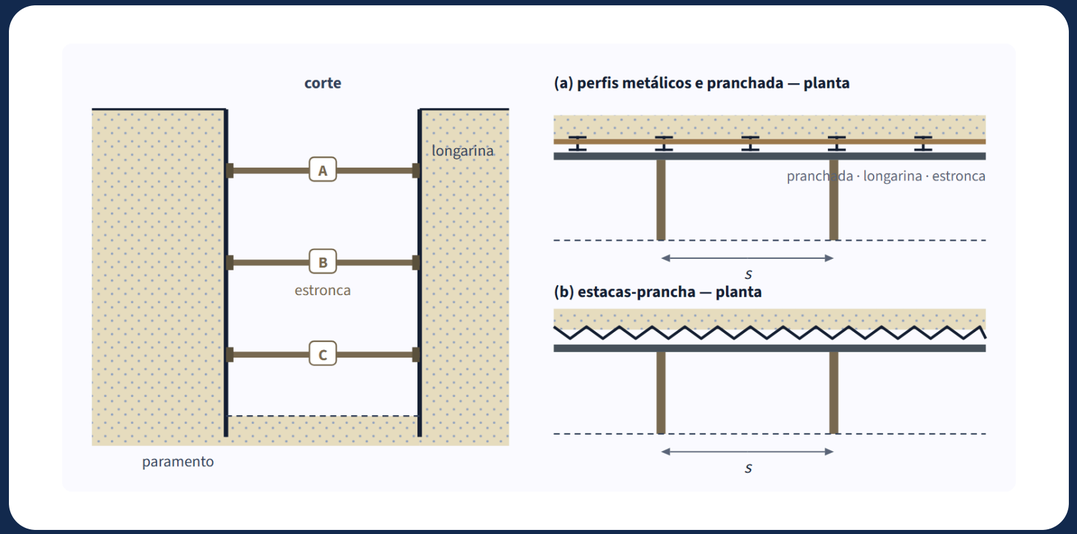
Apresentação da aula de geotecnia · Cortinas de estacas-prancha e escavações escoradas

Argila sobre areia: escavação escorada

Aula: areia e argila na mesma escavação (coesão equivalente de Peck); envoltória, cargas nas estroncas, dimensionamento das estacas-pranchas e das longarinas, verificação do aço e levantamento de fundo; exemplo resolvido em cada tópico.



- Escoramento de escavação
- Argila equivalente (areia + argila)
- Estronca · longarina · estaca-prancha
- EN 1993 · AISC 360
- 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 construídas; as envoltórias para argila (com γH/c)

A **coesão equivalente** de Peck c_{av} e γ_a, quando a escavação atravessa areia e argila; a escolha da envoltória por $\gamma_a H/c_{av}$

Como, na escavação da National Plaza (Chicago), **várias argilas** são primeiro ponderadas pela espessura e depois combinadas com a areia

Incluir a sobrecarga junto à envoltória e obter, a partir dela, as **cargas nas estroncas** e o dimensionamento da **cortina de estacas-pranchas** e da **longarina**

Verificar o aço pela **EN 1993-1-1 e AISC 360-22** e o **levantamento de fundo** em perfil estratificado

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: 3 m de areia no topo (γ = 17 kN/m³, φ′ = 30°) sobre argila (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa); H = 7.00 m, B = 6.00 m; estroncas nas profundidades 1.00 · 3.50 · 6.00 m, espaçamento horizontal s = 3.00 m. As forças referem-se a um metro de muro (cargas nas estroncas multiplicadas por s).

Sistema de escoramento e seus elementos

TEORIA

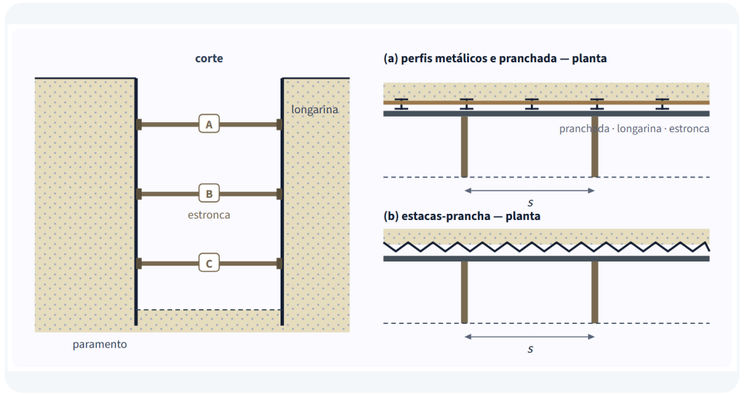
Escavações profundas com paredes verticais (subsolos urbanos, túneis em vala) são mantidas abertas por um **sistema de escoramento** provisório. Duas disposições são comuns: **estacas verticais** (de aço ou madeira) cravadas previamente, entre as quais se coloca o pranchamento horizontal de madeira à 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

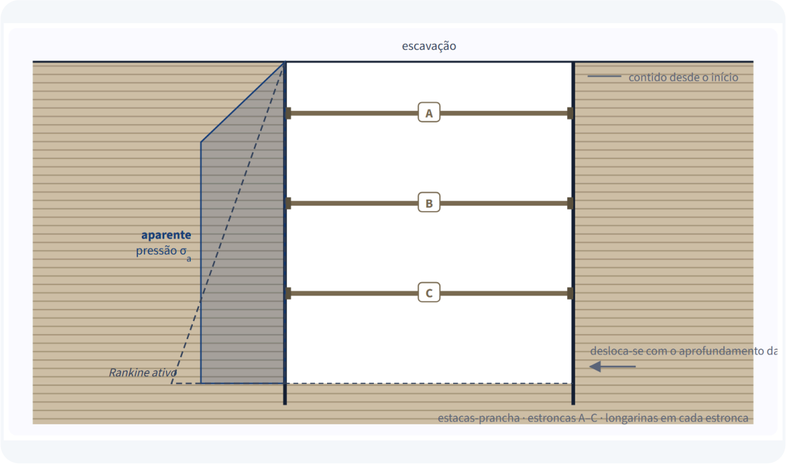
O muro de flexão gira em torno da sua base, e o empuxo ativo de Rankine (nulo no topo, máximo na base) o descreve bem. **O muro escorado move-se no sentido inverso**: a primeira estronca é instalada quando a escavação é rasa, de modo que a parte superior quase não se move; cada etapa seguinte é escavada 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

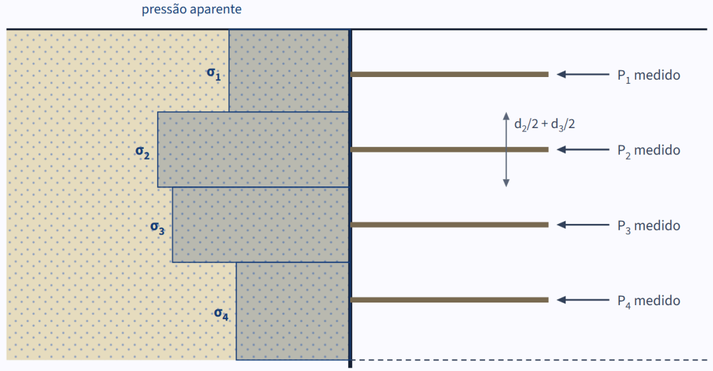
A pressão varia de ponto a ponto, e cada estronca deve ser dimensionada para a **maior carga** que possa encontrar. As envoltórias são construídas para isso: em uma escavação instrumentada, mede-se a carga em cada estronca, divide-se pela faixa de cortina que ela sustenta (espaçamento horizontal s × 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

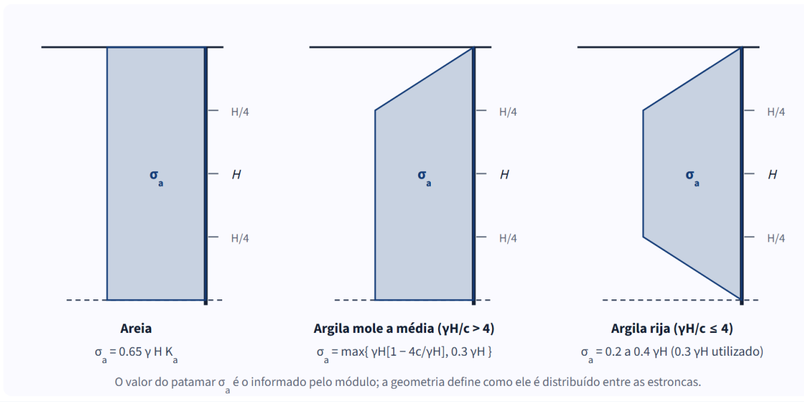
TEORIA

Na argila, o formato da envoltória é governado pelo **número de estabilidade γH/c** (c é a coesão não drenada, φ = 0). A **argila mole a média** com γH/c > 4 é levada pela escavação muito além da sua resistência; a **argila rija** está mais próxima do seu regime elástico:

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

A envoltória de argila mole a média é nula na superfície, aumenta no quarto superior e forma um patamar constante até a base; a envoltória de argila rija aumenta no quarto superior, é constante na metade central e volta a zero no quarto inferior. A maior das duas expressões governa.

Condições: profundidade de escavação ≳ 6 m; água abaixo da base; argila não drenada (a poropressão não é considerada).



Coesão equivalente de Peck

TEORIA

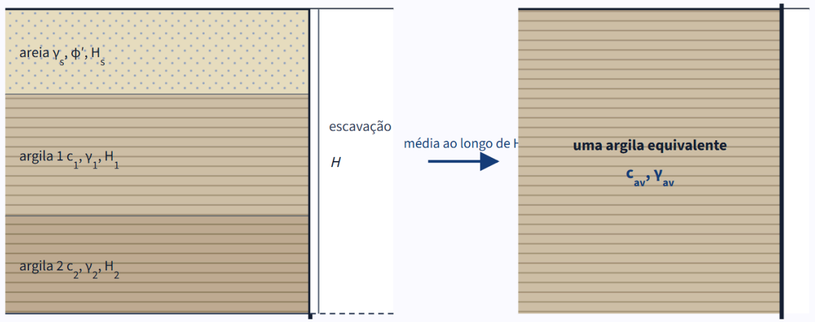
Quando a escavação contém areia e argila, Peck substituiu o perfil por **uma única argila**: faz a média da resistência que o solo pode mobilizar ao longo da altura. A areia contribui com o atrito do próprio peso, e a argila com a resistência à compressão simples (reduzida para a ruptura progressiva):

$$c_{av} = \frac{1}{2H}\left[\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + (H - H_s)\, n' q_u\right] \qquad \gamma_a = \frac{1}{H}\left[\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c\right]$$

H_s, γ_s, φ'_s: altura, peso específico e ângulo de atrito efetivo da areia; K_s coeficiente de empuxo lateral da areia (≈ 1); $q_u = 2c$ resistência à compressão simples da argila, γ_c seu peso específico saturado; n' coeficiente de ruptura progressiva, 0.5–1.0 (média 0.75).

Com c_{av} e γ_a, as envoltórias de argila são aplicadas a toda a altura; a envoltória é escolhida por meio de $\gamma_a H/c_{av}$.

Se houver várias argilas sob a areia, a fonte primeiro as pondera pela espessura ($c_{av} = \Sigma c_i H_i/\Sigma H_i$, γ_{av}) e depois combina essa argila equivalente com a areia (como no caso do National Plaza).



areia: atrito por peso próprio $\gamma K_s H_s^2 \tan\phi'$ · argila: $n' q_u H$ · ambos somados na altura, aplicando-se em seguida a regra da argila

Enunciado

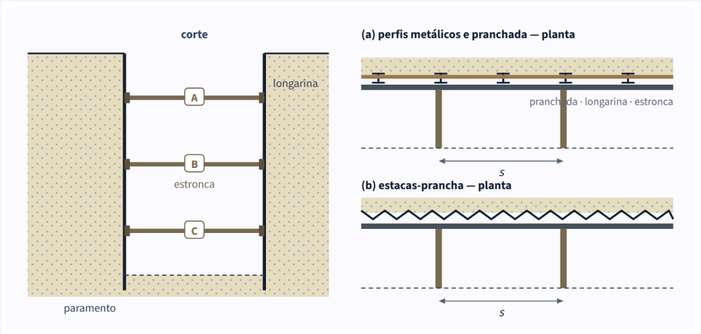
EXEMPLO

Dados

Perfil	**no topo $H_s = 3$ m de areia ($\gamma_s = 17$ kN/m³, $\varphi'_s = 30°$, $K_s = 1$), abaixo argila ($\gamma_c = 18$ kN/m³, $c = 35$ kPa)**
Escavação e coeficiente	$H = 7.0$ **m;** $n' = 0.75$ **(média); e também** $n' = 0.5$ **e** 1.0

PEDE-SE

c_{av}, γ_a, $\gamma_a H/c_{av}$, o tipo de envoltória e σ_a; resultado com a variação de n′.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Coesão e peso específico equivalentes (n′ = 0.75)

$$c_{av} = \frac{1}{2(7)}\left[17(1)(3)^2\tan 30^\circ + (7-3)(0.75)(2\cdot 35)\right] = \frac{88.33 + 210.0}{14} = \mathbf{21.31}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(3) + (7-3)18}{7} = \mathbf{17.57}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_a H}{c_{av}} = \frac{17.57(7)}{21.31} = \mathbf{5.77} > 4$$

Argila equivalente: c_{av} = **21.31 kPa**, γ_a = 17.57 kN/m³; $\gamma_a H/c_{av}$ = **5.77** > 4 → envoltória de argila mole a média.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Envoltória da argila mole a média e sensibilidade a n′

$$\sigma_a = \gamma_a H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_a H}\right] = 17.57(7) - 4(21.31) = \mathbf{37.75}\ \text{kPa}$$

n′	c_{av} (kPa)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	P_{max} (kN)
0.50	16.31	7.54	57.75	424.5
0.75	21.31	5.77	37.75	277.5
1.00	26.31	4.67	36.90	271.2

Argila equivalente: c_{av} = **21.31 kPa**, $\gamma_a H/c_{av}$ = 5.77 > 4: envoltória de argila mole a média, **σ_a = 37.75 kPa**. Adotando-se n′ = 0.5, c_{av} cai para 16.31 e σ_a sobe para 57.8 kPa: o coeficiente de ruptura progressiva afeta muito o resultado.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Enunciado

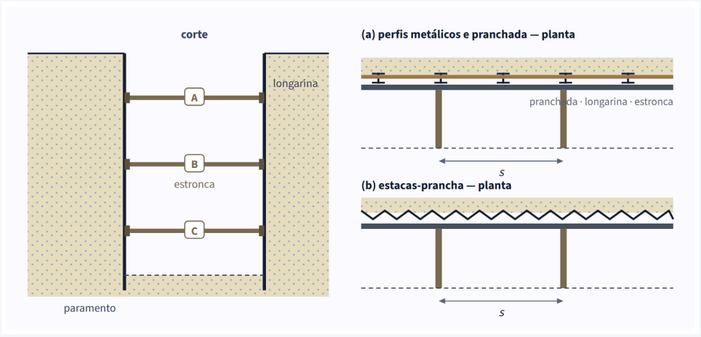
EXEMPLO

Dados

Escavação	$H = 70$ ft $= 21.34$ m de profundidade, seis estroncas; 13 ft de areia abaixo do aterro, quatro argilas (tabela abaixo, SI)
Coeficientes	$K_s = 1$, $\varphi'_s = 30°$, $n' = 0.75$

PEDE-SE

Média da argila ponderada pela espessura $c_{av,clay}$; c_{av}, γ_{av}, $\gamma H/c$ e σ_a.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 Perfil (SI) e argila com média ponderada pela espessura

Camada	Espessura (m)	γ (kN/m³)	c (kPa)	Termo de contribuição (kN/m)
Aterro de areia	3.96	17.28	—	156.6
Argila 1	10.06	19.95	19.2	289.0
Argila 2	3.35	20.42	33.5	168.6
Argila 3	1.83	21.21	95.8	262.7
Argila 4	2.13	21.21	191.5	612.9

$$c_{av,clay} = \frac{\Sigma c_i H_i}{\Sigma H_i} = \mathbf{51.16}\ \mathrm{kPa}$$

A média das quatro argilas ponderada pela espessura é **51.16 kPa**; o termo da areia $\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s$ = 156.6, o termo da argila $n' q_u \Sigma H_i$ = 1,333.2 kN/m.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Coesão equivalente, peso específico e envoltória

$$c_{av} = \frac{\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + n' q_u \Sigma H_i}{2H} = \frac{156.6 + 1{,}333.2}{2(21.34)} = \mathbf{34.91}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_{av} = \frac{\Sigma \gamma_i H_i}{H} = \mathbf{19.76}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_{av} H}{c_{av}} = \frac{19.76(21.34)}{34.91} = \mathbf{12.08}\ > 4$$

$$\sigma_a = \gamma_{av} H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_{av} H}\right] = \mathbf{282.0}\ \text{kPa}$$

Aplica-se a envoltória de argila mole a média: **σ_a = 282.0 kPa** (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma_{av}H/c_{av}$ = 12.08). A comparação dessa envoltória com as cargas observadas nas longarinas encontra-se na seção “Envoltórias em escavações reais” (envoltória de Peck ≈ 1.8 vez).

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Adicionado ao lado da envoltória

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; na argila a água 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; apenas altera o peso do solo: peso específico saturado abaixo da água e, na camada interceptada pela água, a média ponderada pela espessura dos dois valores.

Como a espessura da camada de areia determina a argila equivalente, a **sequência das camadas** do perfil afeta diretamente o resultado: à medida que a areia se espessa, c_{av} varia (exemplo a seguir).

$$\Delta p_q = K_a q = q \;\; (\varphi = 0 \Rightarrow K_a = 1)$$

$$\gamma = \frac{\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w)}{H}$$

Enunciado

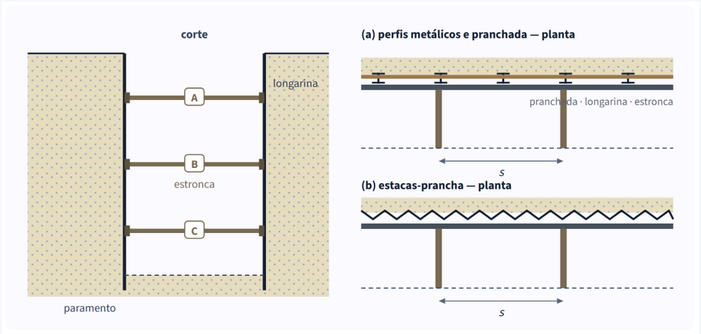
EXEMPLO

Dados

Escavação	**Escavação do Exemplo 1 ($H = 7$ m, $n' = 0.75$): areia 3 m (inicial)**
Alterações	**(a) areia com 5 m de espessura (argila 2 m); (b) sobrecarga $q = 10$ kPa**

PEDE-SE

Em cada caso, c_{av}, $\gamma_a H/c_{av}$, σ_a, a carga total R e a maior carga de estronca.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 (a) Areia 5 m: argila equivalente readensada

$$c_{av} = \frac{1}{14}\left[17(5)^2 \tan 30^\circ + (2)(0.75)(70)\right] = 25.03 \text{ kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(5) + 2(18)}{7} = 17.29 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_a = \max\left(\gamma_a H - 4c_{av},\, 0.3\gamma_a H\right) = \max(20.91, 36.31) = \mathbf{36.31} \text{ kPa}$$

Com 5 m de areia, a coesão equivalente passa de 21.3 → **25.0 kPa** e a envoltória é governada por **0.3γ_aH = 36.3 kPa**.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 (b) Sobrecarga: $\Delta p_q = q = 10$ kPa separadamente; resumo dos três casos

Situação	c_{av} (kPa)	γ_a (kN/m³)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
Escavação inicial (areia 3 m)	21.31	17.57	5.77	37.75	231.2	277.5
(a) areia 5 m	25.03	17.29	4.84	36.31	222.4	266.9
(b) q = 10 kPa	21.31	17.57	5.77	37.75	301.2	351.0

Com o aumento da espessura da areia, c_{av} passa de 21.3 para 25.0 kPa e a envoltória cai de 37.8 para **36.3 kPa** (a areia com atrito agrega mais resistência que a argila; passa a governar o termo $0.3\gamma_a H$). A sobrecarga não afeta a envoltória: apenas acrescenta $\Delta p_q = 10$ kPa (R de 231.2 para 301.2 kN/m).

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:

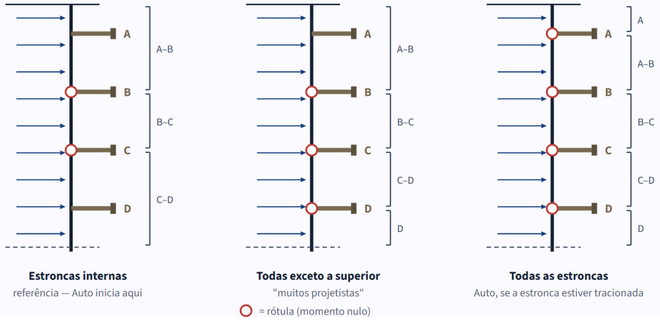
Traçar a envoltória de pressões e os níveis de apoio. Considerar a cortina **articulada em cada nível de apoio**, exceto no mais alto e no mais baixo (muitos projetistas a consideram articulada em todos, exceto no mais alto).

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

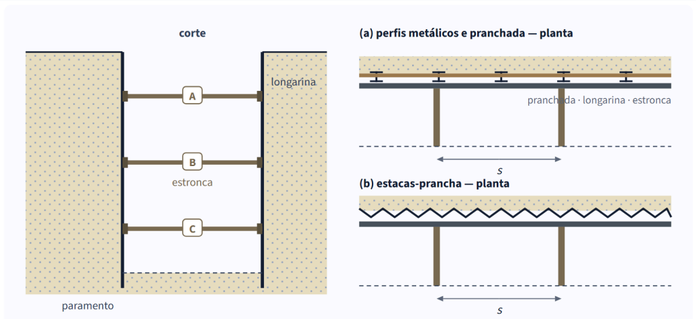
EXEMPLO

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 equivalente, envoltória mole–média $\sigma_a = 37.75$ kPa (aumenta no quarto superior, constante até a base); cortina de estacas-pranchas articulada no apoio B (exceto o superior e o 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	99.09	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	132.12	5.250	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

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

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.09(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.14} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{53.95}\ \mathrm{kN/m}$$

O primeiro trecho transmite aos dois apoios 53.95 e 45.14 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

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{132.12(5.250 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{92.49} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{39.64}\ \mathrm{kN/m}$$

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	53.95	53.95	**161.85**
B	3.50	45.14 + 39.64	84.78	**254.34**
C	6.00	92.49	92.49	**277.47**

A carga máxima na estronca é **P_C = 277.47 kN** (nível C): 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.

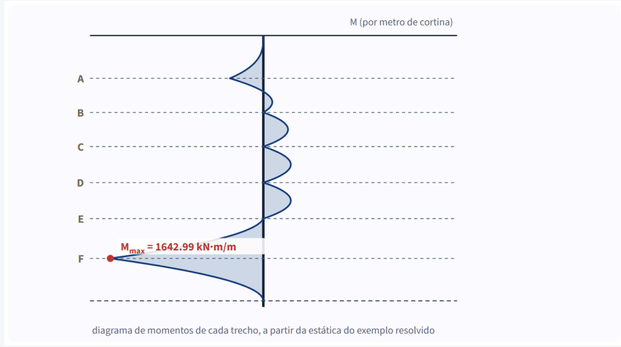
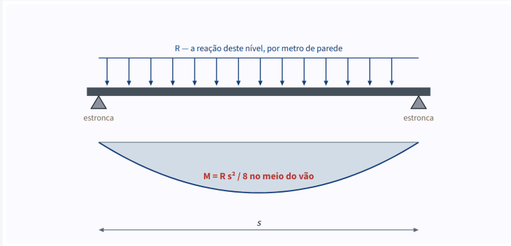


diagrama de momentos de cada trecho, a partir da estática do exemplo resolvido



Enunciado

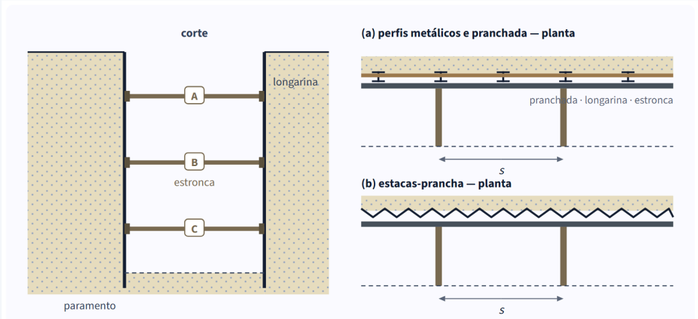
EXEMPLO

Dados

Escavação	**A escavação do Exemplo 1 ($H = 7$ m, argila equivalente, $\sigma_a = 37.75$ kPa); estroncas a 1.0 · 3.5 · 6.0 m; $s = 3.0$ 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	26.99	2.30
2	3.50 – 7.00	20.81	4.55

2 Módulo de resistência necessário

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{26.99}{170{,}000} = 0.0001588\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{158.8}\ \mathrm{cm^3/m}$$

Na cortina de estacas-pranchas, **M_{max} = 26.99 kN·m/m** (segmento 1, z = 2.30 m): **S ≥ 158.8 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	53.95	60.69	357
B	84.78	95.38	561
C	92.49	104.05	612

A maior reação ocorre **no nível C** (R = 92.49 kN/m): a longarina é dimensionada com **M_{max} = 104.05 kN·m**, **S ≥ 612 cm³**; as longarinas dos demais níveis podem ser menores.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Esforços de projeto, classe, flexão e flambagem

TEORIA

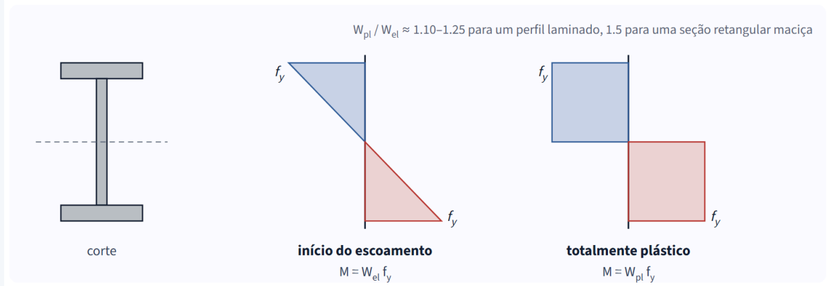
As cargas obtidas da envoltória são **valores de serviço** (a envoltória de Peck é um limite superior das cargas medidas); majoram-se uma única vez para o valor de projeto: $E_d = \gamma_F E_k$. Cada elemento é verificado com a resistência ao escoamento (f_y) da sua própria classe de aço; a seção é dada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

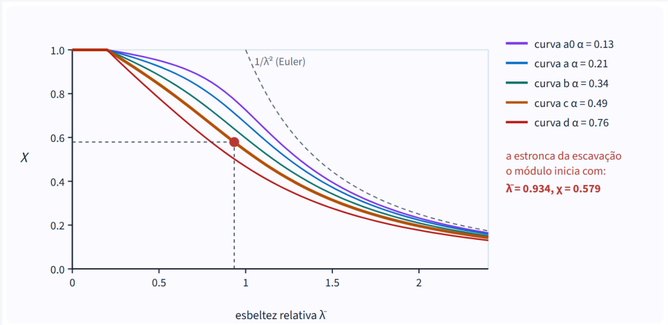
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{classe } 1\text{–}2),\ W_{el}\ (\text{classe } 3)$$

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

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

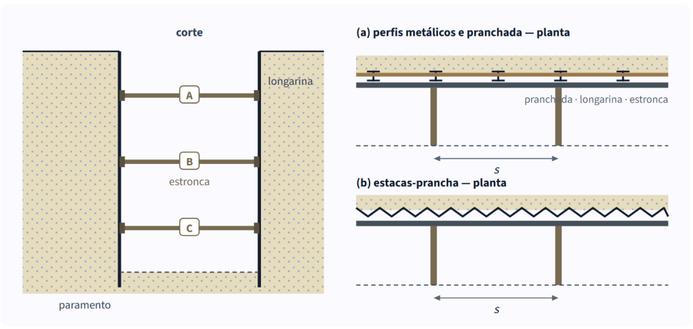
EXEMPLO

Dados

Escavação e cargas	**A escavação do Exemplo 1 e as cargas do Exemplo 4: $P_{max} = 277.47$ kN**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(26.99)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.44}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(104.05)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{140.47}{275.0} = \mathbf{0.511}$$

Estaca-prancha η = **0.221**, longarina η = **0.511**: ambas são suficientes ($\eta \leq 1$).

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Estronca (flambagem): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(277.47) = 374.58$ kN

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

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

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

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

η_{strut} = 374.6 / 1,046.4 = **0.358**. 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

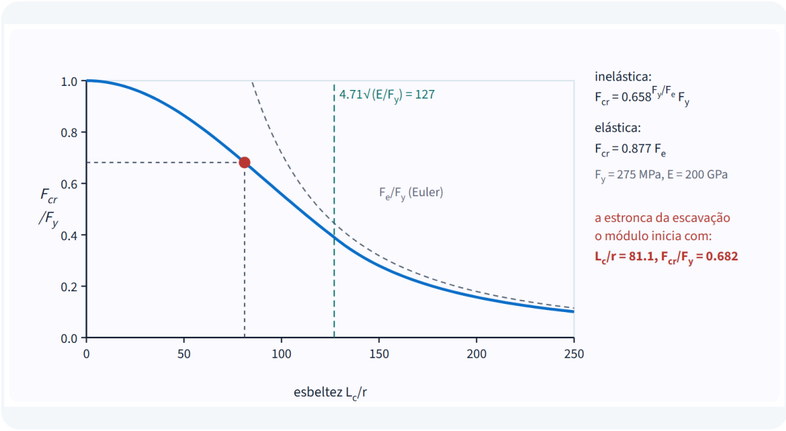
Cada elemento é verificado com a **resistência nominal R_n** obtida das disposições de compressão, flexão e cisalhamento. No LRFD, a carga é majorada e a resistência é reduzida por φ; no ASD, a carga de serviço é comparada com a resistência dividida pelo fator de segurança Ω:

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

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

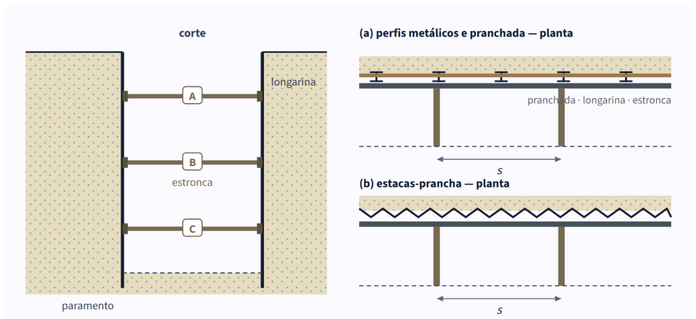
EXEMPLO

Dados

Escavação e cargas	**A escavação do Exemplo 1 e as cargas do Exemplo 4: $P_{max} = 277.47$ kN**
Elementos	**Elementos do Exemplo 6 (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 = 277.47 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(277.47) = 444.0\ \text{kN} \ \leq\ \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.401}$$

$$\text{ASD: } P_a = 277.47\ \text{kN} \ \leq\ \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.376}$$

Estronca: LRFD η = **0.401**, ASD η = **0.376**. Estaca-prancha (LRFD) 0.291, longarina 0.673; pela EN 1993-1-1 eram 0.221, 0.511 e 0.358.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

A argila subjacente suporta a carga, e as camadas laterais transmitem cisalhamento e carga

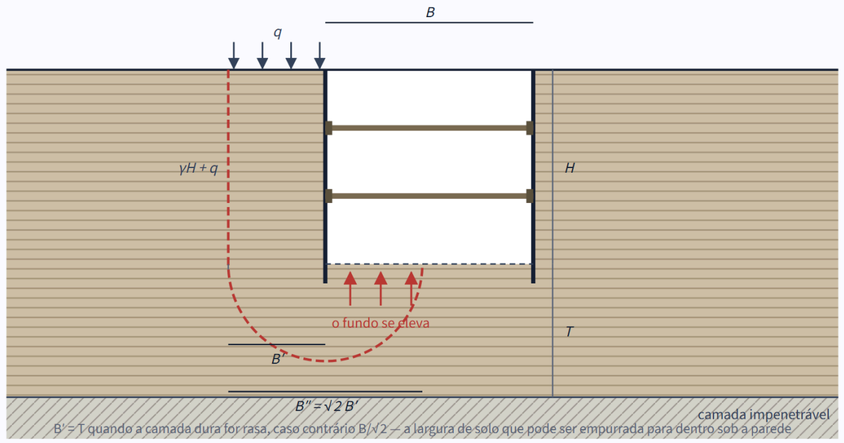
TEORIA

A base de uma escavação em argila pode levantar sob o peso do solo adjacente (coluna de Terzaghi, correção de Chang). A fórmula é deduzida para argila homogênea; o módulo a utiliza **em perfil estratificado por meio da extensão do GeoTerva**:

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

c: a argila abaixo da base (termo de capacidade de carga); **c_{side}**: coesão média na altura contida (a areia é considerada nula; termo de cisalhamento lateral); **$\sigma_v(H)$**: tensão total de sobrecarga no nível da base, na borda da escavação ($\Sigma\gamma_i H_i$).

B é a largura da escavação, L o comprimento em planta, T a camada rija abaixo do fundo; a ficha da cortina não é considerada (a favor da segurança). FS exigido **≈ 1.5**.



Enunciado

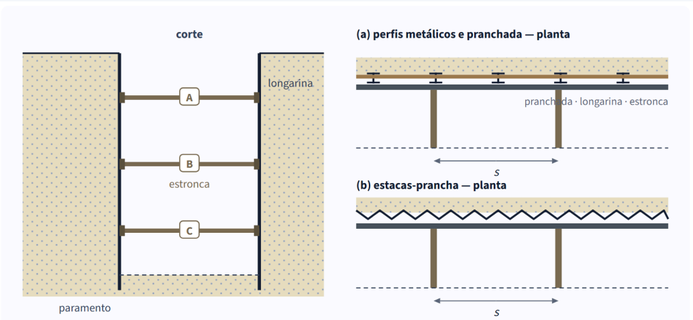
EXEMPLO

Dados

Escavação inicial	$H = 7$ m, $B = 6$ m, $L = 20$ m, argila $T = 4$ m abaixo da base; 3 m de areia no topo ($\gamma = 17$), argila abaixo ($\gamma = 18$, $c = 35$ kPa)
Comparação	se a areia tivesse 5 m de espessura (argila com 2 m)

PEDE-SE

c_{side}, $\sigma_v(H)$, B' e **FS** (≥ 1.5?); como fica o FS quando a espessura da areia aumenta?



Solução

SOLUÇÃO

1 Das camadas laterais: coesão média e tensão de sobrecarga

$$c_{side} = \frac{0\,(3) + 35\,(4)}{7} = \mathbf{20.0}\ \text{kPa}\ \ (\text{areia: zero}) \qquad \sigma_v(H) = 17(3) + 18(4) = \mathbf{123}\ \text{kPa}$$

$$B/\sqrt{2} = 4.24\ \text{m} > T = 4\ \text{m} \ \Rightarrow\ B' = 4.00\ \text{m}, \quad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

2 Fator de segurança (termo de capacidade de carga: argila abaixo da base c = 35 kPa)

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{20(7)}{4.00}}{123} = \frac{190.1 + 35.0}{123} = \mathbf{1.83}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

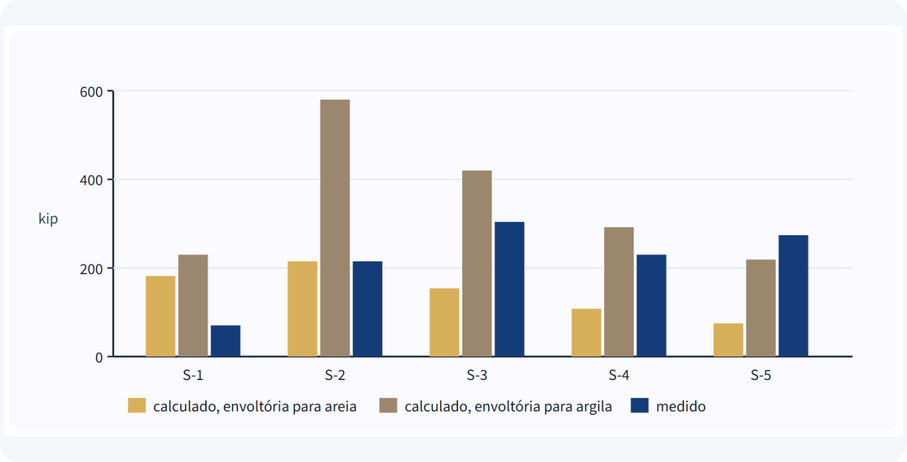
O fator de segurança ao levantamento de fundo é **1.83** (≥ 1.5). Com areia de 5 m, a coesão lateral cai para 10 kPa, a tensão de sobrecarga baixa para 121 kPa e o FS cai para **1.72**: à medida que a camada de areia se espessa, diminui a parcela do cisalhamento lateral.

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, 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, σ_a = 282.0 kPa). A envoltória de Peck forneceu cerca de **1.8 vezes** a pressão 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 mais de cerca de 6 m de profundidade; **a envoltória não é a pressão real sobre a parede em um instante qualquer**: ela fornece uma carga de escoramento segura, não o deslocamento da parede. A argila é não drenada; a areia, drenada.

O perfil de areia + argila é convertido em **uma única argila equivalente** (c_{av}, γ_a); a envoltória é escolhida por $\gamma_a H/c_{av}$. Várias argilas são primeiro ponderadas pela espessura. $K_s \approx 1$ e $n' = 0.75$ são valores médios; uma variação de $n' = 0.5$–1.0 tem grande efeito no resultado.

A sobrecarga é adicionada separadamente ($\Delta p = q$); a água altera apenas o peso específico. A **cortina de estacas-pranchas** é uma cadeia de vigas isostáticas articuladas; as **longarinas** são vãos simples entre apoios. 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 extensão do GeoTerva para solos estratificados da fórmula deduzida para argila homogênea; a ficha da cortina não é considerada.

Esperam-se movimento lateral e perda de solo no entorno durante a escavação; havendo camada dura, as estacas-pranchas são embutidas nela.

Resumo

Pontos-chave

Argila equivalente: $c_{av} = [\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s + (H - H_s) n' q_u]/(2H)$, $\gamma_a = [\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c]/H$; no exemplo, 21.31 kPa e 17.57 kN/m³

Envoltória: $\gamma_a H/c_{av} = 5.77 > 4 \rightarrow$ envoltória de argila mole a média $\sigma_a = \gamma_a H[1 - 4c_{av}/\gamma_a H] = 37.75$ kPa; $n' = 0.5 \rightarrow 57.75$ kPa

National Plaza: $c_{av,clay} = 51.16$, $c_{av} = 34.91$ kPa, $\gamma_{av} = 19.76$ kN/m³, $\gamma H/c = 12.08 \rightarrow \sigma_a = 282.0$ kPa (≈ 1.8 vez o valor observado)

Carga na estronca e dimensionamento: $P_{max} = 277.47$ kN; estaca-prancha $M_{max} = 26.99$ kN·m/m; longarina M = 104.05 kN·m

Aço: EN 1993-1-1 η = 0.221 / 0.511 / 0.358; AISC LRFD estronca 0.401, ASD 0.376

Levantamento de fundo (estratificado): $c_{side} = 20$ kPa, $\sigma_v(H) = 123$ kPa, FS = 1.83 ≥ 1.5

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 motor de cálculo do próprio módulo; o módulo fornece os mesmos valores. Os exemplos resolvidos da página do módulo são o caso do National Plaza (Chicago) e a escavação inicial do módulo (H = 7 m, areia 3 m + argila).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Inserir no GeoTerva as camadas de areia e argila da própria escavação, os níveis das estroncas, a sobrecarga e os elementos; o módulo fornece em conjunto a argila equivalente, a envoltória, 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.