

## Análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca isolada

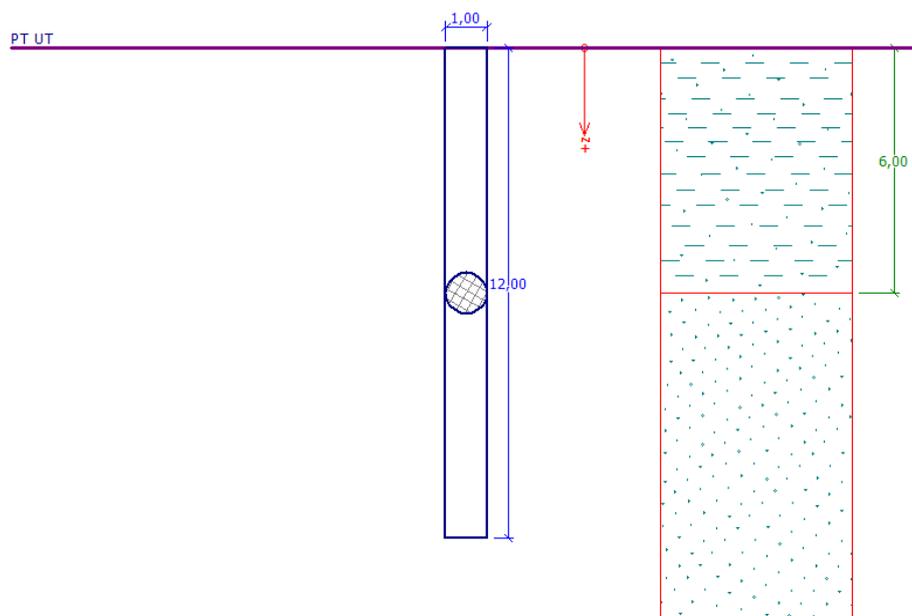
Programa: Estaca

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*

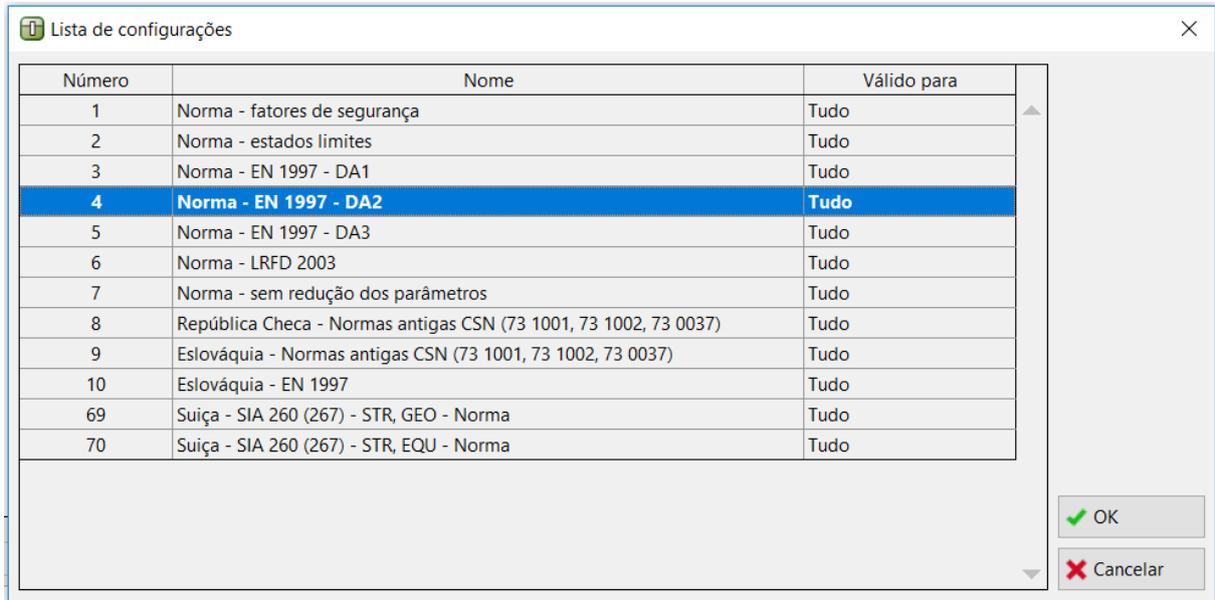
### Resolução

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

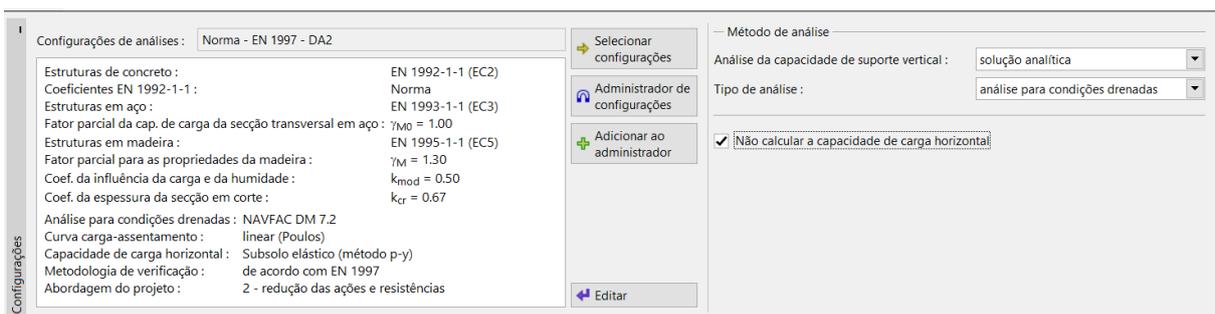
Na janela “Configurações”, através do botão “Selecionar” (na parte inferior do ecrã), escolhemos a opção No. 4 “Norma – EN 1997 – DA2”. De seguida, definimos o método de análise da capacidade de suporte vertical de uma estaca utilizando a *solução analítica*. No nosso caso, vamos avaliar a estaca em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



Caixa de diálogo “Lista de configurações”

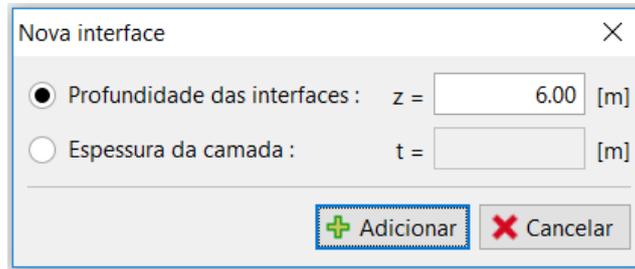
Vamos utilizar o método NAVFAC DM 7.2, que é configuração de análise definida por defeito, para a avaliação inicial da estaca (ver *imagem abaixo*).

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 $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Ângulo de atrito interno $\varphi_{ef}$ [°]	Coesão do solo $c_{ef} / c_u$ [kPa]	Fator de adesão $\alpha$ [–]	Coef. de capacidade de supote $\beta_p$ [–]
CS – Argila arenosa, consistência firme	18.5	24.5	- / 50	0.60	0.30
S-F – Areia com partículas finas, solo mediantemente 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  $\alpha$  [-]. 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/m<sup>3</sup>]

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 :

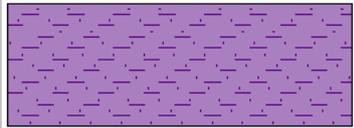
Peso volúmico saturado :  $\gamma_{sat} =$   [kN/m<sup>3</sup>]

**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  $\delta$  [°], 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/m<sup>3</sup>]  
 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/m<sup>3</sup>]

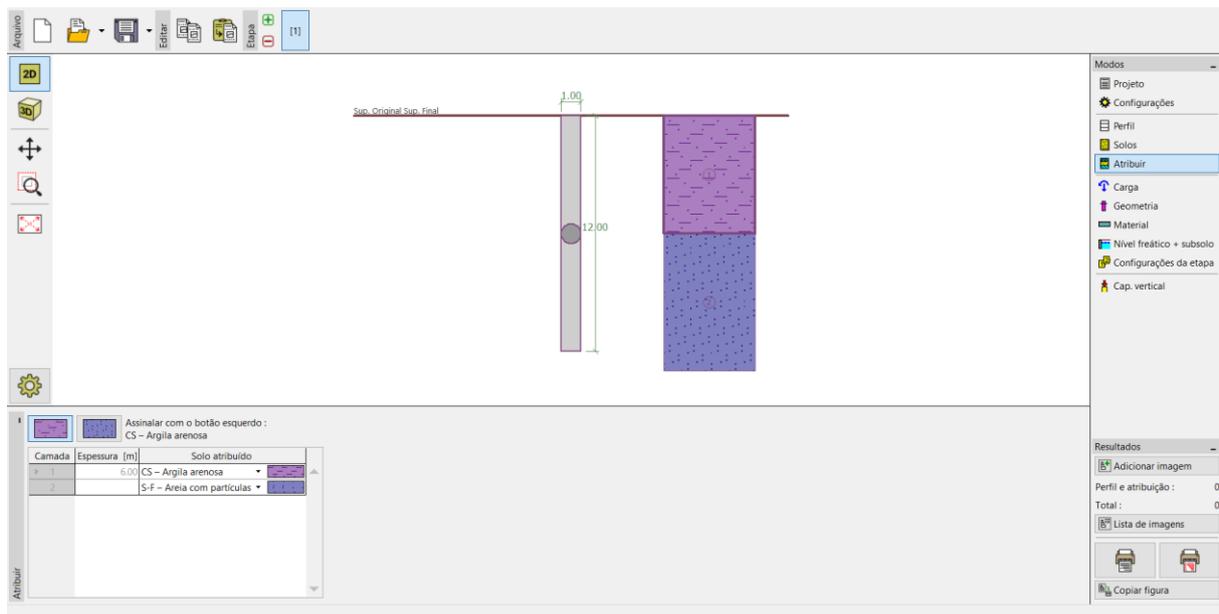
**Desenhar**

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

Classificar    Limpar    + Adicionar    X Cancelar

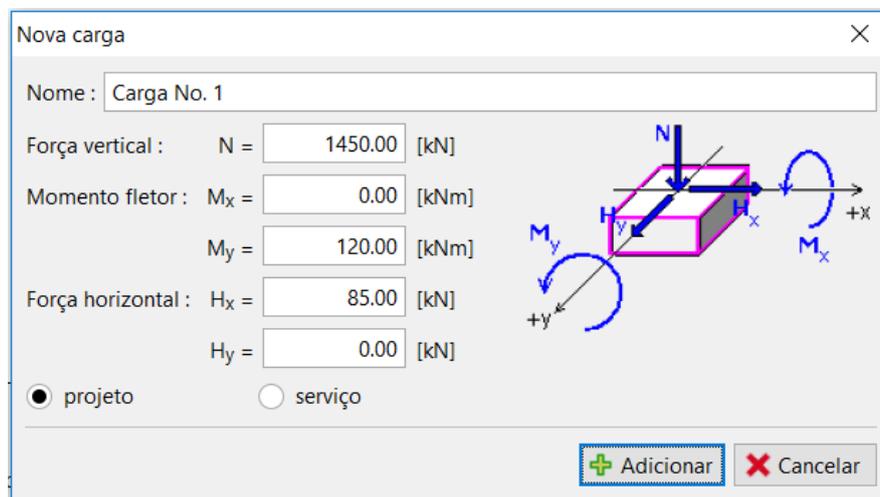
Caixa de diálogo “Adicionar novos solos” – solo S-F

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  $\varphi_{ef}$  [°], 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

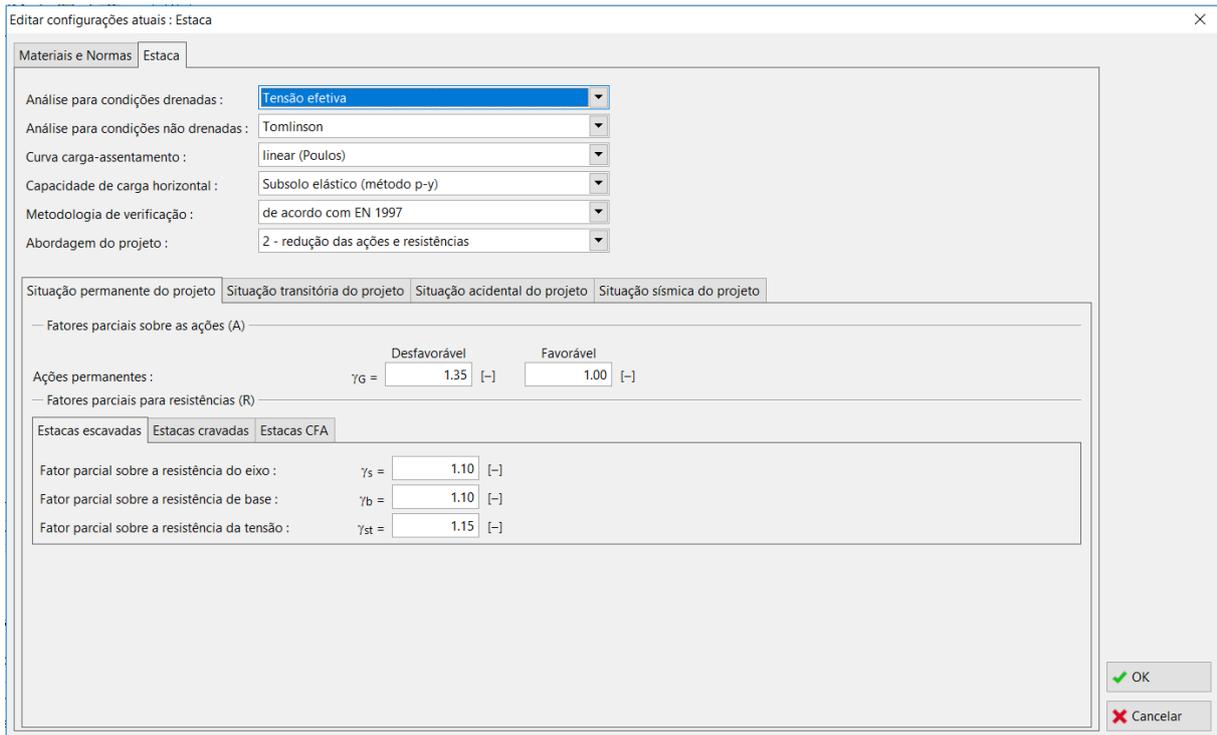
A capacidade de suporte vertical de dimensionamento de uma estaca com carregamento central  $R_c$  [kN] consiste na soma do atrito superficial  $R_s$  com a resistência na base da estaca  $R_b$ . Para obter a condição de confiança, este valor deve ser superior ao valor da carga de projeto  $V_d$  [kN] 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/m<sup>3</sup>]

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/m<sup>3</sup>]

**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

Editar parâmetros do solo

— Identificação —

Nome : S-F – Areia com partículas finas

— Dados base — ?

Peso volúmico :  $\gamma = 17.50$  [kN/m<sup>3</sup>]

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

— Método de tensão efetiva — ?

Tendo coeficiente de capacidade :  $\beta_p = 0.45$  [-]

— 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/m<sup>3</sup>]

— 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

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  $\varphi_{ef}$  [°] 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*):  $R_b = 1542.24$  kN ,
- para  $N_p = 30$  (base da estaca em solo *arenoso*):  $R_b = 4626.71$  kN ,
- para  $N_p = 60$  (base da estaca em solo *de cascalho*):  $R_b = 9253.42$  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  $R_c = 1546.09$  kN  
 Cap. de carga na base da estaca  $R_b = 4626.71$  kN

Capacidade de carga da estaca  $R_c = 6172.80$  kN  
 Força vertical final  $V_d = 1450.00$  kN

$R_c = 6172.80$  kN >  $1450.00$  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

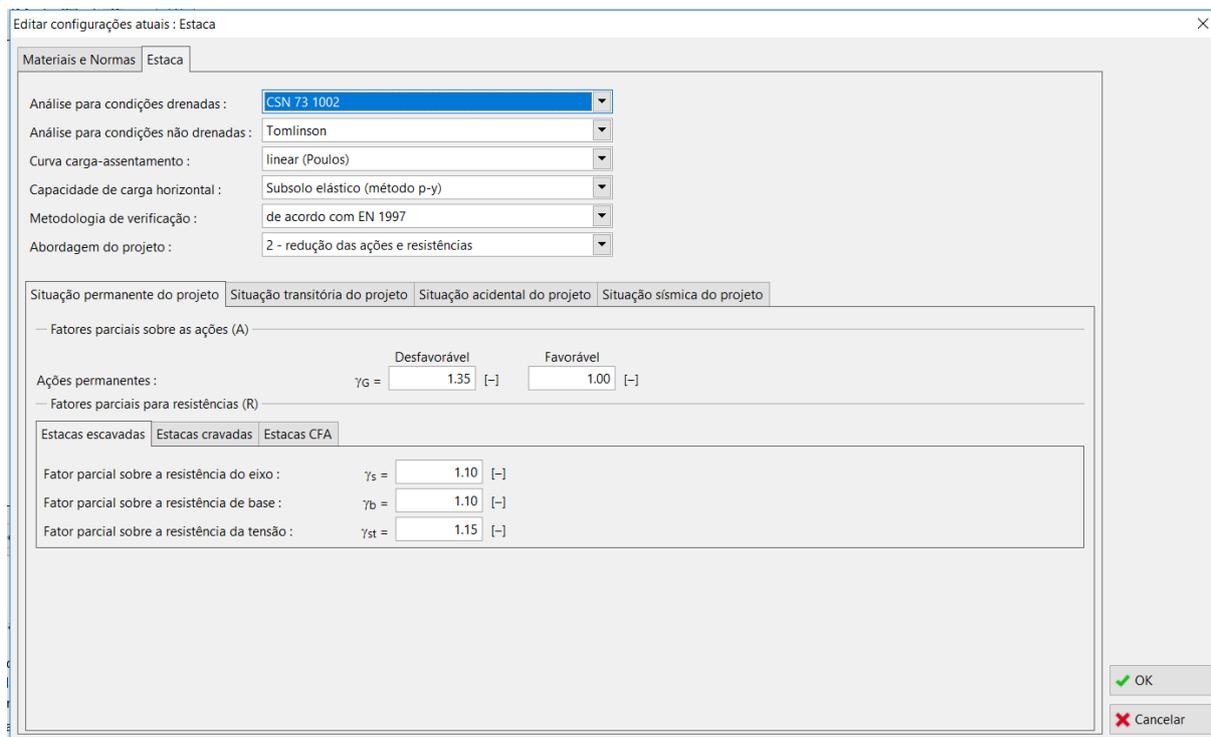
- Adicionar imagem
- Cap. vertical : 0
- Total : 0
- Lista de imagens
- Copiar figura

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

– **TENSÃO EFETIVA:**  $R_c = 6172.8$  kN >  $V_d = 1450.0$  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)  $\gamma_Q =$  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 : CS – Argila arenosa

**Dados base** ?

Peso volúmico :  $\gamma =$  18.50 [kN/m<sup>3</sup>]

Ângulo de atrito interno :  $\varphi_{ef} =$  24.50 [°]

Coesão do solo :  $c_{ef} =$  14.00 [kPa]

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

**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/m<sup>3</sup>]

**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

Editar parâmetros do solo
✕

---

**Identificação**

Nome :

---

**Dados base** ?

Peso volúmico :  $\gamma =$   [kN/m<sup>3</sup>]

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 :

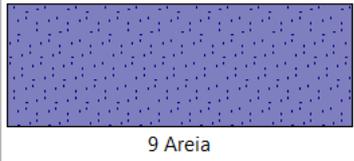
Peso volúmico saturado :  $\gamma_{sat} =$   [kN/m<sup>3</sup>]

**Desenhar**

Categoria de padrão :

Procurar :

Subcategoria :

Padrão :   
9 Areia

Cor :

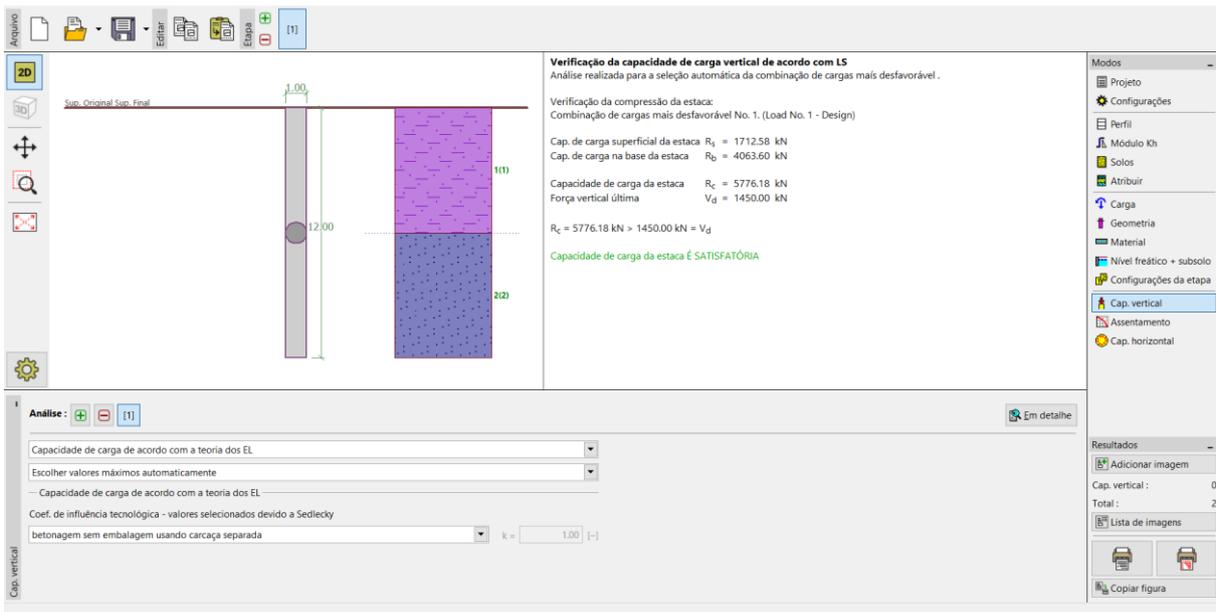
Fundo :

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  $\alpha$  [-],
- ângulo de atrito superficial da estaca  $\delta$  [°],
- 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  $\beta_p$  [-],
- coeficiente da capacidade de suporte  $N_p$  [-].

**CSN 73 1002:**

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

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.