

PEF 3405 – Engenharia Geotécnica e Fundações

Aula 9. Estruturas de contenção

Prof. Marcos Massao Futai



- Fonte: www.solotrat.com.br/contencao-de-talude-para-construcao-civil

“Contenção é todo elemento ou estrutura destinado a contrapor-se a empuxos ou tensões geradas em maciço cuja condição de equilíbrio foi alterada por algum tipo de escavação, corte ou aterro”

Introdução

Por que precisa de uma contenção?

Necessidade de escavação

- Construção de estruturas no subsolo (edifícios e outras estruturas) – Obras permanentes
- Construção de obras de infraestruturas enterradas (rede de água, esgoto, etc) – Obras provisórias



Execução de aterro – Geralmente, obras permanentes

Fontes:

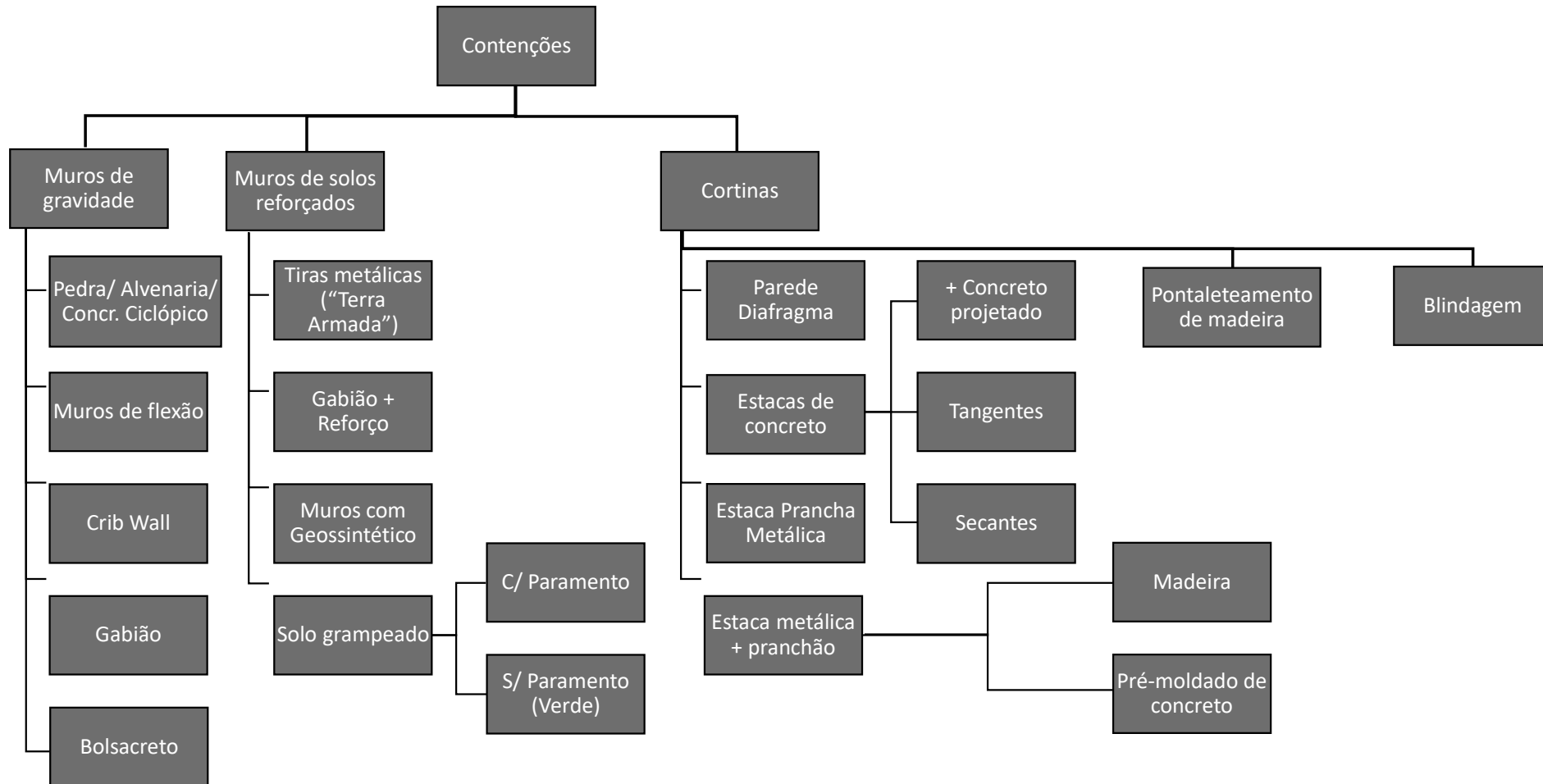
<http://www.alcalaengenharia.com/site/locacao/>

<https://guideengenharia.com.br/estruturas-de-contencao-muro-de-arrimo/>

Introdução

- Normas:
 - NBR 11682/2009 – Estabilidade de taludes
 - NBR 16920/2021 – Muros e taludes de solos reforçados
 - NBR 9061/1985 – Segurança de escavação a céu aberto

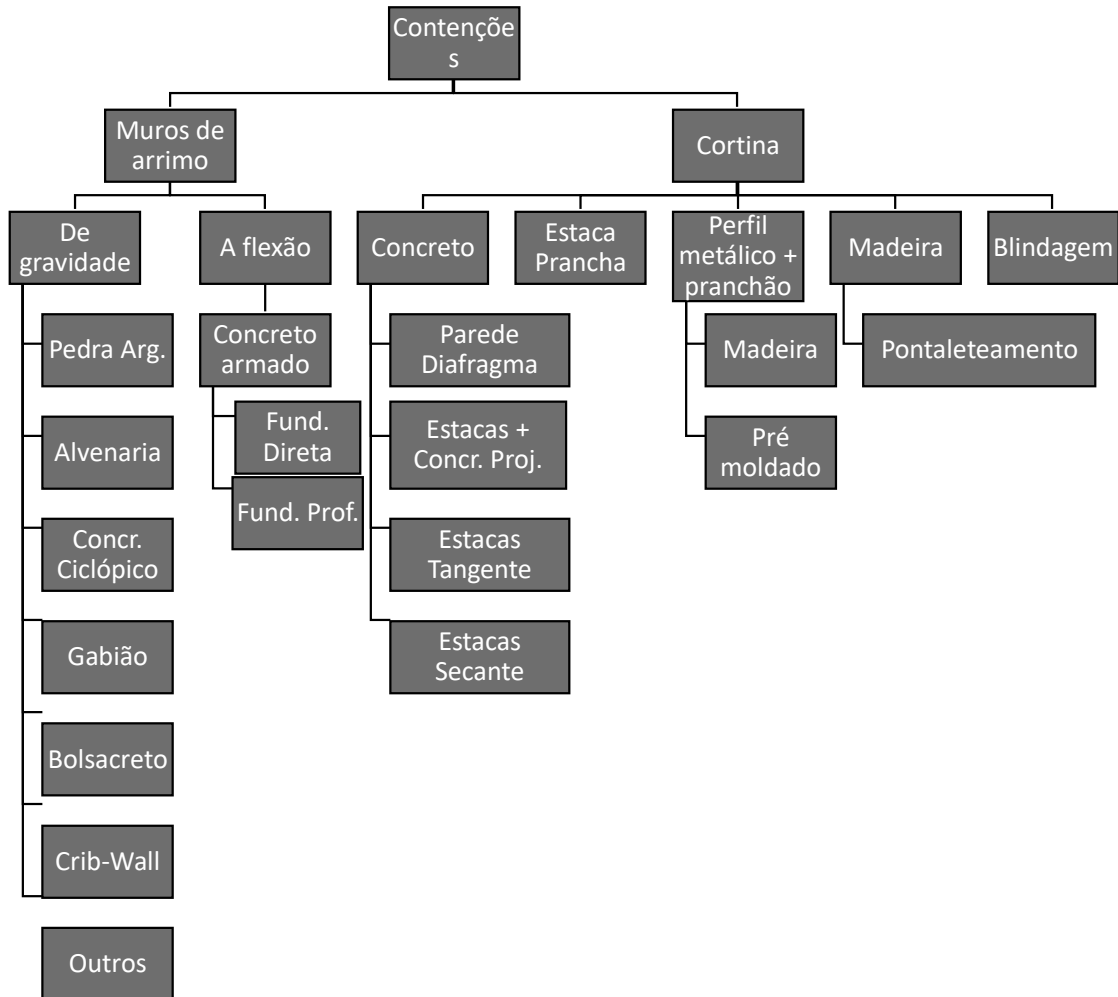
Tipos de contenções



Tipos de contenções



Tipos de contenções



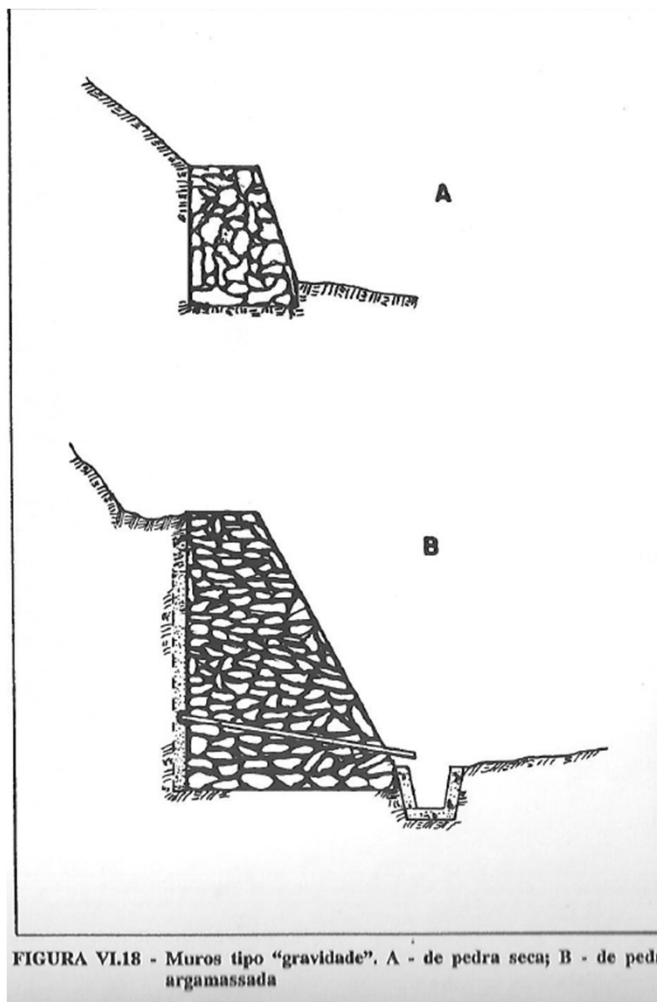
Tipos de contenções: Muros de arrimo de gravidade



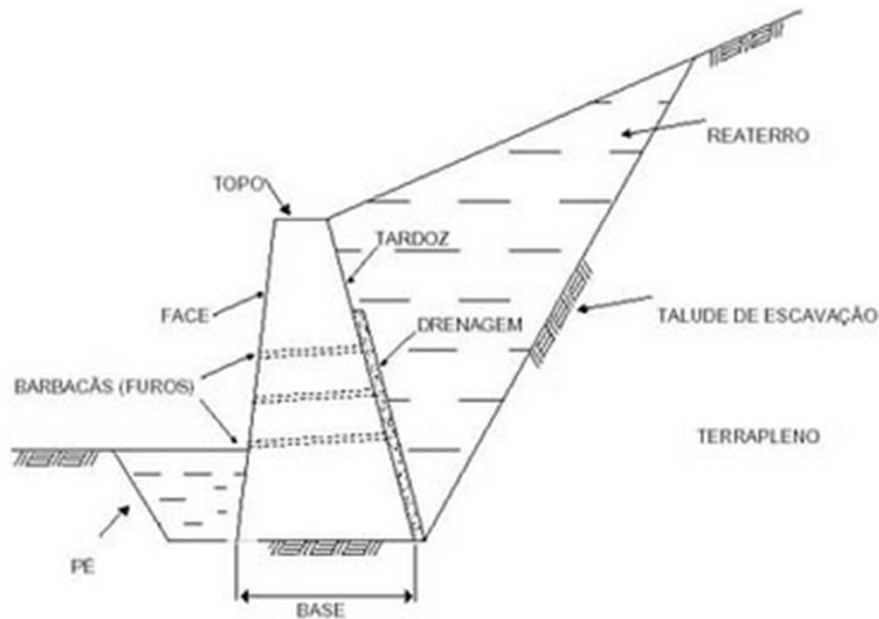
- Utilizam o peso (próprio ou do solo) para estabilizar o talude
 - Geralmente, Fundações diretas
- Aplicações em aterro e em corte (precisando de reaterro)
- Vários materiais utilizados para a construção

Tipos de contenção : Muro de pedra

- Opções: Seca e argamassadas (com seus vazios preenchidos com argamassa);
- Aplicação: Contenção de taludes / desníveis baixos de até 3m;
- Vantagens: Facilidade de construção e baixo custo;
- Fundamental drenar adequadamente todo o tardo do muro, com implantação de dreno de areia e escoamento por barbacãs.



Tipos de contenção: Muro de pedra



Fonte: http://ltdengenharia.com.br/obras_cont.html

Tipos de contenção : Muro de Concreto Ciclópico

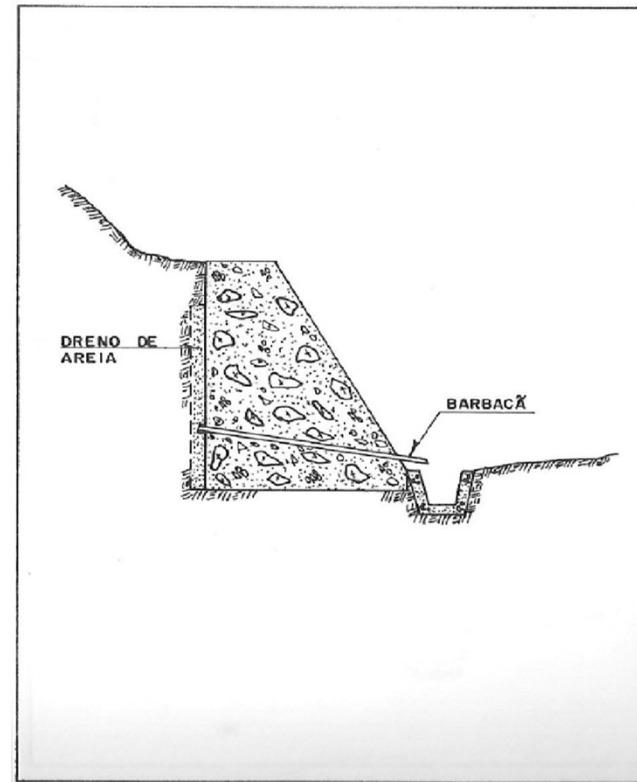
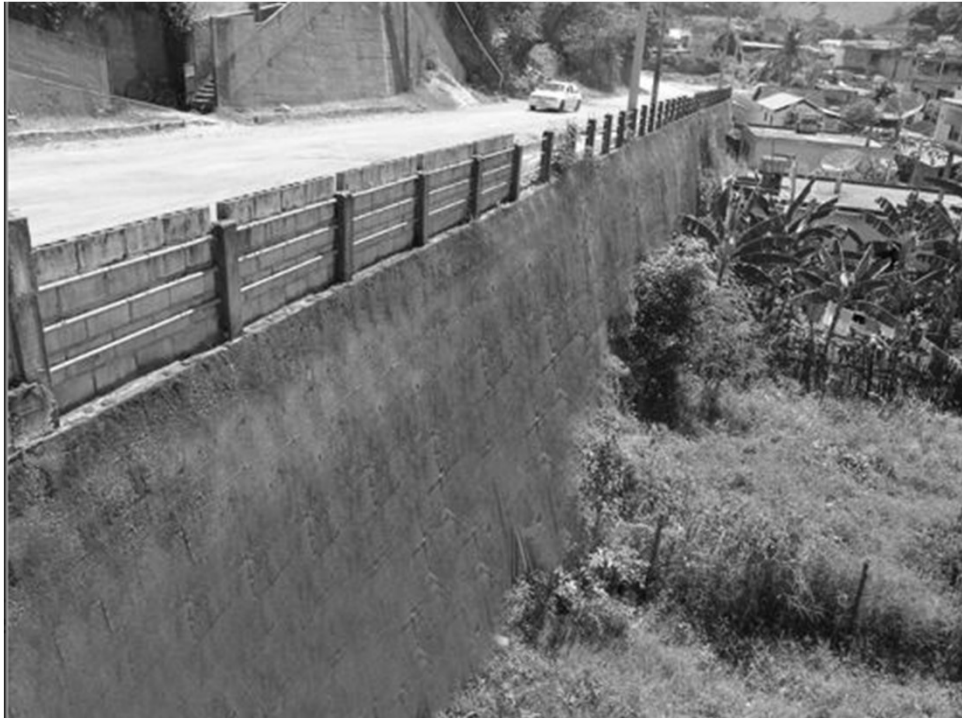


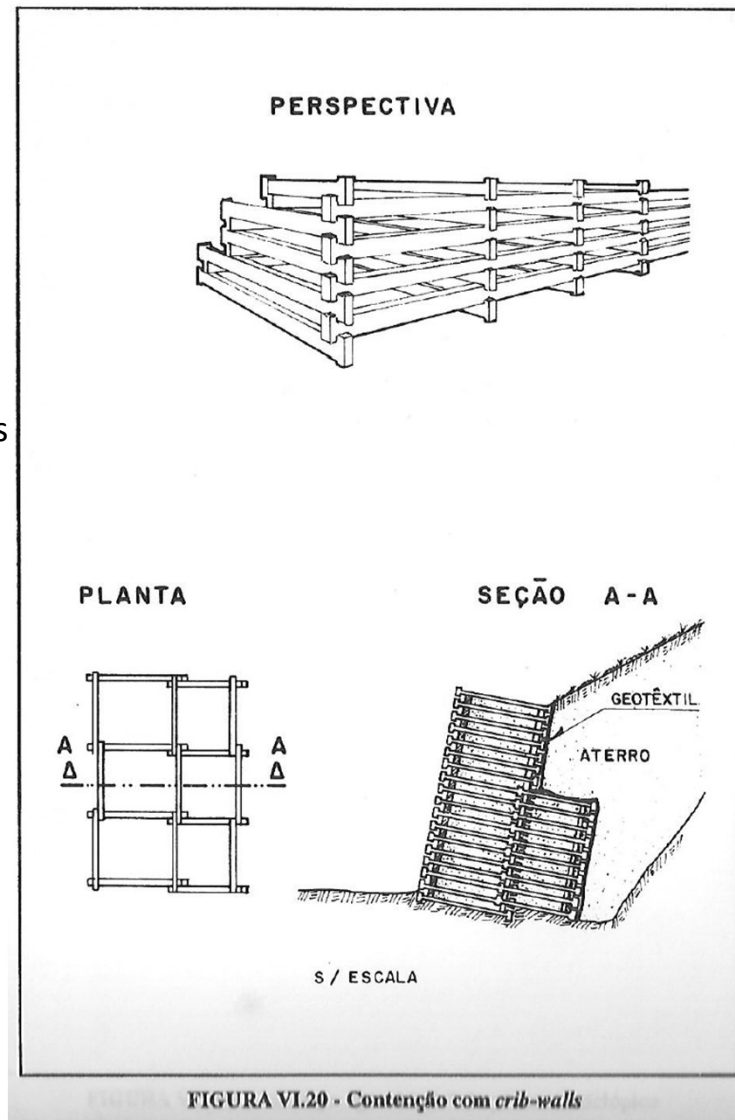
FIGURA VI.19 - Muro tipo "gravidade" de concreto ciclópico

- Estrutura composta de concreto e agregados de grandes dimensões;
- Aplicação: Contenção de taludes e/ou desníveis de maior altura;
- Vantagens: Facilidade de construção devido ao uso de fôrmas e baixo custo em alturas reduzidas;
- Cuidados: Fundamental execução de sistema de drenagem dreno de areia no tardo e barbacãs

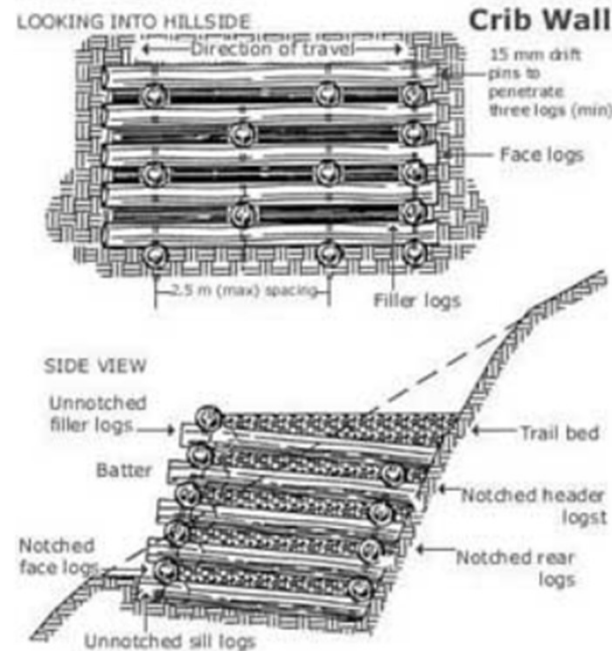
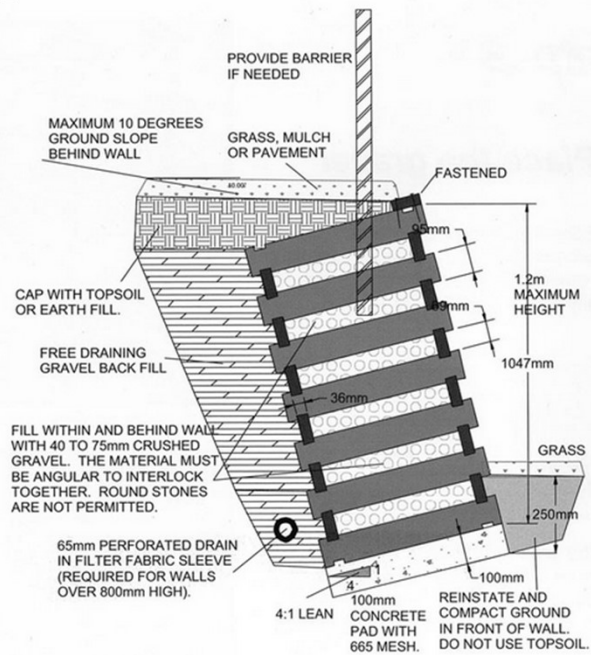
http://artdecoci.com.br/br/obras/muro_de_contencao

Tipos de contenção : Muro de arrimo celular de peças pré-moldadas de concreto (crib-wall)

- Sistema de peças de concreto encaixadas entre si formando “gaiolas”, preenchidas com terra ou blocos de rocha;
- Aplicação:
 - Obras rodoviárias em áreas íngremes;
 - Locais pouco estáveis;
- Vantagens:
 - Facilidade de construção, Baixo custo,
 - Capacidade de adaptação ao terreno;
- Aceitação de pequenos recalques;
- Cuidados:
 - Exige bom terreno de fundação, Drenagem;
 - Compactação cuidadosa do solo dentro da “gaiola”.



Tipos de contenção : Crib-Wall

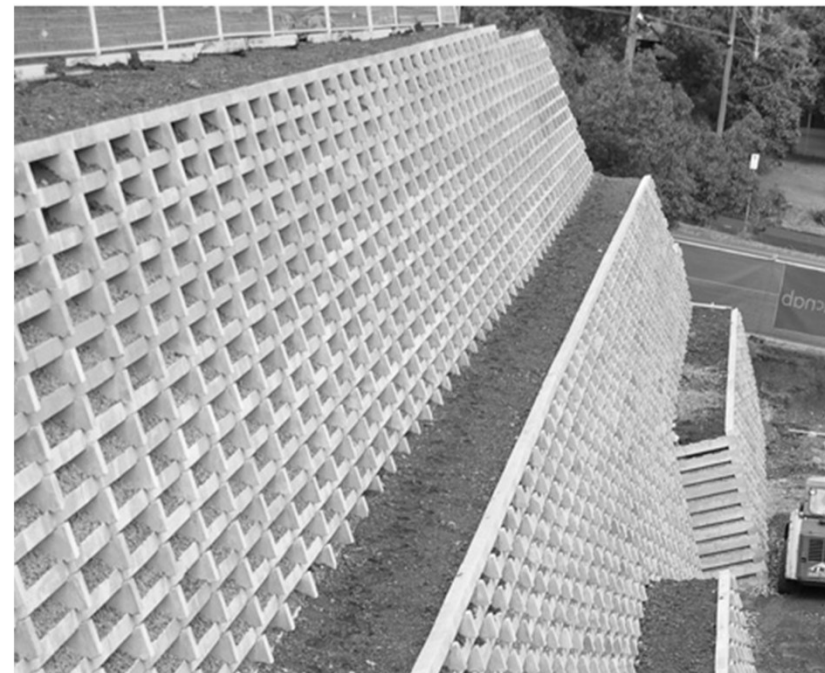


Fonte: <http://www.retainingolutions.com.au/retaining-walls/concrete-crib-walls>

Tipos de contenção : Crib-Wall

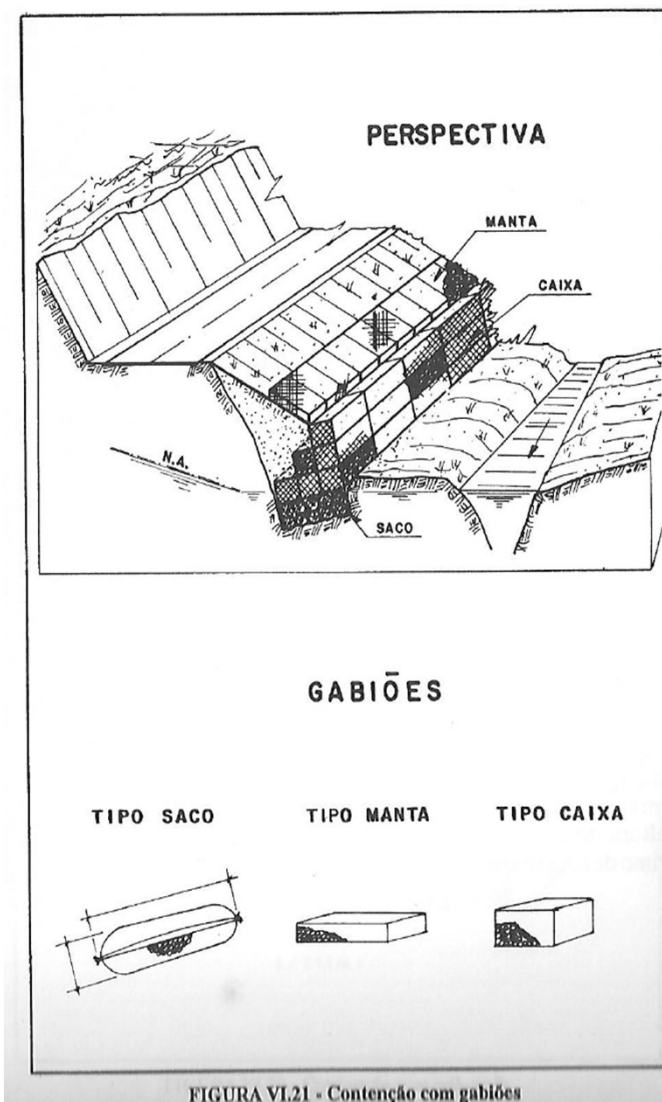


<http://www.moore-concrete.com/civil/product/1/20/>

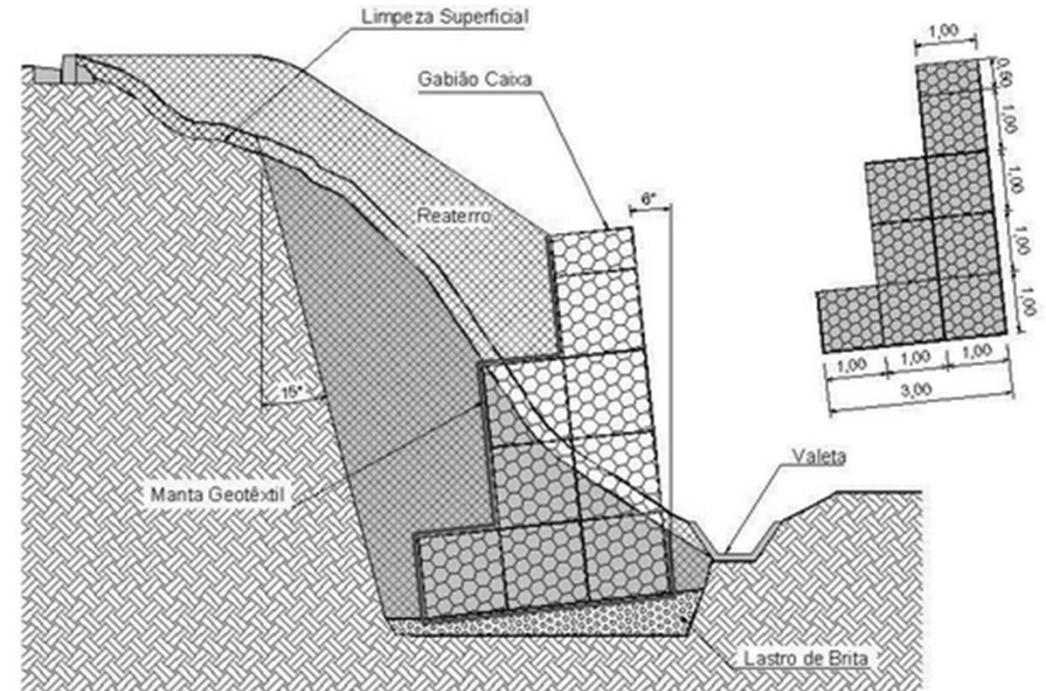
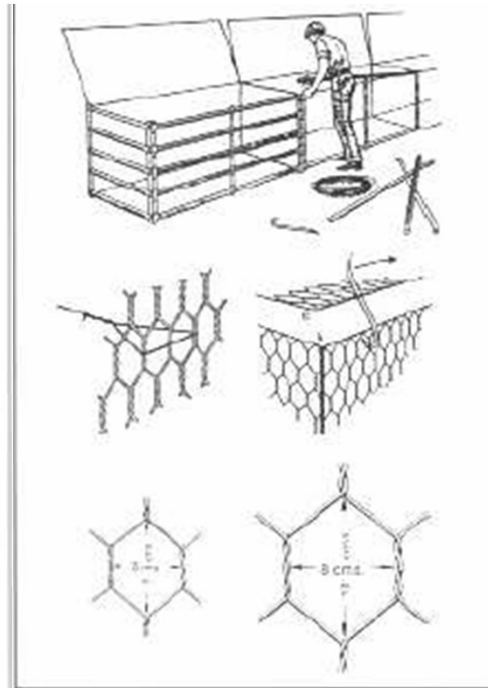
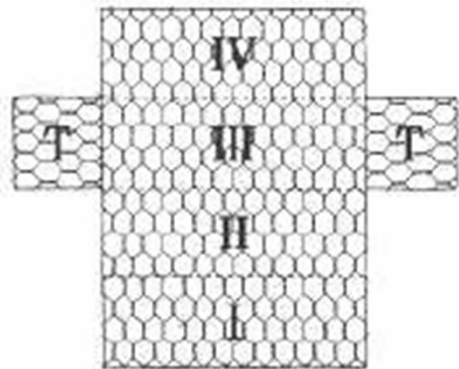


Tipos de contenção : Muro de arrimo de gabiões

- Formado por redes de aço zincado de malha hexagonal, preenchido por pedras;
- Aplicação:
 - Muros de contenção, proteção de margens de cursos d'água;
 - Controle de erosão e obras de emergência.
- Vantagens:
 - Rapidez de construção;
 - Elevada permeabilidade;
 - Grande flexibilidade - Aceitação de deslocamentos e deformações;
 - Possibilidade de incluir reforços de tela no solo de reaterro .
- Cuidados:
 - Regularização e nivelamento do terreno;
 - Boa arrumação das pedras e colocação de elementos de transição.



Tipos de contenção : Muro de gabiões



Tipos de contenção : Muro de gabiões



<http://www.pedrastranieri.com/images/200000036-9784d97bf-public/muro+de+gabi%C3%A3o+-+C%C3%B3pia.jpg>



<http://www.pedrastranieri.com/images/200000036-9784d97bf-public/muro+de+gabi%C3%A3o+-+C%C3%B3pia.jpg>

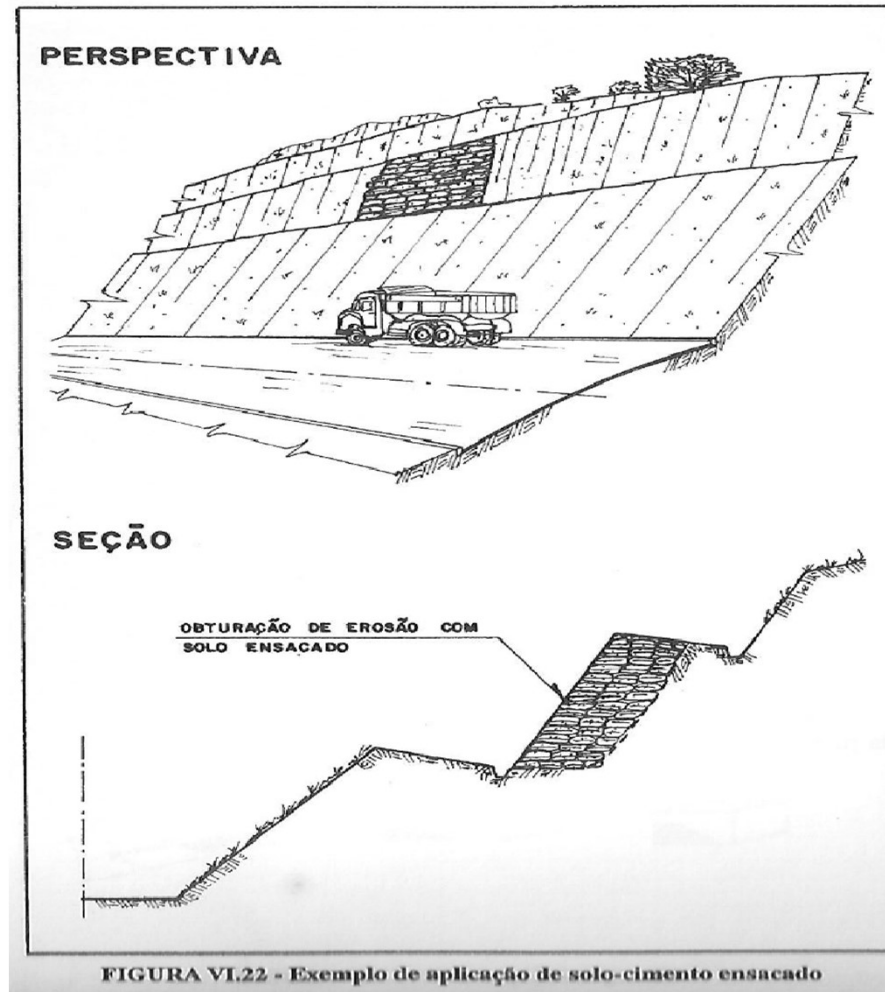
Tipos de contenção : Muro de gabiões



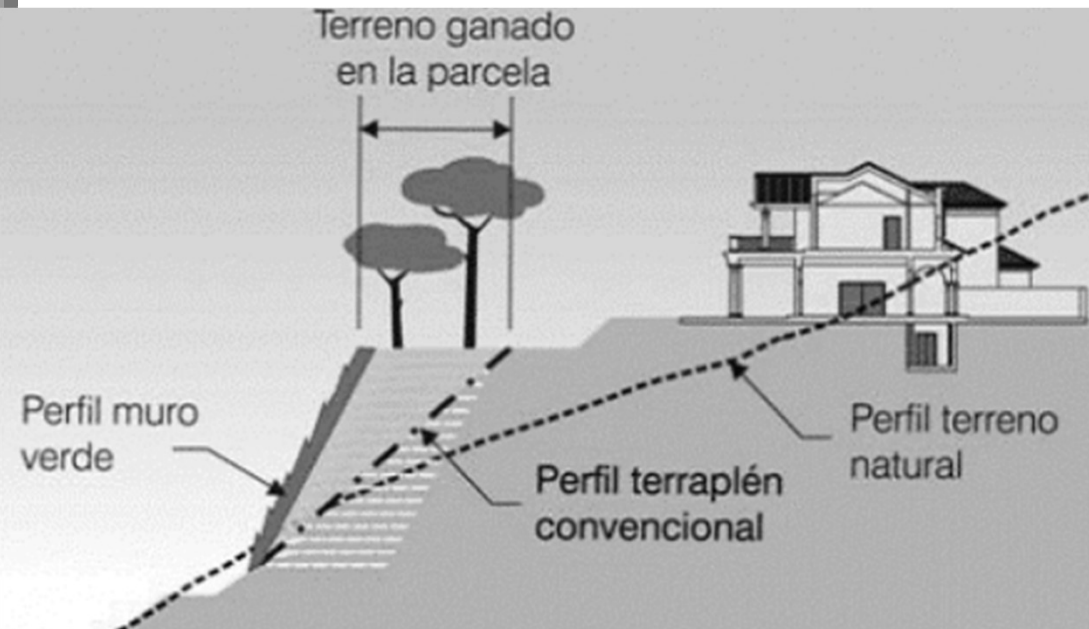
<https://www.diprotecgeo.com.br/produtos/gabiao/>

Tipos de contenção : Muro de concreto ou solo-cimento ensacado (Bolsacreto)

- Composto de fôrmas têxteis flexíveis, preenchidos por bombeamento de concreto ;
- Pode ser empregado dentro ou fora d'água;
- As fôrmas preenchidas transformam-se em grandes blocos.
- Aplicação: Contenção de taludes, proteção de margens e controle de erosão;
- Vantagens: Rapidez de execução e versatilidade;
- Cuidados: Uso de equipamento adequado para o preenchimento das fôrmas.



Tipos de contenção : “Bolsacreto”

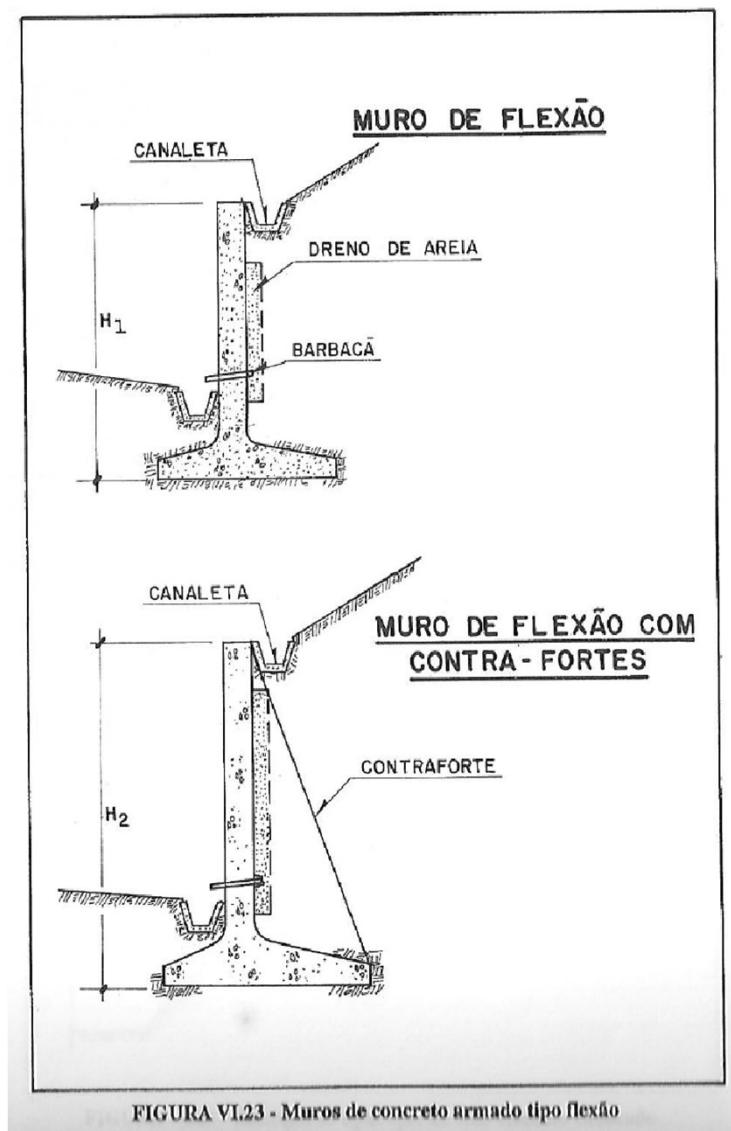


<http://www.radiomundial.com.ve/article/ministerio-de-transporte-terrestre-rehabilita-250-metros-lineales-de-la-autopista-gma-fotos>

<http://www.arkesar.com.ve/geotextiles-bolsacretos-mallas-para-gaviones-muro-bloc-en-caracas-envios-a-todo-43249>

Tipos de contenção : Muro de concreto em L (a flexão)

- Construído em concreto armado, tornando possível a execução de seções esbeltas
- Aplicações: Em geral, os muros de concreto armado estão associados à execução de aterros ou reaterros;
- Vantagens: Permite uma ocupação mais completa das áreas a montante e a jusante;
- Cuidados: O terreno de fundação deve ter boa capacidade suporte e é indispensável a execução de sistema de drenagem interno.



Tipos de contenção : Muro em “L”

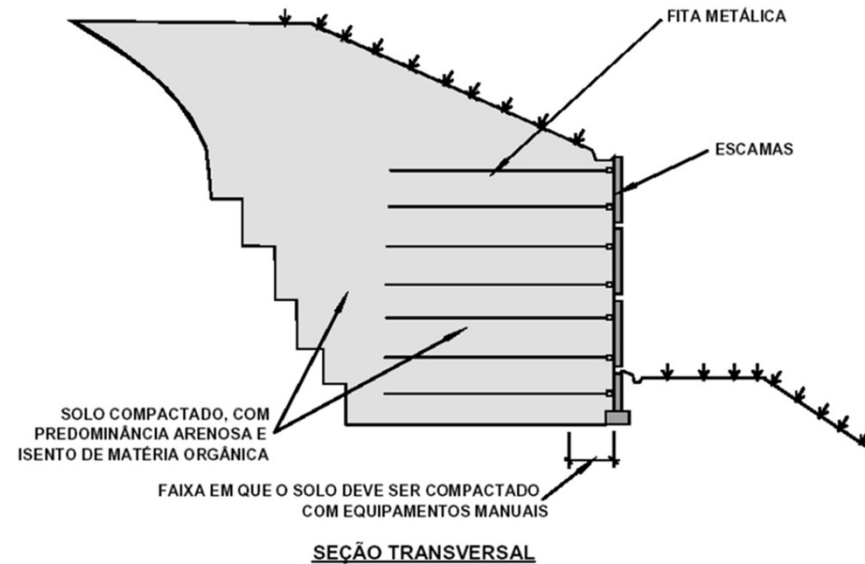
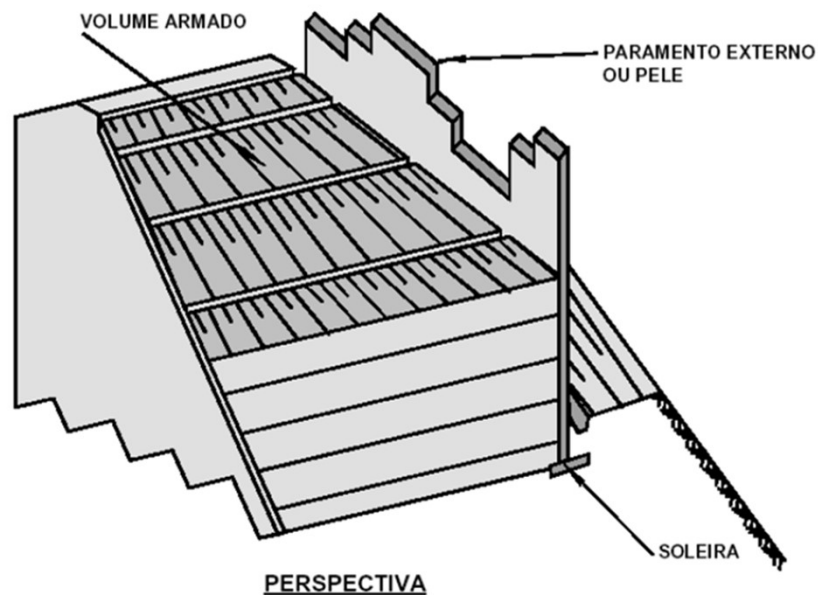


<https://www.guiadaengenharia.com/muros-arrimo-tipos/>



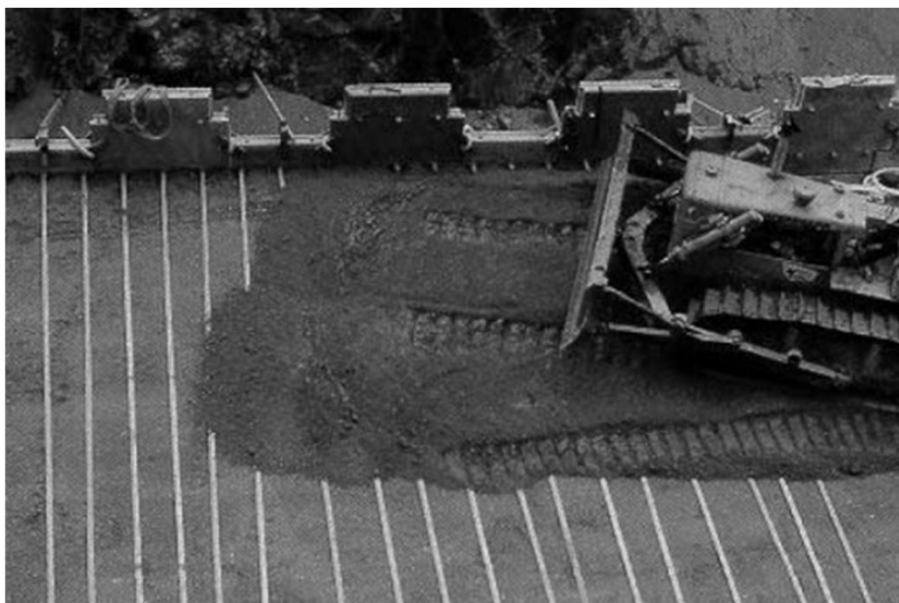
<http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/muros.pdf>

Tipos de contenção : Muro de solo reforçado Paramento de concreto + tiras metálicas (“Terra Armada”)



https://www.recife.pe.gov.br/pr/servicospublicos/emlurb/cadernoencargos/geotecnia_reforcados.pdf

Tipos de contenção : Muro de solo reforçado
Paramento de concreto + tiras metálicas (“Terra Armada”)

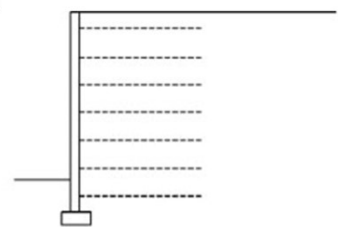


<http://www.terraarmada.com.br>

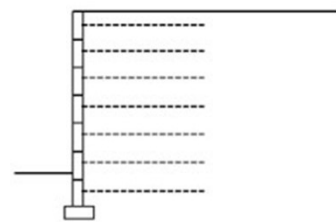


Tipos de contenção : Muro de solo reforçado

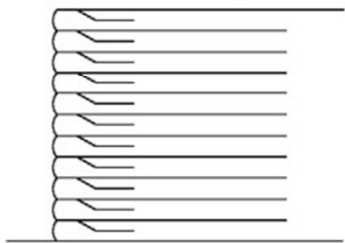
Solo reforçado com geossintético



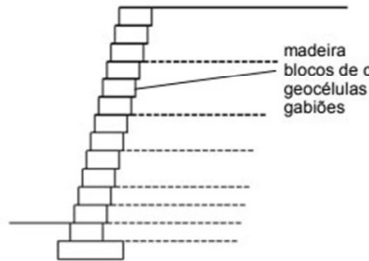
Face em painel único apoiado



Face em painel incremental



Face envelopada

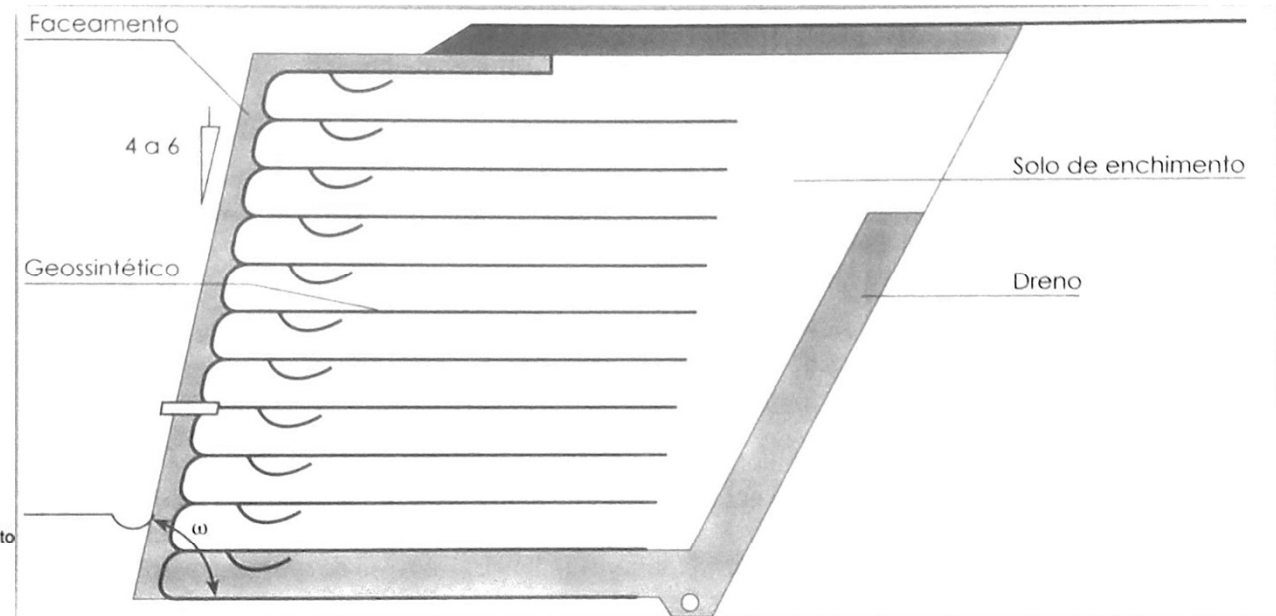


Muro modular

madeira
blocos de concreto
geocélulas
gabiões

Exemplos de muros de solo reforçado.

<https://embugeomembrana.com.br/geossinteticos-em-muros-de-contencao/>



Manual Brasileiro de Geossintéticos (Vertematti, 2015)

Tipos de contenção : Muro de solo reforçado
Solo reforçado com geossintético

Solo envelopado



Muro modular



Tipos de contenção

Perfil metálico + Pranchão + Escoramentos

Cortinas atirantadas



<http://www.solotrat.com.br/cortinas-atirantadas>



<https://jornalzonasul.com.br/ha-46-anos-metro-iniciava-operacao-entre-vila-mariana-e-jabaquara/>

Tipos de contenção

Estaca secantes + Tirantes



https://www.bauer-angola.com/en/construction_methods/secant_pile_walls/

Blindagem de vala



<http://www.carldora.com/pt/portfolio/angola/entivacao-de-valas>

Tipos de contenção

Estaca prancha metálica + rebaixamento do NA (...)



https://www.aecweb.com.br/tematico/img_figuras/obras-de-saneamento-baixada-santista-principal.jpg

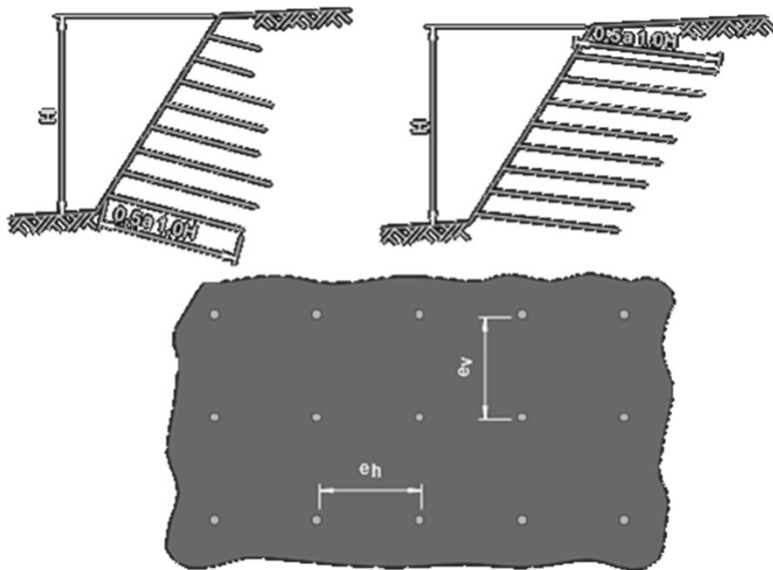
Estaca prancha metálica + Escoramento



<https://blog.apl.eng.br/wp-content/uploads/2018/11/253403-cortina-de-contencao-tudo-sobre-estruturas-de-contencao-em-cortina-de-estacas.jpg>

Tipos de contenção

Solo grampeado



ESQUEMAS TÍPICOS DE TALUDES ESTABILIZADOS COM SOLO GRAMPEADO

Solo grampeado (Brasilianas/USP)

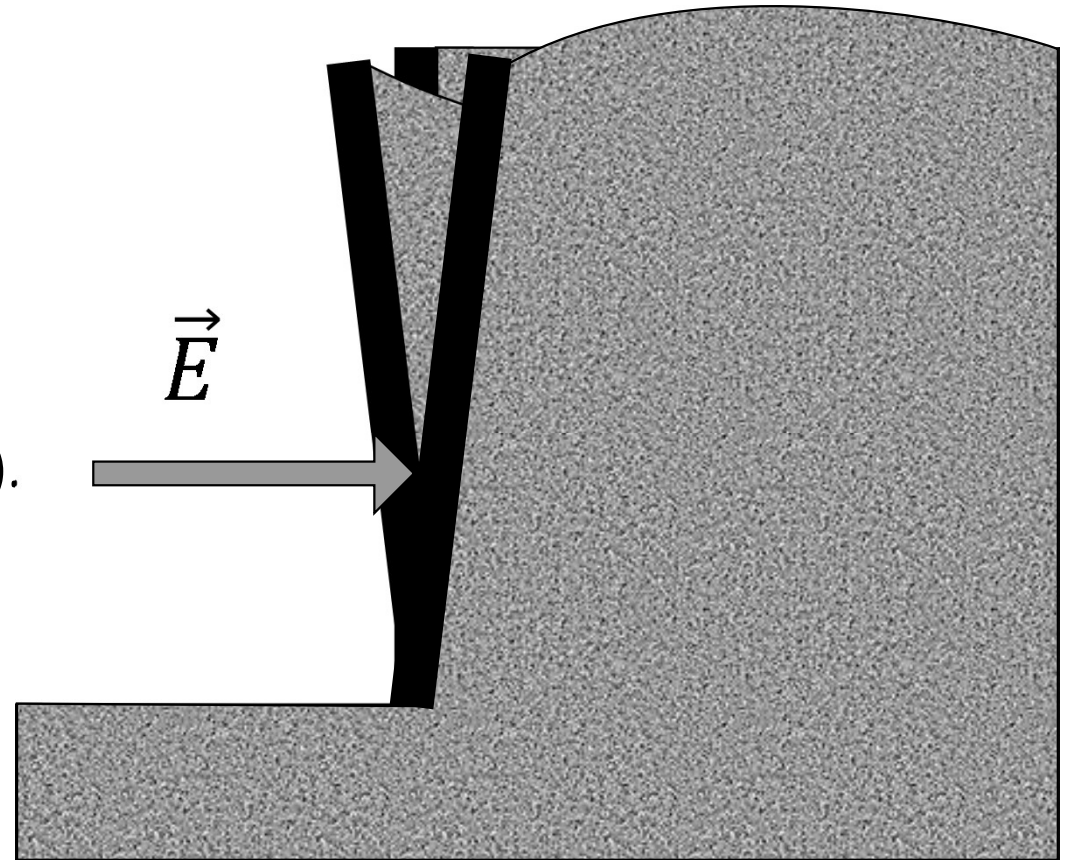


Solicitações em contenções

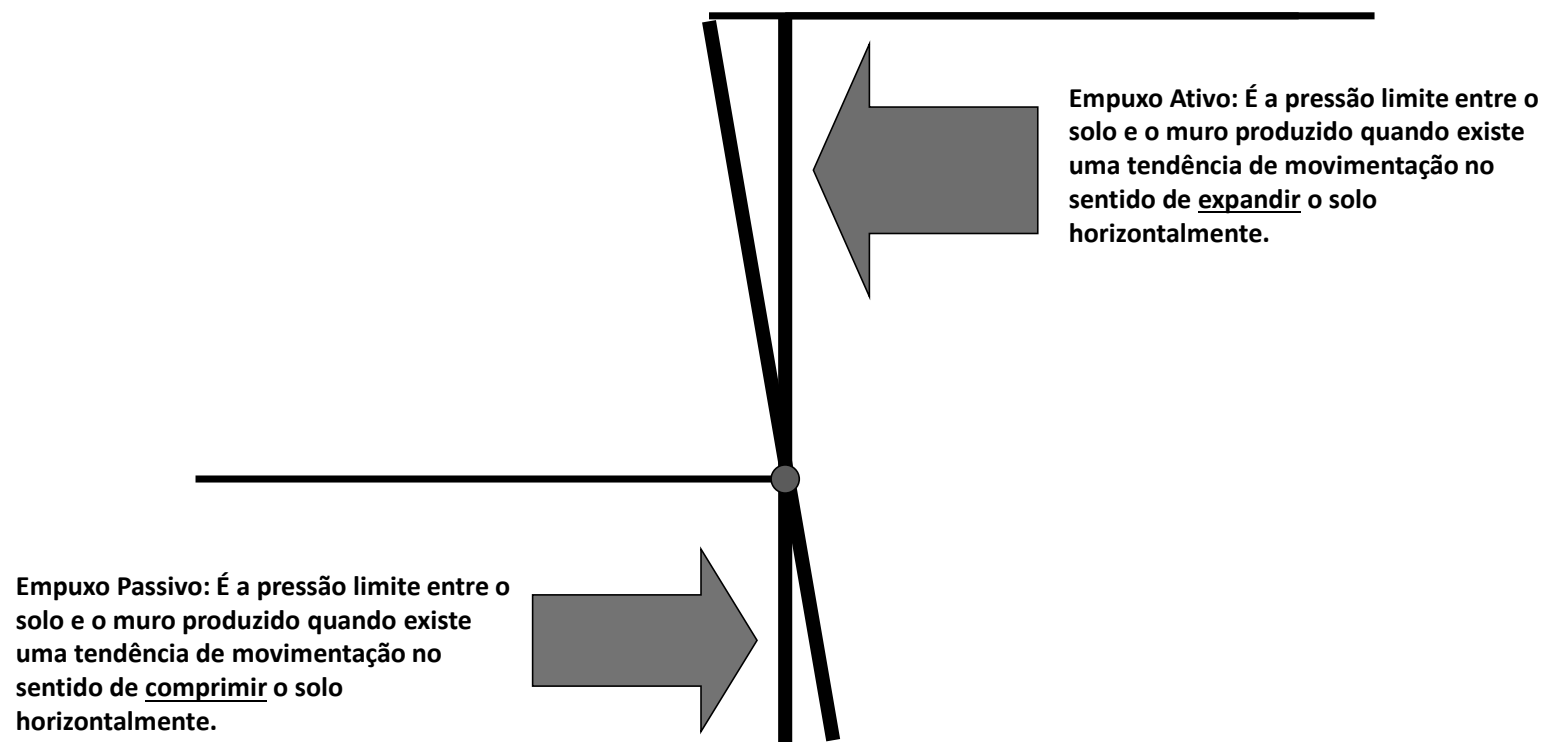
- Empuxo (solo + sobrecarga + água)
 - Deformações/Deslocamentos na contenção
- Estabilidade global
- Estabilidade de fundo
 - Ruptura geotécnica do fundo devido ao carregamento do solo externo à escavação
- Ruptura hidráulica
 - Formação de areia movediça pelo influxo de água
- Levantamento de fundo (Blow)

Empuxo de Terra

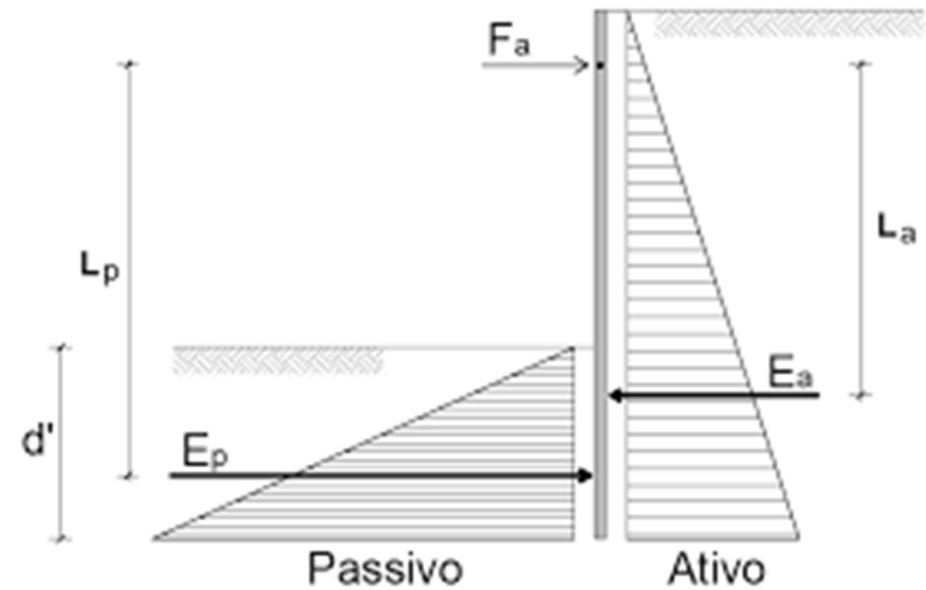
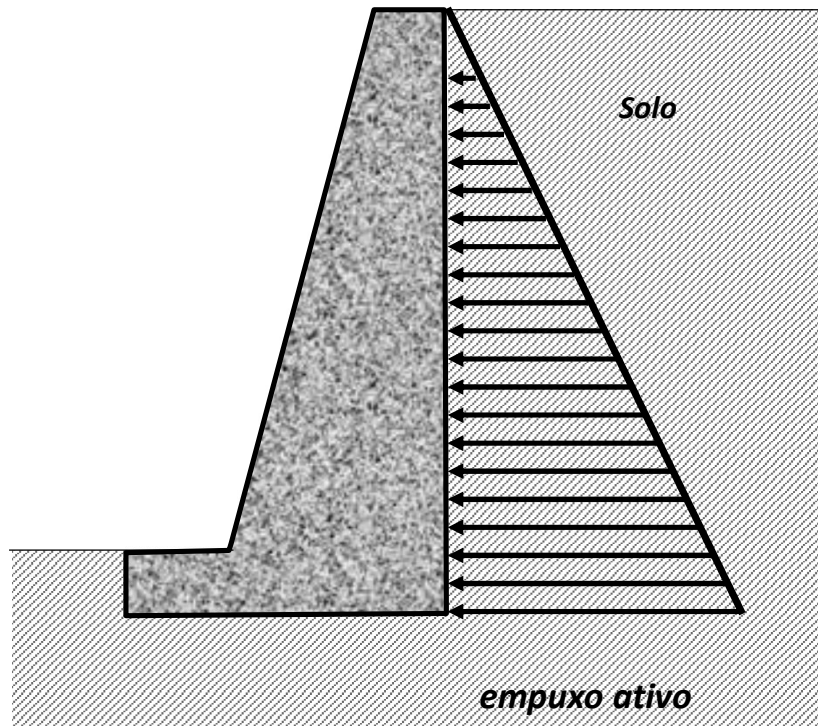
- Empuxo no Repouso (Nenhuma deformação no muro e nenhuma mudança nas tensões horizontais).
- Empuxo Ativo (Deformação do muro e decréscimo da tensão horizontal).
- Empuxo Passivo (Deformação do muro e aumento da tensão horizontal).



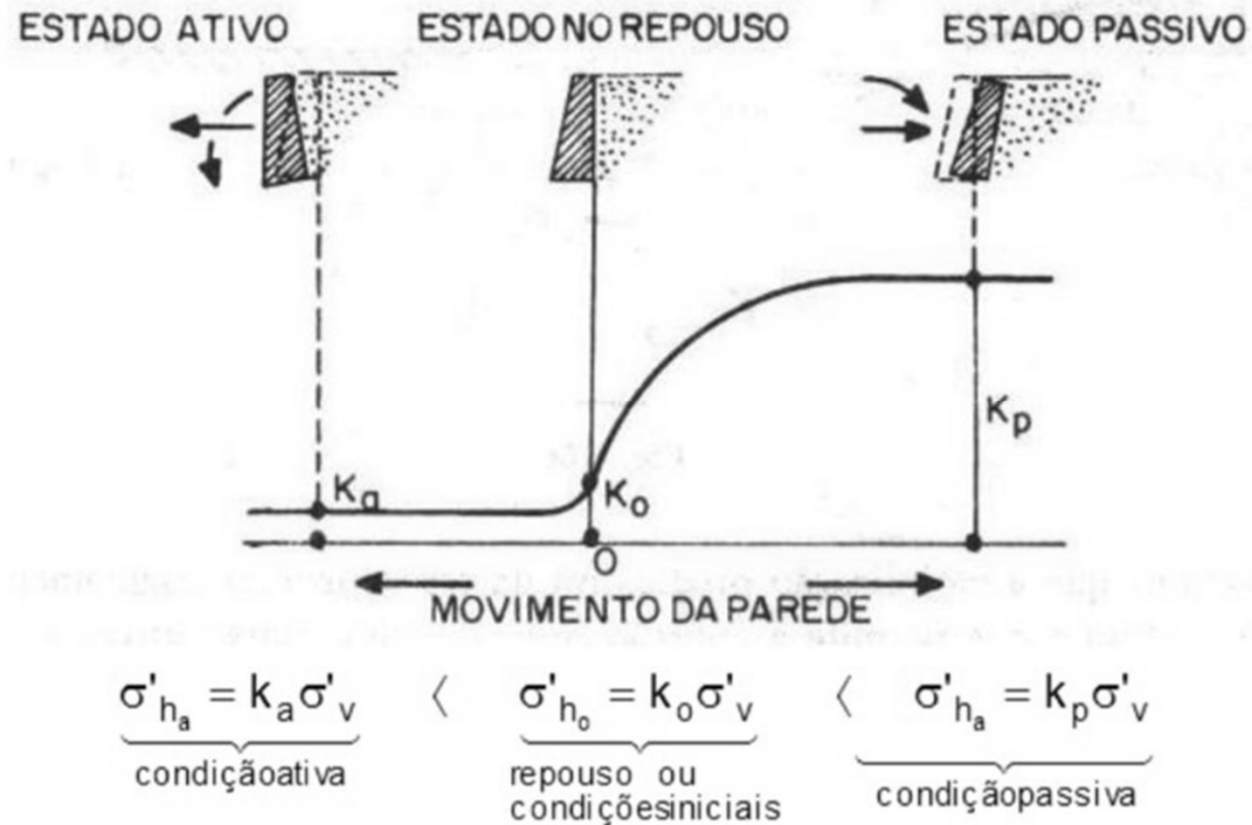
Empuxo de Terra



Empuxo de Terra ($c'=0$)

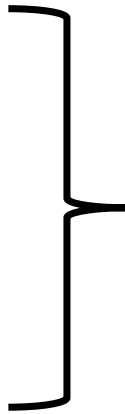


Empuxo de Terra



Teorias de Empuxo de Terra

- Teoria de Empuxo de Rankine
- Teoria de Empuxo de Coulomb
- Método de Culmann – Gráfico
- Método de Poncelet – Gráfico
- Teoria de Caquot-Kérisel – Superfície curva
- Análise Limite
- Métodos Numéricos



Utilizam o critério de ruptura de Mohr-Coulomb

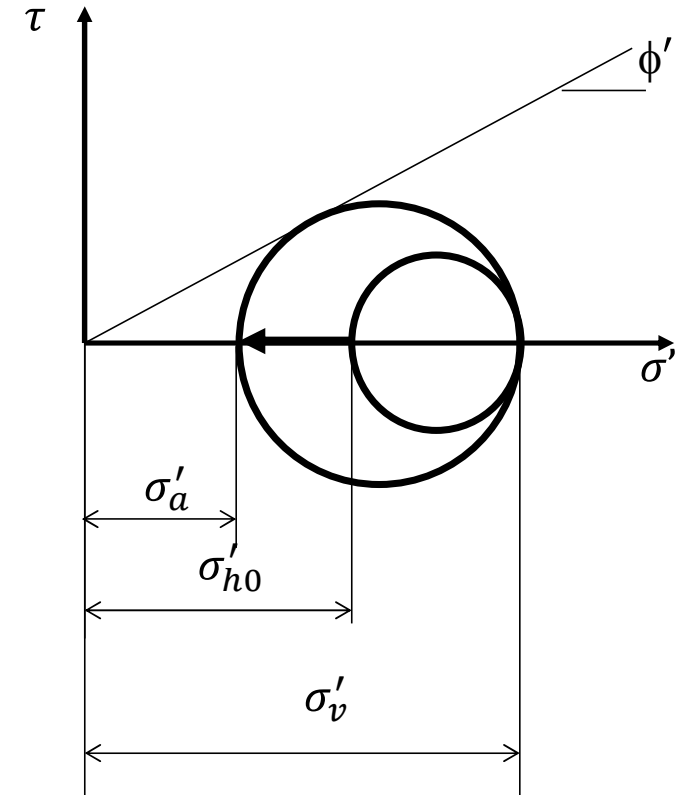
Teoria de Empuxo de Rankine (1857)

- Rankine (original) assume:
 - Muro sem atrito
 - Solo não coesivo
 - Paramento do muro é vertical
 - O aterro é horizontal
 - O muro é flexível

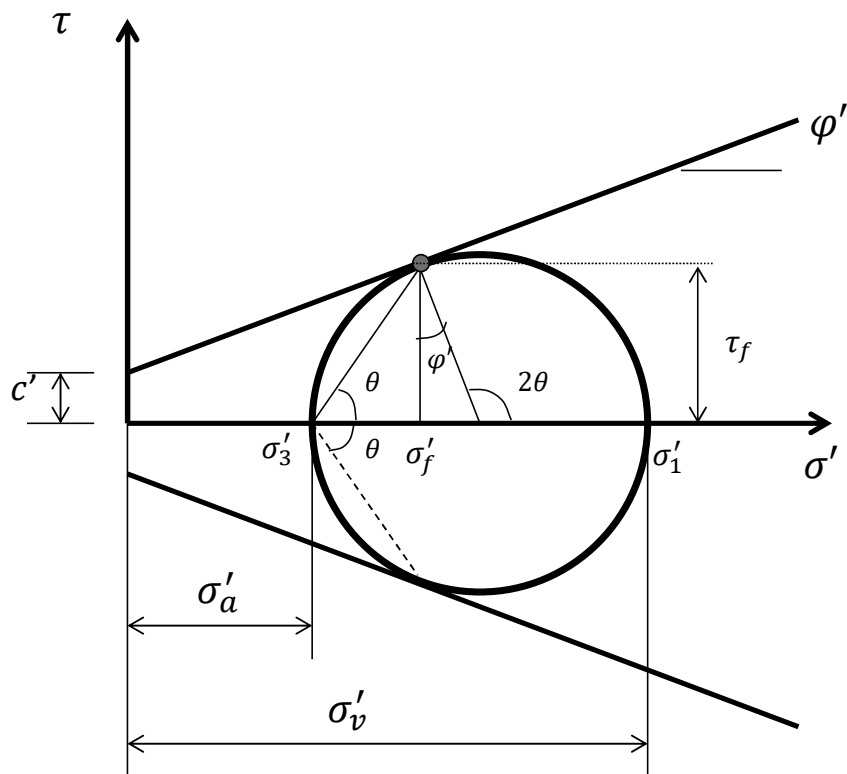
Rankine - Empuxo Ativo

$$K_a = \frac{1 - \text{sen } \varphi'}{1 + \text{sen } \varphi'} = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi'}{2} \right)$$

K_a – Coeficiente de empuxo ativo
O K_a é calculado sempre em tensões efetivas



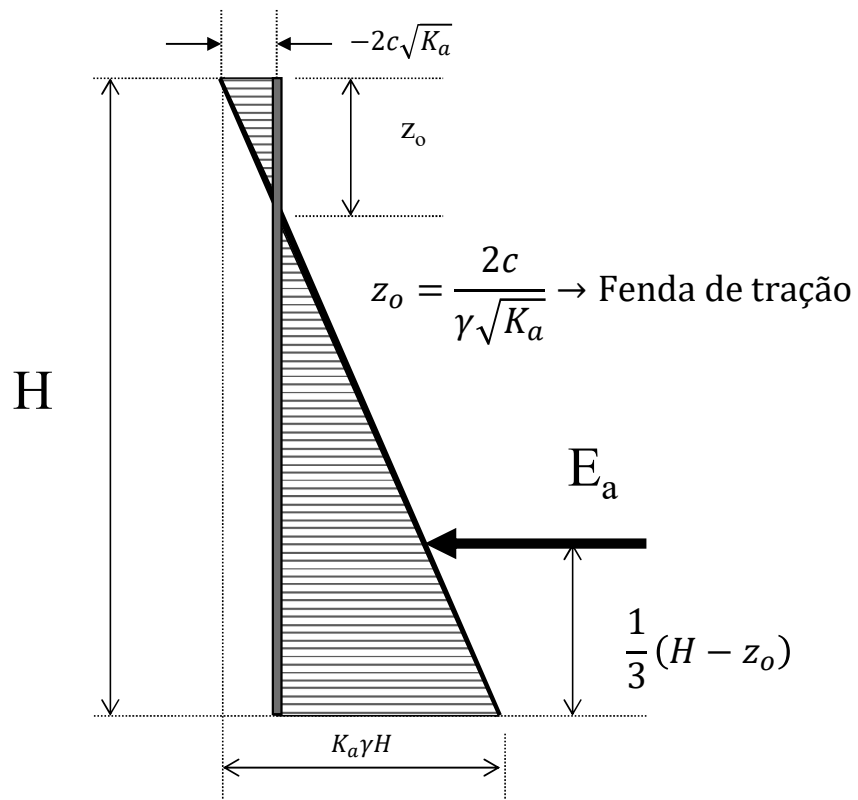
Rankine - Empuxo Ativo



$$\sigma'_a = K_a \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_a}$$

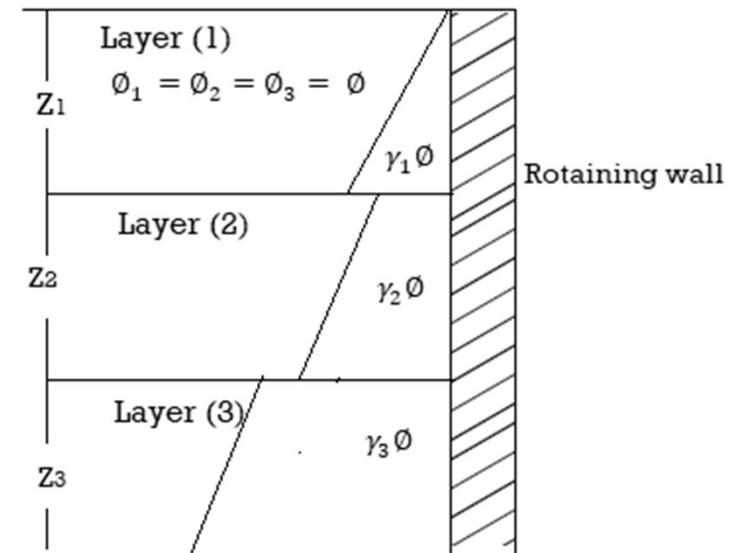
K_a – Coeficiente de empuxo ativo

Rankine - Distribuição do Empuxo Ativo

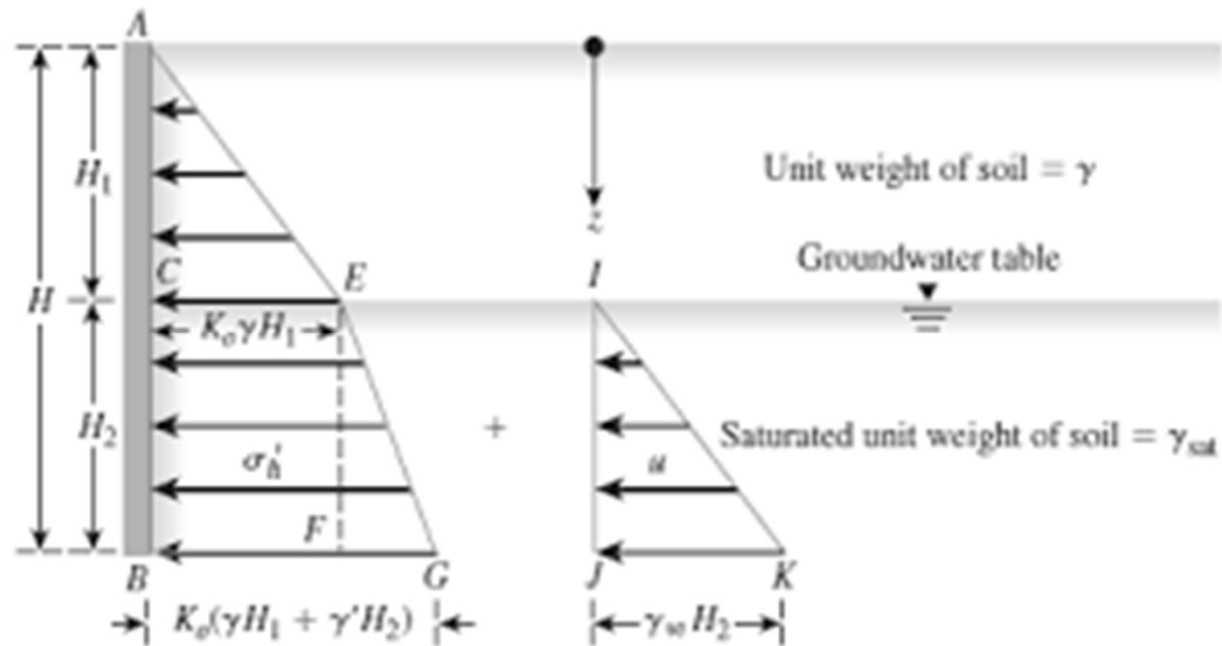


Rankine - Distribuição do Empuxo Ativo Maciços estratificados

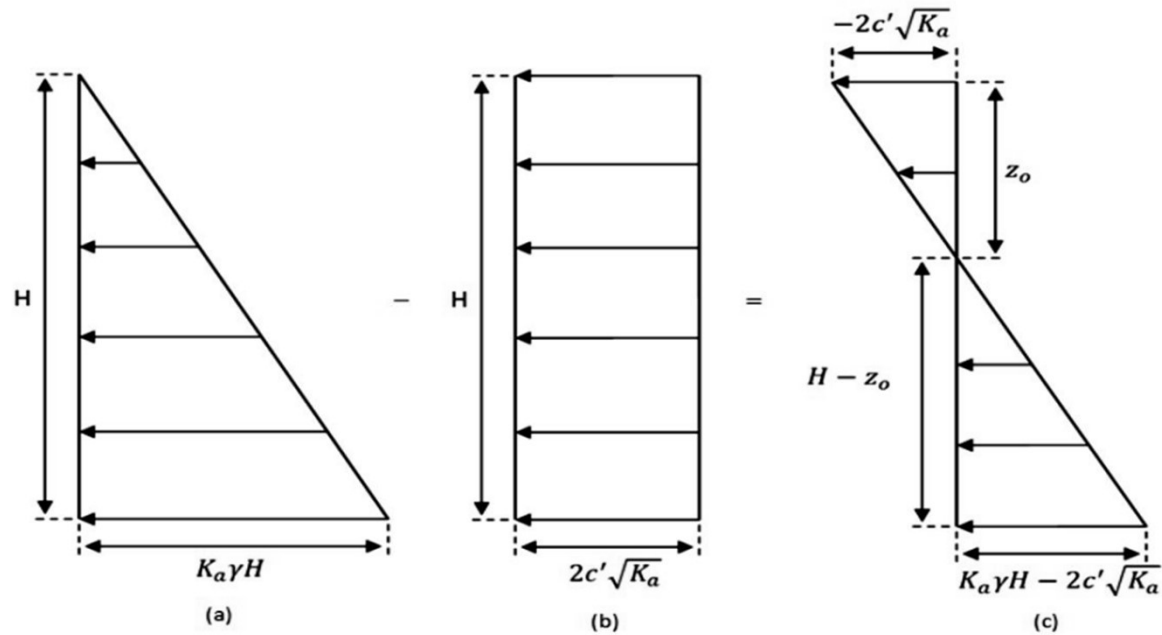
- Multiplas camadas de solos, com propriedades geotécnicas diferentes:
 - Considerar a tensão vertical efetiva até a profundidade analisada;
 - Usar os parâmetros de resistência da camada e coeficientes de empuxo



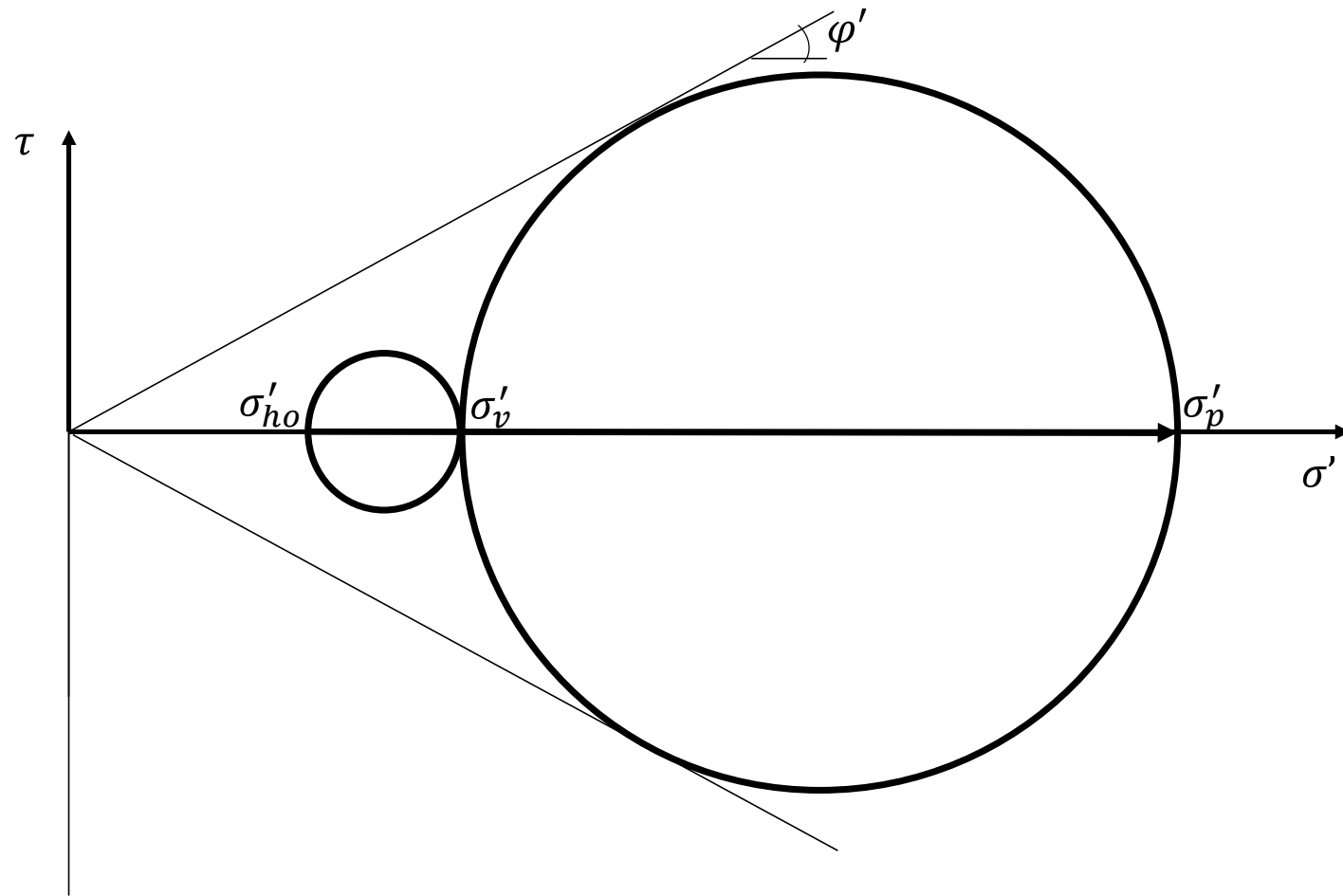
Efeito da água no empuxo



Efeito da água na fenda de tração



Rankine – Empuxo Passivo



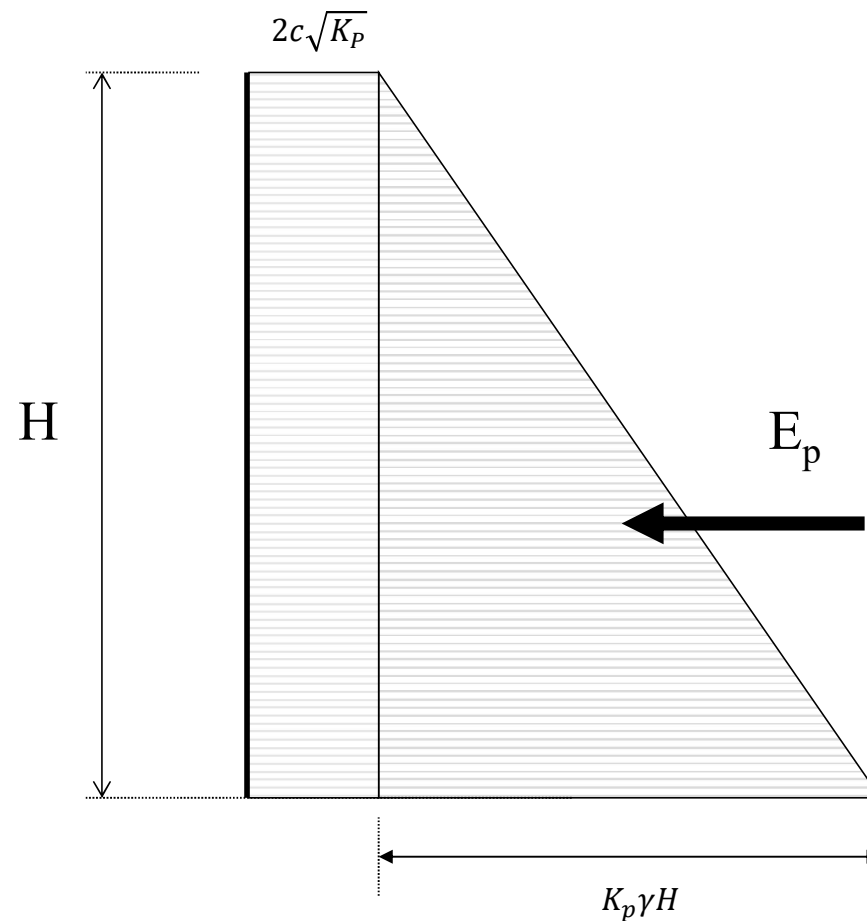
Rankine - Distribuição do Empuxo Passivo

$$\sigma'_p = K_p \gamma z + 2c\sqrt{K_p}$$

K_p - Coeficiente de empuxo passivo

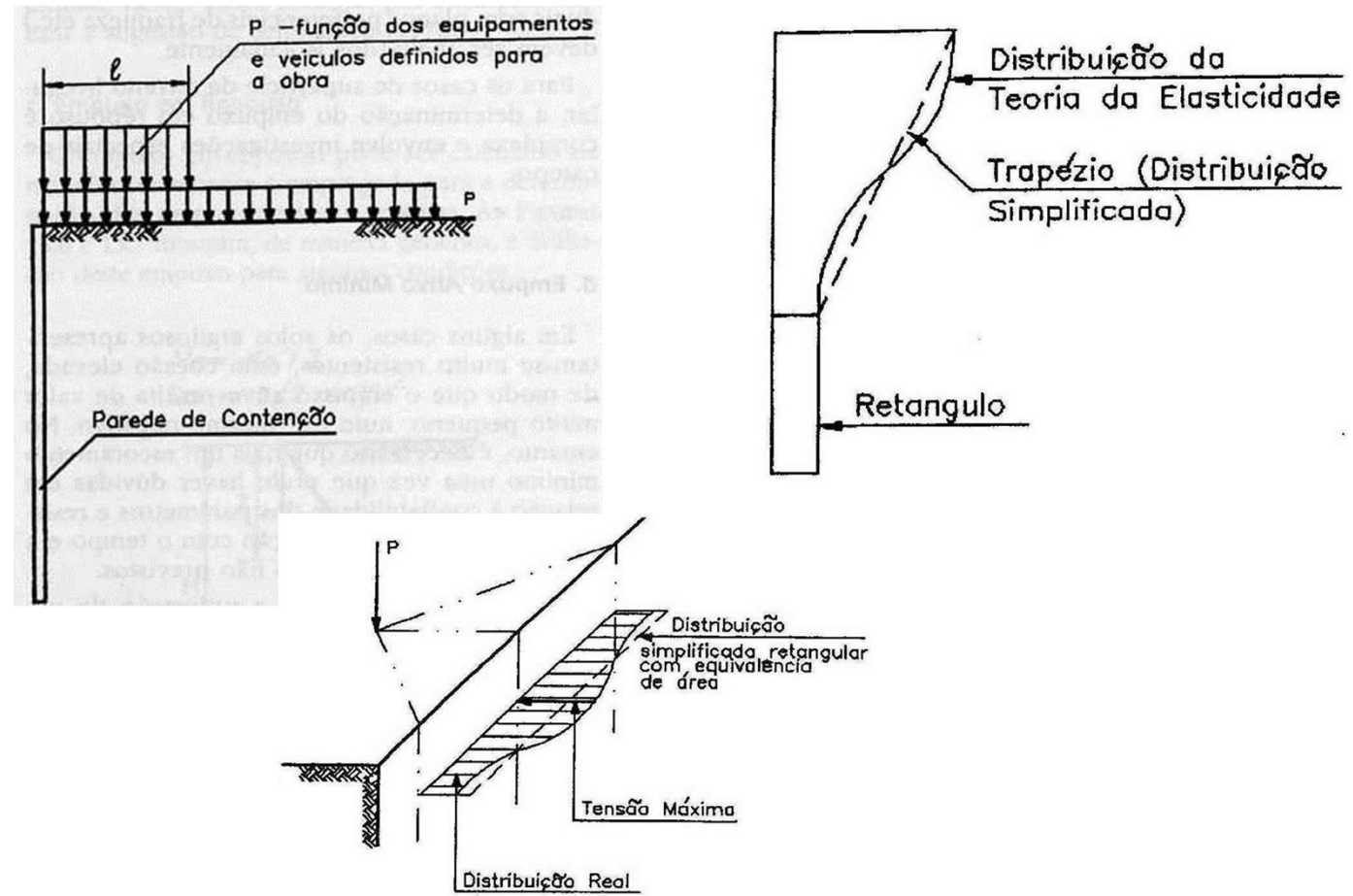
$$K_p = \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi}{1 - \operatorname{sen} \varphi} = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi'}{2} \right) = \frac{1}{K_a}$$

$$E_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2cH\sqrt{K_p}$$



Empuxo de Sobrecargas pontuais ou limitadas

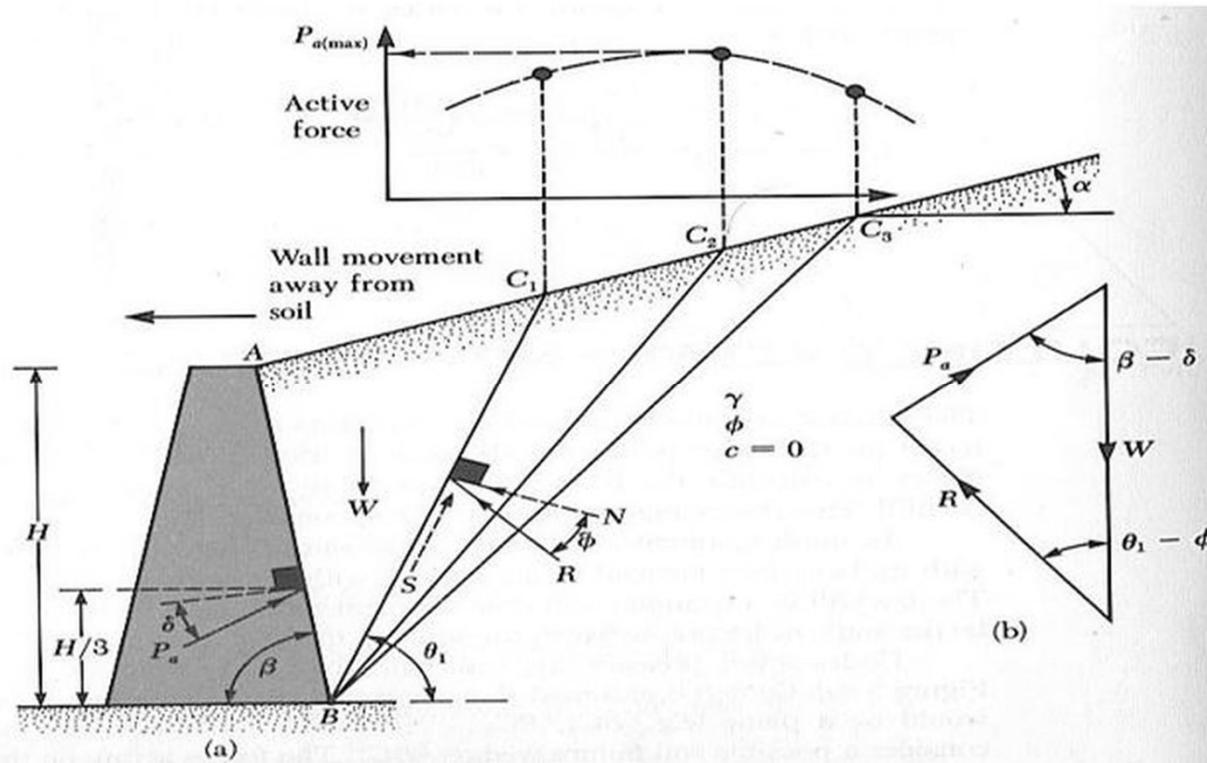
- Exemplos – Fundações de edifícios, equipamentos e máquinas, carregamento de pessoas e veículos, solo retirado da escavação
- Opção de modelo: Teoria da elasticidade



Teoria de Empuxo de Coulomb (1776)

- Coulomb pode assumir atrito entre o muro e o solo, $\delta' \approx \frac{2}{3} \varphi'$
- Pode assumir inclinação do muro e do solo a montante
- Não é possível obter o diagrama de empuxo diretamente
- Calcula empuxos ativos e passivos
- Problemas com o passivo – Ruptura Plana

Teoria de Empuxo de Coulomb (1776) – Ativo ($c'=0$)



Empuxo – Superfícies curvas

- A superfície de deslizamento curva (espiral logaritma) e sua forma depende da também rugosidade do muro.
- Há soluções de Caquot-Kérisel Tabeladas para K_a e K_p

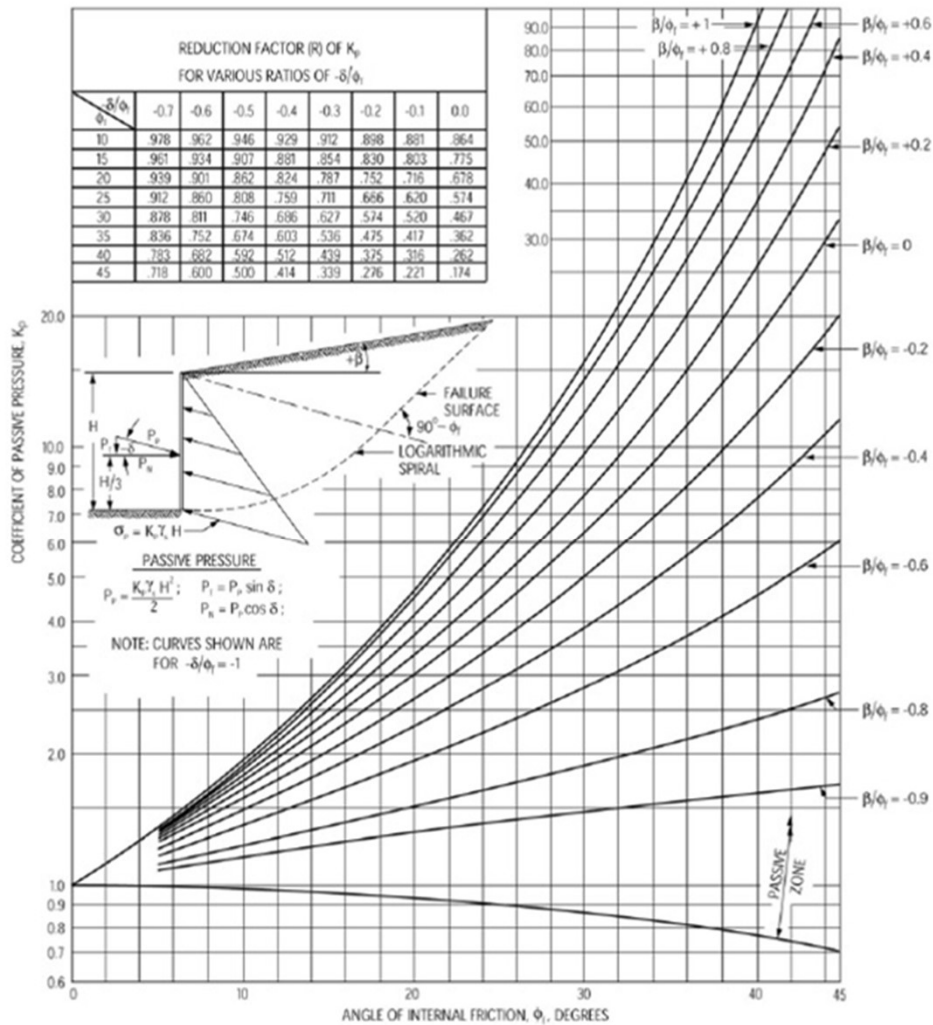


Figure 4-37. Passive earth pressure coefficient (Caquot and Kerisel, 1948)

Distribuição das tensões em função do movimento do anteparo

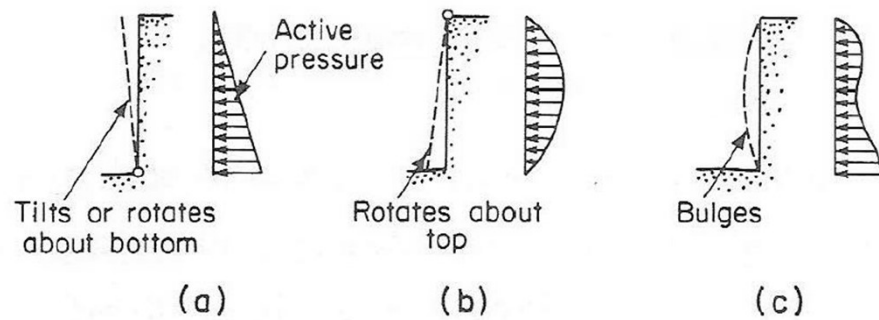


Fig. 4-3 Distribution of earth pressure.

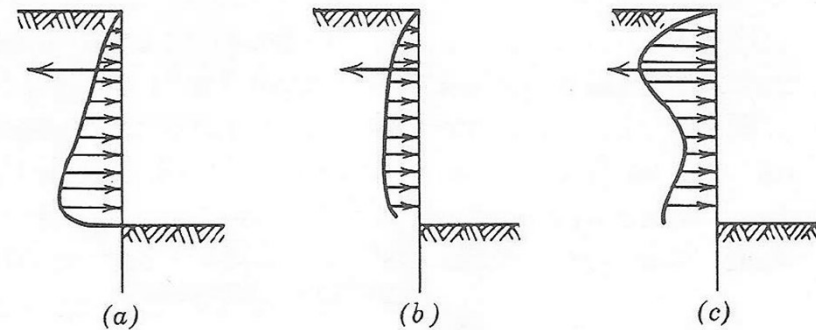
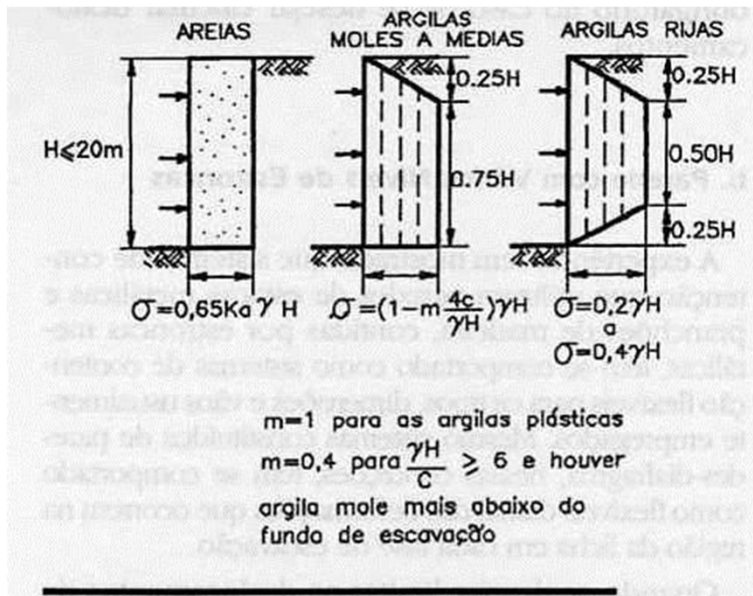
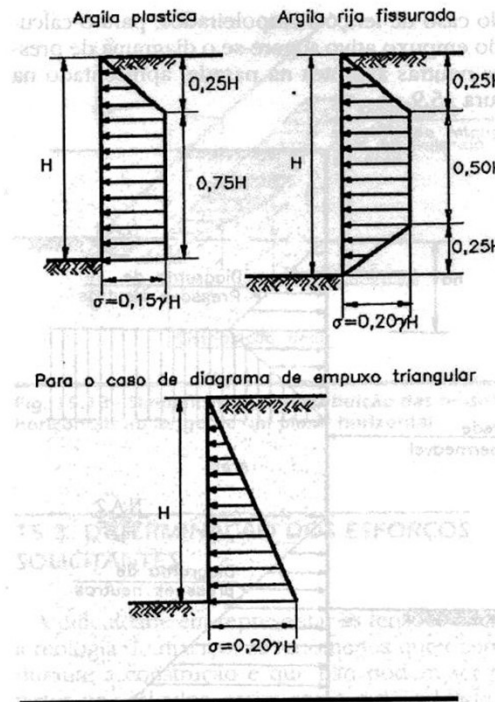


Fig. 13.31 Relation between construction procedure and stress distribution against anchored bulkhead. (a) Backfilling. (b) Dredging with normal yield of anchor. (c) Dredging with unyielding anchor.

Envoltórias de empuxo (contenções escoradas)



Envoltórias Aparentes propostas por Terzaghi-Peck



Envoltórias de Empuxos Mínimos

Verificações de estabilidade de contenções

Deslizamento
(Equilíbrio de
forças)

Tombamento
(Equilíbrio de
momentos)

Capacidade de
suporte do solo da
fundação

Estabilidade
geral

Estabilidade
interna

Fatores de segurança

NBR 16920-1(2020):

- Fator de segurança global:

$$R = S \times FS_g$$

- Fator de segurança parcial:

$$\frac{R}{\gamma_m} = S \times \gamma_f$$

Tabela 2 – Fatores de segurança mínimos para métodos de fator de segurança global

Estabilidade	Mecanismo	Subseção	Fator de segurança global mínimo
Externa	Tensão admissível da fundação ^a	10.4.1	2,0 no bordo mais carregado
	Deslizamento	10.4.2	1,5
	Tombamento	10.4.3	2,0
Interna	Ruptura estrutural do reforço	10.5	1,5
	Arrancamento do reforço	10.5	1,5
Geral	–	10.6	ver Anexo C
Conexão com o paramento	–	10.7	1,5

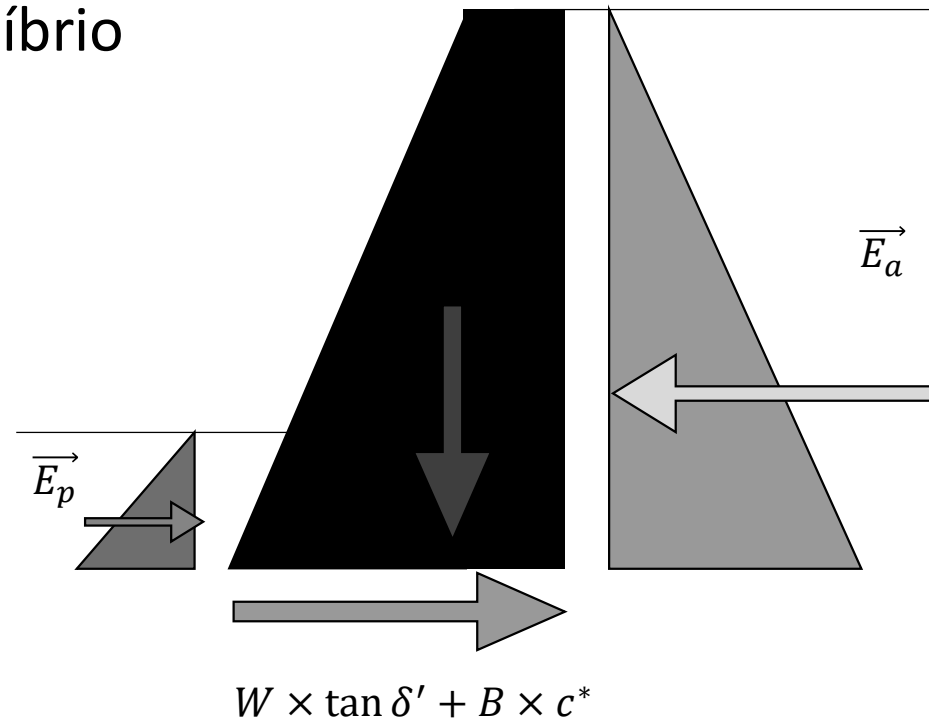
^a No caso de tratamento de fundação, cabe ao projetista apresentar a justificativa de fator de segurança adotado.

Obras provisórias podem ter FS menor, desde que justificado e FS mínimo de 1,2

Verificações de estabilidade de contenções

- Fator de segurança contra o deslizamento da base: Equilíbrio de forças paralela a base

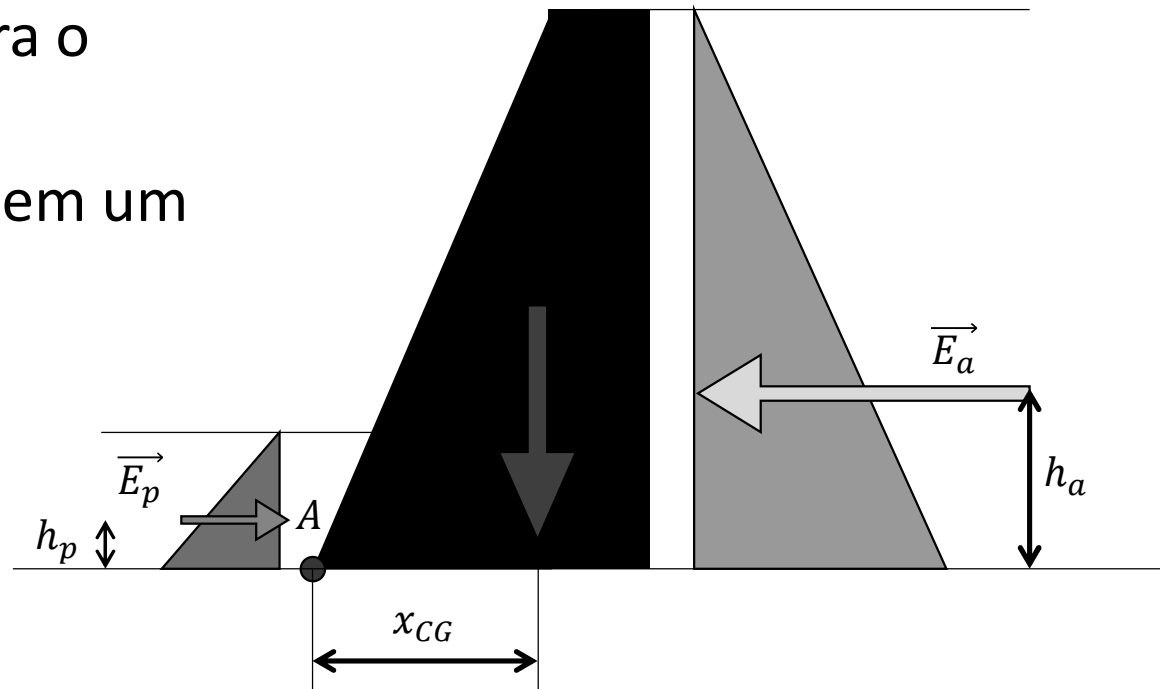
$$FS_{desl} = \frac{\sum F_{est}}{\sum F_{sol}}$$



Verificações de estabilidade de contenções

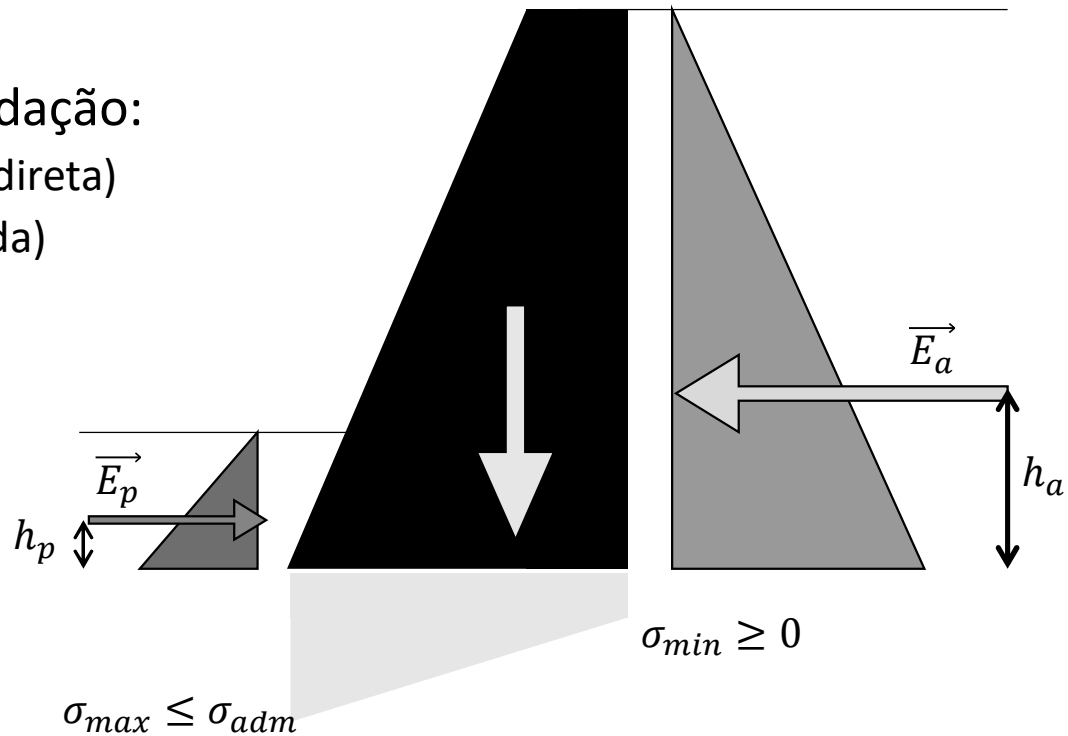
- Fator de segurança contra o deslizamento da base
- Equilíbrio de momentos em um ponto

$$FS_{tombl} = \frac{\sum M_{est}}{\sum M_{sol}}$$



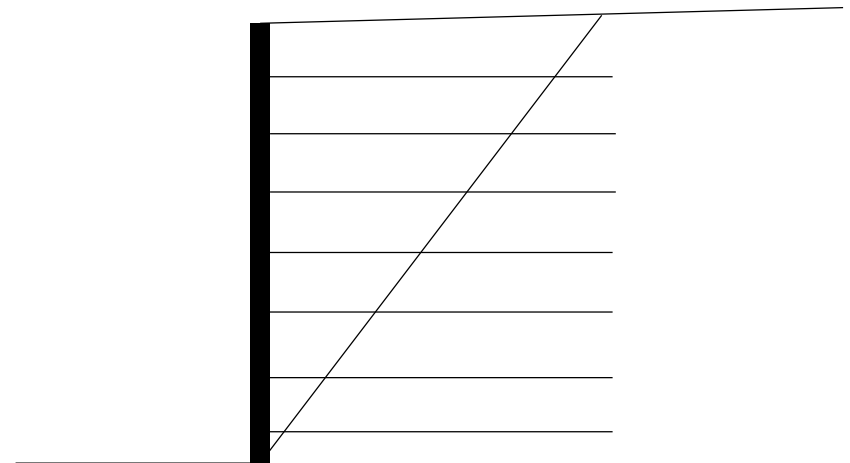
Verificações de estabilidade de contenções

- Capacidade de carga do solo de fundação
 - Dimensionamento de fundação:
 - Sapata corrida (Fundação direta)
 - Estacas (Fundação profunda)



Verificações de estabilidade de contenções

- Estabilidade interna
 - Estabilidade dos elementos internos do sistema de contenção
 - Depende do tipo de contenção
 - Exemplos:
 - Ruptura no reforço
 - Ruptura entre o reforço e a ligação com o paramento
 - Arrancamento do reforço (reforço curto)
 - Escorregamento interno (entre os blocos do paramento)



Estabilidade geral – nível de segurança (NBR11682;NBR16920)

Nível	Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas Critérios
Alto	<p><u>Áreas com intensa movimentação e/ou permanência de pessoas:</u> Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso. Vias públicas de centros urbanos. Edificações ocupadas (por exemplo, residências, escolas, estádios, prédios comerciais, indústrias e fábricas). Construções e/ou áreas com bens ou produto</p>
Médio	<p><u>Áreas com movimentação e permanência restrita de pessoas:</u> Fora da via principal de ferrovias e rodovias de tráfego intenso. Via principal de ferrovias e rodovias de tráfego moderado. Vias de serviço. Áreas de espera de serviços públicos em centros urbanos (por exemplo, plataformas de trem e metrô, pontos de ônibus). Instalações de edificações (por exemplo, estacionamentos, vias internas, áreas de lazer).</p>
Baixo	<p><u>Áreas com movimentação e permanência eventual de pessoas:</u> Vias de ferrovias e rodovias de tráfego reduzido. Vias rurais. Áreas públicas abertas em centros urbanos (por exemplo, praças, estacionamentos, parques). Obras rurais. Obras temporárias com circulação restrita de pessoas e com equipe de obra e/ou monitoramento em operação.</p>

Nível	Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais Critérios
Alto	<p><u>Danos materiais:</u> Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais por elevado período de tempo. <u>Danos ambientais:</u> Locais sujeitos a acidentes ambientais graves (por exemplo, oleodutos, aterros sanitários, barragens de rejeito).</p>
Médio	<p><u>Danos materiais:</u> Locais próximos a propriedades de valor moderado, vias e estradas principais de acesso e áreas que afetem serviços essenciais por curto período de tempo. <u>Danos ambientais:</u> Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados (por exemplo, vias com circulação de produtos perigosos e fábricas de produtos químicos tóxicos próximos a áreas de proteção ambiental).</p>
Baixo	<p><u>Danos materiais:</u> Locais próximos a propriedades de valor reduzido e vias e estradas secundárias de acesso. <u>Danos ambientais:</u> Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.</p>

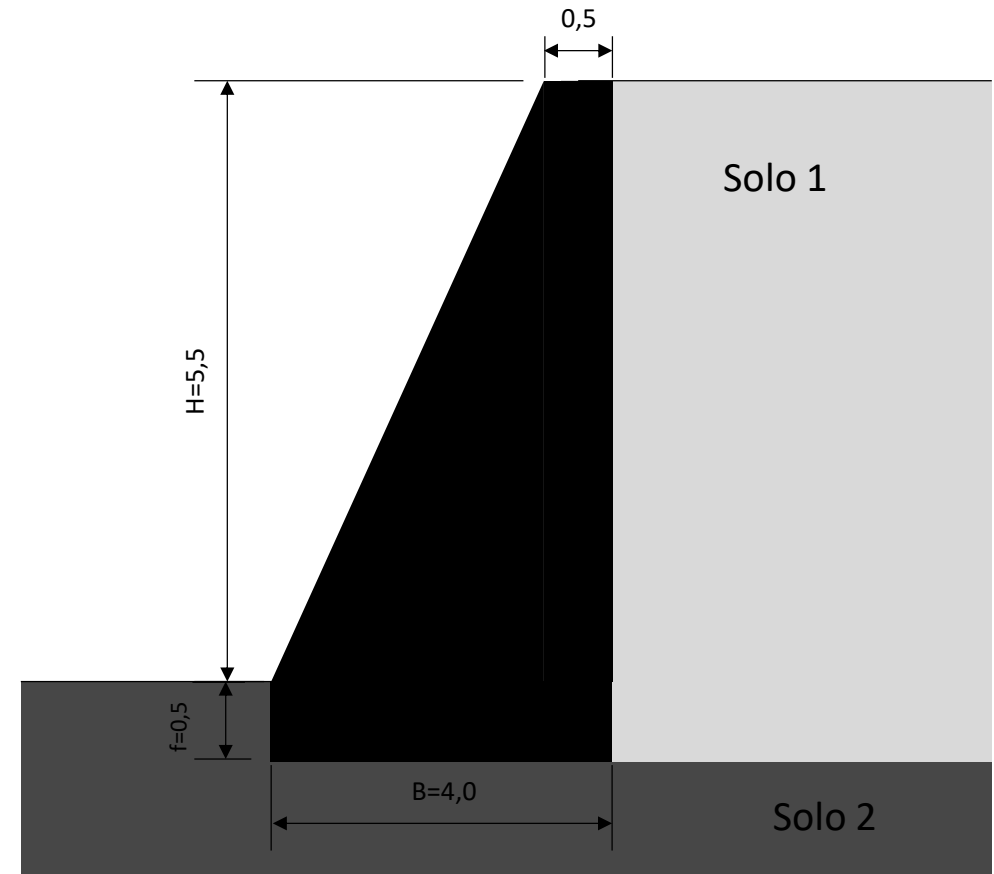
Estabilidade geral – nível de segurança (NBR11682;NBR16920)

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos às vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Exemplo

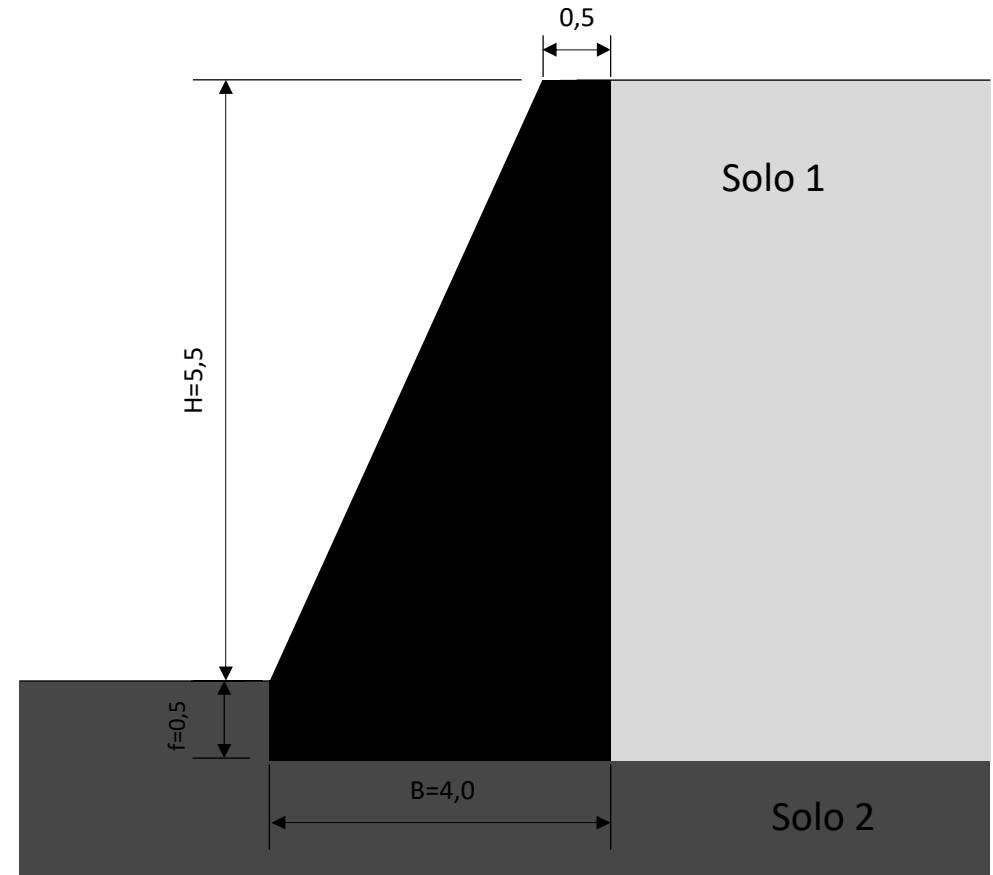
Exemplo – Muro de arrimo

- Um muro de arrimo de concreto ciclópico será executado conforme o desenho. Faça as verificações de segurança contra deslizamento da base, tombamento e da capacidade de carga da fundação.
- Dados:
 - Solo 1: $\gamma_1 = 18 \text{ kN/m}^3$, $\varphi'_1 = 30^\circ$, $c'_1 = 0 \text{ kPa}$;
 - Solo 2: $\gamma_2 = 18 \text{ kN/m}^3$, $\varphi'_2 = 25^\circ$, $c'_2 = 25 \text{ kPa}$;
 - Concreto: $\gamma_{conc} = 24 \text{ kN/m}^3$; considere parâmetros de atrito solo/concreto igual a 2/3 do parâmetro do solo
 - Tensão admissível do solo: $\sigma_{adm} = 300 \text{ kPa}$
 - Medidas em metros



Exemplo – Muro de arrimo

- Deslizamento da base
 - Peso do muro:
 - $W = \left(\frac{5,5 \times 3,5}{2} + 5,5 \times 0,5 + 0,5 \times 4,0 \right) \times 24 = 345 \text{ kN/m}$
 - Empuxo: ?
 - Ativo: Rankine (face vertical sem atrito)
 - $K_a = \frac{1 - \text{sen } \varphi'}{1 + \text{sen } \varphi'} = 1/3$
 - $E_a = \frac{18 \times 6^2}{2} \times K_a = 108 \text{ kN/m}$
 - Passivo: ? (pequena espessura, possibilidade de desconfinamento)
→ Desprezado



Exemplo – Muro de arrimo

- Deslizamento da base

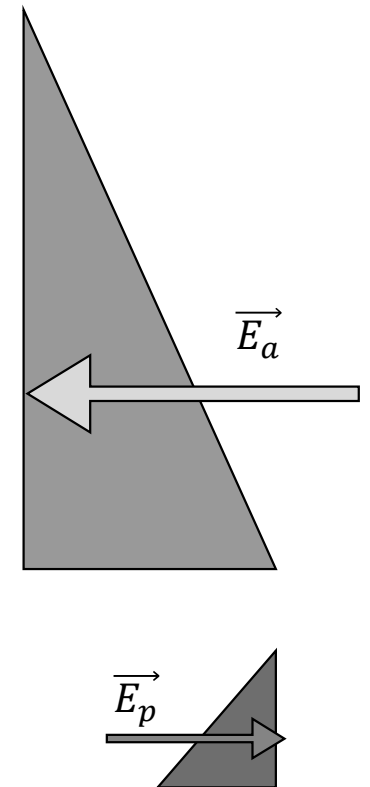
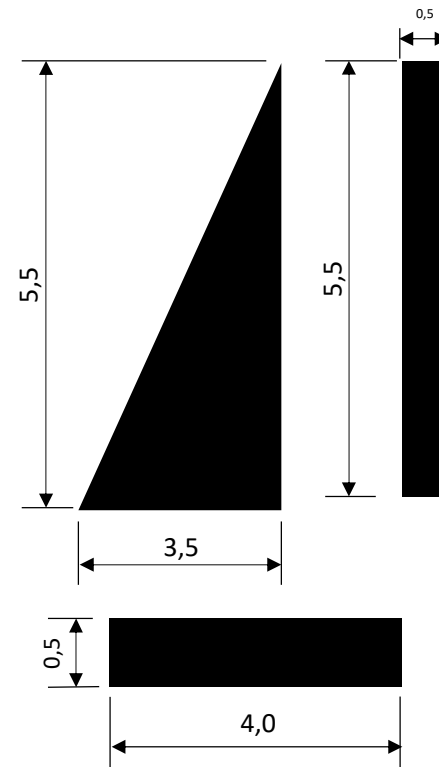
- Atrito na base:

- $F_{at} = \sigma \tan \left(\phi'_2 \times \frac{2}{3} \right) + B \times c'_2 \times \frac{2}{3} = 170 \text{ kN/m}$

- Fator de segurança

- $$FS_{desl} = \frac{\sum F_{est}}{\sum F_{sol}} = \frac{F_{at}}{E_a} = 1,57$$

- Questionamento: coesão da base é confiável?



Exemplo – Muro de arrimo

- Tombamento – Momentos em A

- Resistente - Muro

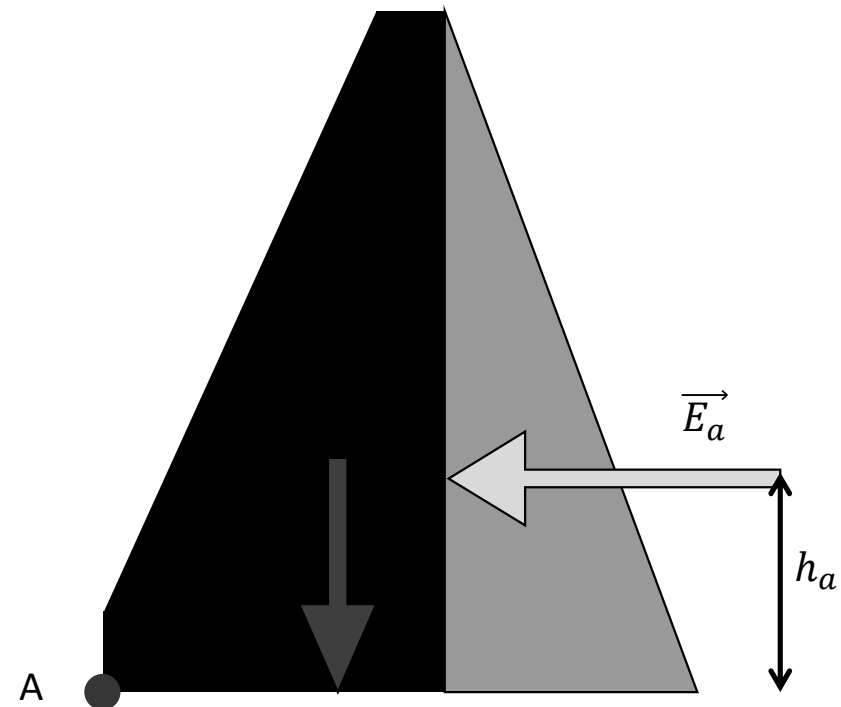
- $M_{est} = \left(\frac{5,5 \times 3,5}{2} \times 3,5 \times \frac{2}{3} + 5,5 \times 0,5 \times \left(3,5 + \frac{0,5}{2} \right) + 0,5 \times 4,0 \times \frac{4,0}{2} \right) \times 24 = 882,48 \text{ kNm/m}$

- Solicitante – Empuxo

- $M_{sol} = E_a \times 6 \times \frac{1}{3} = 216 \text{ kNm/m}$

- Fator de segurança

- $FS_{tomb} = \frac{\sum M_{est}}{\sum M_{sol}} = 4,08$



Exemplo – Muro de arrimo

- Capacidade de carga da fundação
 - Momento total $M = M_{est} - M_{sol} = 666,48 \frac{kNm}{m}$
 - Ponto de aplicação da carga, em relação ao ponto A
 - $b = \frac{M}{W} = 1,932 m$
 - Excentricidade (em relação ao centro da base)
 - $e = b - \frac{B}{2} = 0,068 m$
 - Tensão máxima:
 - $\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{W}{B} + W \times \frac{6e}{B^2} = 95,04 kPa < \sigma_{adm}$
 - Tensão mínima:
 - $\sigma_{m\acute{i}n} = \frac{W}{B} - W \times \frac{6e}{B^2} = 77,45 kPa > 0$

