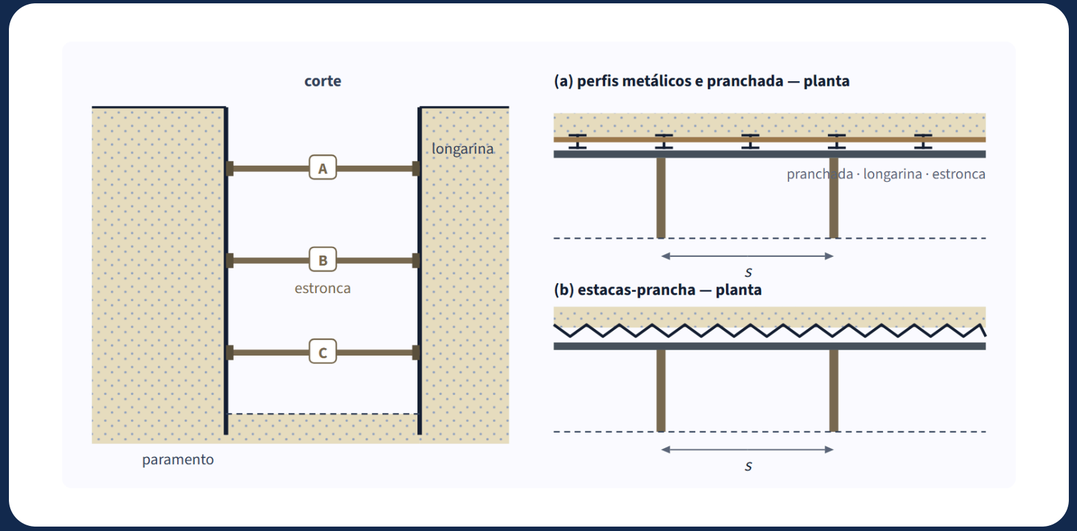
Apresentação da aula de geotecnia · Cortinas de estacas-prancha e escavações escoradas

Escavação escorada em areia

Aula: escavação escorada (com estroncas) em areia; envoltória de empuxo aparente de Peck, cargas nas estroncas, dimensionamento das estacas-pranchas e das longarinas, verificação do aço e piping no fundo; exemplo resolvido em cada tópico.



Escavação escorada

Envoltória de Peck (areia)

Estronca · longarina · estaca-prancha

EN 1993 · AISC 360

Piping no 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 a partir das cargas medidas nas estroncas

Para areia, a **envoltória de Peck $\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$** e as três regras para K_a em várias camadas de areia

A adição de **água** e **sobrecarga** como diagramas separados ao lado da envoltória

Da envoltória às **cargas nas estroncas** (segmentos articulados, reações A, B_1, B_2, C, P = R·s)

O dimensionamento da **estaca-prancha** (M_{max}, S) e da **longarina** ($M = R\,s^2/8$); a verificação do aço conforme **EN 1993-1-1 e AISC 360-22**

Verificação de **piping** na base da areia (gradiente de saída, $FS = i_{cr}/i_{exit}$)

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: areia (γ = 17.6 kN/m³, φ' = 32°), profundidade H = 8.00 m, largura B = 6.00 m; estroncas nas profundidades 1.80 · 4.60 · 7.30 m, espaçamento horizontal s = 3.00 m. As forças são por metro de parede (cargas nas estroncas multiplicadas por s).

Sistema de escoramento e seus elementos

TEORIA

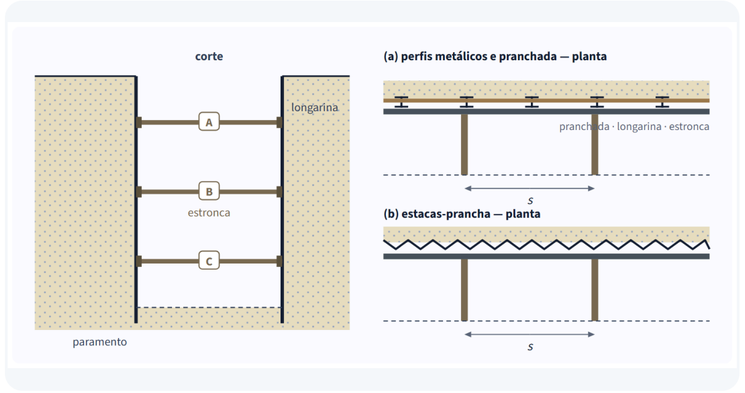
Escavações profundas com paredes verticais (subsolos urbanos, túneis em vala) são mantidas abertas por um **sistema de escoramento** provisório. Duas disposições são comuns: **estacas verticais** (de aço ou madeira) cravadas previamente, entre as quais se coloca o pranchamento horizontal de madeira à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

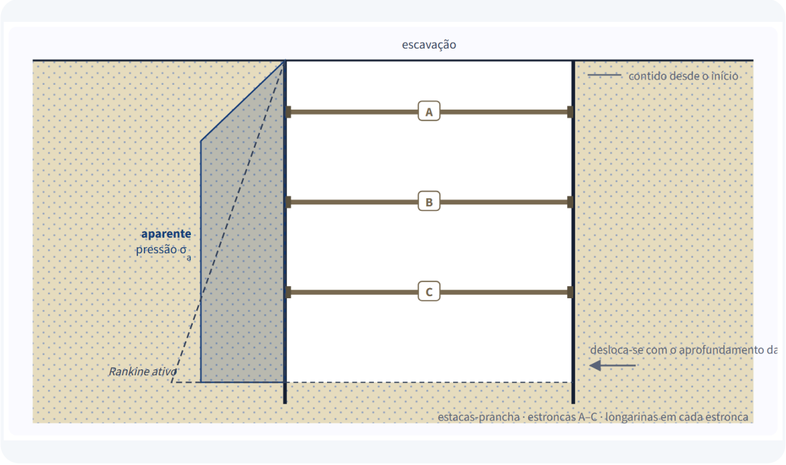
O muro de flexão gira em torno da sua base, e o empuxo ativo de Rankine (nulo no topo, máximo na base) o descreve bem. **O muro escorado move-se no sentido inverso**: a primeira estronca é instalada quando a escavação é rasa, de modo que a parte superior quase não se move; cada etapa seguinte é escavada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

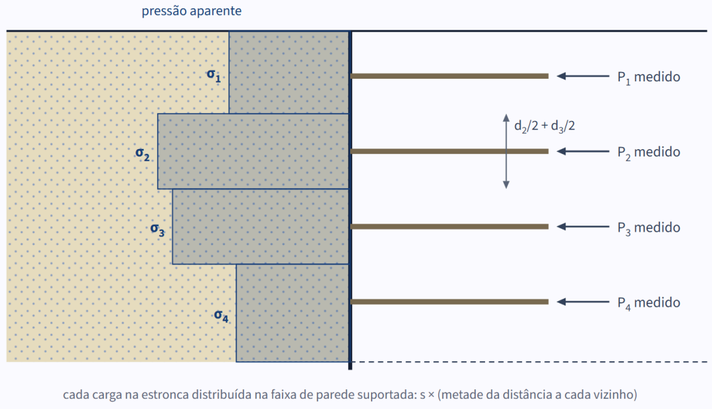
A pressão varia de ponto a ponto, e cada estronca deve ser dimensionada para a **maior carga** que possa encontrar. As envoltórias são construídas para isso: em uma escavação instrumentada, mede-se a carga em cada estronca, divide-se pela faixa de cortina que ela sustenta (espaçamento horizontal s ×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

$\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$, em toda a altura

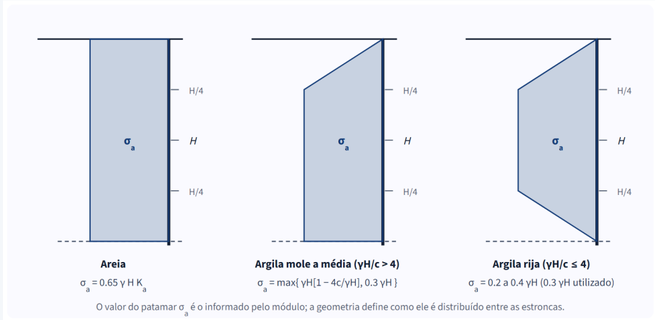
TEORIA

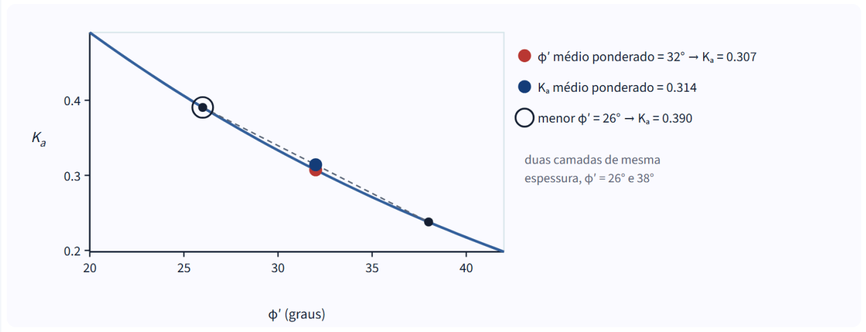
Em areia, a envoltória de Peck é um **retângulo**: pressão única em toda a altura da escavação, igual a 65% da maior ordenada do triângulo ativo de Rankine:

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a \qquad K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

As envoltórias aplicam-se nas seguintes condições: profundidade de escavação superior a cerca de 6 m; **lençol freático abaixo do fundo da escavação**; areia drenada (poropressão nula).

A envoltória exige um único K_a; para **várias areias**, a fonte não dá regra. Usam-se três regras, que não concordam, porque K_a é função convexa de φ' (a média calculada no interior da curva fica abaixo da curva): $K_a(\bar{\varphi} = \Sigma\varphi H/H)$, K_a médio $= \Sigma K_{a,i} H/H$ e $K_a(\varphi'_{min})$.





Enunciado

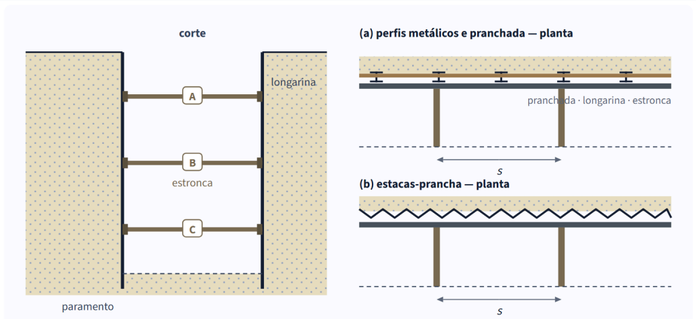
EXEMPLO

Dados

Escavação	$H = 8.00$ **m, areia única** $\gamma = 17.6$ **kN/m³,** $\varphi' = 32°$
Perfil de três camadas	**0–3 m:** $\gamma = 17$, $\varphi' = 28°$**; 3–6 m:** 18, $38°$**; abaixo de 6 m:** 18.5, $33°$ **(mesma escavação)**

PEDE-SE

(a) **K_a** e **σ_a**; (b) os valores de K_a e σ_a segundo as três regras no perfil de três camadas.



Solução

SOLUÇÃO

1 (a) Areia única

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0.3073}$$

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a = 0.65(17.6)(8.00)(0.3073) = \mathbf{28.12}\ \text{kPa}$$

2 (b) Três camadas: $\bar{\gamma}$ ponderado = 17.75 kN/m³ segundo a altura da escavação (espessuras das camadas 3 + 3 + 2 m)

Regra	K_a	$\sigma_a = 0.65\,\bar{\gamma} H K_a$ (kPa)	P_{max} (kN)
$K_a(\bar{\varphi} = 33.0°)$	0.2948	27.21	308.5
K_a médio = $\Sigma K_{a,i} H_i / H$	0.2983	27.53	312.1
$K_a(\varphi'_{min} = 28°)$	0.3610	33.32	377.7

Em areia única, a envoltória é de **28.12 kPa**. Os valores de K_a das três regras variam entre 0.295 – 0.361: o cálculo com o menor φ′ (σ_a = 33.3 kPa) dá um valor 22% maior que o das médias; as regras que adotam a média ficam dentro da curva, e **a conservadora é φ'_{min}.**

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Adicionada ao lado da envoltória, não dentro dela

TEORIA

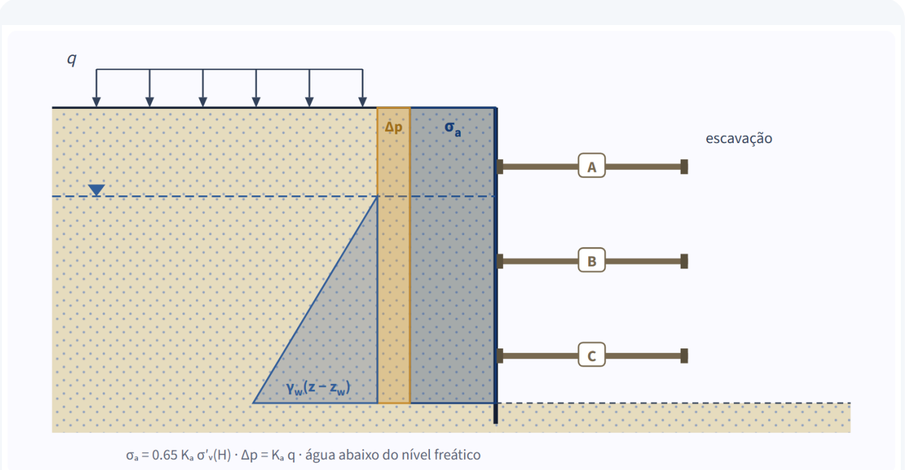
As envoltórias foram construídas a partir de escavações em que não havia água abaixo da base nem carga ao lado da escavação. O módulo acrescenta ambas ao lado da envoltória como **diagramas separados**; a envoltória não é extrapolada além da faixa em que foi medida.

Água: a envoltória de areia de Peck é um diagrama de tensões efetivas. Se a água está dentro da escavação, a tensão de sobrecarga no nível da base é tomada como efetiva (peso específico natural acima da água, submerso abaixo); a água também pressiona a cortina em toda a altura, e as estroncas suportam ambos em conjunto.

A **sobrecarga q** não entra na envoltória (o fator empírico 0.65 também se aplicaria a ela); é considerada como pressão uniforme própria em toda a altura.

$$\sigma'_v(H) = \sum \gamma_i h_i + \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \sigma_a = 0.65 K_a \sigma'_v(H) \qquad u(z) = \gamma_w (z - z_w)$$

$$\Delta p_q = K_a q \qquad R = \sigma_a H + \Delta p_q H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2$$



Enunciado

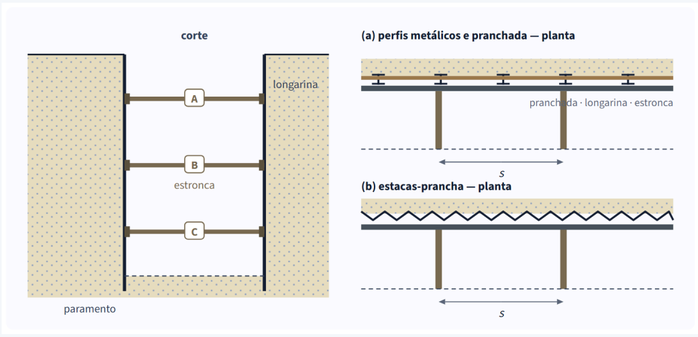
EXEMPLO

Dados

Escavação	**A escavação do Exemplo 1(a) ($H = 8$ m, $\gamma = 17.6$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³, $\varphi' = 32°$)**
Casos	**(a) sem água, sem sobrecarga; (b) lençol freático a $z_w = 3$ m; (c) sobrecarga uniforme $q = 10$ kPa**

PEDE-SE

Em cada caso, **σ_a**, a sobrecarga e a pressão da água; a **carga total R** e a maior carga nas estroncas.



Solução (1/2)

SOLUÇÃO

1 (b) Água: tensão efetiva de sobrecarga e envoltória; a água atua ainda sobre toda a altura

$$\sigma'_v(H) = 17.6(3) + (20 - 9.81)(5) = 103.75\ \text{kPa}$$

$$\sigma_a = 0.65(0.3073)(103.75) = 20.72\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2 = 20.72(8) + \tfrac{1}{2}(9.81)(5)^2 = \mathbf{288.41}\ \text{kN/m}$$

Abaixo da água, a tensão efetiva de sobrecarga diminui (σ_a de 28.12 → 20.72 kPa), mas a água atua sobre a cortina em toda a altura: R = **288.4 kN/m**.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 (c) Sobrecarga: pressão uniforme separada; resumo de (a), (b), (c)

$$\Delta p_q = K_a q = 0.3073(10) = 3.073\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \Delta p_q H = 28.12(8) + 3.073(8) = 249.52\ \text{kN/m}$$

Situação	σ_a (kPa)	Ek (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)	M_{max} da estaca-prancha (kN·m/m)
(a) Sem água, q = 0	28.12	—	224.96	318.8	45.55
(b) Água z_w = 3 m	20.72	u(H) = 49.05	288.38	376.7	37.09
(c) q = 10 kPa	28.12	Δp_q = 3.07	249.52	353.5	50.53

A água **reduz** a envoltória, mas acrescenta a pressão da água: R 225.0 → **288.4 kN/m**. A sobrecarga não altera a envoltória; acrescenta Δp_q = 3.07 kPa (R = 249.5 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:

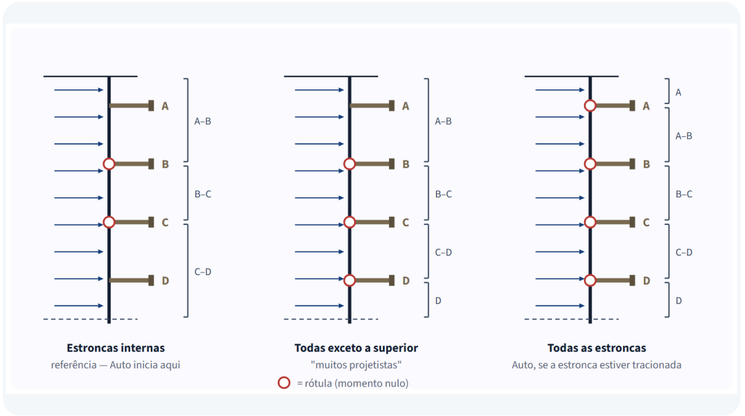
Traçar a envoltória de pressões e os níveis de apoio. Considerar a cortina **articulada em cada nível de apoio**, exceto no mais alto e no mais baixo (muitos projetistas a consideram articulada em todos, exceto no mais alto).

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

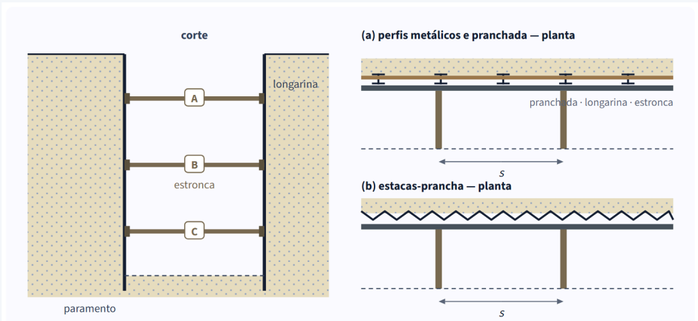
EXEMPLO

Dados

Escavação	$H = 8.00$ m; $B = 6$ m; estroncas $z = 1.80, 4.60, 7.30$ m (A, B, C); espaçamento horizontal $s = 3.00$ m
Pressão	Exemplo 1(a): envoltória retangular contínua $\sigma_a = 28.12$ kPa; cortina de estacas-pranchas articulada no apoio B (exceto no topo e na base)

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 – 4.60	129.35	2.300	A (z = 1.80), B (z = 4.60)
2	4.60 – 8.00	95.61	6.300	B (z = 4.60), C (z = 7.30)

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

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{129.35(2.300 - 1.80)}{4.60 - 1.80} = \mathbf{23.10} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{106.25}\ \mathrm{kN/m}$$

O primeiro trecho transmite aos dois apoios 106.25 e 23.10 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

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{95.61(6.300 - 4.60)}{7.30 - 4.60} = \mathbf{60.20} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{35.41}\ \mathrm{kN/m}$$

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	1.80	106.25	106.25	**318.75**
B	4.60	23.10 + 35.41	58.51	**175.53**
C	7.30	60.20	60.20	**180.60**

A carga máxima na estronca é **P_A = 318.75 kN** (nível A): 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.

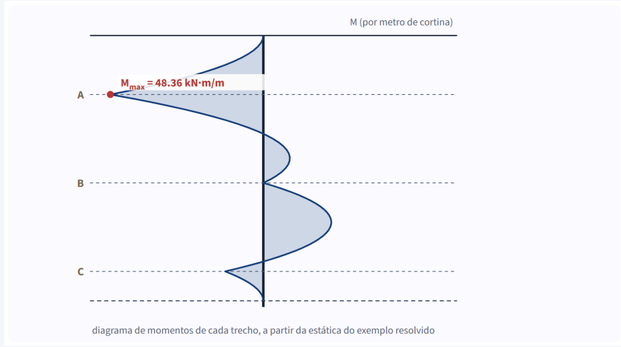
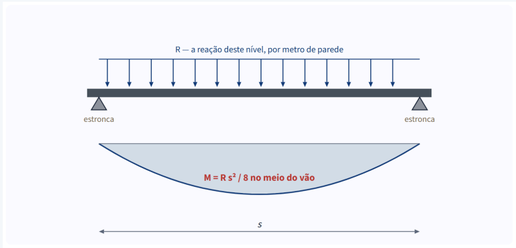


diagrama de momentos de cada trecho, a partir da estática do exemplo resolvido



Enunciado

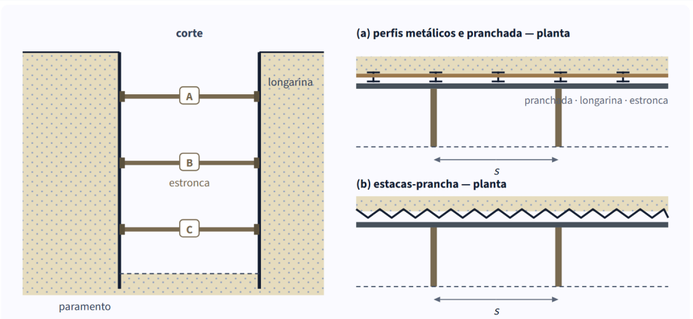
EXEMPLO

Dados

Escavação	**profundidade $H = 27$ ft (8.23 m), areia $\gamma = 17.59$ kN/m³, $\varphi' = 32^\circ$; estroncas a 6, 15, 24 ft (1.83; 4.57; 7.32 m); espaçamento horizontal de 12 ft (3.66 m); articulação em B**
Aço	**tensão admissível de flexão $\sigma_{allow} = 165\,474$ 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 – 4.57	48.36	1.83
2	4.57 – 8.23	21.49	5.79

2 Módulo de resistência necessário

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{48.36}{165{,}474} = 0.0002923\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{292.3}\ \mathrm{cm^3/m}$$

Na cortina de estacas-pranchas, **M_{max} = 48.36 kN·m/m** (segmento 1, z = 1.83 m): **S ≥ 292.3 cm³/m**.

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

3 Longarina: viga biapoiada em cada nível (s = 3.658 m)

Nível	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{allow} (cm³)
A	110.18	184.25	1,113
B	57.30	95.82	579
C	70.52	117.93	713

A maior reação ocorre **no nível A** (R = 110.18 kN/m): a longarina é dimensionada com **M_{max} = 184.25 kN·m**, **S ≥ 1,113 cm³**; as longarinas dos demais níveis podem ser menores.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Esforços de projeto, classe, flexão e flambagem

TEORIA

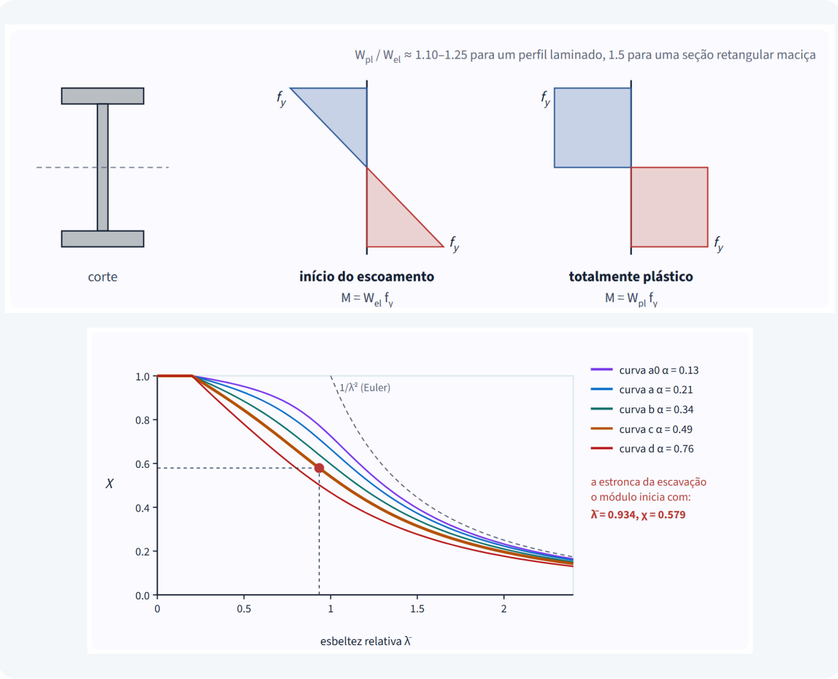
As cargas obtidas da envoltória são **valores de serviço** (a envoltória de Peck é um limite superior das cargas medidas); majoram-se uma única vez para o valor de projeto: $E_d = \gamma_F E_k$. Cada elemento é verificado com a resistência ao escoamento (f_y) da sua própria classe de aço; a seção é dada 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

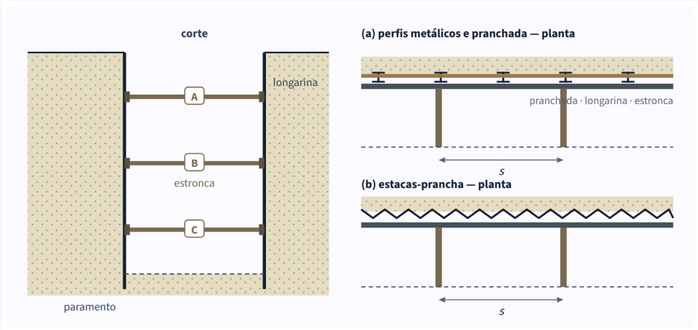
EXEMPLO

Dados

Escavação e cargas	**A escavação do Exemplo 1(a) e as cargas do Exemplo 3: $P_{max} = 318.75$ kN (estronca A)**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(45.55)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{61.50}{165.0} = \mathbf{0.373}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(119.53)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{161.37}{275.0} = \mathbf{0.587}$$

Estaca-prancha η = **0.373**, longarina η = **0.587**: ambas são suficientes ($\eta \leq 1$).

Solução (2/2)

SOLUÇÃO

2 Estronca (flambagem): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(318.75) = 430.31$ 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} = 430.3 / 1,046.4 = **0.411**. 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

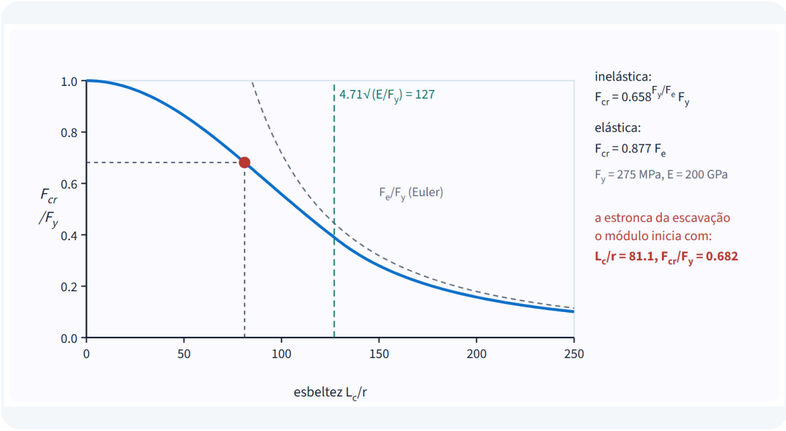
Cada elemento é verificado com a **resistência nominal R_n** obtida das disposições de compressão, flexão e cisalhamento. No LRFD, a carga é majorada e a resistência é reduzida por φ; no ASD, a carga de serviço é comparada com a resistência dividida pelo fator de segurança Ω:

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

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

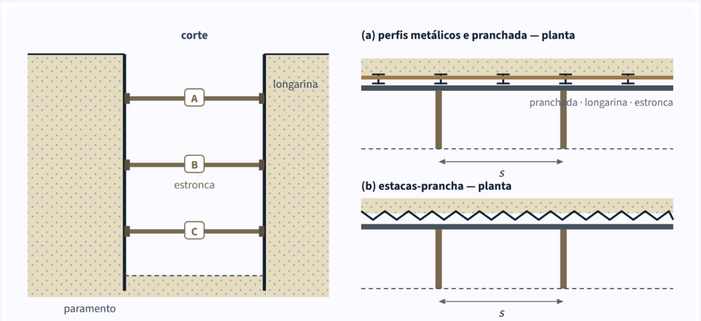
EXEMPLO

Dados

Escavação e cargas	**A escavação do Exemplo 1(a) e as cargas do Exemplo 3: $P_{max} = 318.75$ kN (estronca A)**
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 = 318.75 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(318.75) = 510.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.460}$$

$$\text{ASD: } P_a = 318.75\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.432}$$

Estronca: LRFD η = **0.460**, ASD η = **0.432**. Estaca-prancha (LRFD) 0.491, longarina 0.773; pela EN 1993-1-1 eram 0.373, 0.587 e 0.411.

Verificar a solução no GeoTerva ↗

Gradiente de saída e gradiente crítico

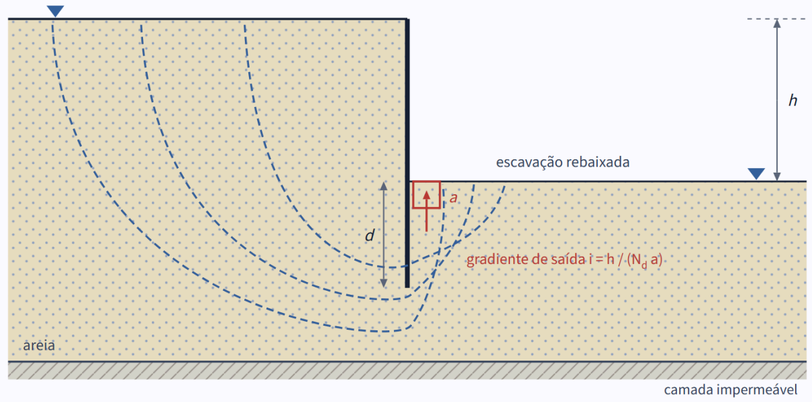
TEORIA

O fundo em areia é em geral estável e assim permanece enquanto a água dentro da escavação não ficar abaixo do lençol freático externo. Quando a escavação é rebaixada, a água passa por baixo da cortina e sobe pelo fundo; o gradiente ascendente elevado no ponto de saída pode levantar os grãos: **ocorre a ebulição do fundo (piping)**. O maior gradiente de saída junto à cortina é lido na rede de fluxo:

$$i_{exit(max)} = \frac{h/N_d}{a} = \frac{h}{N_d\, a} \qquad FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

h é a perda de carga na rede de fluxo, N_d o número de quedas de potencial e a o comprimento do elemento de fluxo em que a água emerge do solo junto à cortina. i_{cr} vale 0.9–1.1 na maioria dos solos (média 1); FS requerido **≈ 1.5**.

Para escavação com cortina em areia profunda, o gradiente de saída foi resolvido teoricamente: de dois ábacos obtêm-se o parâmetro m (com $2L_2/B$ e $2L_1/B$) e L_2 i_{exit}/h; $i = (L_2 i/h)_{nomograph} \cdot h/L_2$. L_1 é a profundidade da areia externa até o nível do fundo, e L_2 é a ficha da cortina abaixo do fundo.



Enunciado

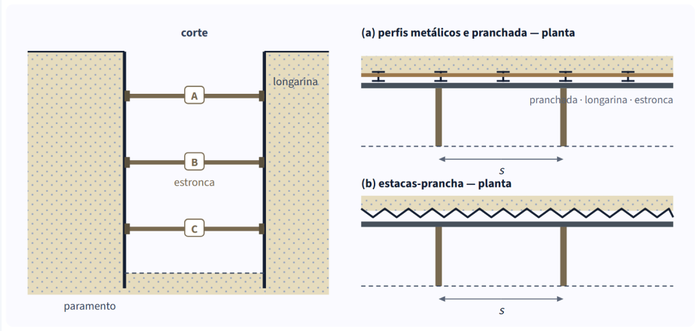
EXEMPLO

Dados

Rede de fluxo (escavação inicial)	**perda de carga $h = 3.0$ m, número de quedas $N_d = 8$, elemento de saída $a = 1.0$ m; $i_{cr} = 1.0$; $FS_{required} = 1.5$**
Exemplo de ábaco (livro-texto)	$h = 4.5$ m, $L_1 = 5$ m, $L_2 = 4$ m, $B = 5$ m: $2L_1/B = 2$, $B/2L_2 = 0.625$, $m \approx 0.033$, $L_2 i_{exit}/h = 0.54$

PEDE-SE

i_{exit} e **FS** pelos dois métodos; decisão em relação ao valor requerido de 1.5.



Solução

SOLUÇÃO

1 Rede de fluxo: $i_{exit} = h/(N_d\, a)$

$$i_{exit(max)} = \frac{h}{N_d a} = \frac{3.0}{8(1.0)} = \mathbf{0.375}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} = \frac{1.0}{0.375} = \mathbf{2.67} \;\geq 1.5\;\checkmark$$

2 Método do ábaco (areia profunda)

$$i_{exit(max)} = \left(\frac{L_2 i_{exit}}{h}\right)_{nomograph} \frac{h}{L_2} = 0.54 \cdot \frac{4.5}{4} = 0.6075$$

$$FS = \frac{1.0}{0.6075} = \mathbf{1.646} \;\geq 1.5\;\checkmark$$

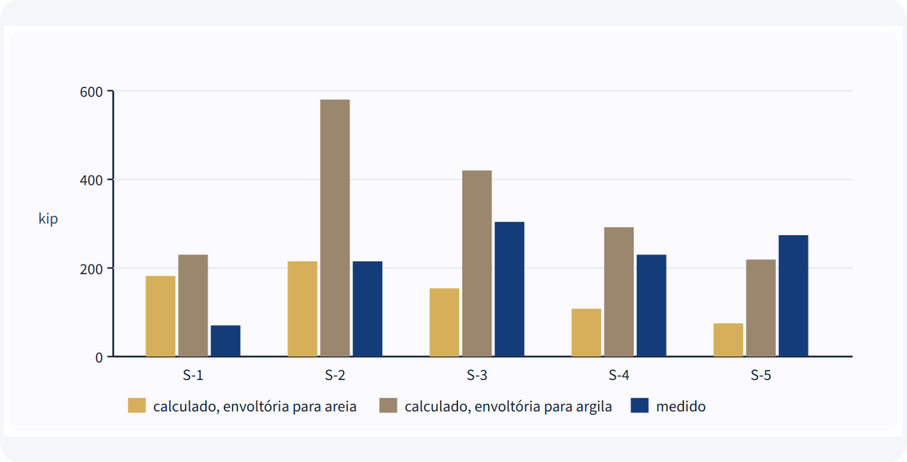
Na rede de fluxo, o fator de segurança contra piping é **2.67**; pelo ábaco, **1.65**: ambos acima do valor exigido de 1.5.

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 (espaçamento de 3.66 m); 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 (parâmetros do solo incertos), e as estroncas haviam sido projetadas para cargas muito superiores às medidas. **Chicago, National Plaza**: 21.3 m de profundidade, seis estroncas, argilas sob 13 ft de aterro arenoso; o perfil foi convertido em uma argila equivalente: c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma H/c = 12.08 > 4 \rightarrow \sigma_a$ = 282.0 kPa. A envoltória de Peck forneceu uma pressão cerca de **1.8 vezes** o valor observado: 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; escavações mais rasas ficam fora dos dados, e o módulo registra esse fato. **A envoltória não é a pressão real que atua sobre a cortina em um instante qualquer**: fornece uma carga segura nas estroncas, não o deslocamento da cortina.

O **lençol freático** é admitido abaixo da base; o módulo mantém o envelope da areia dentro da tensão efetiva de sobrecarga e, se a água estiver acima, soma a pressão hidrostática a ele; a percolação para dentro da escavação é verificada na base.

A **cortina de estacas-pranchas** é considerada uma cadeia de vigas isostáticas articuladas nos níveis de apoio definidos; não se utilizam sua rigidez própria nem a ficha abaixo da base. As **longarinas** são vãos simples entre as estroncas (a favor da segurança para uma longarina contínua que vença várias estroncas).

O aço é verificado pela EN 1993-1-1; seções de classe 4 não são projetadas e a flambagem lateral com torção das longarinas não é verificada. Há uma opção AISC 360-22 LRFD/ASD.

Espera-se algum movimento lateral da cortina: o valor depende do tempo entre a escavação de uma etapa e a instalação das longarinas e estroncas. O movimento causa **perda de solo** no terreno circundante; em 150 casos, o recalque máximo é de ≈ 1.1% da profundidade de escavação em argila mole, 0.2% em argila rija e 0.3% em solo não coesivo.

Resumo

Pontos-chave

Envoltória: a parede escorada gira em torno do seu topo; a pressão não é a de Rankine, mas um diagrama empírico traçado em torno das cargas medidas. **Retangular, em areia**: $\sigma_a = 0.65\ \gamma\ H\ K_a$ (exemplo: 28.12 kPa)

Várias areias: $K_a(\bar{\varphi})$, o K_a médio e $K_a(\varphi'_{min})$ não coincidem (convexo); φ'_{min} é conservador

Água e sobrecarga são tratadas separadamente: a água reduz a tensão efetiva do solo sobrejacente, mas acrescenta a pressão hidrostática total (R: 225 → 288 kN/m); q acrescenta $\Delta p = K_a q$

Carga na estronca: a envoltória é dividida em partes nas articulações, as reações são obtidas por estática, P = (reações somadas)·s; no exemplo, P_A = 318.75 kN

Dimensionamento: $S = M_{max}/\sigma_{allow}$ (estaca-prancha), longarina $M = R\ s^2/8$; na escavação do exemplo didático, a estaca-prancha é de 292 cm³/m e a longarina, de 1 113 cm³

Aço: EN 1993-1-1 η = 0.373 / 0.587 / 0.411 (estaca-prancha / longarina / flambagem da estronca); AISC LRFD estronca 0.460, ASD 0.432

Piping: $FS = i_{cr}/i_{exit} \geq 1.5$; no exemplo, 2.67 (rede de fluxo) e 1.65 (ábaco)

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.

Harr, M.E. (1962). Groundwater and Seepage. McGraw-Hill, New York.

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. O exemplo resolvido da página do módulo também corresponde a estas escavações (escavação do exemplo didático: 27 ft, γ = 112 pcf, φ' = 32°; escavação inicial do módulo: 8 m).

GeoTerva

Cálculos geotécnicos on-line

Da teoria à prática

Inserir no GeoTerva o perfil da escavação, os níveis das estroncas, o lençol freático, a sobrecarga e os elementos estruturais; o módulo fornece a envoltória, as cargas nas estroncas, os momentos na cortina e nas longarinas, a verificação do aço e o piping de fundo.

Abrir o módulo →

Página de teoria →

Abrir no celular
Os módulos de teste não exigem cadastro.