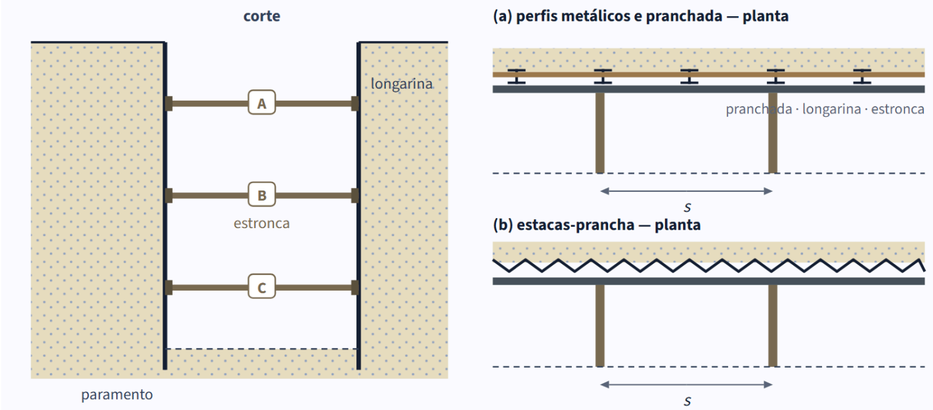
Apresentação da aula de geotecnia · Cortinas de estacas-prancha e escavações escoradas

Escavação escorada em argila

Aula: escavação escorada em argila; envoltórias para argila, trinca de tração, cargas nas estroncas, dimensionamento da cortina de estacas-pranchas e das longarinas, verificação do aço e levantamento de fundo; exemplo resolvido em cada tópico.

- Escoramento de escavação
- Envoltória de Peck (argila)
- Trinca de tração · primeira estronca
- Estronca · longarina · estaca-prancha
- Levantamento de fundo



Introdução

O que veremos nesta aula?

Por que a pressão em uma escavação escorada **não é de Rankine** e como as **envoltórias** são obtidas a partir de cargas medidas

As duas envoltórias da argila pelo **número de estabilidade γH/c**: argila mole a média (γH/c > 4) e argila rija (≤ 4)

A adição da **sobrecarga** como pressão separada, o fato de a água na argila alterar apenas o peso específico; a **trinca de tração $z_c = 2c/\gamma$** e a primeira estronca

A partir da envoltória, as **cargas nas estroncas** (trechos articulados) e o dimensionamento da **cortina de estacas-pranchas** e da **longarina**

Verificar o aço segundo **EN 1993-1-1 e AISC 360-22**

Realizar a verificação de **levantamento de fundo** em escavação em argila (coluna de Terzaghi, correção de Chang)

ROTEIRO DA AULA

Cada tópico é tratado em **três etapas**:

1 · **Teoria**: qual é a regra e por que é assim?

2 · **Enunciado**: dados e o que se pede

3 · **Solução**: passo a passo, com números

Escavação do exemplo: argila (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, φ = 0), profundidade H = 7.00 m, largura B = 6.00 m; estroncas nas profundidades de 1.00 · 3.50 · 6.00 m, espaçamento horizontal s = 3.00 m. As forças referem-se a um metro de cortina (cargas nas estroncas multiplicadas por s).

Sistema de escoramento e seus elementos

TEORIA

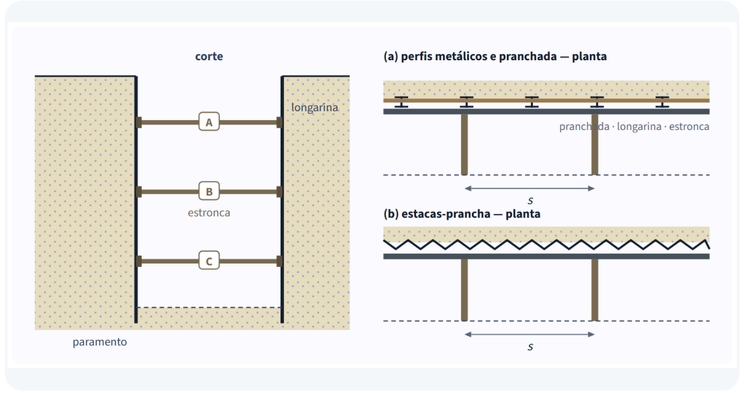
Escavações profundas com paredes verticais (subsolos urbanos, túneis em vala) são mantidas abertas por um **sistema de escoramento** provisório. Duas disposições são comuns: **estacas verticais** (de aço ou madeira) cravadas previamente, entre as quais se coloca o pranchamento horizontal de madeira à medida que a escavação avança; ou **estacas-pranchas** interligadas, que formam uma parede contínua.

Em cada nível de escoramento, as **longarinas** horizontais são instaladas assim que a escavação atinge esse nível; as **estroncas** são elementos de aço horizontais, comprimidos, que atravessam a escavação de uma longarina a outra.

Para selecionar os elementos, é necessária a pressão lateral que o sistema de escoramento receberá. A teoria fornece o empuxo total, e não a sua **distribuição**: a distribuição depende do solo, da sequência e da velocidade da obra, da equipe e dos equipamentos.

As pressões de projeto são, por isso, **envoltórias empíricas**: traçadas em torno das pressões retroanalisadas a partir das cargas nas estroncas medidas em escavações reais.

Durante a construção, o espaçamento vertical entre estroncas deve ser de pelo menos cerca de 2.75 m.



Gira em torno do topo do muro

TEORIA

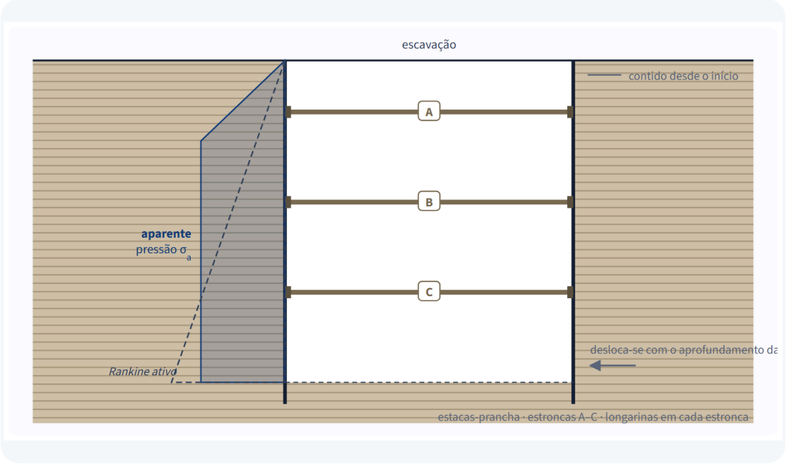
O muro de flexão gira em torno da sua base, e o empuxo ativo de Rankine (nulo no topo, máximo na base) o descreve bem. **O muro escorado move-se no sentido inverso**: a primeira estronca é instalada quando a escavação é rasa, de modo que a parte superior quase não se move; cada etapa seguinte é escavada antes de a estronca ser instalada, e o intervalo de tempo cresce com a profundidade, de modo que o muro passa a fletir cada vez mais abaixo: ao final da escavação, ele **girou em torno do topo**.

No topo, a pressão permanece próxima do **valor em repouso** (o solo se moveu muito pouco).

Na base, a pressão pode cair abaixo do valor ativo de Rankine (o solo já ultrapassou há muito o equilíbrio plástico).

O empuxo resultante P_a atua **acima** do ponto de um terço do triângulo: à altura n_aH da base, com $n_a > 1/3$.

O empuxo total é obtido com a cunha em espiral logarítmica ($r = r_o e^{\theta \tan \varphi'}$); em solo granular, fica 15–20% acima do valor de Coulomb. Mas, como sua distribuição e n_a dependem do solo e da obra, as escavações são projetadas com **envoltórias**.



Como as envoltórias foram construídas?

TEORIA

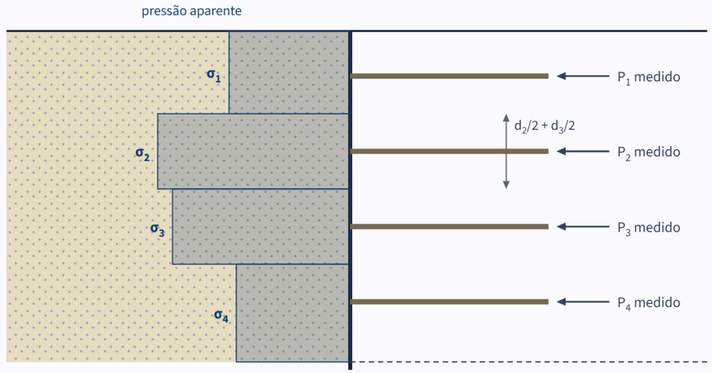
A pressão varia de ponto a ponto, e cada estronca deve ser dimensionada para a **maior carga** que possa encontrar. As envoltórias são construídas para isso: em uma escavação instrumentada, mede-se a carga em cada estronca, divide-se pela faixa de cortina que ela sustenta (espaçamento horizontal s × metade das distâncias às estroncas acima e abaixo) e converte-se em **pressão aparente** sobre essa faixa:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{s\left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right)} \qquad \sigma_i = \frac{P_i}{s\left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_{i+1}}{2}\right)}$$

d_1 é a profundidade da primeira estronca e d_i, as distâncias entre as estroncas seguintes. A envoltória de todos os diagramas desenhados uns sobre os outros é uma **envoltória de empuxo aparente**.

As envoltórias de Peck baseiam-se em cargas medidas em areia nas escavações de metrô de Berlim, Munique e Nova York; para argilas moles a médias e rijas, ele as construiu pelo mesmo método.

A envoltória **não é** a pressão que atua sobre a cortina em um instante qualquer: a carga dela obtida para um apoio foi traçada de modo a permanecer a favor da segurança em relação às cargas medidas.



cada carga na estronca distribuída na faixa de parede suportada: s × (metade da distância a cada vizinho)

Mole–média ou rija: γH/c

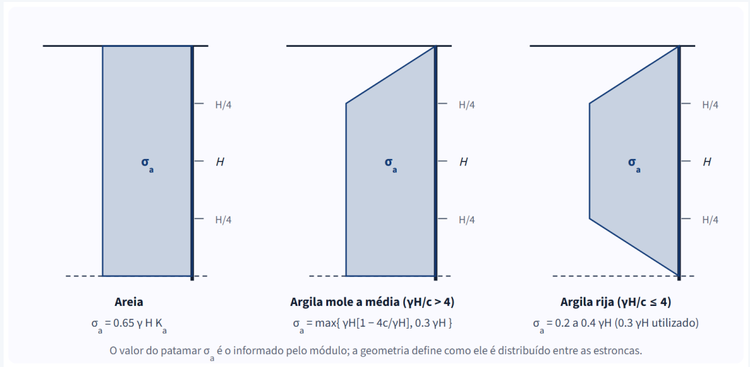
TEORIA

Na argila, a forma da envoltória é determinada pelo **número de estabilidade γH/c** (c é a coesão não drenada, φ = 0). Uma **argila mole a média** com γH/c > 4 é levada pela escavação a trabalhar muito além da sua resistência:

$$\frac{\gamma H}{c} > 4: \quad \sigma_a = \max\left(\gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right],\ 0.3\gamma H\right)$$

A envoltória é nula na superfície, cresce linearmente no quarto superior e permanece constante até a base; governa o maior dos dois valores. A **argila rija** está mais próxima do seu intervalo elástico:

$$\frac{\gamma H}{c} \leq 4: \quad \sigma_a = 0.2\gamma H \text{ com } 0.4\gamma H \ \ (\text{média } 0.3\gamma H)$$



Em argila rija, o envelope aumenta no quarto superior, é constante na metade central e retorna a zero no quarto inferior. As condições são as mesmas do envelope da areia (profundidade ≳ 6 m, água abaixo da base, argila não drenada).

Se a escavação atravessa várias argilas, a referência as pondera pela espessura: $c_{av} = \Sigma c_i H_i/H$, $\gamma_{av} = \Sigma \gamma_i H_i/H$; em seguida, as envoltórias de argila são usadas com as médias.

Enunciado

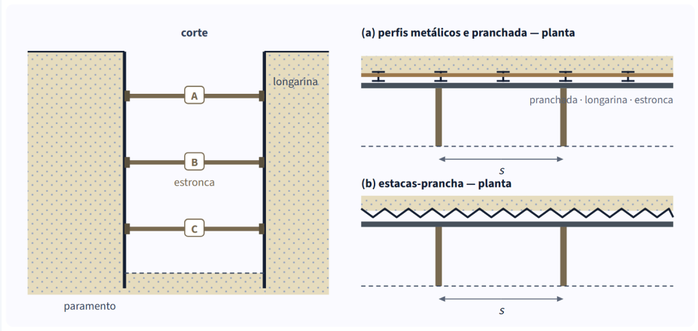
EXEMPLO

Dados

Escavação inicial	$H = 7.0$ **m,** $\gamma = 18$ **kN/m³,** $c = 35$ **kPa**
Argila mais mole	**mesma escavação,** $c = 20$ **kPa**

PEDE-SE

Para as duas argilas, **γH/c**, o tipo de envoltória e σ_a.



Solução

SOLUÇÃO

1 Argila inicial (c = 35 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{18(7)}{35} = \mathbf{3.60} \leq 4 \Rightarrow \text{argila rija}$$

$$\sigma_a = 0.3\gamma H = 0.3(18)(7) = \mathbf{37.80}\ \text{kPa}$$

2 Argila mais mole (c = 20 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{126}{20} = \mathbf{6.30} > 4 \Rightarrow \text{argila mole a média}$$

$$\sigma_a = \gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right] = 126(1 - 0.635) = \mathbf{46.00}\ \text{kPa} \geq 0.3\gamma H = 37.8$$

A argila inicial é considerada rija: σ_a = **37.80 kPa** (maior carga em estronca P = 271.3 kN).

Quando a coesão cai para 20 kPa, a escavação passa a se comportar como argila mole a média: σ_a = **46.0 kPa** e a base da envoltória torna-se um patamar constante (P = 338.1 kN).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Ao lado da envoltória; com o peso específico; posição da primeira estronca

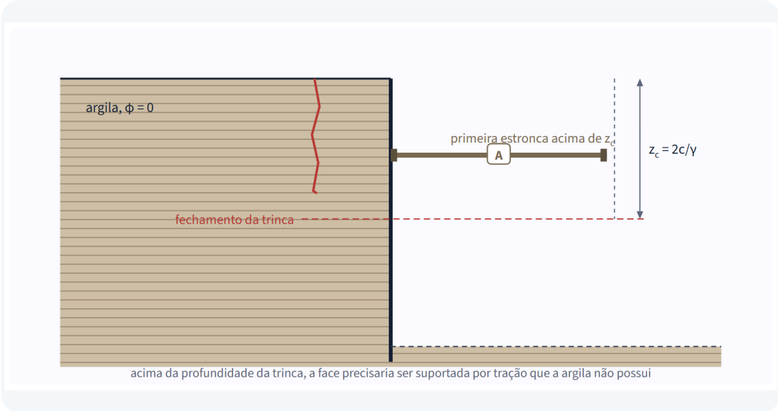
TEORIA

A **sobrecarga q** não participa da envoltória (os coeficientes empíricos também seriam aplicados a ela); é considerada como pressão uniforme própria em toda a altura e, em argila não drenada, $K_a = 1$: $\mathbf{\Delta p_q = q}$.

Água: as envoltórias para argila são construções não drenadas, em tensões totais; a água na argila já está contida no peso específico e na resistência não drenada. A água acima do fundo é desenhada e anotada, não acrescentada como carga separada; a única coisa que altera é o peso do solo: peso específico saturado abaixo da água e, na camada interceptada pela água, a média ponderada pela espessura dos dois valores, $\gamma = (\gamma\, z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$.

Trinca de tração: a face de argila pode permanecer sem apoio até a profundidade em que a trinca de tração se fecha (a profundidade em que o empuxo ativo de Rankine com coesão é nulo). Para $\varphi = 0$, $K_a = 1$; o primeiro apoio deve ser colocado **acima** dessa profundidade, para que a cortina não se apoie numa face aberta que a argila não consegue sustentar.

$$\Delta p_q = q \qquad z_c = \frac{2c}{\gamma}\ (q = 0), \qquad z_c = \frac{2c - q}{\gamma}\ (\text{sobrecarga q})$$



Enunciado

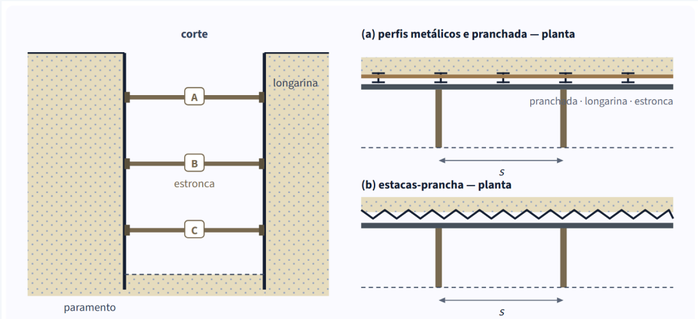
EXEMPLO

Dados

Escavação	**A escavação inicial do Exemplo 1 ($H = 7$ m, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³, $c = 35$ kPa); primeira estronca a $z = 1.0$ m**
Casos	**(a) q = 0, sem água; (b) sobrecarga $q = 10$ kPa; (c) nível do lençol freático $z_w = 3$ m**

PEDE-SE

z_c, se a posição da primeira estronca é adequada; em (c), **$\bar{\gamma}$** e **$\bar{\gamma}H/c$**; em cada caso, a carga total R e a maior carga de estronca.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Trinca de tração e primeiro apoio

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} = \frac{2(35)}{18} = \mathbf{3.889}\ \mathrm{m}\ > 1.00\ \mathrm{m}\ \checkmark$$

$$z_c = \frac{2c - q}{\gamma} = \frac{70 - 10}{18} = 3.333\ \mathrm{m}\ \ (q = 10\ \mathrm{kPa})$$

A primeira estronca (z = 1.0 m) está bem acima da profundidade da trinca de tração (3.89 m): adequada. Com a sobrecarga, a trinca passa a 3.33 m.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Água (c): $\bar{\gamma} = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$; resumo dos três casos

$$\bar{\gamma} = \frac{18(3) + 19(4)}{7} = 18.571\ \text{kN/m}^3 \qquad \frac{\bar{\gamma}H}{c} = \frac{18.571(7)}{35} = 3.714$$

$$\sigma_a = 0.3\bar{\gamma}H = 39.00\ \text{kPa}$$

Situação	γH/c	σ_a (kPa)	z_c (m)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
(a) q = 0, sem água	3.60	37.80	3.89	198.4	271.3
(b) q = 10 kPa	3.60	37.80	3.33	268.4	334.3
(c) água z_w = 3 m	3.71	39.00	—	204.8	279.8

A sobrecarga acrescenta apenas $\Delta p_q = q = 10$ kPa (R 198.4 → 268.4 kN/m); a água apenas eleva $\bar{\gamma}$ a 18.57 kN/m³ (σ_a 37.8 → 39.0 kPa).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Da envoltória às cargas nas estroncas

TEORIA

As estroncas são colunas horizontais: transmitem a pressão ao longo de seus eixos, flexionam sob o peso próprio; a capacidade depende da esbeltez, e em escavações largas pode ser necessário reforço adicional. A referência fornece um método simples e conservador para a carga:

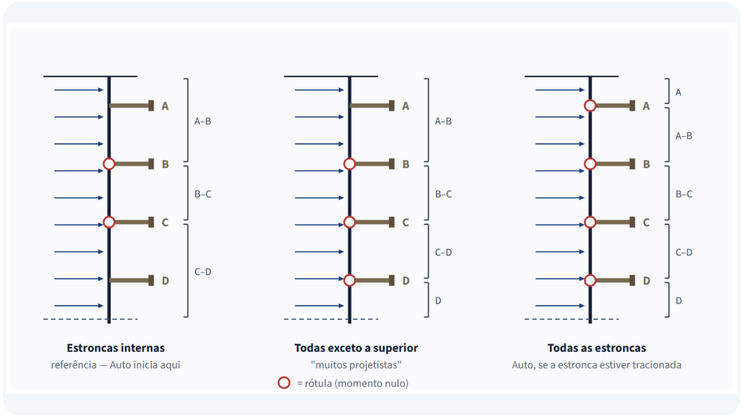
Traçar a envoltória de pressões e os níveis de apoio. Considerar a cortina **articulada em cada nível de apoio**, exceto no mais alto e no mais baixo (muitos projetistas a consideram articulada em todos, exceto no mais alto).

Dividir a parede nas rótulas em **vigas em balanço nas extremidades e vigas simplesmente apoiadas entre elas**; obter as reações de cada parte pela estática (em uma escavação com quatro estroncas, A, B_1, B_2, C_1, C_2, D).

A carga de uma estronca é a soma das reações que ela recebe × o espaçamento horizontal s.

$$P_A = A\,s \quad P_B = (B_1 + B_2)\,s \quad P_C = (C_1 + C_2)\,s \quad P_D = D\,s$$

Cada trecho é estaticamente determinado: tem dois apoios; o equilíbrio de momentos e de forças horizontais em relação a um dos apoios fornece ambas as reações. Como o apoio na articulação pertence aos dois lados, ele recebe **duas reações**. As reações são por unidade de comprimento da cortina (kN/m); s as converte em carga no apoio.



Enunciado

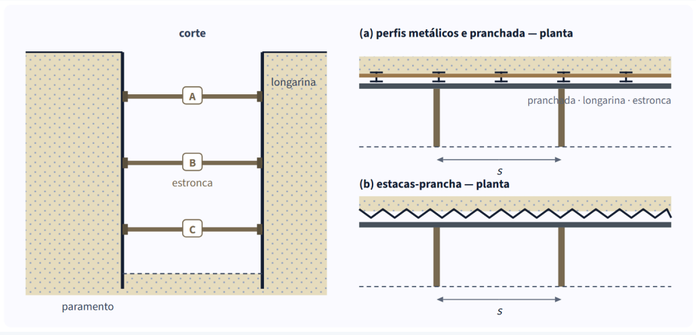
EXEMPLO

Dados

Escavação	$H = 7.00$ m; $B = 6$ m; estroncas $z = 1.00, 3.50, 6.00$ m (A, B, C); espaçamento horizontal $s = 3.00$ m
Pressão	Exemplo 1: argila rija (γH/c = 3.6): envoltória trapezoidal $\sigma_a = 0.3\gamma H = 37.8$ kPa (cresce no quarto superior, cai a zero no quarto inferior); cortina de estacas-pranchas articulada no apoio B (exceto no extremo superior e no extremo inferior)

PEDE-SE

A **resultante W** das partes e seu braço **z̄**; as reações **A, B_1, B_2, C**; as cargas nas estroncas **P_A, P_B, P_C**.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Dividir a envoltória em partes nas articulações; a resultante e o braço de alavanca de cada parte (profundidade a partir da superfície superior)

Peça	Intervalo (m)	W (kN/m)	z̄ (m)	Apoios
1	0.00 – 3.50	99.23	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	99.23	4.861	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 Primeira parte: equilíbrio de momentos em relação ao primeiro apoio

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.23(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.20} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{54.02}\ \mathrm{kN/m}$$

O primeiro trecho transmite aos dois apoios 54.02 e 45.21 kN/m; a reação da estronca mais alta (A) é maior por incluir também a carga do trecho em balanço.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Segunda parte

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{99.23(4.861 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{54.02} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{45.20}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Cada estronca soma as reações que recebe; carga = total × s (s = 3.00 m)

Nível	z (m)	Reações recebidas (kN/m)	Total (kN/m)	P = R·s (kN)
A	1.00	54.02	54.02	**162.06**
B	3.50	45.21 + 45.21	90.42	**271.26**
C	6.00	54.02	54.02	**162.06**

A carga máxima na estronca é **P_B = 271.26 kN** (nível B): essa carga governa o dimensionamento da estronca. Como o apoio B pertence a duas partes, somam-se duas reações.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Momento máximo e módulo de resistência necessário

TEORIA

A **estaca-prancha** é projetada a partir dos mesmos trechos: em cada trecho determina-se o maior momento fletor (onde o esforço cortante troca de sinal: no vão ou na estronca, onde o trecho em balanço encontra o apoio); o maior deles é o momento de projeto por unidade de comprimento da cortina. O módulo de resistência necessário resulta da tensão admissível de flexão e, na tabela, escolhe-se uma seção com valor pelo menos igual:

$$M_{max} = \max_{parts} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

Longarinas podem ser consideradas contínuas se convenientemente emendadas; de forma conservadora, adotam-se **articuladas** nas estroncas: viga biapoiada de vão s, com a reação do nível R (por unidade de comprimento do muro) como carga distribuída:

$$M_{max} = \frac{R\,s^2}{8} \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

O nível com a maior reação é o determinante. As longarinas às vezes são ligadas à cortina de estacas-pranchas em pontos que proporcionarão o apoio lateral de que necessitam.

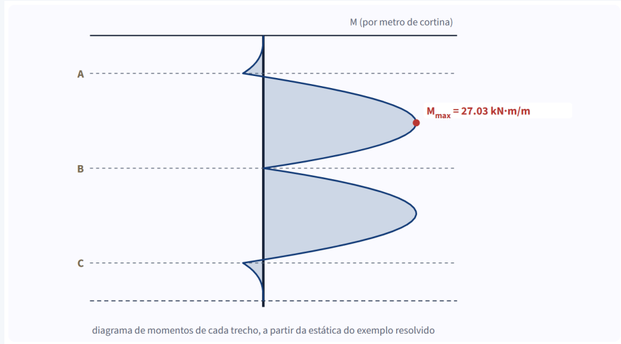
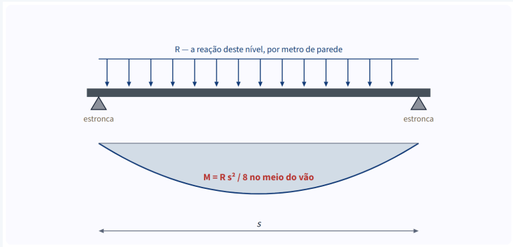


diagrama de momentos de cada trecho, a partir da estática do exemplo resolvido



Enunciado

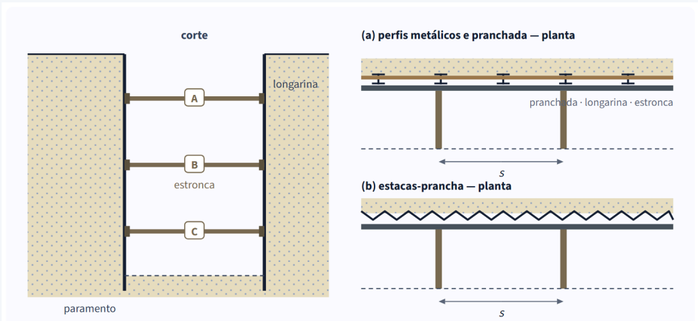
EXEMPLO

Dados

Escavação	**Escavação do Exemplo 1 ($H = 7$ m, argila rija, $\sigma_a = 37.8$ kPa); estroncas a 1.0 · 3.5 · 6.0 m; espaçamento horizontal $s = 3.0$ m; articulação em B**
Aço	**tensão admissível de flexão $\sigma_{allow} = 170\,000$ kPa**

PEDE-SE

M_{max} e **S** necessário da estaca-prancha (cm³/m); no nível da maior reação, **M_{max}** e **S** da longarina (cm³).



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Estaca-prancha: momento máximo em cada parte

Peça	Intervalo (m)	M_{max} (kN·m/m)	Posição z (m)
1	0.00 – 3.50	27.03	2.30
2	3.50 – 7.00	27.03	4.70

2 Módulo de resistência necessário

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{27.03}{170{,}000} = 0.0001590\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{159.0}\ \mathrm{cm^3/m}$$

Na cortina de estacas-pranchas, **M_{max} = 27.03 kN·m/m** (segmento 1, z = 2.30 m): **S ≥ 159.0 cm³/m**.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Longarina: viga biapoiada em cada nível (s = 3.000 m)

Nível	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{allow} (cm³)
A	54.02	60.77	357
B	90.42	101.72	598
C	54.02	60.77	357

A maior reação ocorre **no nível B** (R = 90.42 kN/m): a longarina é dimensionada com **M_{max} = 101.72 kN·m**, **S ≥ 598 cm³**; as longarinas dos demais níveis podem ser menores.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Esforços de projeto, classe, flexão e flambagem

TEORIA

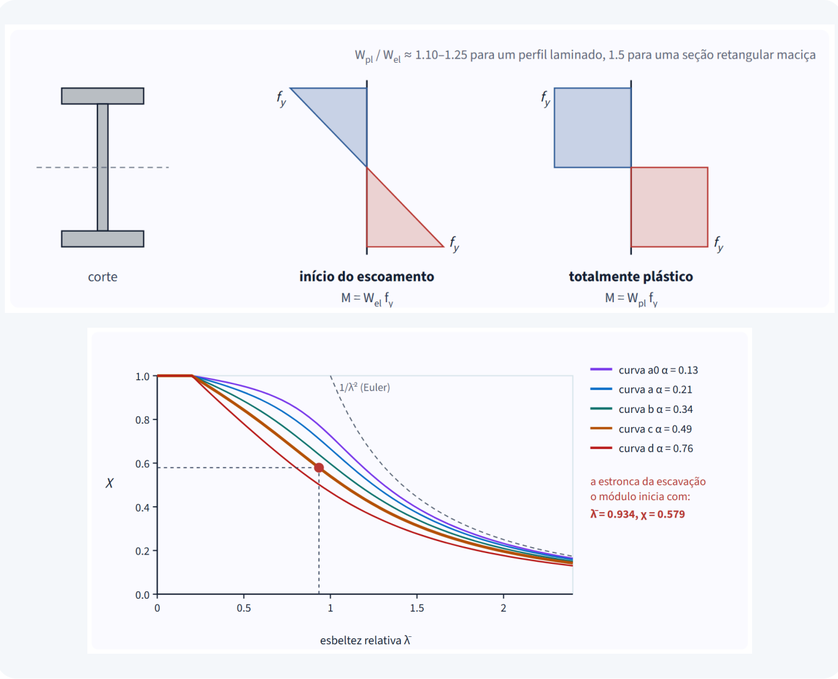
As cargas obtidas da envoltória são **valores de serviço** (a envoltória de Peck é um limite superior das cargas medidas); majoram-se uma única vez para o valor de projeto: $E_d = \gamma_F E_k$. Cada elemento é verificado com a resistência ao escoamento (f_y) da sua própria classe de aço; a seção é dada pelo **módulo de resistência** do elemento (estaca-prancha: W_{el} por metro; longarina: W; estronca: A e I em relação ao eixo fraco).

$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{classe } 1\text{–}2),\ W_{el}\ (\text{classe } 3)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_{cr}^2} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1 \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

A estronca flamba em torno do eixo fraco: I é o menor momento de inércia, $L_{cr} = K L_b$ é o comprimento efetivo (largura da escavação, se nenhum perfil metálico (estaca-perfil) ou contraventamento cruzado passa entre as extremidades). α provém da curva de flambagem (curva c: 0.49).

Na cortina de estacas-pranchas a mesma resistência vale por unidade de largura (EN 1993-5; deslizamento nos encaixes β_B nos perfis U, 1.0 no perfil Z). Como a mesa comprimida da longarina se apoia na cortina, a flambagem lateral com torção não é determinante.



Enunciado

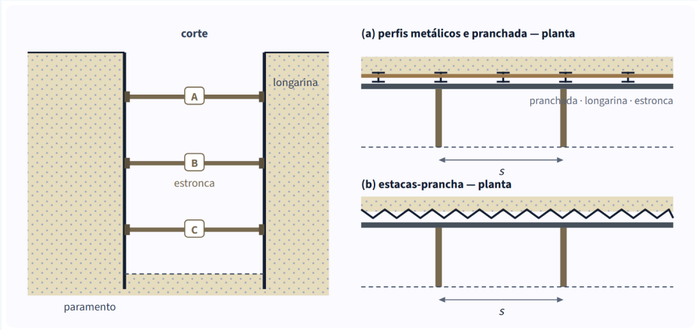
EXEMPLO

Dados

Escavação e cargas	**A escavação do Exemplo 1 e as cargas do Exemplo 3: $P_{max} = 271.26$ kN (estronca B)**
Elementos	**S275 ($f_y = 275$ MPa), $\gamma_F = 1.35$, $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.00$: estaca-prancha $W_{el} = 600$ cm³/m; longarina $W_{el,y} = 1\,000$ cm³; estronca $A = 65.7$ cm², $I = 3\,598$ cm⁴, curva c, $L_{cr} = 6.00$ m**

PEDE-SE

η (≤ 1) para a cortina de estacas-pranchas, a longarina mais carregada e a estronca mais carregada.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Cortina de estacas-pranchas e longarina (flexão): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(27.03)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.49}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(101.72)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{137.33}{275.0} = \mathbf{0.499}$$

Estaca-prancha η = **0.221**, longarina η = **0.499**: ambas são suficientes ($\eta \leq 1$).

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Estronca (flambagem): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(271.26) = 366.20$ kN

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(210\,000\,000)(3\,598 \cdot 10^{-8})}{6.00^2} = 2{,}071.5\ \text{kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,806.8}{2{,}071.5}} = 0.9339$$

$$\Phi = 0.5\left[1 + 0.49(0.9339 - 0.2) + 0.9339^2\right] = 1.1159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.5791 \qquad N_{b,Rd} = \chi A f_y = 1{,}046.4\ \text{kN}$$

η_{strut} = 366.2 / 1,046.4 = **0.350**. Os três elementos são adequados ($\eta \le 1$); na estronca, a **flambagem** é determinante ($N_{c,Rd}$ = 1,806.8 kN, $N_{b,Rd}$ = 1,046.4 kN).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

LRFD ou ASD; classes, flexão, cortante, curva de flambagem de colunas

TEORIA

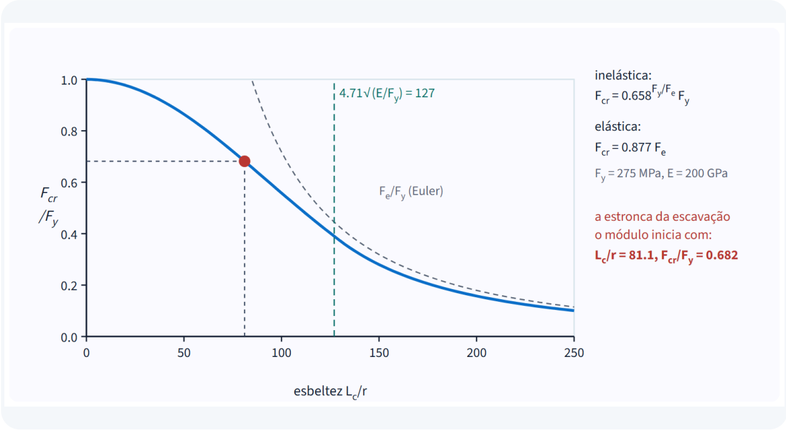
Cada elemento é verificado com a **resistência nominal R_n** obtida das disposições de compressão, flexão e cisalhamento. No LRFD, a carga é majorada e a resistência é reduzida por φ; no ASD, a carga de serviço é comparada com a resistência dividida pelo fator de segurança Ω:

$$R_u \le \phi R_n \ \text{(LRFD)} \qquad R_a \le \frac{R_n}{\Omega} \ \text{(ASD)} \qquad P_u = \gamma_H P,\ M_u = \gamma_H M,\ \gamma_H = 1.6$$

As cargas obtidas da envoltória constituem o **empuxo lateral de terra H** da ASCE 7-22: nas combinações LRFD, entra com 1.6 onde quer que se some à carga (sempre nas escoras de escavação), e com 1.0 em ASD. A estaca-prancha e a longarina fornecidas com o módulo são tomadas com a resistência declarada pelo módulo: F_yZ em seção compacta, F_yS no primeiro escoamento. Como a longarina é contida lateralmente pela cortina, $L_b = 0$ e a flambagem lateral com torção não é um estado-limite.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} \qquad F_{cr} = 0.658^{F_y/F_e} F_y \ \left(\tfrac{L_c}{r} \le 4.71\sqrt{E/F_y}\right) \ \text{caso contrário } 0.877F_e \qquad P_n = F_{cr} A_g$$

Uma única curva de flambagem serve a toda seção (não há curva a escolher, como na EN 1993-1-1); r é o raio de giração menor, $L_c = K\,L_b$ o comprimento efetivo; recomenda-se $L_c/r \le 200$. O AISC, diferentemente da EN 1993-1-1, não reduz a resistência à flexão em razão da força cortante.



Enunciado

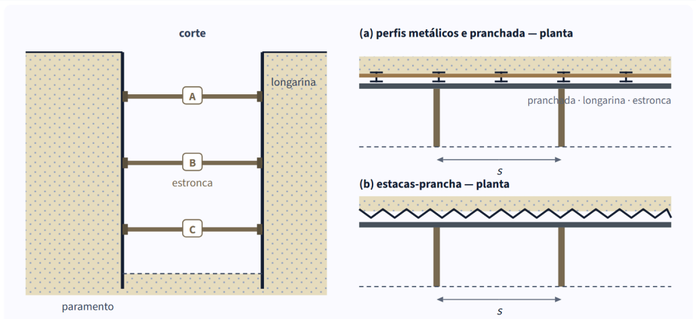
EXEMPLO

Dados

Escavação e cargas	**A escavação do Exemplo 1 e as cargas do Exemplo 3: $P_{max} = 271.26$ kN (estronca B)**
Elementos	**Elementos do Exemplo 5 (S275, $F_y = 275$ MPa); $E = 200$ GPa; LRFD $\gamma_H = 1.6$, $\phi_c = \phi_b = 0.90$; ASD $\Omega_c = 1.67$, $\Omega_b = 1.67$ ($M_n = F_y S$)**

PEDE-SE

Para a estronca mais carregada: **L_c/r, F_e, F_{cr}, P_n**; razões LRFD e ASD; razão LRFD para a estaca-prancha e a longarina.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Estronca: curva de coluna (A_g = 65.7 cm², r = 7.40 cm, L_c = 6.00 m)

$$\frac{L_c}{r} = \frac{600}{7.40} = 81.1 \;\le 4.71\sqrt{E/F_y} = 127$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2(200\,000)}{(81.1)^2} = 300.3\ \text{MPa}$$

$$F_{cr} = 0.658^{275/300.3}(275) = 187.4\ \text{MPa}$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 187.4 \times 6\,570\ \text{mm}^2 = \mathbf{1{,}231.5}\ \text{kN}$$

Na estronca, a **resistência nominal P_n = 1,231.5 kN**; índice de esbeltez L_c/r = 81.1, na faixa de flambagem inelástica (limite 127).

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Razões LRFD e ASD (P = 271.26 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(271.26) = 434.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.392}$$

$$\text{ASD: } P_a = 271.26\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.368}$$

Estronca: LRFD η = **0.392**, ASD η = **0.368**. Estaca-prancha (LRFD) 0.291, longarina 0.658; pela EN 1993-1-1 eram 0.221, 0.499 e 0.350.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Coluna de Terzaghi, correção de Chang

TEORIA

Uma escavação escorada pode romper mesmo sem o colapso das estroncas: o peso do solo ao lado da escavação e da sobrecarga comprime a argila abaixo do fundo para dentro e para cima. A coluna de solo de largura B′ apoia-se, ao nível do fundo, sobre a argila com capacidade de carga cN_c (N_c = 5.7); a resistência ao cisalhamento cH nas faces laterais a alivia:

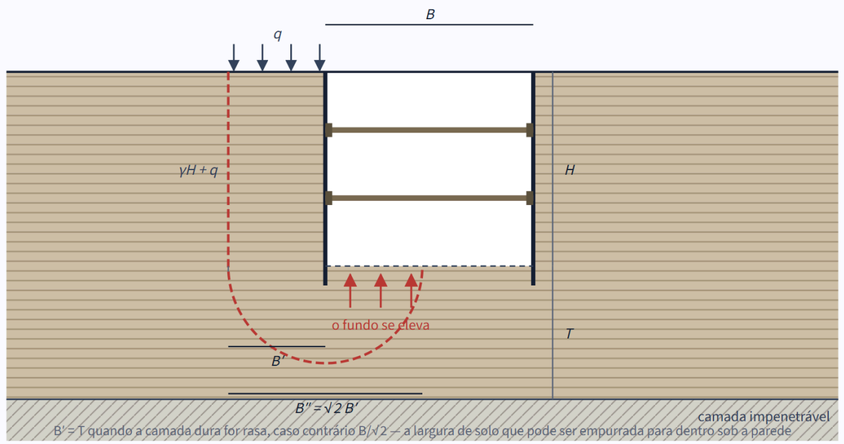
$$FS = \frac{cN_c}{\gamma H + q - cH/B'}$$

A equação foi **corrigida em três aspectos**: o cisalhamento lateral não reduz a carga, **acrescenta resistência**; a faixa da base de largura B″ comporta-se como uma fundação carregada para cima; como a base da escavação é ilimitada, N_c = 5.14 (fundação lisa):

$$FS = \frac{5.14\,c\left(1 + 0.2\dfrac{B''}{L}\right) + \dfrac{cH}{B'}}{\gamma H + q} \qquad B' = \min\left(T, \frac{B}{\sqrt{2}}\right),\ B'' = \sqrt{2}\,B'$$

B é a largura da escavação, L o comprimento em planta, T a espessura da argila abaixo da base; q a sobrecarga ao lado da escavação. Em escavações totalmente rompidas, FS ≈ 1; nas parcialmente rompidas ou com pouca ruptura, resulta um pouco acima; FS requerido ≈ **1.5**.

Em argila homogênea, se FS < 1.5, as estacas-prancha são cravadas mais fundo (em geral, não mais que B/2 abaixo da base); o comprimento embutido suporta uma força obtida em ábacos de projeto publicados.



Enunciado

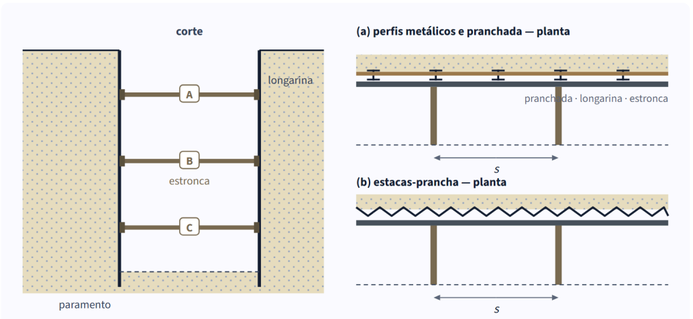
EXEMPLO

Dados

Escavação inicial	$H = 7$ m, $B = 6$ m, $L = 20$ m; argila $\gamma = 18$, $c = 35$ kPa, espessura de argila abaixo da base $T = 4$ m; sem sobrecarga
Escavação do exemplo didático	4 m de largura, 15 m de comprimento, 6 m de profundidade; $\gamma = 17$, $c = 40$ kPa; camada rígida 2 m abaixo da base

PEDE-SE

Para as duas escavações: **B′**, **B″** e **FS** (≥ 1.5?); na escavação inicial, e se não houvesse camada rija e a largura fosse de 10 m?



Solução

SOLUÇÃO

1 Escavação inicial: B/√2 = 4.24 m > T = 4 m, portanto B′ = T

$$B' = T = 4.00\ \text{m} \qquad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{35(7)}{4.00}}{18(7)} = \frac{190.1 + 61.2}{126} = \mathbf{1.99} \geq 1.5\ \checkmark$$

2 Escavação do exemplo didático (T = 2 m ≤ B/√2 = 2.83 m: B′ = T = 2.00 m, B″ = 2.83 m)

$$FS = \frac{5.14(40)\left(1 + 0.2\frac{2.83}{15}\right) + \frac{40(6)}{2.00}}{17(6)} = \mathbf{3.27}$$

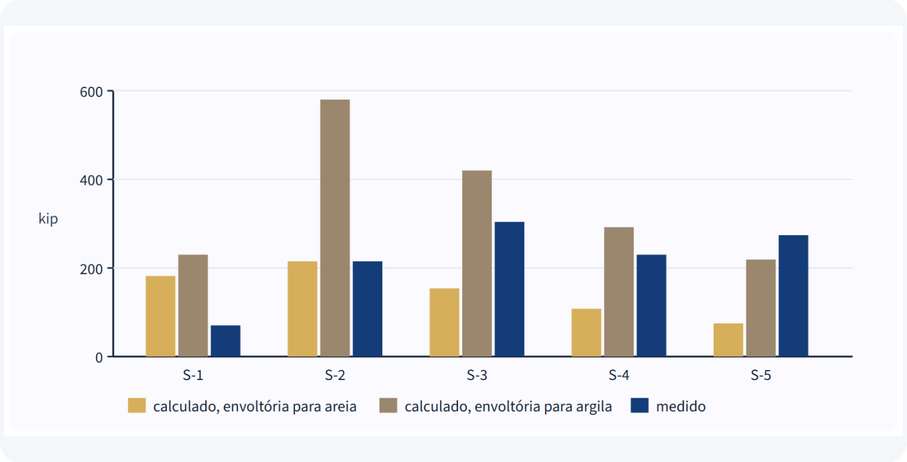
A escavação inicial dá **FS = 1.99** e a escavação do exemplo didático **3.27**: ambos ≥ 1.5. Se a camada rígida não for considerada (B′ = B/√2), o FS da escavação do exemplo didático cai para 2.96; a escavação inicial cai para 1.80 com 10 m de largura e sem camada rígida (diminui no sentido conservador): o levantamento de fundo piora com a largura e com a ausência da camada rígida.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Estudos de caso de Boston e Chicago

TEORIA

Boston (seção de ensaio B): 17.7 m de profundidade, cinco estroncas; o perfil foi delimitado por duas envoltórias, para areia e para argila (envoltória para areia 53.5 kPa, envoltória para argila mole a média 146.1 kPa); as cargas medidas resultaram muito diferentes das duas estimativas (os parâmetros do solo são incertos), e as estroncas haviam sido projetadas para cargas muito superiores às medidas. **Chicago, National Plaza**: 21.3 m de profundidade, seis estroncas; o perfil foi convertido em uma argila equivalente (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, γH/c = 12.08 > 4, σ_a = 282.0 kPa). A envoltória de Peck forneceu uma pressão cerca de **1.8 vezes** a observada: uma envoltória traçada em torno de muitas escavações é conservadora para uma única escavação; no mesmo solo, a experiência de campo pode reduzir de forma significativa o superdimensionamento.



O que o método admite

TEORIA

As envoltórias foram compiladas a partir de escavações com profundidade superior a cerca de 6 m; **a envoltória não é a pressão real sobre a cortina em um instante qualquer**: fornece uma carga segura nas estroncas, não o deslocamento da cortina. A argila é **não drenada**; a poropressão não é considerada separadamente.

Havendo várias argilas, toma-se a média ponderada pela espessura (c_{av}, γ_{av}); $\gamma H/c$ é determinado com essas médias. A sobrecarga é acrescentada à envoltória ($\Delta p = q$); a água altera apenas o peso específico.

A **cortina de estacas-pranchas** é tratada como uma cadeia de articulações definidas; não se utilizam sua rigidez própria nem a ficha abaixo da base. As **longarinas** são vãos simples entre apoios (a favor da segurança). O aço é verificado conforme a EN 1993-1-1 (a classe 4 não é dimensionada) ou conforme a AISC 360-22.

O levantamento de fundo é verificado com a equação corrigida de Chang; a ficha da cortina de estacas-pranchas abaixo do fundo da escavação não é considerada (a favor da segurança). Para vários estratos, a fórmula é utilizada com a extensão do GeoTerva para solos estratificados.

Durante a construção, esperam-se movimentos laterais e perda de solo no entorno; havendo camada rija, as estacas-pranchas são embutidas nela. Em argila mole, com $\gamma H/c \approx 8$, podem ocorrer grandes deslocamentos e o colapso das estroncas.

Resumo

Pontos-chave

Envoltória: $\gamma H/c > 4$ mole–média ($\sigma_a = \max(\gamma H[1 - 4c/\gamma H], 0.3\gamma H)$); ≤ 4 rija (≈ $0.3\gamma H$). Exemplo: $\gamma H/c = 3.6$, $\sigma_a = 37.8$ kPa

Sobrecarga e água: $\Delta p = q$ é acrescentado separadamente; a água altera apenas $\bar{\gamma}$. **Trinca de tração** $z_c = 2c/\gamma = 3.89$ m; a primeira estronca (1.0 m) fica acima dela

Carga na estronca: a envoltória é dividida em partes nas articulações e as reações são obtidas por estática; no exemplo, $P_B = 271.26$ kN (soma das duas reações)

Dimensionamento: estaca-prancha $M_{max} = 27.03$ kN·m/m ($S = 159$ cm³/m), longarina $M = R\,s^2/8 = 101.72$ kN·m ($S = 598$ cm³; $\sigma_{allow} = 170$ MPa)

Aço: EN 1993-1-1 $\eta = 0.221 / 0.499 / 0.350$ (estaca-prancha / longarina / estronca); AISC LRFD estronca 0.392, ASD 0.368

Levantamento de fundo: $FS = (5.14c(1 + 0.2B''/L) + cH/B')/(\gamma H + q) \geq 1.5$; 2.00 na escavação inicial, 3.27 na escavação do exemplo didático

Referências bibliográficas

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning — Chapter 15, “Braced Cuts”; esta página baseia-se nele.

Peck, R.B. (1943). Earth pressure measurements in open cuts, Chicago (Ill.) subway. Transactions, ASCE, 108, 1008–1058.

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 225–290.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Lambe, T.W. (1970). Braced excavations. Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, 149–218.

Swatek, E.P., Asrow, S.P. and Seitz, A. (1972). Performance of bracing for deep Chicago excavation. Proceedings, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 2, 1303–1322.

Bjerrum, L. and Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. Géotechnique, 6(1), 32–47.

Chang, M.F. (2000). Basal stability analysis of braced cuts in clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126(3), 276–279.

U.S. Department of the Navy (1971). Design Manual — Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7, Washington, D.C.

Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. Soils and Foundations, 44(1), 87–98.

EN 1990:2002, Eurocode — Basis of structural design. CEN.

EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN.

EN 1993-5:2007, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 5: Piling. CEN.

ANSI/AISC 360-22, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022.

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, 2022.

NOTA

Todos os exemplos numéricos foram gerados com o próprio motor de cálculo do módulo; o módulo fornece os mesmos valores. O exemplo resolvido da página do módulo também é esta escavação (H = 7 m, γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, estroncas a 1 · 3.5 · 6 m).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Inserir no GeoTerva o perfil de argila da própria escavação, os níveis das estroncas, a sobrecarga, a água e os elementos; o módulo fornece em conjunto a envoltória, a trinca de tração, as cargas nas estroncas, os momentos da cortina e das longarinas, a verificação do aço e o levantamento de fundo.

Abrir o módulo →

Página de teoria →

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.