

Análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada

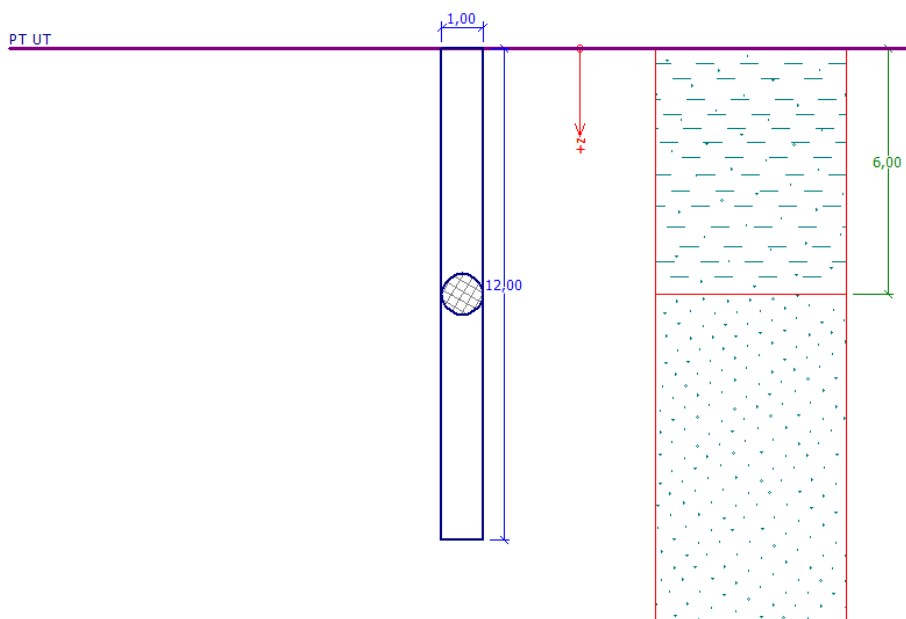
Programa: Estaca

Arquivo: Demo_manual_13.gpi

O objetivo deste manual de engenharia é explicar a aplicação do programa GEO5 Estaca na análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada, para um problema prático específico.

Definição do problema

A definição geral do problema é apresentada no capítulo anterior (*12. Fundações por estacas – introdução*). Todas as análises da capacidade de suporte vertical de estacas isoladas podem ser realizadas de acordo com os requisitos da Norma EN 1997-1 (Metodologia de dimensionamento 2). As componentes resultantes do carregamento $N_1, M_{y,1}, H_{x,1}$ atuam ao nível da cabeça da estaca.



Esboço do problema – estaca isolada

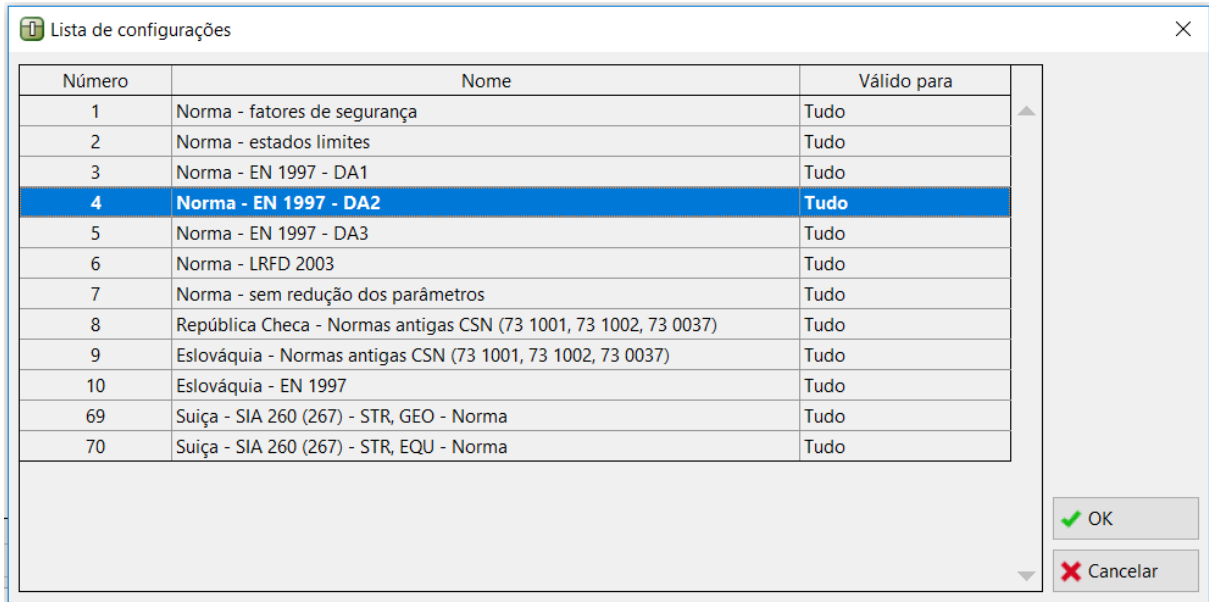
Resolução

Para analisar este problema, vamos utilizar o programa GEO5 Estaca. No texto abaixo, vamos descrever a resolução deste problema passo-a-passo.

Nesta análise, vamos avaliar uma estaca isolada através de vários métodos de análise analíticos (NAVFAC DM 7.2, TENSÃO EFETIVA e CSN 73 1002) e vamos focar-nos nos **parâmetros a introduzir**, que influenciam os resultados.

Definições específicas

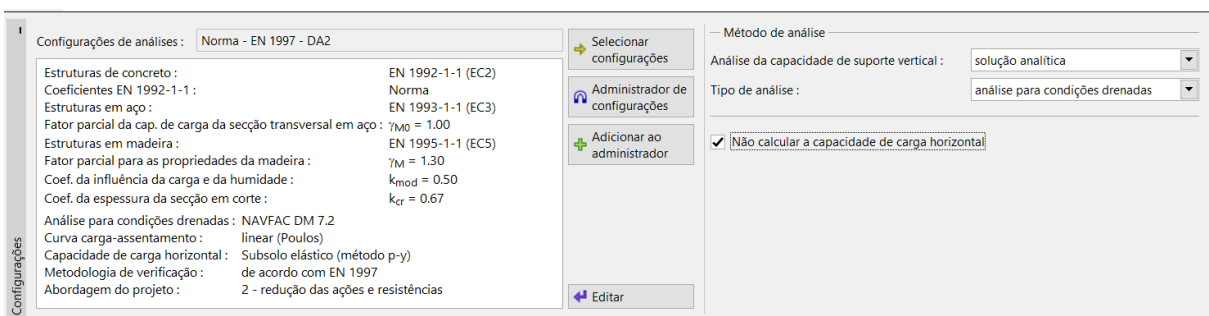
Na janela “Configurações”, através do botão “Selecionar” (na parte inferior do ecrã), escolhemos a opção No. 4 “Norma – EN 1997 – DA2”. De seguida, definimos o método de análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca utilizando a *solução analítica*. No nosso caso, vamos avaliar a estaca em **condições drenadas**.



Caixa de diálogo “Lista de configurações”

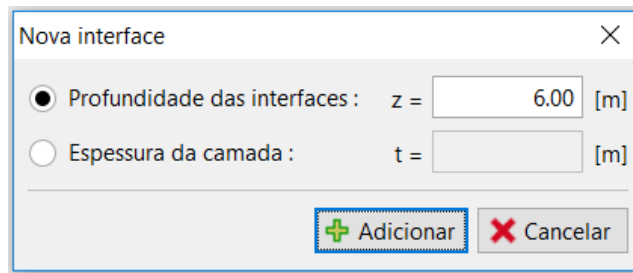
Vamos utilizar o método NAVFAC DM 7.2, que é configuração de análise definida por defeito, para a avaliação inicial da estaca (ver *imagem abaixo*).

Não vamos analisar a capacidade de suporte horizontal nesta tarefa, sendo que devemos selecionar a opção “Não calcular a capacidade de carga horizontal”.



Janela “Configurações”

Depois, avançamos para a janela “Perfil”, onde vamos adicionar uma nova interface à cota de 6.0 m.



Janela “Perfil” – adicionar nova interface

A seguir, passamos à janela “Solos”, onde vamos definir os parâmetros do solo necessários para a análise e atribuímo-lo ao perfil. O método **NAVFAC DM 7.2** implica que o tipo de solo seja definido primeiro, isto é, se é uma camada de solo coesiva ou não coesiva. Todos os parâmetros listados abaixo influenciam o valor do atrito superficial R_s [kN].

Solo (Classificação do solo)	Peso volúmico γ [kN/m ³]	Ângulo de atrito interno φ_{ef} [°]	Coesão do solo c_{ef} / c_u [kPa]	Fator de adesão α [–]	Coef. de capacidade de supote β_p [–]
CS – Argila arenosa, consistência firme	18.5	24.5	- / 50	0.60	0.30
S-F – Areia com partículas finas, solo mediamente denso	17.5	29.5	0 / -	-	0.45

Tabela com os parâmetros do solo – Capacidade de suporte vertical (solução analítica)

Para a 1ª camada, considerada como um **solo coesivo não drenado** (classe F4, consistência firme), também é necessário definir a coesão total do solo (resistência não drenada) c_u [kPa] e o fator de adesão α [-]. Este fator é determinado tendo em conta a consistência do solo, material da estaca e coesão total do solo (mais informações na Ajuda – F1).

Adicionar novos solos
✕

Identificação

Nome :

Dados base ?

Peso volúmico : $\gamma =$ [kN/m³]

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

Metodo NAVFAC ?

Tipo de solo :

Coesão do solo : $c_u =$ [kPa]

Fator de adesão : $\alpha =$ [-]

Características da deformação ?

Análise de assentamento :

Módulo edométrico : $E_{oed} =$ [MPa]

Computação de empuxos ?

Cálculo da pressão hidrostática :

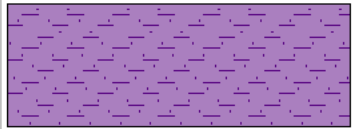
Peso volúmico saturado : $\gamma_{sat} =$ [kN/m³]

Desenhar

Categoria de padrão :

Procurar :

Subcategoria :

Padrão : 

5 Argila arenosa

Cor :

Fundo :

Saturação <10 - 90> : [%]

Caixa de diálogo “Adicionar novos solos” – solo CS

Para a 2ª camada, considerada como um **solo não coesivo** (classe S3, mediamente denso), é necessário definir o ângulo de atrito superficial δ [°], que depende do material da estaca. Também é necessário definir o coeficiente de tensão lateral K [-], que é afetado pelo tipo de carregamento (tensão – pressão) e pela técnica de instalação da estaca (mais detalhes na Ajuda – F1). Para simplificar o problema, selecionamos a opção “calcular” para ambas as variáveis.

Adicionar novos solos

Identificação

Nome : S-F – Areia com partículas finas

Dados base

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

Metodo NAVFAC

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

Características da deformação

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

Computação de empuxos

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

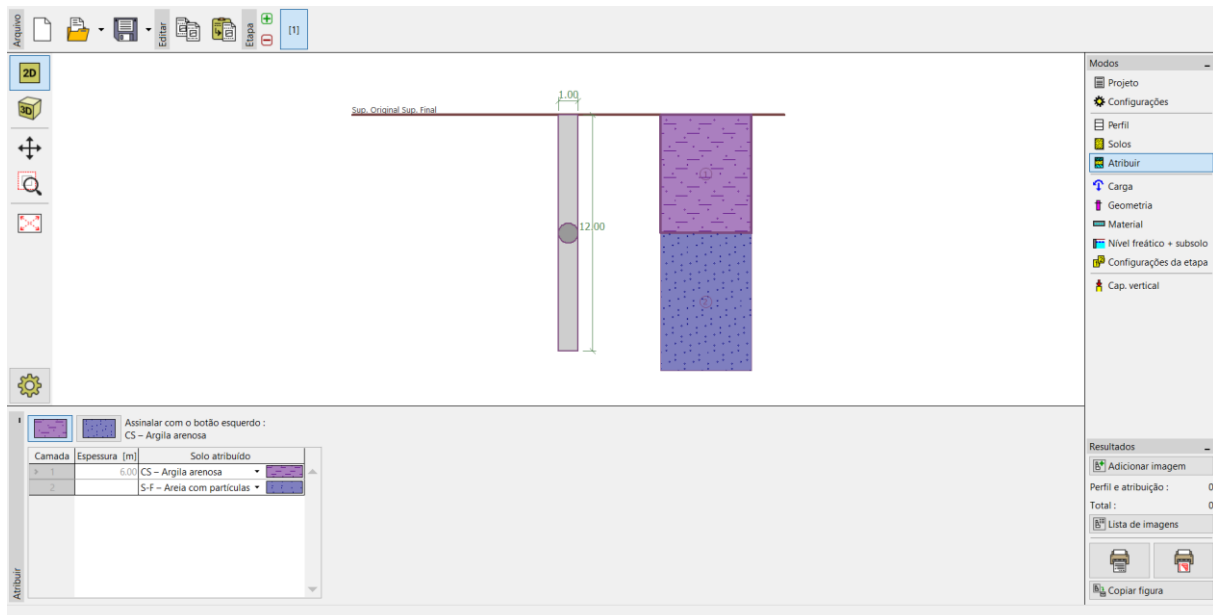
Desenhar

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

Classificar Limpar Adicionar Cancelar

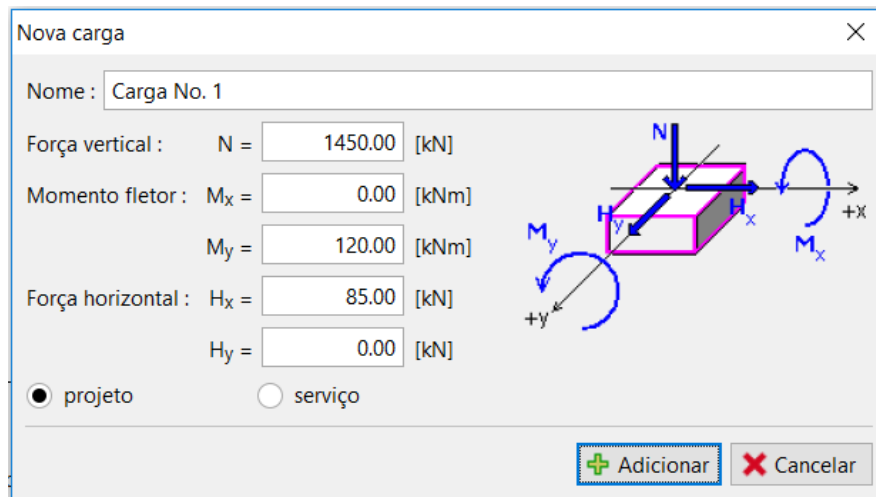
Caixa de diálogo “Adicionar novos solos” – solo S-F

Seguidamente, passamos à atribuição dos solos na janela “Atribuir”.



Janela “Atribuir” – atribuir solos ao perfil

Agora, vamos definir o carregamento atuante na estrutura, na janela “Carga”. O carregamento de projeto (cálculo) é considerado na análise da capacidade de suporte vertical da estaca, enquanto que o carregamento de serviço é considerado na análise de assentamento. Assim, vamos adicionar uma nova carga de dimensionamento, conforme mostra a imagem abaixo.



Caixa de diálogo “Nova carga”

Na janela “Geometria”, vamos definir a secção transversal da estaca como circular e determinar as suas dimensões base, isto é, o diâmetro e o comprimento. Também é necessário definir o tipo de estaca e a técnica de instalação.

Janela “Geometria”

Na janela “Material”, vamos definir as características materiais da estaca – o peso volúmico da estrutura: $\gamma = 23.0 \text{ kN/m}^3$.

Janela “Material”

Não vamos realizar alterações na janela “Nível freático + subsolo”. Na janela “Configurações da etapa”, definimos a situação do projeto como permanente e prosseguimos para a avaliação da estaca na janela “Capacidade vertical”.

Análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada – método de análise NAVFAC DM 7.2

Na janela “Capacidade vertical”, é necessário começar por definir os parâmetros de análise que afetam o valor da capacidade de suporte da base da estaca R_b [kN]. Definimos o coeficiente de análise da profundidade crítica k_{dc} [-], que está relacionado com a profundidade crítica dependente da densidade do solo (mais detalhes em Ajuda – F1). Consideramos este coeficiente como $k_{dc} = 1,0$.

Outro parâmetro importante é o coeficiente da capacidade de suporte N_q [-], que é determinado através do ângulo de atrito interno do solo φ_{ef} [°], com base na tecnologia de instalação da estaca (mais detalhes em Ajuda – F1). Neste caso, consideramos $N_q = 10,0$.

Verificação da capacidade de carga : NAVFAC DM 7.2
 Análise realizada para a seleção automática da combinação de cargas mais desfavorável.
 Fator determinante da prof. crítica $k_{dc} = 1.00$
 Fator da capacidade de carga $N_q = 10.00$

Verificação da compressão da estaca:
 Combinação de cargas mais desfavorável No. 1. (Load No. 1 - Design)

Cap. de carga superficial da estaca $R_s = 676.82$ kN
 Cap. de carga na base da estaca $R_b = 1542.24$ kN

Capacidade de carga da estaca $R_c = 2219.06$ kN
 Força vertical última $V_d = 1450.00$ kN

$R_c = 2219.06$ kN > 1450.00 kN = V_d
 Capacidade de carga da estaca É SATISFATÓRIA

Análise : Escolher valores máximos automaticamente
 — Análise NAVFAC DM 7.2
 Fator determinante da prof. crítica : $k_{dc} = 1.00$ [-]
 Coeficiente N_q : introduzir
 Coeficiente da capacidade de carga : $N_q = 10.00$ [-]

Resultados
 Adicionar imagem
 Cap. vertical : 0
 Total : 2
 Lista de imagens
 Copiar figura

Janela “Capacidade vertical” – avaliação de acordo com NAVFAC DM 7.2

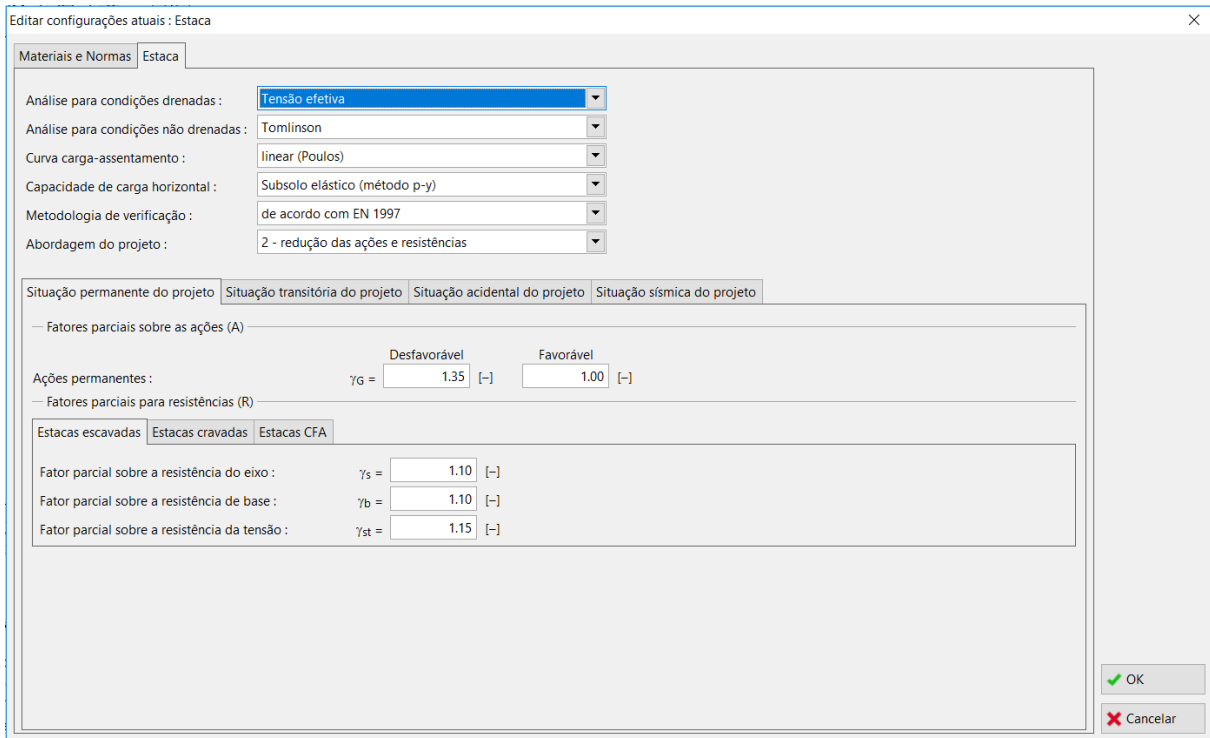
A capacidade de suporte vertical de dimensionamento de uma estaca com carregamento central R_c [kN] consiste na soma do atrito superficial R_s com a resistência na base da estaca R_b . Para obter a condição de confiança, este valor deve ser superior ao valor da carga de projeto V_d [kN] atuante na cabeça da estaca.

– **NAVFAC DM 7.2:** $R_c = 2219.06$ kN > $V_d = 1450.0$ kN **SATISFAZ**

Análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada – método da TENSÃO EFETIVA

Agora vamos voltar às configurações de introdução de dados para realizar a análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada, através de outros métodos de análise (Tensão efetiva e CSN 73 1002).

Na janela “Configurações”, clicamos no botão “Editar”. Na secção “Estaca”, selecione a opção “tensão efetiva”. Os outros parâmetros não devem ser alterados.



Editar configurações atuais : Estaca

Material e Normas Estaca

Análise para condições drenadas : Tensão efetiva

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 : $\gamma_G =$ [-] [-]

— 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 : $\gamma_{st} =$ [-]

OK Cancelar

Caixa de diálogo “Editar configurações atuais”

Passando à janela “Solos”, é necessário definir o coeficiente da capacidade de suporte da estaca $\beta_p [-]$, para este método de análise, que influencia o valor do atrito superficial $R_s [kN]$. Este parâmetro é determinado através do ângulo de atrito interno do solo $\varphi_{ef} [^\circ]$ e pelo tipo de solo (mais detalhes na Ajuda – F1).

Editar parâmetros do solo

Identificação

Nome : CS - Argila arenosa

Dados base

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

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

Método de tensão efetiva

Tendo coeficiente de capacidade : $\beta_p = 0.30$ [-]

Características da deformação

Análise de assentamento : inserir Eoed

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

Computação de empuxos

Cálculo da pressão hidrostática : padrão

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

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

Caixa de diálogo “Editar parâmetros do solo” – solo CS

Caixa de diálogo “Editar parâmetros do solo” – solo S-F

As restantes janelas não são alteradas. Agora, voltamos à janela “Capacidade vertical”. Para o método da **Tensão efetiva**, é necessário começar por definir o valor do coeficiente da capacidade de suporte N_p [-], que afeta de forma significativa a capacidade de suporte da base da estaca R_b [kN]. Este parâmetro é determinado através do ângulo de atrito interno do solo φ_{ef} [°] e pelo tipo de solo (mais detalhes na Ajuda – F1).

A influência significativa que este parâmetro tem nos resultados é demonstrada através dos valores abaixo:

- para $N_p = 10$ (base da estaca em solo *argiloso*): $R_b = 1542.24 \text{ kN}$,
- para $N_p = 30$ (base da estaca em solo *arenoso*): $R_b = 4626.71 \text{ kN}$,
- para $N_p = 60$ (base da estaca em solo *de cascalho*): $R_b = 9253.42 \text{ kN}$.

Neste problema em particular, consideramos o coeficiente da capacidade de suporte $N_p = 30$ (base da estaca em solo arenoso). Os valores de referência para N_p são apresentados na Ajuda – para mais detalhes clique no botão “F1”.

Verificação da capacidade de carga : método de tensão efetiva
 Análise realizada para a seleção automática da combinação de cargas mais desfavorável .

Verificação da compressão da estaca:
 Combinação de cargas mais desfavorável No. 1. (Carga No. 1)

Cap. de carga superficial da estaca $R_c = 1546.09 \text{ kN}$
 Cap. de carga na base da estaca $R_b = 4626.71 \text{ kN}$

Capacidade de carga da estaca $R_c = 6172.80 \text{ kN}$
 Força vertical final $V_d = 1450.00 \text{ kN}$

$R_c = 6172.80 \text{ kN} > 1450.00 \text{ kN} = V_d$
 Capacidade de carga da estaca É SATISFATORIA

Análise : [1] Em detalhe

Escolher valores máximos automaticamente

Análise método de tensão efetiva

Coeficiente da capacidade de carga : $N_p = 30.00 [-]$

Cap. vertical

Modos

- Projeto
- Configurações
- Perfil
- Solos
- Atribuir
- Carga
- Geometria
- Material
- Nível freático + subsolo
- Configurações da etapa
- Cap. vertical
- Assentamento

Resultados

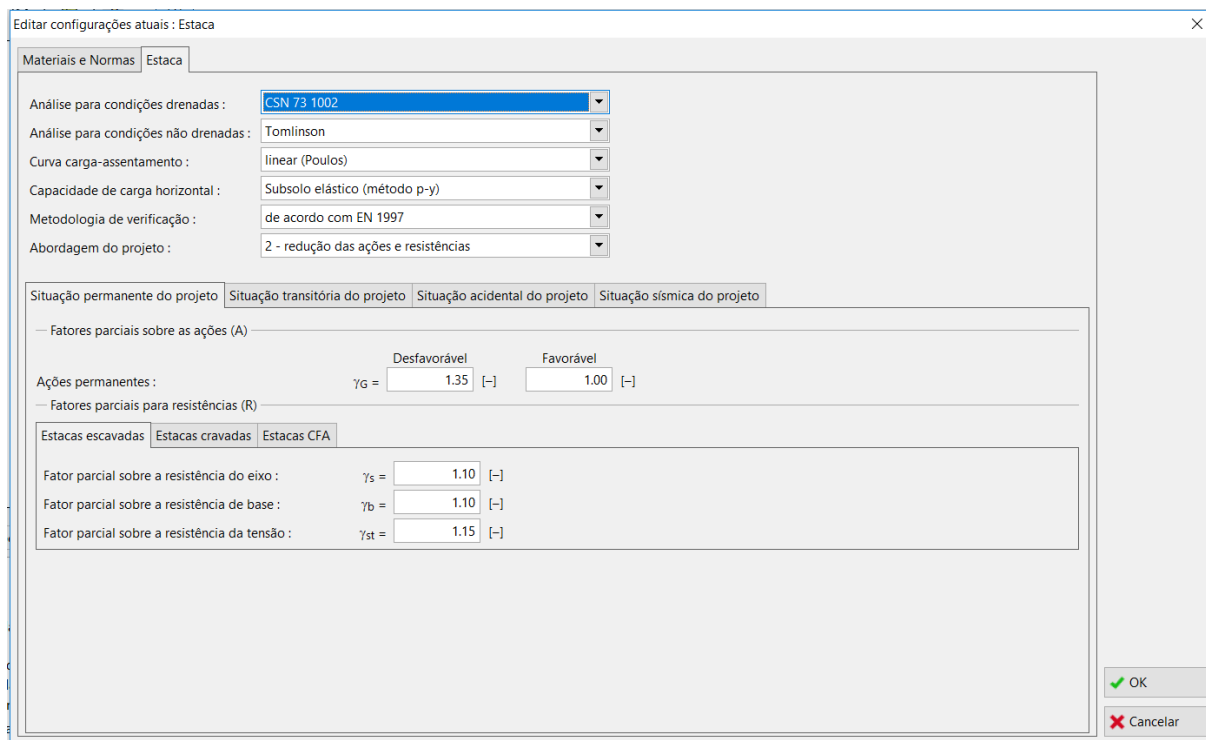
- Adicionar imagem
- Cap. vertical : 0
- Total : 0
- Lista de imagens
- Copiar figura

Janela “Capacidade vertical” - avaliação de acordo com o método da Tensão Efetiva

– **TENSÃO EFETIVA:** $R_c = 6172.8 \text{ kN} > V_d = 1450.0 \text{ kN}$ **SATISFAZ**

Análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada – método de análise CSN 73 1002

Voltamos à caixa de diálogo “Configurações”, onde alteramos o método de análise para condições drenadas, através do botão “Editar”, selecionando o método de análise “CSN 73 1002”. Todos os outros parâmetros permanecem inalterados.



Editar configurações atuais : Estaca

Materials e Normas | Estaca

Análise para condições drenadas : CSN 73 1002

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 : $\gamma_G =$ 1.35 [-] (Desfavorável) | 1.00 [-] (Favorável)

— Fatores parciais para resistências (R)

Estacas escavadas | Estacas cravadas | Estacas CFA

Fator parcial sobre a resistência do eixo : $\gamma_s =$ 1.10 [-]

Fator parcial sobre a resistência de base : $\gamma_b =$ 1.10 [-]

Fator parcial sobre a resistência da tensão : $\gamma_{st} =$ 1.15 [-]

OK

Cancelar

Caixa de diálogo “Editar configurações atuais”

Nota: A metodologia de análise é apresentada na publicação “Pile foundations – Comments on CSN 73 1002” (Capítulo 3: Designing, parte B – General solution according to group 1 of the limit states theory, p. 15). Todas as metodologias do programa baseiam-se nas relações apresentadas neste texto, com a exceção dos coeficientes de análise, que dependem da metodologia de avaliação adotada (mais detalhes na Ajuda – F1).

Agora, vamos, novamente, à janela “Solos”, onde é necessário definir os parâmetros efetivos para cada solo.

Editar parâmetros do solo

Identificação

Nome :

Dados base ?

Peso volúmico : $\gamma =$ [kN/m³]

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

Coesão do solo : $c_{ef} =$ [kPa]

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

Características da deformação ?

Análise de assentamento :

Módulo edométrico : $E_{oed} =$ [MPa]

Computação de empuxos ?

Cálculo da pressão hidrostática :

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

Desenhar

Categoria de padrão :

Procurar :

Subcategoria :

Padrão :

Cor :

Fundo :

Saturação <10 - 90> : [%]

Classificar Limpar OK + ↓ OK Cancelar

Caixa de diálogo “Editar parâmetros do solo” – solo CS

Editar parâmetros do solo
✕

Identificação

Nome :

Dados base ?

Peso volúmico : $\gamma =$ [kN/m³]

Ângulo de atrito interno : $\phi_{ef} =$ [°]

Coesão do solo : $c_{ef} =$ [kPa]

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

Características da deformação ?

Análise de assentamento :

Módulo edométrico : $E_{oed} =$ [MPa]

Computação de empuxos ?

Cálculo da pressão hidrostática :

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

Desenhar

Categoria de padrão :

Procurar :

Subcategoria :

Padrão :

Cor :

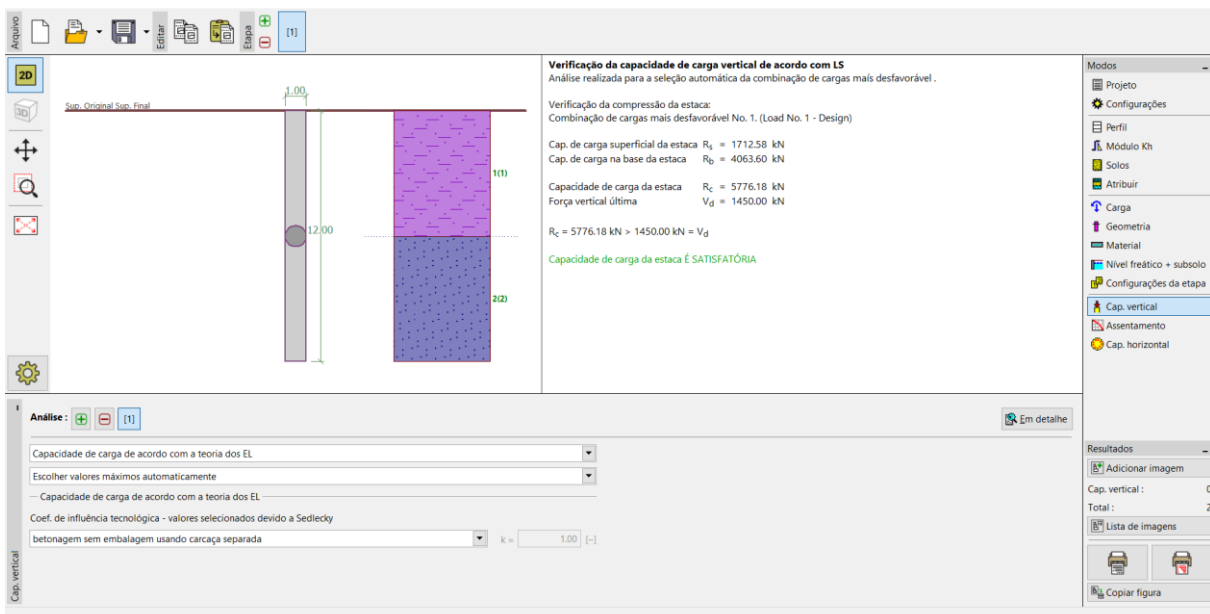
Fundo :

Saturação <10 - 90> : [%]

Classificar
Limpar
OK + ↑
OK
Cancelar

Caixa de diálogo “Editar parâmetros do solo” – solo S-F

Depois, vamos reanalisar a estaca na janela “Capacidade vertical”. Mantemos o coeficiente de influência tecnológica igual a 1.0 (análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca sem redução devido à técnica de instalação).



Janela “Capacidade vertical” - avaliação de acordo com o método CSN 73 1002

– **CSN 73 1002:** $R_c = 5776.18 \text{ kN} > V_d = 1450.0 \text{ kN}$ **SATISFAZ**

Resultados da análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada

Os valores da capacidade de suporte vertical total R_c de uma estaca diferem consoante o método de análise utilizado e os respetivos parâmetros assumidos para estes métodos:

NAVFAC DM 7.2:

- fator de adesão α [-],
- ângulo de atrito superficial da estaca δ [°],
- coeficiente de tensão lateral do solo K [-],
- coeficiente de análise da profundidade crítica k_{dc} [-],
- coeficiente da capacidade de suporte N_q [-].

TENSÃO EFETIVA:

- coeficiente da capacidade de suporte da estaca β_p [-],
- coeficiente da capacidade de suporte N_p [-].

CSN 73 1002:

- coesão do solo c_{ef} [kPa],
- ângulo de atrito interno do solo φ_{ef} [°].

Os resultados da análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada, em condições drenadas, de acordo com os diferentes métodos de análise utilizados, são apresentados na tabela seguinte:

EN 1997-1, DA2 (condições drenadas) Método de análise	Capacidade de suporte superficial da estaca R_s [kN]	Capacidade de suporte da base da estaca R_b [kN]	Capacidade de suporte vertical R_c [kN]
NAVFAC DM 7.2	676.82	1542.24	2219.06
TENSÃO EFETIVA	1546.09	4626.71	6172.80
CSN 73 1002	1712.58	4063.60	5776.18

Sumário dos resultados – Capacidade de suporte vertical da estaca em condições drenadas

A capacidade de suporte vertical total de uma estaca com carregamento central R_c é superior ao valor da carga de projeto V_d atuante sobre a mesma. A condição fundamental de confiança para o estado limite último é verificada; o dimensionamento da estaca é satisfatório.

Conclusão

A partir dos resultados da análise é possível verificar que a capacidade de suporte vertical total difere, devido à utilização de parâmetros e de métodos de análise diferentes.

A avaliação da estaca depende, em primeiro lugar, do método de análise escolhido e dos parâmetros do solo utilizados. Os projetistas devem utilizar metodologias de análise coerentes com os parâmetros do solo disponíveis, por exemplo, valores obtidos a partir de investigações geológicas e de acordo com as práticas locais.

Não é apropriado analisar uma estaca com recurso a todos os métodos disponíveis no programa e escolher o melhor ou os piores resultados.

Para a República Checa e Eslováquia, os autores do software GEO5 recomendam a análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada utilizando dois métodos:

- análise considerando o valor do assentamento permitido $s_{\text{lim}} = 25 \text{ mm}$ (metodologia de acordo com **Masopust**, que se baseia nas equações de curvas de regressão).
- análise de acordo com **CSN 73 1002**. A metodologia de análise da estaca é idêntica ao proposto em CSN, mas os coeficientes de carregamento e de análise para reduzir os parâmetros do solo ou a resistência da estaca são definidos de acordo com EN 1997-1. Esta análise está totalmente de acordo com o proposto em EN 1997-1.