

ARQUIVO TECNICO

3101  
C338c(RCET)  
030456



22862

030456



3

SANEAMENTO AMBIENTAL



**CETESB**

**COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL**

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL  
BIBLIOTECA DE SÃO PAULO - Garcez  
Av. Prof. Frederico H. Costa, 100 - Pinheiros  
05489-000 - SÃO PAULO - BR/SP

GUIA PRÁTICO Nº 4

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA  
DE LOCAIS

Data Aquis.:	
CLASS. I	
Indic. A-TOR	
3101	2
Preço. (R\$) 0338c (RCET)	
032683	
Data Ex. 2	

---

**DIRETORIA**

---

**Werner Eugênio Zulauf**  
*Diretor-Presidente*

**Antônio Alves de Almeida**  
*Diretor Administrativo*

**Fredmar Corrêa**  
*Diretor de Planejamento Ambiental*

**Nelson Mansour Nabhan**  
*Diretor de Engenharia*

**Nelson Vieira de Vasconcelos**  
*Diretor de Controle*

**Paulo Bezerril Júnior**  
*Diretor Financeiro*

**Samuel Murgel Branco**  
*Diretor de Pesquisa*

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL  
BIBLIOTECA

SUPERINTENDÊNCIA DE ASSISTÊNCIA AOS MUNICÍPIOS

Engº Mário de Lavigne Filho

GERÊNCIA DE ASSISTÊNCIA EM RESÍDUOS SÓLIDOS

Eng<sup>a</sup> Maria Helena de Andrade Orth

DIVISÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS

Engº Pedro Penteado de Castro Neto

Programa : Controle de Poluição no Estado de São Paulo

Coordenador: Márcio Pereira de Souza

Projeto : Avaliação de Resíduos Industriais

Coordenador: Cyro Bernardes Jr.

EQUIPE TÉCNICA

Engº Pedro Penteado de Castro Neto

Engº Cyro Bernardes Jr.

## ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
1 - INTRODUÇÃO .....	4
2 - CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA .....	7
2.1 - Fluxo de percolado .....	8
2.2 - Fluxo do lençol freático .....	9
2.3 - Fluxo na região insaturada .....	15
2.4 - Caracterização da qualidade da água do lençol freático .....	16
3 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS .....	17
4 - COMENTÁRIOS FINAIS .....	22



1 - INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo permitir que os técnicos da CETESB consigam avaliar uma determinada área no que diz respeito a sua adequabilidade ou não em receber resíduos.

Esta adequabilidade é medida através da capacidade do local em absorver, reter, imobilizar, degradar, dispersar ou diluir poluentes que tenderiam a comprometer a qualidade das águas do lençol freático.

O problema que se coloca então é como traduzir esses fenômenos em termos das propriedades ou características do ciclo hidrológico e do sub-solo e como prever o que acontecerá no futuro.

O esquema abaixo procura mostrar o que acontece em uma disposição de resíduos sobre o solo (Figura 1).

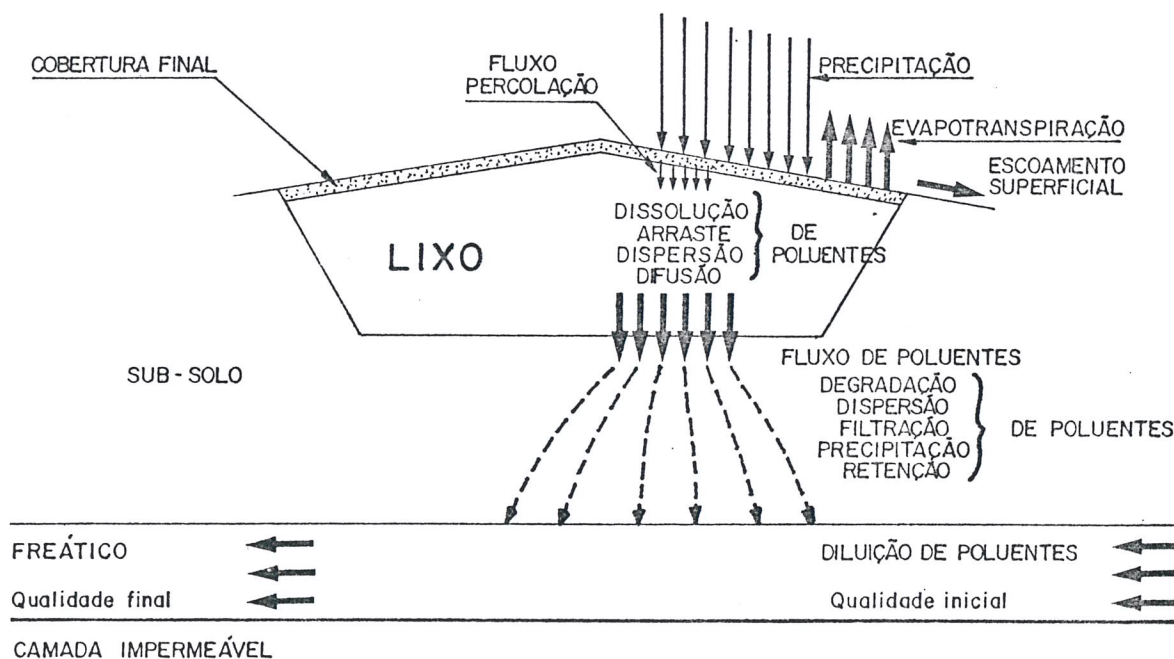


Figura 1 - Fluxo de percolado em uma disposição do solo

Como o esquema deixa claro, existem dois grupos de fenômenos:

- . físicos - são ligados a hidráulica do fluxo de percolação;
- . químicos, físico-químicos e biológicos - ligados às características dos resíduos, do sub-solo, do fluxo de percolação e do lençol freático.

Como se pode notar no esquema apresentado, a análise global dos fenômenos intervenientes é extremamente complexa e dependente da obtenção dos parâmetros, os quais frequentemente são impossíveis de serem obtidos a um custo e consumindo um tempo razoáveis.

Para aqueles casos de alta responsabilidade, a obtenção desses parâmetros exigirá um custo muitas vezes superior ao próprio custo do projeto de disposição assim como necessitará do concurso de técnicos altamente especializados e muito escassos no país.

Portanto, esse trabalho somente permitirá uma primeira aproximação do conjunto de respostas perseguidas.

2 - CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

## 2 - CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

A caracterização hidrológica visa o conhecimento dos fenômenos hidráulicos que estarão presentes em qualquer disposição sobre o solo.

### 2.1 - FLUXO DE PERCOLADO

O conhecimento do fluxo de percolado permite uma avaliação da vazão de percolado que atingirá o sub-solo. Esse fluxo é dependente da quantidade de água que precipita sobre o a terra e da quantidade de água que é perdida por evapotranspiração e por escoamento superficial.

O modelo mais simples conhecido diz que a quantidade de percolado por ano é uma fração entre 15 a 50% do total da precipitação anual, então:

$$\text{Per} = 0,15 \text{ a } 0,50 \text{ Prec.}$$

onde:

Per = quantidade de percolado em mm/ano;

Prec.= precipitação média anual em mm.

Um modelo mais completo indicaria:

$$\text{Per} = \text{Prec.} - \text{Evap.} - \text{Esc. Sup.}$$

onde:

Per = quantidade de percolado em mm/ano

Prec.= precipitação média anual em mm

Evap.= evaporação média

Esc. Sup. = escoamento superficial em mm que é igual a 0,4 Prec. para áreas gramadas com solos argilosos e declividade de 7%.

Existe ainda um método de cálculo mais elaborado denominado "Método do Balanço de Água" que pode ser consultado no relatório "Drenagem em Aterros Sanitários" - CETESB - 1981.

Portanto, para avaliação do fluxo de percolado é necessário se conhecer dados sobre Precipitação Média e Evaporação Média Anuais, os quais podem ser obtidos no DAEE, nas suas estações meteorológicas, ou nas universidades, ou ainda no INPE.

## 2.2 - FLUXO DO LENÇOL FREÁTICO

A avaliação do impacto atual e futuro de aterros e lagoas de resíduos sobre o lençol freático passa forçosamente pela determinação das características do escoamento das águas de infiltração e das subterrâneas. Essas características são basicamente a direção e velocidade do fluxo e a espessura da camada saturada. Essas características são obtidas comumente a partir dos dados de sondagem e análise de solo. Em linhas gerais, a metodologia de obtenção será descrita a seguir.

A partir de sondagens de reconhecimento é possível se desenhar um perfil aproximado do sub-solo e da superfície do lençol freático da área, como mostrado no desenho abaixo.

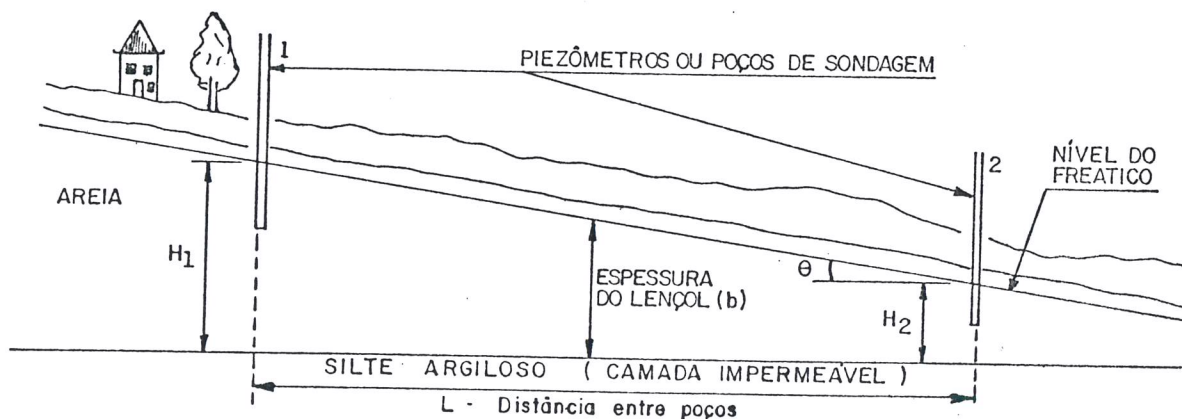


Figura 2.2 - Perfil do sub-solo e da superfície do lençol freático

Na camada de areia, mostrada na figura, o sentido do escoamento será de 1 para 2, pois  $H_1 > H_2$ .

Para avaliação da velocidade do fluxo será necessário se conhecer o coeficiente de permeabilidade horizontal e a porosidade da camada saturada (camada de areia da figura 2.2). Esses parâmetros são obtidos de maneira complementar às sondagens de simples reconhecimento.

A velocidade de média aparente ou específica do aquífero (vazão/seção de escoamento) pode ser estimada pela lei de DARCY que, para aquíferos com base horizontal, pode ser dada por:

$$q = K_h \cdot \left( \frac{H_1 - H_2}{L} \right) \quad \text{ou} \quad q = K_h \cdot \text{tg} \cdot \theta$$

onde:

$K_h$  = coeficiente de permeabilidade horizontal da camada saturada

$L$  = distância entre piezômetros ou poços

$H_1, H_2$  = espessura do aquífero nos pontos 1 e 2 respectivamente

$\theta$  = ângulo da superfície do freático com a horizontal

É importante notar que a velocidade dada pela lei de Darcy não é real pois não considera o volume preenchido pelos grãos do solo, isto é, o fluxo não se dá em toda seção transversal mas só nos espaços entre grãos. Desse modo a velocidade real pode ser muito maior que a calculada.

A velocidade de um poluente completamente solúvel e não reativo, isto é, que se desloca junto com a massa de água, será dada por:

$$V = q/n$$

onde  $n$  = porosidade da região saturada (volume de vazios/volume total).

A velocidade de fluxo pode ser determinada diretamente pela utilização de traçadores. Esse método traz algumas vantagens sobre a utilização de piezômetros pois prescinde de um maior conhecimento da estrutura do solo na área.

Quando o escoamento se dá em duas direções, a determinação da direção resultante do fluxo deve ser feita a partir de pelo menos 3 piezômetros não alinhados. Estes piezômetros devem se situar a distâncias superiores a 30 m e as medidas do nível freático devem ser feitas na mesma época. A determinação da direção será feita por composição de vetores, como mostrado na figura abaixo.

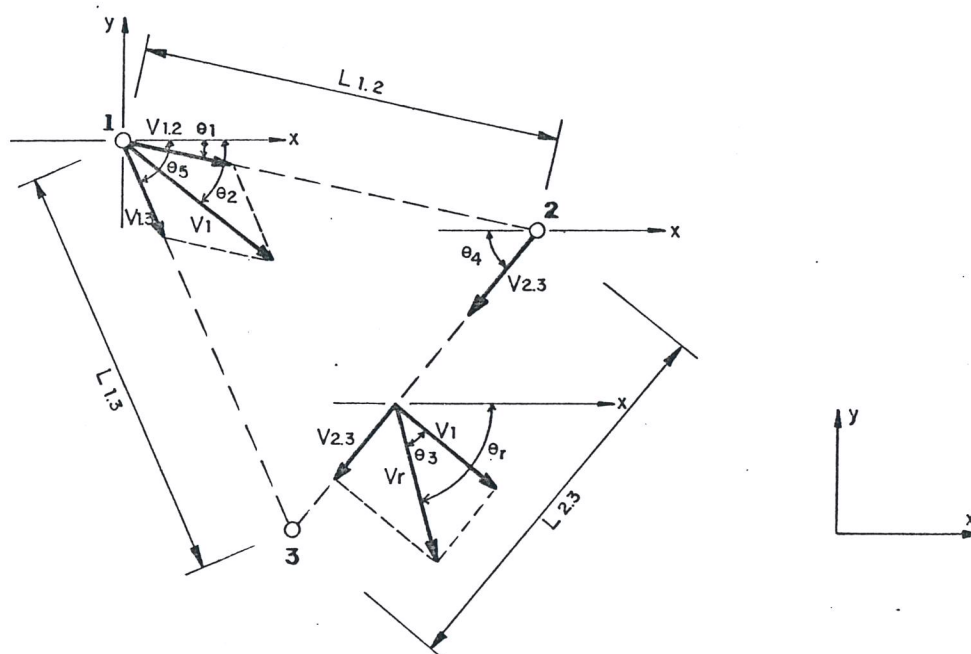


Figura 2.2.2 - Determinação da velocidade, direção e sentido do escoamento do lençol freático

Da figura temos:

$$|V_{1.2}| = \frac{Kh}{n} \cdot \frac{H_1 - H_2}{L_{1.2}}$$

$$|V_{1.3}| = \frac{Kh}{n} \cdot \frac{H_1 - H_3}{L_{1.3}}$$

$$|V_{2.3}| = \frac{Kh}{n} \cdot \frac{H_2 - H_3}{L_{2.3}}$$

$$\vec{V}_R = \vec{V}_{1.2} + \vec{V}_{1.3} + \vec{V}_{2.3} = \vec{V}_1 + \vec{V}_{2.3}$$

$$\theta_R = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

A velocidade  $\vec{V}_R$  pode ser obtida graficamente, conforme mostrado acima ou, então, analiticamente, decompondo-se as velocidades  $\vec{V}_{1.2}$ ,  $\vec{V}_{1.3}$  e  $\vec{V}_{2.3}$  segundo os eixos x e y, então:

$$\vec{V}_{1.2} = \vec{V}_{1.2,x} + \vec{V}_{1.2,y} ;$$

$$\vec{V}_{1.3} = \vec{V}_{1.3,x} + \vec{V}_{1.3,y} ;$$

$$\vec{V}_{2.3} = \vec{V}_{2.3,x} + \vec{V}_{2.3,y} ;$$

e, portanto

$$\vec{V}_R = \vec{V}_{1.2} + \vec{V}_{1.3} + \vec{V}_{2.3}, \text{ ou}$$

$$V_{Rx} = V_{1.2,x} + V_{1.3,x} + V_{2.3,x} \quad e,$$

$$V_{Ry} = V_{1.2,y} + V_{1.3,y} + V_{2.3,y}$$

Da figura temos:

$$V_{1.2} = |V_{1.2}| \cdot \cos \theta_{1,x} + |V_{1.2}| \cdot \sin \theta_{1,y};$$

$$V_{1.3} = |V_{1.3}| \cdot \cos \theta_{5,x} + |V_{1.3}| \cdot \sin \theta_{5,y};$$

$$V_{2.3} = |V_{2.3}| \cdot \cos \theta_{4,x} + |V_{2.3}| \cdot \sin \theta_{4,y};$$

a velocidade escalar resultante será dada por:

$$V_{Rx} = |V_{1.2}| \cdot \cos \theta_1 + |V_{1.3}| \cdot \cos \theta_5 - |V_{2.3}| \cdot \cos \theta_4$$

$$V_{Ry} = -|V_{1.2}| \cdot \sin \theta_1 - |V_{1.3}| \cdot \sin \theta_5 - |V_{2.3}| \cdot \sin \theta_4, \text{ e}$$

$$V_R = \sqrt{V_{Rx}^2 + V_{Ry}^2}$$

e a direção é dada por:

$$\theta_R = \text{arc. tag } \frac{V_{Ry}}{V_{Rx}}$$

As velocidades  $V_{1.2}$ ;  $V_{1.3}$  e  $V_{2.3}$  podem também ser obtidas utilizando-se traçadores.

A velocidade média aparente resultante ( $q$ ) pode ser calculada do mesmo modo.

A espessura da camada saturada é outro fator de importância para a avaliação de impacto causados por aterros ou lagoas pois, definirá, juntamente com a velocidade calculada, a vazão do lençol. Essa espessura é definida pela distância entre a superfície livre do lençol freático e a superfície da camada relativamente impermeável, conforme mostrado na figura nº 2.2.1. A sua determinação pode ser feita através do conhecimento do perfil do sub-solo da área ou, então, através de medidas geo-físicas como o perfil elétrico.

Deve-se ressaltar que em lençóis freáticos, essa espessura varia ao longo do ano, sendo maior nas épocas chuvosas.

A capacidade de diluição de um aquífero será dada pela sua vazão, entre outros fatores. A vazão do aquífero será definida por:

$$Q = q \cdot \bar{A}$$

onde  $\bar{A}$  = seção média de escoamento conforme mostrado na figura abaixo.

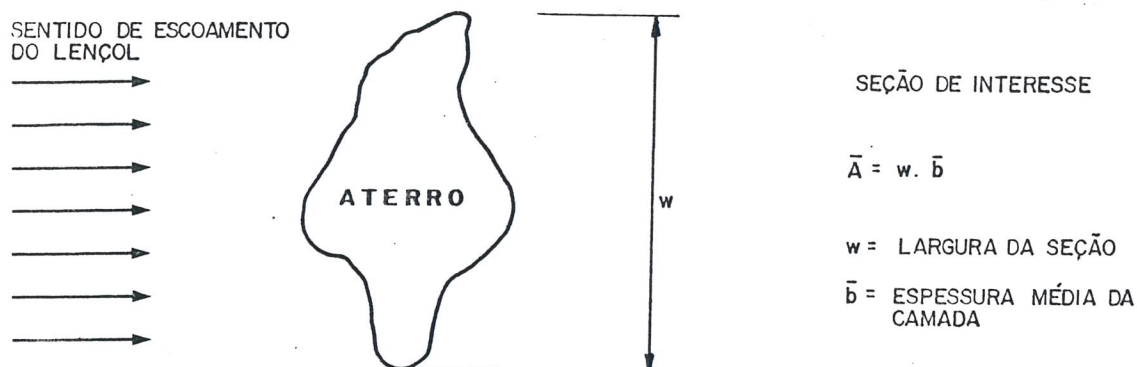


Figura nº 2.2.3 - Determinação da seção de interesse

A grosso modo, pode-se estimar a vazão média de um lençol por:

$$Q = Kh \cdot \bar{b} \cdot w \cdot \text{tg} \theta \quad \text{ou} \quad (1)$$

$$Q = w \cdot \bar{T} \cdot \text{tg} \theta \quad (2)$$

onde:

$w$  = largura da seção perpendicular ao fluxo

$\bar{b}$  = espessura média da camada

$Kh$  = coeficiente de permeabilidade horizontal da camada

$\text{tg} \theta$  = ângulo de inclinação da superfície do freático com a horizontal

$\bar{T}$  = transmissibilidade média do lençol dada por  $\bar{T} = Kh \times \bar{b}$

A vantagem de se utilizar a fórmula (2) é que  $\bar{T}$  pode

ser obtido diretamente de ensaios de bombeamento de poços e a  $\text{tg } \theta$  é obtida diretamente dos piezômetros.

### 2.3 - FLUXO NA REGIÃO INSATURADA

O comportamento hidráulico do fluxo na camada insaturada existente entre a base do aterro e o nível do lençol freático é de fundamental importância para que se tenha uma avaliação do tempo de transito de poluentes nessa região. Esse fluxo depende da quantidade de água que vai infiltrar no aterro.

A infiltração é calculada como mostrado no item 2.1. Se a infiltração for maior ou igual ao coeficiente de permeabilidade do solo, o escoamento se dará em meio saturado e as espessões aplicáveis são as apresentadas no item anterior. Entretanto, o coeficiente de percolação a ser utilizado é o medido na vertical.

Caso contrário, quando a infiltração é menor que o coeficiente de permeabilidade vertical, a velocidade de infiltração será dada por:

$$V_i = I/\theta$$

onde:

- $V_i$  = velocidade de escoamento insaturado
- $I$  = infiltração
- $\theta$  = umidade resultante (base volumétrica).

A umidade resultante  $\theta$  pode ser calculada por:

$$\theta = \theta_0 + (I/A)^{1/3}$$

onde:

$$A = K_s / (n - \theta_0)^{1/3}, \text{ constante}$$

$\theta_o$  = umidade natural do solo  
 $n$  = porosidade  
 $K_s$  = coeficiente de permeabilidade vertical

As fórmulas acima foram desenvolvidas para aplicação em solos com coeficientes de permeabilidade superiores a  $1 \times 10^{-6}$  cm/s.

O tempo de trânsito de poluentes solúveis e não reativos e solidários à massa líquida será definido por:

$$T = L/V_i$$

onde:

$L$  = distância entre a base do aterro e o nível do lençol freático.

#### 2.4 - CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA DO LENÇOL FREÁTICO

O conhecimento da qualidade do lençol freático é de fundamental importância pois irá balizar todas as medidas de monitoramento e uma parcela substancial das obras de infra-estrutura do futuro aterro.

Os parâmetros utilizados nessa caracterização são os constantes na BSB-56 (Potabilidade de Águas para Consumo Humano).

Para essa análise é necessária a obtenção de uma ou mais amostras da água do lençol freático coletadas na área pretendida e de preferência durante a campanha de sondagens de sub-solo.



CETESB

3 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS

### 3 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS

Todas as propriedades dos solos a seus parâmetros somente se rão determinadas através da amostragem e análise de amostras das diferentes camadas que compõe o sub-solo. Existem diferentes meios diretos ou indiretos para estimar esses parâmetros, porém o método mais difundido consiste nas sondagens de simples reconhecimento e para esses serviços o Estado conta com inúmeras firmas especializadas.

Como resultado direto das sondagens ter-se-ia uma visão de como se distribuem as diferentes camadas do sub-solo, suas espessuras e seus aspectos visuais, os quais serão tão precisos quanto mais experiente for a equipe de sondagem. Outro dado que aparece nesse tipo de sondagem é uma indicação da resistência do sub-solo através do nº SPT (se a sondagem for feita à percursão), quanto maior for esse número, maior a resistência do sub-solo.

Esse tipo de sondagem pode indicar ainda o nível do lençol freático mas, nesse caso, a verificação do nível deve ser feita alguns dias após o término da sondagem pois, dependendo da permeabilidade do sub-solo e grau de amalgamento das paredes do furo o enchimento desse poço pode levar muitas horas.

Durante a execução da sondagem são retiradas amostras deformadas das diferentes camadas do sub-solo para análise de laboratório. Nessas análises são determinados:

. limite de liquidez - LL - indicador da umidade na qual o solo tem comportamento mecânico de um líquido viscoso.

. limite de plasticidade - LP - indicador da umidade na qual o solo tem comportamento mecânico plástico, permitindo moldagem sem variação de volume.

. Índice de plasticidade - IP - diferença entre LP e LL e é um indicador da plasticidade de um solo. Quanto menor for essa diferença maior a sensibilidade (em termos de plasticidade) em relação a variação da umidade.

. Análise granulométrica - estudo da distribuição dos grãos do solo em função do seu diâmetro aparente. É uma indicação da quantidade de grãos finos ( $\phi < 0,005$  mm) ou do teor de argila, da quantidade de silte ( $0,05 > \phi > 0,005$ ) e quantidade de areias ( $0,05 < \phi < 2$  mm) presentes em um solo.

. Umidade natural - determinação em peso da quantidade de água (perdida em estufa a 110°C) de um solo, expressa em porcentagem. Essa análise só tem validade se a sondagem não usar água de lavagem para permitir a penetração do amostrador.

Os resultados dessas análises permitirã, ainda que grosseiramente, a estimativa das seguintes grandezas (somente para argilas):

. Índice de consistência - IC

$$Ic = \frac{LL - h}{IP}$$

onde: h = umidade de uma argila  
 LL = limite de liquidez  
 IP = índice de plasticidade

desse cálculo então infere-se:

- $Ic < 0$  - consistência de vaza
- $0 < Ic < 0,5$  - consistência plástica mole
- $0,50 < Ic < 0,75$  - consistência plástica média
- $0,75 < Ic < 1,00$  - consistência plástica rija
- $Ic > 1,00$  - consistência plástica dura

. Resistência a compressão simples - Rs - por comparação com consistência infere-se a resistência.

consistência mole	$R_s < 0,5 \text{ Kgf/cm}^2$
consistência média	$0,5 < R_s < 1,5 \text{ Kgf/cm}^2$
consistência rija	$1,5 < R_s < 4,0 \text{ Kgf/cm}^2$
consistência dura	$R_s > 4,0 \text{ Kgf/cm}^2$

Uma outra maneira de se inferir a resistência a compressão simples e a consistência de argilas é dada através do STP como se segue:

Número STP para amostrador de 2"	Consistência	$R_s$ kgf/cm <sup>2</sup>
< 2	muito mole	
2 - 5	mole	< 0,5
6 - 10	média	0,5 - 1,5
11 - 19	rija	1,5 - 4,0
> 19	dura	> 4

. Coesão -  $C$  - esta grandeza é largamente utilizada no cálculo de estabilidade de taludes e cálculos de pressão a resistência e com uma boa dose de sorte pode-se estimar:

$$c = \frac{R_s}{2}$$

Frequentemente será necessário o conhecimento de outros parâmetros dos solos, os quais podem ser obtidos através de análise de laboratório em amostras indeformadas conseguidas em sondagens especiais com amostradores de diâmetro superior a 4 polegadas ou então através de poços exploratórios.

As análises em amostras indeformadas indicarão:

. a umidade natural do solo -  $w$  - parâmetro usado para se estimar o grau de plasticidade, para cálculo de fluxo em meio não saturado e para cálculo de compactação.

. a massa específica natural -  $\rho$  - parâmetro utilizado para cálculo de compactação, fundação e recalques.

. o índice de vazios -  $e$  - parâmetro utilizado para cálculo de recalques, fluxo em meio não saturado.

. o coeficiente de permeabilidade -  $K$  - parâmetro utilizado para cálculo de fluxo em meios porosos.

Dependendo da complexidade do resíduo a ser depositado poderá ser necessário o conhecimento de outros parâmetros do sub-solo, dentre eles destacam-se:

. capacidade de troca iônica (meq/100 g) - que dará indicação da capacidade desse sub-solo em reter cátions e,

. teor de matéria orgânica - que servirá como parâmetro para cálculo da retenção ou imobilização de compostos orgânicos.



4 - COMENTÁRIOS FINAIS

#### 4 - COMENTÁRIOS FINAIS

O conjunto das informações do item 2 e 3 se constituirá numa caracterização hidrogeológica preliminar. Em muitos casos campanhas de pesquisas muito mais elaboradas e o auxílio de geólogos ou geotécnicos serão necessários para se conseguir uma caracterização precisa de um determinado terreno.

A grande dificuldade que se encontra diz respeito a que todos os ensaios e determinações aqui apresentadas foram concebidos para servir de ferramentas a Mecânica dos Solos e não para controle ambiental, mas são as únicas informações disponíveis hoje.

A seguir são apresentadas as características de uma área ideal para receber resíduos, apenas com o sentido de servir como uma orientação aos técnicos da CETESB.

Uma área será considerada adequada para receber resíduos sólidos se apresentar as seguintes características:

- . não estar sujeita a inundações nem ser alagadiça;
- . não apresentar depressões naturais;
- . não ser vossoroca nem passagem preferencial de água de drenagem;
- . não ter declividade superior a 20%;
- . estar a pelo menos 200 m de qualquer corpo d'água (Portaria GM 124 MINTER);
- . baixo índice de precipitação;
- . alto índice de evaporação;
- . diferença entre evaporação e precipitação deve ser positiva;
- . sub-solo com alto teor de argila;

. a distância ideal entre o fundo do aterro e o mais alto nível do lençol freático deve ser maior ou igual a 3 m, não se aceitando distâncias inferiores a 1,5 m;

. sub-solo deve ser argiloso com baixa permeabilidade vertical, (da ordem de  $1 \times 10^{-7}$  cm/s), não se aceitando permeabilidades maiores ou iguais a  $1 \times 10^{-4}$  cm/s;

. sub-solo com índice de liquidez maior ou igual a 30% e índice de plasticidade maior ou igual a 15 unidades.



**CETESB**

**Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental**  
Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - Pinheiros  
Fone: 210.1100 - Telex (011) 222-46 - CTS - BR  
CEP 05459 – São Paulo - SP – Brasil