

Análise da capacidade de suporte horizontal de uma estaca isolada

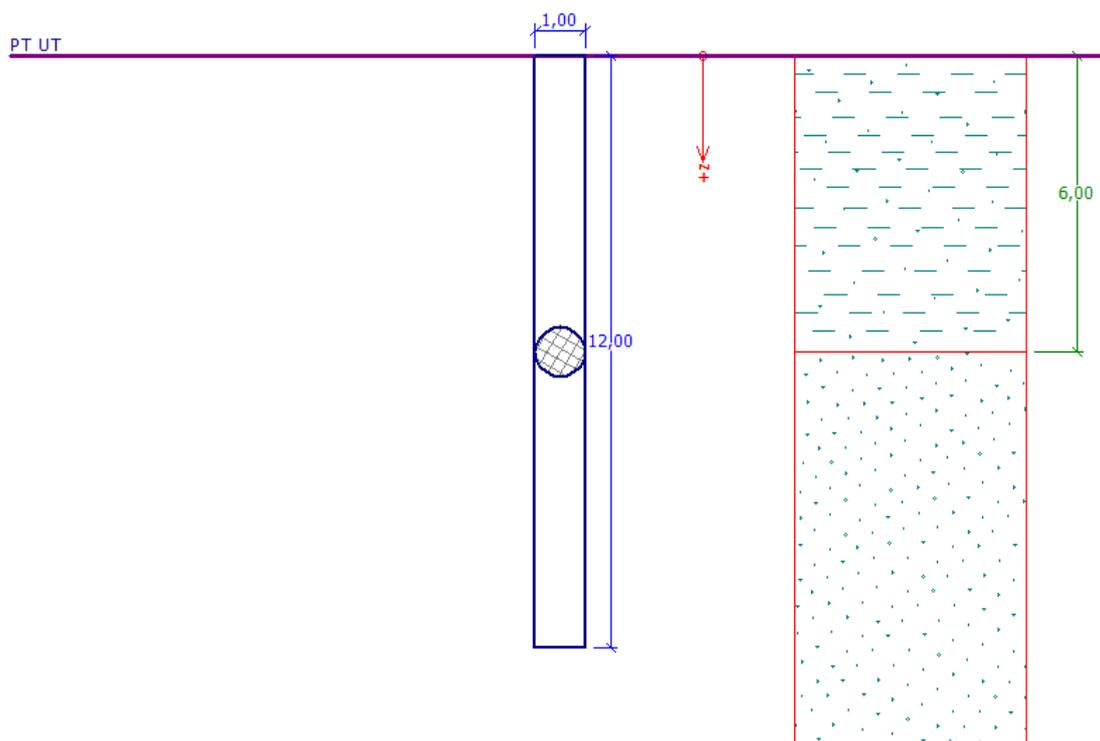
Programa: Estaca

Arquivo: Demo_manual_16.gpi

O objetivo deste manual de engenharia é explicar como utilizar o programa GEO5 Estaca para a análise da capacidade de suporte horizontal de uma estaca isolada.

Definição do problema

A definição geral do problema está descrita em um dos capítulos anteriores (*12. Fundações por estacas – introdução*). Agora, vamos realizar a análise da capacidade de suporte horizontal de uma estaca isolada, como continuação do problema de outro dos capítulos apresentados previamente (*13. Análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada*). As componentes resultantes do carregamento $N_1, M_{y,1}, H_{x,1}$ atuam ao nível da cabeça da estaca. Calcule as dimensões da estaca de acordo com a Norma EN 1992-1.



Esquema do problema – estaca isolada

Resolução

Para resolver este problema, vamos utilizar o programa GEO5 Estaca. No texto abaixo vamos descrever como resolver este problema passo-a-passo.

A estaca carregada horizontalmente é analisada através do Método dos Elementos Finitos, como uma viga assente num meio elástico de Winkler (*Subsolo elástico – método p-y*). Os parâmetros dos solos ao longo da extensão da estaca são caracterizados pelo módulo de reação horizontal do subsolo.

O programa contém outras possibilidades para determinar o módulo de reação do subsolo. Os métodos lineares (Linear, Matlock e Reese) são adequados para solos não coesivos, enquanto que os métodos constantes (Constante, Vesic) são mais adequados para solos coesivos. O método de cálculo do módulo k_h , de acordo com a Norma CSN 73 1004, é válido para ambos os métodos.

Na primeira parte deste capítulo, vamos realizar a análise utilizando o módulo de reação do subsolo constante; na segunda parte, vamos comparar as diferenças verificadas para a utilização de outros métodos.

Definições específicas

No programa “Estaca”, abra o ficheiro relativo ao Manual No. 13. Primeiro, na janela “Configurações”, clique no botão “Editar” e selecione a opção para definir o método de análise da capacidade de carga horizontal como “Subsolo elástico (método p-y)”.

Nota: Para a análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca em solo homogéneo, também é possível utilizar o [método de Broms](#) (mais detalhes na Ajuda – F1).

Editar configurações atuais : Estaca

Materiais e Normas | Estaca

Análise para condições drenadas : NAVFAC DM 7.2
 Análise para condições não drenadas : Tomlinson
 Curva carga-assentamento : linear (Poulos)
 Capacidade de carga horizontal : **Subsolo elástico (método p-y)**
 Metodologia de verificação : de acordo com EN 1997
 Abordagem do projeto : 2 - redução das ações e resistências

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

Fatores parciais sobre as ações (A)

Ações permanentes : $\gamma_G =$ [-] (Desfavorável) [-] (Favorável)

Fatores parciais para resistências (R)

Estacas escavadas | Estacas cravadas | Estacas CFA

Fator parcial sobre a resistência do eixo : $\gamma_s =$ [-]
 Fator parcial sobre a resistência de base : $\gamma_b =$ [-]
 Fator parcial sobre a resistência da tensão : $\gamma_{st} =$ [-]

Caixa de diálogo “Editar configurações atuais”

As configurações gerais da análise, valores definidos para as cargas e o perfil geológico, incluindo os parâmetros relacionados com a resistência dos solos, permanecem iguais.

Na janela “Configurações”, é, ainda, necessário remover a seleção da opção “Não calcular a capacidade de carga horizontal”.

Configurações de análises : (apenas para a tarefa atual)

Estruturas de concreto : EN 1992-1-1 (EC2)
 Coeficientes EN 1992-1-1 : Norma
 Estruturas em aço : EN 1993-1-1 (EC3)
 Fator parcial da cap. de carga da secção transversal em aço : $\gamma_{M0} = 1.00$
 Estruturas em madeira : EN 1995-1-1 (EC5)
 Fator parcial para as propriedades da madeira : $\gamma_M = 1.30$
 Coef. da influência da carga e da humidade : $k_{mod} = 0.50$
 Coef. da espessura da secção em corte : $k_{cr} = 0.67$

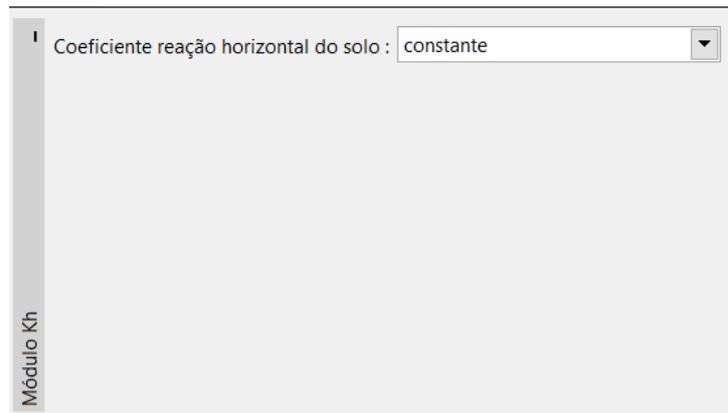
Análise para condições drenadas : NAVFAC DM 7.2
 Curva carga-assentamento : linear (Poulos)
 Capacidade de carga horizontal : Subsolo elástico (método p-y)
 Metodologia de verificação : de acordo com EN 1997
 Abordagem do projeto : 2 - redução das ações e resistências

Método de análise :
 Análise da capacidade de suporte vertical :
 Tipo de análise :

Não calcular a capacidade de carga horizontal

Janela “Configurações”

De seguida, passamos à janela “Módulo Kh”, onde vamos selecionar a opção “constante”.



Janela “Módulo k_h ”

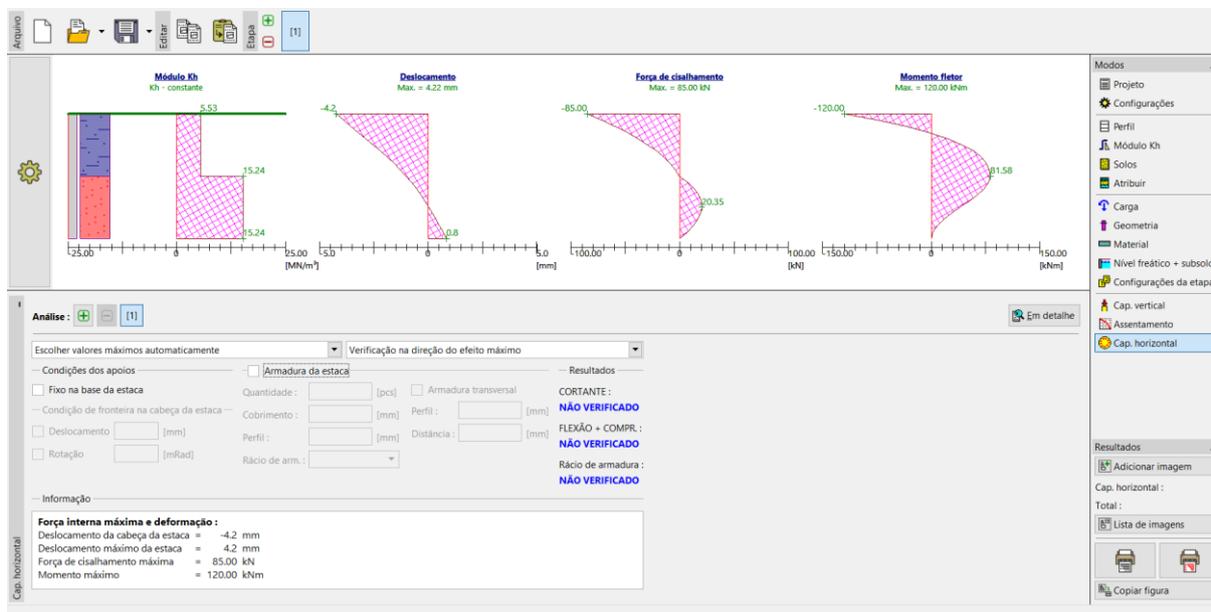
Nota: O módulo de reação horizontal do subsolo constante depende do módulo de deformação do solo E_{def} [MPa] e da largura reduzida da estaca r [m] (mais detalhes na Ajuda – F1).

Seguidamente, na janela “Solos”, é necessário definir os parâmetros dos solos – o valor do ângulo de dispersão β [–], dentro do intervalo $\frac{\varphi_{ef}}{4} - \varphi_{ef}$. Este coeficiente depende do ângulo de atrito interno do solo (mais detalhes na Ajuda – F1).

Solo (Classificação do solo)	Peso volúmico γ [kN/m ³]	Ângulo de atrito interno φ_{ef} [°]	Ângulo de dispersão β [°]	Tipo de solo
CS – Argila arenosa, consistência firme	18.5	24.5	10.0	Coesivo
S-F – Areia com partículas finas, solo mediamente denso	17.5	29.5	15.0	Não coesivo

Tabela com os parâmetros do solo – Capacidade de suporte horizontal de uma estaca isolada

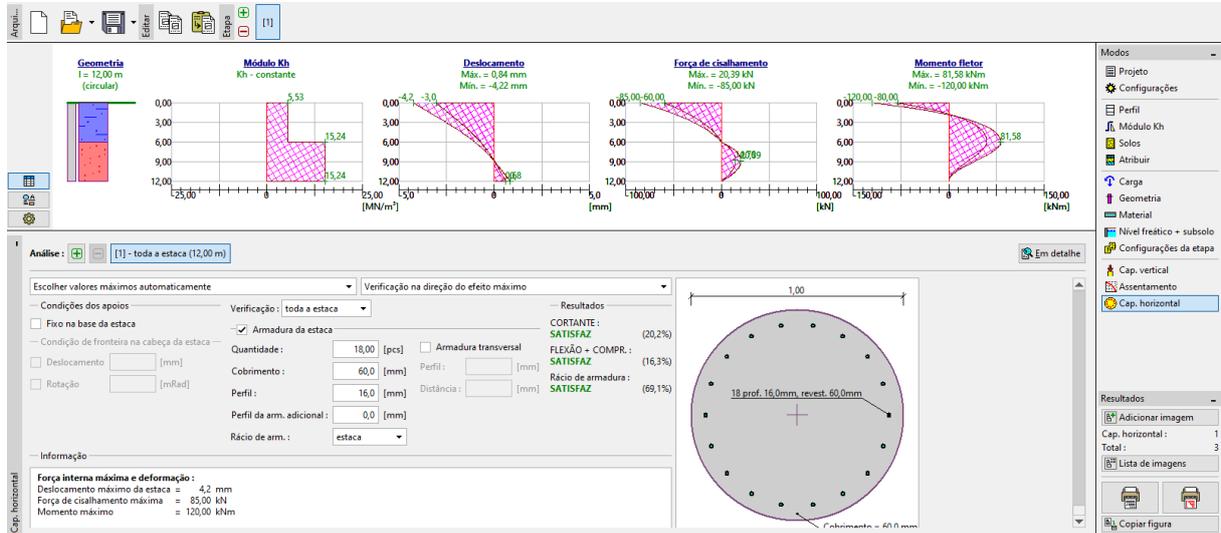
Agora, vamos passar à janela “Capacidade horizontal”, onde vamos determinar o valor da deformação horizontal máxima na cabeça da estaca, a distribuição das forças internas ao longo da estaca e os resultados do dimensionamento da estaca para a verificação do concreto armado, na direção do efeito máximo.



Janela “Capacidade de carga horizontal” – Verificação da distribuição constante do módulo k_h

Nota: A condição de fronteira de uma estaca fixada na base é modelada para os casos em que a extremidade da estaca está assente em maciços duros (não é o caso). As condições de fronteira na cabeça da estaca são aplicadas quando a carga de deformação é utilizada, onde apenas são definidas a rotação angular e a deformação na cabeça da estaca, sem definir a carga (mais detalhes na Ajuda – F1).

Nesta janela, vamos realizar o dimensionamento da armadura da estaca. Vamos dimensionar a armadura longitudinal estrutural – **18 barras Ø 16 mm** e o concreto mínimo de recobrimento de **60 mm**, correspondente à exposição ambiental de classe XC1.



Janela “Capacidade de carga horizontal” – Dimensionamento

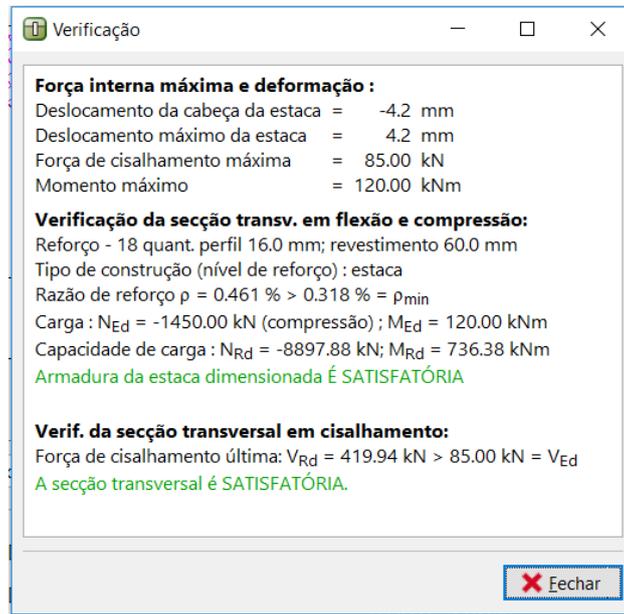
Neste caso vamos considerar um rácio de armadura para a estaca carregada horizontalmente de acosto com a Norma *CSN EN 1536: Execution of special geotechnical works - Bored piles* (Table 4 – Minimum reinforcement of bored piles). Esta opção é definida na secção “Estaca” do programa.

Área da secção transversal da estaca: A_c [m^2]	Área da armadura longitudinal: A_s [m^2]
$A_c \leq 0.5 m^2$	$A_s \geq 0.5 \% \cdot A_c$
$0.5 m^2 < A_c \leq 1.0 m^2$	$A_s \geq 0.0025 m^2$
$A_c > 1.0 m^2$	$A_s \geq 0.25 \% \cdot A_c$

“EN 1536: Table 4 – Minimum reinforcement of bored piles”

Nota: Para elementos comprimidos, é mais adequado utilizar o rácio de armadura como se fosse para um “pilar”, enquanto que uma “viga” é melhor para estacas sujeitas à flexão. Para uma combinação de cargas verticais e horizontais, a Norma CSN EN 1536 define que o rácio de armadura mínimo para estacas escavadas corresponde à proporção entre a área de armadura da secção e a área de concreto (mais detalhes em Ajuda – F1).

Nos resultados do dimensionamento da estaca, é possível observar a secção transversal da estaca sujeita à flexão e a condição para o rácio de armadura mínima (através do botão “Em detalhe”).



Caixa de diálogo “Verificação (em detalhe)”

Resultados da análise

Na análise de uma estaca isolada carregada horizontalmente, interessa conhecer a distribuição das forças internas ao longo da estaca, as deformações máximas e a utilização da secção transversal da estaca. Para uma **distribuição constante** do módulo de reação do subsolo k_h , os resultados são os seguintes:

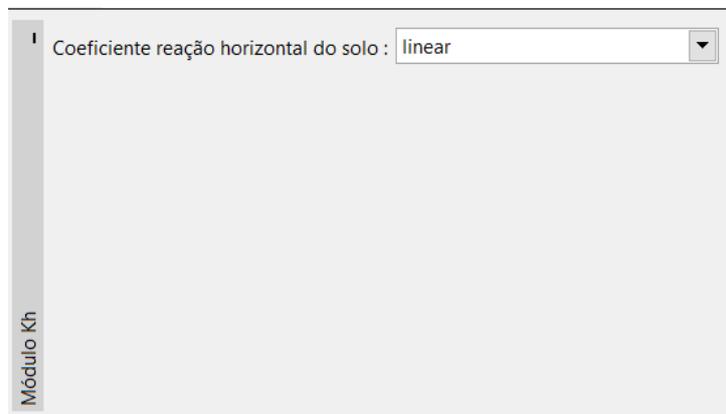
- Deformação máxima da estaca: $u_{\max} = 4.2 \text{ mm}$
- Força de cisalhamento máxima: $Q_{\max} = 85.0 \text{ kN}$
- Momento fletor máximo: $M_{\max} = 120.0 \text{ kNm}$
- Capacidade de carga da estaca (flexão + compressão): 16.3 % **SATISFAZ**
- Capacidade de carga da estaca (cisalhamento): 20.2 % **SATISFAZ**
- Rácio de armadura da estaca: 69.1 % **SATISFAZ**

Agora, vamos voltar à janela “Módulo Kh” para alterar as configurações. Vamos alterar o método de cálculo do módulo de reação do subsolo e adicionar os parâmetros do solo necessários para cada método. Vamos realizar este procedimento para os métodos seguintes:

- linear (segundo Bowles),
- de acordo com a Norma CSN 73 1004,
- de acordo com Vesic.

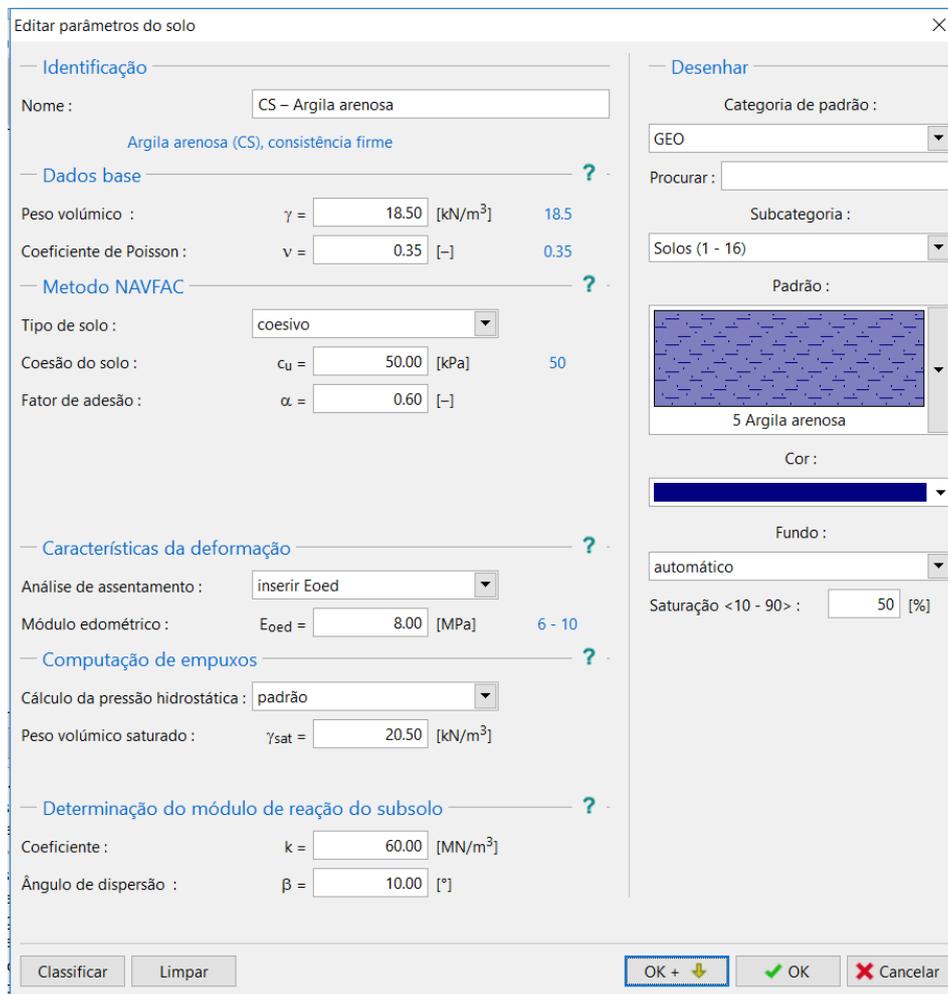
Método linear (segundo Bowles)

Primeiro, vamos à janela “Módulo Kh” alterar as configurações para “linear”.



Janela “Módulo Kh”

Depois, na janela “Solos”, vamos selecionar o solo “CS – Areia argilosa” e clicar no botão “Editar”. Vamos, ainda, alterar o coeficiente k para 60 MN/m³ e clicar em “OK”.



Editar parâmetros do solo

Identificação

Nome: CS – Argila arenosa

Argila arenosa (CS), consistência firme

Dados base

Peso volúmico: $\gamma = 18.50$ [kN/m³] 18.5

Coeficiente de Poisson: $\nu = 0.35$ [-] 0.35

Metodo NAVFAC

Tipo de solo: coesivo

Coesão do solo: $c_u = 50.00$ [kPa] 50

Fator de adesão: $\alpha = 0.60$ [-]

Características da deformação

Análise de assentamento: inserir Eoed

Módulo edométrico: $E_{oed} = 8.00$ [MPa] 6 - 10

Computação de empuxos

Cálculo da pressão hidrostática: padrão

Peso volúmico saturado: $\gamma_{sat} = 20.50$ [kN/m³]

Determinação do módulo de reação do subsolo

Coeficiente: $k = 60.00$ [MN/m³]

Ângulo de dispersão: $\beta = 10.00$ [°]

Desenhar

Categoria de padrão: GEO

Procurar:

Subcategoria: Solos (1 - 16)

Padrão: 5 Argila arenosa

Cor:

Fundo: automático

Saturação <10 - 90>: 50 [%]

Classificar Limpar OK + ↓ OK Cancelar

Janela “Solos” – Editar parâmetros do solo (solo CS)

Repita o mesmo procedimento para o solo “S-F – Areia com partículas finas”. Desta vez, defina o coeficiente k como 150 MN/m^3 .

Janela “Solos” – Editar parâmetros do solo (solo S-F)

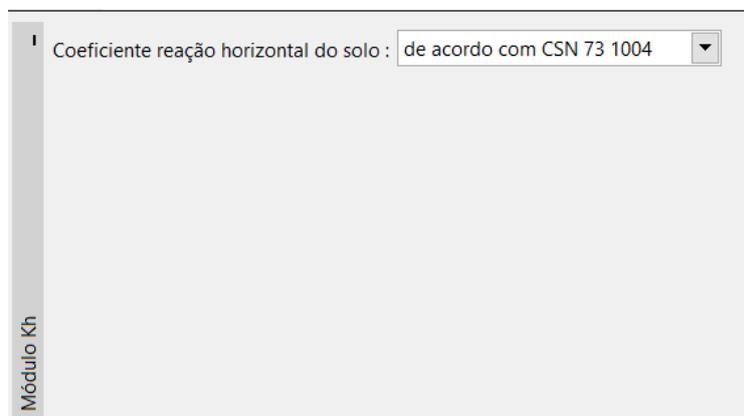
Agora, vamos à janela “Capacidade de carga horizontal”, para visualizar os resultados da análise.



Janela “Capacidade de carga horizontal” – Distribuição linear do módulo de reação horizontal do subsolo k_h , deformação e forças internas

Segundo a Norma CSN 73 1004

Agora, voltamos à janela “Módulo Kh” para alterar o método de análise para “segundo CSN 73 1004”.



Janela “Módulo Kh”

Na janela “Solos”, é necessário definir o módulo de compressão horizontal para o solo não coesivo “S-F – Areia com partículas finas”. Clique no botão “Editar” e defina o valor do módulo como 4.5 MN/m³.

Editar parâmetros do solo
✕

Identificação

Nome :

Areia com finos (S-F), densidade média

Dados base ?

Peso volúmico : $\gamma =$ [kN/m³] 17.5

Coefficiente de Poisson : $\nu =$ [-] 0.30

Metodo NAVFAC ?

Tipo de solo :

Ângulo de atrito interno : $\varphi_{ef} =$ [°] 28 - 31

Fricção na estaca :

Coefficiente de tensão lateral :

Características da deformação ?

Análise de assentamento :

Módulo edométrico : $E_{oed} =$ [MPa] 16 - 26

Computação de empuxos ?

Cálculo da pressão hidrostática :

Peso volúmico saturado : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

Determinação do módulo de reação do subsolo ?

Tipo de solo :

Módulo de compressibilidade horizontal : $n_h =$ [MN/m³]

Desenhar

Categoria de padrão :

Procurar :

Subcategoria :

Padrão :

Cor :

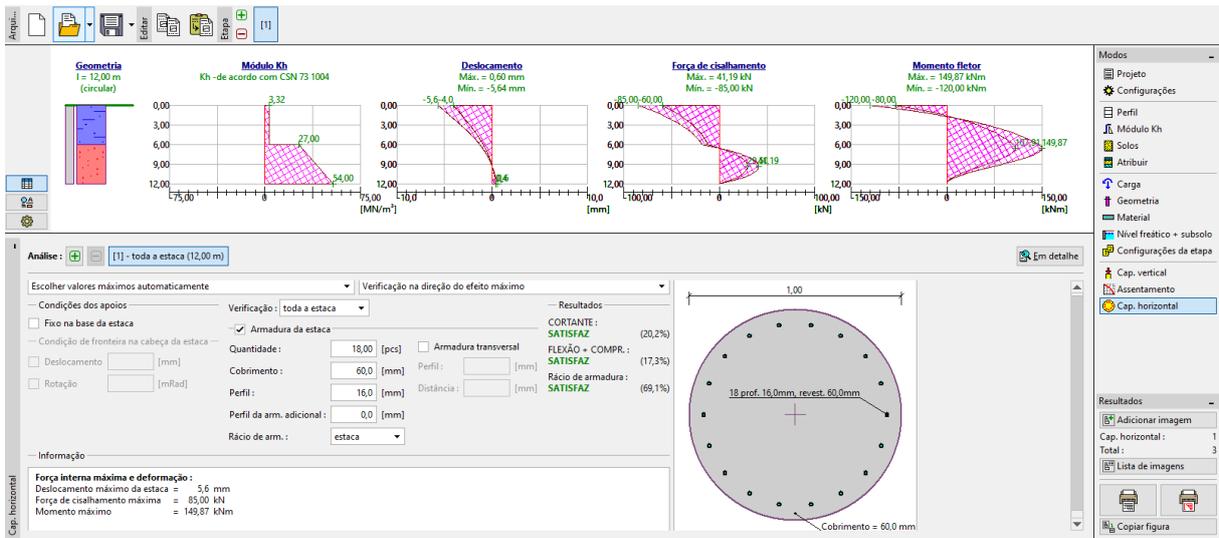
Fundo :

Saturação <10 - 90> : [%]

Classificar
Limpar
OK + ↑
OK
Cancelar

Janela “Solos” – Editar parâmetros do solo (solo S-F)

Agora, é possível visualizar os resultados na janela “Capacidade de carga horizontal”.

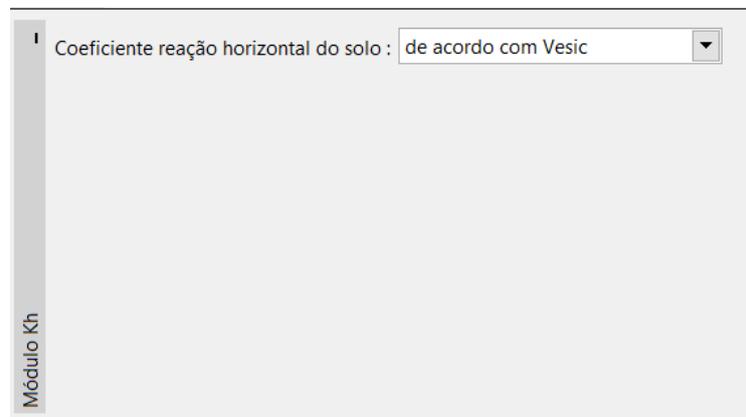


Janela “Capacidade de carga horizontal” – Distribuição do módulo de reação horizontal do subsolo

k_h segundo a Norma CSN 73 1004, deformação e forças internas

Segundo Vesic

Mais uma vez, vamos voltar à janela “Módulo Kh” e alterar as configurações para “segundo Vesic”.



Janela “Módulo Kh”

Na janela “Solos”, é necessário definir o módulo de elasticidade E para ambos os solos. No caso do solo “CS – Areia argilosa”, o seu valor deve ser definido como 5 MPa.

Editar parâmetros do solo

Identificação

Nome : CS – Argila arenosa
Argila arenosa (CS), consistência firme

Dados base

Peso volúmico : $\gamma = 18.50$ [kN/m³] 18.5
Coeficiente de Poisson : $\nu = 0.35$ [-] 0.35

Metodo NAVFAC

Tipo de solo : coesivo
Coesão do solo : $c_u = 50.00$ [kPa] 50
Fator de adesão : $\alpha = 0.60$ [-]

Características da deformação

Análise de assentamento : inserir Eoed
Módulo edométrico : $E_{oed} = 8.00$ [MPa] 6 - 10

Computação de empuxos

Cálculo da pressão hidrostática : padrão
Peso volúmico saturado : $\gamma_{sat} = 20.50$ [kN/m³]

Determinação do módulo de reação do subsolo

Módulo de young : $E = 5.00$ [MPa]

Desenhar

Categoria de padrão : GEO
Procurar :
Subcategoria : Solos (1 - 16)
Padrão : 5 Argila arenosa
Cor :
Fundo : automático
Saturação <10 - 90> : 50 [%]

Classificar Limpar OK + ↓ OK Cancelar

Janela “Solos” – Editar parâmetros do solo (solo CS)

Defina, também, o módulo de elasticidade E para o solo “S-F – Areia com partículas finas”. Neste caso, o seu valor é 15.5 MPa.

Editar parâmetros do solo

Identificação

Nome : S-F – Areia com partículas finas
Areia com finos (S-F), densidade média

Dados base

Peso volúmico : $\gamma = 17.50$ [kN/m³] 17.5
 Coeficiente de Poisson : $\nu = 0.30$ [-] 0.30

Metodo NAVFAC

Tipo de solo : não coesivo
 Ângulo de atrito interno : $\phi_{ef} = 29.50$ [°] 28 - 31
 Fricção na estaca : calcular
 Coeficiente de tensão lateral : calcular

Características da deformação

Análise de assentamento : inserir Eoed
 Módulo edométrico : $E_{oed} = 21.00$ [MPa] 16 - 26

Computação de empuxos

Cálculo da pressão hidrostática : padrão
 Peso volúmico saturado : $\gamma_{sat} = 19.50$ [kN/m³]

Determinação do módulo de reação do subsolo

Módulo de young : $E = 15.50$ [MPa]

Desenhar

Categoria de padrão : GEO
 Procurar :
 Subcategoria : Solos (1 - 16)
 Padrão : 9 Areia
 Cor :
 Fundo : automático
 Saturação <10 - 90> : 50 [%]

Classificar Limpar OK + ↑ OK Cancelar

Janela “Solos” – Editar parâmetros do solo (solo S-F)

Agora, é possível visualizar os resultados na janela “Capacidade de carga horizontal”.



Janela “Capacidade de carga horizontal” – Distribuição do módulo de reação horizontal do subsolo k_h segundo Vesic, deformação e forças internas

Resultados da análise da capacidade de suporte horizontal de uma estaca isolada:

Os resultados da análise da capacidade de suporte horizontal de uma estaca isolada, para cada método utilizado para calcular o módulo de reação horizontal do subsolo k_h , são apresentados na tabela seguinte:

Módulo de reação do subsolo k_h [MN/m^3]	Deslocamento máximo da estaca u_{max} [mm]	Momento fletor máximo M_{max} [kNm]	Capacidade de suporte da estaca [%]
CONSTANTE	4.2	120.0	16.3
LINEAR (Bowles)	6.4	174.44	18.2
CSN 73 1004	5.6	149.87	17.3
VESIC	9.3	120.0	16.3

Sumário dos resultados – Capacidade de suporte horizontal e dimensionamento de uma estaca isolada

Conclusão

A partir dos resultados da análise, é possível verificar que os valores obtidos para as forças internas ao longo da estaca e para as deformações máximas na cabeça da estaca diferem ligeiramente, mas a influência do método escolhido para calcular o módulo de reação horizontal do subsolo não é crucial.