

GEOTECNIA AMBIENTAL – REMEDIACÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS



Maria Eugenia Gimenez Boscov



O que é uma área contaminada (AC)

- Área onde há comprovadamente poluição causada por quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados, e que determina impactos negativos sobre os bens a proteger.



O que é uma área contaminada (AC)

- Contaminantes propagam-se no subsolo, água subterrânea, água superficial e ar;
- Riscos de incêndios ou explosão;
- Riscos à saúde humana e ao ecossistema;
- Limitações enquanto ao uso do terreno.



O que é uma área potencialmente contaminada (AP)

- Área onde estão sendo desenvolvidas ou onde foram desenvolvidas atividades potencialmente contaminadoras.



O que é uma área suspeita de contaminação (AS)

- Área na qual, após a realização de uma avaliação preliminar, foram observadas indicações que induzem a suspeitar da presença de contaminação.



Tipos de contaminantes

- Carga orgânica, nutrientes e patógenos fecais
- Salinidade
- Compostos orgânicos sintéticos
 - compostos de petróleo, VOCs (BTEX), PAHs (benzo-a-pireno, naftaleno)
 - solventes clorados (PCE, TCE, TCA, MC, VC, PCBs)
 - pesticidas clorados ou fosforados
- Metais pesados (arsênio, cádmio, cromo, chumbo, níquel, zinco e mercúrio)



Principais poluentes

- Metais pesados
- Elementos radioativos
- Cloro, enxofre, arsênio, fósforo, selênio, carbono, enxofre, flúor, boro, nitrogênio
- Substâncias orgânicas
- Fertilizantes
- Pesticidas
- Microrganismos (vírus e bactérias)
- Príons

Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo - dezembro de 2017

Região	Atividade					Total
	Comercial	Industrial	Resíduos	Postos de combustíveis	Acidentes/ Desconhecida/ Agricultura	
São Paulo	110	389	57	1.579	13	2.148
RMSP - outros	56	282	34	649	12	1033
Interior	99	326	70	1.569	21	2.085
Litoral	34	46	26	273	4	383
Vale do Paraíba	5	66	6	214	2	293
<i>Total</i>	304	1.109	193	4.284	52	5.942

3%

19%

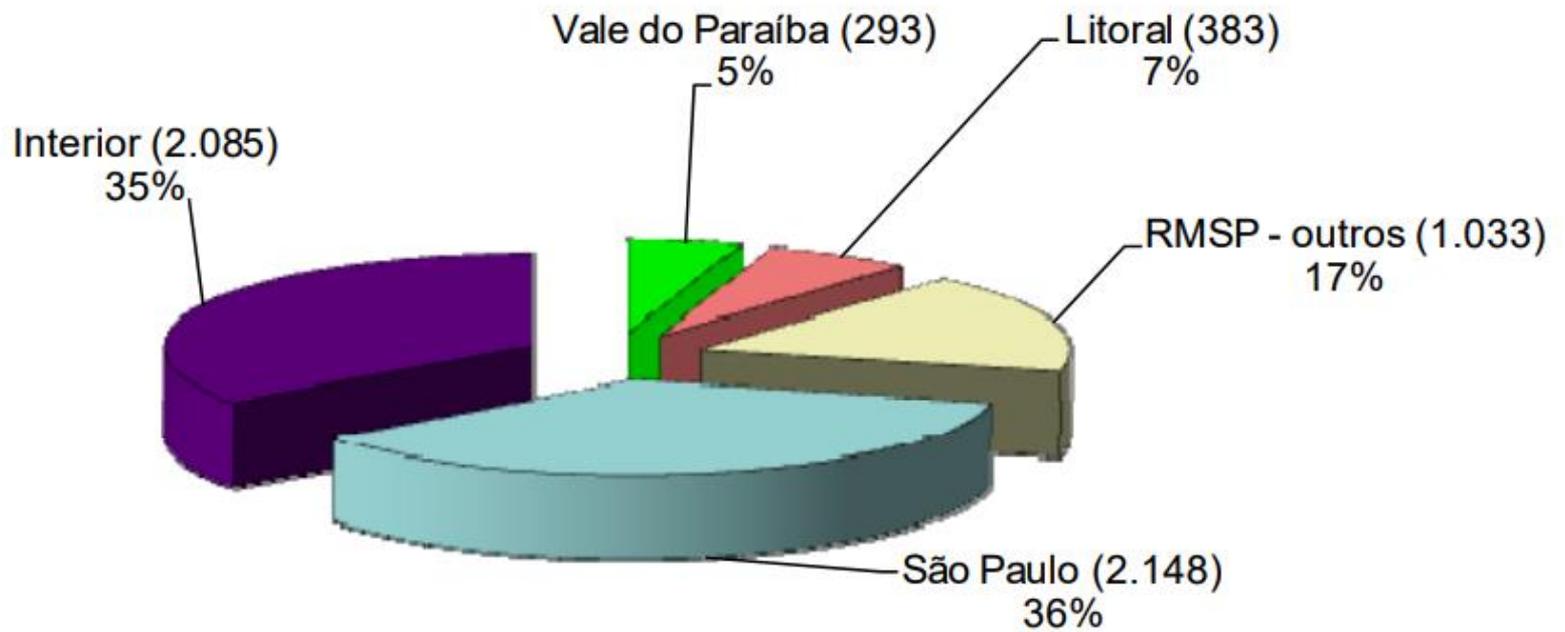
5%

72%

1%

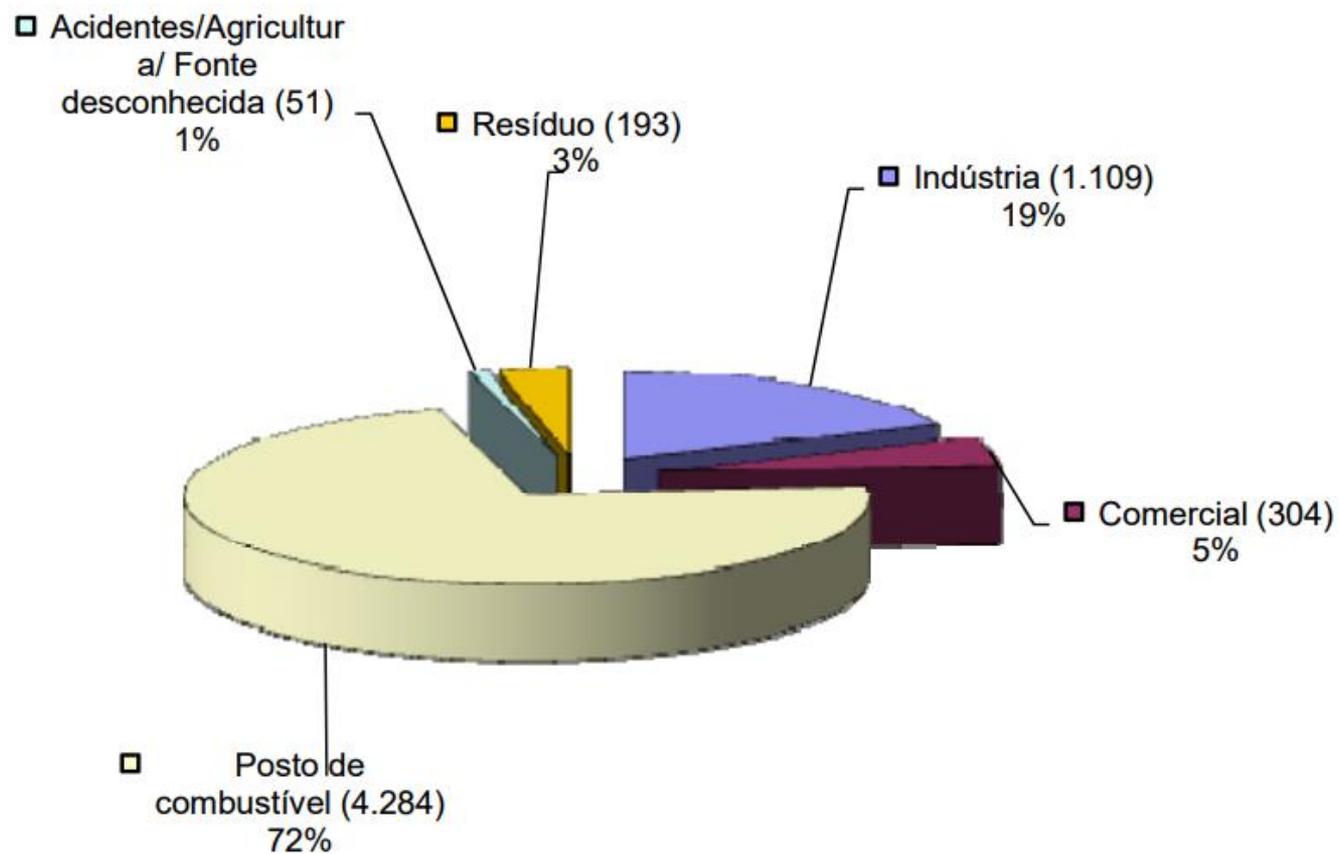
(CETESB, 2018)

Por região



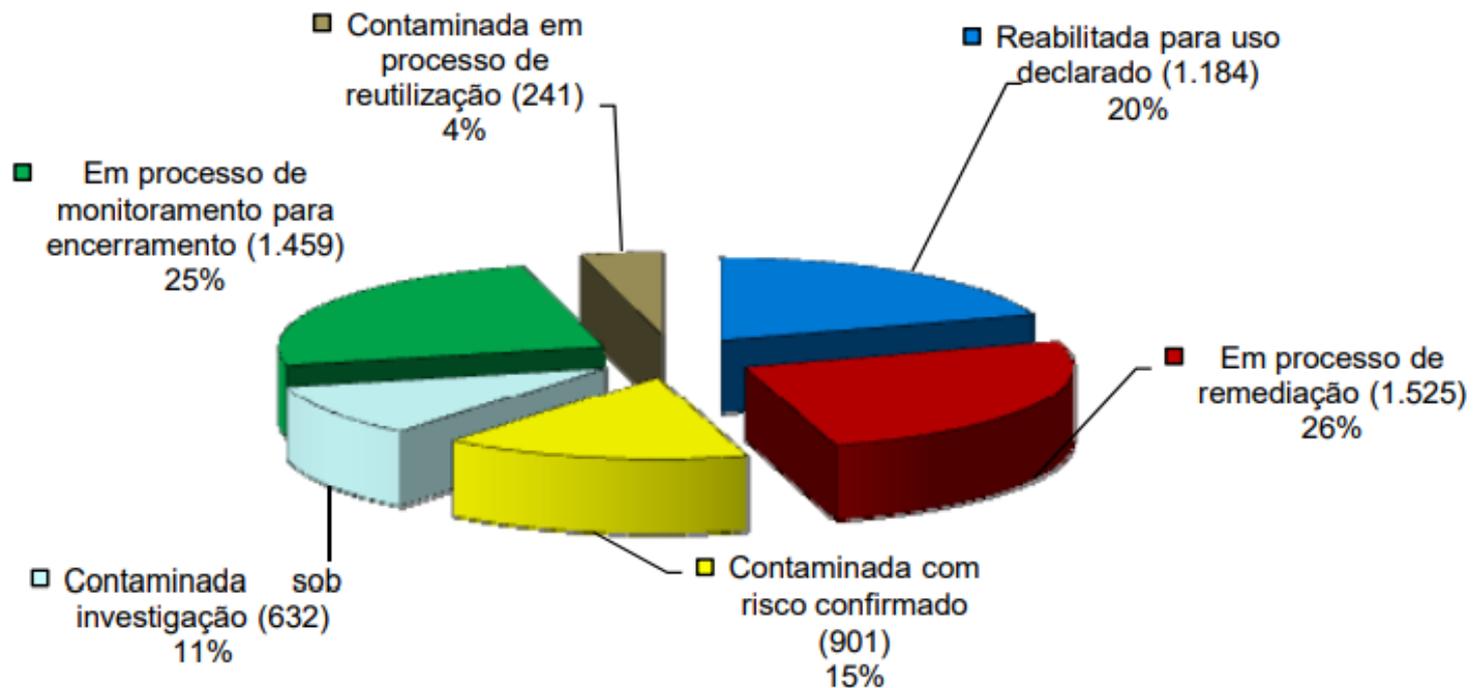
(CETESB, 2018)

Por causa



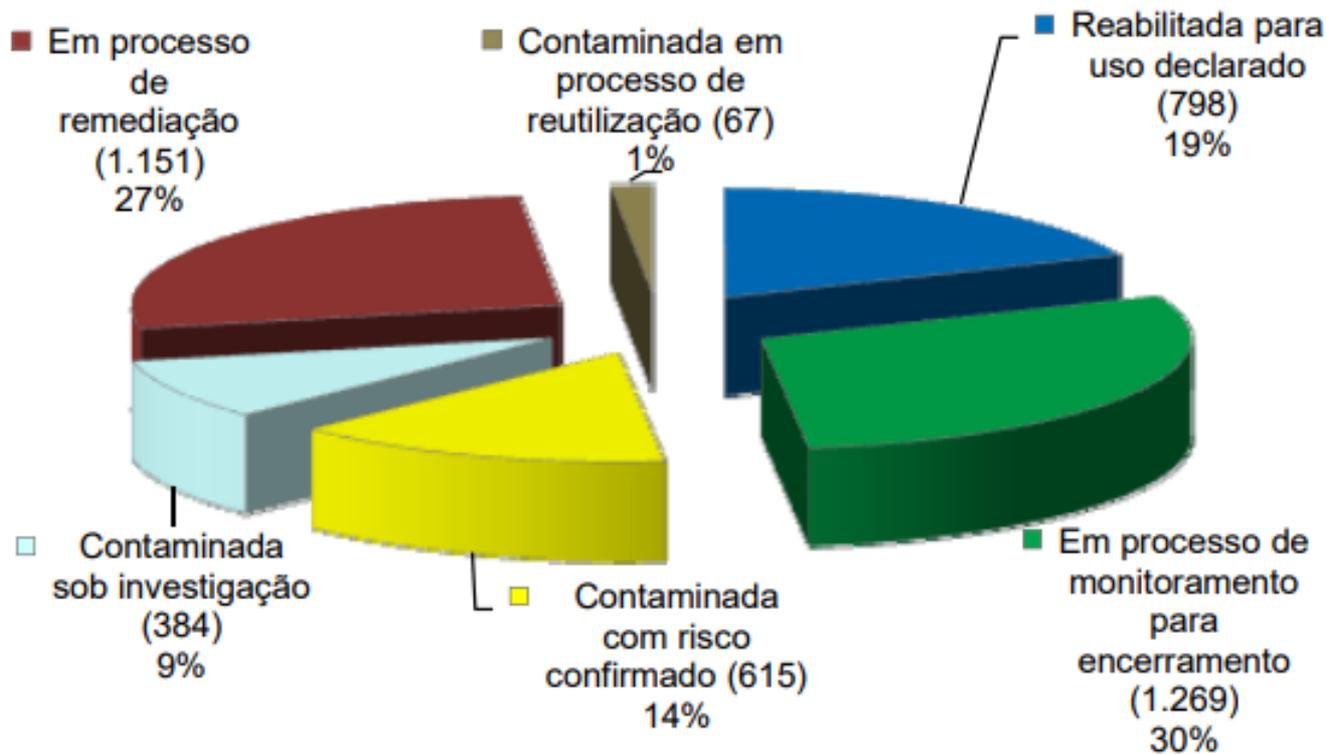
(CETESB, 2018)

Classificação



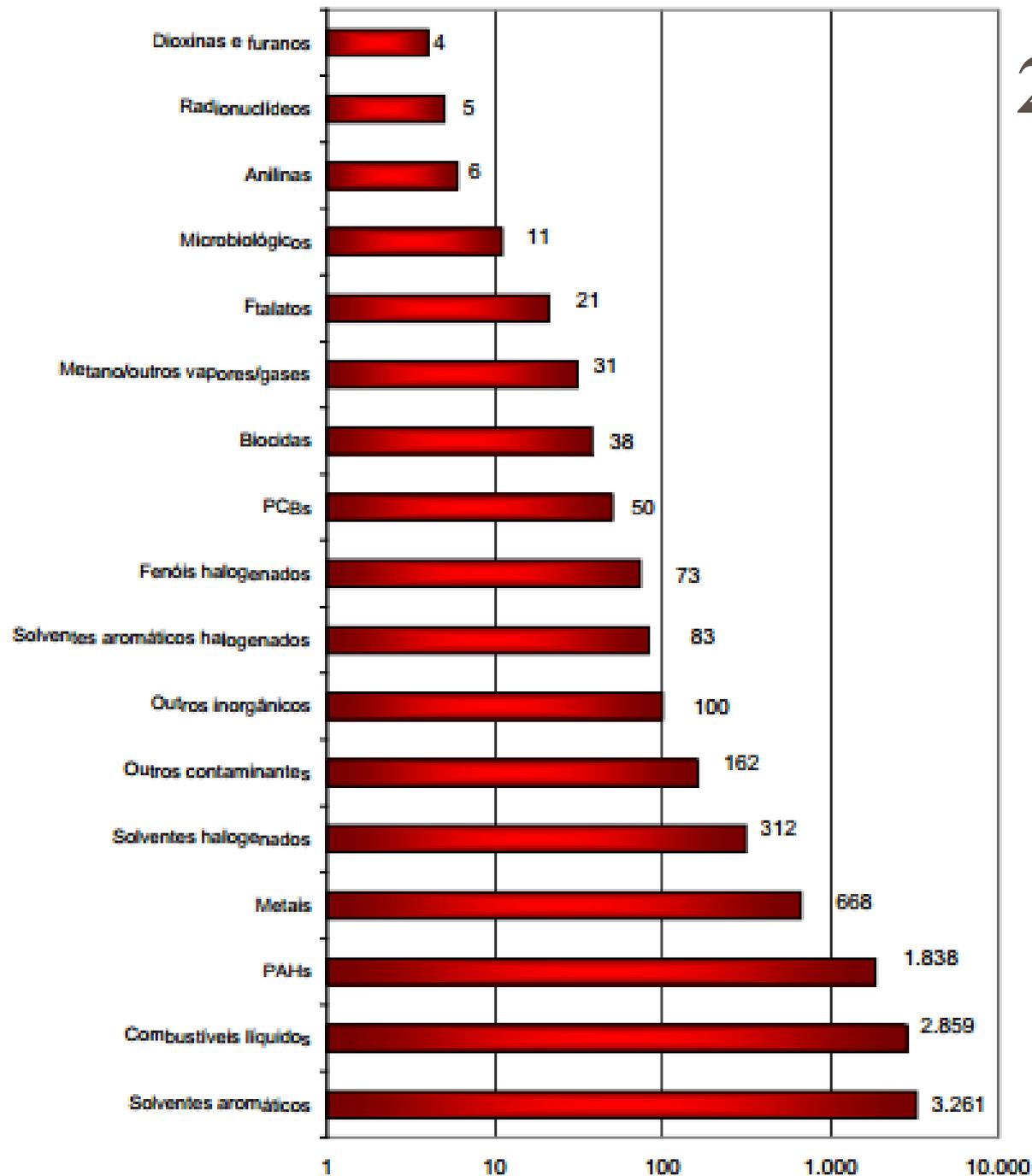
(CETESB, 2018)

Reutilização

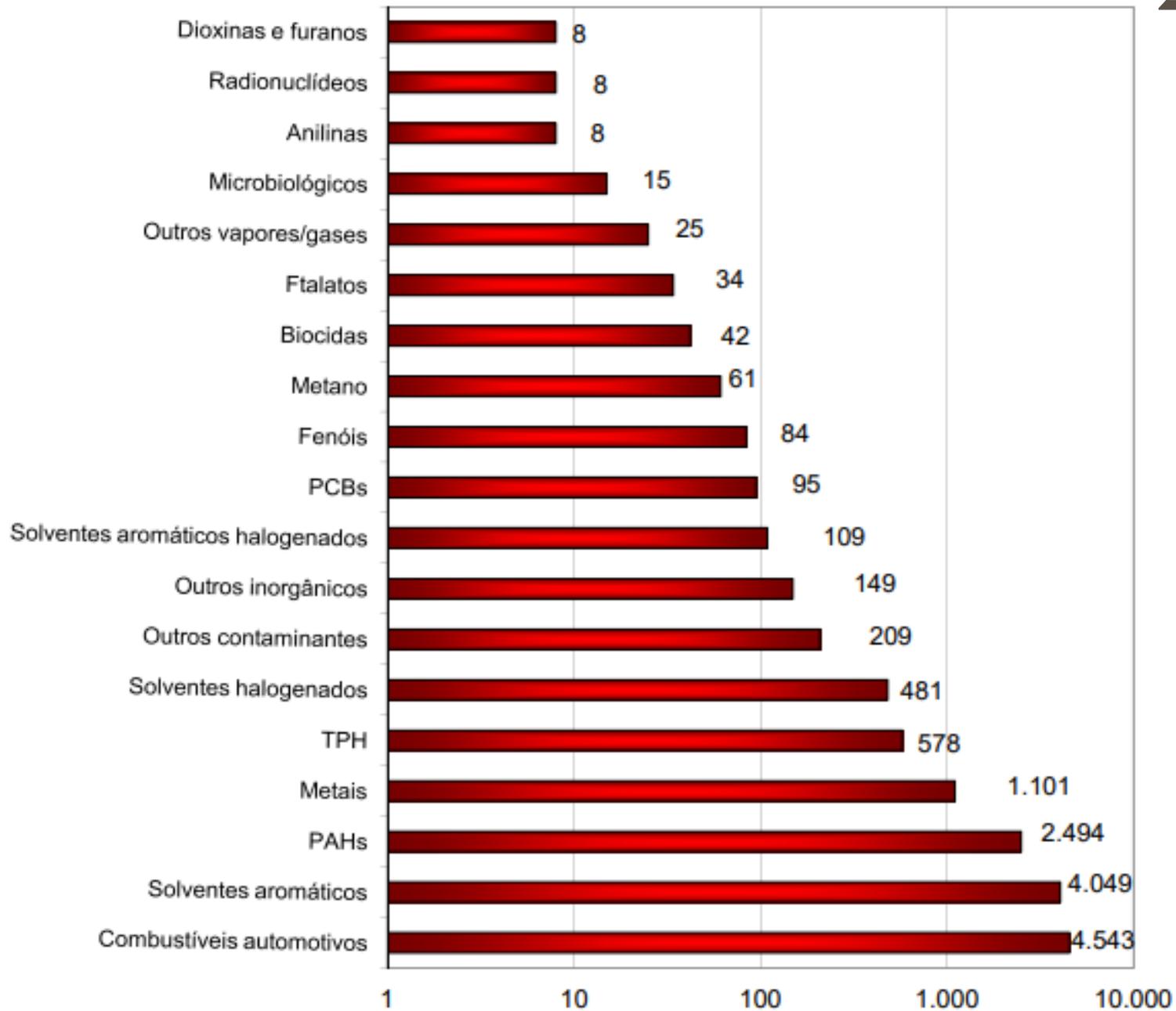


(CETESB, 2018)

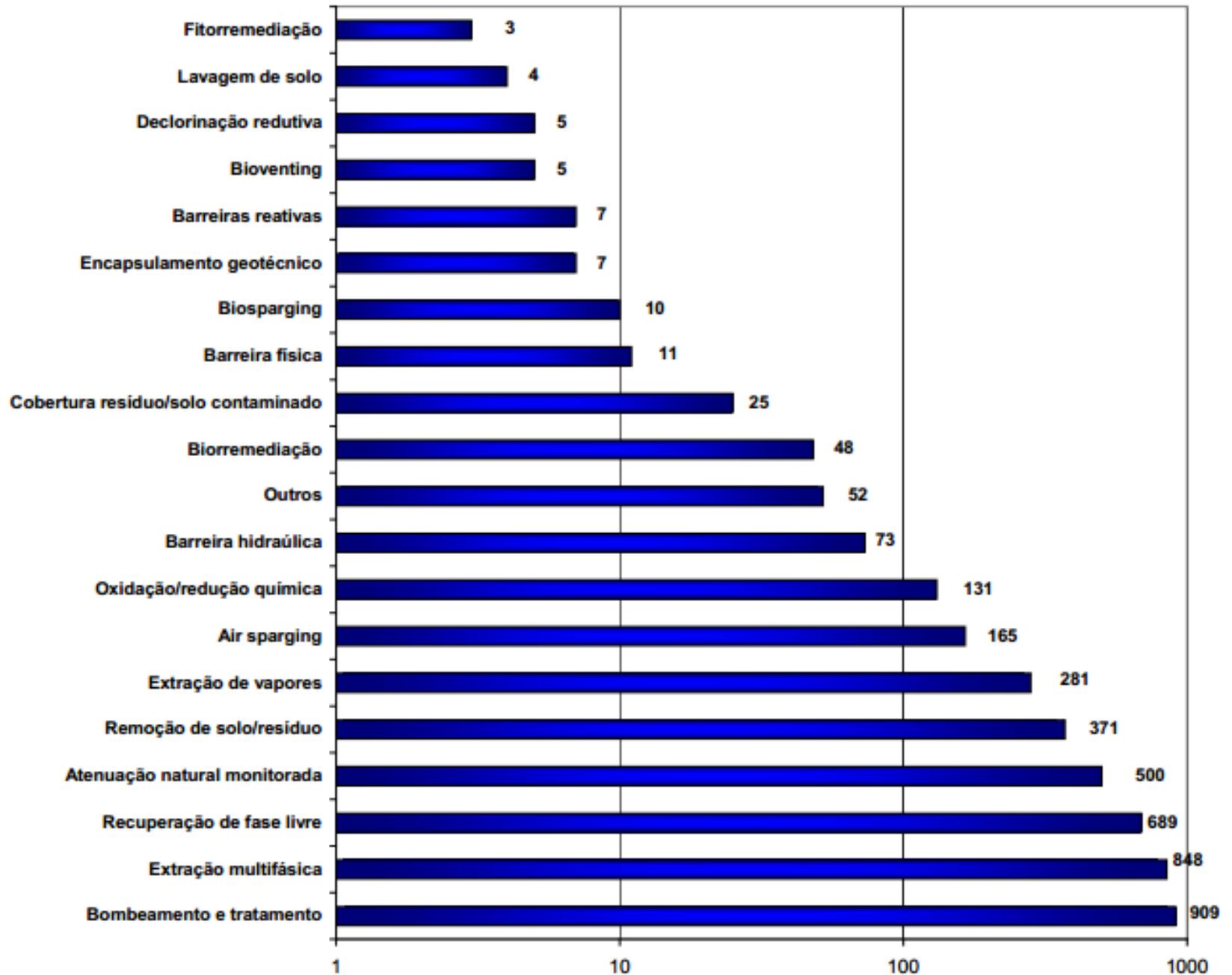
2013



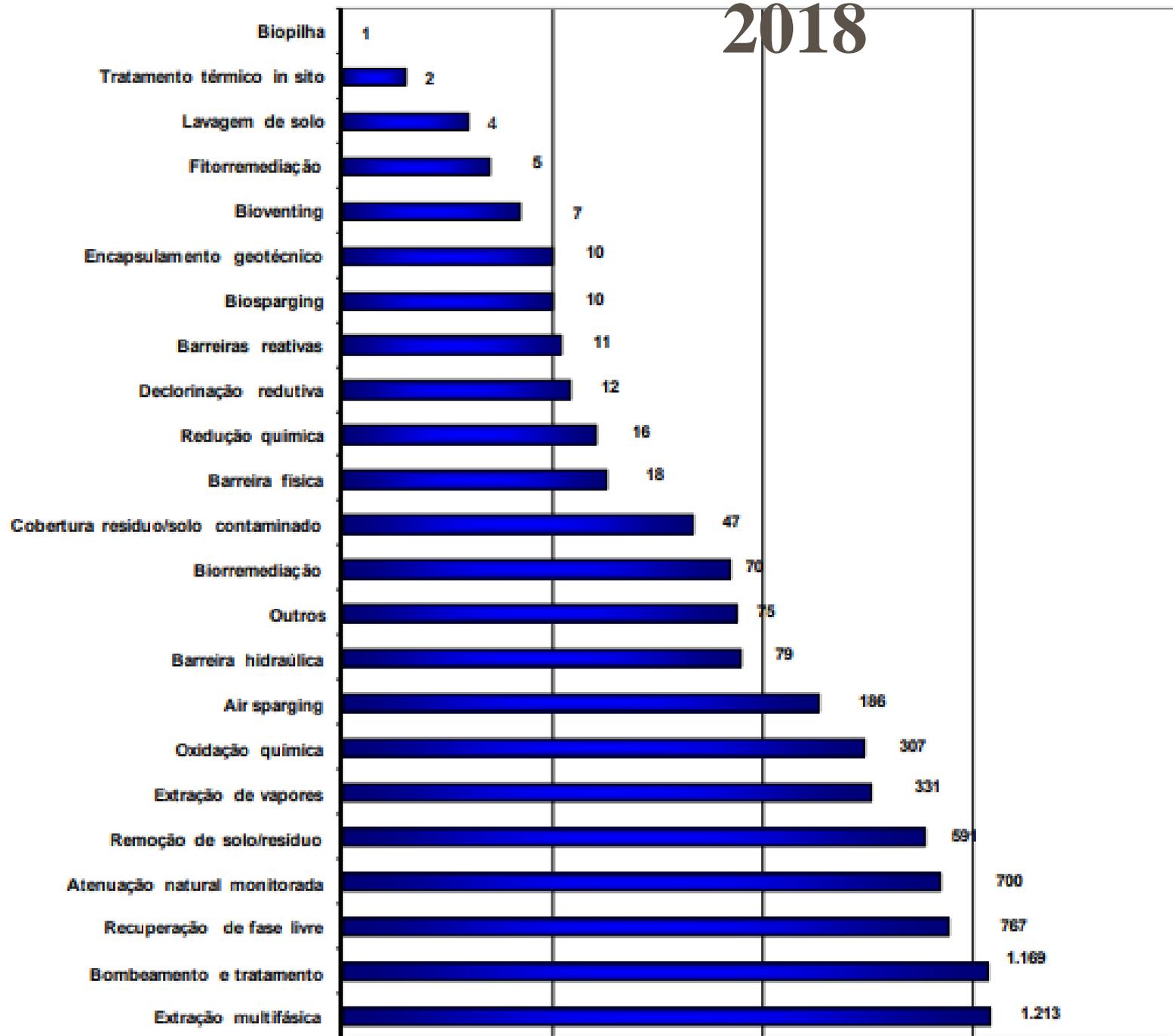
2018



2013



2018



GUIA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO EM IMÓVEIS



**GOVERNO DO ESTADO
DE SÃO PAULO**

**Governo do Estado de São Paulo
Geraldo Alckmin – Governador**

**Secretaria de Estado do Meio Ambiente
José Goldemberg – Secretário**

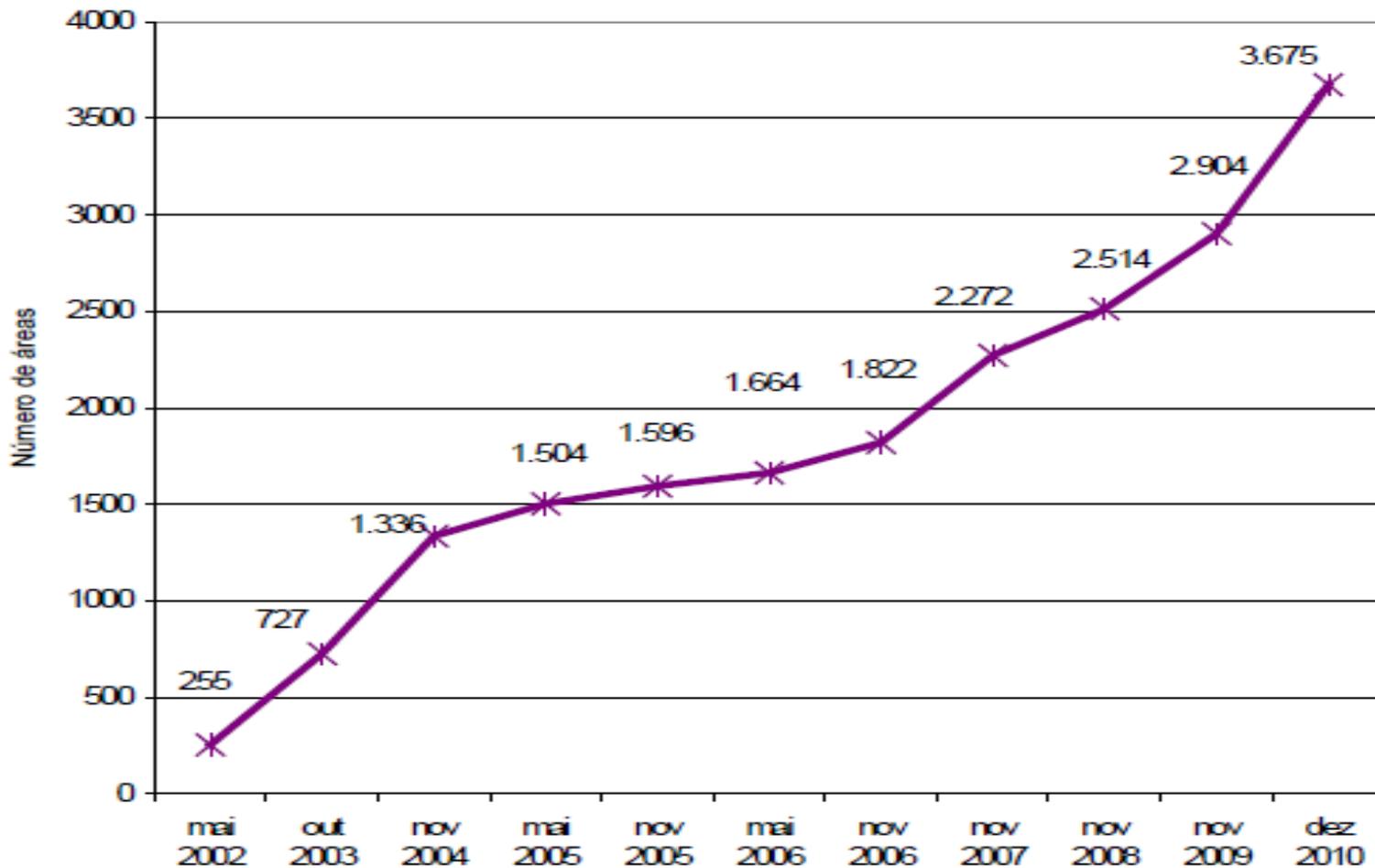
**CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento
Ambiental
Rubens Lara – Diretor Presidente**



Potencial de contaminação em SP

- Cerca de 8.400 postos de abastecimento (2.400 na RMSP);
- Cerca de 160.000 indústrias licenciadas (~10% delas são potenciais poluidoras = 16.000 áreas);
- Cerca de 4.300 áreas industriais abandonadas na RMSP (2.000 delas são potenciais poluidoras);
- Vários aterros sanitários e lixões;
- Centenas de milhares de estabelecimentos comerciais (oficinas mecânicas, laboratórios, lavanderias etc);

Áreas contaminadas identificadas em SP

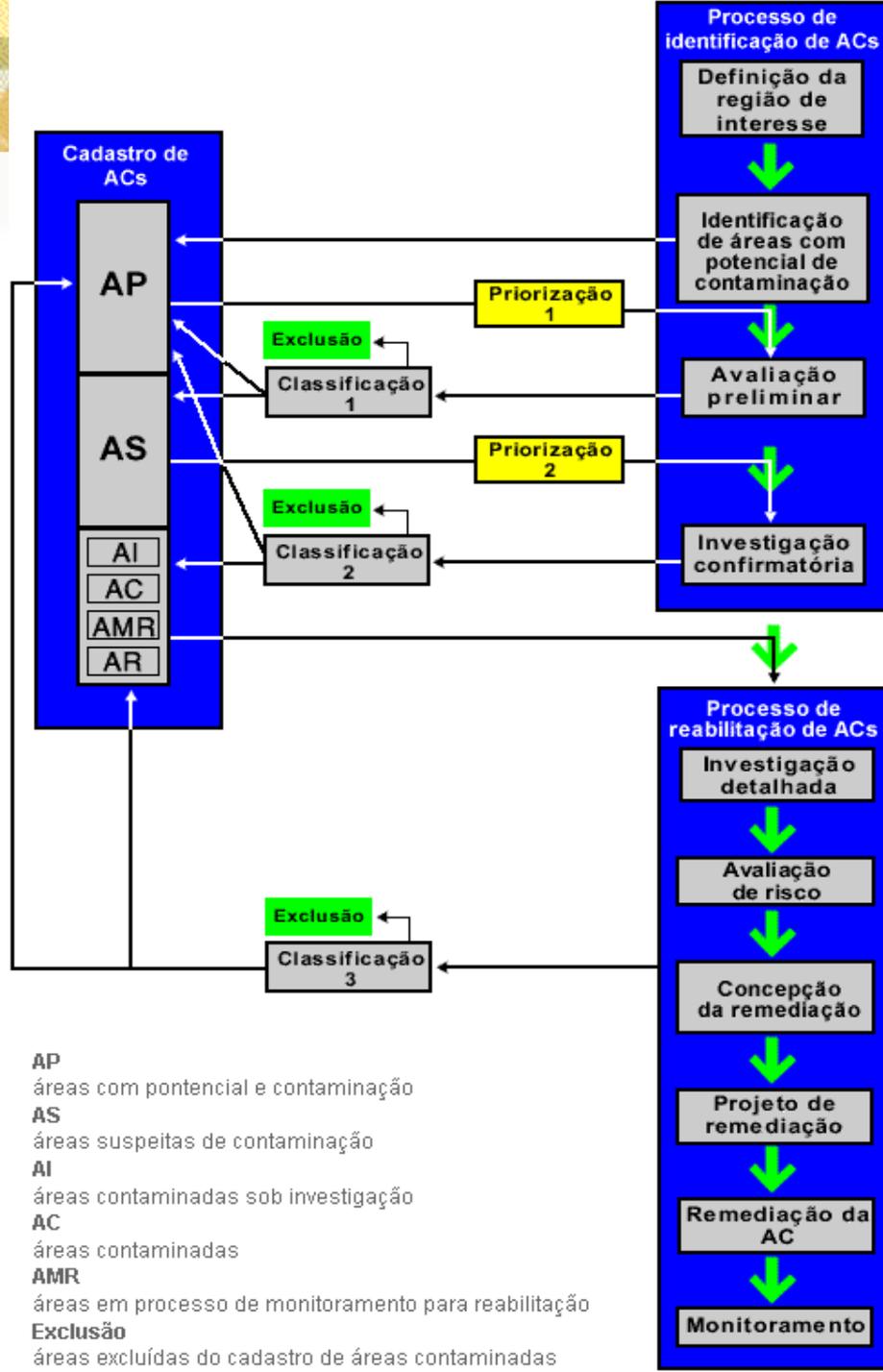




Riscos de execução de obras civis em áreas contaminadas

- O trabalhador da construção civil pode entrar em contato com contaminantes e correr risco de saúde
- O trabalho com solos, escombros e entulhos contaminados representa risco à saúde pública e ao meio ambiente nas circunvizinhanças da obra (poeira, gases, arraste de contaminantes por águas superficiais)
- a disposição de solos, escombros e entulhos contaminados em bota-foras ou aterros de inertes caracteriza um crime ambiental
- A precaução contra danos à saúde pública, ao meio ambiente e à propriedade são obrigações previstas na Constituição Federal.

Gerenciamento de áreas contaminadas





Investigação Preliminar

- Revisão de documentação; levantamento de dados sobre as características físicas do local; uso do solo e informações históricas; revisão do processo industrial; inspeção da área; entrevistas com proprietários, ocupantes ou vizinhos e, eventualmente, com o órgão ambiental; relatório.

Investigação Confirmatória

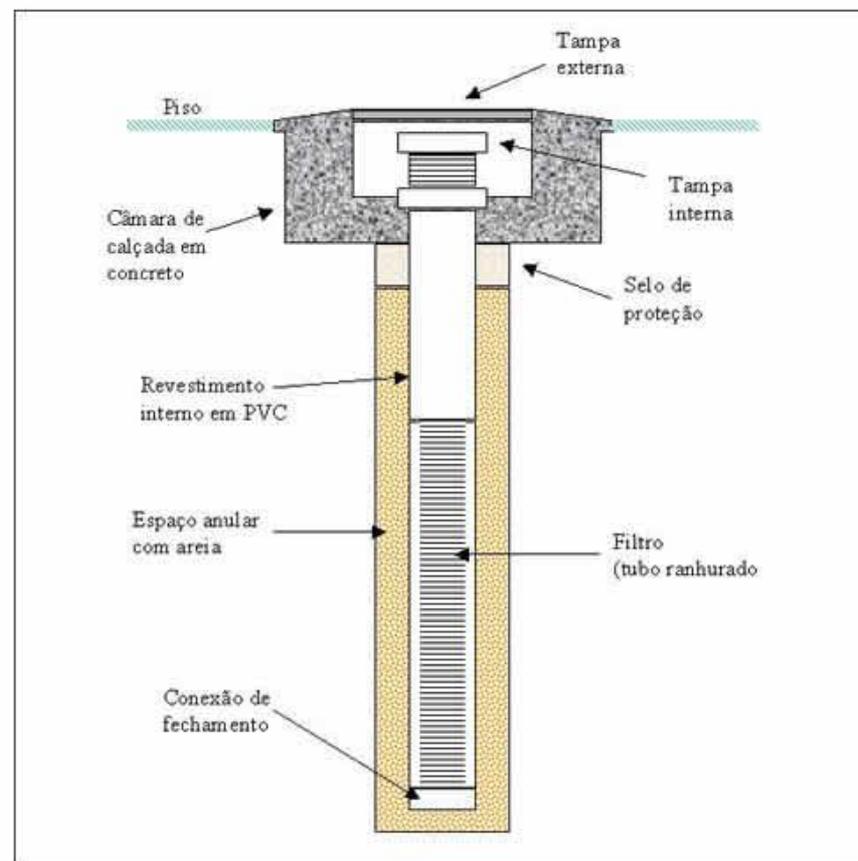
- Amostragem de solo



(Tsugawa, 2012)

Investigação Confirmatória

■ Instalação de poços de monitoramento



(Tsugawa, 2012)



Investigação Detalhada

- Investigação com propósito de selecionar estratégia de remediação e conceber o projeto de remediação
- Delimitação da pluma de contaminação
- Interação dos contaminantes com o meio
- Modelo conceitual da contaminação



Remediação de aquíferos

- Fonte de contaminação
- Pluma de contaminante



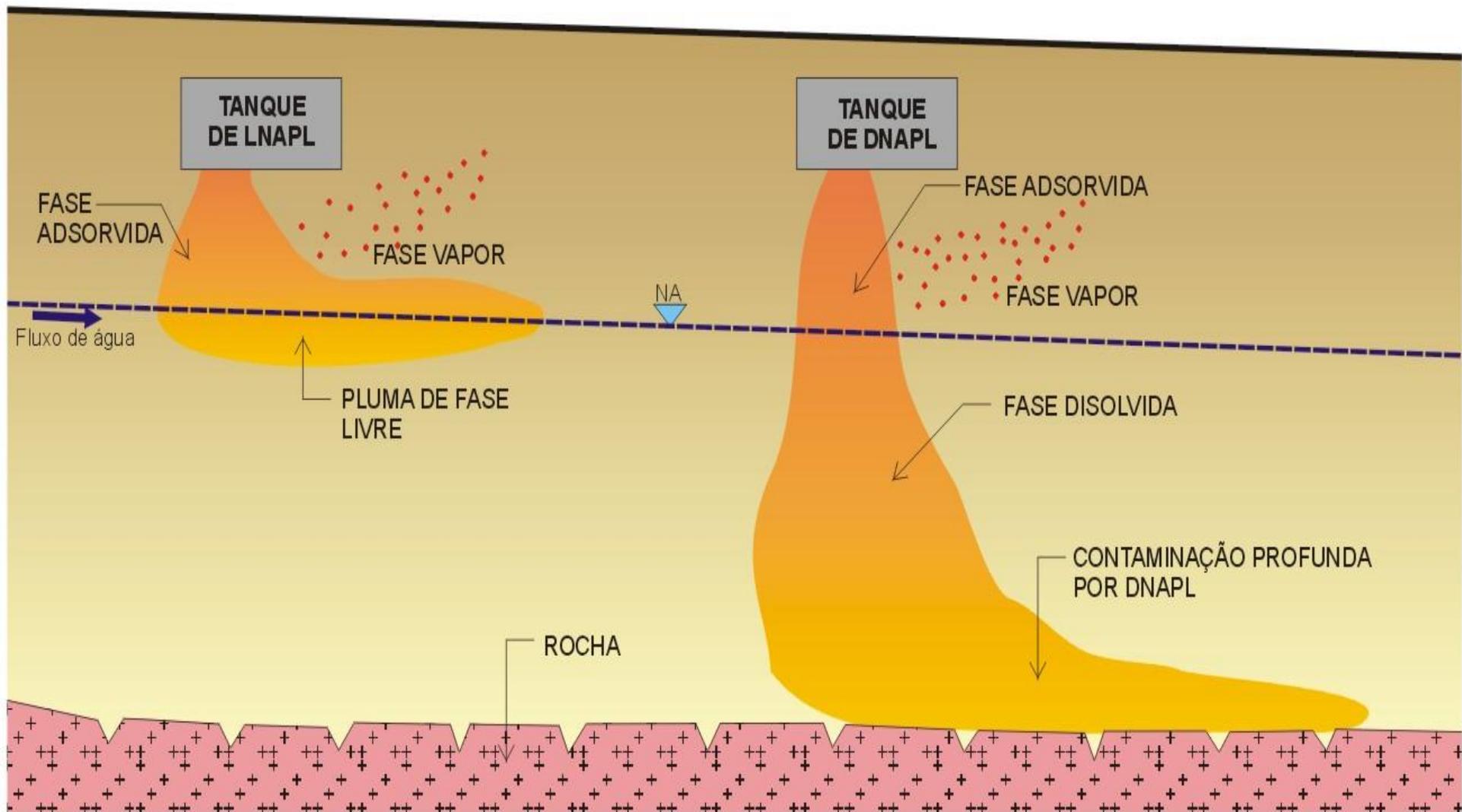
Remediação

- Esforços para corrigir problemas pré-existentes.
- Incerteza sobre a fonte, causa, condição de ruptura ou falha, natureza, velocidade de espalhamento, extensão do problema, riscos potenciais a humanos e ao meio-ambiente.
- Aplicação de tecnologias novas e de eficácia ainda não totalmente comprovada.



Remediação

- Caráter forense
- Interesse público
- Imprensa



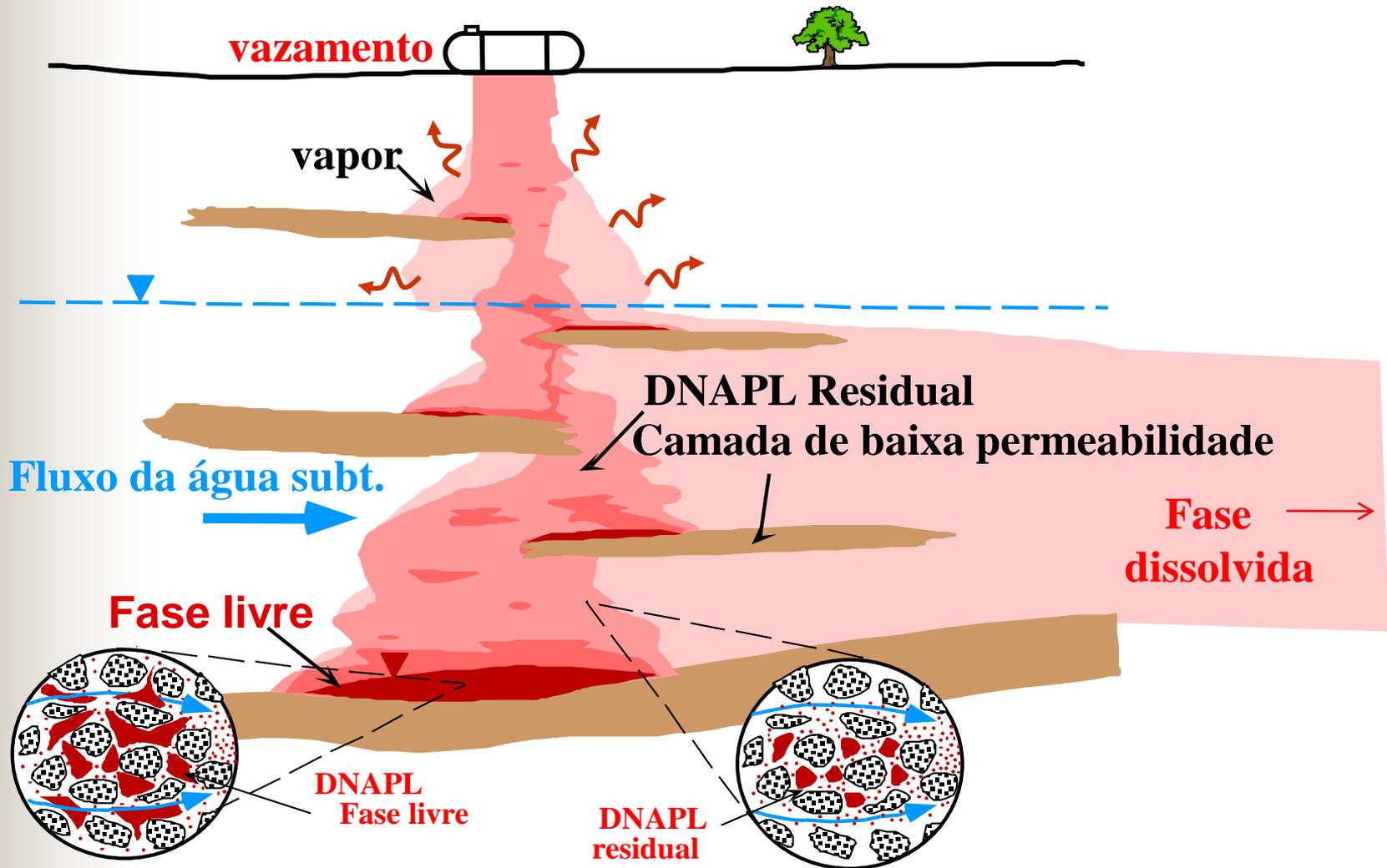
(Campos, 2003)



NAPL = non-aqueous phase liquid (compostos não solúveis em água)

DNAPL = dense non-aqueous phase liquid
solventes clorados (Tricloroetano-TCE,
percloroetano-PCE, PCBs, alcatrão de hulha)

LNAPL = light non- aqueous phase liquid
benzeno, tolueno, combustíveis contendo
hidrocarbonetos (gasolina, querosene, óleo diesel)



- 
- A duração da dissolução depende da massa de NAPL e da taxa de dissolução, que é afetada por diversos fatores (solubilidade do contaminante, velocidade de fluxo do aquífero, arranjo e tamanho dos poros, composição da mistura de fluidos)

■ A duração da dissolução depende da massa de NAPL e da taxa de dissolução, que é afetada por diversos fatores (solubilidade do contaminante, velocidade de fluxo do aquífero, arranjo e tamanho dos poros, composição da mistura de fluidos)

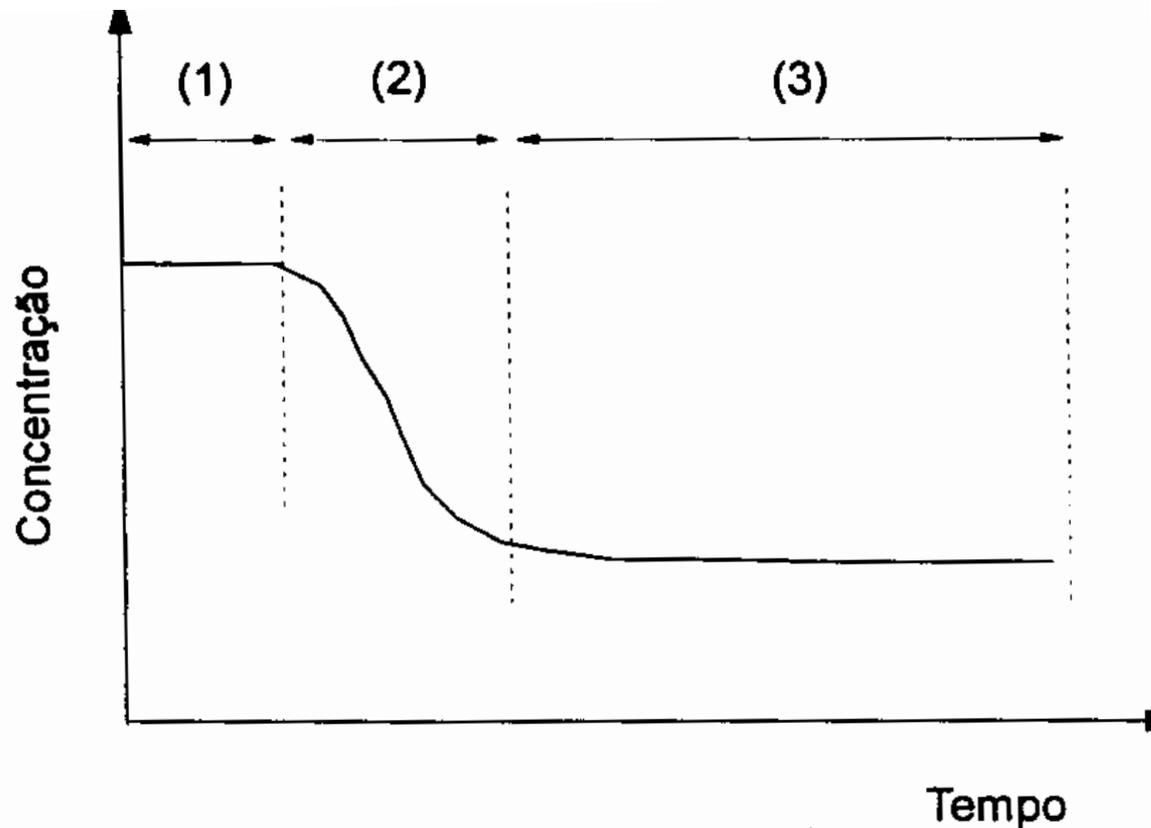
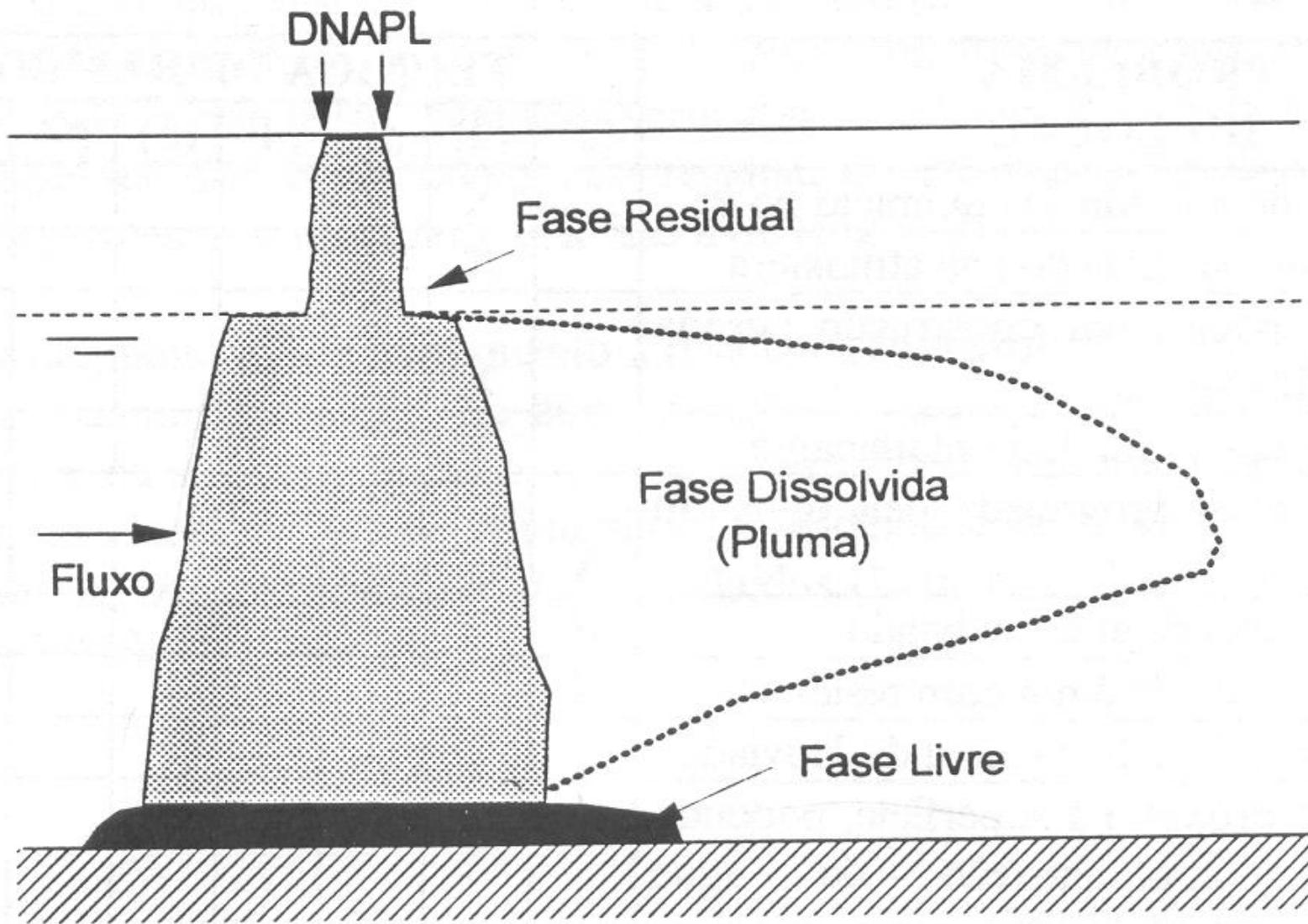


Fig. 1.3: Dissolução da Fase Residual de um *NAPL* na Água Subterrânea.

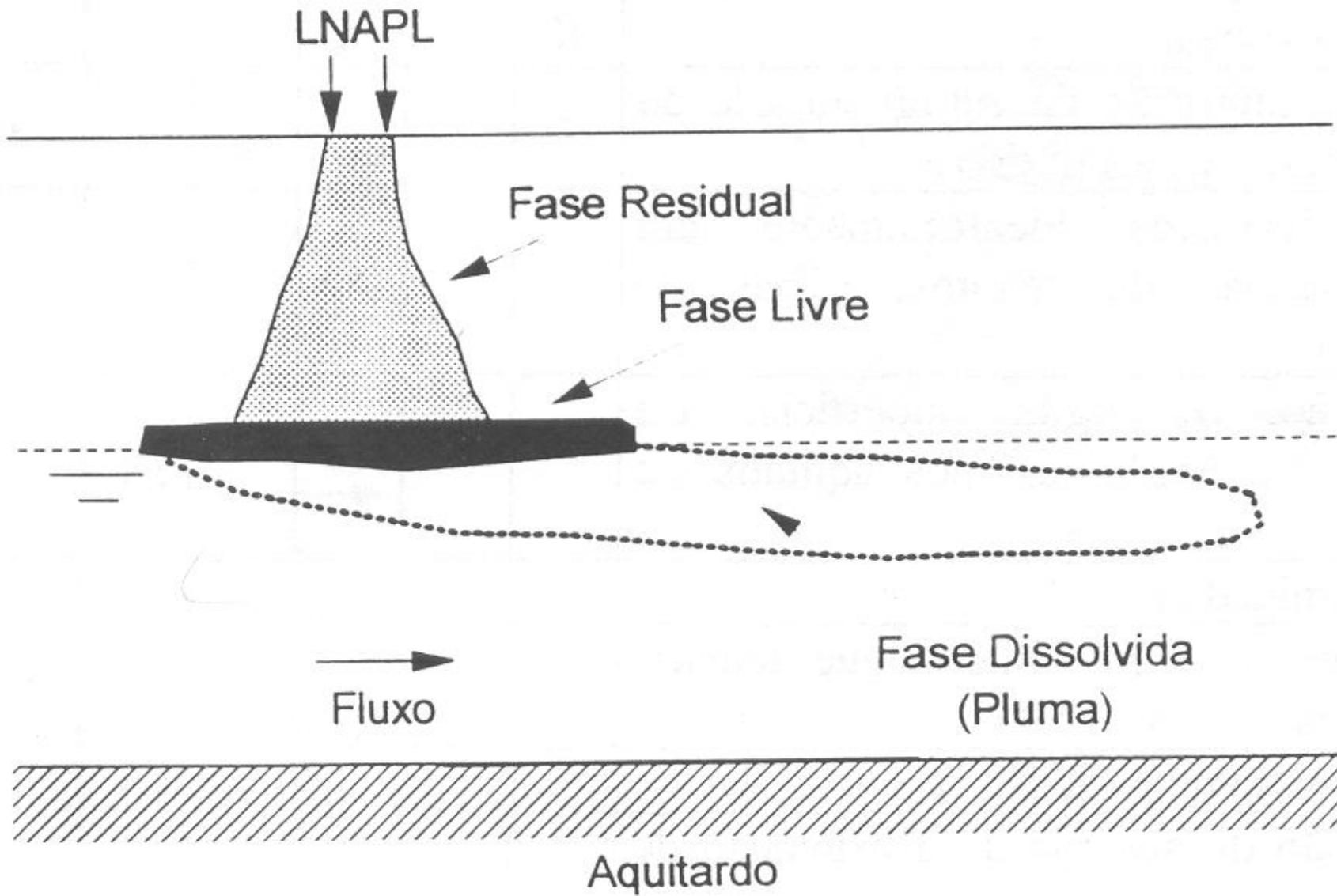
(Gusmão, 1999)



Aquitardo

(a)

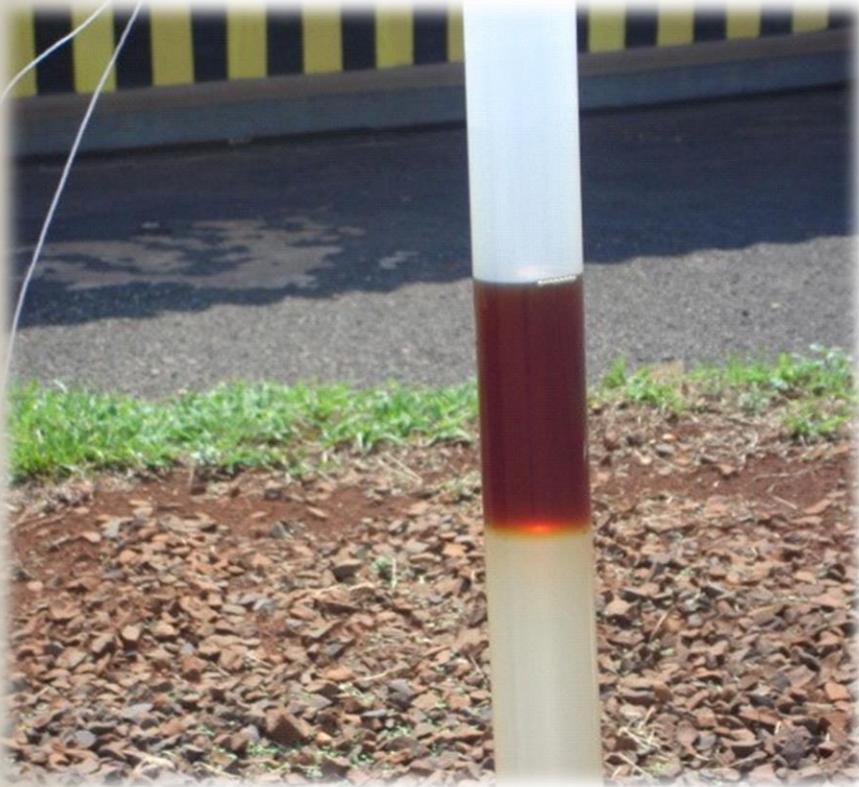
(Gusmão, 1999)



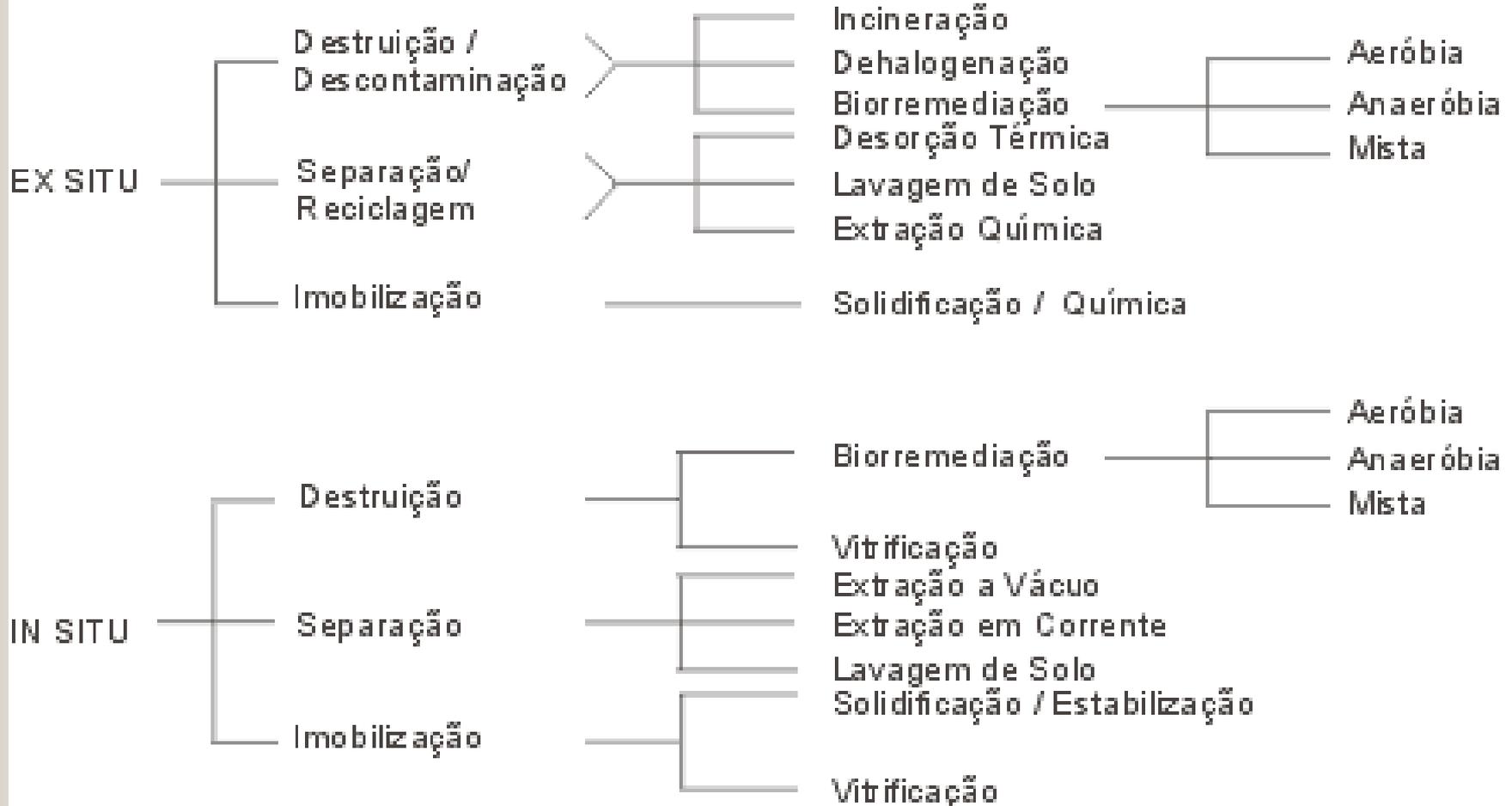
(b)

(Gusmão, 1999)

Fase Livre



Remoção do solo	Categoria da tecnologia	Técnica/Processo	Exemplos	Comentários
Sim (ex situ)	Contenção	Disposição	Aterros	On-site x off-site
				Novo x já existente
	Tratamento	Químico	Neutralização, extração por solvente	Solo tratado pode ser disposto em um aterro ou retornado ao local
		Físico	Lavagem de solo, estabilização, solidificação, vitrificação	
		Biológico	Biopilhas, biorreatores	
Térmico		Incineração, desorção térmica		
Não (in situ)	Contenção	Pump and treat	Poços verticais, poços horizontais	No “pump and treat”, a função do bombeamento é controlar o gradiente hidráulico e coletar a água contaminada; o tratamento é ex situ.
		Cobertura	Coberturas tradicionais, alternativas, geoquímicas	
		Barreiras verticais	Diafragmas flexíveis, cortinas de “grouting”, estacas-prancha, biobarreiras, barreiras reativas	
		Barreiras horizontais	Barreiras horizontais de “grouting”	
	Tratamento	Químico	Oxidação, redução	* tecnologias que exigem remoção das fases líquida e/ou gasosa e tratamento ex situ.
		Físico	Lavagem*, estabilização/solidificação, vitrificação, aspersão de ar abaixo do lençol subterrâneo (“air sparging”)*, extração de vapor do solo*, eletrocinese*	



VALORES ORIENTADORES PARA SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA PROPOSTOS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO

Substância	CAS N°	Referência (a)	Prevenção	Solo (mg/kg)			Água Subt (µg/L)
				Intervenção			Intervenção
				Agrícola APMax	Residencial	Industrial	

Etenos clorados

1,1-Dicloroetano	75-34-2	<LD	-	6	12	24	875
1,2-Dicloroetano	107-06-2	<LD	0,075	0,15	0,25	0,50	10
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6	<LD	-	9	10	30	280

Etenos clorados

Cloreto de vinila (Monocloroetano)	75-01-4	<LD	0,01	0,02	0,003	0,008	5
1,1 Dicloroetano (Dicloroetileno)	75-35-4	<LD	-	4	3	8	30
1,2-Dicloroetano - cis	156-60-5	<LD	-	1,5	3	4	50 (s)
1,2-Dicloroetano - trans	156-60-5	<LD	-	4	8	12	
1,1,2-Tricloroetano (TCE)	79-01-6	<LD	0,0078	8	8	20	70
1,1,2,2 – Tetracloroetano (PCE)	127-18-4	<LD	0,054	4	8	16	40

VALOR DE
INTERVENÇÃO - I

Concentração de uma substância no solo e na água subterrânea que provoca riscos potenciais diretos e indiretos à saúde humana, considerado um cenário de exposição genérico



Metodologias de remediação mais utilizadas

- **Contenção/Remoção:**

- Capeamento e Barreiras Hidráulicas
- Bombeamento e Tratamento
- Extração de Vapores (SVE)
- Escavação

- **Destruição:**

- Extração Multifásica (MPE)
- Oxidação Química In-situ
- Redução Química In-situ
- Termal

Sistema MPE Fixo



Sistema MPE Móvel



Sistema AS (Air Sparging)



Sistema SVE



Sistema ISCO (Oxidação Química in situ)



Unidade de Dessorção Térmica – TDU



- 
- As técnicas de bombeamento e tratamento da água, remoção do solo, extração de vapores, recuperação da fase livre, extração multifásica e “air sparging” respondem por 88% das remediações concluídas.
 - Os grupos contaminantes mais encontrados são os solventes aromáticos e os combustíveis líquidos, que perfazem 64% das contaminações cadastradas; adicionando-se os PAHs (hidrocarboneto policíclicos aromáticos) e os metais, tem-se 90% das áreas contaminadas.



Remoção e tratamento do solo

- Profundidade do lençol freático elevada, 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

- Quando as mais eficientes alternativas de remediação são muito onerosas, devido ao elevado volume de solo a ser tratado ou à mistura de resíduos e contaminantes que levaria a diversos tipos de tratamento combinados, uma alternativa é a execução de um confinamento dos resíduos e/ou solo contaminado, impedindo o contato e posterior percolação das águas de chuva, isolando os resíduos dos seres vivos e diminuindo ao máximo o aporte de contaminantes ao lençol freático (Campos 2003).



Confinamento geotécnico

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



Confinamento geotécnico

- O confinamento é obtido pela utilização conjunta de coberturas, barreiras verticais e barreiras horizontais de fundo, que envolvem todo o material a ser isolado.
- O confinamento geotécnico impede a continuação do processo de contaminação do subsolo e do lençol freático, porém persiste a necessidade de saneamento do lençol e da interrupção do avanço da pluma de contaminação; é, portanto, geralmente associado à remoção e tratamento de águas subterrâneas. O nível do lençol freático é rebaixado sob o confinamento por bombeamento, e a água retirada é tratada e descartada ou re-introduzida no subsolo (“pump-and-treat”).



Confinamento geotécnico

- Cobertura
- Barreiras verticais
- Remoção de água subterrânea e tratamento



Barreiras verticais

Objetivo:

- Barreira para água subterrânea: permeabilidade
- Barreira para poluentes: considerar também outros mecanismos de transporte de poluentes além do advectivo



Barreiras verticais

- Barreiras no perímetro da área contaminada.
- Podem ser localizadas em parte do local, a jusante da área contaminada para melhorar a eficiência de sistema de remoção de água subterrânea, ou para evitar a entrada de água subterrânea limpa na área contaminada.
- Engastadas em estratos naturais de menor permeabilidade.



Barreiras verticais

- Permeabilidade da barreira deve ser significativamente menor do que a do subsolo natural.
- Trincheira escavada usando lama bentonítica e preenchida com sol-bentonita, cimento-bentonita, concreto plástico ou concreto reforçado.
- Por injeção: “jet grouting”.
- Cortinas de estacas-prancha.
- Painéis de geomembranas.

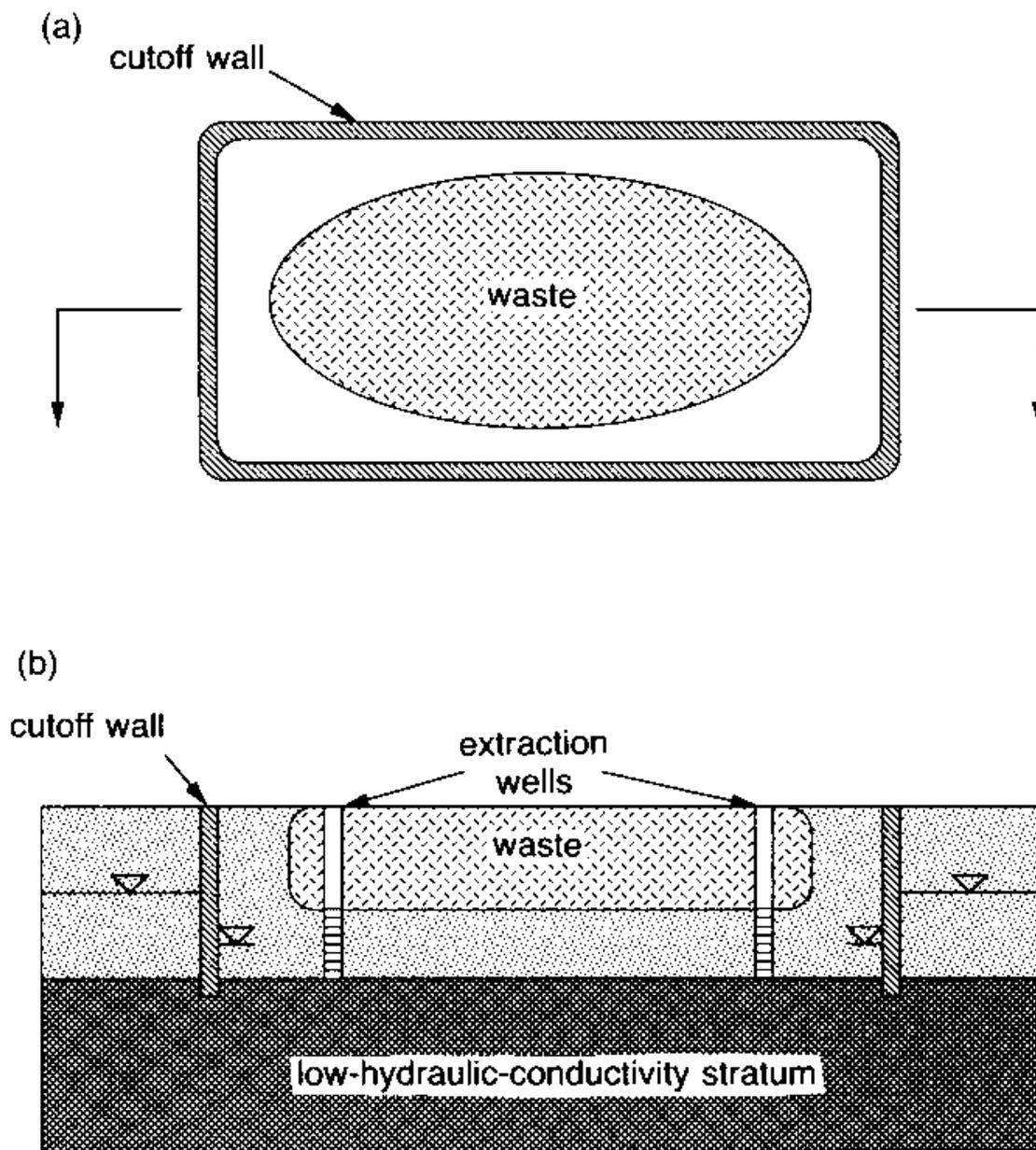


Fig. 17.1 Schematic diagram of vertical cutoff wall configuration for typical site remediation project: (a) plan view and (b) cross-section.

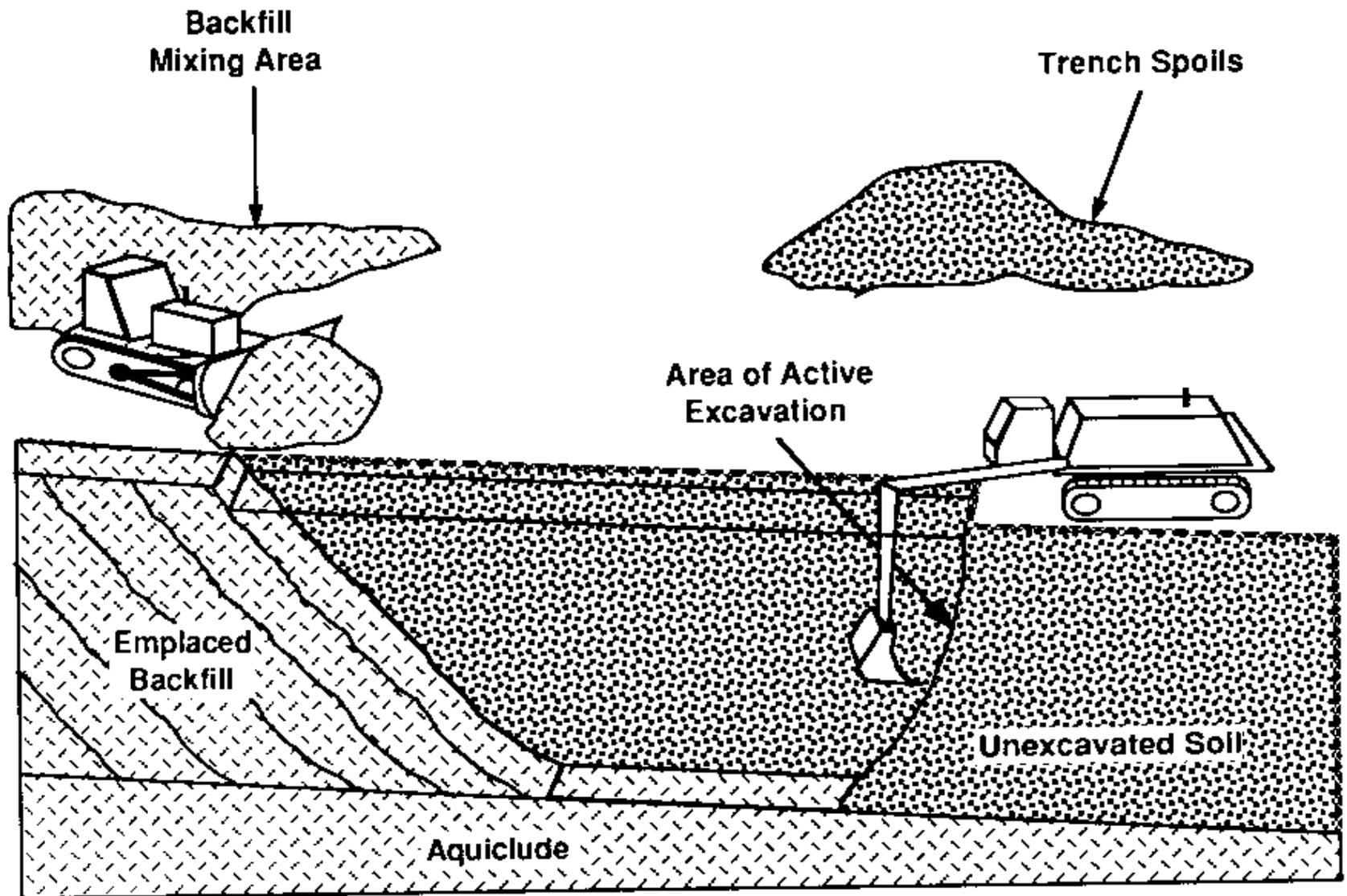
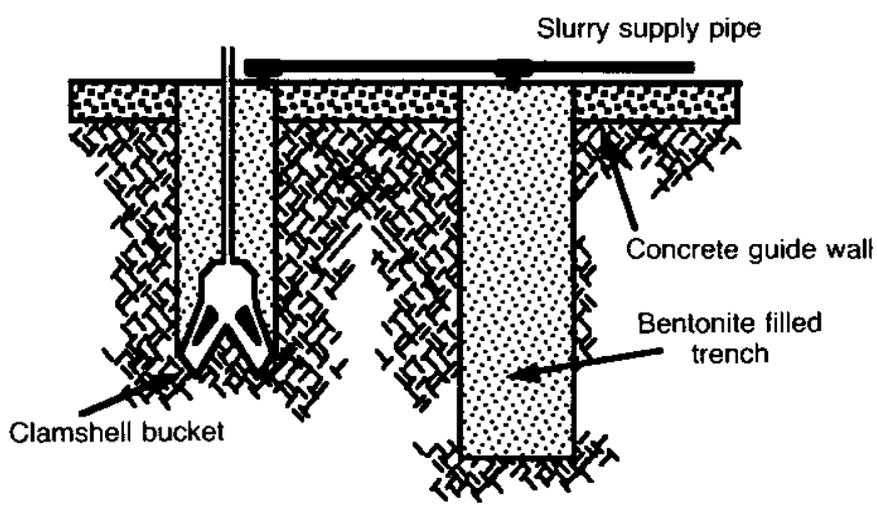
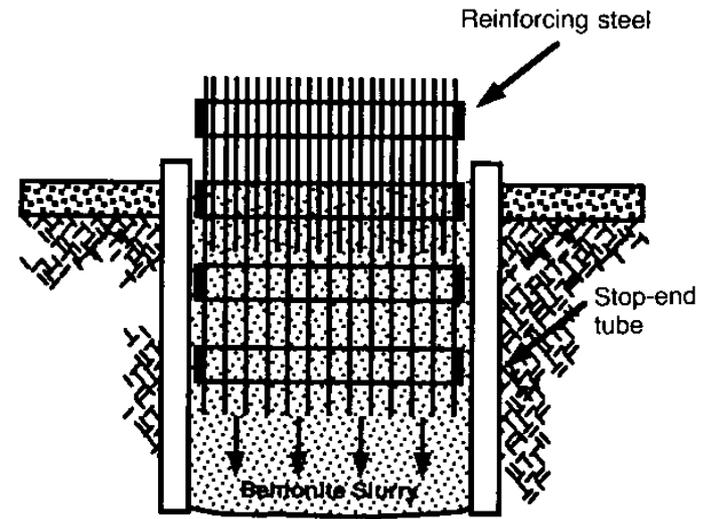


Fig. 17.2 Excavation of trench and placement of soil-bentonite backfill.

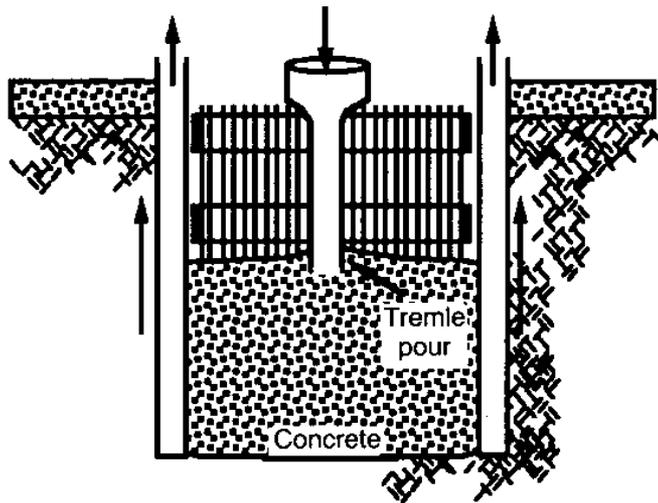
(Daniel, 1993)



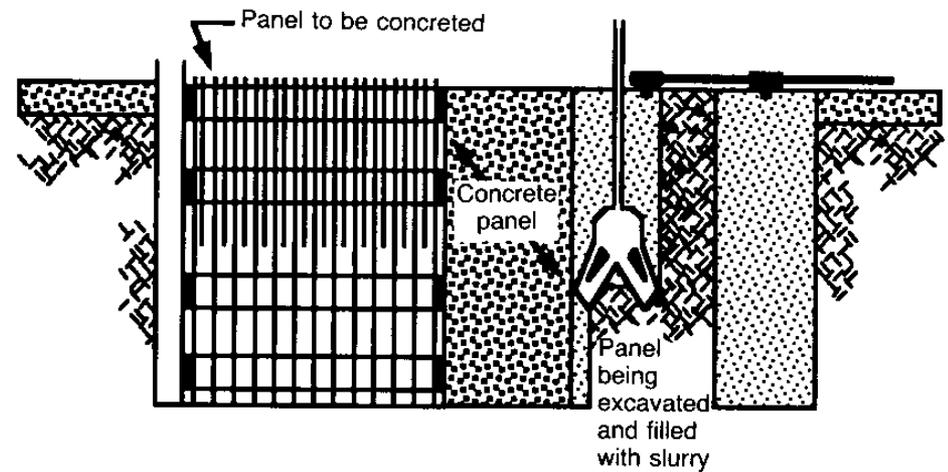
(a)



(b)

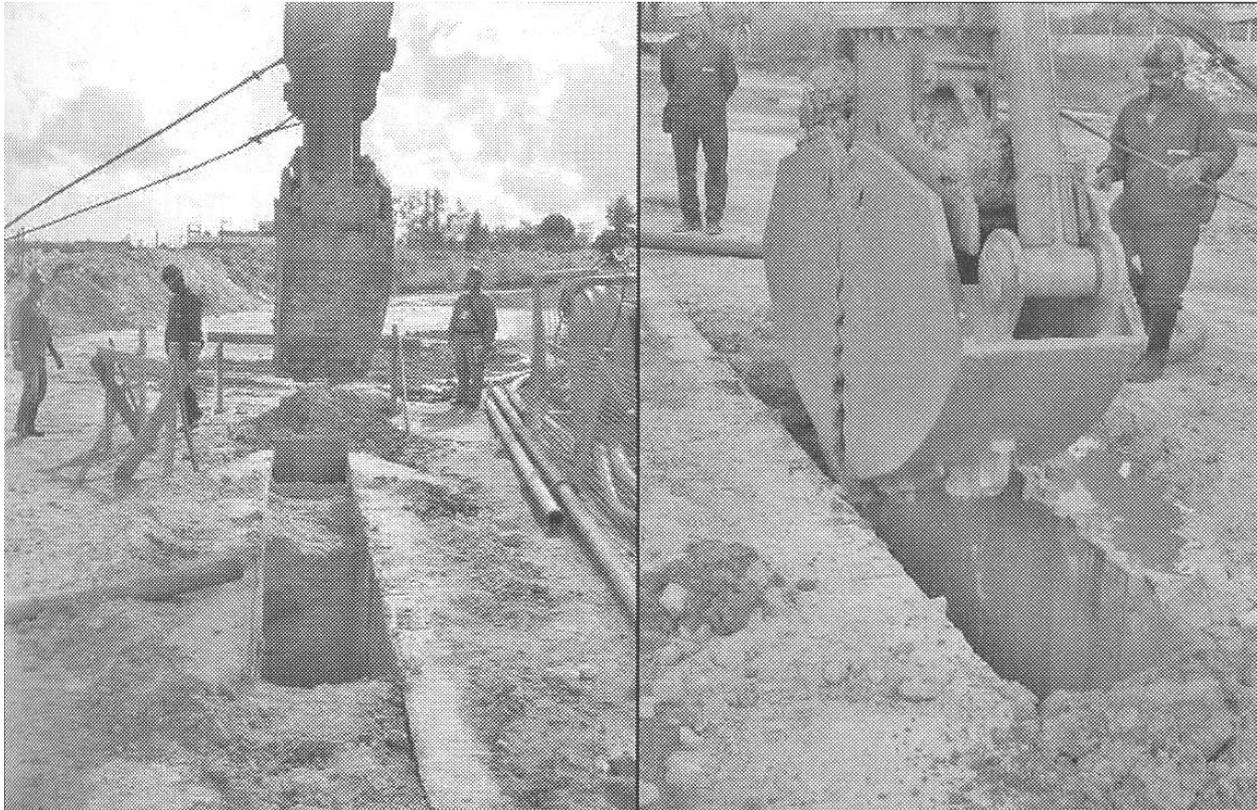


(c)



(d)

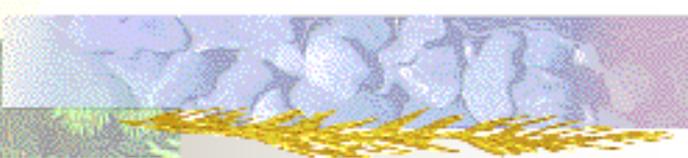
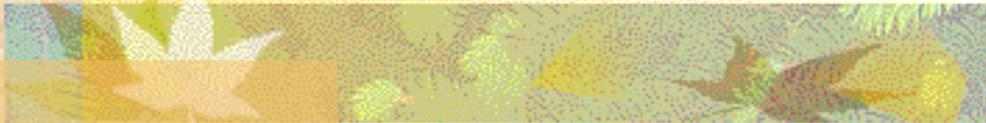
Parede diafragma (Daniel, 1993)



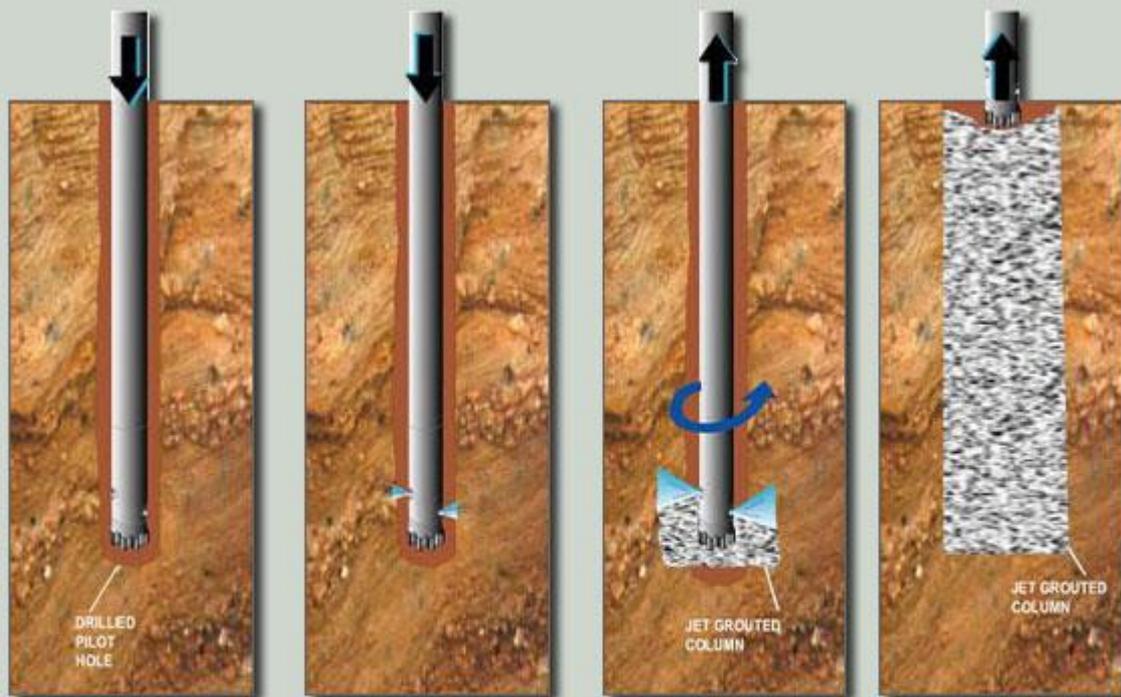
Escavação de parede-diafragma (Maia Nobre 2006)











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 GROUDED
COLUMN IS COMPLETED.



← Pompe HP (couils)
← Compresseur (abri)







Barreiras verticais

- A escolha do tipo e dos materiais das barreiras verticais é feita considerando a profundidade e o comprimento da parede, o limite superior aceitável de permeabilidade, a extensão e o tipo da contaminação, o tipo do solo, as condições da barreira de fundo, a profundidade até o nível d'água, o equipamento de construção disponível, a experiência anterior e custos.



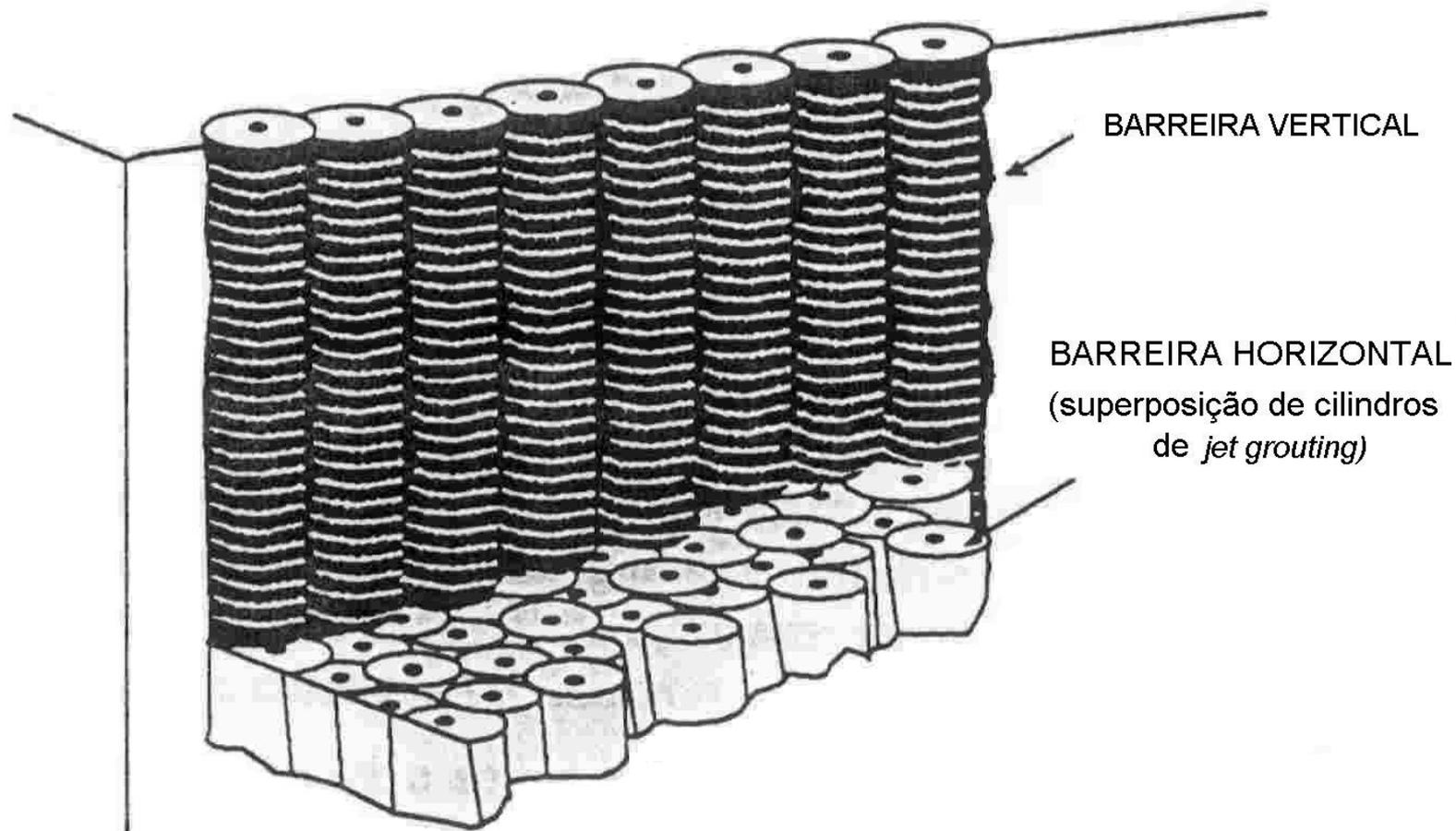
Barreiras horizontais

- Coberturas
- Barreiras horizontais de fundo

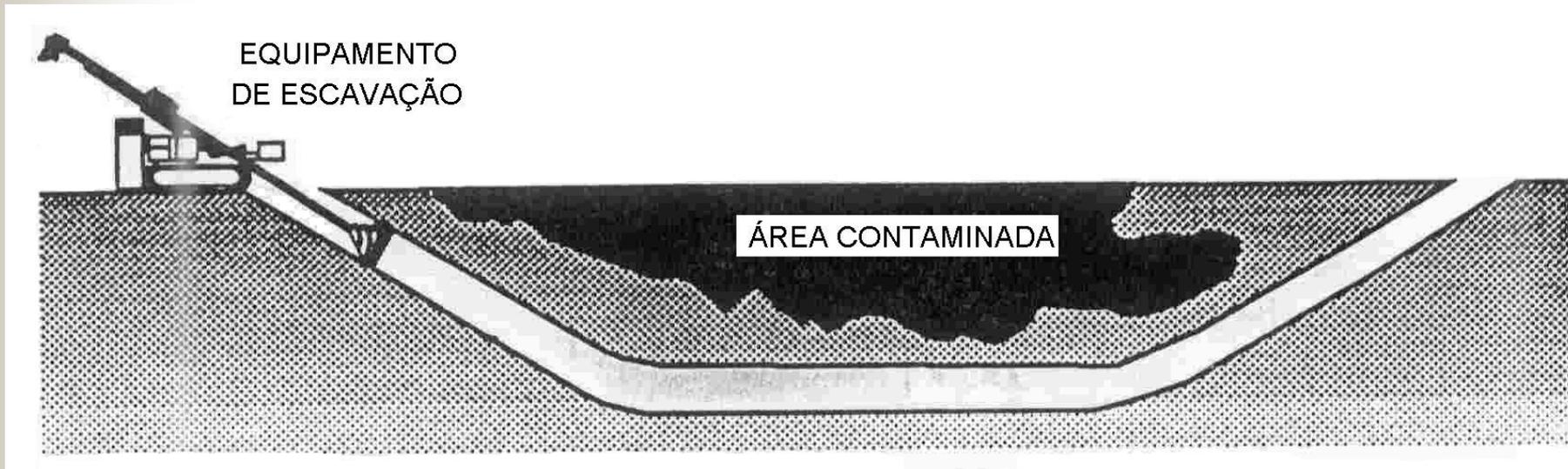


Barreiras horizontais de fundo

- São utilizadas quando o estrato natural de baixa permeabilidade é profundo, principalmente quando os contaminantes são líquidos densos não solúveis em água (Dense Non-Aqueous Phase Liquids - DNAPL), que migram em sentido descendente pelo subsolo, contaminando-o até grandes profundidades e dificultando o processo de remediação.
- As barreiras horizontais de fundo podem ser construídas por superposição de colunas de “jet grouting”, por 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))



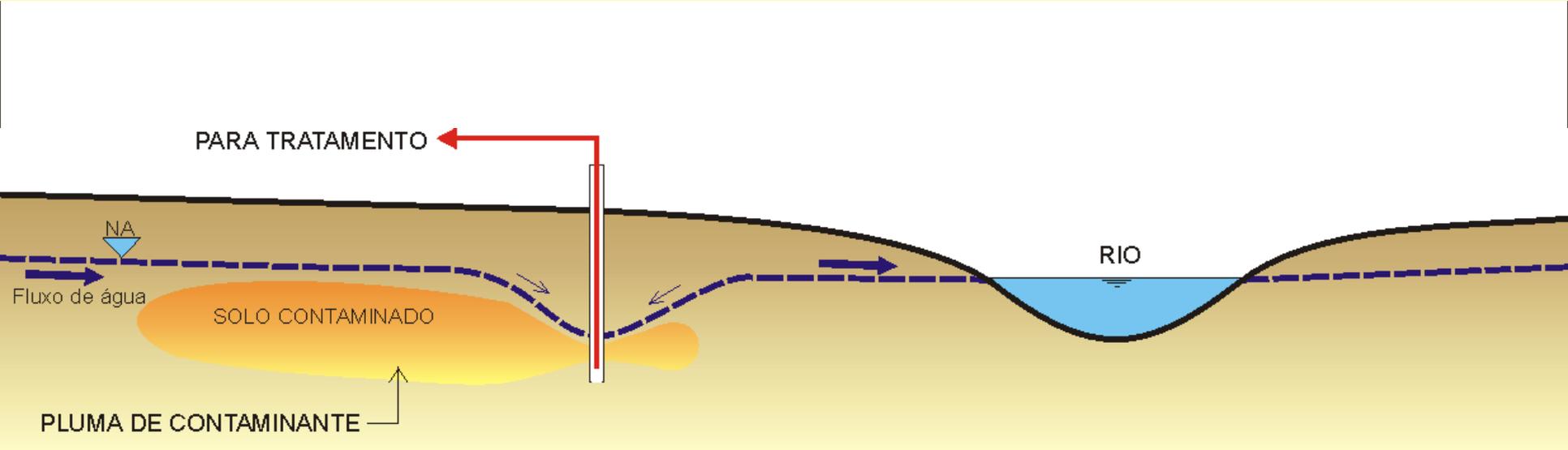
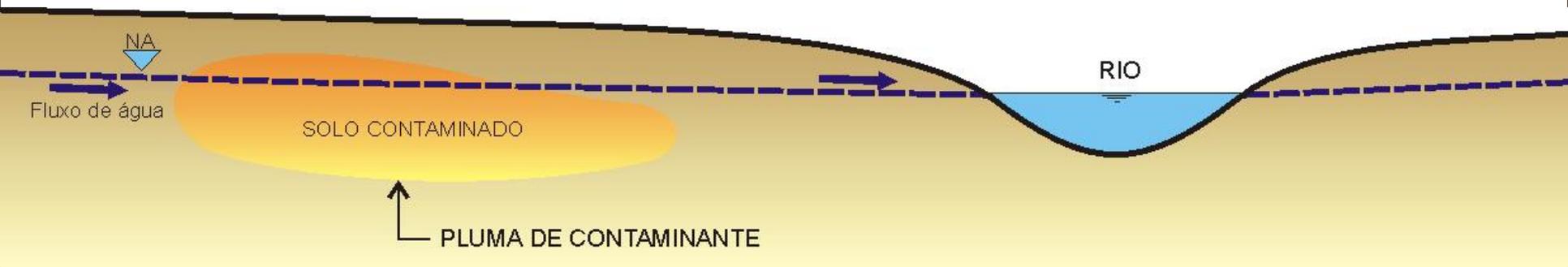
“Pump-and-treat”

- Aceleração da remoção dos contaminantes do aquífero por meio de injeção de surfactantes ou de co-solventes, 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.



Barreira Hidráulica

- 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)



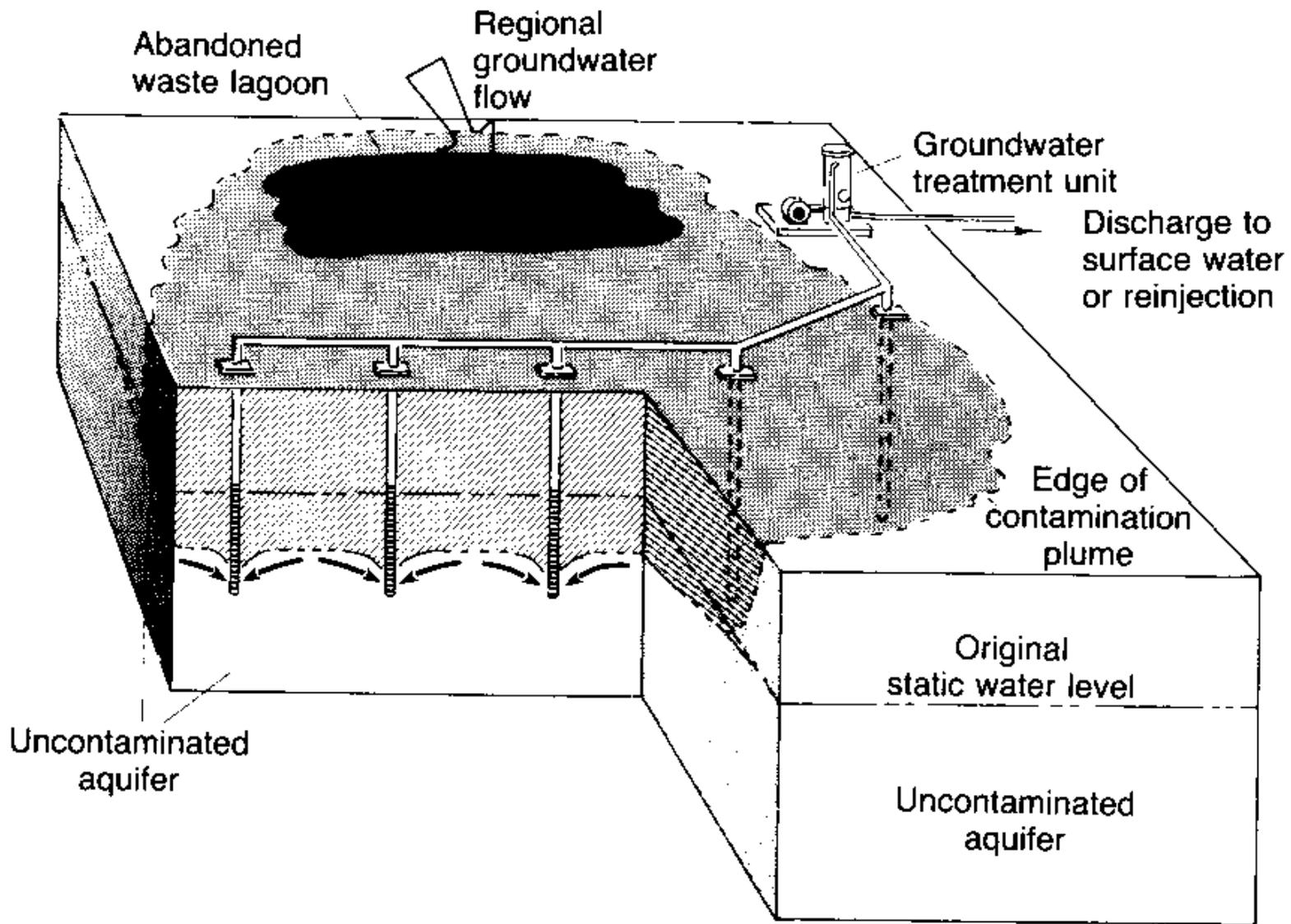
Barreira Hidráulica

- 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.
- O princípio do funcionamento da Barreira Hidráulica consiste em executar um bombeamento das águas subterrâneas contaminadas, encaminhando estas para tratamento em uma Estação de Tratamento de Efluentes, e posterior descarte e/ou devolução ao lençol através de injeção ou simples infiltração.

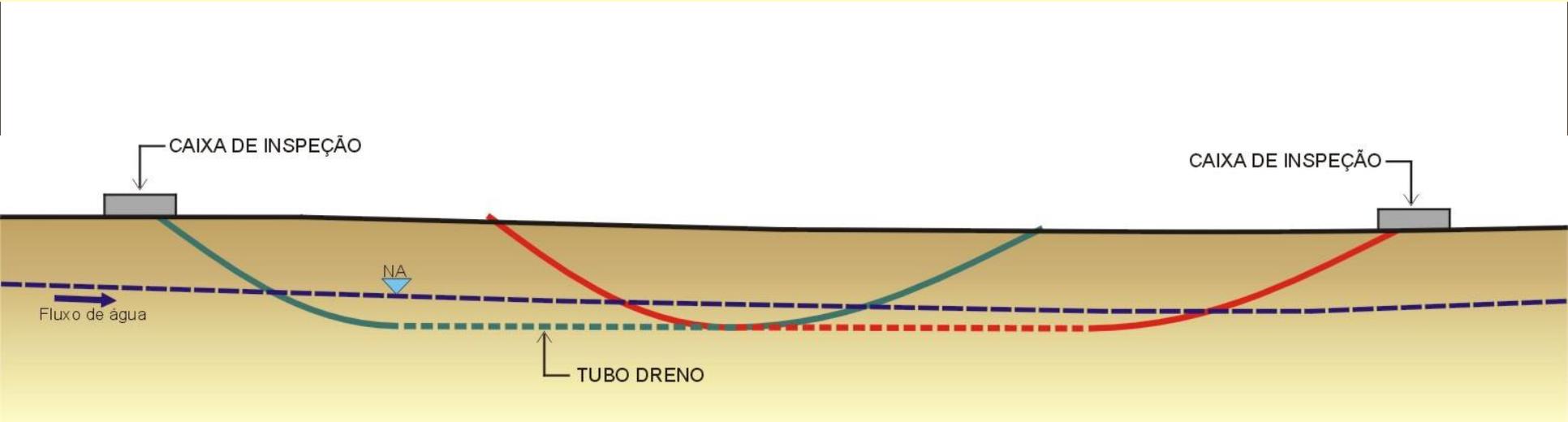
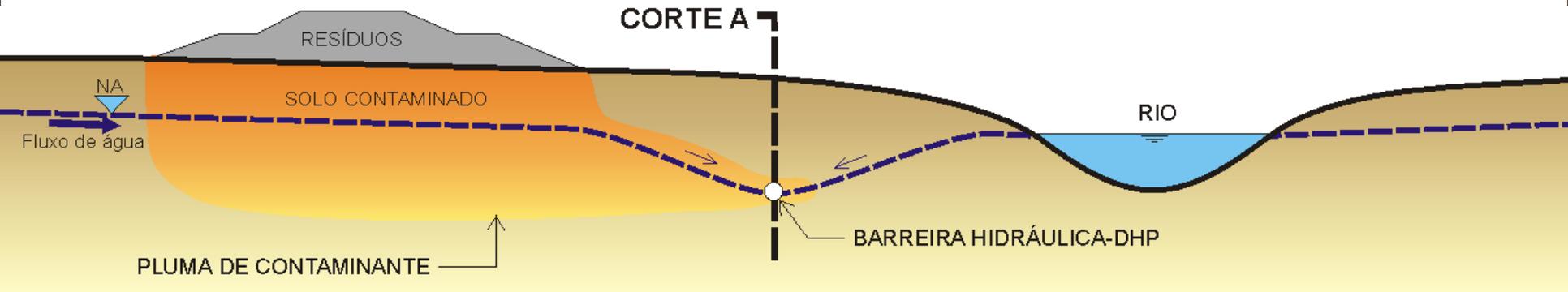


Barreiras hidráulicas

- Poços de bombeamento de pequeno diâmetro
- Poços escavados de grandes diâmetros;
- Ponteiros filtrantes à vácuo (*well points*);
- Drenos escavados
- DHPs

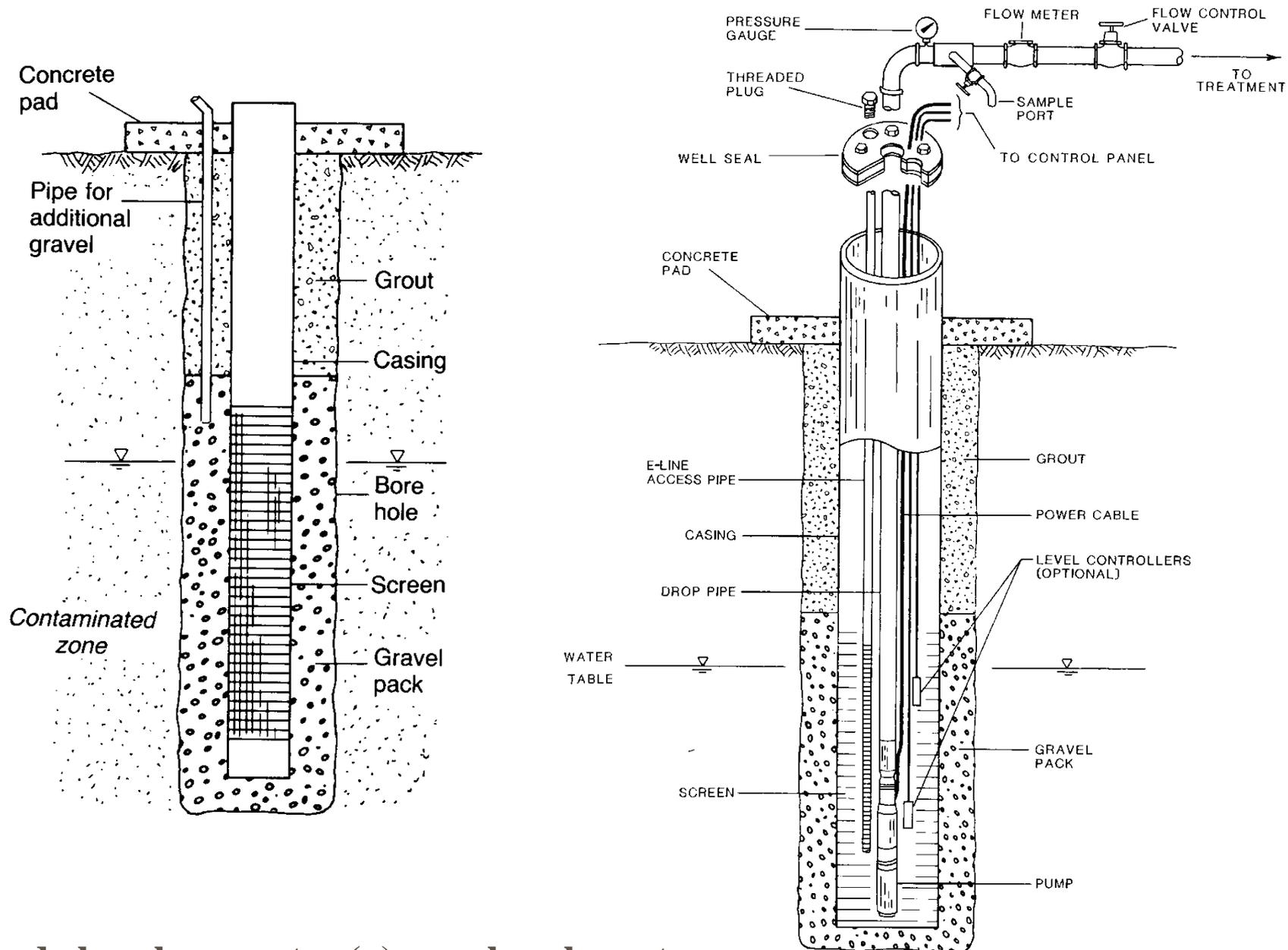


(Daniel, 1993)



Barreira hidráulica por DHP

(Campos, 2003)



**Poço de bombeamento: (a) com bomba externa;
(b) com bomba submersa (Daniel 1993)**



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, bem como da localização e profundidade da pluma de contaminação.

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.



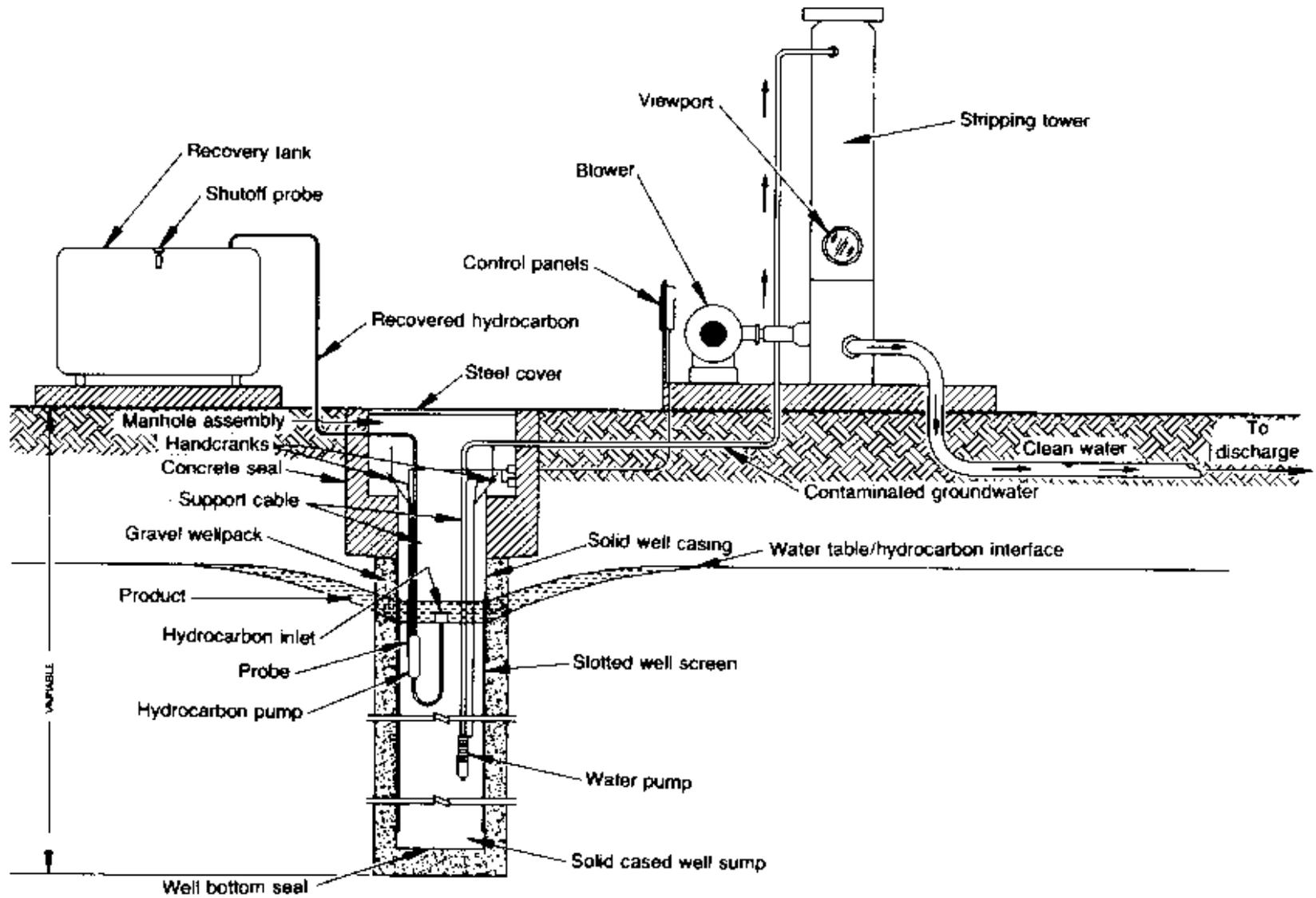
As ponteiras filtrantes (well points), além dos limitantes anteriormente descritos, devem ser instaladas somente em casos onde a pluma de contaminantes esteja limitada a, no máximo, cinco metros de profundidade, devido à capacidade limitada de funcionamento das ponteiras com a profundidade do lençol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

Tanto a instalação de poços de bombeamento, quanto a implantação de sistemas constituídos por cortinas de ponteiras filtrantes, possuem ainda 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, estão atualmente caindo em desuso devido aos elevados volumes de solo e água contaminados que são gerados durante a implantação do sistema.

Além disto, as dificuldades de execução e necessidade de interrupção das atividades diárias do local levaram à necessidade de procura de novas opções de sistemas de remediação, como é o caso dos Drenos Horizontais Profundos (DHPs).





Instalação de DHP por perfuração direcionada a partir da superfície
(Campos, 2003)



Extração de vapor

- VOC – volatile organic compound
- Zona vadosa (solo não saturado)
- Manufatura de pesticidas, plásticos, tintas, produtos farmacêuticos, solventes e têxteis
- Solventes sintéticos e constituintes do petróleo



Extração de vapor

- Instalação de um ou mais poços de extração de vapor na área contaminada com aplicação de vácuo para extrair VOCs.
- O fluxo de ar retira os VOCs do solo; à medida que os poluentes vão sendo retirados, mais VOCs passam para a fase de vapor.
- O ar extraído é descartado na atmosfera, após tratamento, através de uma chaminé.
- Solos de permeabilidade relativamente alta.



Extração de vapor

- Remoção de vapores do gás do solo, promoção de volatilização, dissolução de VOCs na água do solo, dessorção de VOCs dos sólidos do solo.
- Aeração aumentada aumenta biodegradação dos compostos mais pesados, que não são retirados por extração de vapor.
- Eficiente para gasolina e solventes.



Extração de vapor

- Variações para aumentar a eficiência do método (poços horizontais em pilhas, poço com função dupla para rebaixar o lençol e aplicar vácuo, injeção de ar).



Extração de vapor

- Air Sparging: injeção forçada de ar na porção saturada do subsolo contaminado.
- A injeção de ar promove a oxigenação do meio e o arraste dos compostos orgânicos voláteis, presentes em fase dissolvida, em direção à zona não saturada. O aumento das concentrações de oxigênio no aquífero também potencializa a biodegradação aeróbia do meio.



Extração de vapor

- MPE – Multiphase Extraction: aplicação de alto vácuo, com simultânea extração dos vapores da zona não saturada, da fase dissolvida no lençol e da fase livre do contaminante que fica sobrenadante ao lençol freático.
- Uma bomba instalada em um tanque produz vácuo, que pela tubulação atinge poços de extração, extraíndo simultaneamente líquido e vapor.
- Os líquidos se acumulam em uma caixa separadora; o vapor é encaminhado a uma chaminé para tratamento e descarte na atmosfera; a água é reinjetada no solo após resfriamento e ajuste de pH; o óleo separado é coletado em tambores.



Estudo de caso na RMSP (Sanchez, 2009)

- Posto de serviço, lavador de autos, um estacionamento de veículos e uma oficina mecânica
- Sedimentos terciários da Formação São Paulo
- Camada arenosa de 4 m de espessura, confinada por uma camada superficial de argila silto-arenosa e uma camada inferior de argila siltosa rija
- NA a 7,5 m de profundidade
- 17 sondagens com coleta de 42 amostras de solo
- 17 poços de monitoramento com coleta de 17 amostras de água subterrânea
- HTP, HPA e BTEX



Estudo de caso (Sanches, 2009)

- Compostos orgânicos voláteis em concentrações com alto risco de explosividade, na área dos antigos tanques, confinados na parte não saturada da camada arenosa (até 6000 ppm)
- Hidrocarbonetos de petróleo, naftaleno, benzeno e xileno no solo e águas subterrâneas, sem formar fase livre sobrenadante

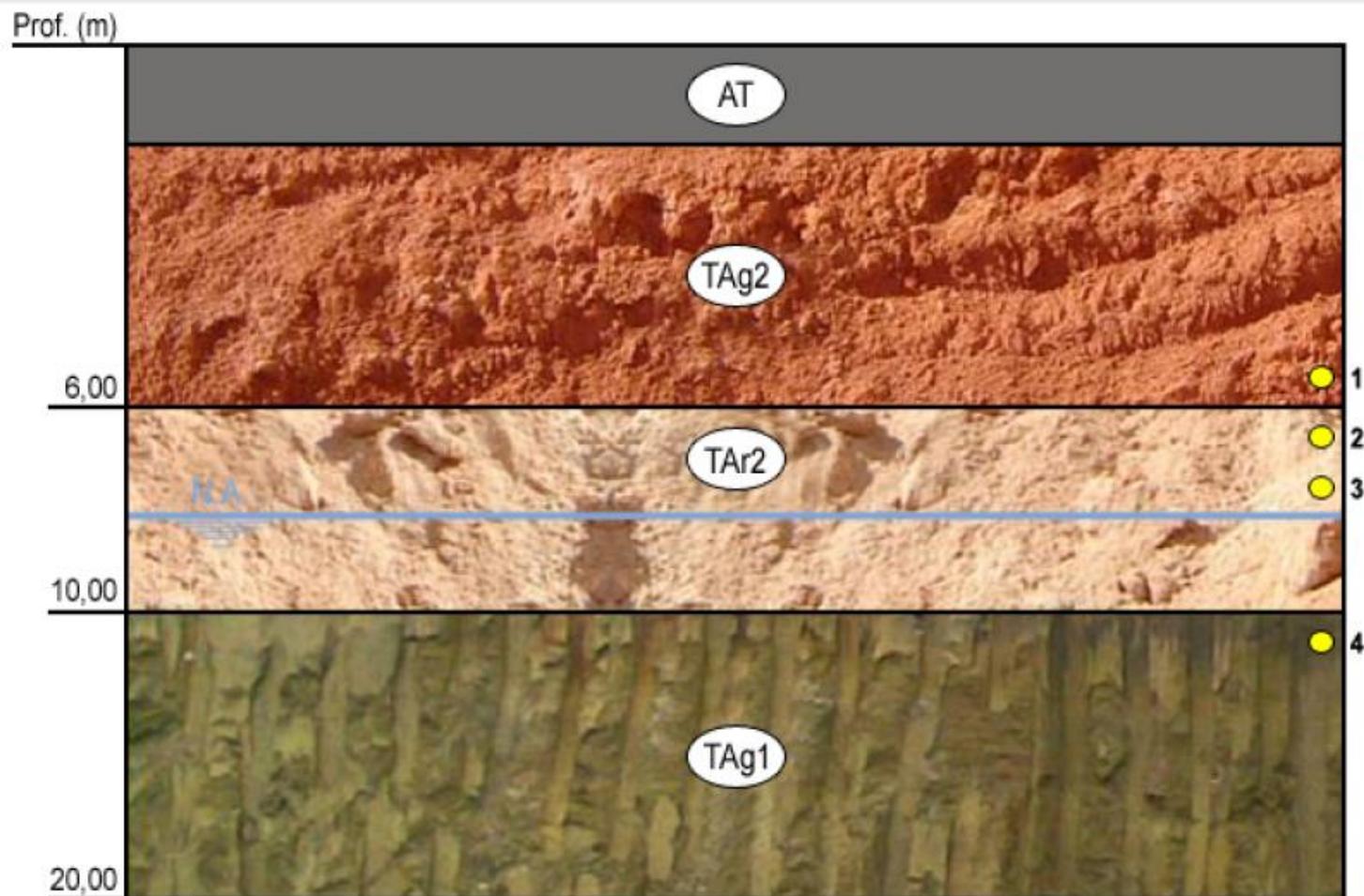
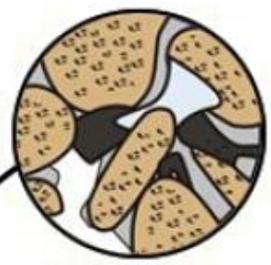
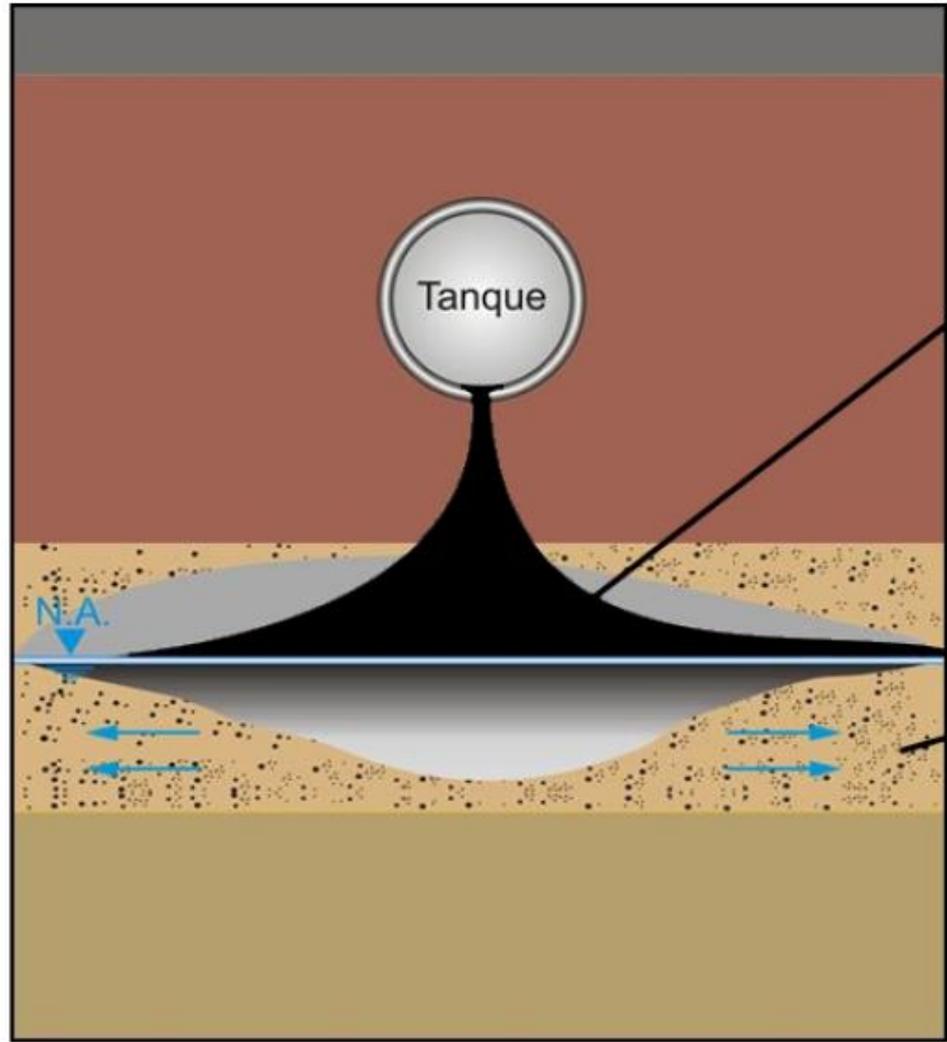
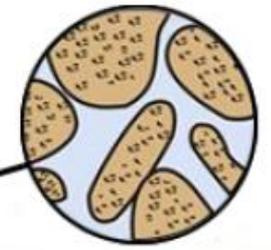


Figura 14 – Perfil geológico típico da área: AT – aterro; Solos da Formação São Paulo: TAg₂ – argilas silto-arenosas, variegadas; TAr₂ – areia fina a grossa pouco argilosa, variegada; TAg₁ – argila siltosa rija, variegada.

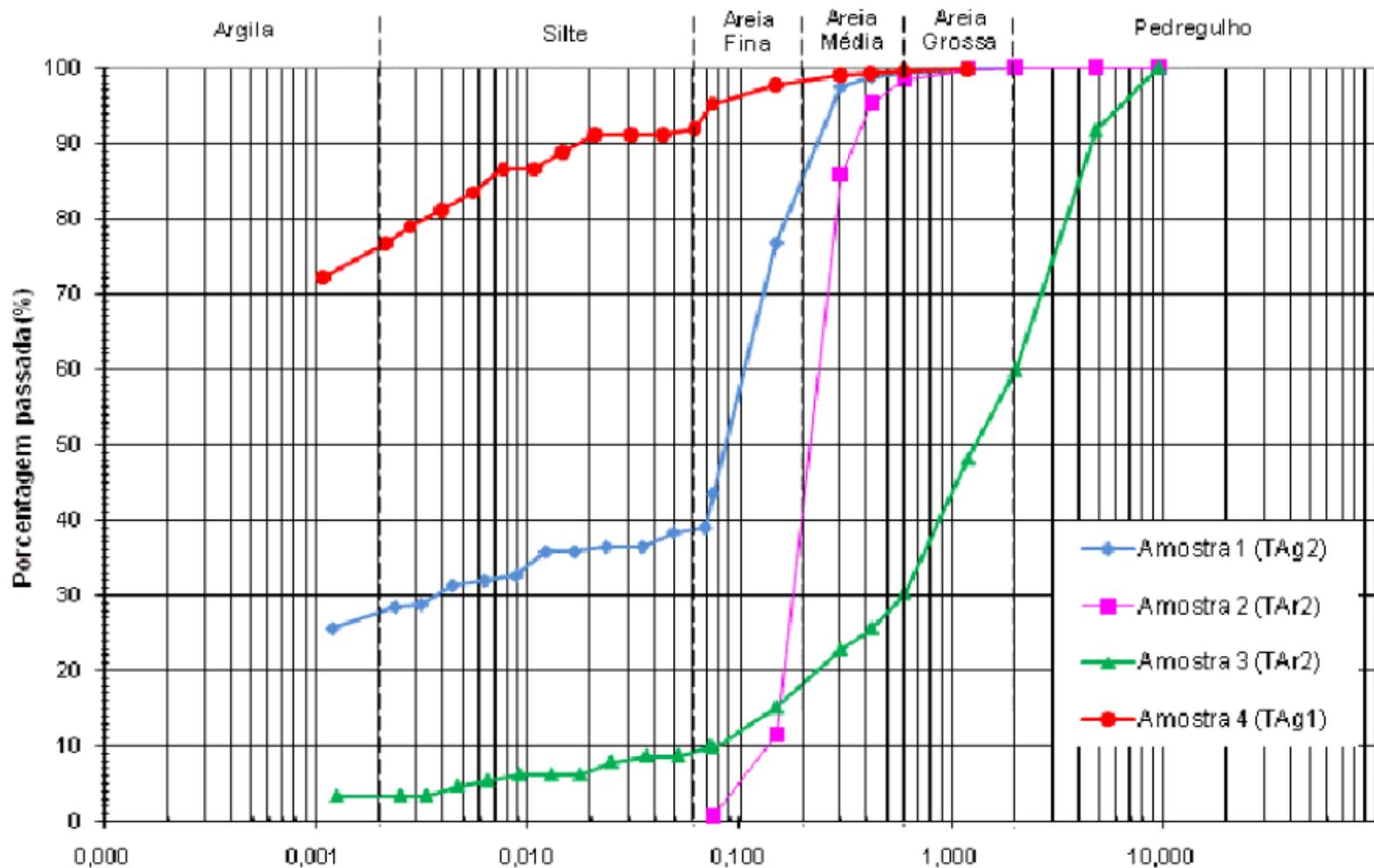
-  Aterro
-  Camada de Argila Silto-Arenosa
-  Camada Arenosa
-  Camada de Argila Siltosa Rija
-  Fase Sorvida
-  Fase de Vapor
-  Fase Dissolvida



Fase Sorvida

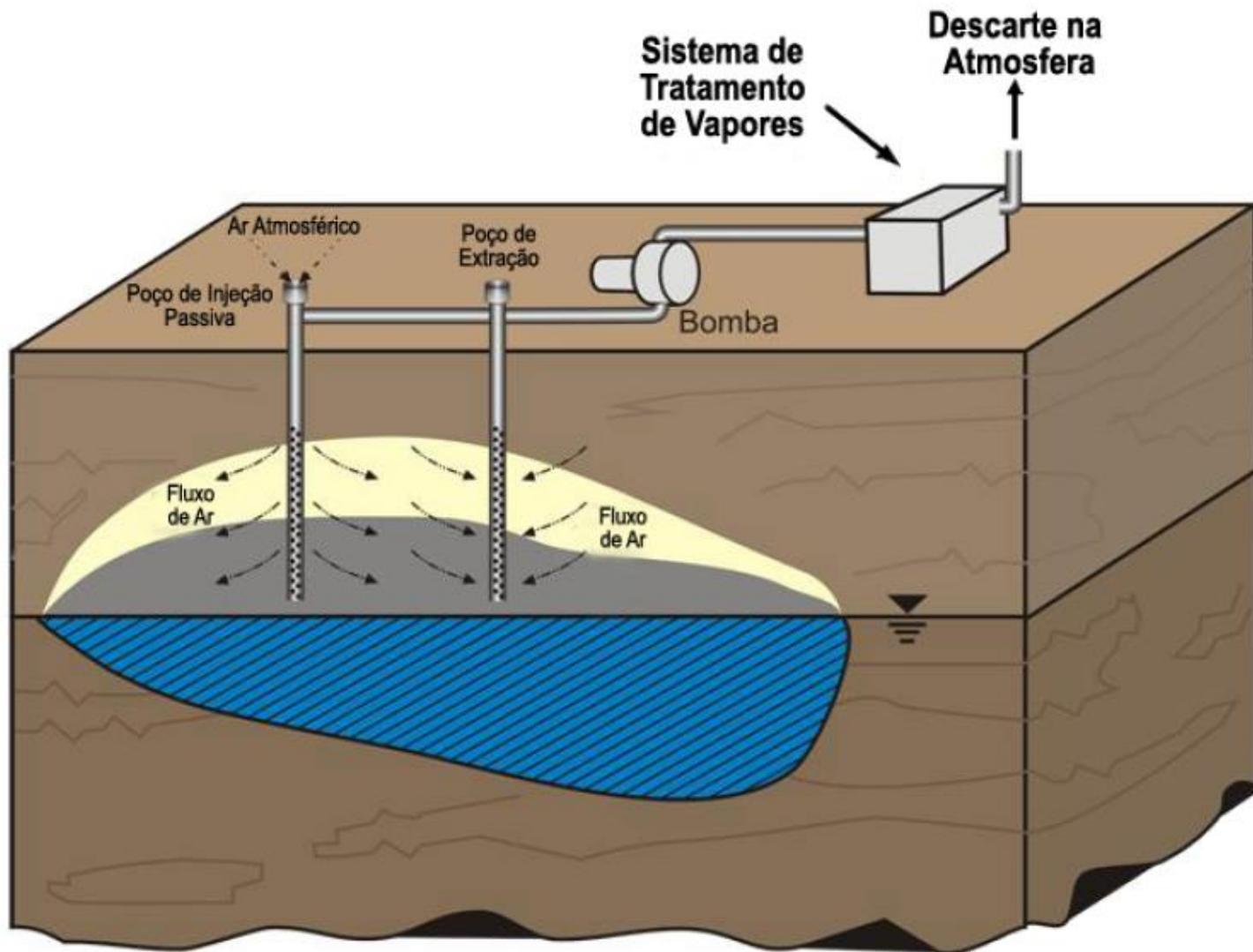


Fase Dissolvida



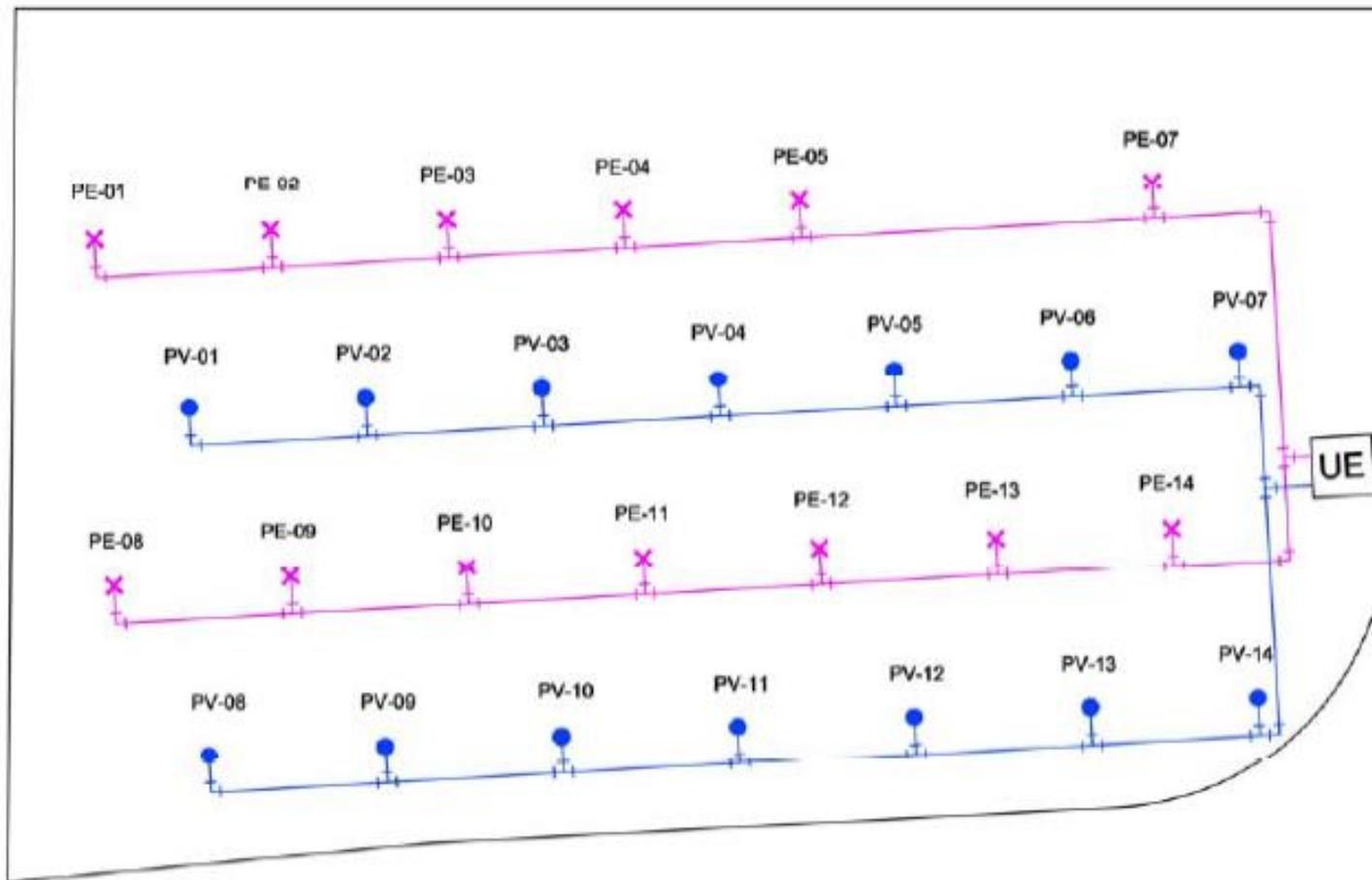
$$K_{\text{areia}} = 7 \times 10^{-5} \text{ a } 2 \times 10^{-4} \text{ m/s (} e_{\text{mín}} \text{ e } e_{\text{máx}} \text{)}$$

$$K_{\text{ar}} = 3 \times 10^{-12} \text{ a } 2 \times 10^{-11} \text{ m}^2$$



Legenda

-  Fase de Vapor
-  Fase Sorvida
-  Fase Dissolvida



LEGENDA

- ✕ PE - Poço de Extrato
- PV - Poço de Ventilação
- UE Unidade de Exatção



Figura 18 – Localização esquemática dos poços de extração e ventilação.

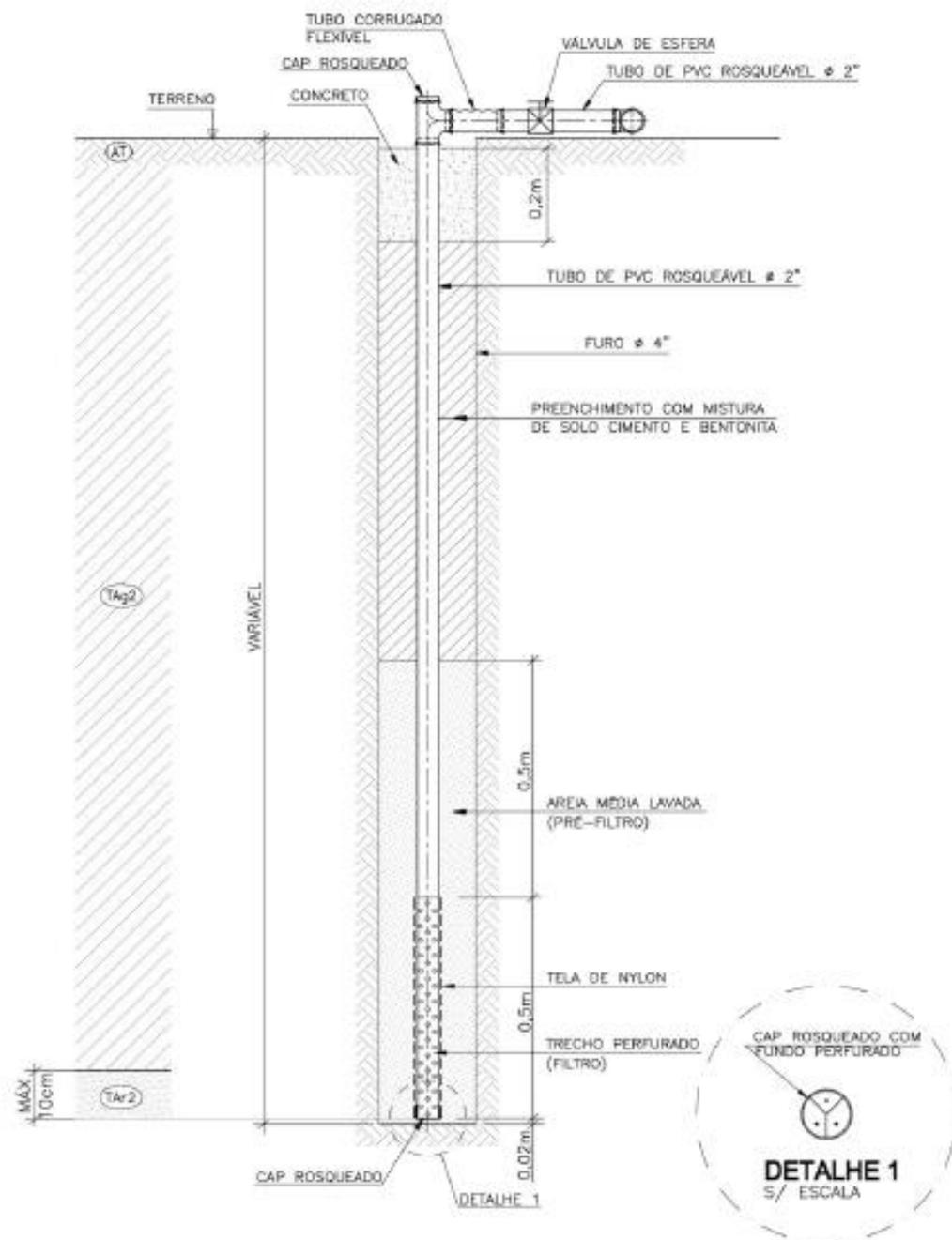


Figura 19 – Perfil típico de instalação dos poços de extração e ventilação.

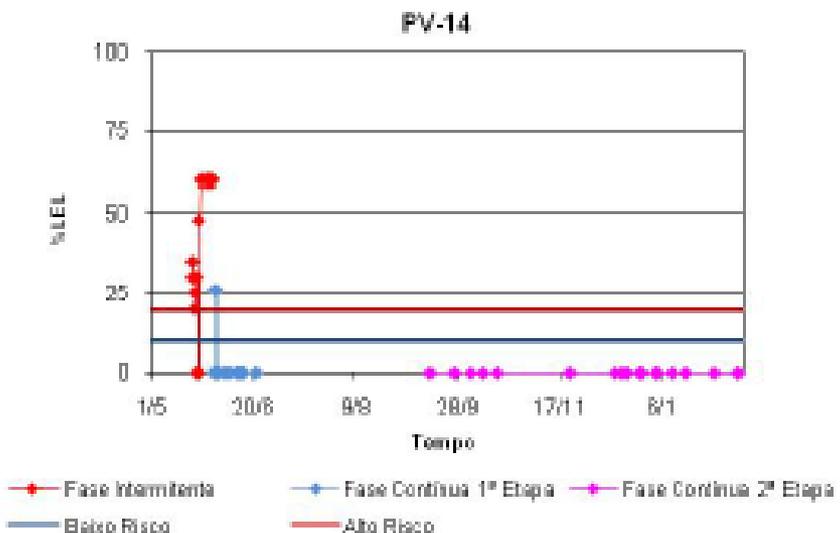
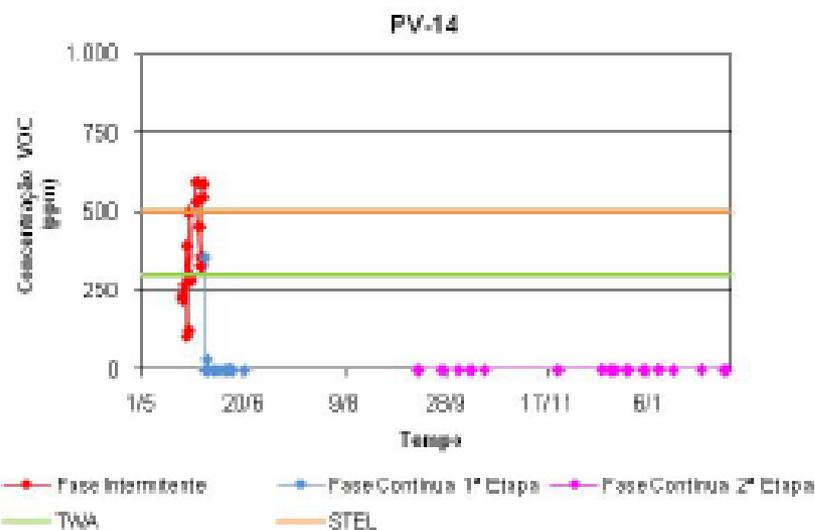
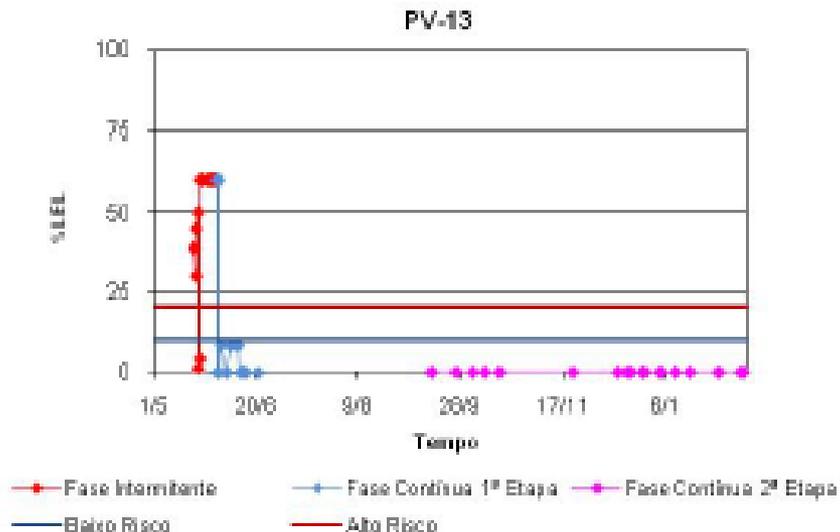
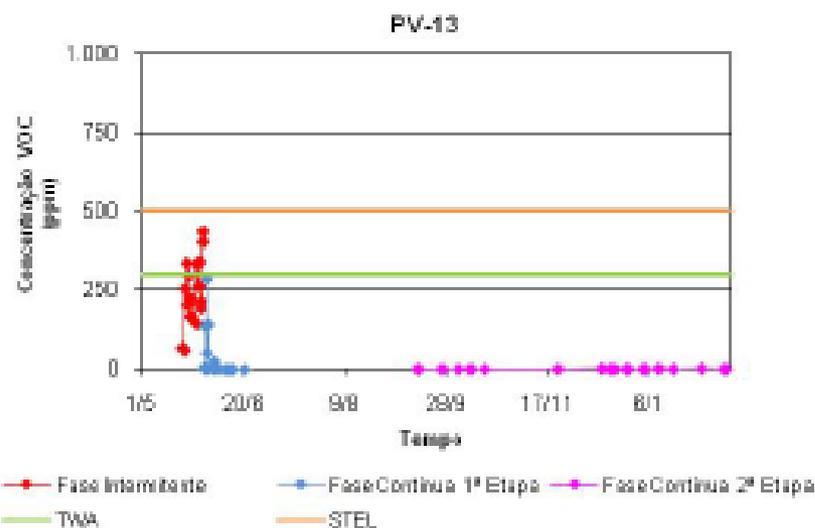


Figura 26 – Leituras de concentrações de VOC (ppm) e %LEL para os PVs 12, 13 e 14 (conclusão).



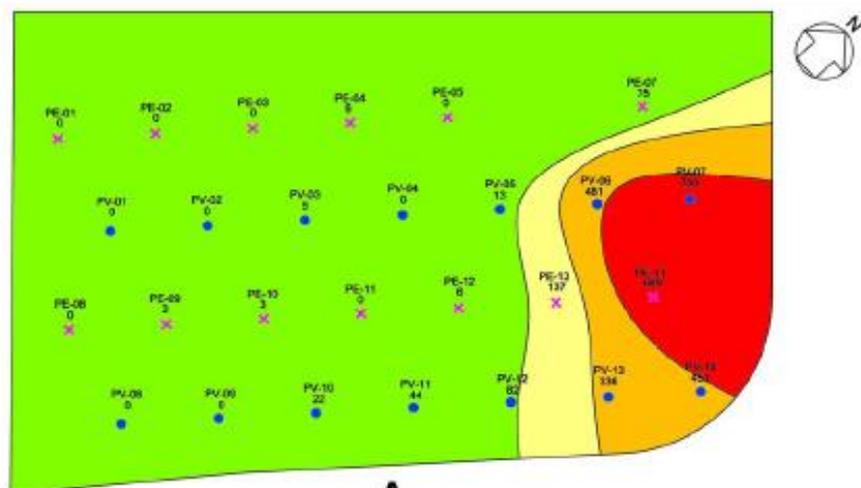
A



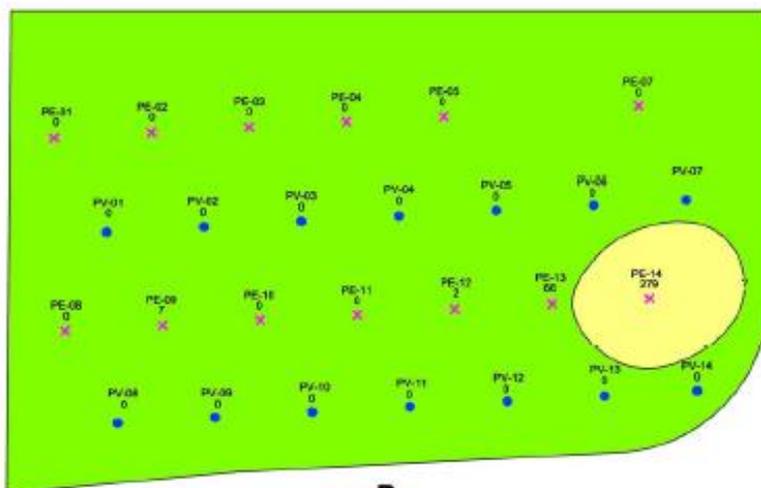
B

Figura 20 – Equipamento portátil modelo *GasAlertMicro 5 PID* da *BW Technologies*: **A** – detector com sensores de fotoionização e oxidação catalítica; **B** – kit com equipamento portátil, filtro externo e sonda de amostragem. Fonte: <http://www.jjstech.com/gasalmi5pid.html>.

As concentrações de vapores inflamáveis ou combustíveis no ar, necessárias para ocasionar a ignição, correspondem a valores entre o limite inferior de explosividade (LEL – *Lower Explosive Limit*) e o limite superior de explosividade (UEL - *Upper Explosive Limit*). O primeiro indica a concentração mínima de gás ou vapor (em porcentagem de volume) misturado ao ar que causará a propagação de chamas, quando em contato com uma fonte de ignição. O segundo, ao contrário do LEL, indica a concentração máxima de gás ou vapor (em porcentagem de volume) misturado ao ar que ainda causará a propagação de chamas, quando em contato como uma fonte de ignição.



A



B

LEGENDA

- ✕ PE - Poço de Exatno
- PV - Poço de Ventilação

Isoconcentrações de VOC's - gasolina (ppm)

- ≤ 100 ppm
 - de 100 a 300 ppm
 - de 300 a 500 ppm
 - acima de 500 ppm
- TWA (NIOSH)
STEL (NIOSH)

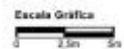
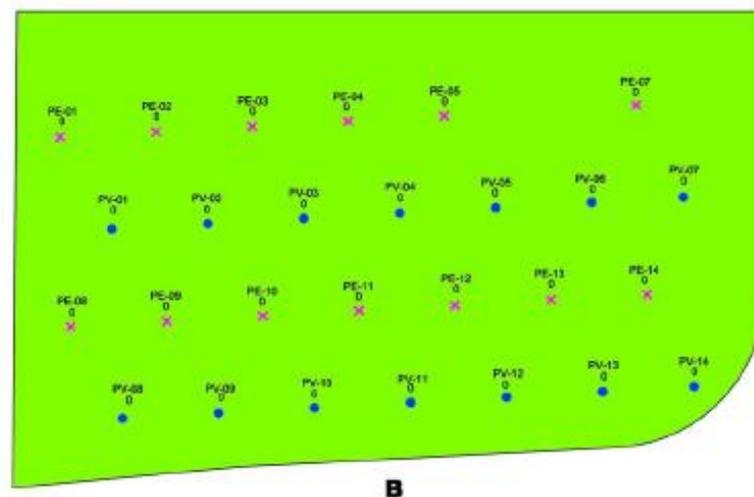
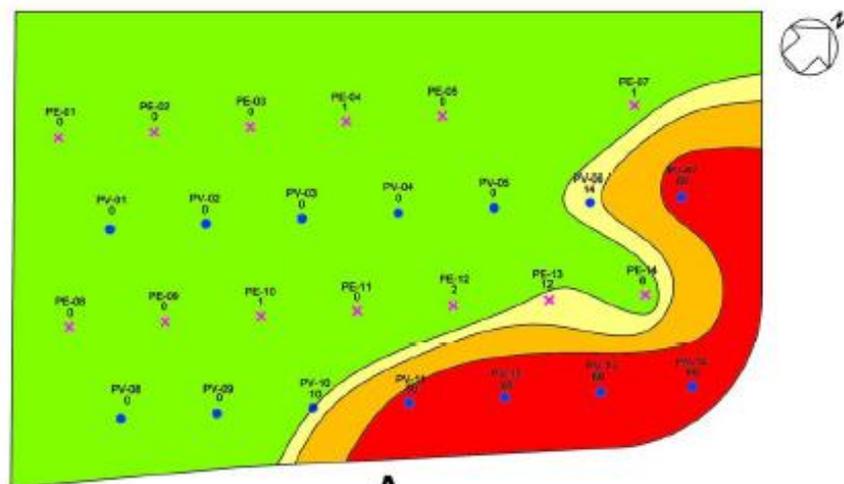


Figura 27 – Mapa de isoconcentrações de VOC: A – condição inicial (leitura de 29/05/07); B – condição final (leitura de 13/02/08).



LEGENDA

- ✕ PE - Poço de Efluente
- PV - Poço de Ventilação

Isoconcentrações de % LEL - gasolina (%)

- Verde: até 10%
- Amarelo: de 10% a 20%
- Laranja: de 20% a 50%
- Vermelho: acima de 50%
- Baixo risco de explosividade (OSHA)
- Alto risco de explosividade (OSHA)

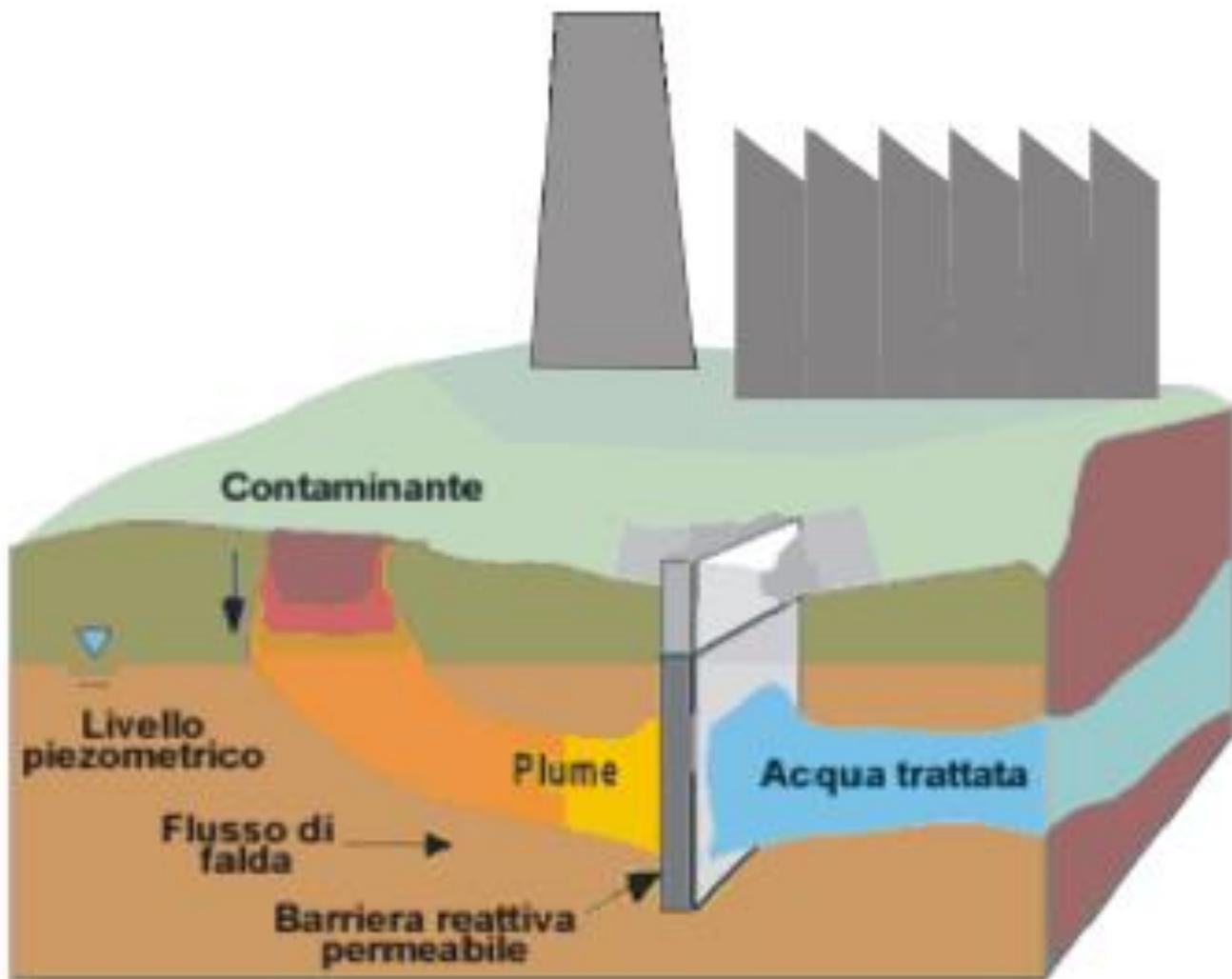
Escala Gráfica
0 2.5m 5m

Figura 28 – Mapa de isoconcentrações de LEL: A – condição inicial (leitura de 29/05/07); B – condição final (leitura de 13/02/08).



Barreiras reativas

O princípio de funcionamento de uma barreira reativa é relativamente simples: o material reativo permeável é colocado dentro do aquífero de modo a ser atravessado pela água contaminada, a qual se move por efeito do gradiente natural. Os processos físicos-químicos que ocorrem dentro da barreira levam à degradação, imobilização ou adsorção do contaminante.



(Di Molfetta e Sethi, 2003)



Barreiras 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

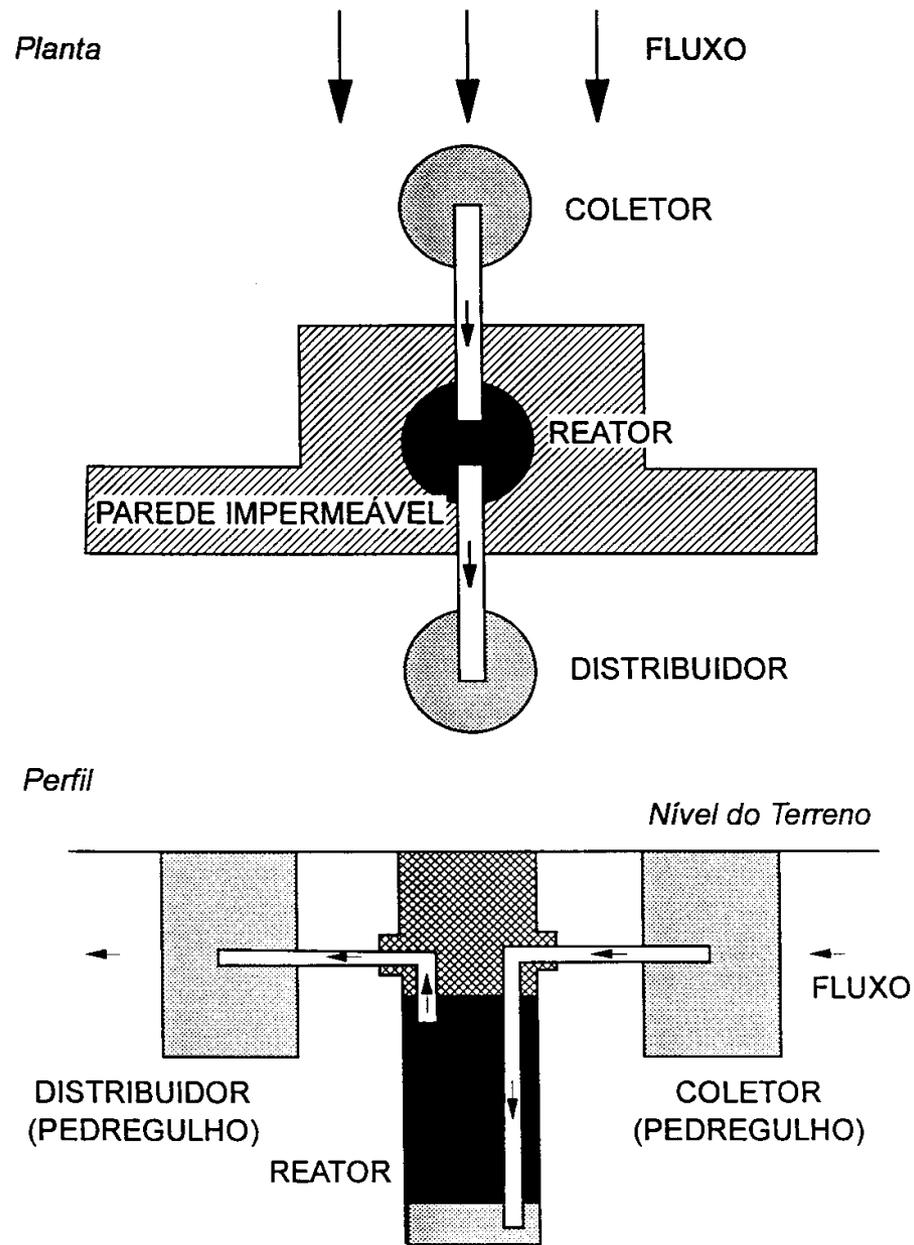


Fig. 3:25: Detalhe Esquemático da Barreira Reativa (Jefferis et al., 1997).

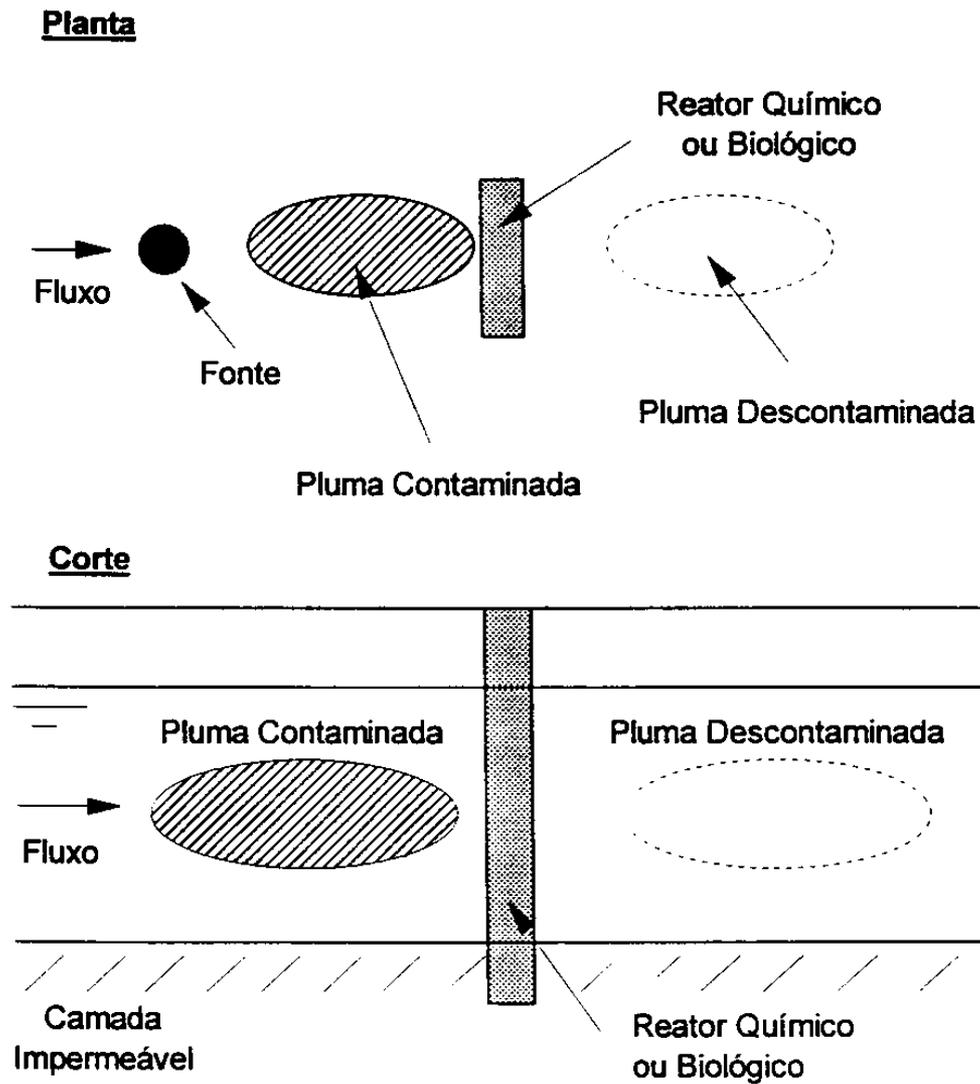


Fig. 4.1: Tratamento Passivo *in situ* da Água Subterrânea.

(Gusmão, 1999)



“Funnel-and-gate”

- A barreira reativa deve ser grande o suficiente para que toda a pluma passe através dela.
- Se a pluma for muito larga ou se estender a grandes profundidades, podem ser utilizadas paredes verticais de baixa permeabilidade para direcionar o fluxo de água subterrânea, permitindo que o reator tenha menores dimensões.
- Combinação de paredes impermeáveis e reatores in situ: “funnel-and-gate”.

Planta

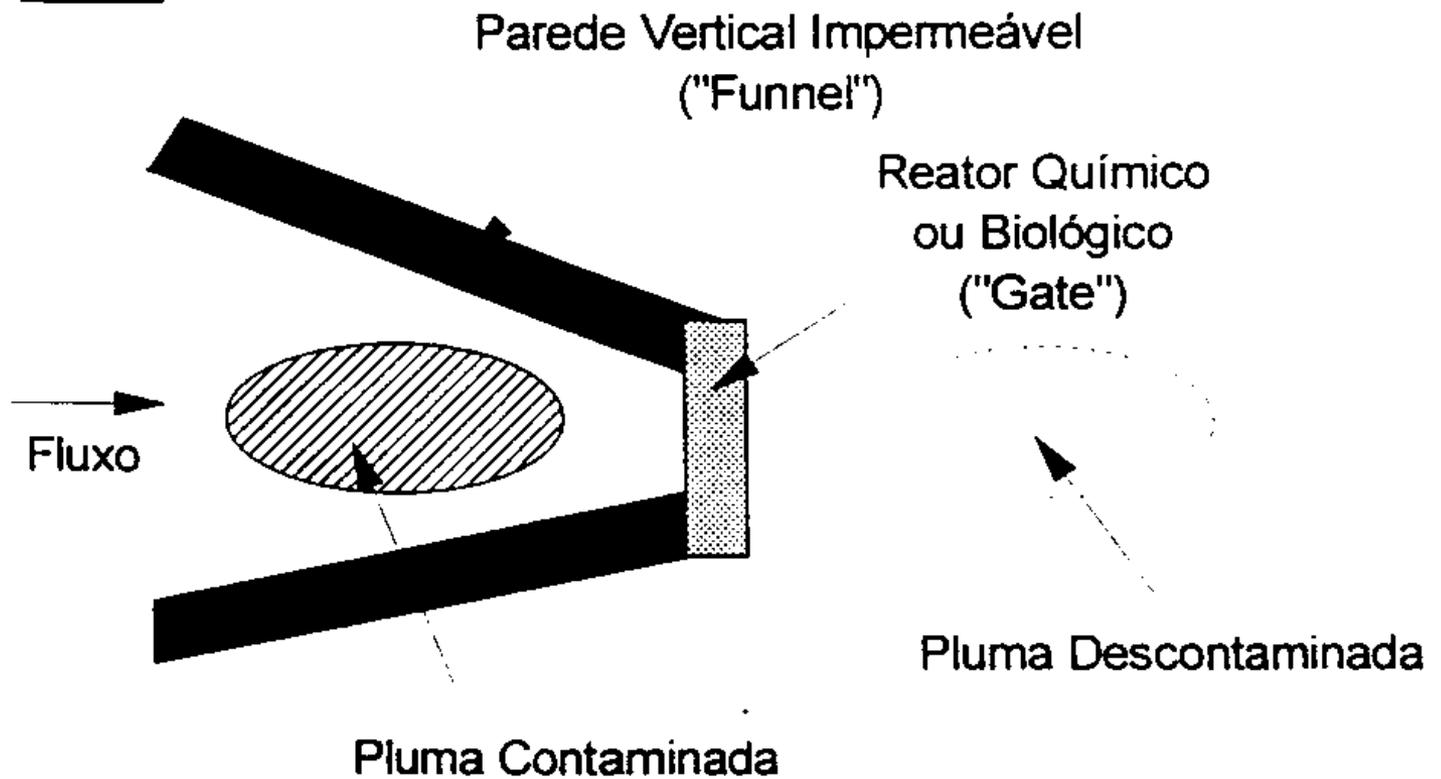


Fig. 4.2: Técnica do *Funnel-and-Gate*.

(Gusmão, 1999)

Planta

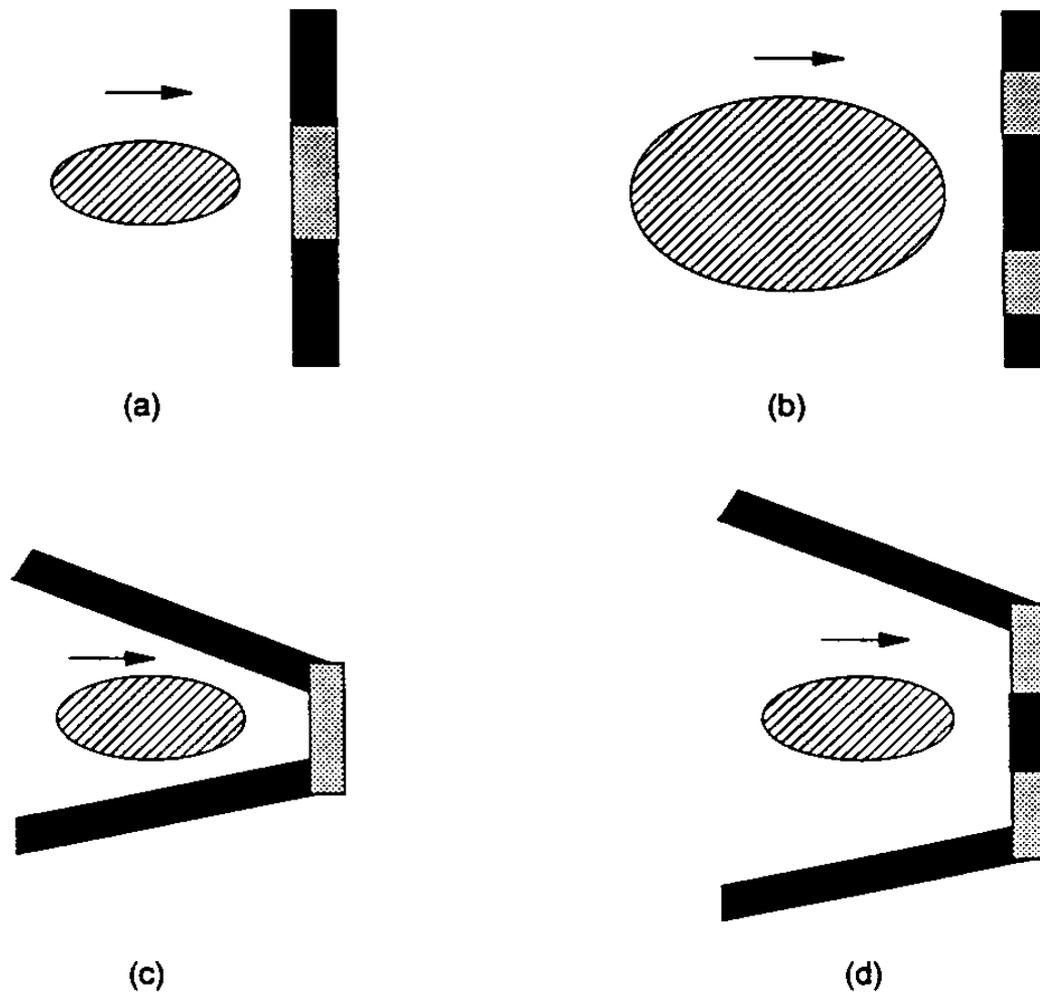


Fig. 4.3: Exemplos de Configuração do *Funnel-and-Gate*.

(Gusmão, 1999)

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>
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</p> <p>Pode haver problemas técnicos 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 microorganismos.</p>

(Gusmão, 1999)

Dados necessários ao estudo de viabilidade de barreiras reativas

Dados necessários	Características
Contaminante	Tipos e concentrações Características e taxas de degradação na presença de metais de valência nula
Pluma de contaminação	Largura , profundidade
Aqüitardo	Profundidade, espessura, descontinuidades
Considerações geotécnicas	Estratigrafia, heterogeneidades, permeabilidade e porosidades das camadas Presença de sedimentos consolidados, pedregulhos, blocos de rocha
Aqüífero	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)



Processos de tratamento

- Decloração com metais de valência nula
- Adsorção e troca catiônica
- Precipitação
- Oxidação química
- Biorremediação

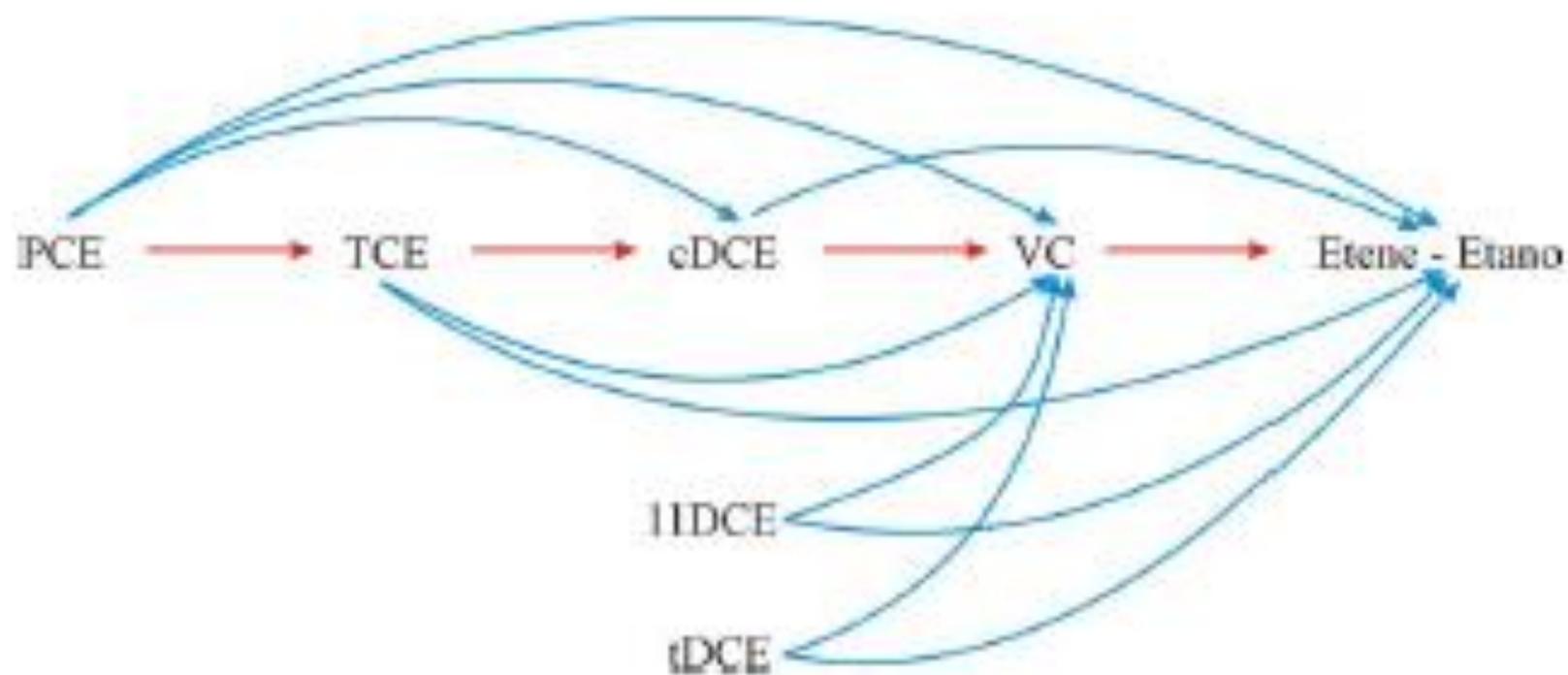


Fig. 10: Percorsi di degradazione a rete di alcuni eteni clorurati.

(Di Molfetta e Sethi, 2003)

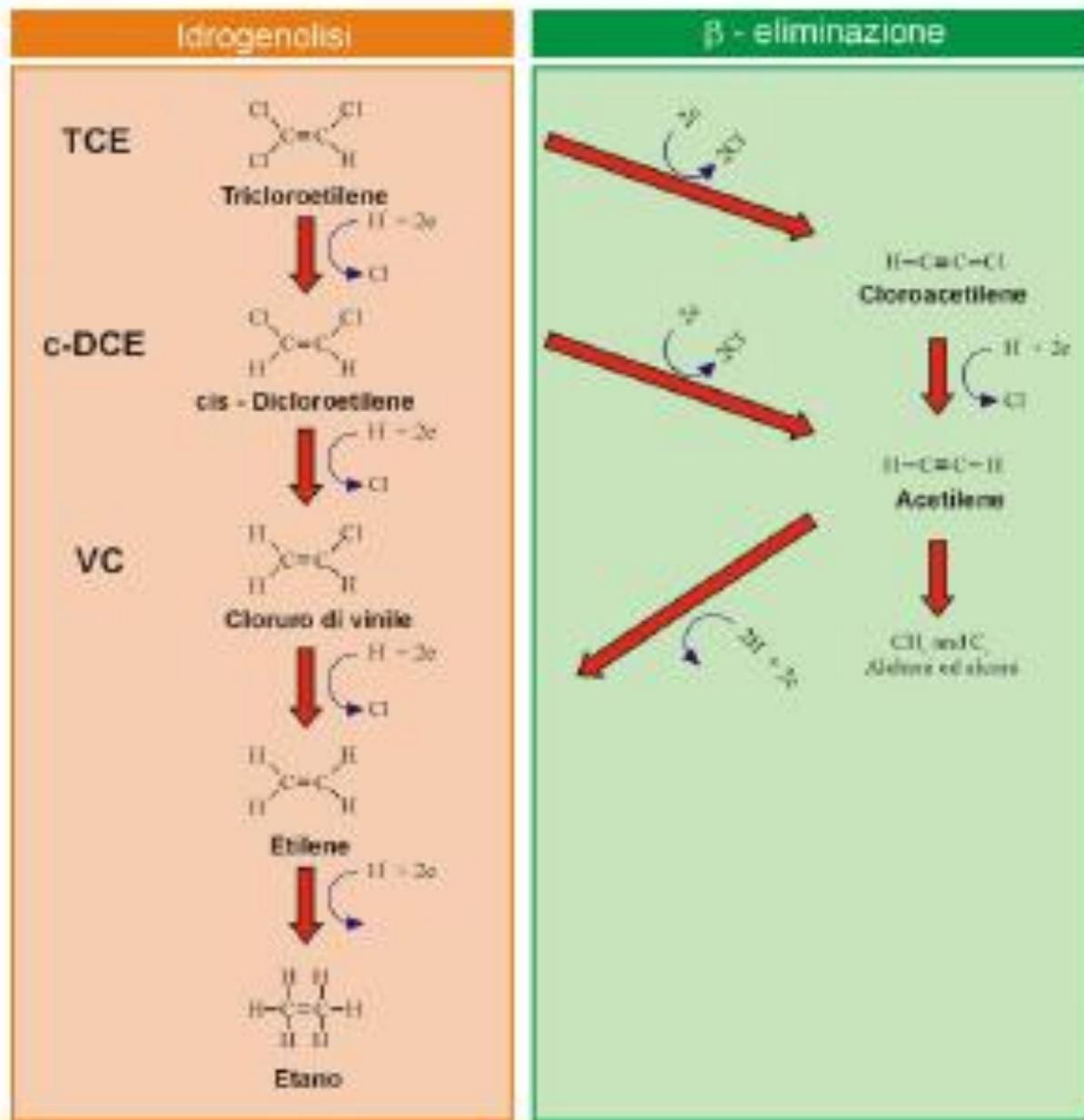


Fig. 5: Percorsi principali di degradazione del TCE in una barriera reattiva permeabile a Fe^0 .

(Di Molfetta e Sethi, 2003)



Uso de metais de valência nula na degradação de solventes clorados

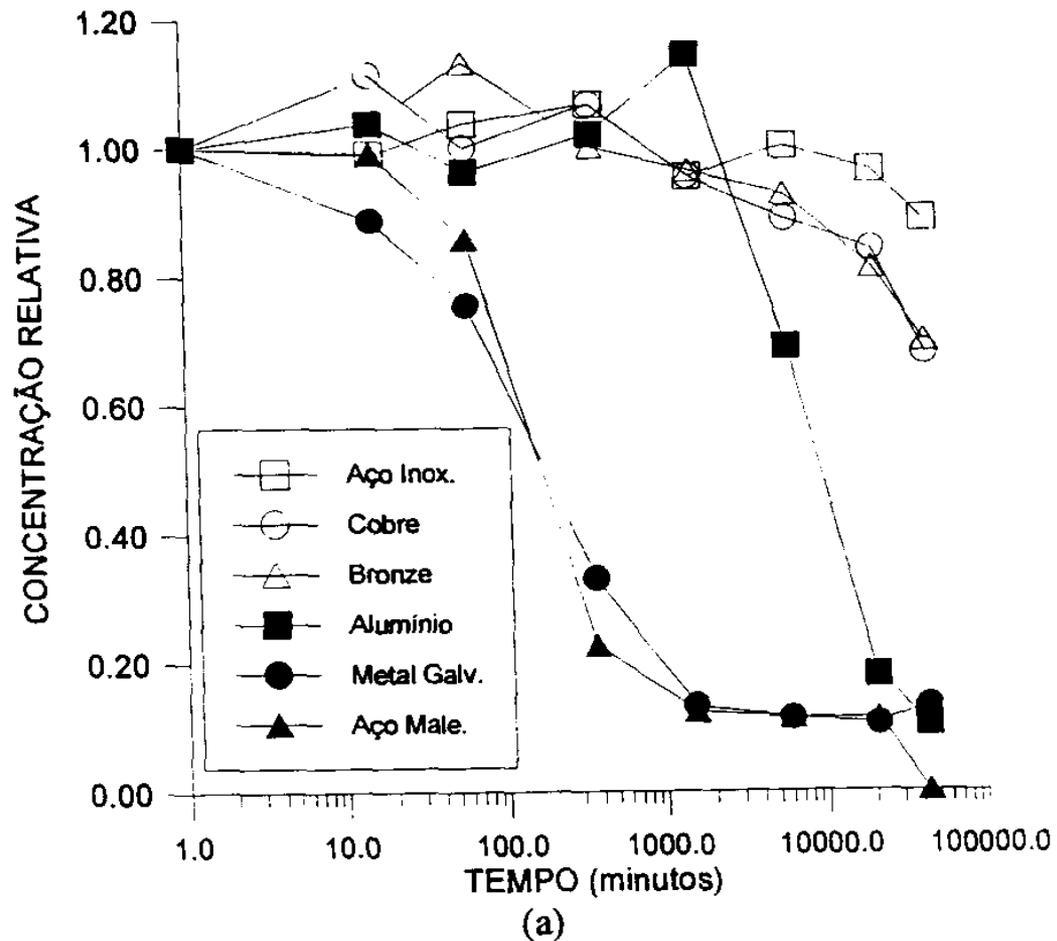
$$C = C_0 e^{-\mu t}$$

μ = taxa de degradação

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

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

Concentração do 1,1,1,-TCA ao longo do tempo (Gusmão, 1999)



Ferro granular de valência zero



(Di Molfetta e Sethi, 2003)

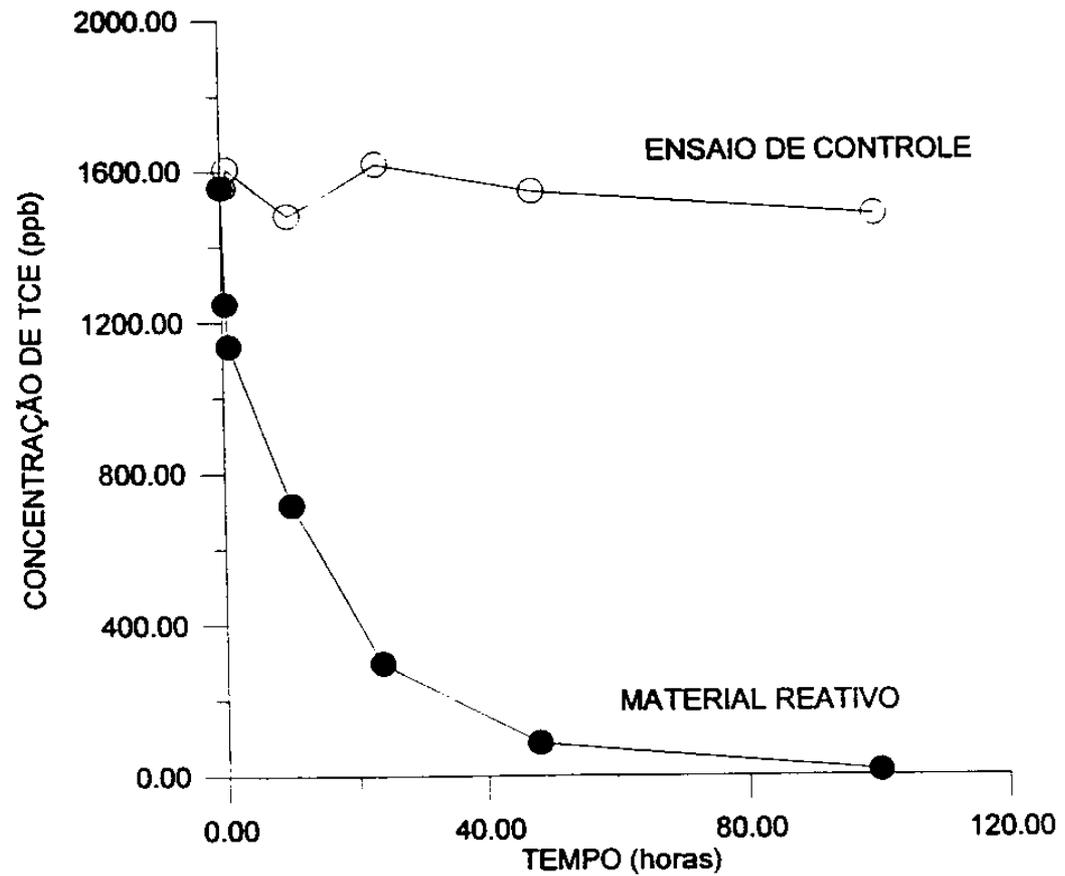


Fig. 3.9: Degradação do TCE na Presença de Ferro Granular (Gillham et al., 1993).

Tab. 1: Contaminanti trattabili mediante barriere reattive permeabili a Fe⁰.

Composti organici		Composti inorganici	
Metani	Tetraclorometano Triclorometano Tribromometano	Metalli in traccia	Cromo Nickel Piombo Uranio Tecnezio Ferro Manganese Selenio Rame Cobalto Cadmio Zinco
Etani	Esacloroetano 1,1,2,2-tetracloroetano 1,1,1,2-tetracloroetano 1,1,1-tricloroetano 1,1,2-tricloroetano 1,1-dicloroetano 1,2-dibromoetano		
Eteno	Tetracloroetene Tricloroetene Cis-1,2-dicloroetene Trans-1,2-dicloroetene 1,1-dicloroetene Cloruro di vinile		
Propano	1,2,3-tricloropropano 1,2-dicloropropano	Contaminanti Anionici	Solfati Nitrati Fosfati Arsenico
Altri	Esaclorobutadiene Freon 11 Freon 113 N-nitrosodimetilammina Lindano		

Tab. 2: Contaminanti non trattabili mediante barriere reattive permeabili a Fe^0 .

Composti organici	Composti inorganici
Diclorometano 1,2-dicloroetano Cloroetano Clorometano BTEX Idrocarburi petroliferi	Cloro Perclorato

Tab. 3: Composti di cui non è nota la trattabilità mediante Fe^0 .

Composti organici	Composti inorganici
Clorobenzeni Clorofenoli Alcuni pesticidi PCB	Mercurio

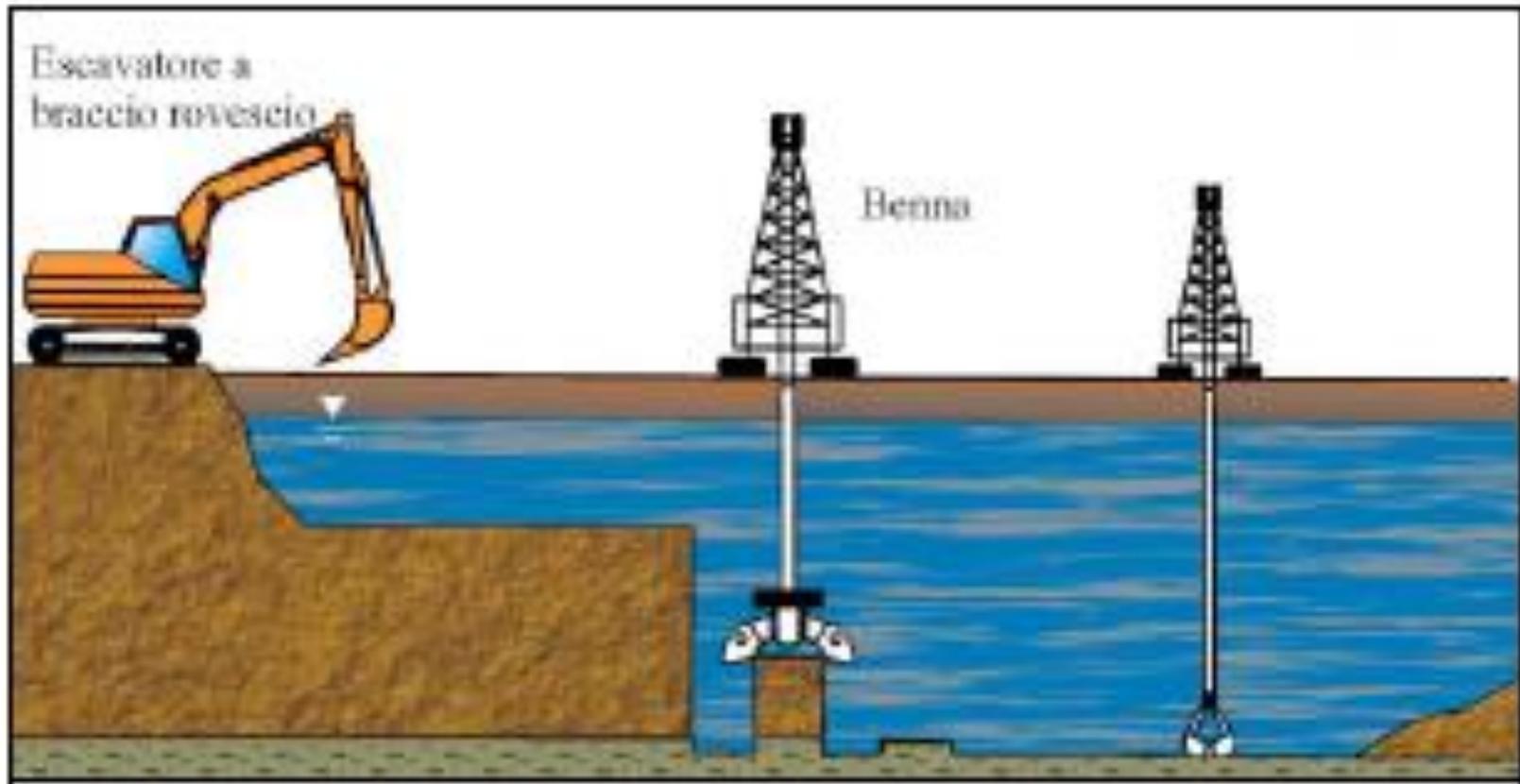


Fig. 19: Tecniche di scavo convenzionali (adattato da Gavaskar, 1998).

(Di Molfetta e Sethi, 2003)

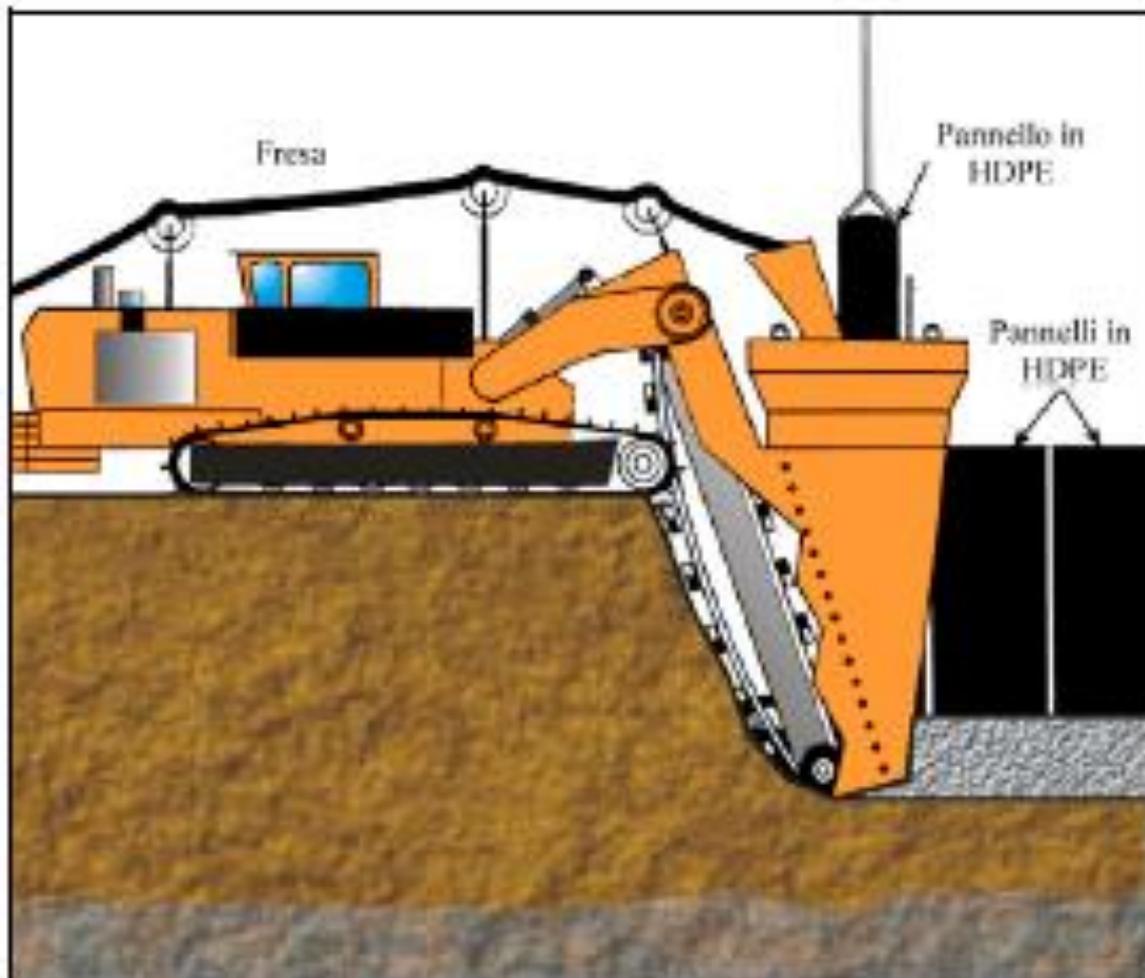


Fig. 20: Trincee continue mediante fresatura (adattato da Gavaskar, 1998).

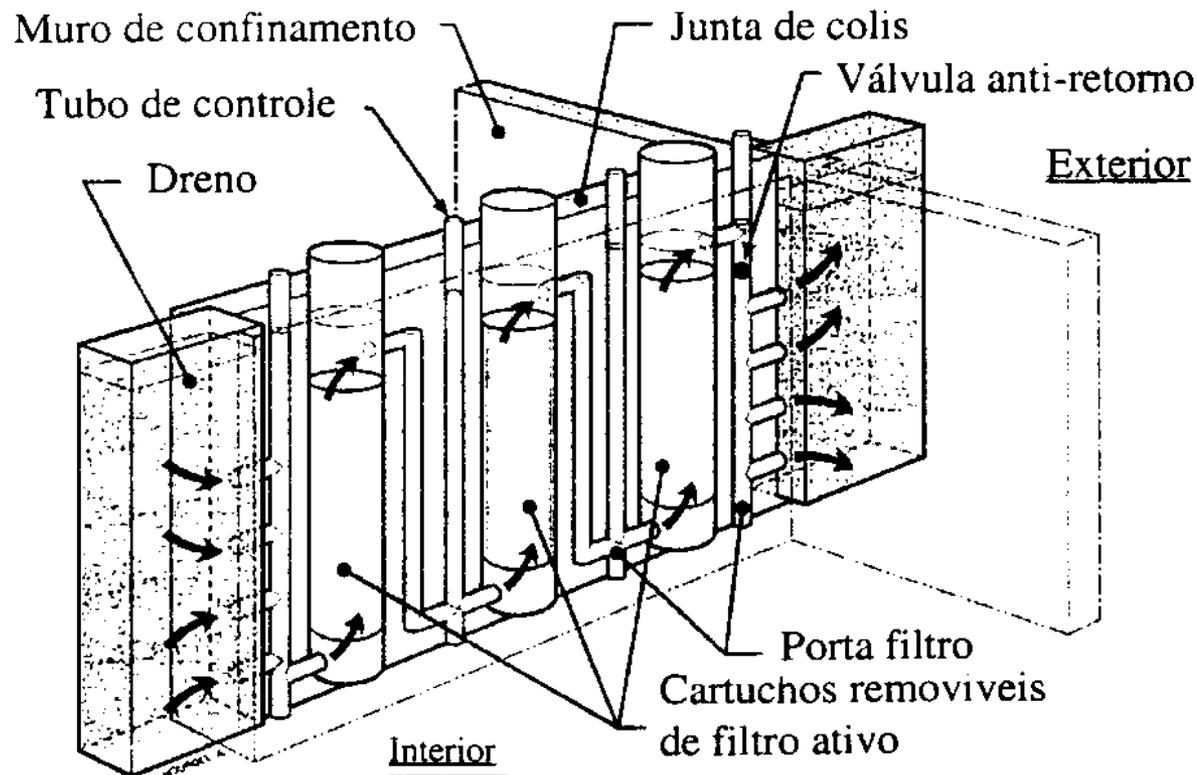
(Di Molfetta e Sethi, 2003)



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

Filtros removíveis



(Soletanche, 2001)



Exemplo de aplicação

- SBF (Soletanche Bachy): 1994, norte da França; preenchida com ECOSOL, produto patenteado que retém o Cr6+.
- Com uma capacidade de retenção de 15 kg/mL, a trincheira está parcialmente saturada após 4 anos.
- A melhoria técnica essencial é o processo de filtragem com a realização de portas filtrantes munidas de filtros facilmente acessíveis e renováveis



Biorremediação

- Processo de tratamento que utiliza microorganismos, como fungos e bactérias, para degradar ou transformar substâncias perigosas em substâncias menos tóxicas ou não tóxicas.

(Carrara, 2003)



Biorremediação

- Os microorganismos digerem compostos orgânicos para produção de energia.
- Uma vez degradados os contaminantes, a população de microorganismos morre devido à falta de alimento.
- Para que as técnicas de biorremediação sejam eficientes, é necessário haver crescimento da população de microorganismos, que pode ser obtido criando-se condições ambientais adequadas.



Biorremediação

- Microorganismos nativos ou indígenas: crescimento pode ser estimulado através da adição de nutrientes, introdução de oxigênio e adequação da temperatura.
- Microorganismos exógenos: inoculação.



Biorremediação

- In situ: estímulo e aumento da atividade dos microorganismos indígenas, aplicando-se oxidantes (O_2 , H_2O_2) e nutrientes (nitrogênio, fósforo).
- Ex situ: escavação do solo contaminado ou bombeamento da água subterrânea, e tratamento em outro local; reatores em batelada (slurry phase) e em fase sólida (landfarming, biopilhas e compostagem).



Biorremediação

- CETESB (1994): identificação dos microorganismos, classificação taxonômica, procedência, descrição do hábitat natural, interações com hospedeiros, infecciosidade e patogenicidade, competitividade ambiental relativa, potencial de sobrevivência, capacidade de reprodução do ambiente, trocas genéticas com outros microorganismos, identificação e quantificação de componentes não microbianos. Para microorganismos geneticamente modificados, informações sobre os métodos usados para alteração genética.



Fatores que podem limitar a eficiência da biorremediação in situ

- Baixas temperaturas
- Condições anaeróbias
- Baixas concentrações de nutrientes
- Baixa disponibilidade (distribuição espacial insuficiente dos contaminantes em relação aos microorganismos)
- Dificuldade de biodegradação (compostos recalcitrantes)



Técnicas in situ aeróbias

- Injeção de peróxido de hidrogênio: oxigênio do peróxido para estimular atividades biológicas; por sistemas de tubos ou sprinklers na contaminação superficial, por poços de injeção na contaminação profunda
- Bioventing: suprimento de ar acima do lençol freático; contaminação por hidrocarbonetos do petróleo, hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAHs) e misturas de acetona, tolueno e naftaleno; permeabilidade do solo ao ar.



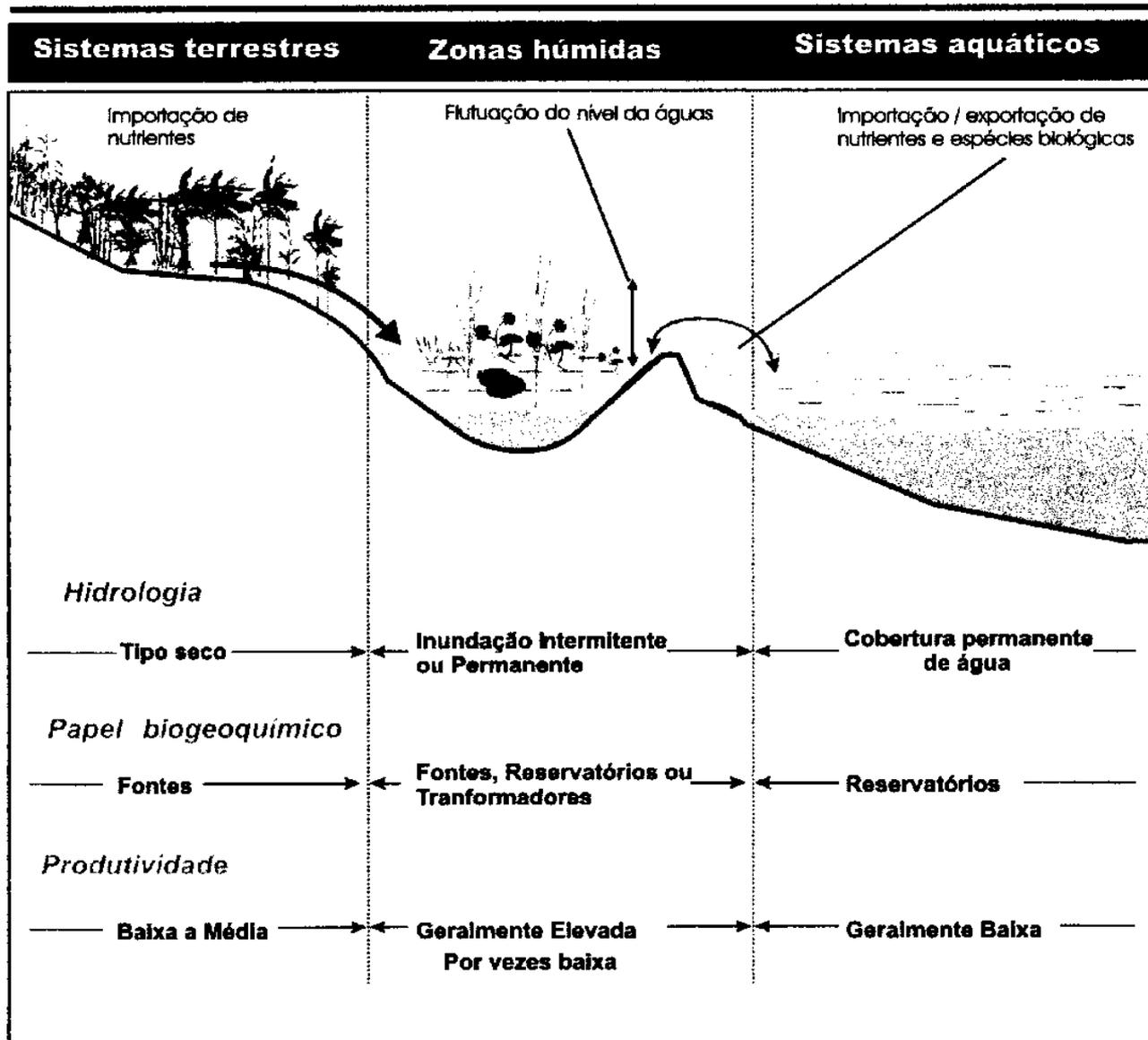
Técnicas in situ aeróbias

- “Air sparging”: suprimento de ar abaixo do lençol freático
- Extração a vapor (ou a vácuo)

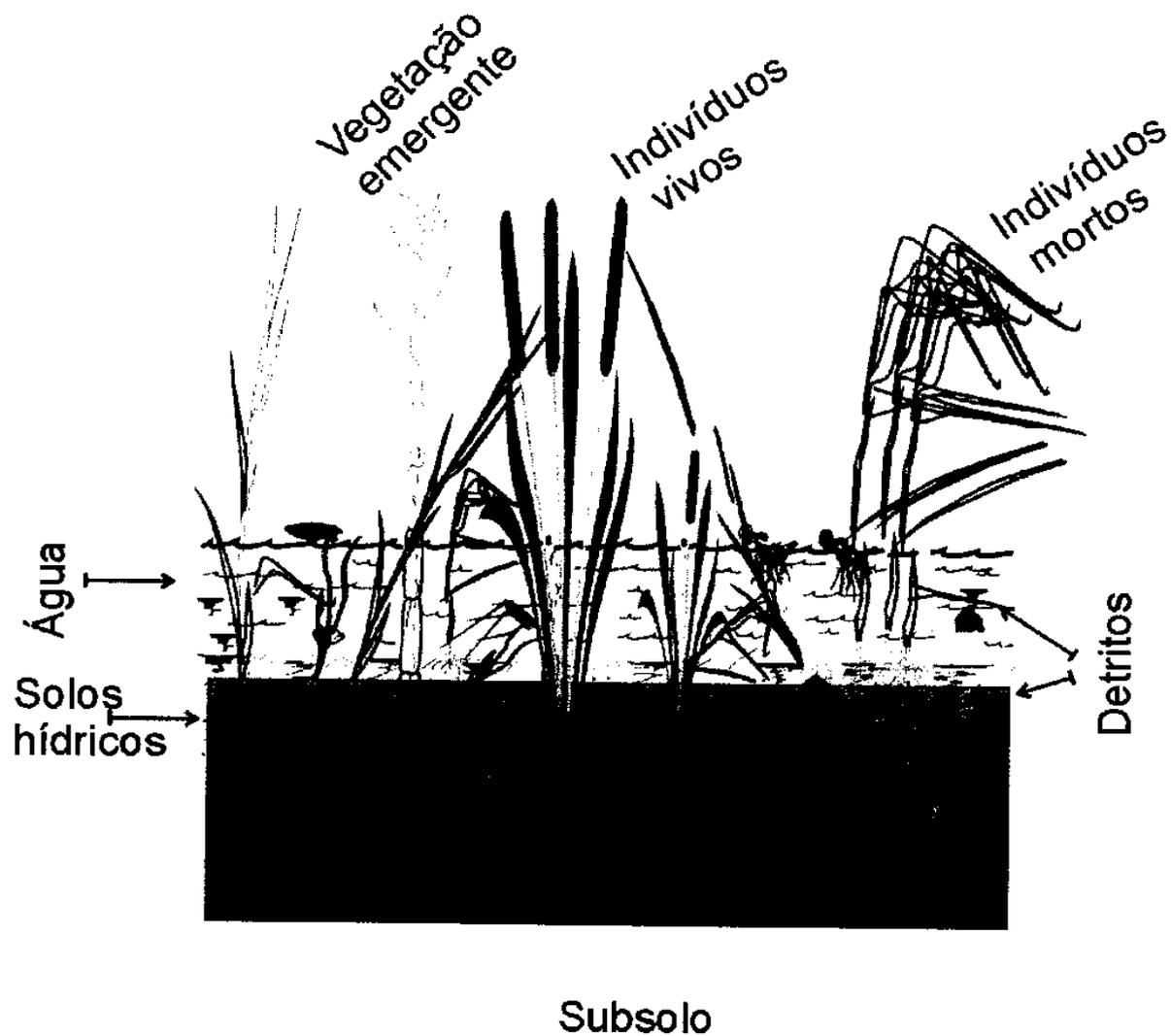


Zonas alagadiças (“wetlands”)

- Ambientes de transição entre ecossistemas terrestres (emersos) e aquáticos (submersos)
- Retenção/remoção de contaminantes: mecanismos de natureza física (filtração, sedimentação, adsorção, volatilização), química (precipitação, oxi-redução, hidrólise) e biológica (metabolismo bacteriano, adsorção radicular de substâncias, liberação de exsudados específicos)



(Dias e Boavida, 2001)



(Dias e Boavida, 2001)

Tabela 4 Mecanismos de Remoção de Contaminantes nas Zonas Húmidas *

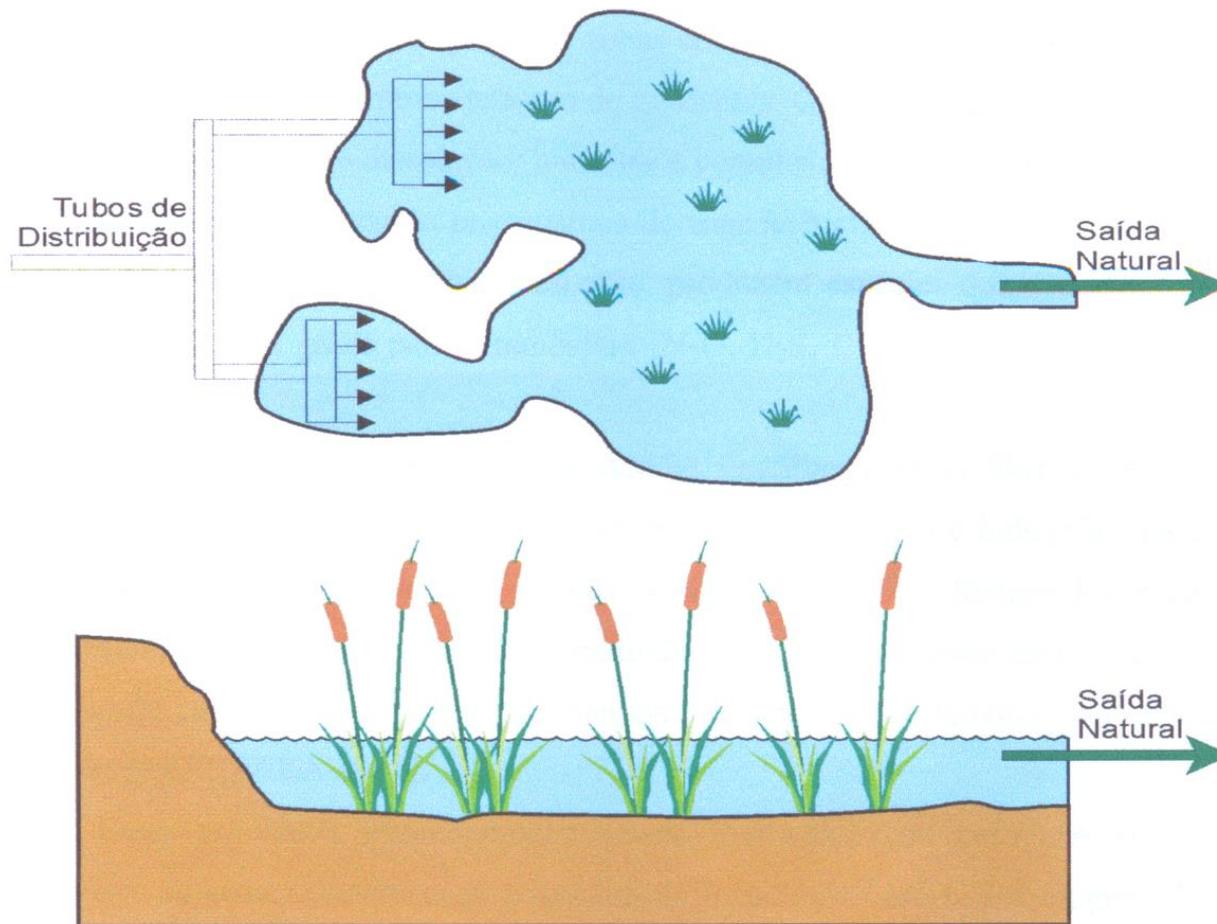
Mecanismo/processo	Contaminantes afectados *								Descrição
	SS	SC	CBO	N	P	MP	OR	B&V	
FÍSICOS									
Sedimentação	P	S	I	I	I	I	I	I	Sedimentação por gravidade dos sólidos
Filtração	S	S							As partículas são filtradas mecanicamente durante a passagem da água poluída através do substrato e massa radicular
Adsorção		S							Forças de atracção interparticular (força de van der Waals)
Volatilização				S					Volatilização de NH ₃ da água residual
QUÍMICOS									
Precipitação					P	P			Formação ou co-precipitação de compostos insolúveis
Adsorção					P	P	S		Adsorção no substrato ou em superfícies vegetais
Decomposição							P		Decomposição ou alteração de compostos pouco estáveis por fenómenos como radiação UV, oxidação e redução
BIOLÓGICOS									
Metabolismo bacteriano		P	P	P				P	Remoção de sólidos colóidais e substâncias orgânicas solúveis por bactérias em suspensão, bênticas ou fixas às plantas. Nitrificação/desnitrificação
Metabolismo vegetal								S S	Captação e metabolismo de substâncias orgânicas pelas plantas. Excreção radicular de toxinas
Absorção radicular				S	S	S	S		Captação radicular de nutrientes
Mortalidade natural								P	Aniquilamento de organismos em meio desfavorável

* SS = sólidos sedimentáveis; SC = sólidos colóidais; MP = metais pesados; OR = orgânicos refractários; B&V = bactérias e vírus; P = efeito primário; S = efeito secundário; I = efeito incidental (efeito que ocorre incidentalmente ao remover outros contaminantes)

* Adaptada de [11]

Zona	Clima	Área (10 ³ Km ²)	% do total da zona
Polar	úmido e semi-úmido	200	2,5
Boreal	úmido e semi-úmido	2558	11,0
Sub-boreal	úmido	539	7,3
	Semiárido	342	4,2
	Árido	136	1,9
Subtropical	úmido	1077	17,2
	Semiárido	629	7,6
	Árido	439	4,5
Tropical	úmido	2317	8,7
	Semiárido	221	1,4
	Árido	100	0,8
Mundo		8558	6,4

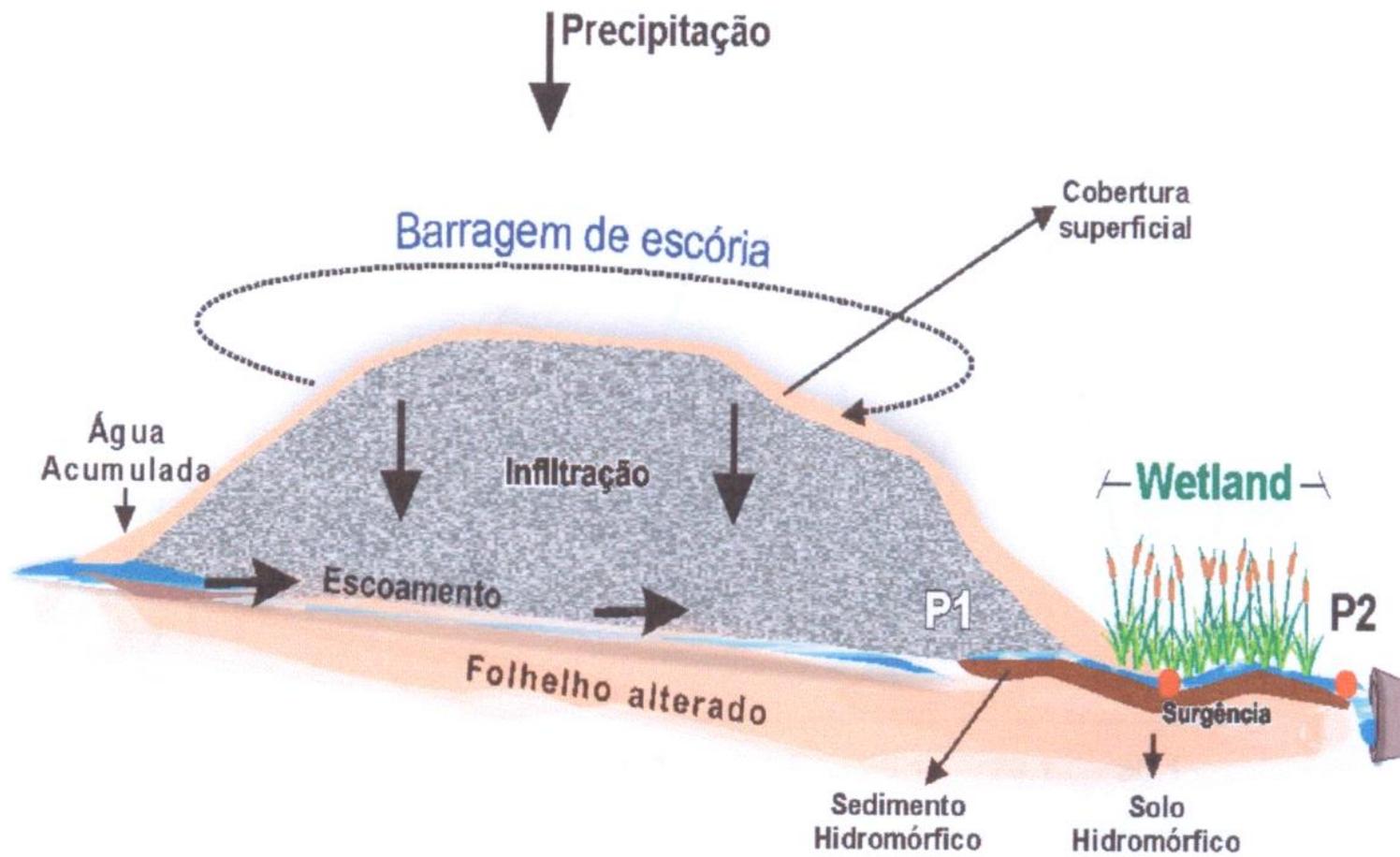
(Dias e Boavida, 2001)



Fonte: KADKEC e KNIGHT (1996)

Figura 5.3 - *Wetland* alterada

(Anjos, 2003)



(Anjos, 2003)

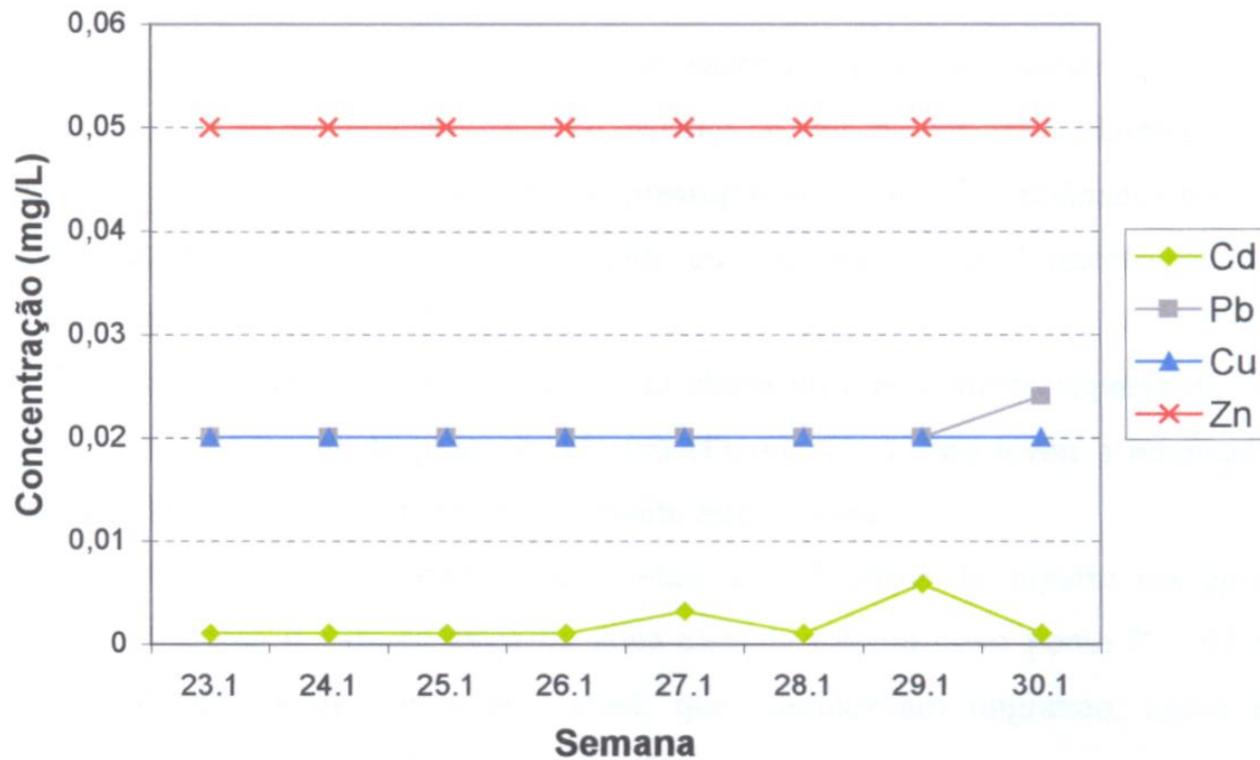


Figura 7.31 – Metais pesados no ponto de saída da zona alagadiça.

CONAMA 01/86, Classe 2: Cd = 0,001; Pb = 0,03; Cu = 0,02; e Zn = 0,18

(Anjos, 2003)



Processos reativos usados no tratamento in situ (Gusmão, 1999)

- Injeção de ar (air sparging)
- Bioreatores in situ
- Decloração abiótica com metais de valência nula
- Adsorção e troca iônica
- Precipitação
- Oxidação química



Injeção de ar (air sparging)

- Indicada para compostos orgânicos voláteis (VOCs)
Indução da mudança do contaminante da fase dissolvida para a fase gasosa
- Quanto maior a constante de Henry do contaminante, maior a eficiência do processo
- Há um sistema de injeção de ar e outro para coleta de vapores
- A taxa de injeção de ar deve ser otimizada para ter a eficiência requerida
- Pode haver necessidade do tratamento dos vapores coletados



Bioreatores in situ

- Indicados para contaminantes biodegradáveis em condições aeróbicas ou anaeróbicas
- O meio poroso no reator deve permitir o crescimento da biomassa
- Dependendo do volume do reator, o crescimento da biomassa pode diminuir a permeabilidade
- Geralmente são inoculados microorganismos do próprio aquífero, facilitando sua aclimatação
- Para tratamentos aeróbicos, é feita injeção de oxigênio
- Para tratamentos anaeróbicos, deve ser feita a remoção do oxigênio dissolvido e outros aceptores de elétrons da água (NO_3^- , SO_4^{2-}), antes da entrada no reator



Referências bibliográficas

Avaliação da eficiência de uma zona alagadiça (wetland) no controle de poluição por metais pesados: o caso da Plumbum em Santo Amaro da Purificação/BA. José Ângelo Sebastião Araújo dos Anjos. Tese de doutoramento, EPUSP, São Paulo. 2003.

Barreira e Confinamento Ativo. Soletanche Bachy. Apresentação, EPUSP, São Paulo. 2001.

Barriere reattive permeabili. A. Di Molfetta & R.Sethi. Siti Contaminati: Tecnologie de risamamento.57 Corso de aggiornamento in Ingegneria Sanitaria Ambientale. Milano, 17-21 Febbraio 2003.

Biorremediação de áreas contaminadas por plastificantes: caso do ftalato de Di-2-etilhexila. Silvia Marta Castelo de Moura Carrara. Tese de doutoramento, EPUSP, São Paulo. 2003.



Referências bibliográficas

- Dinâmica das zonas húmidas na prevenção da contaminação das águas subterrâneas. Veríssimo N. Dias & Maria José Boavida. Seminário Contaminação de solos e águas subterrâneas, Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2001.
- Geotechnical practice for waste disposal. D.E.Daniel. Editado por Chapman & Hall. 1993.
- Uso de barreiras reativas na remediação de aquíferos contaminados. Alexandre Duarte Gusmão. Tese de doutoramento, PUC/RJ, Rio de Janeiro. 1999.
- Utilização de drenos horizontais profundos (DHP) em projetos de remediação ambiental. Dissertação de mestrado, EPUSP, São Paulo. 2003.