00 [m]

Inclinação : $\alpha =$ 15.00 [°]

Espaçamento : $b =$ 4.00 [m]

— Rigidez —

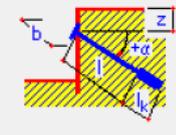
Tipo de introdução : inserir diâmetro

Diâmetro : $d_s =$ 32.0 [mm]

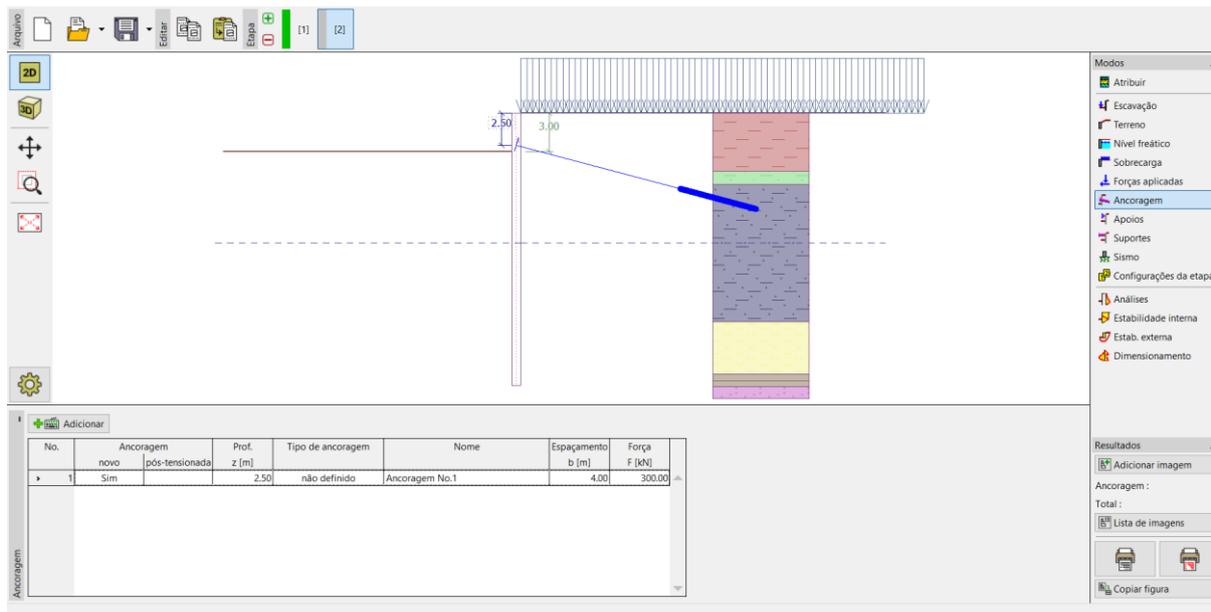
Módulo de elasticidade : $E =$ 210000.00 [MPa]

Força de pré-esforço : $F =$ 300.00 [kN]

+ Adicionar
✕ Cancelar



Janela “Ancoragens” – adicionar uma nova ancoragem (etapa de construção 2)



Janela “Ancoragens” – Etapa de construção 2

Execute, novamente, a análise e adicione uma nova etapa de construção. Na 3ª etapa de construção, abra a janela “Escavação” e altere a profundidade da vala para $h = 6,5$ m. Nesta etapa não são adicionadas ancoragens. Volte a executar a análise e adicione a 4ª etapa de construção. Na 4ª etapa, adicione uma nova ancoragem à profundidade $z = 5,5$ m. O nível freático mantém-se constante.

Nova ancoragem ✕

Tipo de ancoragem :

Nome :

— Parâmetros da ancoragem —

Prof. : $z =$ [m]

Comp. livre : $l =$ [m]

Comp. da raiz : $l_k =$ [m]

Inclinação : $\alpha =$ [°]

Espaçamento : $b =$ [m]

— Rigidez —

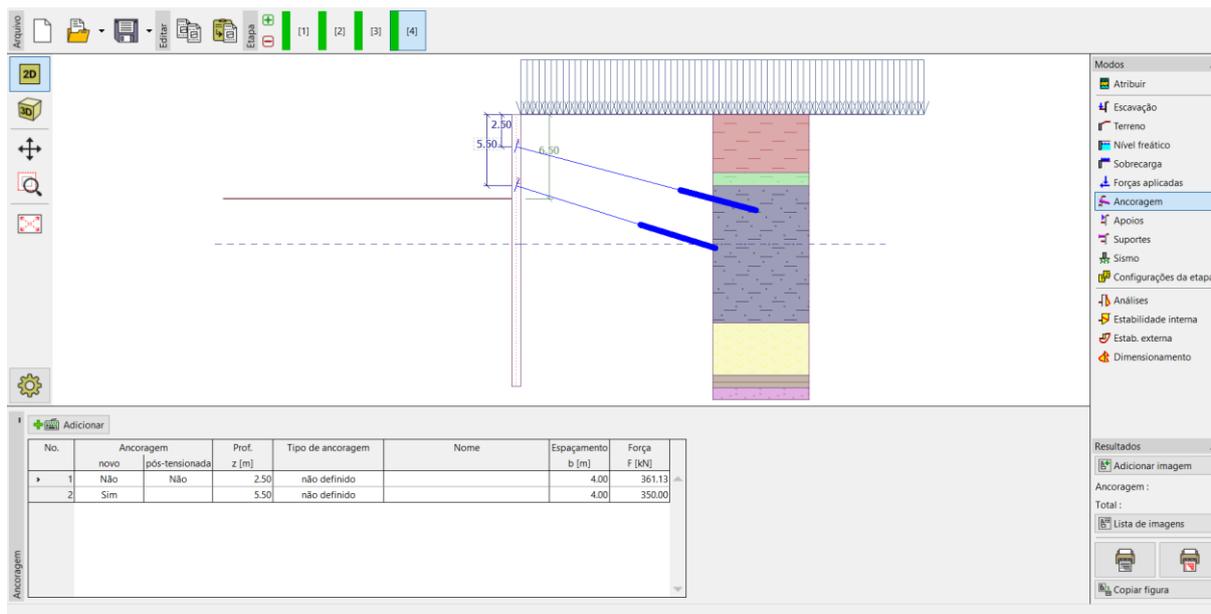
Tipo de introdução :

Diâmetro : $d_s =$ [mm]

Módulo de elasticidade : $E =$ [MPa]

Força de pré-esforço : $F =$ [kN]

Janela “Ancoragens” – adicionar uma nova ancoragem (etapa de construção 4)



Janela "Ancoragens" – Etapa de construção 4

Adicione uma 5ª etapa de construção. Na 5ª etapa de construção, altere a profundidade da vala para $h = 9$ m. Depois, adicione mais outra etapa de construção. Na 6ª etapa, adicione uma nova ancoragem à profundidade de $z = 8,5$ m. O nível freático mantém-se constante.

Nova ancoragem ✕

Tipo de ancoragem :

Nome :

— Parâmetros da ancoragem —

Prof. : z = [m]

Comp. livre : l = [m]

Comp. da raiz : $l_k =$ [m]

Inclinação : $\alpha =$ [°]

Espaçamento : b = [m]

— Rigidez —

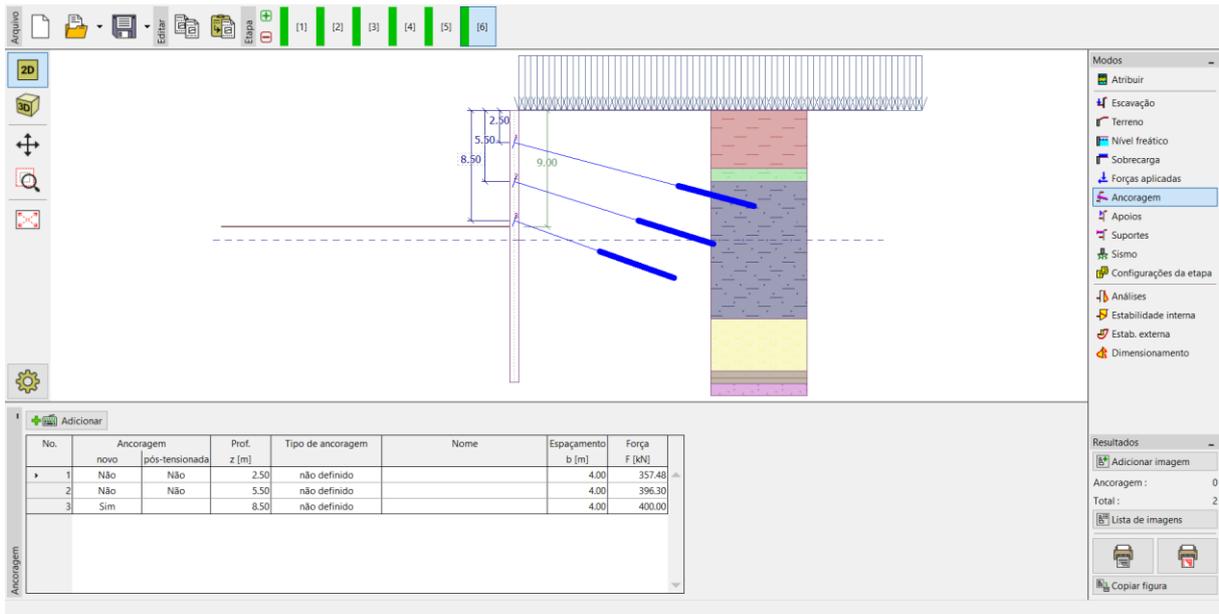
Tipo de introdução :

Diâmetro : $d_s =$ [mm]

Módulo de elasticidade : E = [MPa]

Força de pré-esforço : F = [kN]

Janela "Ancoragens" – adicionar uma nova ancoragem (etapa de construção 6)



Janela “Ancoragens” – Etapa de construção 6

Adicione outra etapa de construção. Na 7ª etapa de construção, altere a profundidade da escavação para $h = 11,5$ m. Na janela “Nível Freático”, altere, ainda, o Nível freático à frente da parede para estar a uma profundidade de $h_2 = 12$ m, abaixo da superfície. O nível freático atrás da estrutura mantém-se constante. Adicione a 8ª etapa de construção. Na 8ª etapa, adicione mais uma ancoragem à profundidade de $z = 11$ m.

Nova ancoragem ✕

Tipo de ancoragem : não definido

Nome : Ancoragem No.4

— Parâmetros da ancoragem —

Prof. : z = 11.00 [m]

Comp. livre : l = 6.00 [m]

Comp. da raíz : l_k = 4.00 [m]

Inclinação : α = 22.50 [°]

Espaçamento : b = 4.00 [m]

— Rigidez —

Tipo de introdução : inserir diâmetro

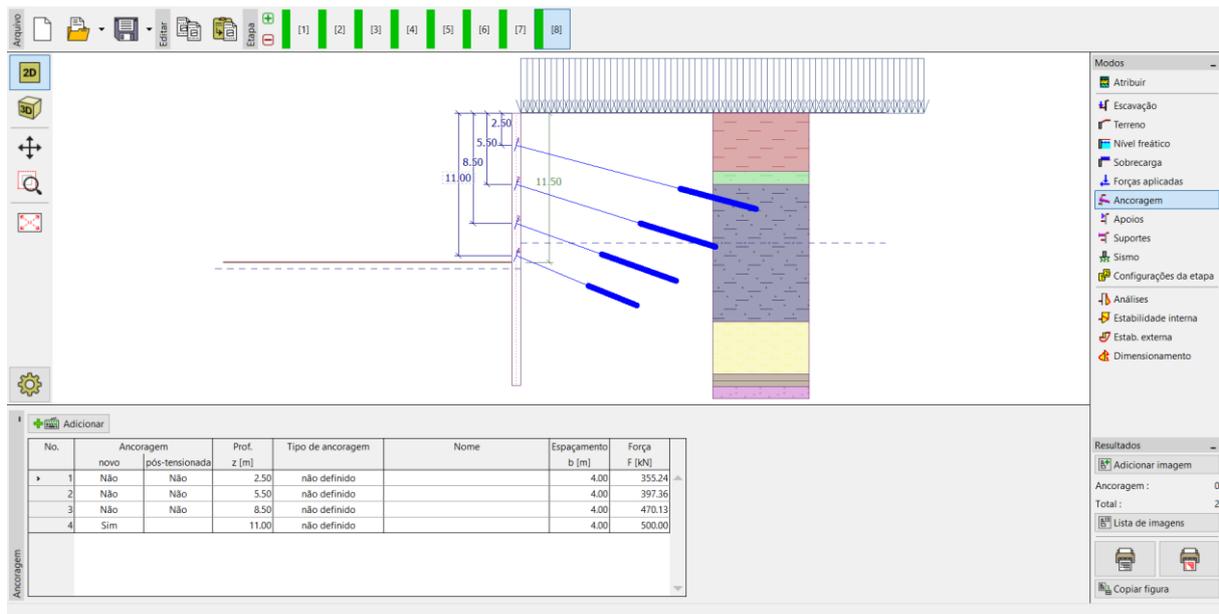
Diâmetro : d_s = 32.0 [mm]

Módulo de elasticidade : E = 210000.00 [MPa]

Força de pré-esforço : F = 500.00 [kN]

+ Adicionar
✕ Cancelar

Janela “Ancoragens” – adicionar uma nova ancoragem (etapa de construção 8)



Janela "Ancoragens" – Etapa de construção 8

Volte a adicionar uma nova etapa de construção. Na 9ª etapa de construção, a vala é escavada até à profundidade de $h = 13,5$ m. O nível freático à frente da estrutura está a $h_2 = 15,5$ m, abaixo da superfície. De seguida, adicione outra etapa de construção. Na 10ª etapa, adicione uma ancoragem à profundidade de $z = 13$ m.

Nova ancoragem ✕

Tipo de ancoragem :

Nome :

— Parâmetros da ancoragem —

Prof. : z = [m]

Comp. livre : l = [m]

Comp. da raiz : lk = [m]

Inclinação : α = [°]

Espaçamento : b = [m]

— Rigidez —

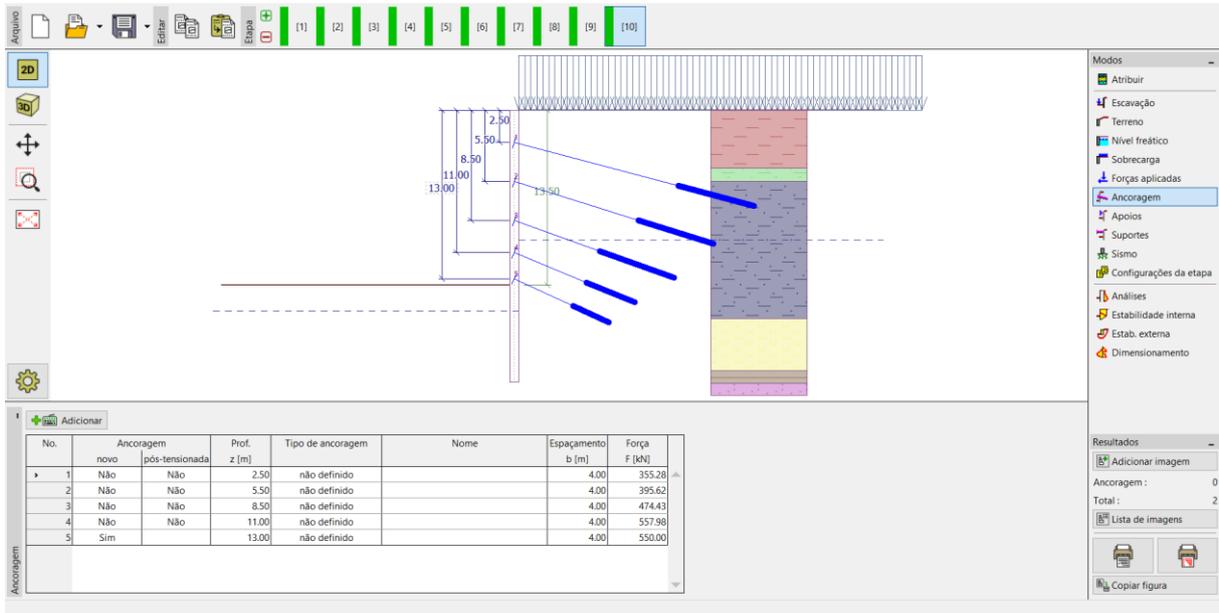
Tipo de introdução :

Diâmetro : d_s = [mm]

Módulo de elasticidade : E = [MPa]

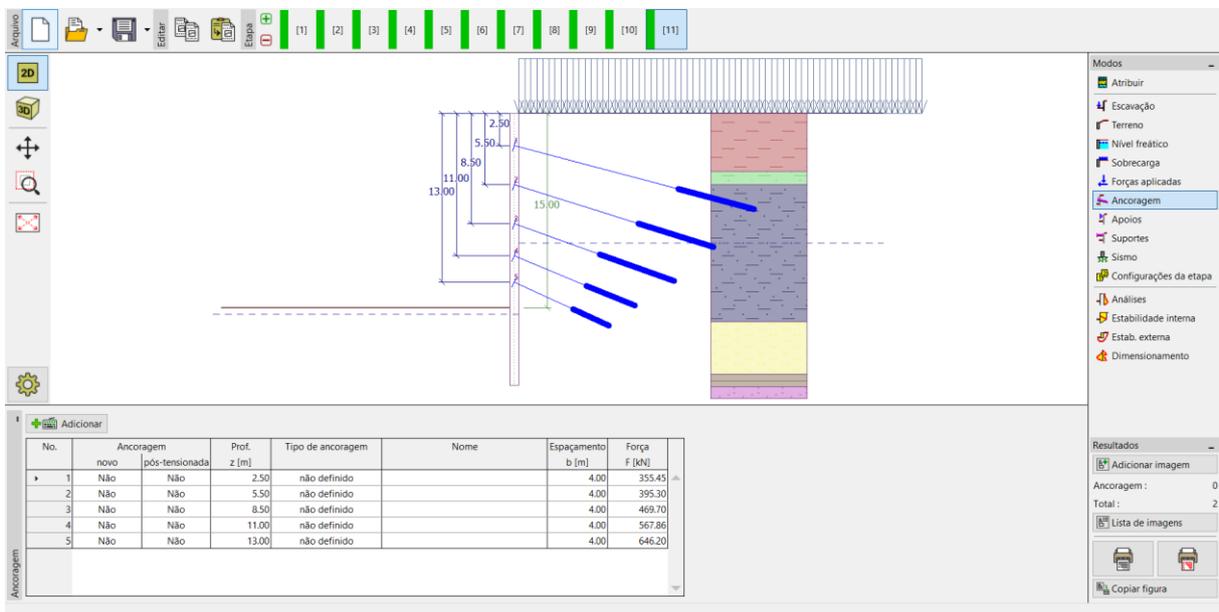
Força de pré-esforço : F = [kN]

Janela "Ancoragens" – adicionar uma nova ancoragem (etapa de construção 10)



Janela "Ancoragens" – Etapa de construção 10

Na 11ª, e última, etapa de construção, a vala é escavada até à profundidade de $h = 15$ m. Não são adicionadas mais ancoragens. O nível freático mantém-se constante desde a 9ª etapa de construção (profundidade de $h_2 = 15,5$ m à frente da parede e de $h_1 = 10$ m atrás).

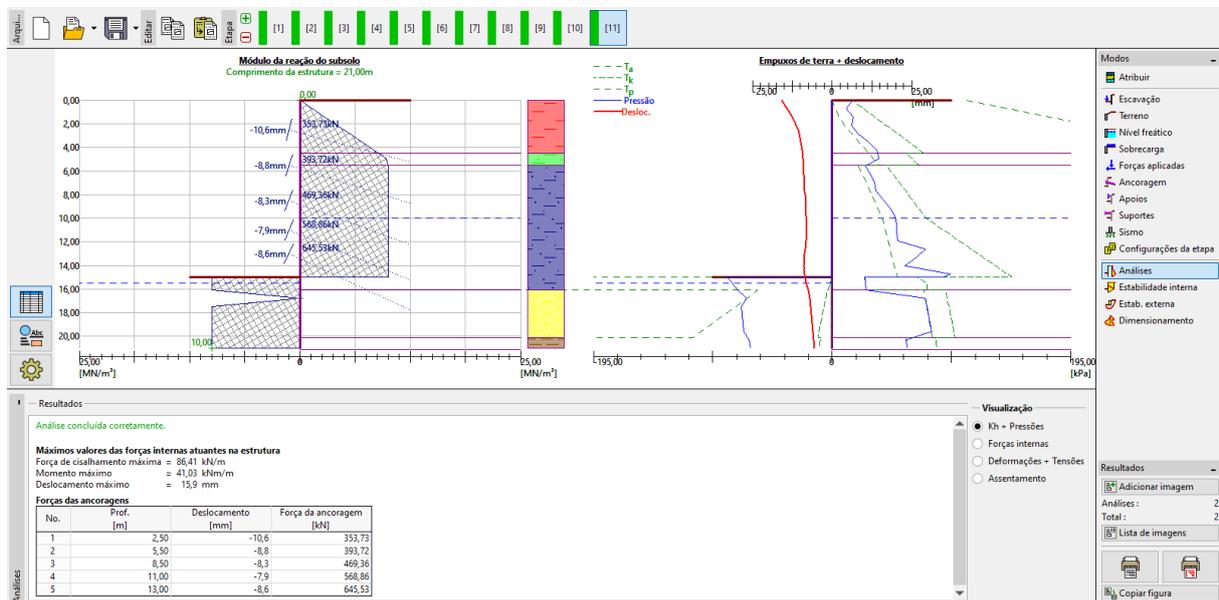


Janela "Ancoragens" – Etapa de construção 11

Nota: As forças das ancoragens variam devido às deformações da estrutura. Estas variações dependem da rigidez das ancoragens e da deformação na cabeça das ancoragens. A força pode diminuir (devido à perda da força de pré-esforço) ou aumentar. As forças podem voltar a ser pré-esforçadas em qualquer etapa de construção, de modo a obter o valor desejado.

Resultados da análise

Nas imagens abaixo, são exibidos os resultados da análise (análise das forças internas – momento fletor e força de cisalhamento, deslocamentos da estrutura e empuxos de terra) para a última (11ª) etapa de construção.



Janela "Análises" – Etapa de construção 11 (módulo de reação do subsolo)



Janela "Análises" – Etapa de construção 11 (Forças internas)



Janela "Análises" – Etapa de construção 11 (deslocamentos da estrutura + empuxos de terra)

Todas as etapas de construção estão analisadas. Isto significa que a estrutura de contenção suportada é estável e funcional em todas as etapas de construção. Também se deve verificar se os deslocamentos não são demasiado elevados, assim como se deve verificar se as forças de ancoragem não excedem a capacidade de suporte da ancoragem (o próprio usuário deve realizar estas verificações uma vez que não são realizadas pelo programa Verificação de Contensões). Para a última etapa de construção (11ª), os resultados são os seguintes:

- Força de cisalhamento máxima: $Q_{\max} = 86.41 \text{ kN/m}$,
- Momento fletor máximo: $M_{\max} = 41.03 \text{ kNm/m}$,
- Empuxo de terra máximo: $\sigma_x = 97.04 \text{ kPa}$,
- Deslocamento máximo: $\mu_{\max} = 15.9 \text{ mm}$.

Verificação da secção transversal da estrutura

Abra a janela “Dimensionamento”, na última etapa de construção (11ª), onde podem ser observadas os valores máximo e mínimo das variáveis (envolventes das forças internas).

- Força de cisalhamento máxima (mínima): $Q_{\max, \min} = 86.41 \text{ kN/m}$,
- Momento fletor máximo (mínimo): $M_{\max, \min} = 50.73 \text{ kNm/m}$.

As forças internas são calculadas por metro (pé) de desenvolvimento da estrutura, no programa Verificação de Contensões. Para o dimensionamento real de vigas soldado (secção metálica tipo I), é necessário multiplicar estes valores pelo espaçamento entre perfis $a = 2 \text{ m}$, de modo a obter as forças internas na secção transversal.

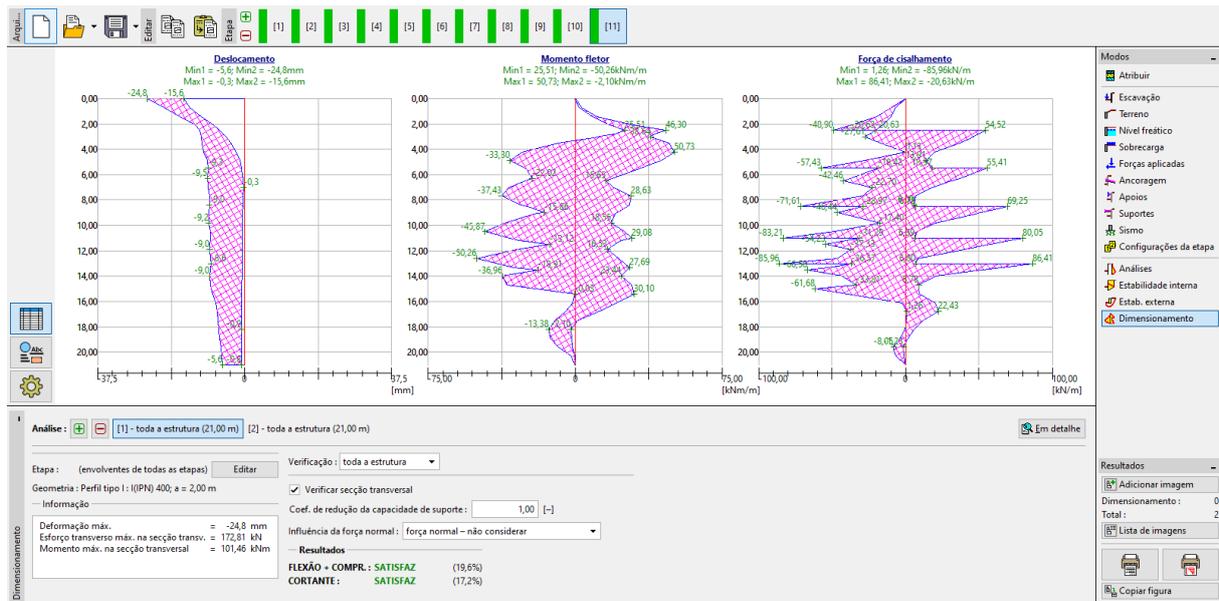
- Força de cisalhamento máxima para dimensionamento: $Q_{Ed} = 86.41 \times 2.0 = 172.82 \text{ kN/m}$,
- Momento fletor máximo para dimensionamento: $M_{Ed} = 50.73 \times 2.0 = 101.46 \text{ kNm/m}$.

O programa realiza a avaliação de vigas soldado (secção metálica tipo I) para os valores extremos das forças internas, de acordo com a Norma EN 1993-1-1 (EC 3).

Por agora, mantemos o coeficiente de redução da capacidade de suporte como 1.0. Para este caso, os resultados são os seguintes:

- Capacidade de suporte da secção transv.: $M_{Rd} = 516.61 \text{ kNm} \geq M_{Ed, \max} = 101.46 \text{ kNm/m}$.
- Utilização total da secção metálica tipo I: **19.6 %**

a secção transversal tipo I satisfaz os critérios da análise



Janela "Dimensionamento" – Etapa de construção 11 (Avaliação da secção metálica tipo I 400)

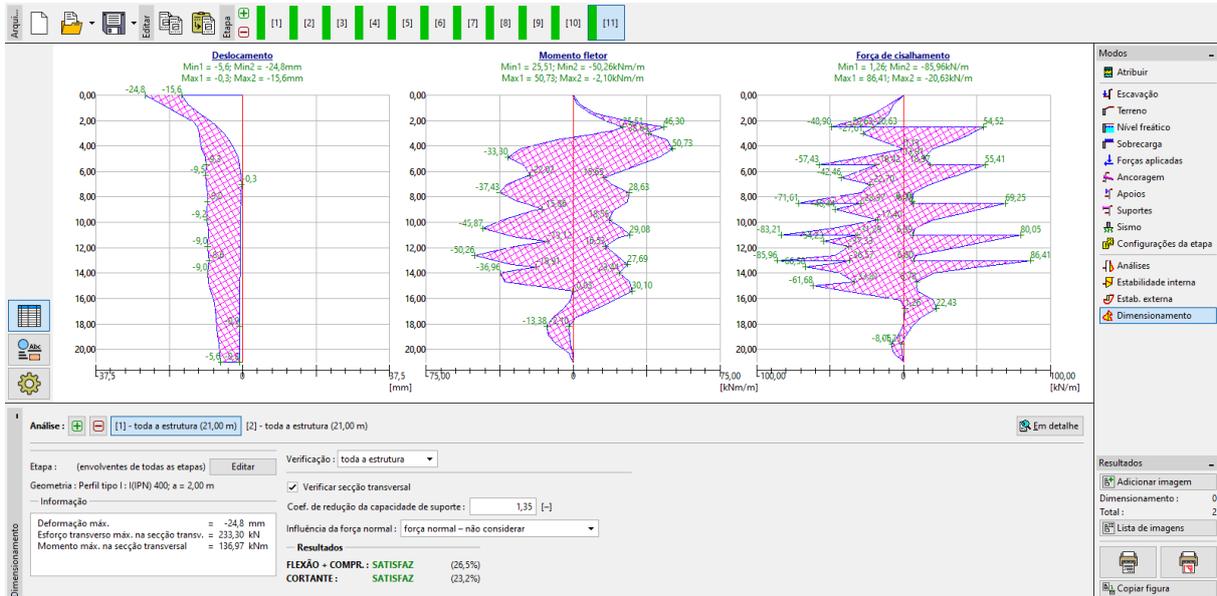
Durante a análise, mantivemos os valores limite dos empuxos de terra não reduzidos, sendo que o carregamento é inferior ao suposto, de acordo com a Norma EN 1997-1. No entanto, as forças internas são mais adequadas ao comportamento real da estrutura. As variações nos empuxos de terra levam a melhorias na segurança, mas também distorcem os resultados da análise. É por esta razão que introduzimos um valor personalizado para o coeficiente de redução da capacidade de suporte, durante a avaliação da secção metálica.

Nota: A Norma EN 1997-1 assume que o fator parcial para uma carga permanente é $\gamma_G = 1,35$ e para uma carga variável é $\gamma_Q = 1,5$. No entanto, neste caso, a totalidade da sobrecarga e do carregamento atuam como permanentes, sendo que devemos aplicar o fator parcial γ_G igual a 1.35.

Para uma combinação de cargas permanentes e variáveis, devemos determinar o valor do fator parcial de dimensionamento, dentro do intervalo 1.35 a 1.5, consoante as componentes predominantes do carregamento.

Agora, vamos modificar o coeficiente de redução da capacidade de carga para 1.35. Multiplicamos este coeficiente pelas forças internas atuantes na secção transversal da viga soldada. Neste caso, as forças internas são as seguintes:

- Força de cisalhamento máxima para dim.: $Q_{Ed, \max} = (86.41 \times 2) \times 1.35 = 233.31 \text{ kN/m}$,
- Momento fletor máximo para dim.: $M_{Ed, \max} = (50.73 \times 2) \times 1.35 = 136.97 \text{ kNm/m}$.



Janela “Dimensionamento” – Etapa de construção 11 (Nova avaliação da secção metálica tipo I 400)

Neste caso (avaliação com influência do coeficiente de redução da capacidade de suporte igual a 1.35), os resultados são os seguintes:

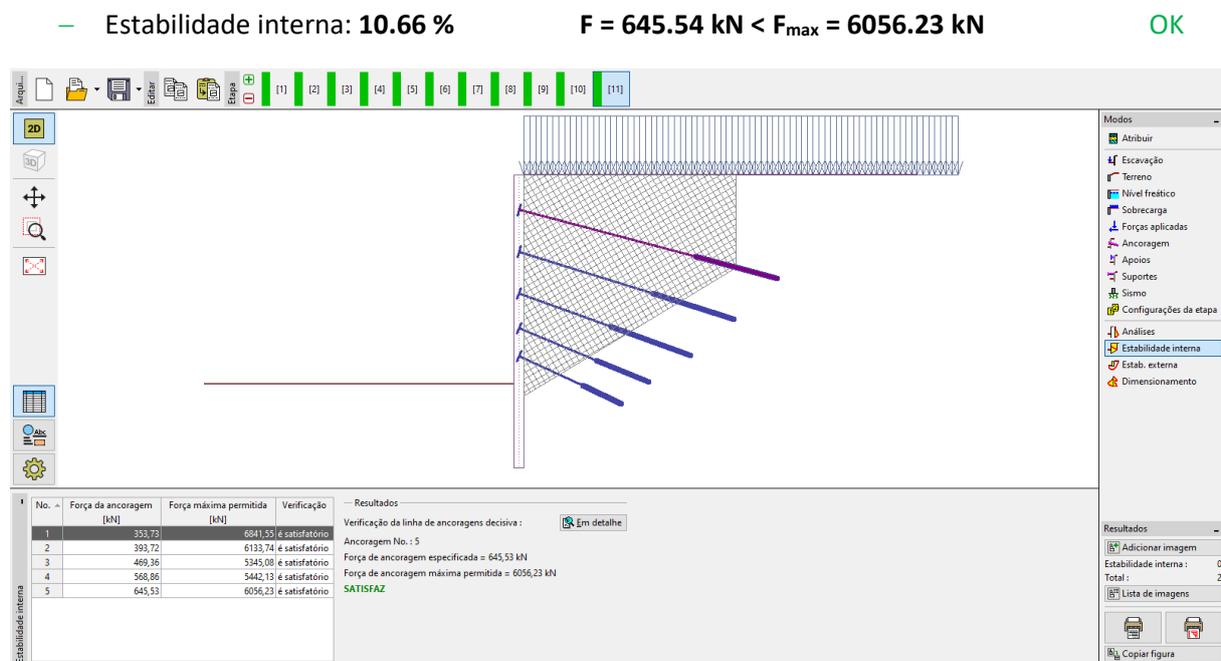
- Capacidade de suporte da secção transv.: $M_{c, Rd} = 516.61 \text{ kNm} \geq M_{Ed, \max} = 136.97 \text{ kNm/m}$
- Utilização total da secção metálica tipo I: **26.5 %** OK
- Verificação ao cisalhamento: $V_{c, Rd} = 1005.29 \text{ kN} \geq Q_{Ed, \max} = 233.31 \text{ kNm/m}$
- Utilização total da secção metálica tipo I: **23.2 %** OK

Análise da estabilidade interna

Abra a janela “Estabilidade interna”, na última etapa de construção, e observe a força máxima permitida em cada ancoragem.

Nota: A verificação é realizada desta forma. A força da ancoragem é iterada, até alcançar o equilíbrio de todas as forças atuantes na cunha de terra. Esta cunha de terra é limitada pela estrutura, superfície do terreno, centro das raízes das ancoragens e base teórica da estrutura (mais informações em Ajuda – F1). Se alguma das ancoragens não for satisfatória, a melhor forma de resolver o problema é aumentar o seu comprimento ou reduzir a força de pré-esforço.

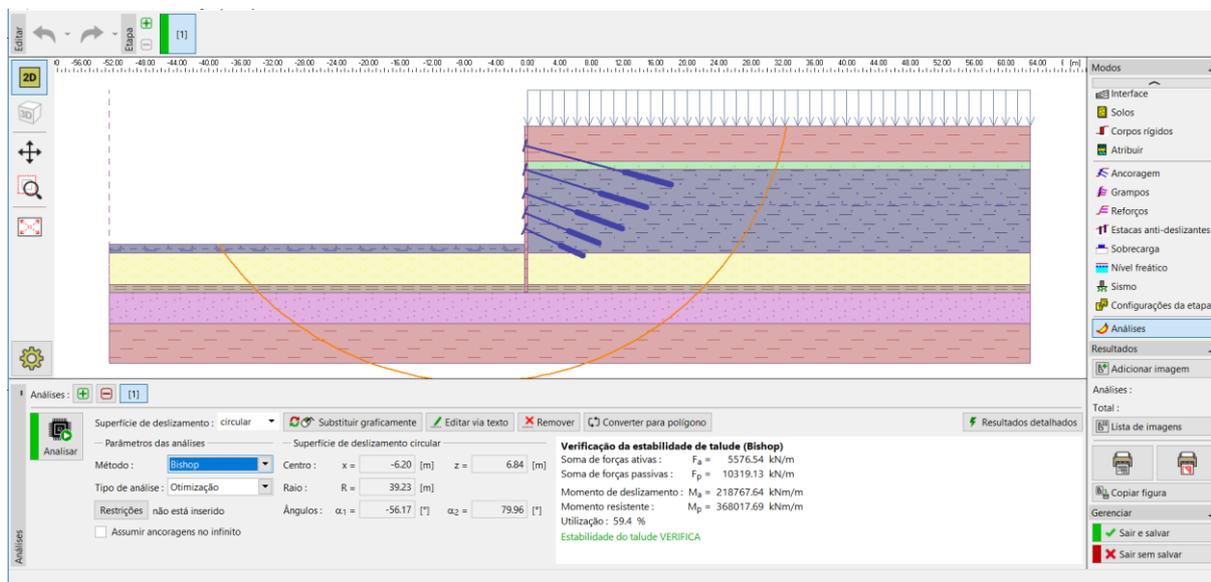
Obtemos a força máxima nas ancoragens (linha No. 5), a partir da análise e, de seguida, a utilização total da ancoragem:



Janela “Estabilidade interna” – Etapa de construção 11

Verificação da estabilidade externa (global)

A última verificação a realizar é a da estabilidade externa. Ao abrir a janela “Estabilidade externa”, é iniciado automaticamente o programa “Estabilidade de Taludes”. Na janela “Análises”, clique no botão “Analisar” para computar a estabilidade global.



Programa “Estabilidade de Taludes” – método de Bishop com otimização da superfície de deslizamento circular

Conclusão, resultados complementares:

A estrutura foi dimensionada com sucesso, com uma deformação máxima de 24.8 mm. Isto é satisfatório para este tipo de estruturas. Os limites das forças nas ancoragens também não foram excedidos.

- Capacidade de suporte: **26.5 %** 516.61 kNm \geq 136.97 kNm/m **Satisfaz**
- Estabilidade interna: **10.66 %** 6056.23 kN \geq 645.54 kN **Satisfaz**
- Estabilidade global: **59.40 %** Método – *Bishop* (otimização) **Satisfaz**

A estrutura de contenção suportada satisfaz os critérios de avaliação.