

**REMEDIAÇÃO DE ÁREAS  
CONTAMINADAS:  
CONFINAMENTO GEOTÉCNICO,  
BARRERIAS PERMEÁVEIS,  
BARRERIAS REATIVAS**

Maria Eugenia Gimenez Boscov

PHA 3523

# Recuperação de áreas degradadas

- ❖ A recuperação de áreas degradadas pode utilizar diversas atividades geotécnicas, como terraplenagem, dragagem, drenagem, obras de contenção de erosão, assim como envolver a **remediação de áreas contaminadas**.

# Potencial de contaminação em áreas urbanas

- ❖ Postos de abastecimento
- ❖ Indústrias licenciadas (porcentagem de potencialmente poluidoras)
- ❖ Áreas industriais abandonadas
- ❖ Aterros sanitários e lixões
- ❖ Estabelecimentos comerciais (oficinas mecânicas, laboratórios, lavanderias)
- ❖ Curtumes, matadouros, frigoríficos

# Potencial de contaminação em áreas rurais

- ❖ Carreamento de defensivos agrícolas e fertilizantes pela água
- ❖ Gás metano emitido pelos animais
- ❖ Vapores de amônia e dióxido de nitrogênio (fezes de animais e fertilizantes à base de nitrogênio)
- ❖ Gás carbônico (uso de combustíveis na mecanização e técnicas de manejo do solo)
- ❖ Queimadas



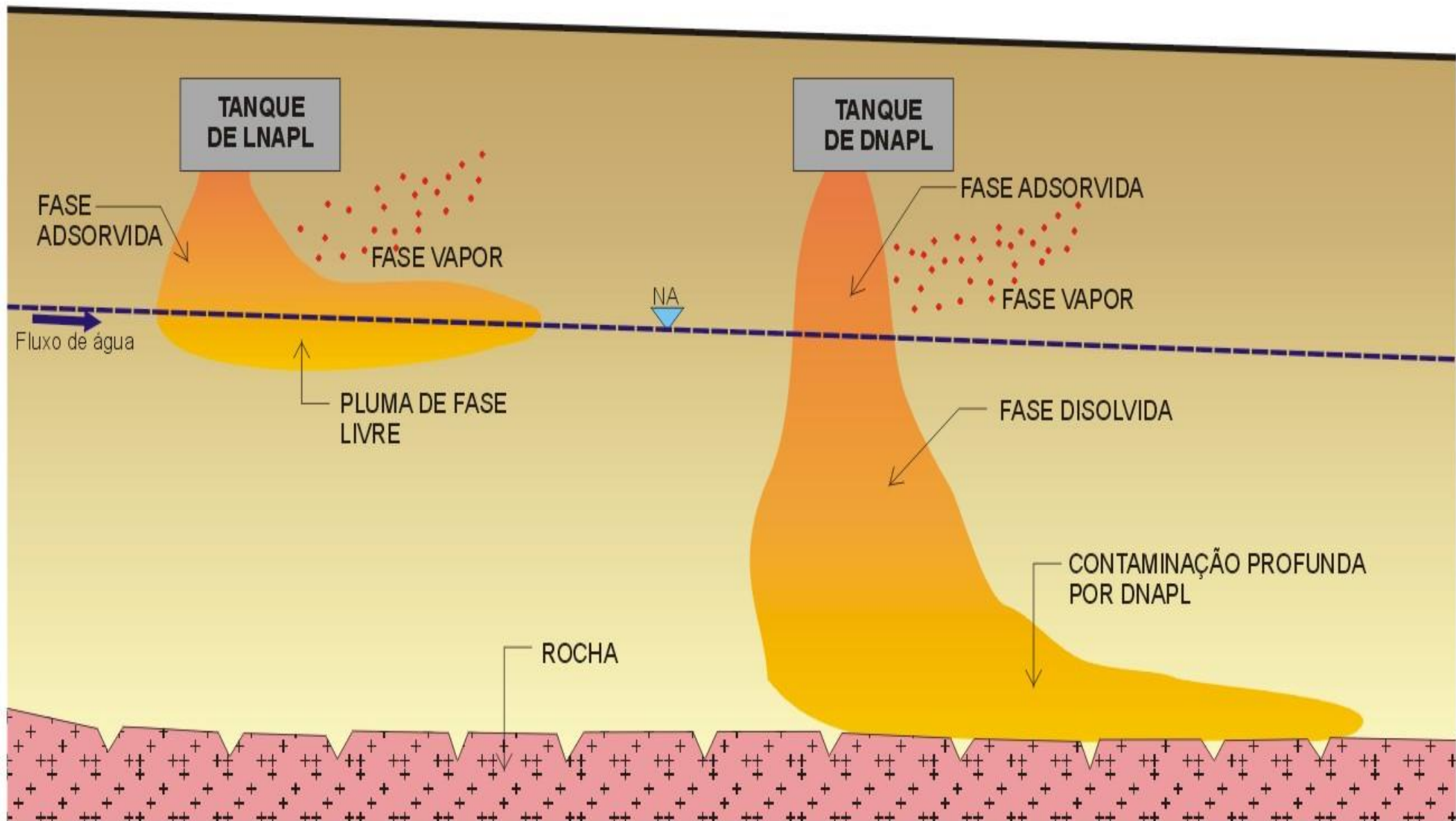
# TIPOS DE CONTAMINANTES

- ❖ Carga orgânica e fertilizantes
- ❖ Microrganismos: vírus e bactérias (patógenos fecais)
- ❖ Salinidade
- ❖ Compostos orgânicos sintéticos
  - compostos de petróleo, VOCs (BTEX), PAHs
  - solventes clorados (PCE, TCE, TCA, MC, VC, PCBs)
  - pesticidas clorados ou fosforados
- ❖ Metais pesados
  - arsênio, cádmio, cromo, chumbo, níquel, zinco, mercúrio
- ❖ Elementos radioativos
- ❖ Cloro, enxofre, arsênio, fósforo, selênio, carbono, enxofre, flúor, boro, nitrogênio

# Poluentes não miscíveis na água

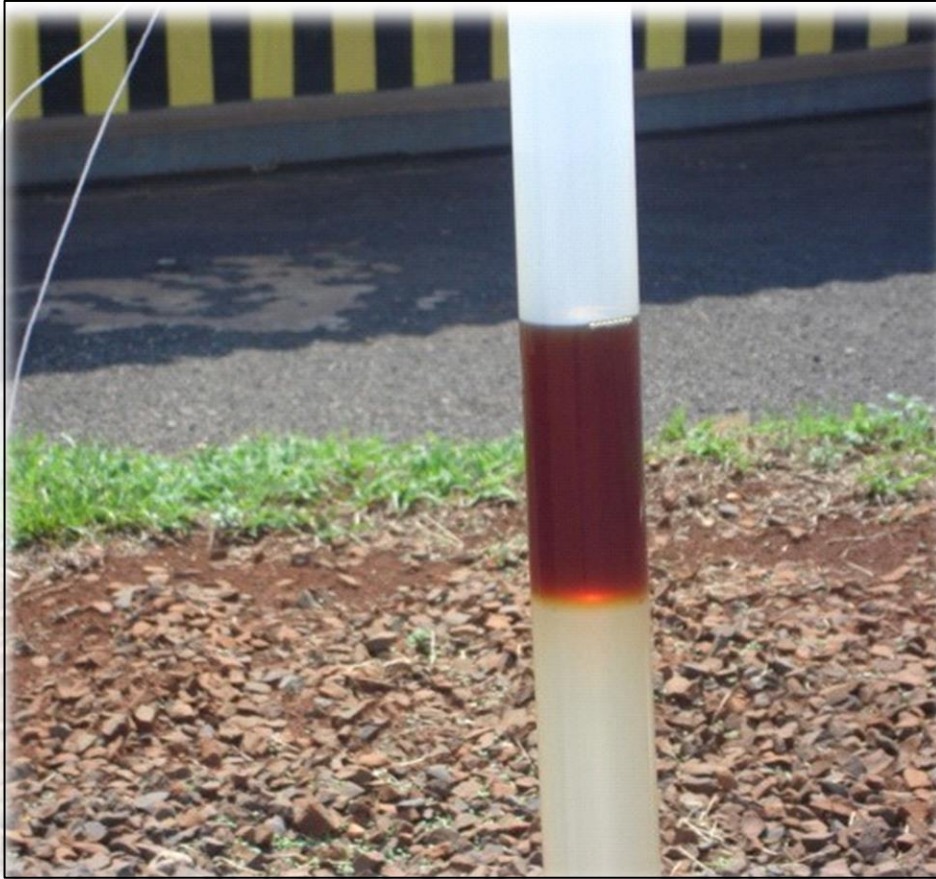
LNAPL – “light non aqueous phase liquid” – imiscível de menor densidade que a água

DNAPL – “dense non aqueous phase liquid” – imiscível de maior densidade que a água



(Campos, 2003)

# FASE LIVRE



# Técnicas de remediação

❖ *In situ* ou *ex situ*

❖ *Ex situ*:

Remoção

Disposição (em aterro adequado) ou tratamento

❖ *In situ*:

Contenção (confinamento) e/ou tratamento

# Técnicas de remediação

- ❖ Remoção de solo
- ❖ Barreiras impermeáveis
- ❖ *Pump and treat*
- ❖ Barreiras hidráulicas
- ❖ Barreiras permeáveis reativas
- ❖ Extração de vapor
- ❖ Extração multifásica
- ❖ *Air sparging*
- ❖ Oxidação/redução
- ❖ Biorremediação
- ❖ *Wetlands*

# Remoção do solo

- ❖ Lençol freático profundo, permeabilidade do subsolo muito baixa, contaminantes ainda não atingiram o lençol freático
- ❖ Remoção do solo contaminado, tratamento e posterior disposição em aterro adequado
- ❖ Principais técnicas de tratamento *ex situ*: tratamento térmico, incineração, “lavagem” de solo, solidificação ou inertização, tratamentos químicos.



# Confinamento geotécnico

- ❖ Confinamento de um local contaminado por meio de barreiras de baixa permeabilidade, isolando a massa de resíduos ou de materiais contaminados dos seres vivos, impedindo seu contato com águas superficiais, evitando a infiltração e a percolação de águas de chuva em seu interior, assim como o escape de vapores para a atmosfera, e diminuindo o aporte de contaminantes ao lençol freático.

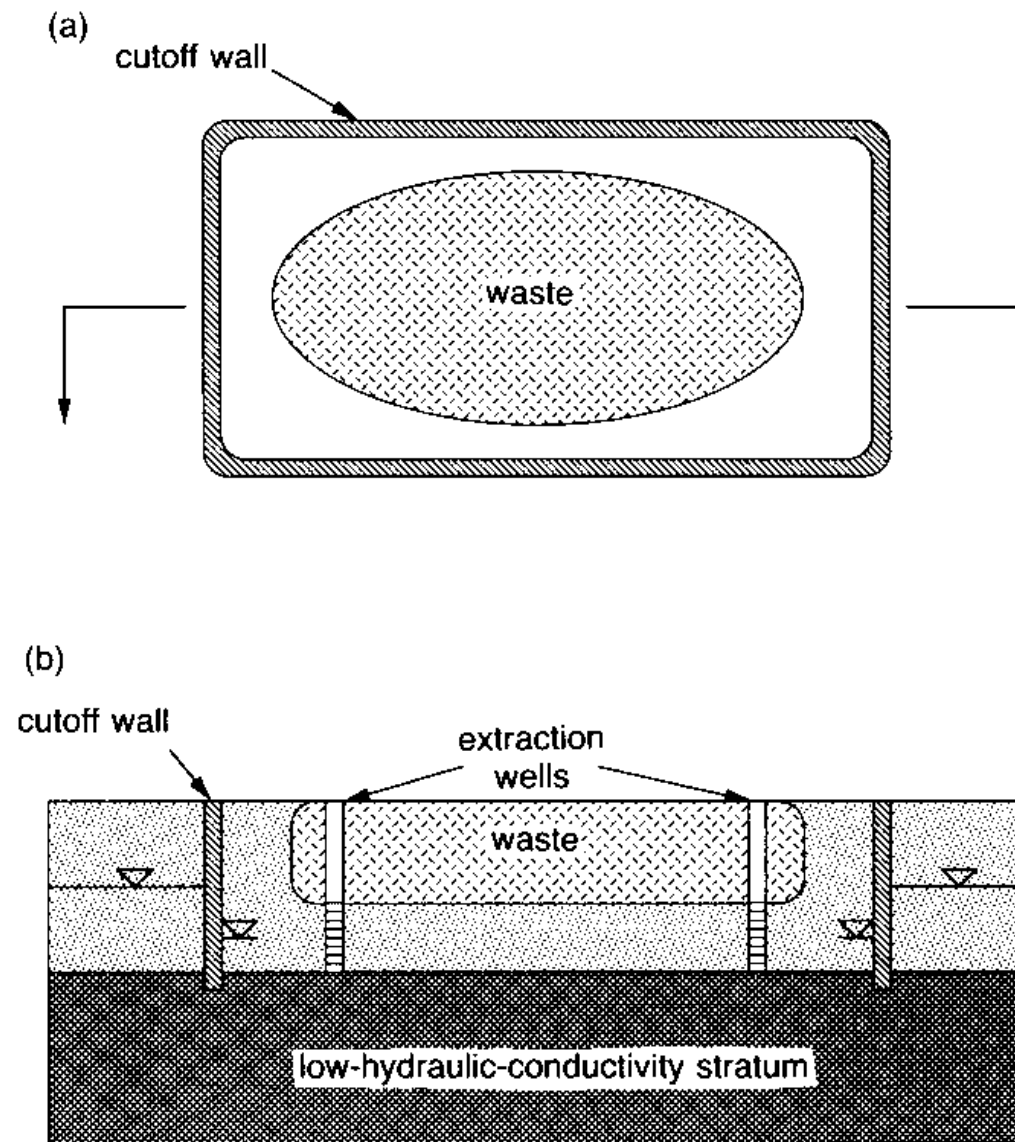


# Confinamento geotécnico

- ❖ É uma medida de remediação aceitável quando outras alternativas têm custos proibitivos e/ou eficácia baixa
- ❖ Volume de solo a ser tratado é muito grande ou há diversos tipos de contaminantes no solo, exigindo uma combinação de técnicas.

# Confinamento geotécnico

- ❖ Barreiras verticais
- ❖ Cobertura
- ❖ Barreiras horizontais de fundo



**Fig. 17.1** Schematic diagram of vertical cutoff wall configuration for typical site remediation project: (a) plan view and (b) cross-section.

# Barreiras verticais

- ❖ Barreiras no perímetro da área contaminada engastadas em estratos de menor permeabilidade.
- ❖ Permeabilidade da barreira deve ser significativamente menor do que a do subsolo natural.
- ❖ Podem ser localizadas em parte do local: a jusante da área contaminada para melhorar a eficiência de sistema de remoção de água subterrânea, ou a montante para evitar a entrada de água subterrânea limpa na área contaminada.

# Barreiras verticais

- ❖ Trincheira escavada preenchida com solo-bentonita, cimento-bentonita, concreto plástico ou concreto reforçado
- ❖ Por injeção: “jet grouting”
- ❖ Cortinas de estacas-prancha
- ❖ Painéis de geomembranas

# TRINCHEIRA ESCAVADA

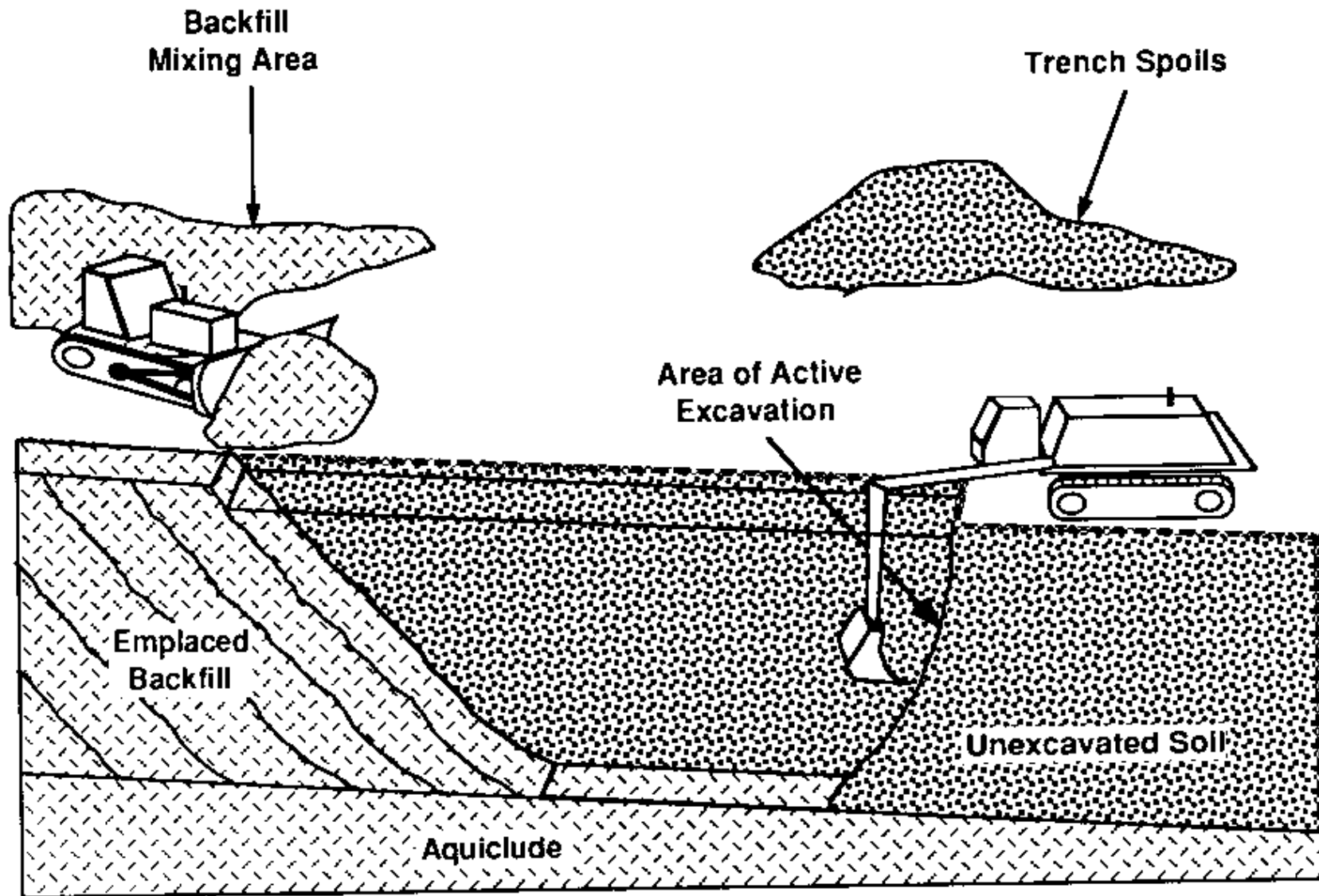


Fig. 17.2 Excavation of trench and placement of soil-bentonite backfill.

(Daniel, 1993)





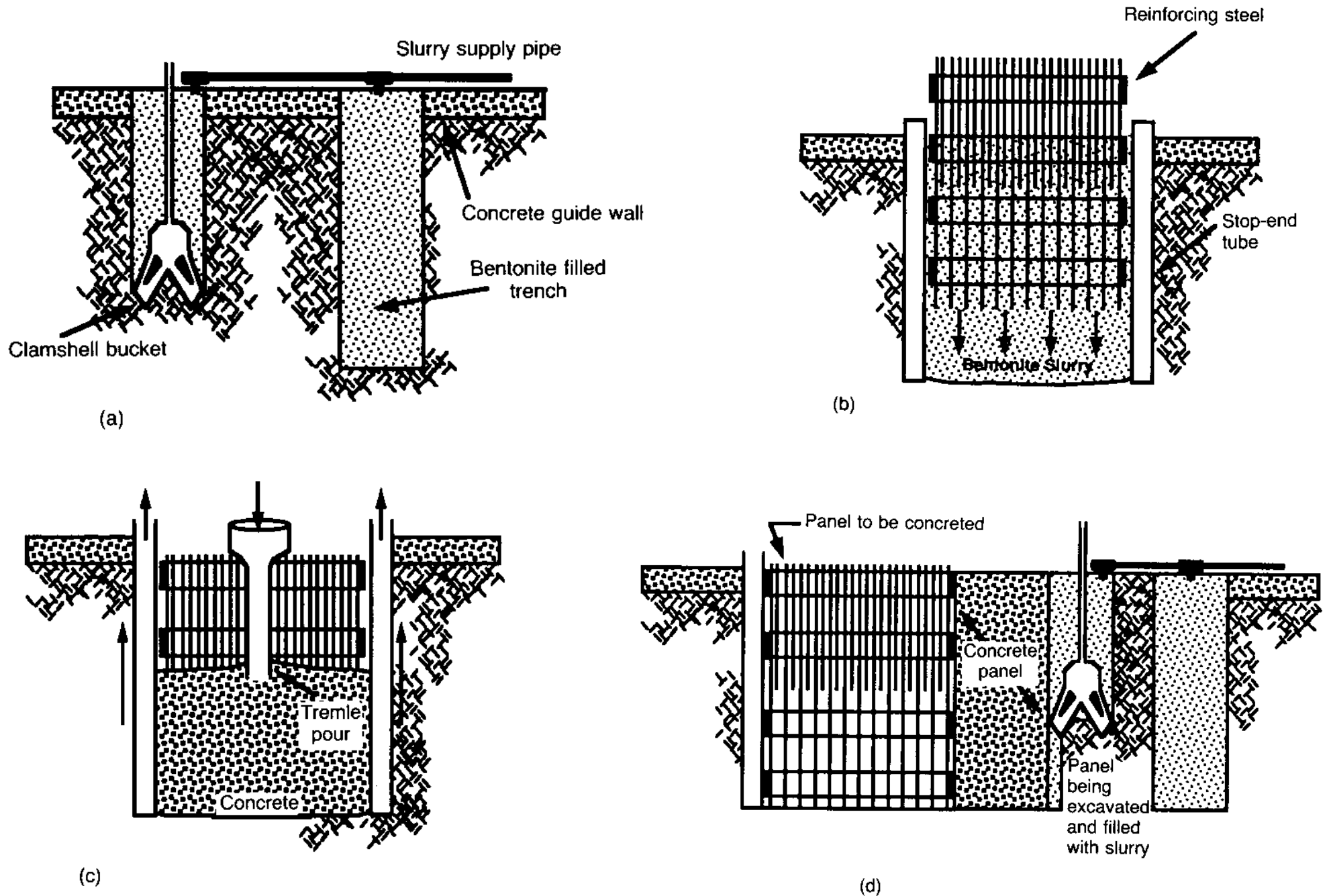


## ***CLAM SHELL***





# Parede diafragma



(Daniel, 1993)



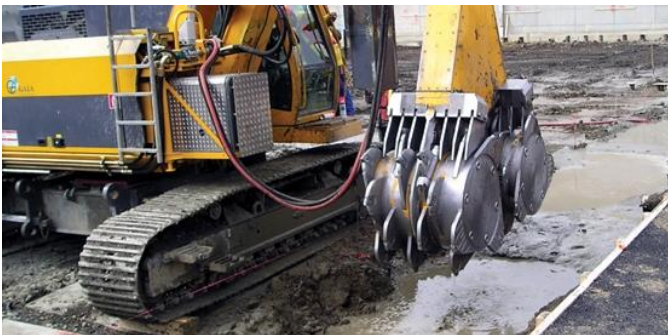


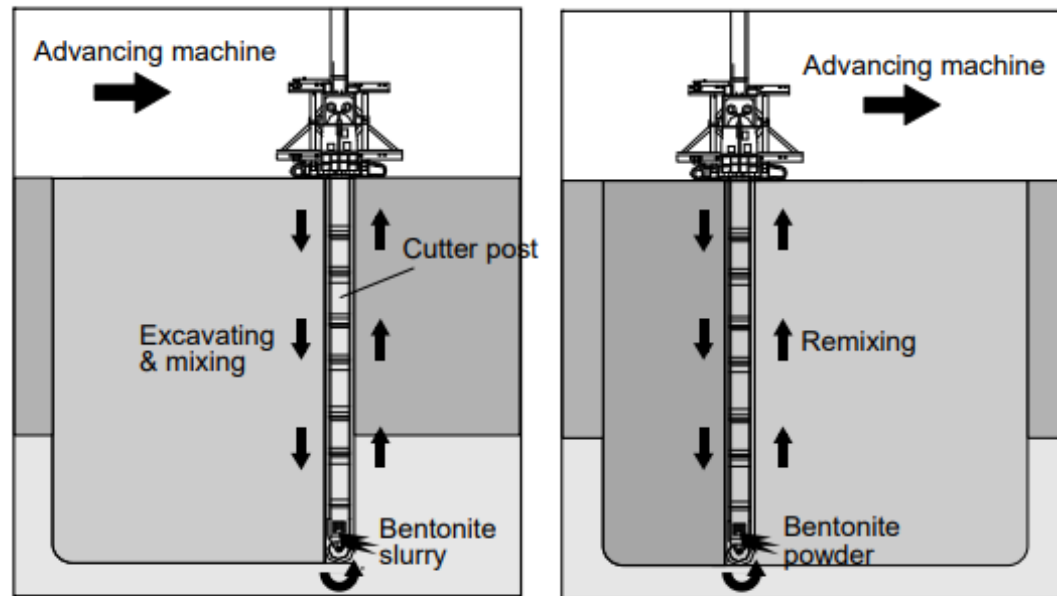






# ***DEEP SOIL MIXING***





- 1) Trench cutting with the addition of bentonite slurry
- 2) Re-mixing the bentonite powder in the trench

Figure 1. Construction procedures of SBM cut-off wall with TRD method (Katsumi et al. 2008b).

Katsumi, T., Kamon, M., Inui, T. & Araki, S. 2008b. Hydraulic barrier performance of SBM cut-off wall constructed by the trench cutting and re-mixing deep wall method. Khire, M.V., Alshawabkeh, A.N. and Reddy, K.R. (eds.), *GeoCongress 2008: Geotechnics of Waste Management and Remediation*, Geotechnical Special Publication 177. ASCE: 628-635.

# Jet grouting



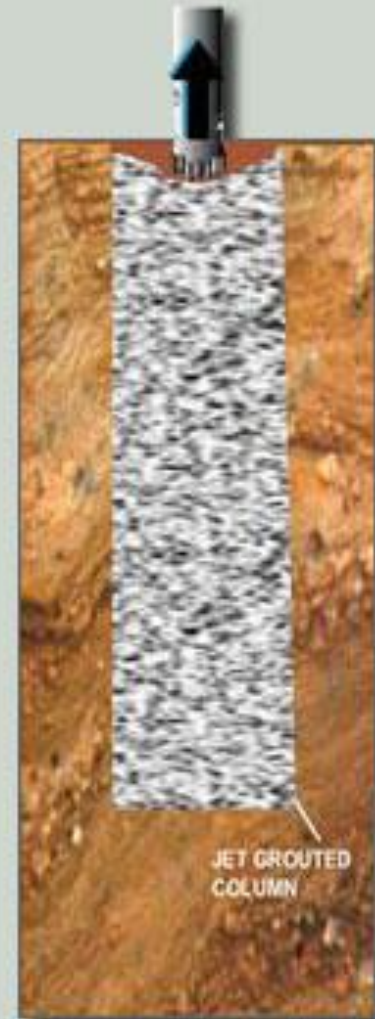
**STEP ONE:**  
ADVANCE STEEL DRILL  
ROD DOWNWARD TO THE  
DESIGNATED COLUMN  
DEPTH.



**STEP TWO:**  
SWITCH TO JET  
GROUTING SYSTEM.  
APPLY HIGH PRESSURE  
TO ACTIVATE THE JET  
MONITOR



**STEP THREE:**  
PERFORM JET GROUTING  
AS JET ROD IS ROTATED  
AND WITHDRAWN AT A  
CONTROLLED  
RATE.



**STEP FOUR:**  
AS THE JET ROD REACHES  
THE TOP, JET GROUTED  
COLUMN IS COMPLETED.



# Jet grouting









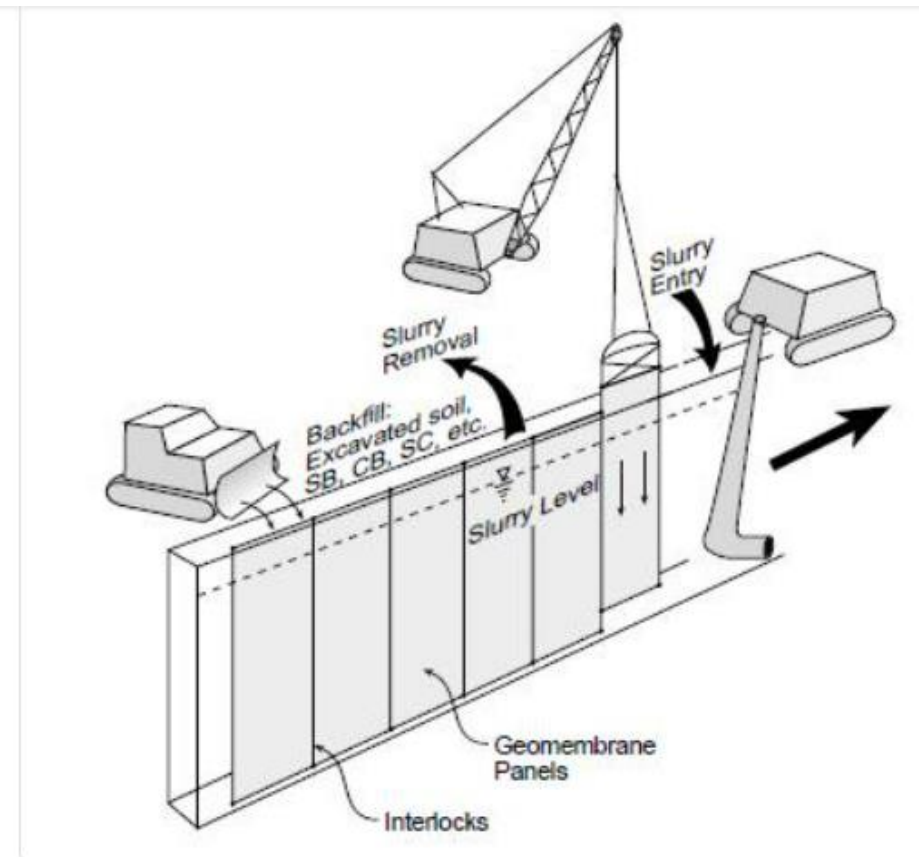


Figure 13: Geomembrane/Slurry wall combination (Evans, 1995)



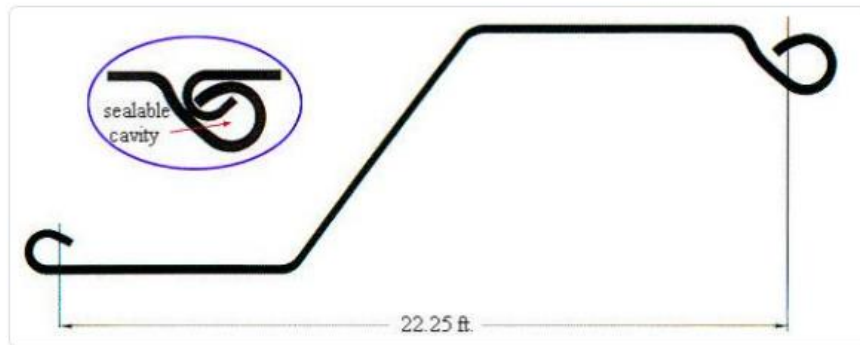


Figure 11: Waterloo Barrier Schematic (Mutch et al., 1997 as presented by Pearlman, 1999)









# Trincheiras solo-bentonita

Misturas de solo e bentonita (*SBM - soil-bentonite mixtures*) são materiais com condutividade hidráulica baixa o suficiente para serem usados como barreira de contenção para solos contaminados.

As principais preocupações em relação a barreiras de contenção *in situ* são: (i) a homogeneidade e (ii) a garantia de desempenho hidráulico adequado a curto, médio e longo prazo, o qual resulta de fatores físicos e químicos acoplados.



# Trincheiras solo-bentonita

Misturas de solo e bentonita (*SBM - soil-bentonite mixtures*) são materiais com condutividade hidráulica baixa o suficiente para serem usados como barreira de contenção para solos contaminados.

As principais preocupações em relação a barreiras de contenção *in situ* são: (i) a homogeneidade e (ii) a garantia de desempenho hidráulico adequado a curto, médio e longo prazo, o qual resulta de fatores físicos e químicos acoplados.



# Trincheiras solo-bentonita

Ensaio de permeabilidade em corpos-de-prova de SBM com diferentes teores de bentonita e diferentes líquidos nos vazios do solo e para percolação.

Dois solos: (a) solo vulcânico misturado com cascalho arenoso (b) areia de sílica

$\text{CaCl}_2$ , água do mar artificial e óleo combustível pesado.

Para simular o processo de construção no laboratório: lama bentonítica misturada ao solo até atingir viscosidade desejada; adição de 25 to  $150 \text{ kg/m}^3$  de bentonita em pó.

Table 2. Testing conditions for hydraulic conductivity test

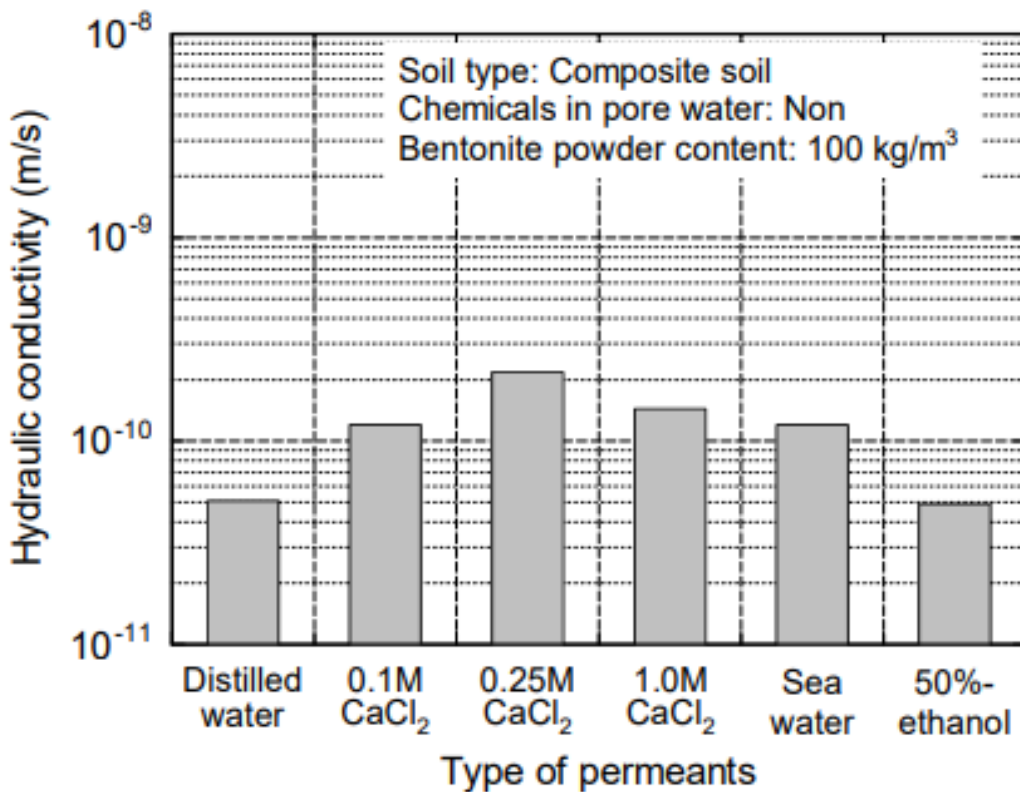
Test No.	Soil type <sup>*1</sup>	Chemical type in pore water <sup>*2</sup>	Type of permeant	Bentonite powder content kg/m <sup>3</sup>	Hydraulic conductivity m/s
P-1	Composite soil	0	Distilled water	100	$5.0 \times 10^{-11}$
P-2			0.25 M-CaCl <sub>2</sub>		$2.2 \times 10^{-10}$
P-3			1.0 M-CaCl <sub>2</sub>		$1.4 \times 10^{-10}$
P-4			Seawater		$1.2 \times 10^{-10}$
P-5			50%-ethanol		$4.9 \times 10^{-11}$
N-1	Composite soil	0	0.1 M-CaCl <sub>2</sub>	50	$2.3 \times 10^{-10}$
N-2				100	$1.2 \times 10^{-10}$
N-3			0.01 M-CaCl <sub>2</sub>	100	$2.2 \times 10^{-10}$
N-4		0.025 M-CaCl <sub>2</sub>	0.1 M-CaCl <sub>2</sub>	50	<b><math>1.5 \times 10^{-9}</math></b>
N-5				75	$6.8 \times 10^{-10}$
N-6				100	$5.6 \times 10^{-10}$
N-7		0.05 M-CaCl <sub>2</sub>	0.1 M-CaCl <sub>2</sub>	75	<b><math>1.1 \times 10^{-9}</math></b>
N-8				100	$1.0 \times 10^{-9}$
N-9				125	$7.4 \times 10^{-10}$
N-10				100	<b><math>1.3 \times 10^{-9}</math></b>
N-11				0.1 M-CaCl <sub>2</sub>	125
N-12		Sea water	Sea water	150	$7.0 \times 10^{-10}$
N-13				100	$9.8 \times 10^{-10}$
N-14				5,000 mg/kg-heavy fuel oil A	100
N-15		10,000 mg/kg-heavy fuel oil A	0.1 M-CaCl <sub>2</sub>	100	$8.3 \times 10^{-11}$
S-1	Silica sand	0	Distilled water	25	<b><math>2.7 \times 10^{-9}</math></b>
S-2				50	$8.7 \times 10^{-10}$
S-3				100	$1.1 \times 10^{-10}$

<sup>\*1</sup> Composite soil: a mixture of volcanic cohesive soil and sandy gravel (collected at a pilot test site).

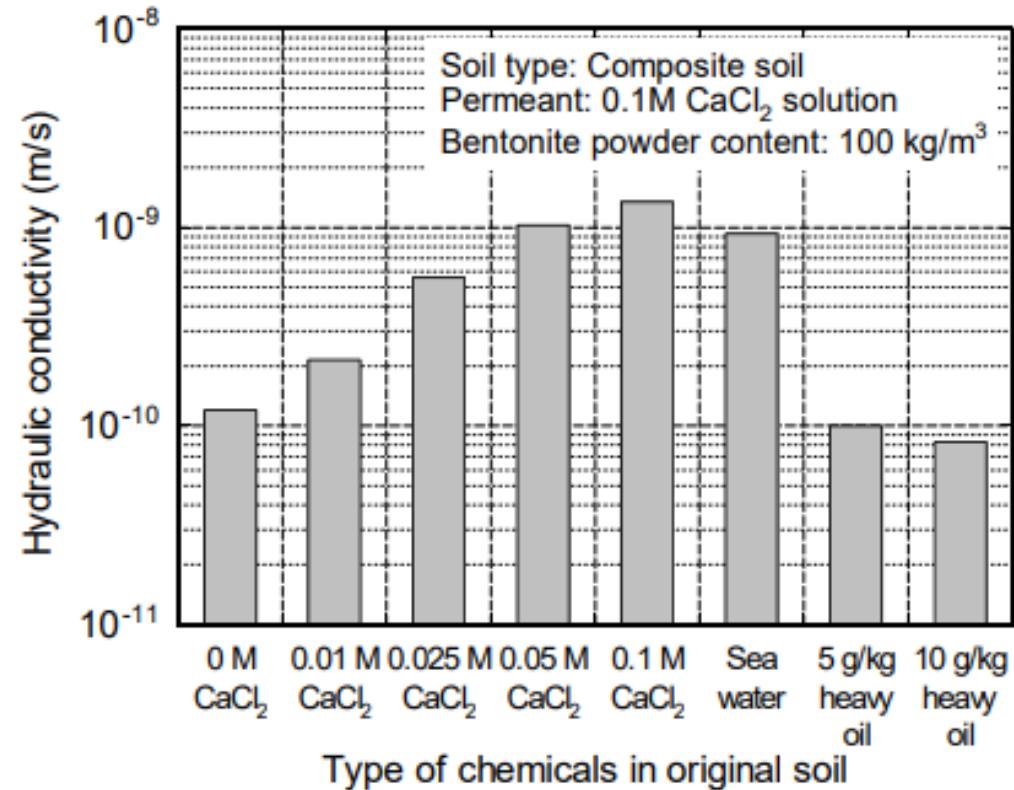
<sup>\*2</sup> CaCl<sub>2</sub>: concentration in pore water of parent material, Heavy fuel oil A: concentration in parent material (dry weight basis), Seawater: pore water of the parent material was replaced by the seawater.



## Efeito da solução percolante



## Efeito da água do solo



O aumento da concentração na água do solo levou a um maior aumento da condutividade hidráulica do que o aumento da concentração da solução percolante.



# Trincheiras solo-bentonita

Para ensaios de permeabilidade na barreira construída: difícil obter amostra indeformada

Portanto: CPTU (dissipação da pressão neutra)

CPTU também pode indicar a heterogeneidade (indiretamente)

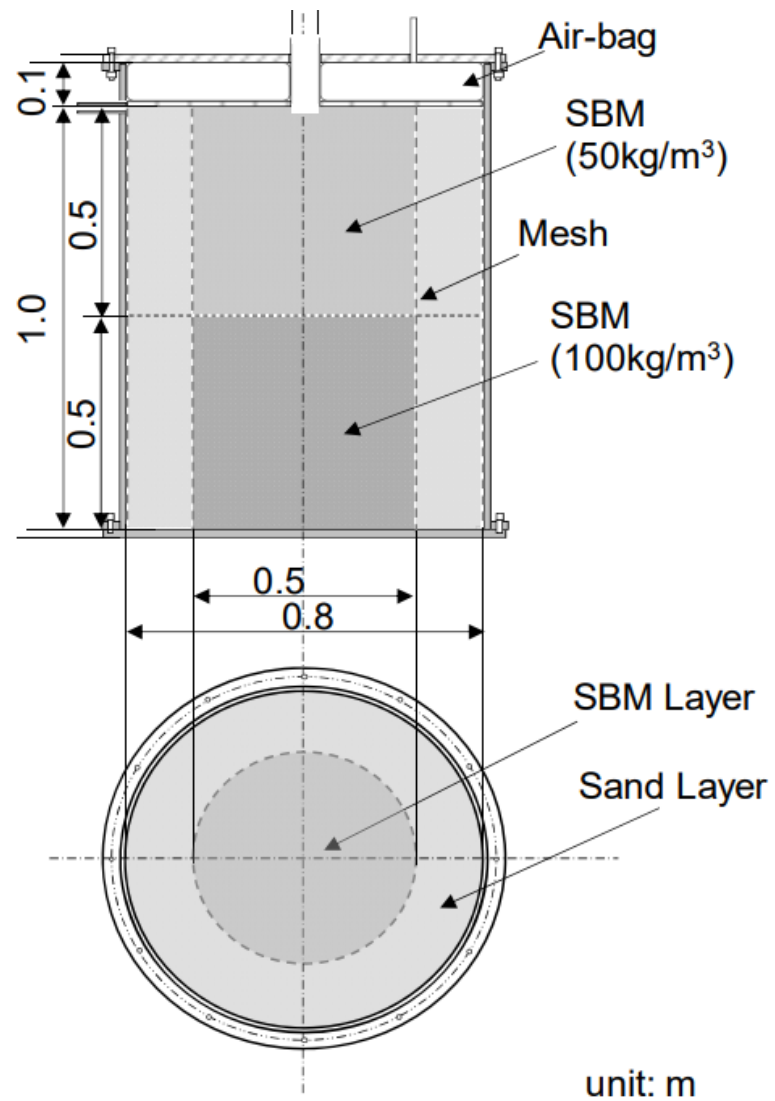


Figure 2. Detail of a large-scale soil tank used for CPTU

Takai et al. 2013

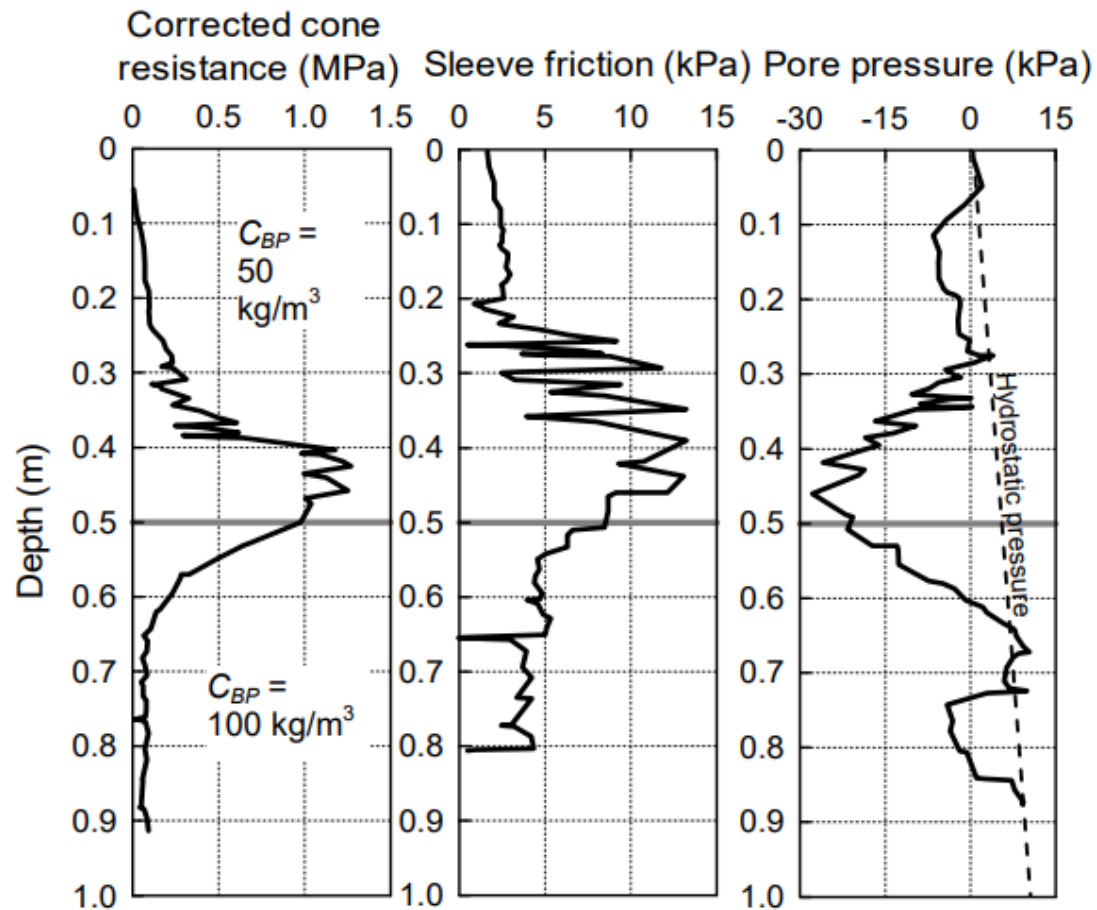


Figure 7. Results of CPTU; [Left] Corrected cone resistance ( $q_t$ ), [Center] Sleeve friction ( $f_s$ ), [Right] Pore pressure ( $u$ )

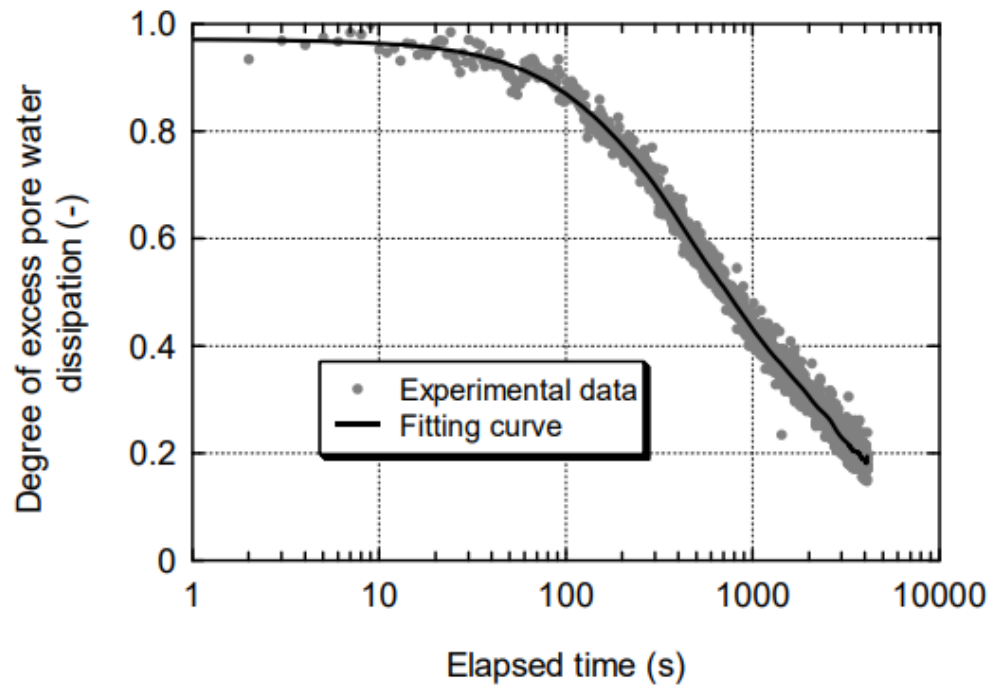


Figure 8. Pore pressure dissipation test result at 0.75 m depth

Table 4. Coefficient of consolidation and hydraulic conductivity at each degree of excess pore pressure dissipation

Degree of dissipation %	Horizontal coefficient of consolidation, $c_h$ $\text{m}^2/\text{kN}$	Horizontal hydraulic conductivity, $k_h$ $\text{m/s}$
20	$2.5 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-10}$
30	$2.4 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-10}$
50	$2.9 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-10}$



## Capacidade de “self healing”

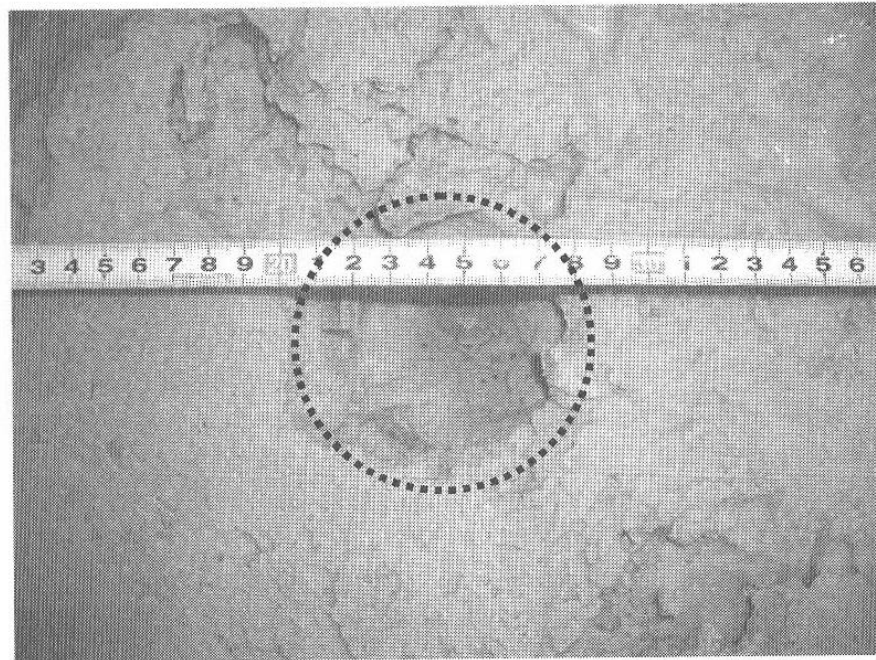


Photo 2. Appearance of SBM surface after CPTU.



# Trincheiras solo-bentonita

Compatibilidade e controle  
construtivo

(Takai et al., 2013)

Mistura de solo vulcânico com  
pedregulho

25 a 150 kg/m<sup>3</sup> de bentonita

Soluções de cálcio

Utilização de CPTU para avaliar  
permeabilidade e homogeneidade  
vertical



Pre-construction

Hydraulic conductivity test

- ✓ *Chemical concentration*
- ✓ *Particle size distribution*
- ✓ *Bentonite powder content*

Construction of SBM cut-off wall

Post-construction

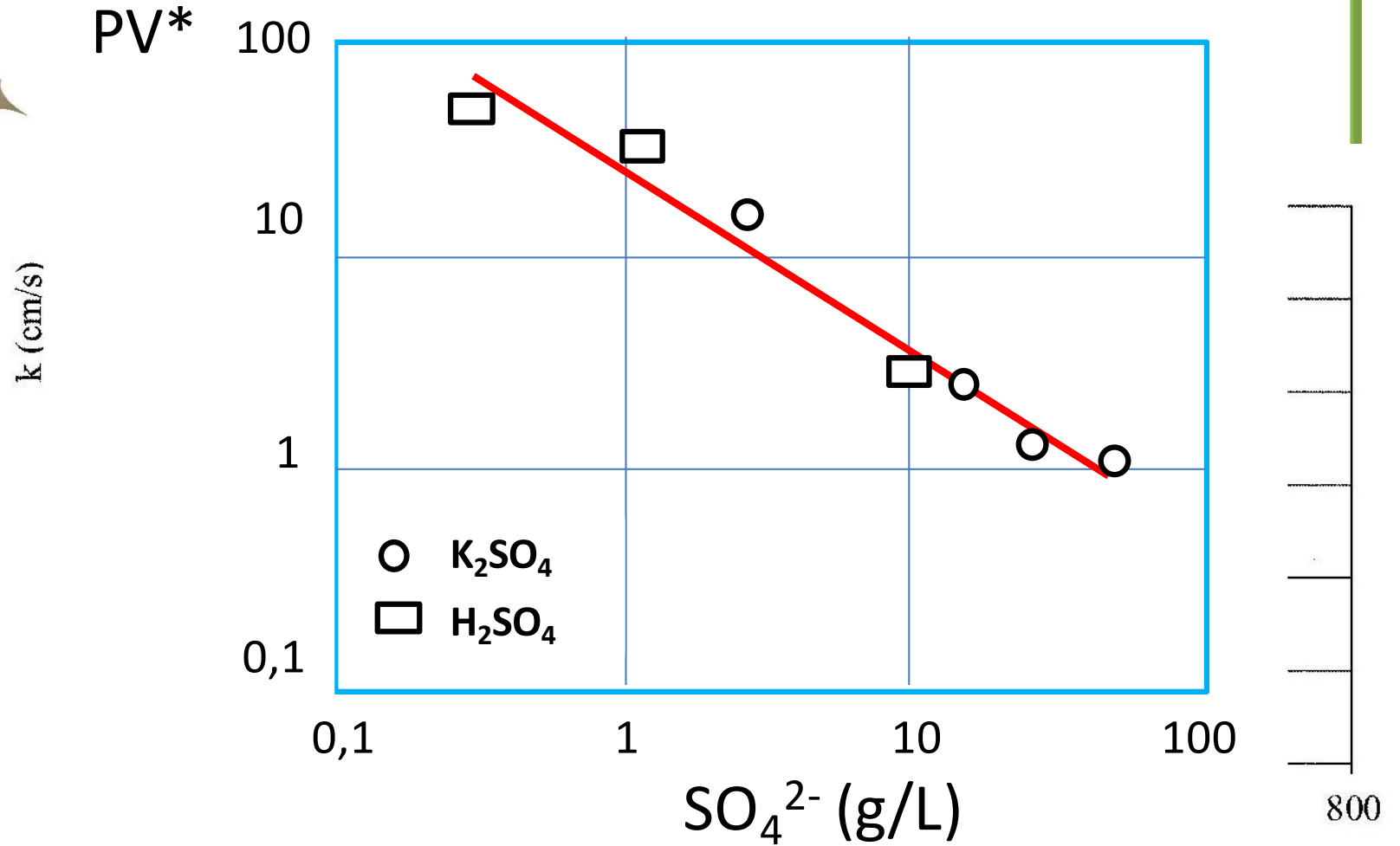
CPTU

- ✓ *Stability of three parameters*
- ✓ *Evaluation of hydraulic conductivity by dissipation test*

Figure 10. Brief scheme of design and evaluation



# Trincheiras de cimento-bentonita



(Brianzoni et al., 2013)

# Escolha do tipo de parede vertical

- ❖ profundidade e comprimento da parede
- ❖ extensão e tipo da contaminação
- ❖ tipo do solo
- ❖ limite superior aceitável de permeabilidade
- ❖ condições da barreira de fundo
- ❖ profundidade até o nível d'água
- ❖ equipamentos de construção disponíveis
- ❖ experiência anterior
- ❖ custos

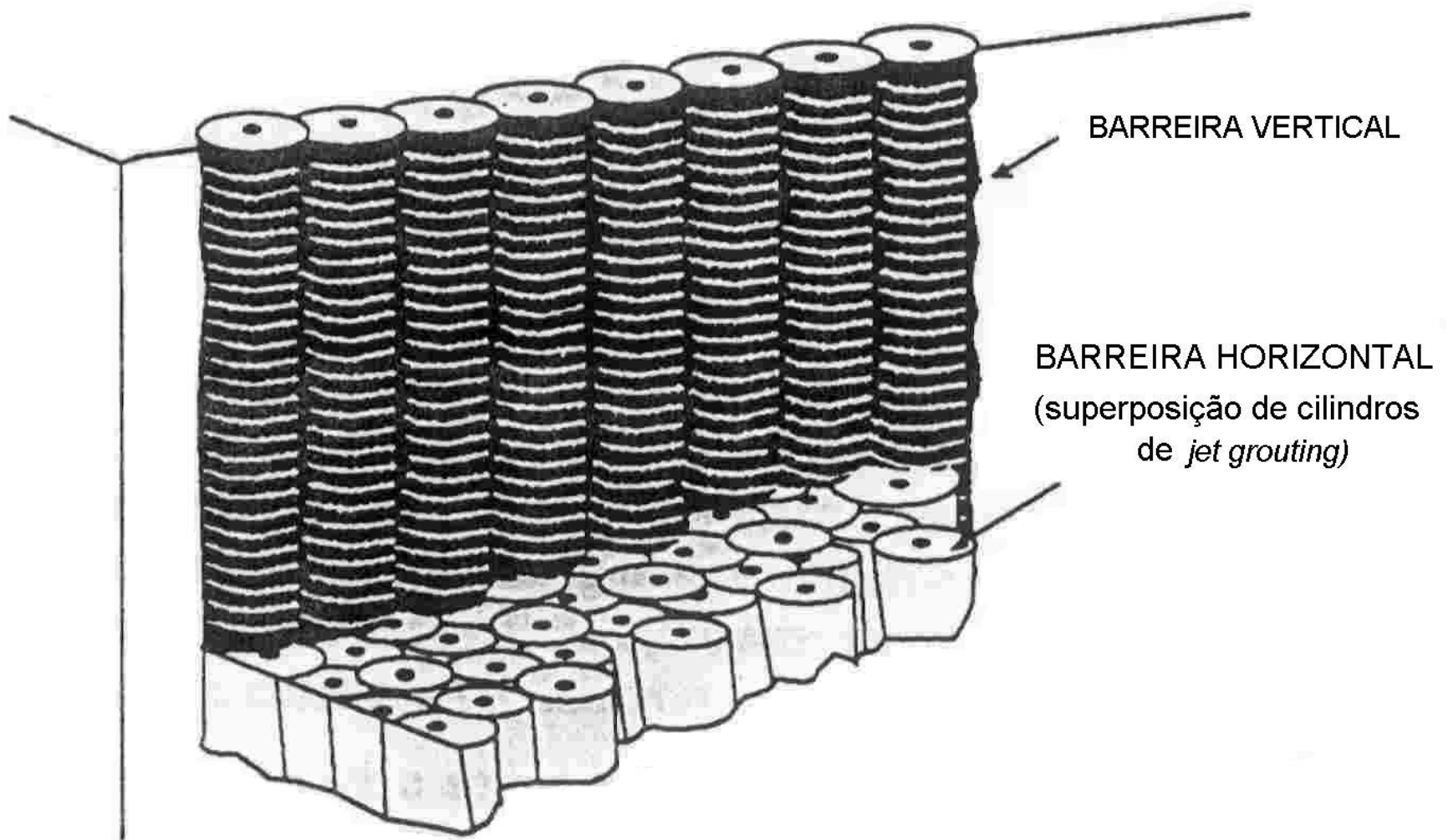
# Barreiras horizontais

❖ Coberturas

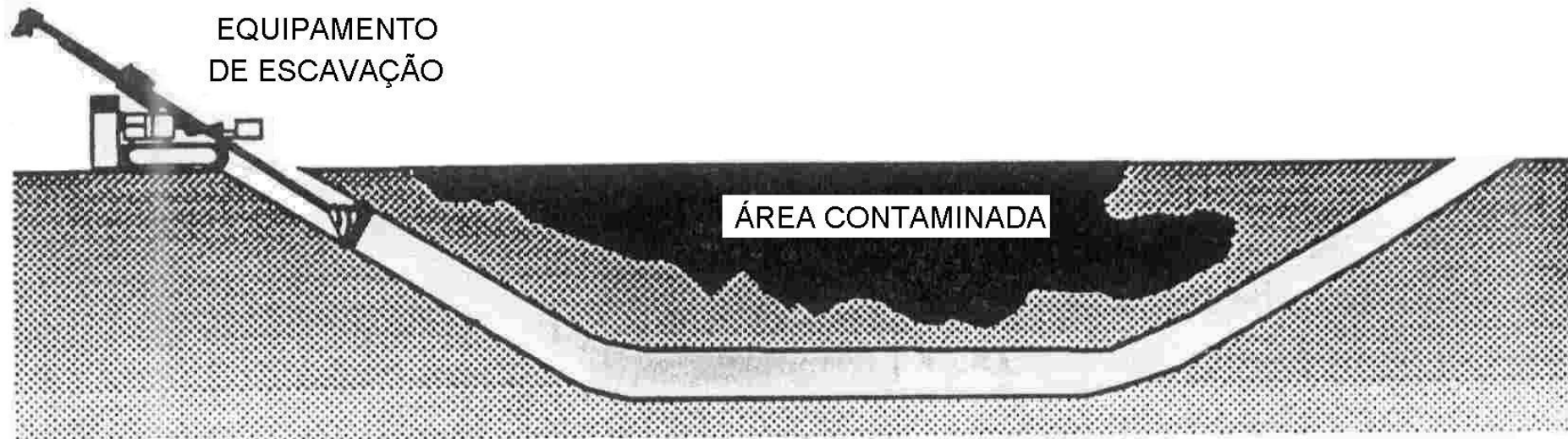
❖ Barreiras horizontais de fundo

# Barreiras horizontais de fundo

- ❖ Quando o estrato natural de baixa permeabilidade é profundo (principalmente no caso dos DNAPLs)
- ❖ Superposição de colunas de *jet grouting*, perfuração direcionada a partir da superfície e preenchimento do furo com material de baixa permeabilidade, por fraturamento hidráulico e preenchimento das fraturas com argamassa bombeada (*block displacement*) e por congelamento do solo.

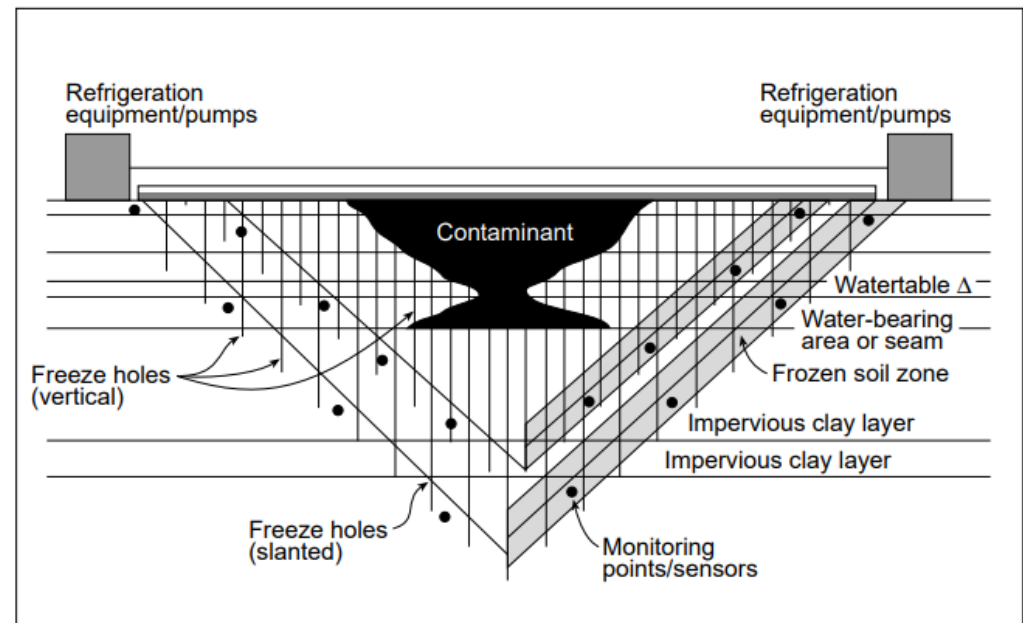
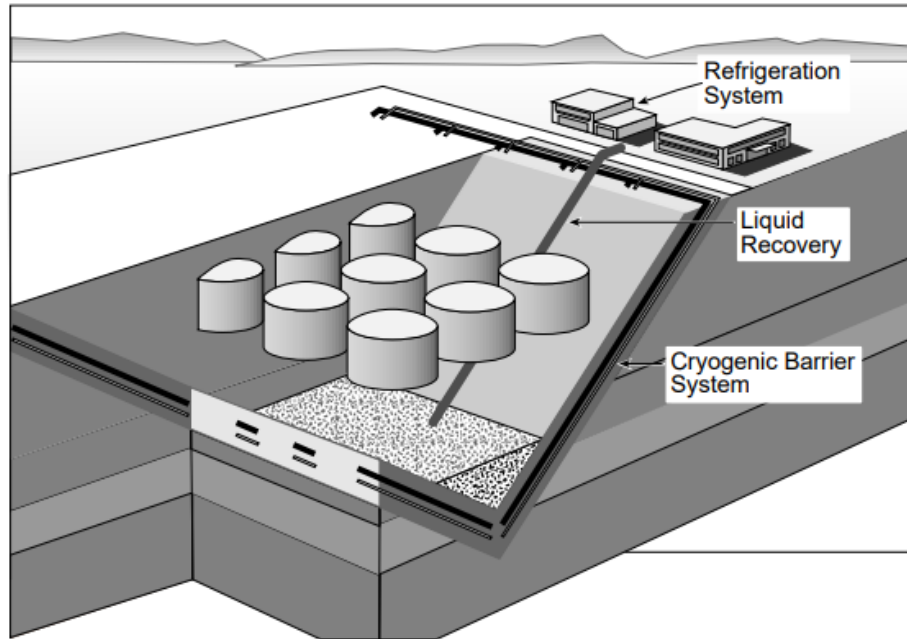


Barreira horizontal construída por *jet grouting* (Sanchez 2007)



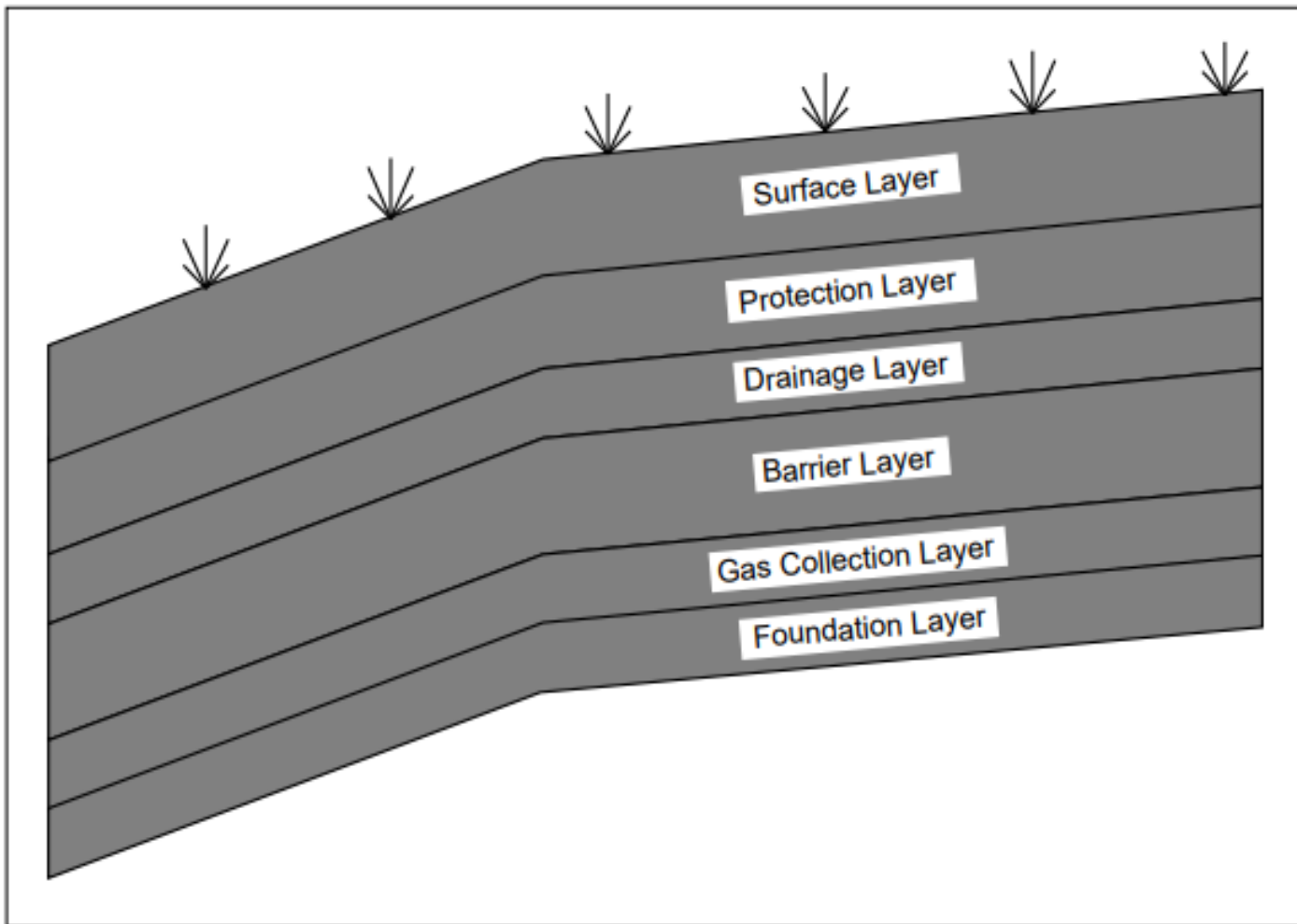
Barreira horizontal construída por perfuração direcionada a partir da superfície

(Adaptado de: Assessment of Waste Barrier Containment System (1997))

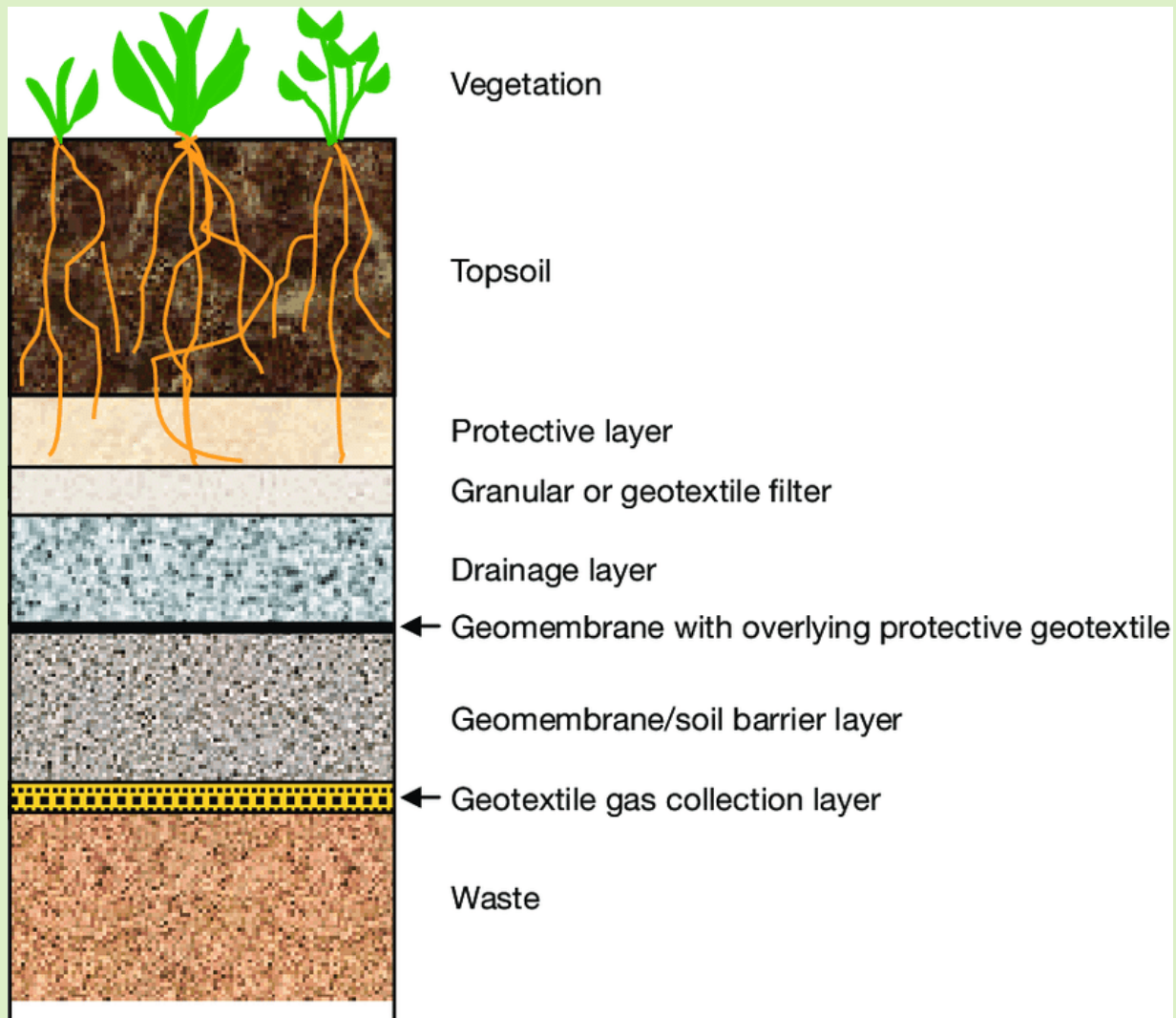




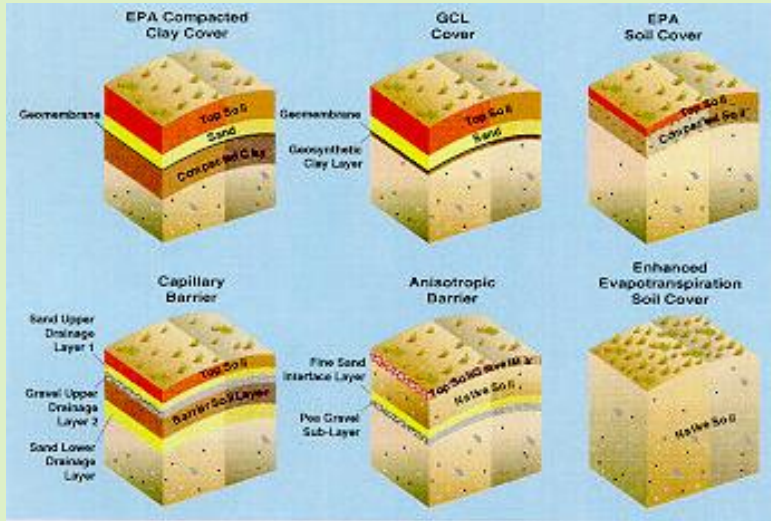
# Coberturas



# Coberturas



# Coberturas



# Coberturas



<https://www.xrgeomembranes.com/blog/exposed-geomembrane-covers-the-rest-of-the-story>



<http://www.scswana.org/Resources/Documents/2013%20Exposed%20GM%20Covers%20-%20Othman.pdf>



# Geomembranas expostas

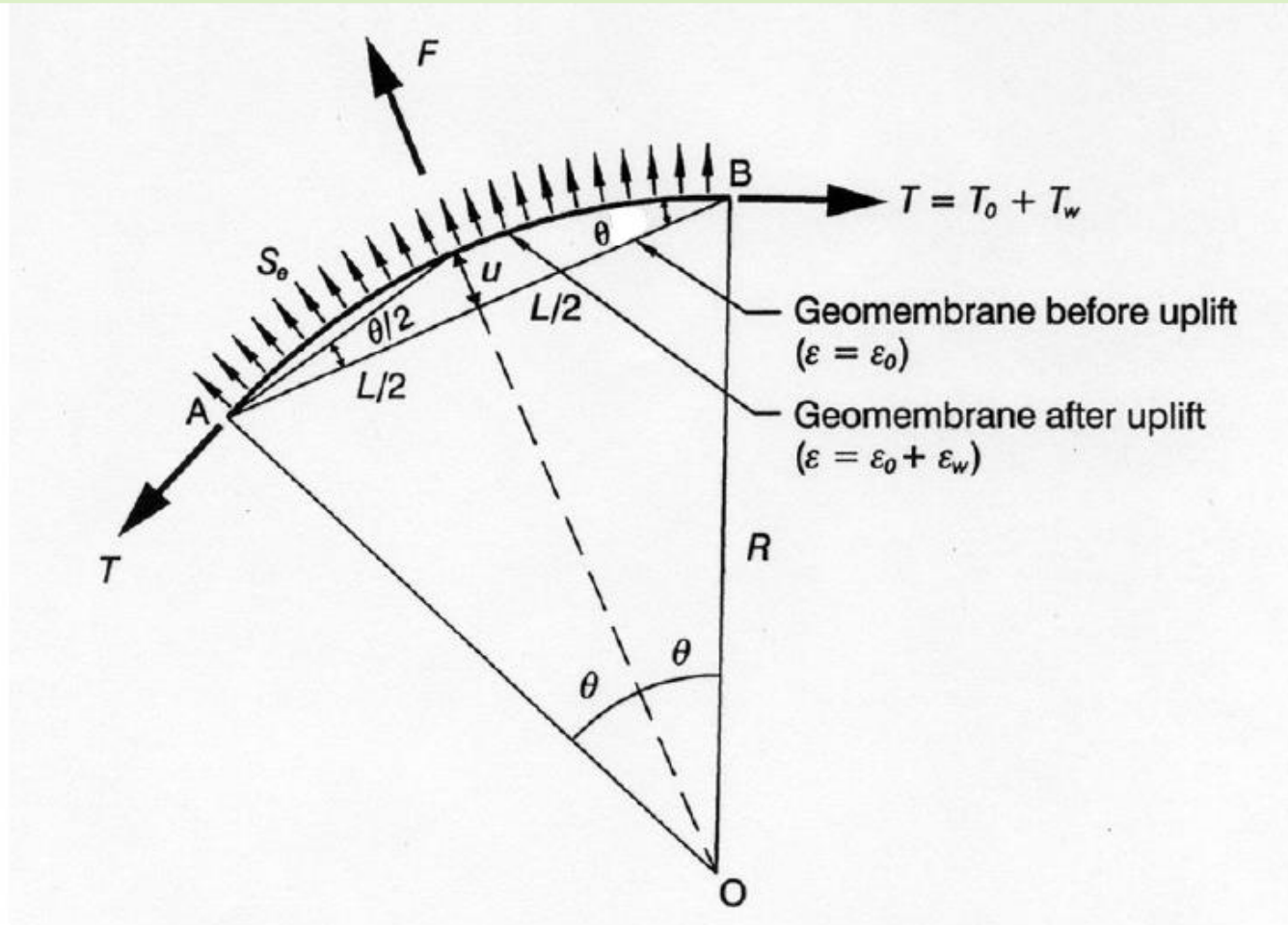
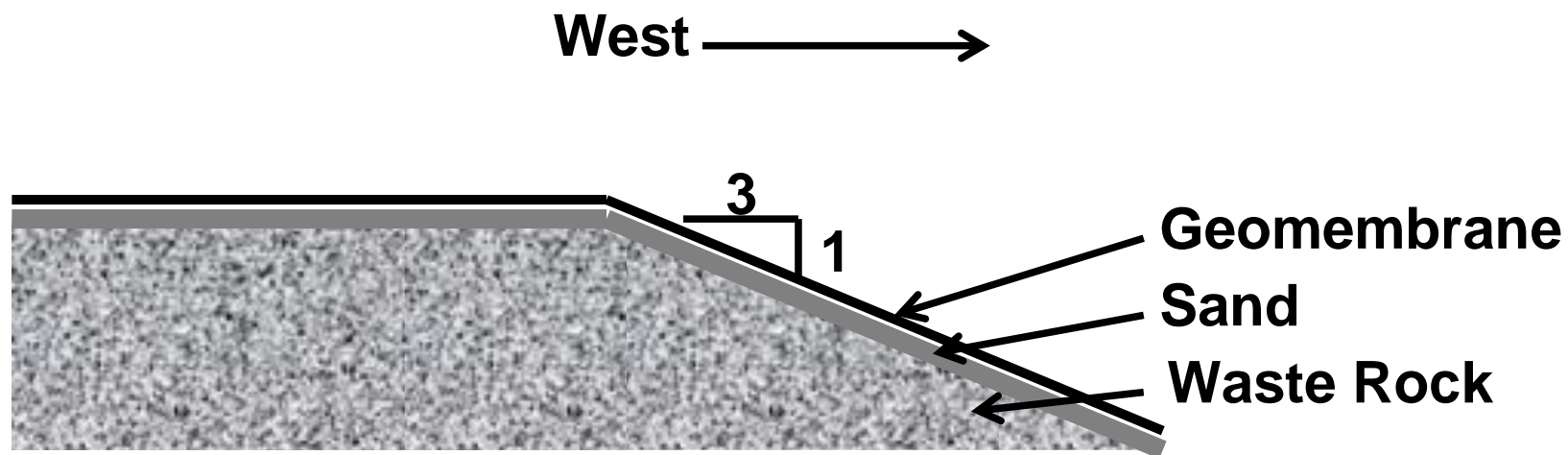
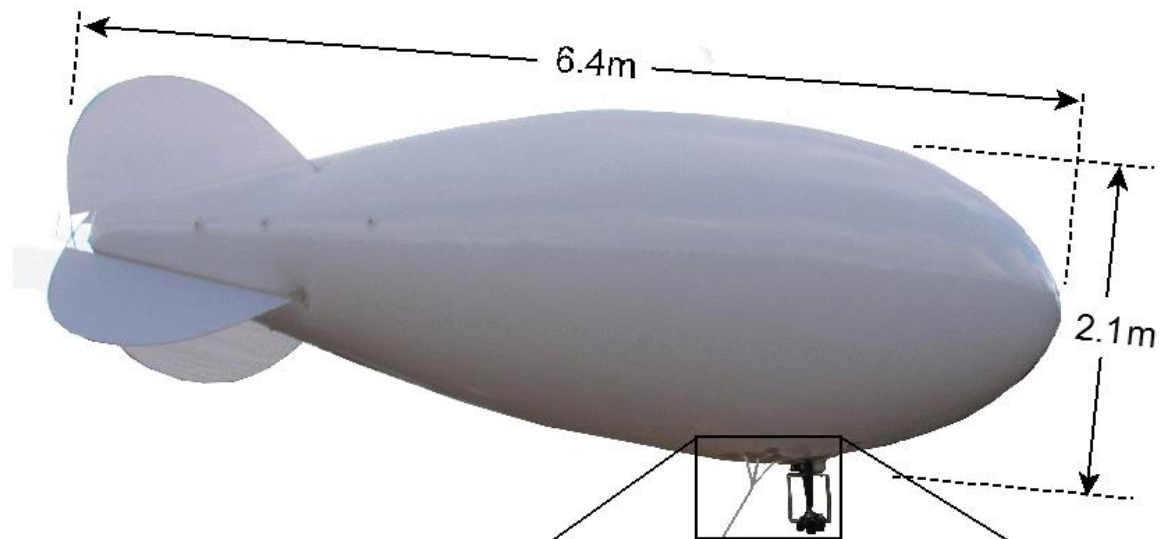


Figure 4. Schematic representation of an uplifted geomembrane (Zornberg and Giroud, 1997).



- Rugas em uma GM de HPDE de 1,5 mm de espessura sobre um talude de 65 m de comprimento, declividade 3H:1V.
- Fotos entre 13:14 and 13:27 de 18/07/06
- Temperatura do ar = 28°C

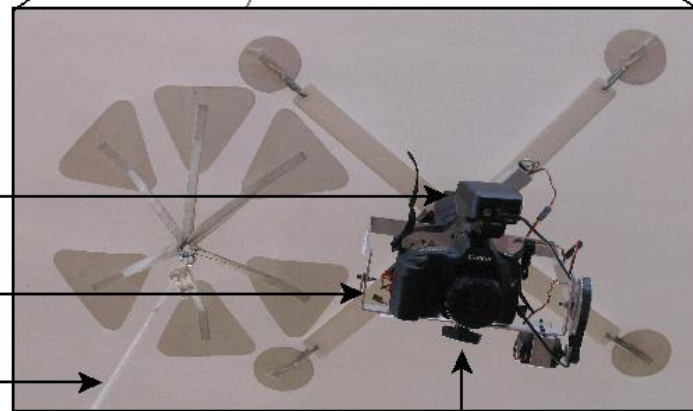




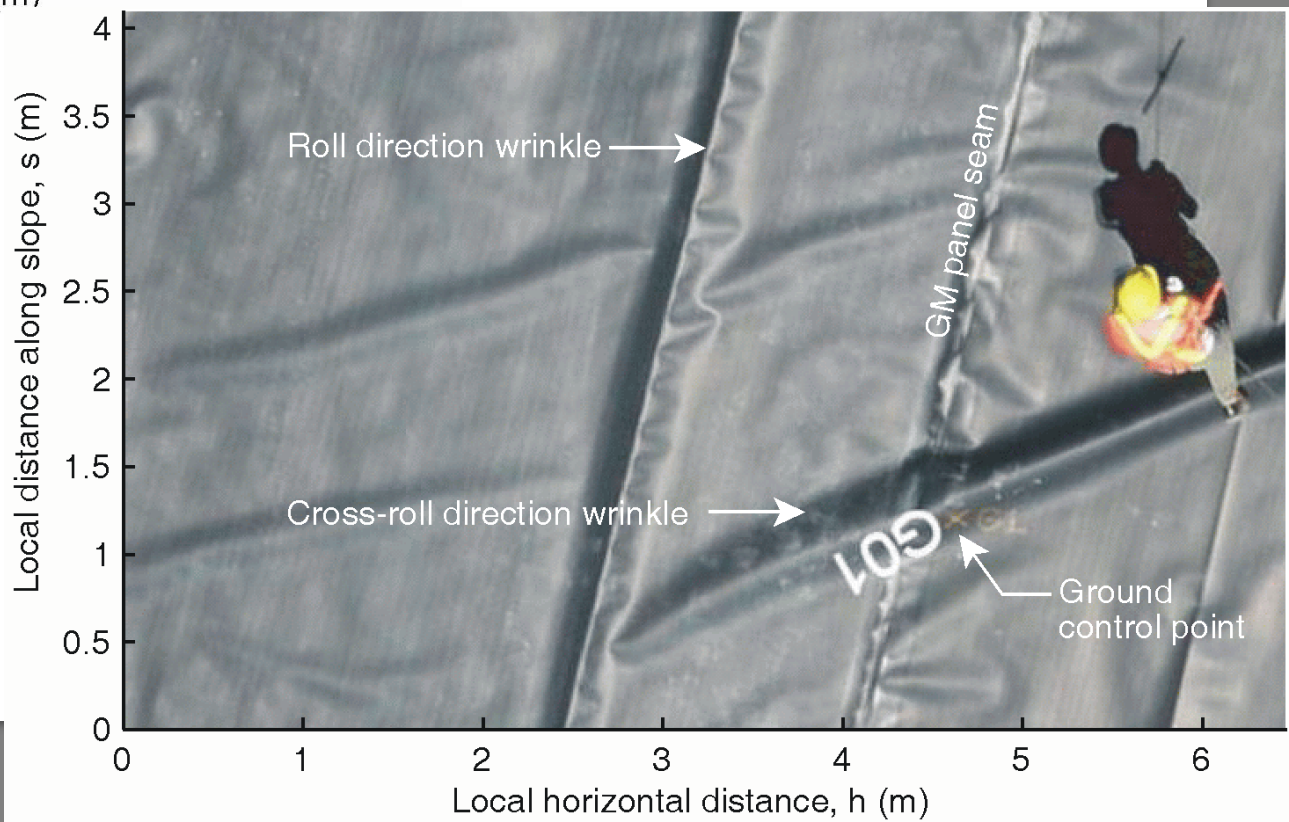
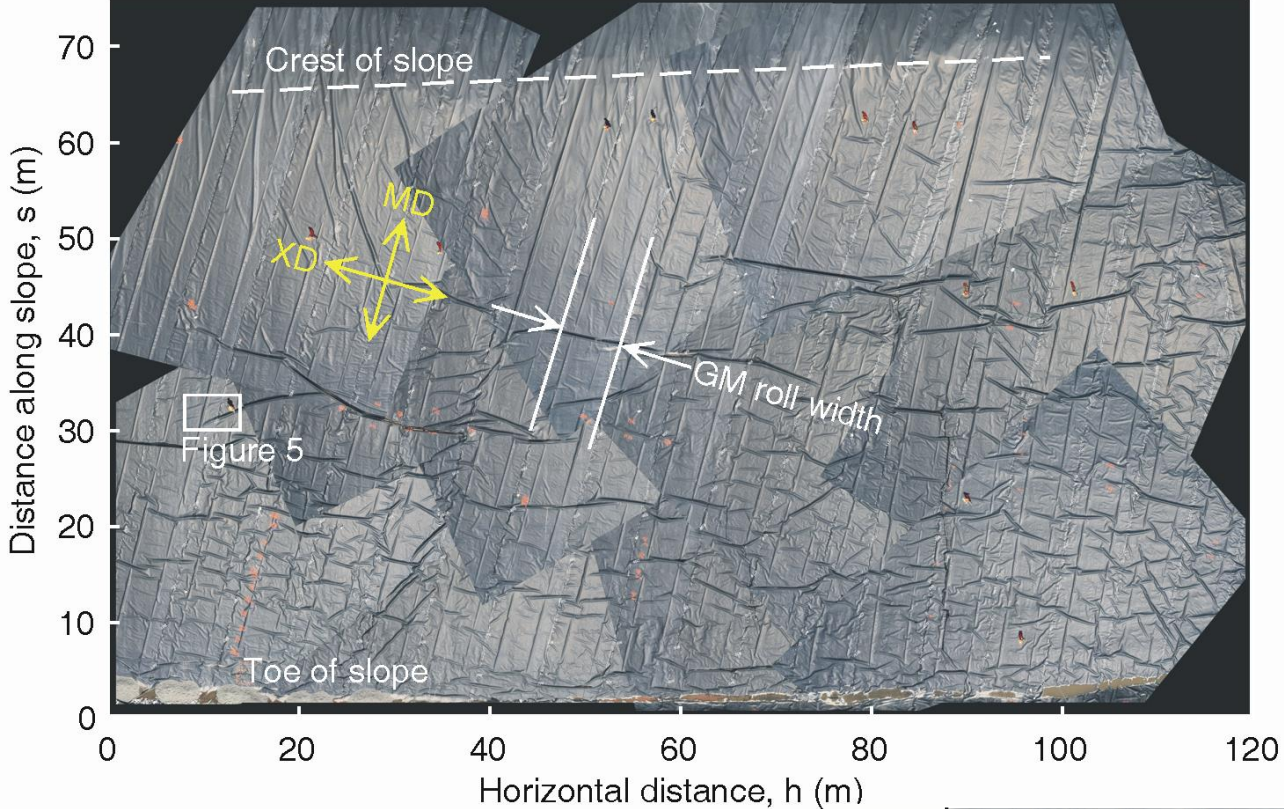
Long-range remote  
shutter release

Remote pan and  
tilt mechanism

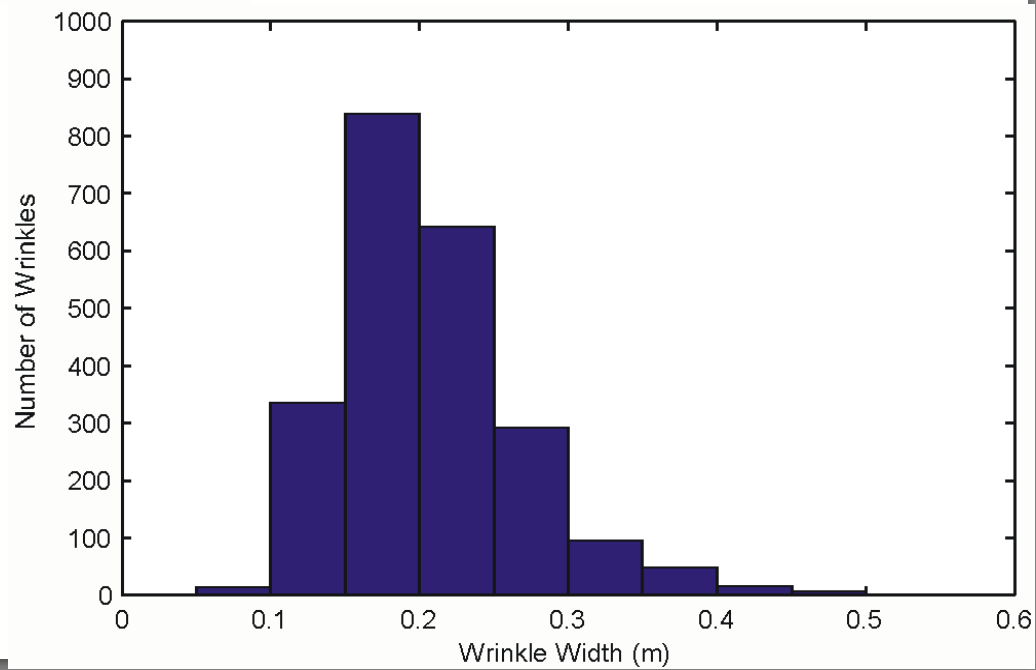
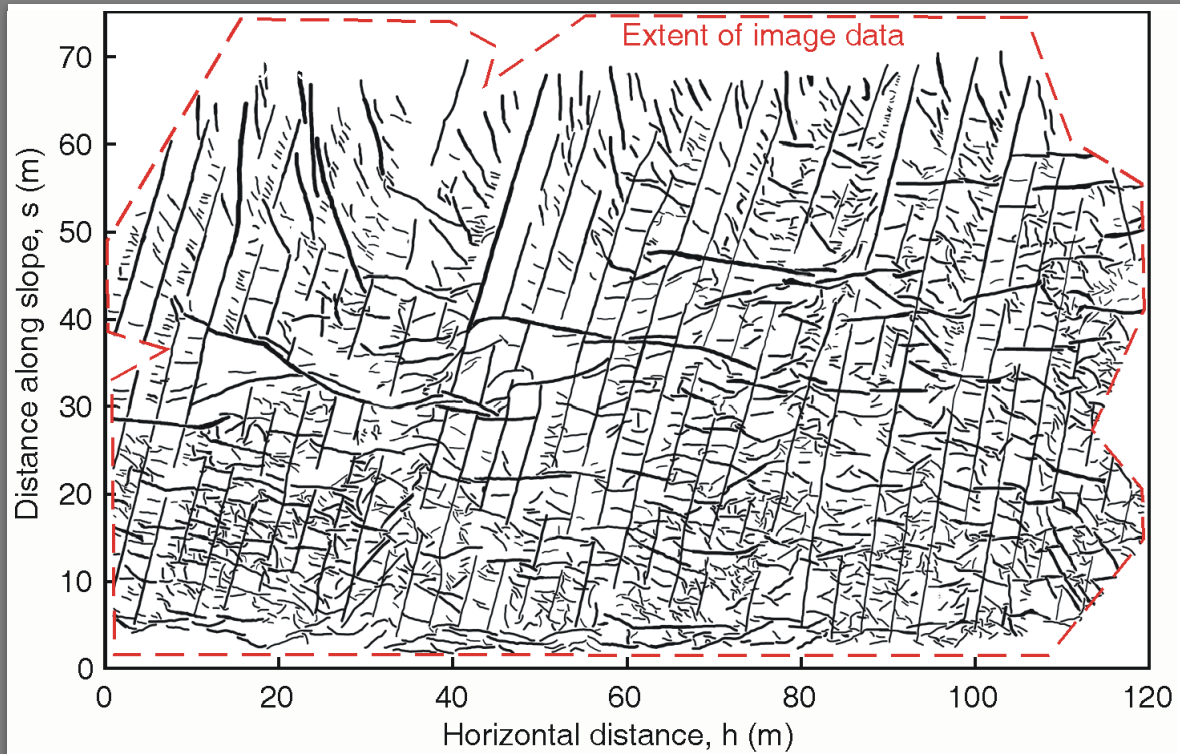
Tether line




Digital SLR  
camera









- 
- ❖ 2286 rugas com altura maior que 3 cm em uma área de 65 m x 120 m.
  - ❖ Maioria das rugas com larguras entre 0,1-0,3 m e comprimentos menores que 7 m.
  - ❖ Contudo, algumas rugas muito longas se estendendo por todo o comprimento do talude.
  - ❖ A porcentagem da área ocupada por rugas cresce com a distância do topo do talude, atingindo o valor máximo de 26% da área total.



Alibaba.com

Visitar

Heating Keep Pool Exposed Geomembrane Solar Cover, Geo Bubble Gold 500micron Solar Cover ...

4,9 ★★★★★ · \$ 5,00 USD\* · Esgotado · Marca: Ali

Heating Keep Pool Exposed Geomembrane Solar Cover, Geo Bubble Gold

Geosyntec  
consultants

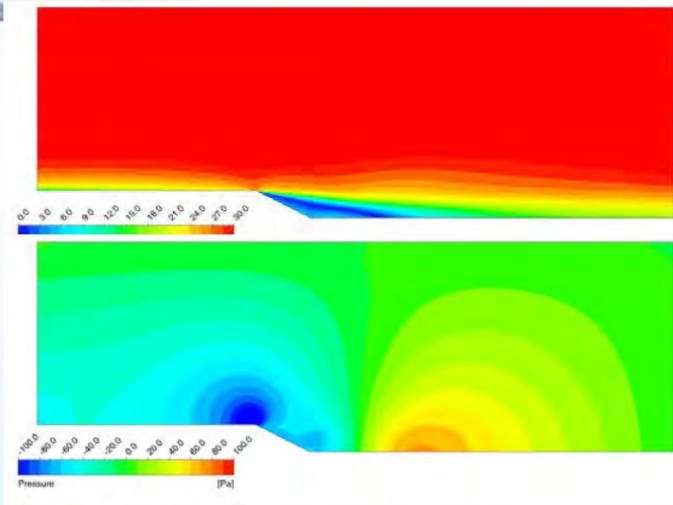
### Closure Turf

- Crazy Horse Landfill, CA
- 50-mil structured LLDPE
- Construction 2011-12
- Area 63 acres
- Anchored with Closure Turf
- Approved as Final



Sand is applied as a ballast eliminating the need for anchoring.

## Wind Uplift Predictions using CFD Modeling



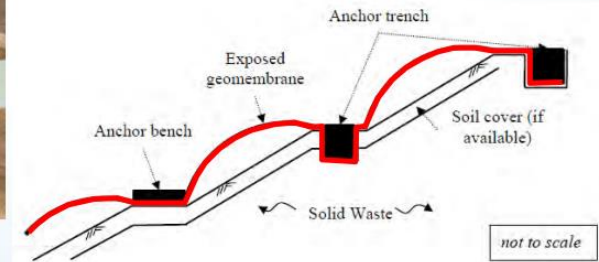
Wind  
Speed

Wind Uplift  
Pressure

Botelho, Heynes, and Giroud, "Evaluating Wind Uplift for Exposed Geomembranes using Computer Modeling", Geosynthetics 2013, April 1-4, Long Beach, California

## Wind Uplift – Typical Anchor Trench Design

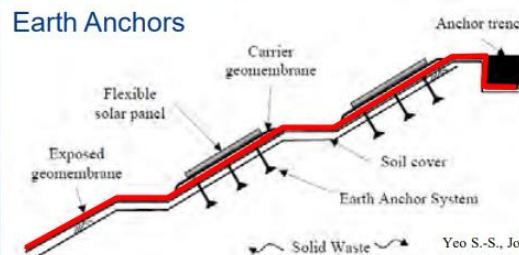
- Vertical anchor trenches are the most common method
  - 3x3-ft trenches every 60-100 feet
  - Average cost \$20,000 per acre



## Wind Uplift – Earth Anchors

- Earth anchors are new, less costly method
  - No trenching/backfilling, geomembrane use reduced by 15%
  - Anchor every 15-25 feet
  - Average cost \$10,500 per acre

### Earth Anchors



Yeo S.-S., Johnson R.S., Corcoran G.T. (2011) Alternative anchorage methodology for exposed geomembrane installations with flexible solar photovoltaic panels, Proc. Geo-Frontiers 2011, 13-16 Mar 2011, Dallas, TX.

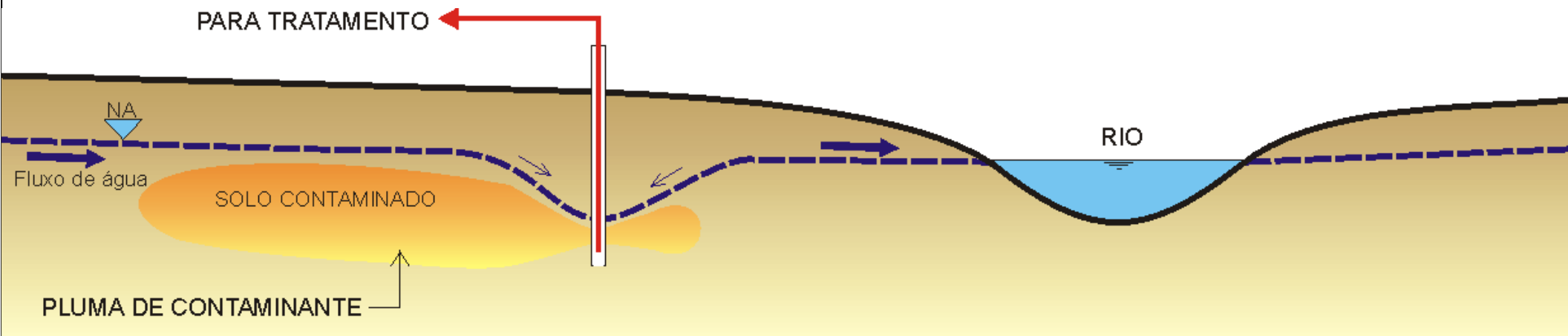
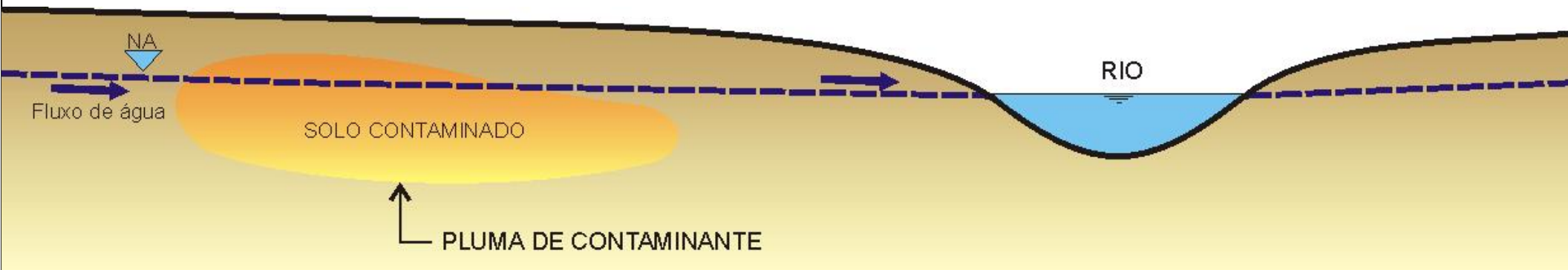
Othman, 2013

# BARREIRAS HIDRÁULICAS

- ❖ Contaminação do lençol freático por substâncias solúveis em água, com a formação de pluma de contaminação dissolvida
- ❖ Casos específicos de presença de plumas de fase livre que se movimentam rápida ou lentamente em direção a determinado corpo d'água



# Princípio de funcionamento de barreiras hidráulicas




(Campos, 2003)

# BARREIRAS HIDRÁULICAS

- ❖ Impedir avanço da pluma a partir de determinado ponto e fazer regredir uma determinada pluma que já esteja quase em contato com algum rio ou nascente.
- ❖ Princípio do funcionamento: executar um bombeamento das águas subterrâneas contaminadas, encaminhando-as para tratamento em uma Estação de Tratamento de Efluentes, e posterior descarte e/ou devolução ao lençol através de injeção ou simples infiltração.

# BARREIRAS HIDRÁULICAS

- ❖ Poços verticais de bombeamento (ponteiras filtrantes e poços de pequeno ou grande diâmetro) são instalados ao longo de uma linha.
- ❖ São geralmente implantados no limite da pluma de contaminação ou dentro da própria pluma, recuperando e encaminhando para tratamento a água captada.
- ❖ O número e a disposição de poços são dependentes das características geotécnicas do solo local, e da localização e profundidade da pluma de contaminação.

- 
- ❖ A utilização de barreiras hidráulicas para contenção de plumas de contaminação é historicamente uma das primeiras formas de remediação que foram utilizadas.
  - ❖ Uma barreira hidráulica consiste na instalação de uma sequência de poços de bombeamento de forma a interceptar a pluma de contaminação, assegurando que não haja progresso da contaminação além do limite estabelecido pela barreira.
  - ❖ É uma técnica de contenção da evolução da pluma e também de remediação, uma vez que a água produzida deve ser tratada em superfície.
  - ❖ Também denominada *pump-and-treat*.
  - ❖ A quantidade de água que deve ser bombeada é muito grande, e o tempo de operação pode facilmente chegar às dezenas de anos.

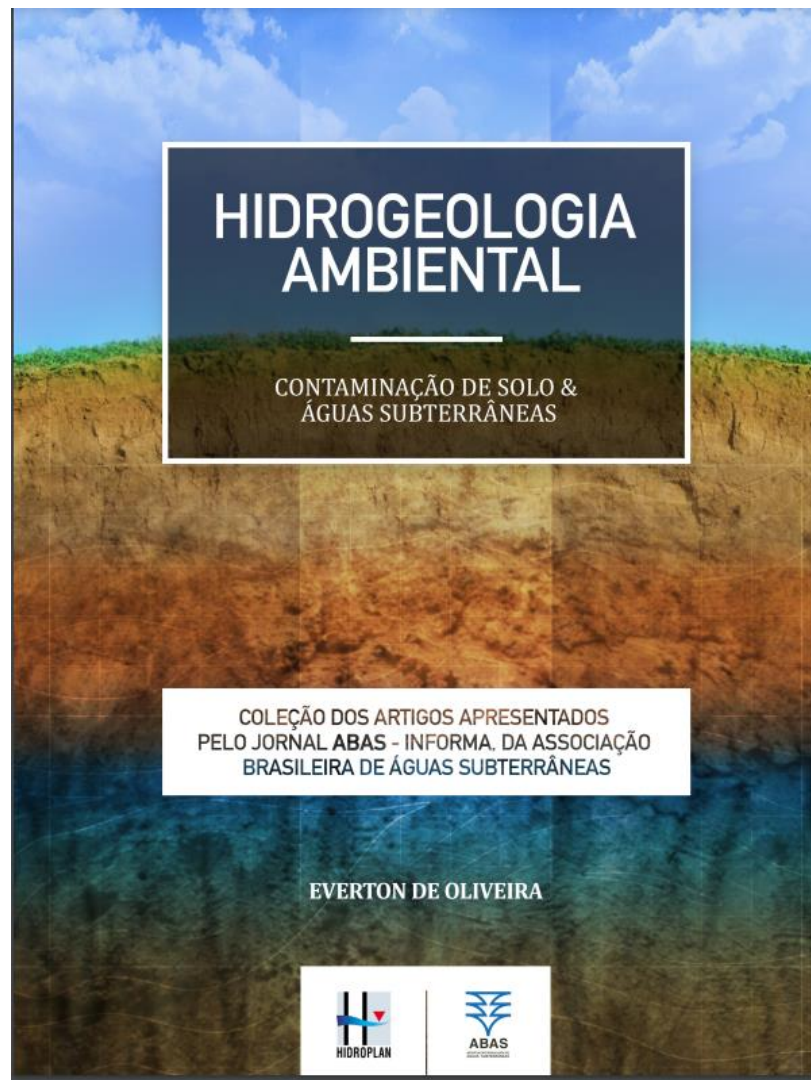
(Oliveira, 2016)



# ***PUMP AND TREAT***

## **BOMBEAMENTO E TRATAMENTO**

- ❖ Aceleração da remoção dos contaminantes do aquífero por meio de injeção de surfactantes ou de cossolventes, e complexação de agentes que favoreçam a dessorção ou dissolução.
- ❖ Alto custo, pouca eficiência.
- ❖ Um dos únicos processos possíveis na contenção de plumas a grandes profundidades.
- ❖ Geralmente utilizado com outras técnicas.

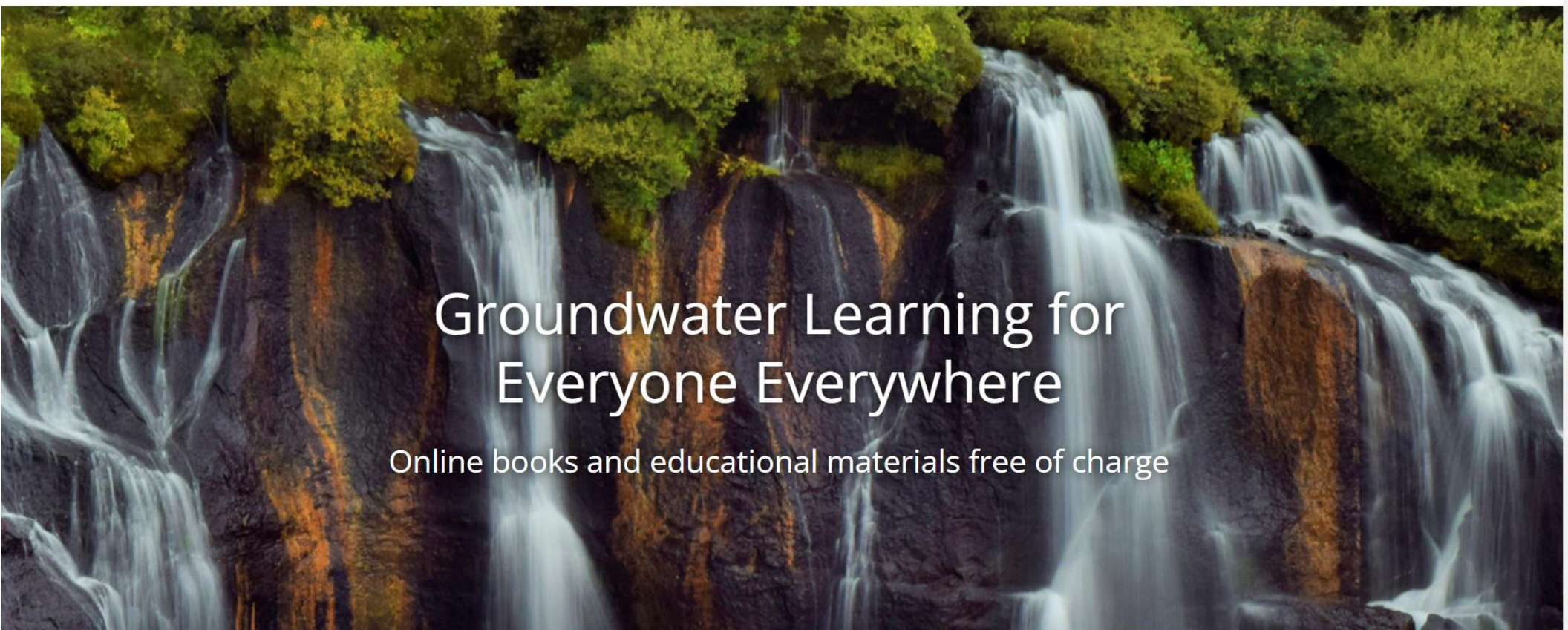




Online Platform for Groundwater Knowledge

Donate


[Home](#) [About](#) [Books](#) [Blog](#) [Volunteer](#) [English](#) ▾



# Groundwater Learning for Everyone Everywhere

Online books and educational materials free of charge



- 
- ❖ Em inúmeros casos a barreira hidráulica é a única forma possível de remediação, devido a dificuldades de acesso ao contaminante (e.g., profundidade do aquífero contaminado).
  - ❖ Em vários outros casos, é uma técnica acessória, permitindo a remediação segura das áreas-fonte, enquanto a barreira garante que o contaminante em fase dissolvida não atinja eventuais receptores potenciais a jusante da área impactada.
  - ❖ Não é incomum haver corpos d'água nas proximidades da área contaminada. Como a barreira hidráulica baseia-se no rebaixamento do nível d' água, é possível que ocorra uma inversão de fluxo suficiente para que seja bombeada água do corpo superficial para a barreira. Uma barreira colocada ao longo de um córrego ou rio, por exemplo, pode trazer água deste para si.
  - ❖ Caso a água do corpo superficial seja de má qualidade, corre-se o risco de ter que se tratar água superficial em conjunto com a contaminação.

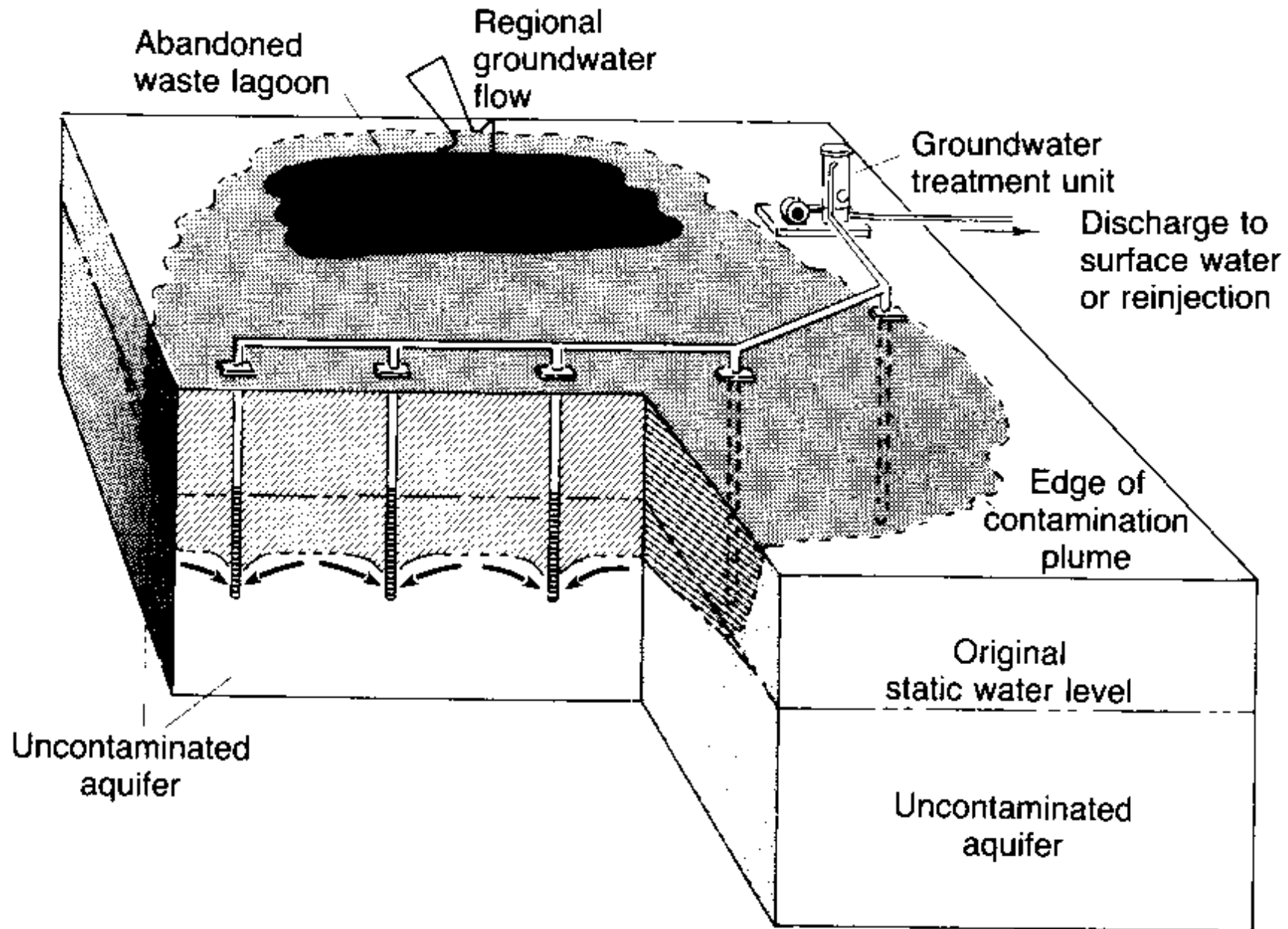
(Oliveira, 2016)



# BARREIRAS HIDRÁULICAS

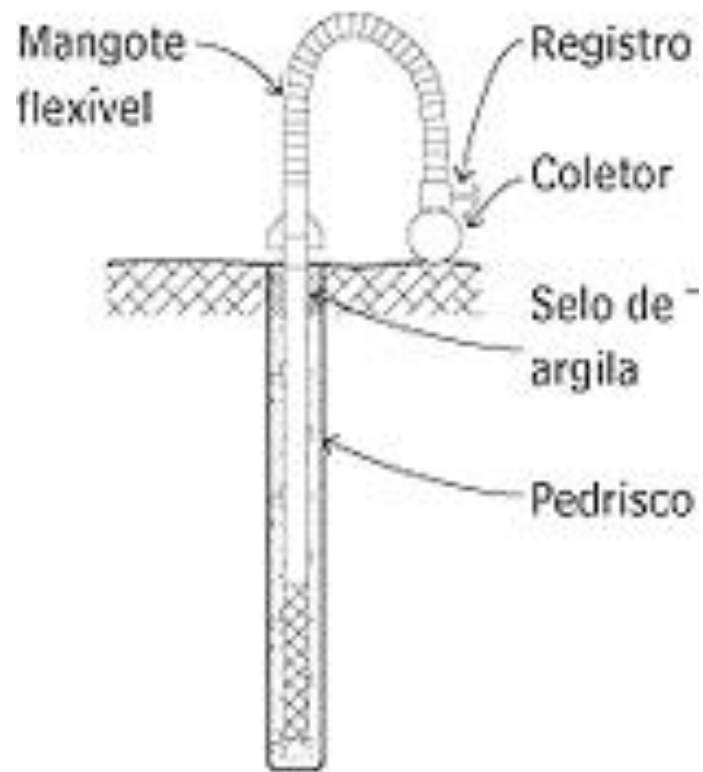
- ❖ Ponteiros filtrantes a vácuo
- ❖ Drenos escavados
- ❖ Poços de bombeamento de pequeno diâmetro
- ❖ Poços de bombeamento de grande diâmetro
- ❖ Drenos horizontais profundos (DHP)

# Pump and treat



(Daniel, 1993)

### Esquema básico




### Processo de perfuração





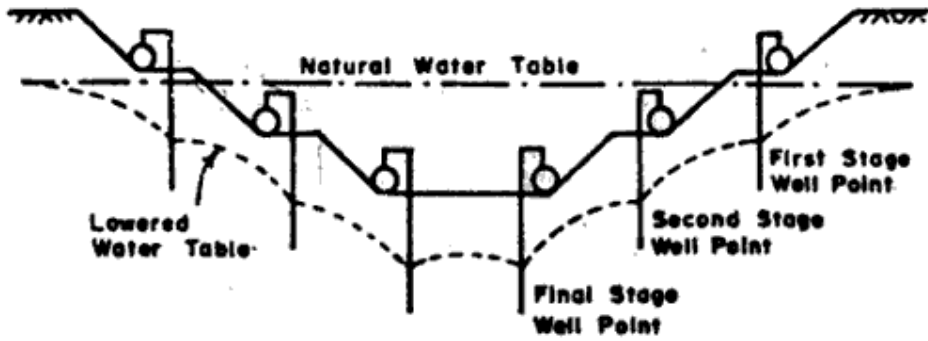




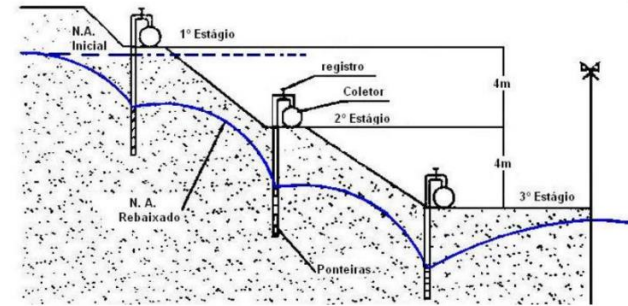


As ponteiras filtrantes (*well points*) devem ser instaladas somente em casos onde a pluma de contaminantes esteja limitada a, no máximo, cinco metros de profundidade, devido à capacidade limitada de funcionamento das ponteiras com a profundidade do lençol freático.

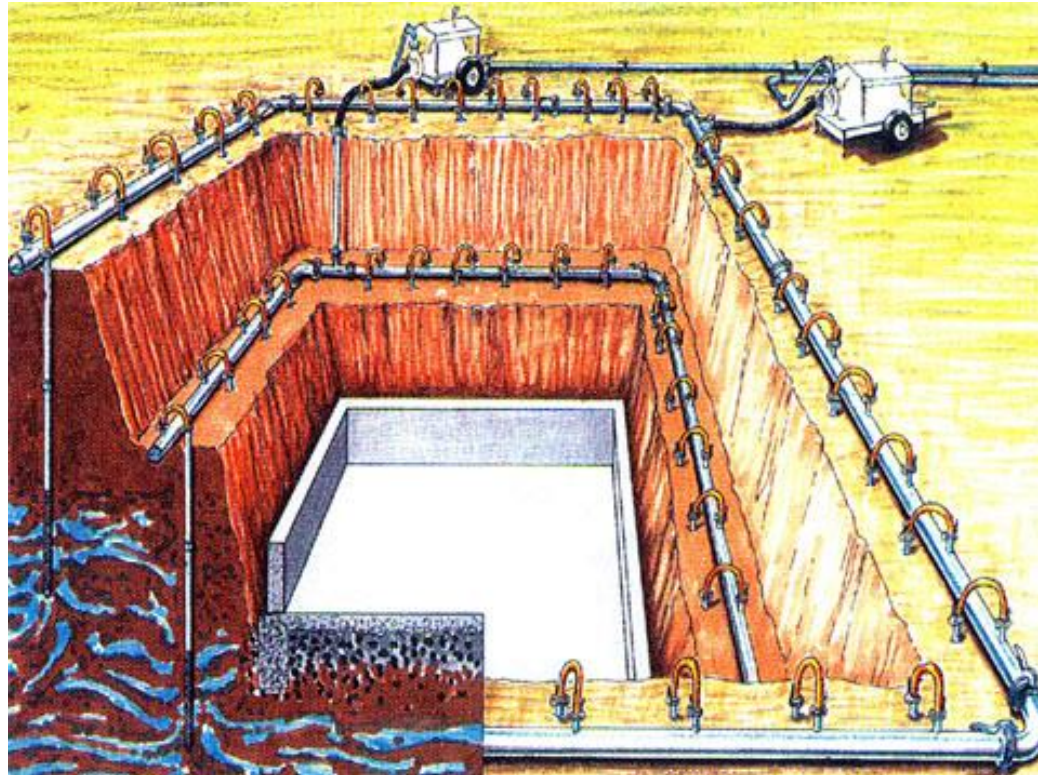
Uma solução possível para maiores profundidades é a utilização de várias linhas de ponteiras em diferentes profundidades.



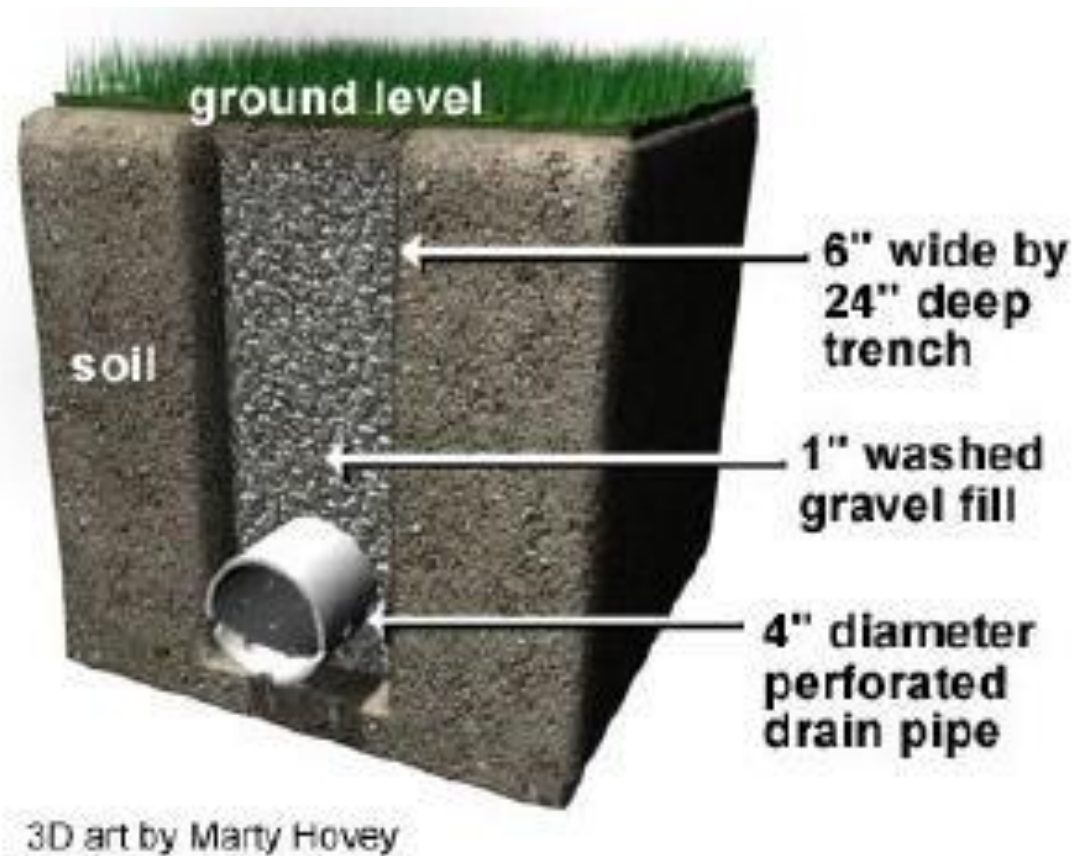
<http://www.abuildersengineer.com/2012/11/excavations-well-point-system.html>



Urbano, 1999



# Drenos escavados ou trincheiras drenantes



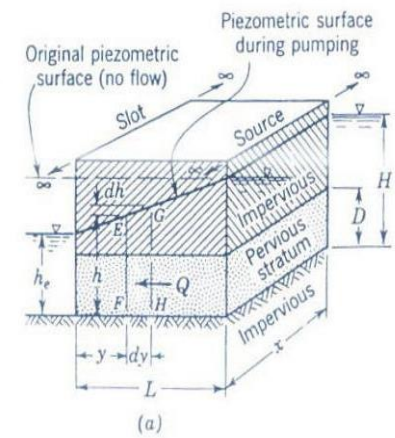
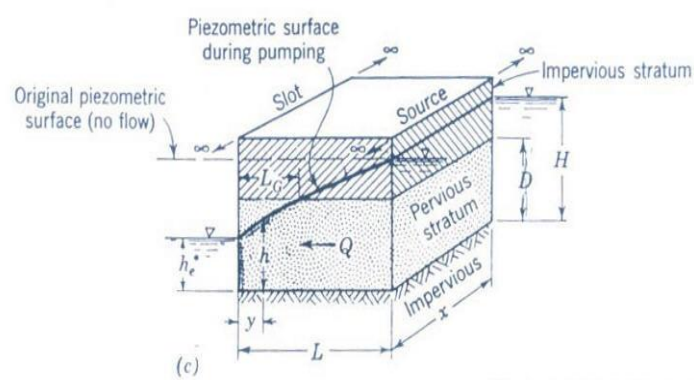
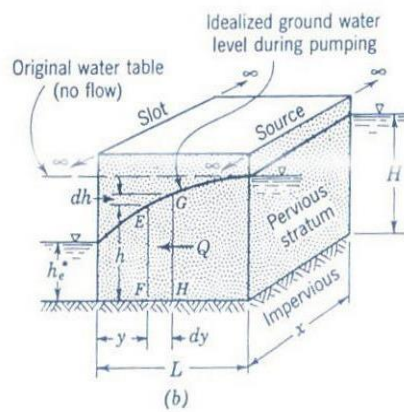




<http://fibratex.com.br/index.php/produtos/geotextil>



<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/execucao>

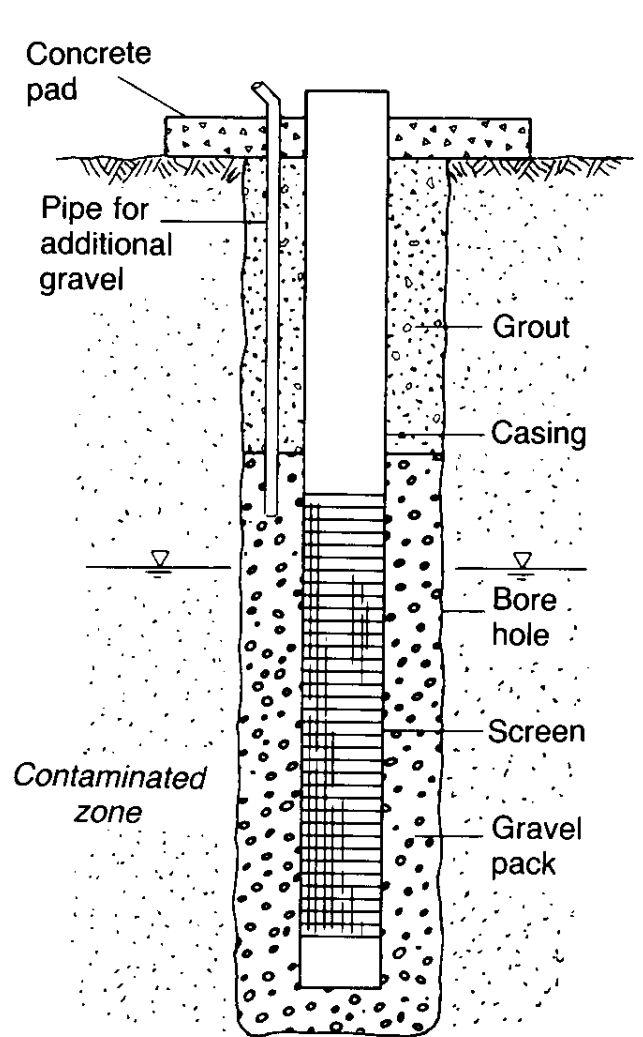




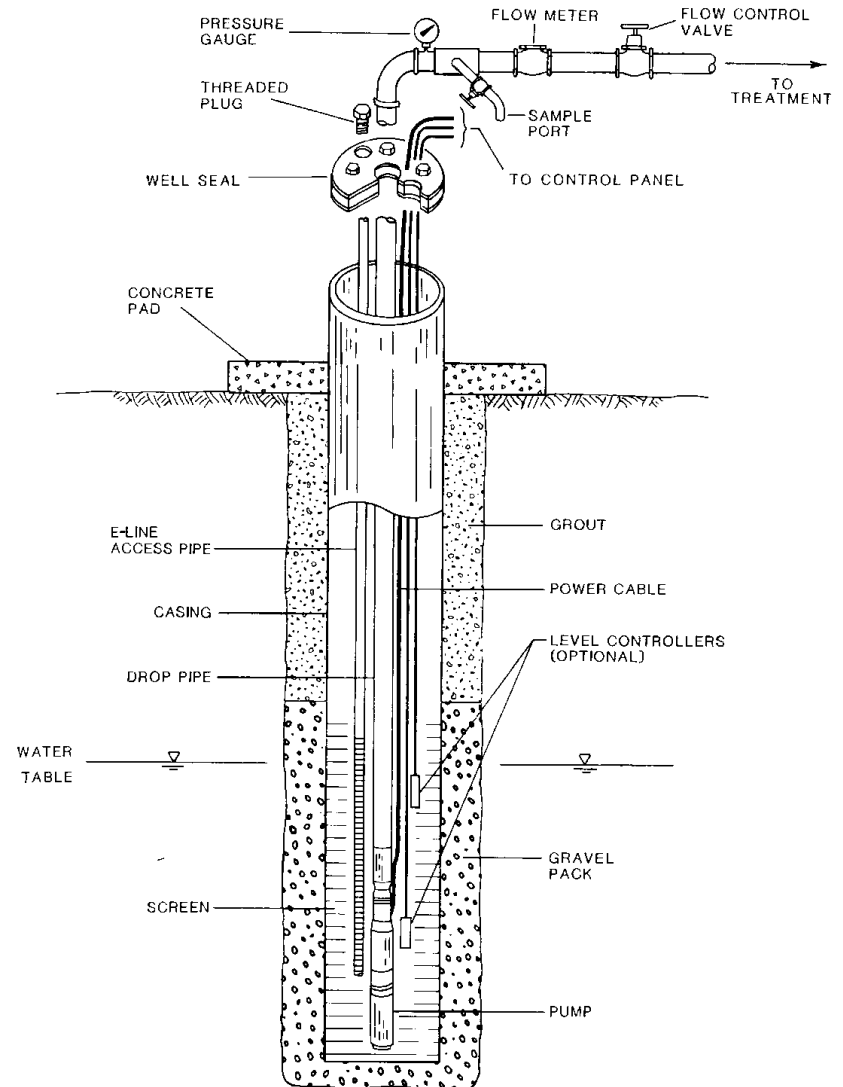
Published April 20, 2017 at 2448 x 3264 in Hydraulic Capture



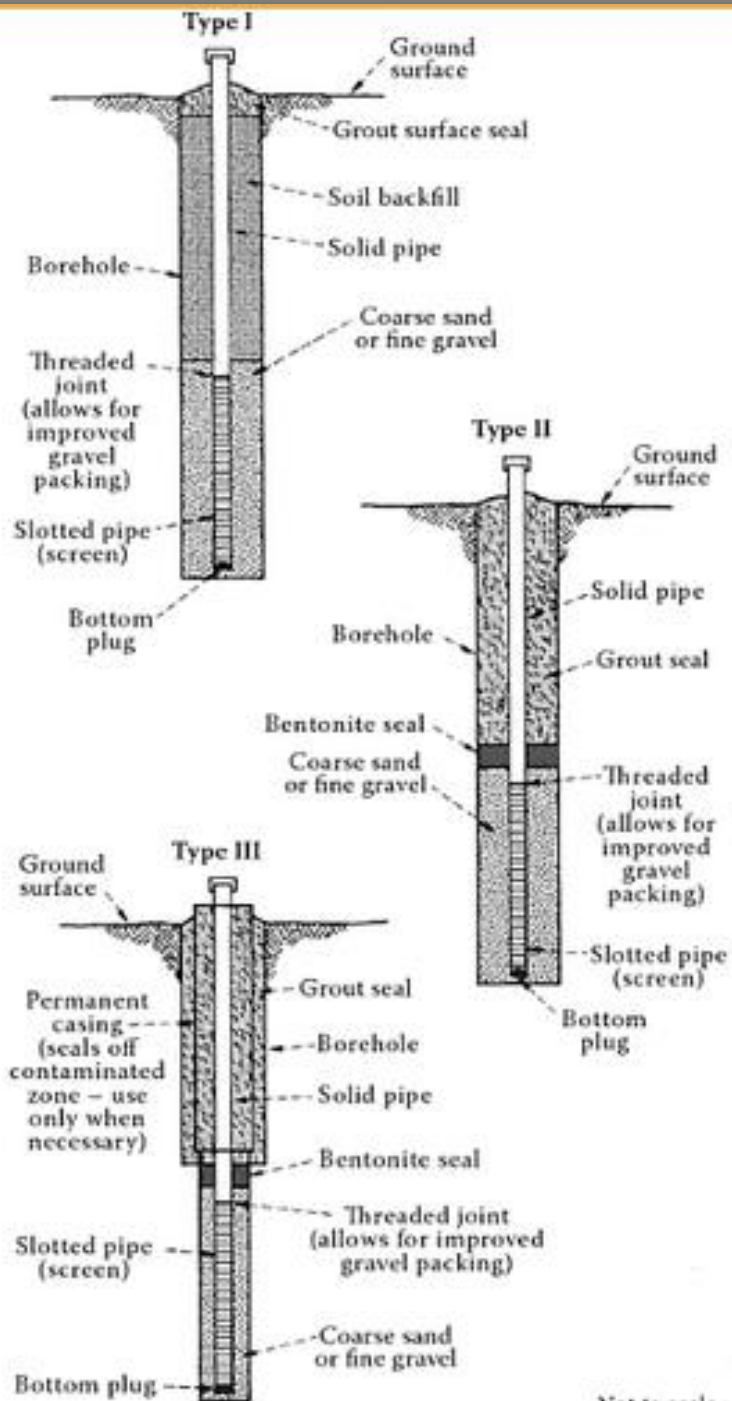
# Poço de bombeamento: (a) com bomba externa; (b) com bomba submersa



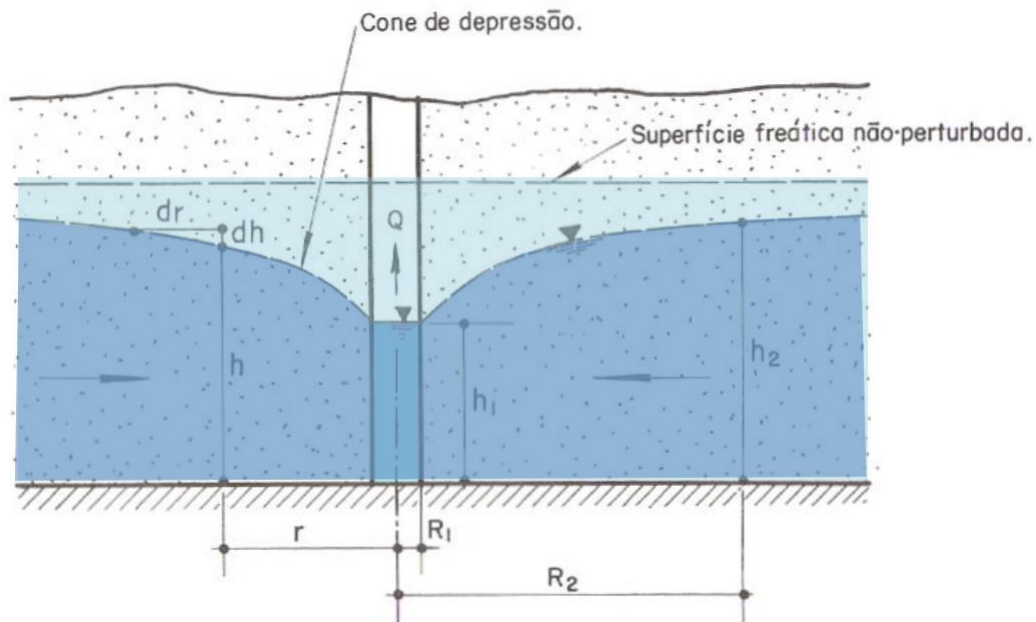
(a)



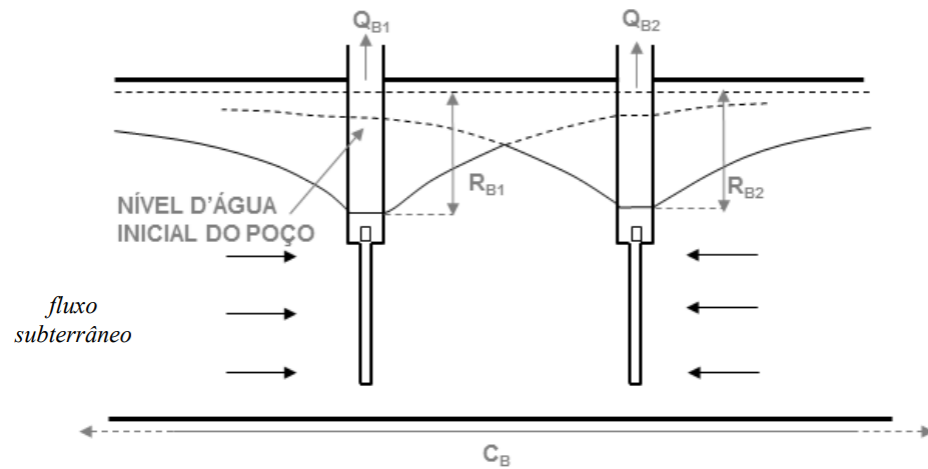
(b)



Not to scale

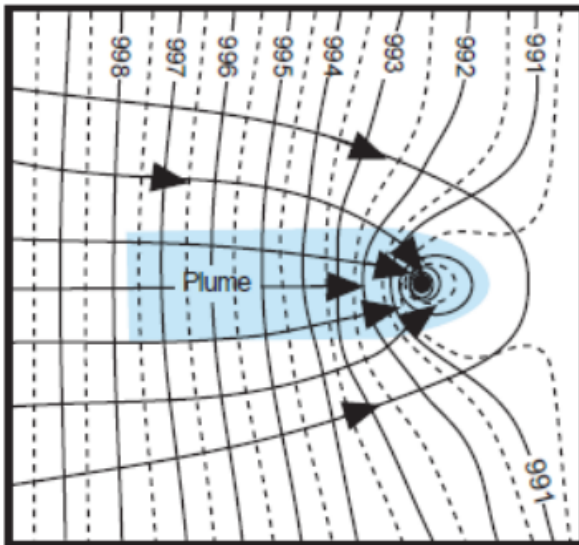


[https://docs.ufr.br/~rtkishi.dhs/TH024/TH024\\_16\\_Escoamento\\_Subterraneo.pdf](https://docs.ufr.br/~rtkishi.dhs/TH024/TH024_16_Escoamento_Subterraneo.pdf)

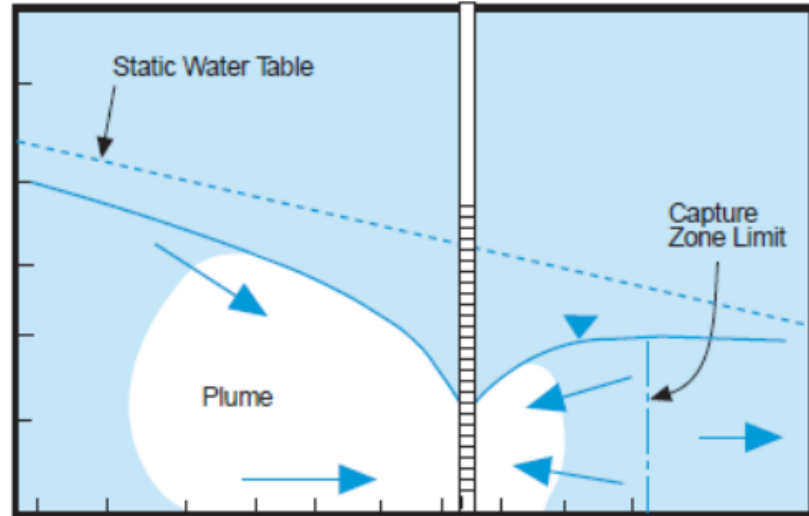


[https://www.abas.org/xixcabas/anais/103016\\_113\\_ESTIMATIVA\\_DO\\_RAIO\\_DE\\_INFLUENCIA\\_D OS\\_POCOS\\_DE\\_REBAIXAMENTO\\_DA\\_MINA\\_F4\\_E\\_SUA\\_AREA\\_DE\\_INTERFERENCIA.pdf](https://www.abas.org/xixcabas/anais/103016_113_ESTIMATIVA_DO_RAIO_DE_INFLUENCIA_D OS_POCOS_DE_REBAIXAMENTO_DA_MINA_F4_E_SUA_AREA_DE_INTERFERENCIA.pdf)





(a)







<https://www.hidrotecengenharia.com.br/barreira-hidraulica>



<https://www.doxor.com.br/remediacao-ambiental-agua-subterranea#group1-2>

- 
- ❖ São eficientes quando implantados em solos permeáveis, com coeficientes de permeabilidade superiores a  $10^{-5}$  cm/s.
  - ❖ São utilizados com sucesso onde existe a presença de solo razoavelmente permeável e homogêneo, sem a presença de camadas mais permeáveis preferenciais para o fluxo.

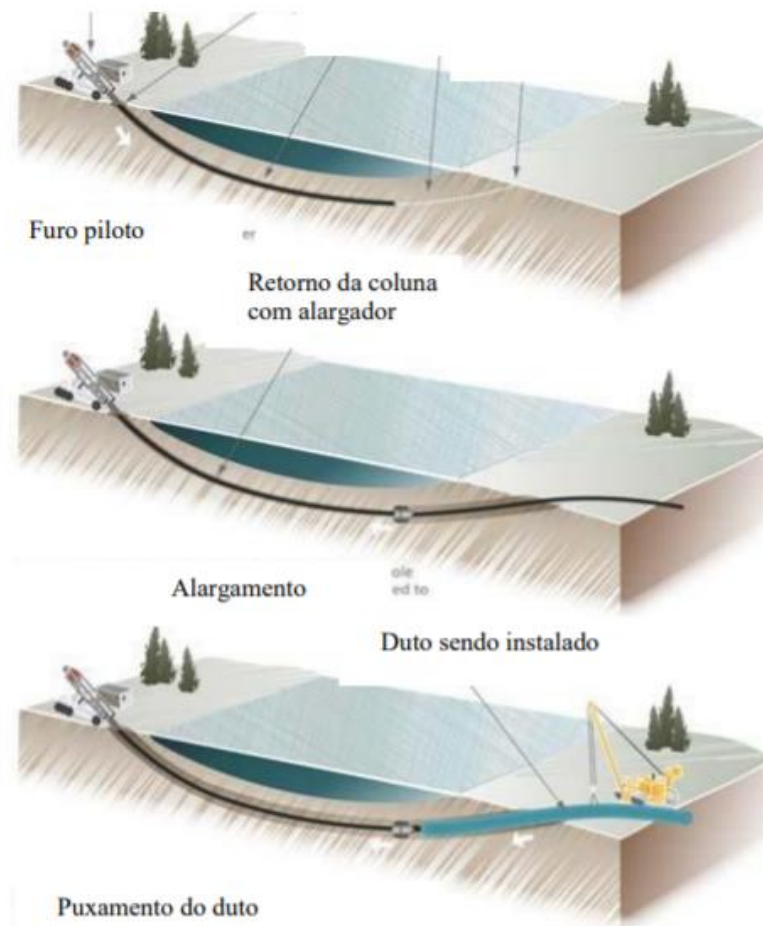
- 
- ❖ Tanto a instalação de poços de bombeamento, quanto a implantação de sistemas constituídos por cortinas de ponteiros filtrantes, possuem a dificuldade de implantação em locais com atividades ainda em operação, como por exemplo fábricas ou postos de combustíveis, devido ao elevado número de perfurações e tubulações a serem implantados.
  - ❖ As alternativas que envolvem grandes escavações, como o dreno convencional e os poços de grande diâmetro, geram elevados volumes de solo e água contaminados durante a implantação do sistema.



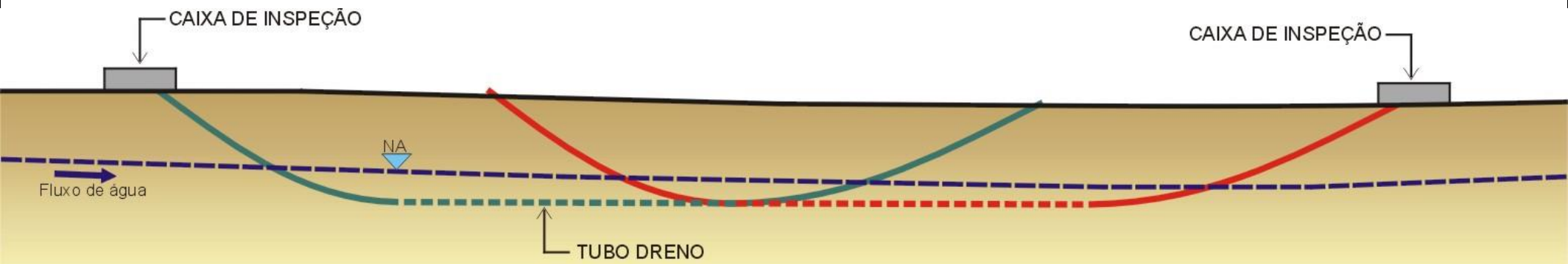
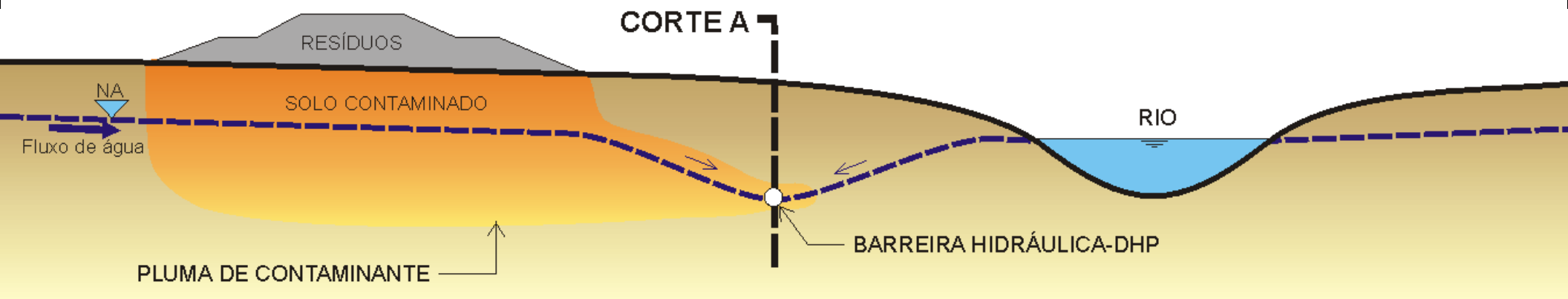


Instalação de DHP por perfuração  
direcionada a partir da superfície

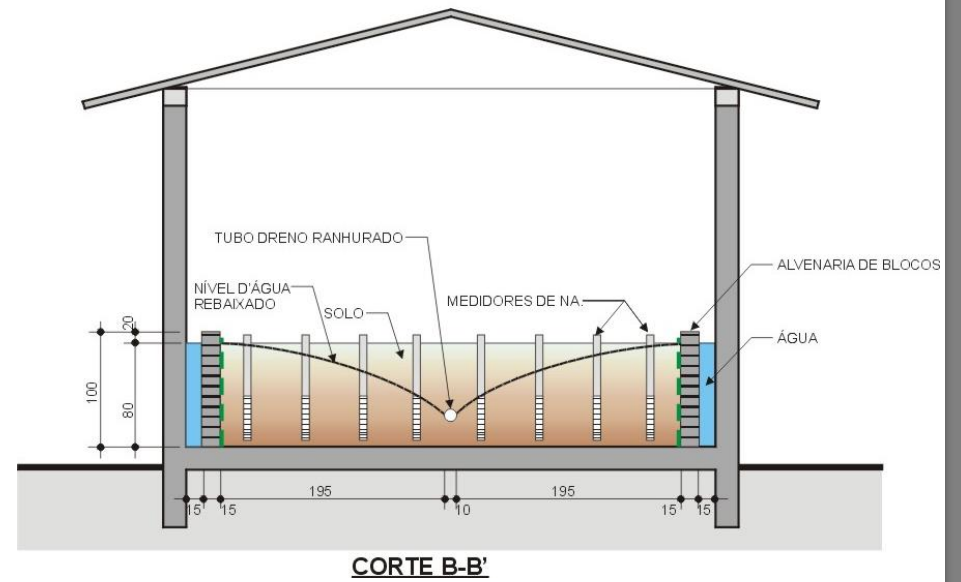
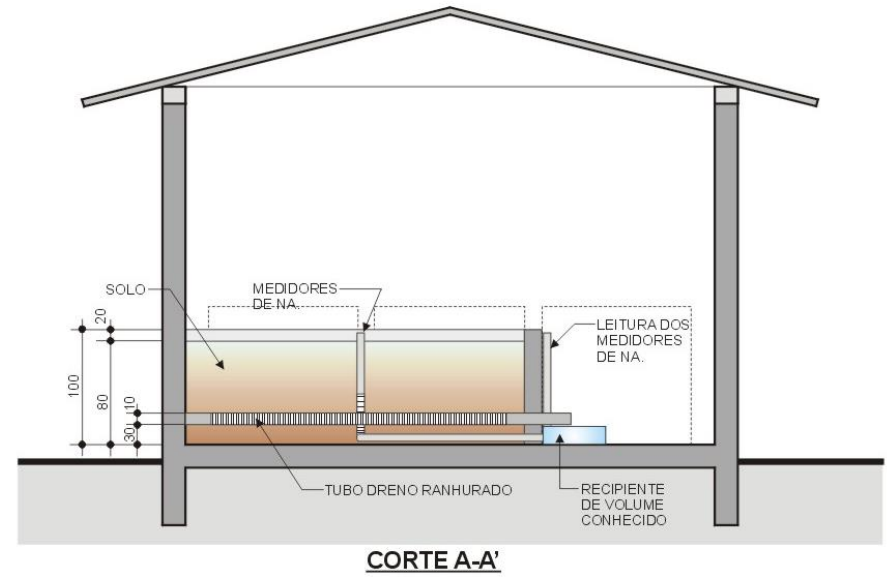
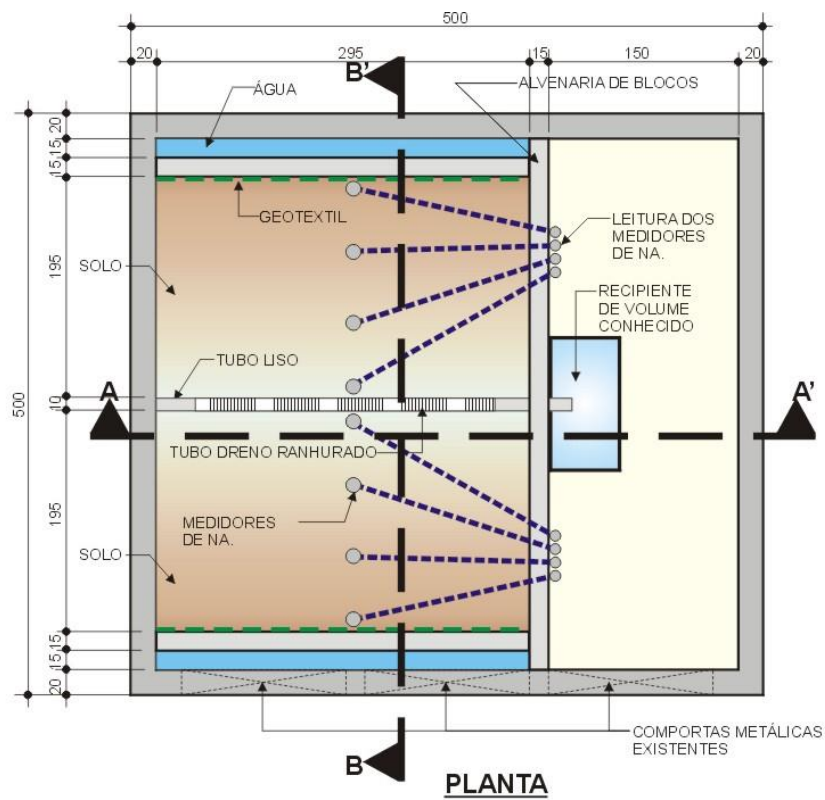
(Campos, 2003)



(Ribeiro Jr., 2012)



Barreira hidráulica por DHP  
(Campos, 2003)



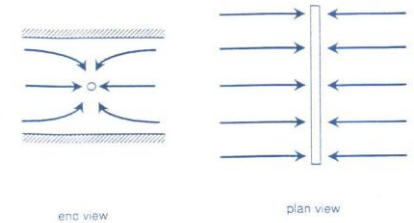
(Mello, 2003)



## Kawecki, 2000

Fluxo linear primário em um aquífero livre :

$$h_e - h_w = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \times \frac{2Q}{LK_x(D_0 + h_e)} \sqrt{\frac{(D_0 + h_e)K_x t}{2S_y}} + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} (\sigma_z + \sigma)$$



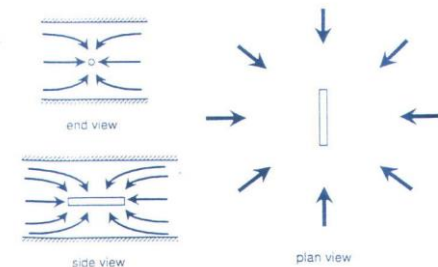
Fluxo pseudorradial:

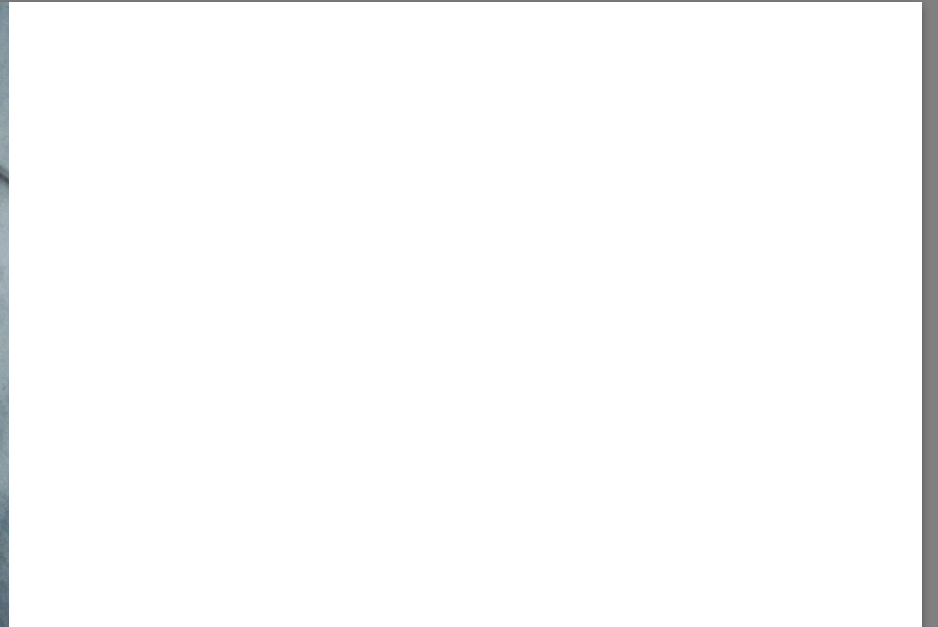
$$h_e - h_w = \frac{Q}{\pi K_h (D_0 + h_e)} \ln \left( \frac{1.5 \sqrt{(D_0 + h_e) K_y t / 2S_y}}{L/4} \right) + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} (\sigma_z + \sigma)$$

onde

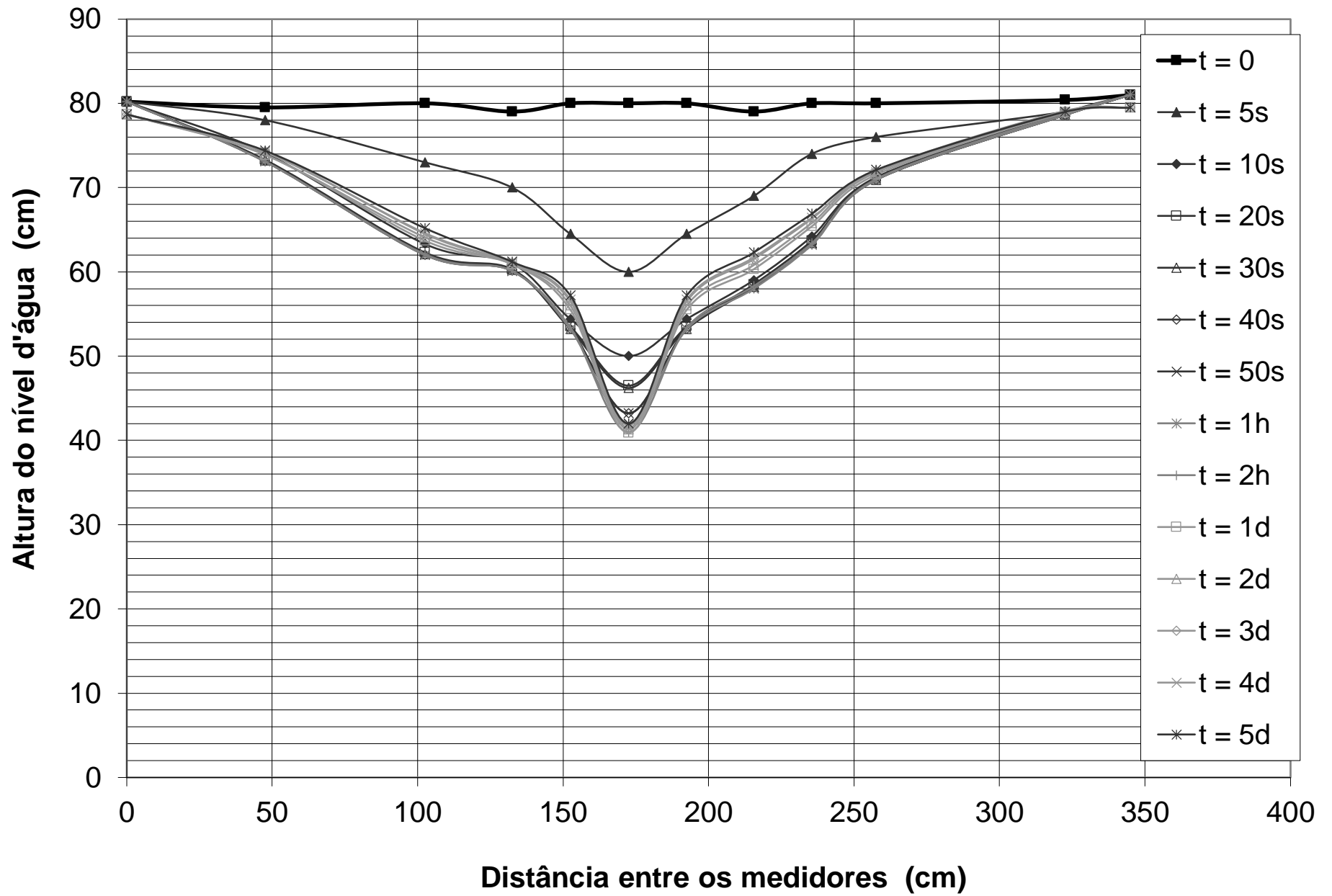
$$D_0 = h_w + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} (\sigma_z + \sigma)$$

$$\sigma_z = \ln \left( \frac{D_0}{2\pi r_w} \right) + 0.25 \ln \left( \frac{K_x}{K_z} \right) - \ln \left( \text{sen} \frac{180^\circ z_w}{D_0} \right)$$

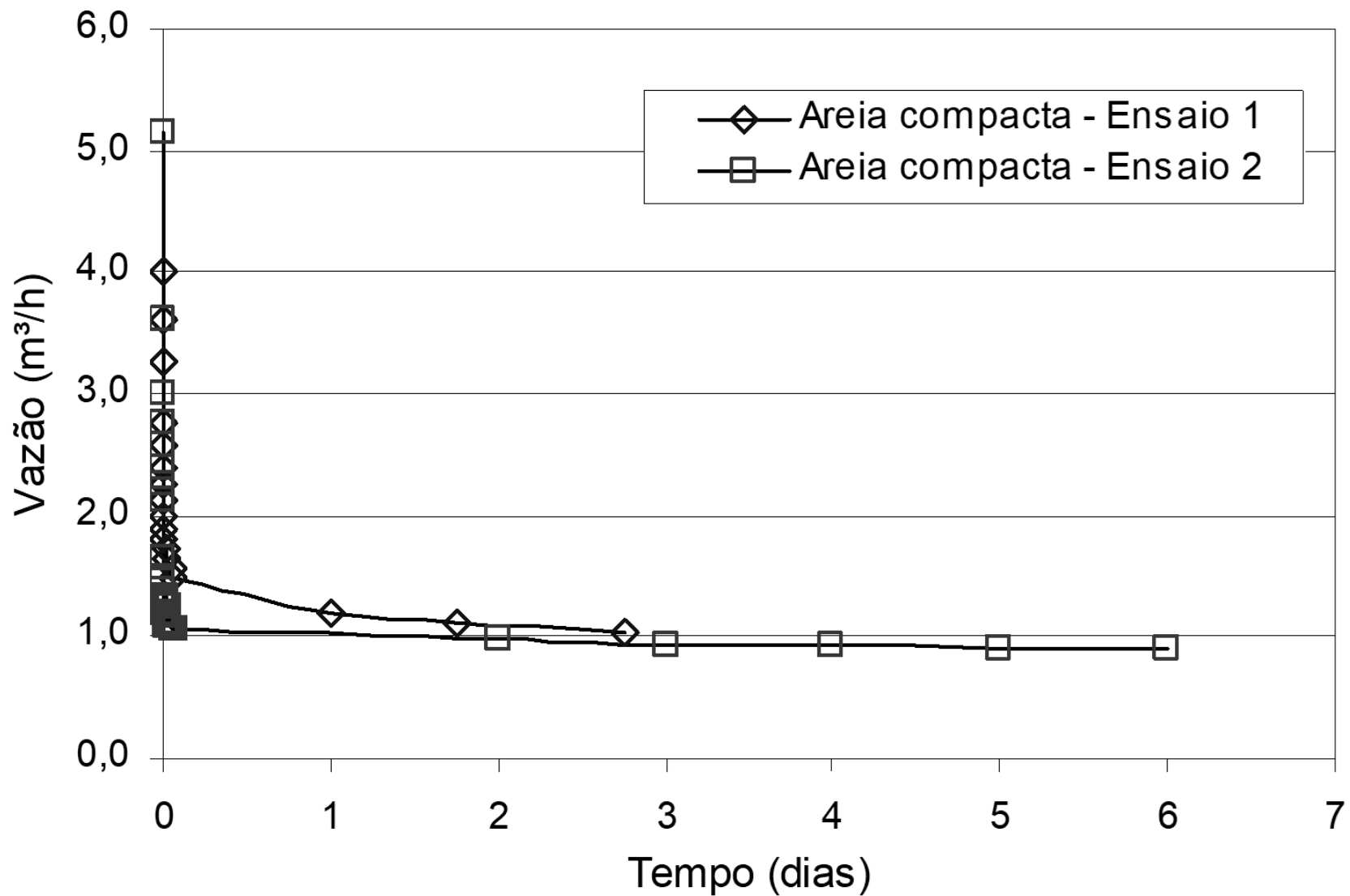




(Mello, 2003)

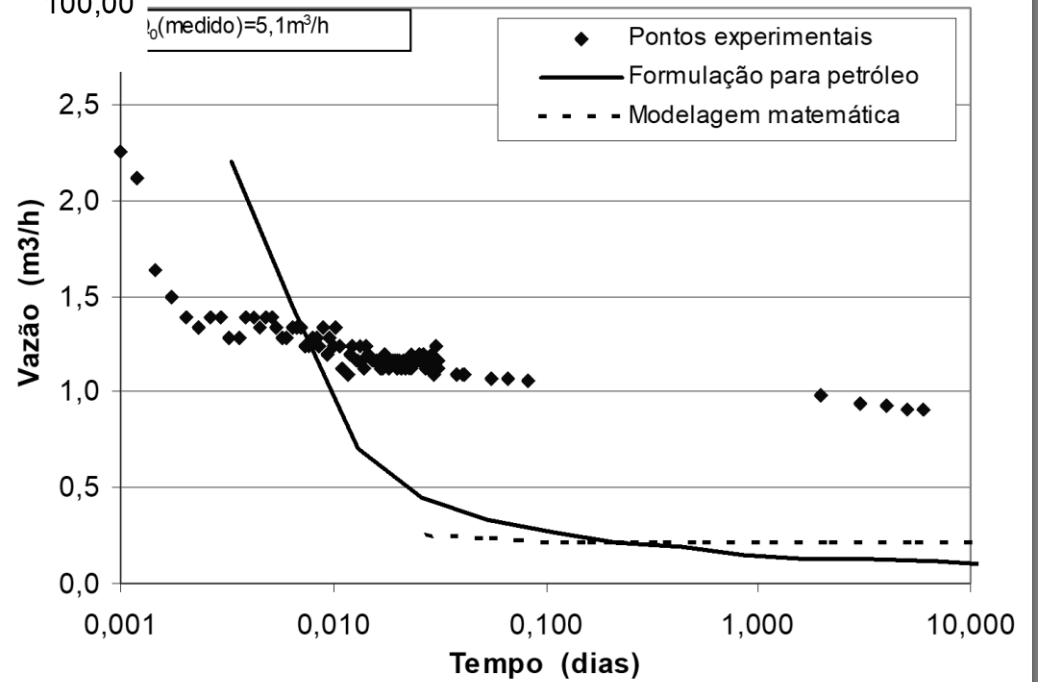
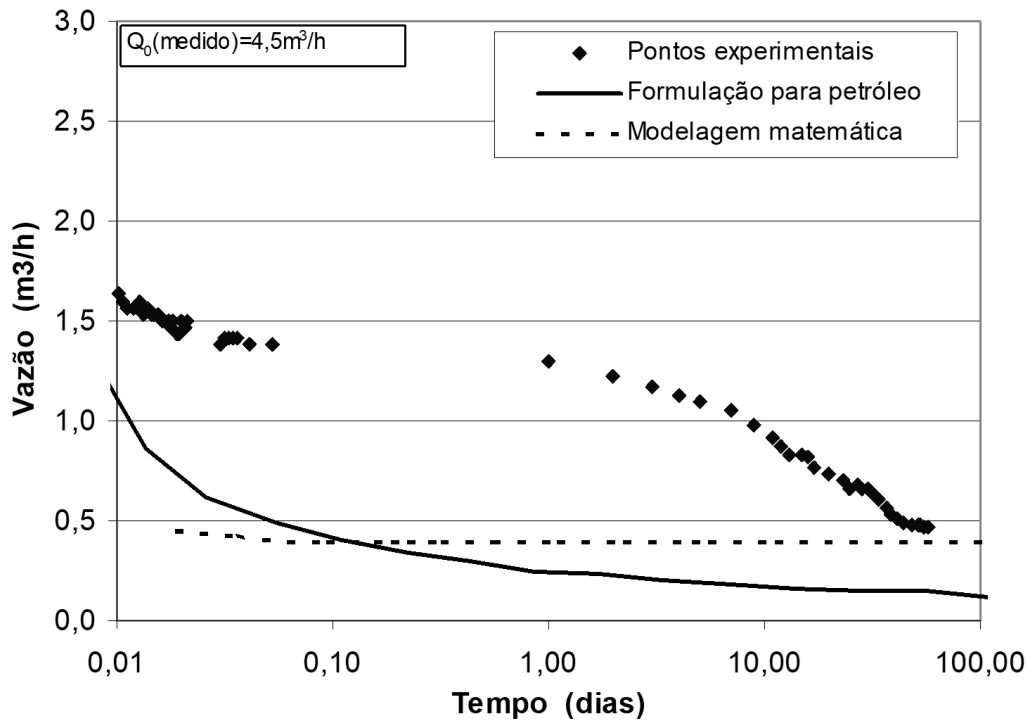


(Mello, 2003)

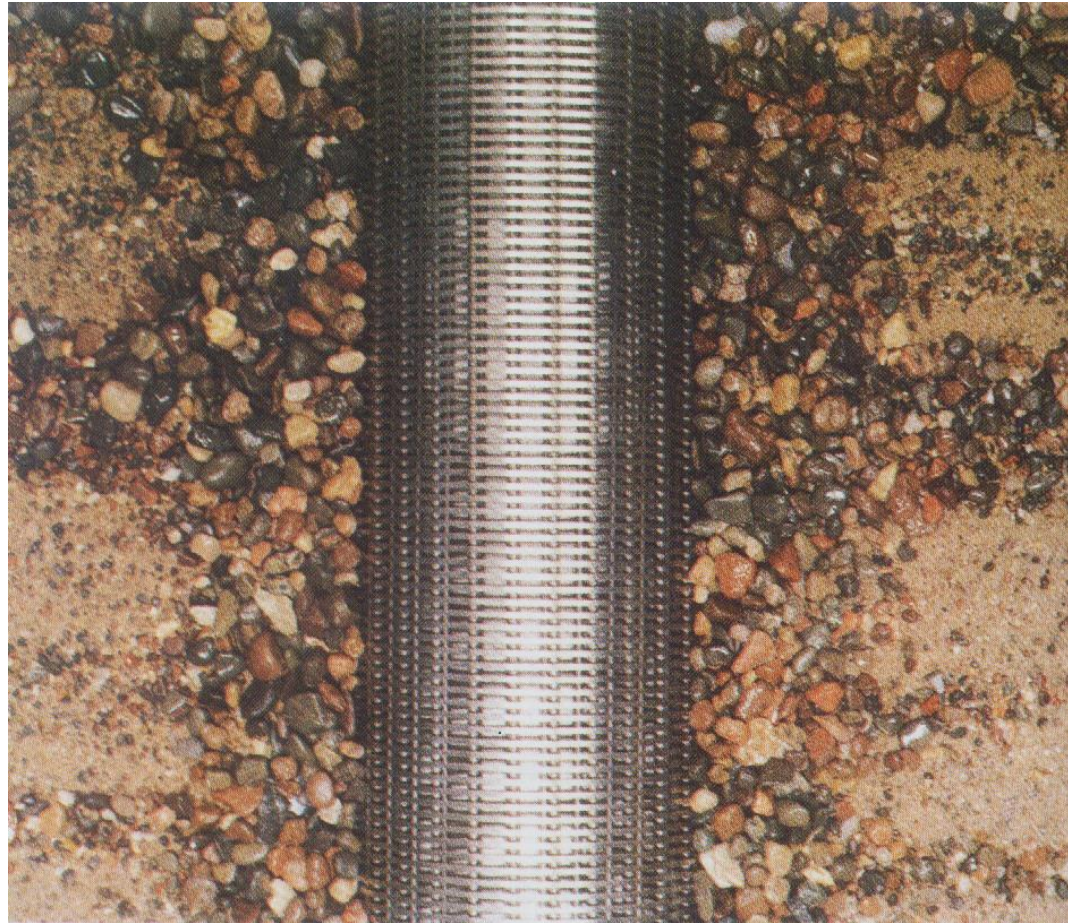


(Mello, 2003)





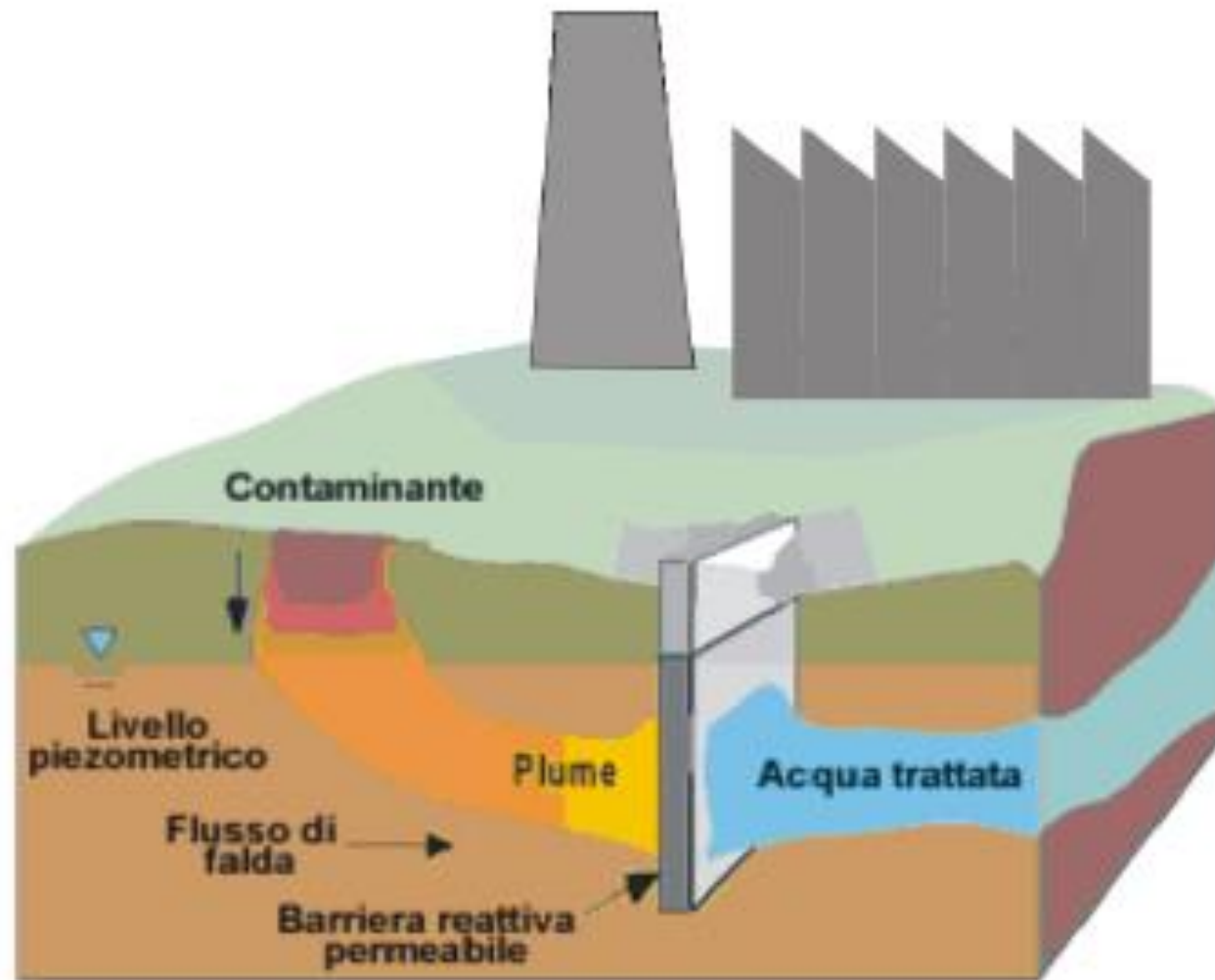
(Mello, 2003)



(Mello, 2003)

# BARREIRAS PERMEÁVEIS REATIVAS

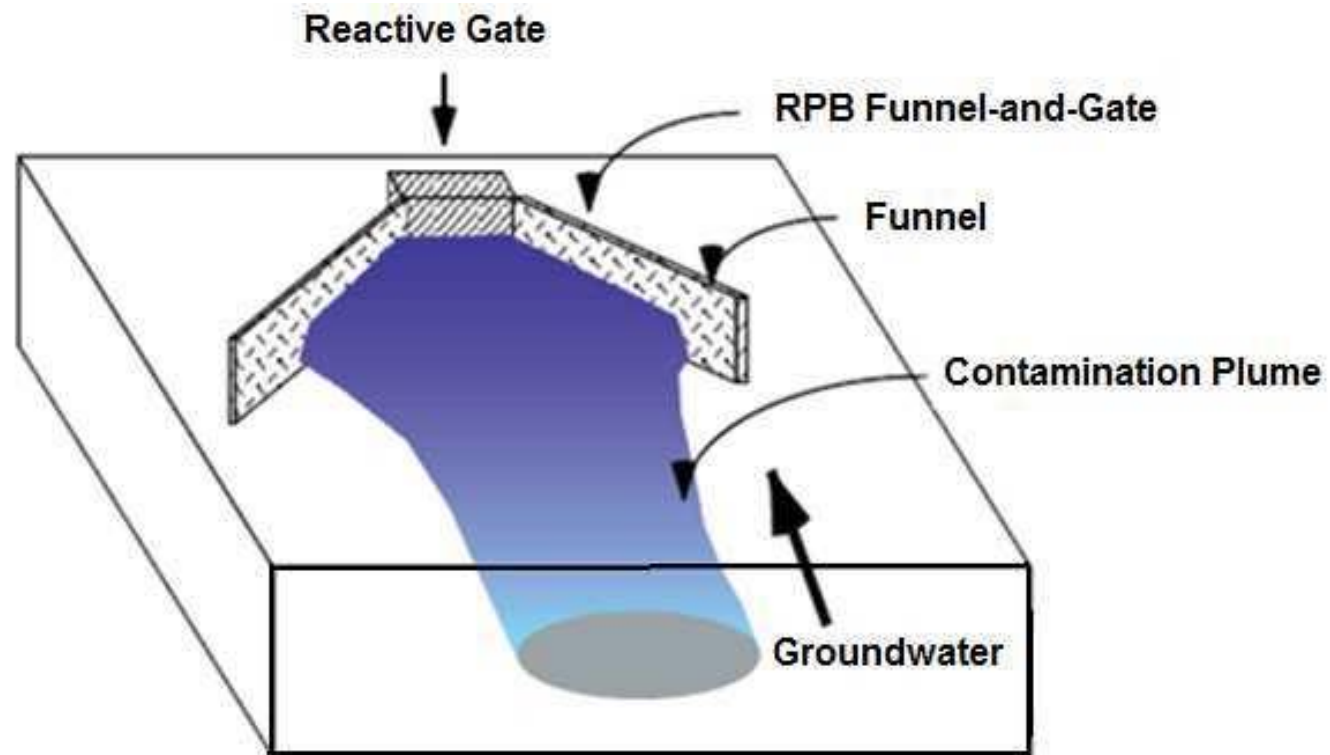
- ❖ Tratamento passivo *in situ* dos contaminantes
- ❖ Barreira permeável (reator) no caminho da pluma de contaminação; à medida que a água percola através do reator, os contaminantes vão sendo degradados
- ❖ A degradação pode envolver processos físicos, químicos e biológicos
- ❖ É uma barreira ao transporte de poluentes e não ao fluxo da solução



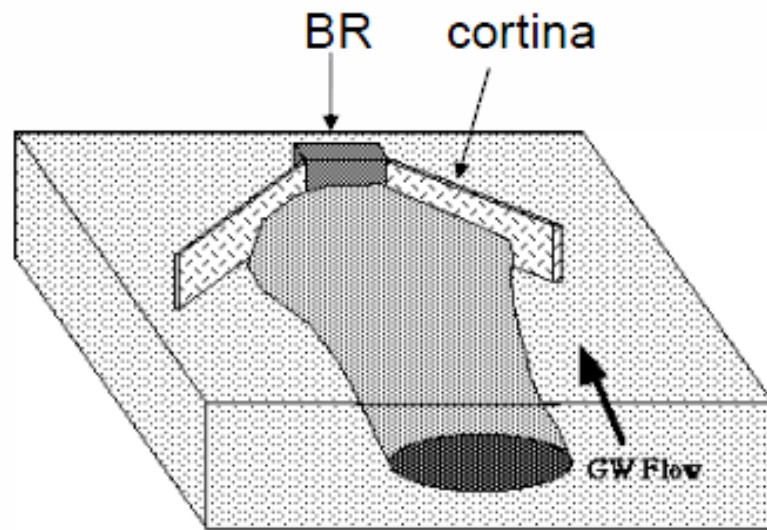
(Di Molfetta e Sethi, 2003)



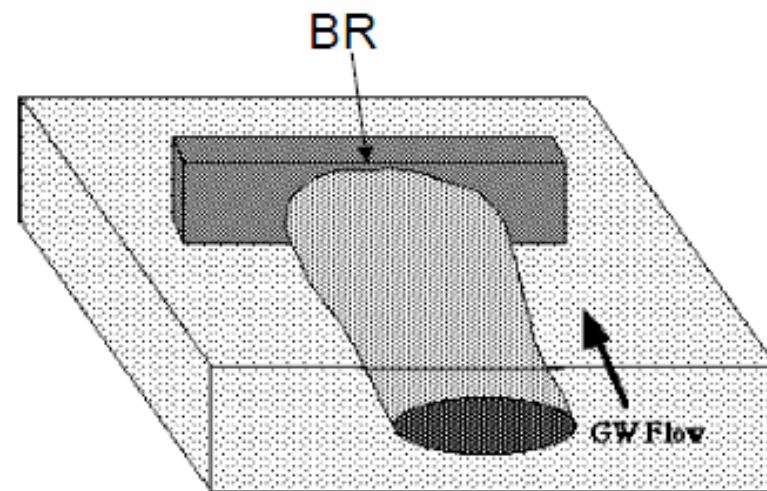
# FUNNEL AND GATE



Cortina e BR (*Funnel and Gate*)



BR Continua



US EPA 1998

**Planta**

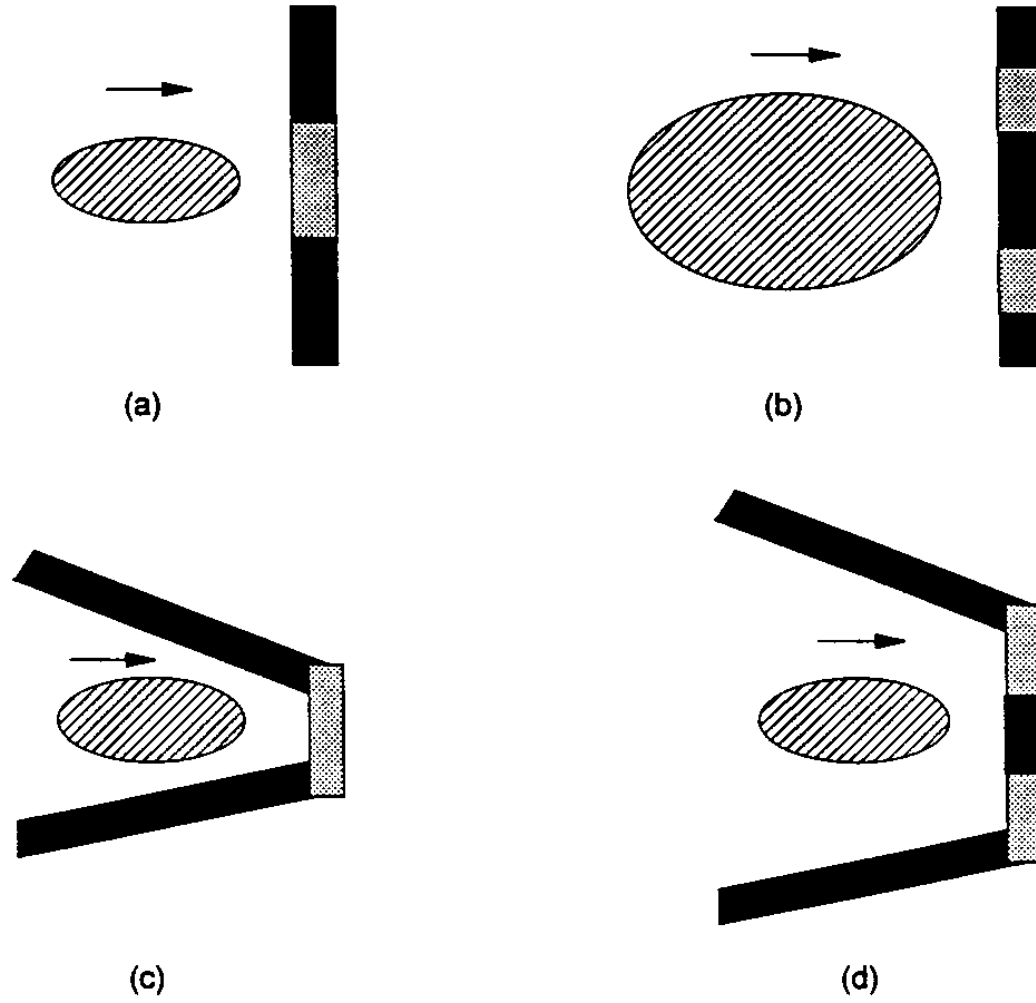
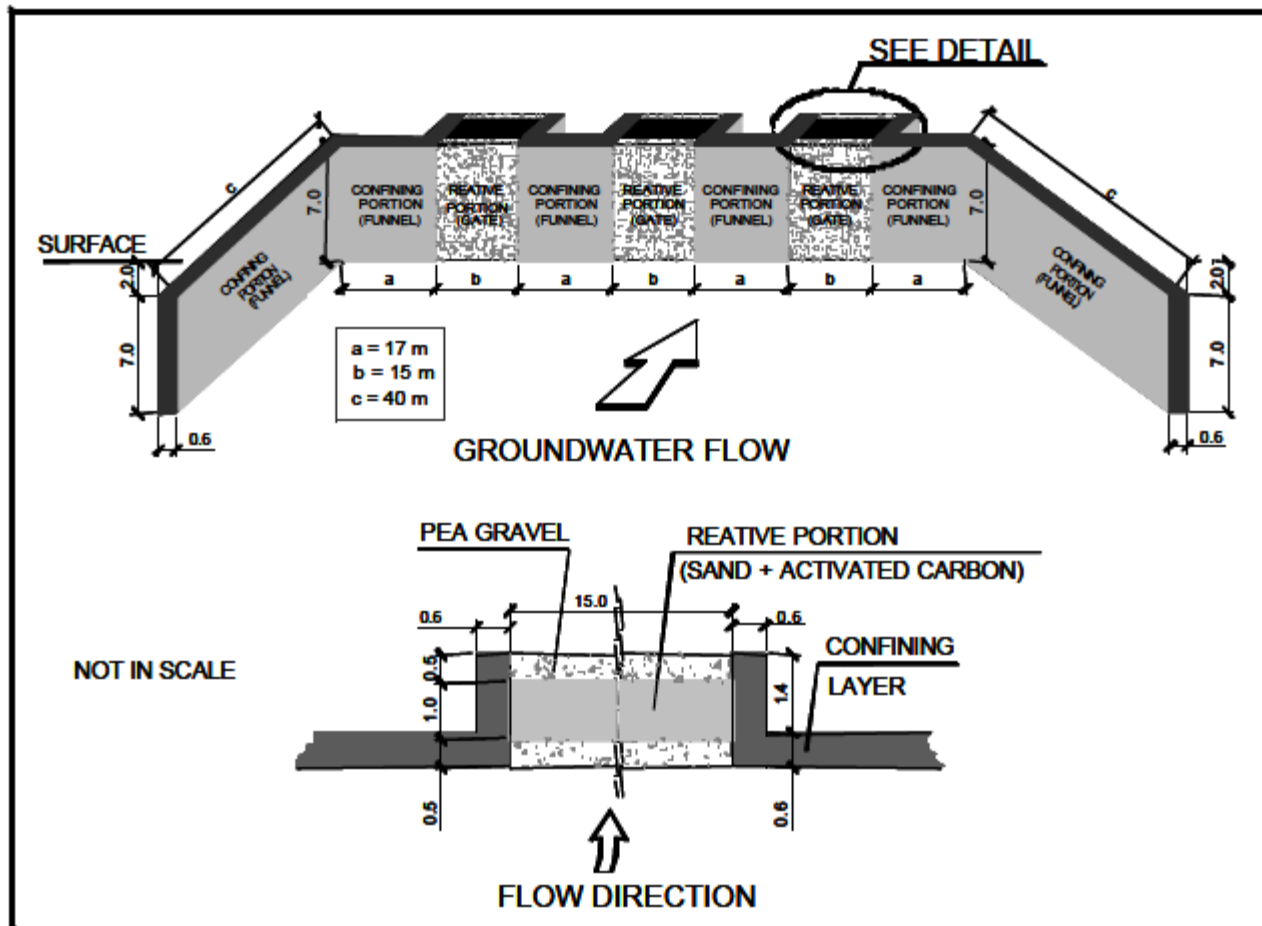


Fig. 4.3: Exemplos de Configuração do *Funnel-and-Gate*.

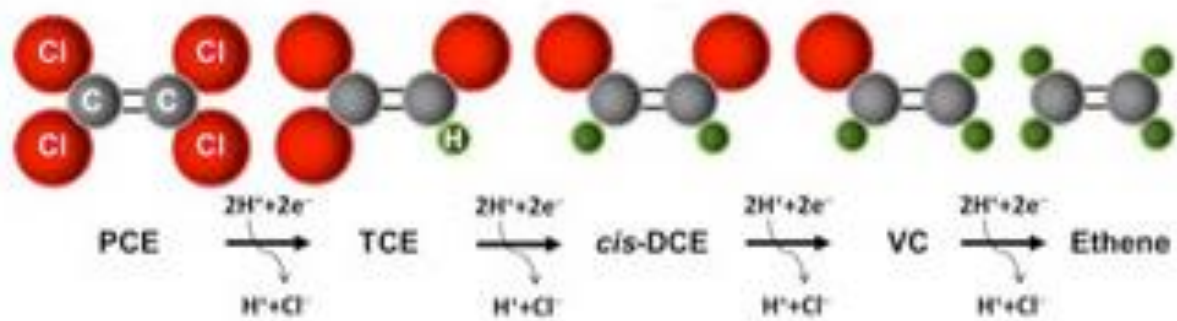
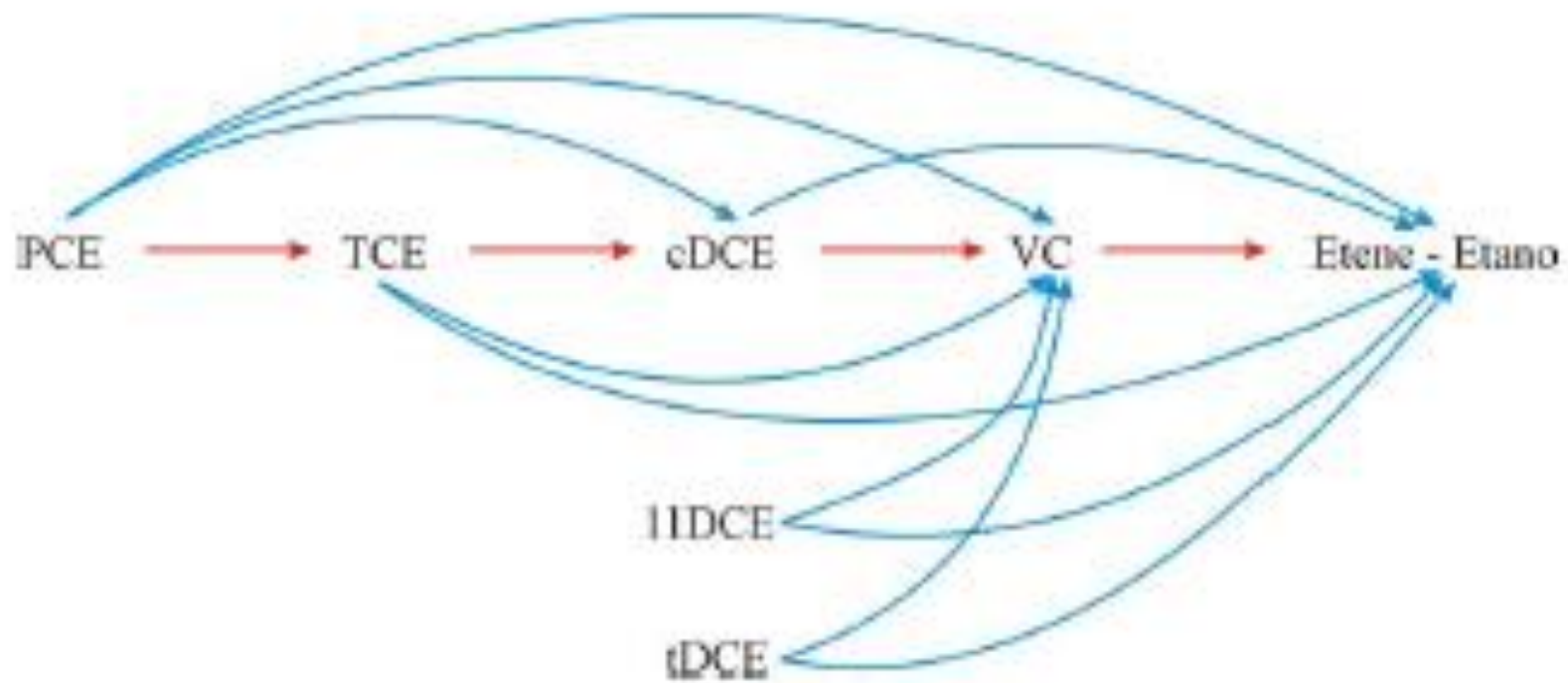
(Gusmão, 1999)



**FIGURE 5. Schematic perspective of PRB.**

Maia Nobre et al. (2006)





# Ferro granular de valência nula

Subproduto da usinagem do aço (lascas e limalhas): remoção do óleo por aquecimento, moagem e peneiramento (0,3 a 2,0 mm)



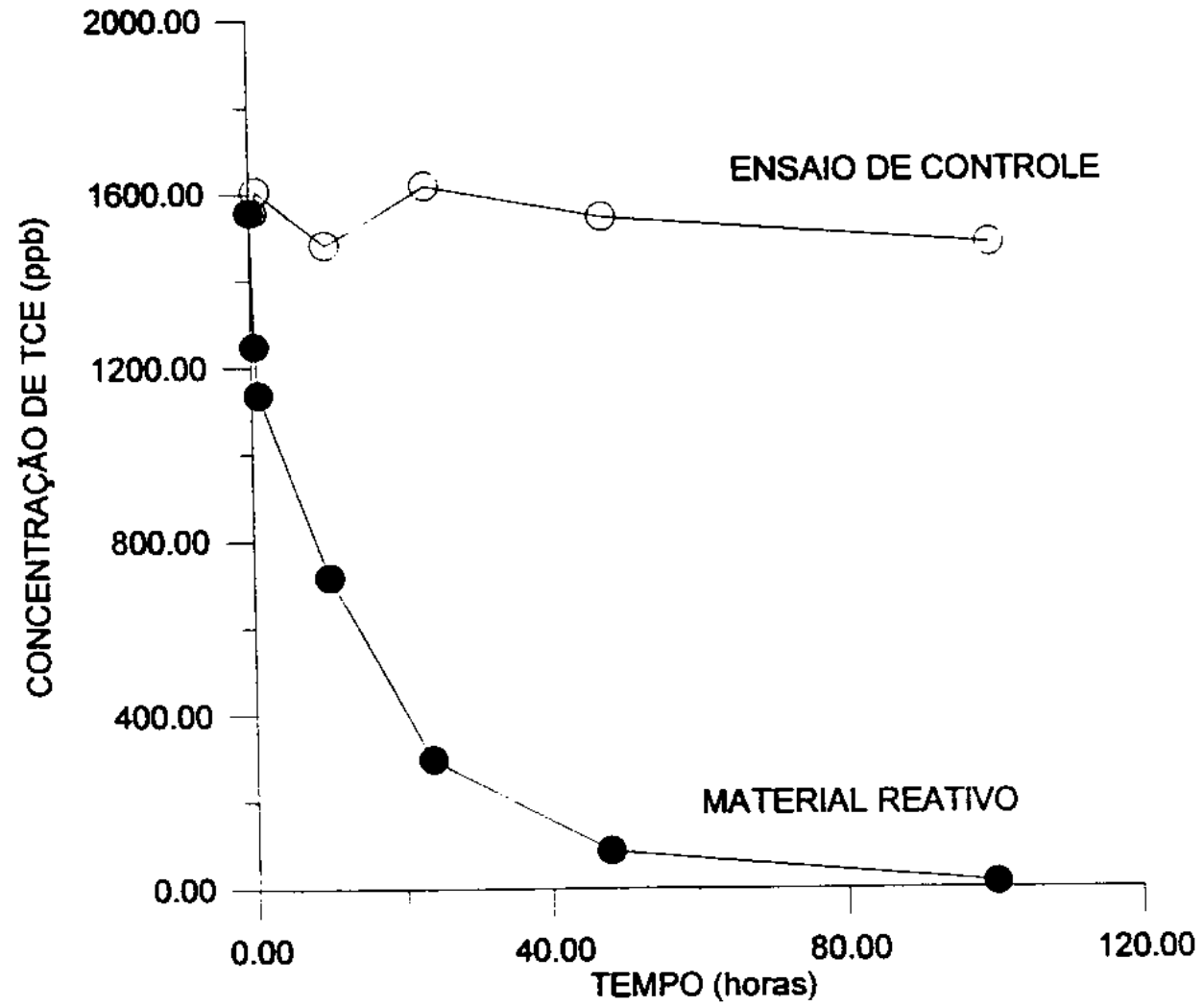


Fig. 3.9: Degradação do TCE na Presença de Ferro Granular (Gillham et al., 1993).



Ferro granular serve para:

- Oxiânions de Cr(VI), As(V), Se(VI)
- Solventes Organoclorados
  - PCE, TCE, DCE, VC
  - TCA, DCA
- Radionuclídeos
- $\text{NO}_3^-$





$$C = C_0 e^{-\mu t}$$

$\mu$  = taxa de degradação

$$T_{50} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Tempo de meia vida = tempo necessário para que a concentração do contaminante se reduza à metade do seu valor inicial

- 
- ❖ O material reativo pode agir de formas distintas, basicamente: adsorção, precipitação e degradação.
  - ❖ Adsorção: material adsorvente é misturado a areia para preenchimento da barreira. Por exemplo, carvão ativado para remoção de compostos orgânicos hidrofóbicos.
  - ❖ Precipitação: material de preenchimento da barreira altera as condições de Eh-pH da água subterrânea para que o composto não mais permaneça solúvel. Por exemplo, barreira preenchida com uma mistura de calcário para cromo hexavalente, transformando o cromo para uma forma sólida que precipita na barreira.
  - ❖ Degradação biótica ou abiótica: o material da barreira faz com que o contaminante seja decomposto em novos compostos inofensivos. Por exemplo, ferro metálico para compostos organoclorados (abiótica) ou adição de oxigênio e nutrientes para compostos orgânicos aromáticos (biobarreira).

(Oliveira, 2016)

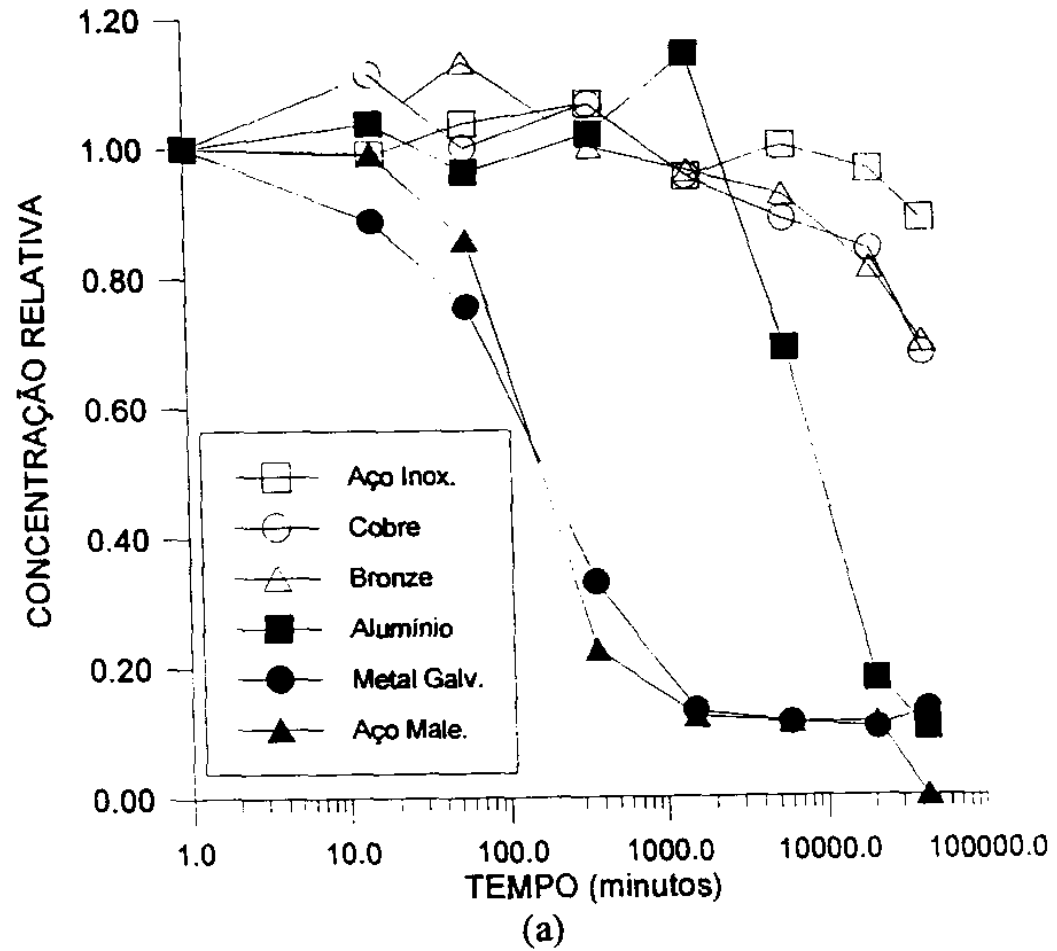


## Barreira reativa de adsorção

- Adsorção de cátions (metais) e ânions ( $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ):  
Matéria orgânica, Solos tropicais, Zeólitas, Calcário, Sub-produtos industriais (Cinzas volantes)
- Adsorção de orgânicos:  
Matéria orgânica, Carvão ativado granular, Resinas, Zeólitas modificadas, Tiras de pneus, Argilas modificadas (*organo-clays*)

# Concentração do 1,1,1-TCA ao longo do tempo

(Gusmão, 1999)







## Degradação biológica por biorremediação anaeróbia

Aplicam-se principalmente ao tratamento da drenagem ácida de mineração:

- $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , Metais Pesados ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ , outros),  $\text{H}^+$  e acidez das águas (pH 2 – 5)

Além disso, pode tratar também:

- $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$

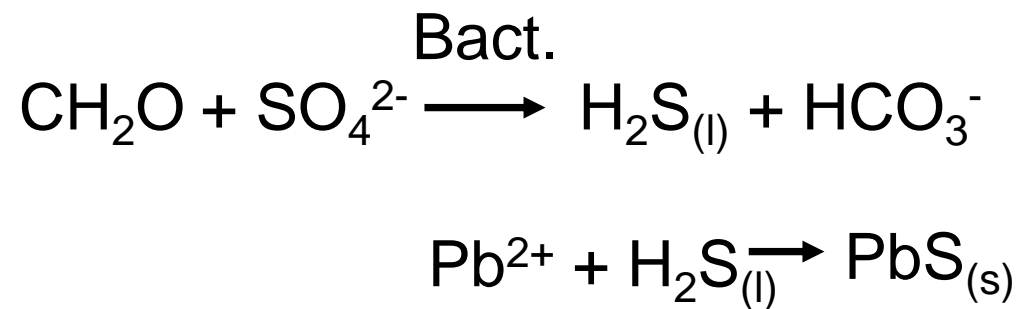
## Degradação biológica por biorremediação anaeróbia

O princípio é desenvolver uma comunidade eficaz de bactérias

Exemplo: bactérias redutoras de  $\text{SO}_4^{2-}$

Substratos: lascas de madeira, folhas, serragem

celulose

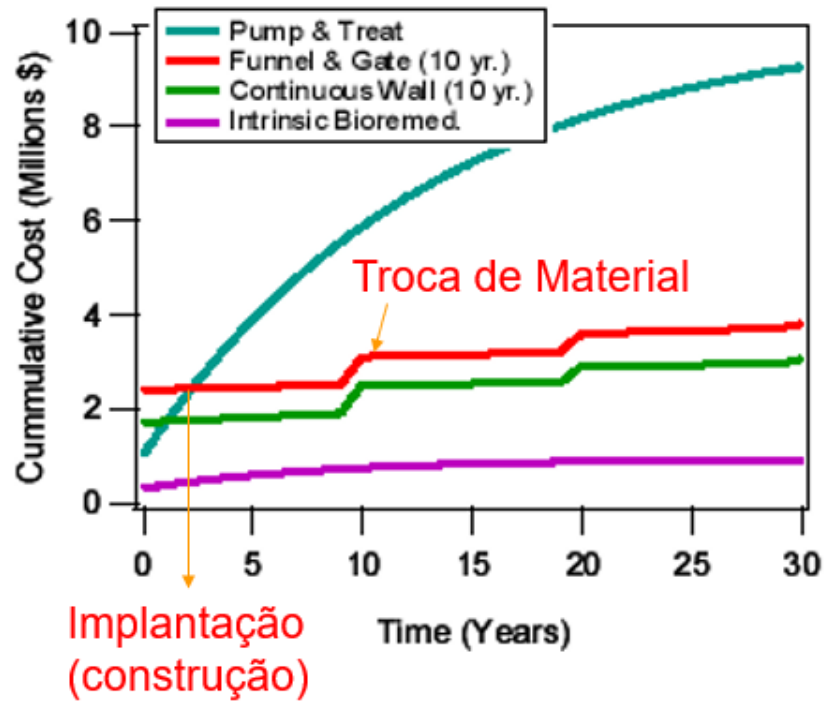


- Decomposição de polissacarídeos (polímeros) nos materiais orgânicos sólidos
- Liberação de um substrato orgânico limitante para crescimento das bactérias (acetato, lactato, metanol,  $\text{H}_2$ )
- Redução do  $\text{SO}_4^{2-}$  mediado pelas bactérias. Produz  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{HCO}_3^-$


Técnica	Pump-and-treat	Barreira reativa
Vantagens	<p>Menor custo de instalação</p> <p>Maior controle do tratamento</p>	<p>Baixo custo de operação e manutenção</p> <p>Não necessita de fornecimento contínuo de energia</p> <p>Não necessita de área na superfície</p> <p>Baixos custos de operação</p> <p>Mínima interferência com a superfície do terreno</p> <p>Não geram resíduos ou emissões</p>
Desvantagens	<p>Elevado custo de operação e manutenção</p> <p>O tempo de operação pode ser excessivamente longo</p> <p>É praticamente impossível a completa remoção dos contaminantes</p> <p>Necessita de contínuo fornecimento de energia para a operação do sistema</p> <p>Necessita de uma área para o tratamento de superfície <small>(Gusmão, 1999)</small></p> <p>Pode haver problemas técnicas e legais na descarga da água</p>	<p>Elevado custo de instalação</p> <p>O tempo de operação pode ser excessivamente longo</p> <p>Pode ser necessária a troca do material reativo após um certo período de operação</p> <p>Pode haver obstrução da barreira devido à precipitação de substâncias inorgânicas ou microrganismos.</p>

Dados necessários	Características
Contaminante	Tipos e concentrações Características e taxas de degradação na presença de metais de valência nula
Pluma de contaminação	Largura, profundidade
Aquitardo	Profundidade, espessura, descontinuidades
Considerações geotécnicas	Estratigrafia, heterogeneidades, permeabilidade e porosidades das camadas Presença de sedimentos consolidados, pedregulhos, blocos de rocha
Aquífero	Profundidade do aquífero, velocidade da água subterrânea, gradientes hidráulicos e variações sazonais, padrão de fluxo
Água subterrânea	pH, Eh, oxigênio dissolvido, composição (cálcio, magnésio, ferro, bicarbonato, cloreto, nitrato, sulfato)





↓ Custos de operação = **monitoramento e troca**  
(comparar com *Pump&Treat*)

- 
- Os poluente devem ser suficientemente reativos
  - Os material reativos devem ser suficientemente abundantes e com vida útil compatível
  - A BR não deve liberar poluentes ou subprodutos nocivos
  - Reversibilidade das reações

# Problemas de projeto

- ❖ Estimativa da taxa de degradação dos contaminantes
- ❖ Seleção de um material reativo
- ❖ Avaliação da vida útil do reator
- ❖ Localização
- ❖ Configuração
- ❖ Permeabilidade do reator
- ❖ Espessura do reator em função das taxas de degradação dos contaminantes e da velocidade de fluxo



# Método construtivo

## ❖ Escavação da Vala

Retroescavadeira profundidade  $\leq 10$  m

*Clam shell* profundidade  $\leq 40$  m

## ❖ Estabilização da escavação

Lama de biopolímero (biodegradável)

Escoramento provisório (estacas prancha)

## ❖ Preenchimento com Mistura do Material Reativo

Lançamento com pá carregadeira

Bombeamento e aplicação com tubo funil





<http://www.geoenviro.co.uk/permeable-reactive-barriers/>



<https://www.geo-solutions.com/resource-category/permeable-reactive-barriers/>



Source: ITRC 2011







Mines often produce waste, or tailings, that contains chemicals, minerals, and heavy metals and gets stored in ponds like this one in Lake County,



# HÉLICE DE GRANDE DIÂMETRO

