



Hidrologia

5.3. Águas Subterrâneas

- 5.3.1 Introdução
- 5.3.2 Classificação dos aquíferos
- 5.3.3 Parâmetros hidrodinâmicos fundamentais dos aquíferos
- 5.3.4 Captações de águas subterrâneas
- 5.3.5 A base de dados do SNIHR- obtenção de informações sobre as unidades hidrogeológicas de Portugal continental

1. Introdução

- Os recursos hídricos subterrâneos sempre desempenharam um importante papel, e deverão continuar a fazê-lo, tanto no abastecimento das populações como na origem de água para a agricultura e a indústria.
- Mesmo em vastas zonas onde as águas subterrâneas são escassas, elas podem ser fundamentais, na ausência de outros recursos hídricos economicamente mobilizáveis, permitindo assegurar o abastecimento de núcleos urbanos ou industriais de pequena dimensão, de explorações agropecuárias e do regadio de pequenas explorações agrícolas (SNIRH, 2018).

As **águas subterrâneas** ocorrem em formações geológicas conhecidas por **aquíferos**. Ocupam os espaços vazios das rochas, nomeadamente, os poros intergranulares, os canalículos que os interligam e as fraturas.

Um **aquífero** é uma formação geológica que armazena e possibilita a circulação da água e de onde é possível extrair a mesma em quantidades suficientes de forma a possibilitar o seu aproveitamento pelo Homem.

Para a sua exploração ser viável os aquíferos não só devem armazenar água em quantidade suficiente, como possibilitar a sua circulação.

A quantidade suficiente varia de região para região. Por exemplo, em climas semiáridos considera-se economicamente viável uma captação (furo, poço ou galeria) que forneça caudais que seriam considerados irrisórios noutra região, tais como 0.5 l/s.

Se as formações geológicas não são aquíferas, i.e., apresentam características físicas que impedem o armazenamento, e logo a circulação de água, recebem o nome de **aquílugos**. É caso das rochas magmáticas não fraturadas - granitos, gnaisses, basaltos e calcários muito compactos.

Aquitardo (*tardare* = retardar) é uma formação geológica que armazena água mas que a transmite lentamente, produzindo pequenas quantidades de água. Apresentam permeabilidades médias/baixas - caso das areias argilosas e rochas vulcânicas alteradas. São importantes para a recarga de aquíferos subjacentes.

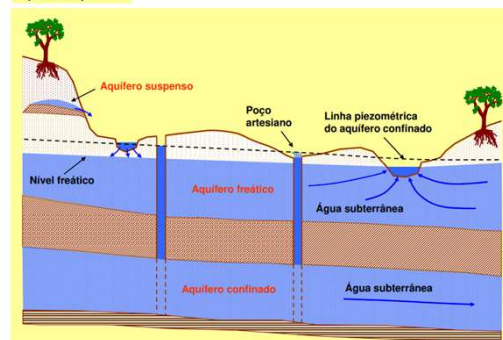
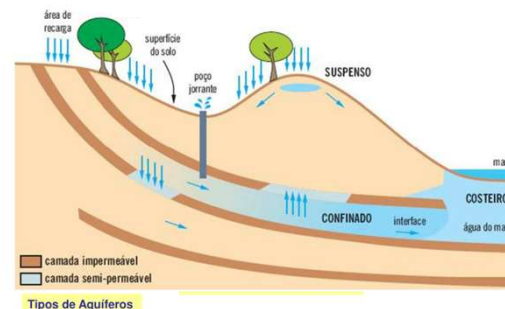
Aquicludo (*claudere* = fechar) é uma formação geológica que pode armazenar água mas não a transmite - a água não circula - caso das argilas. Funcionam como camada confinante ou impermeável.

2. Classificação de aquíferos

Os aquíferos podem ser classificados de três formas:

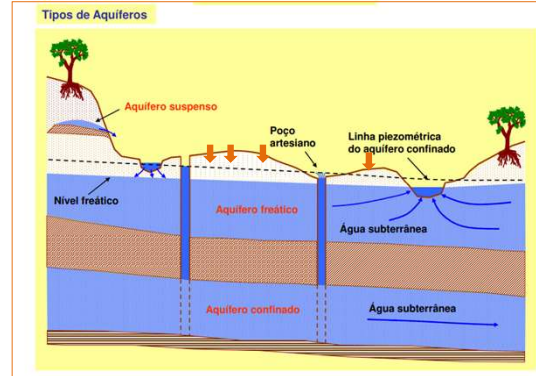
- Quanto à **estrutura geológica**: porosos, fissurados e cársicos;
- Quanto à **localização geográfica**: costeiros e interiores, basais e suspensos;
- Quanto à **pressão a que está submetido**: livres ou freáticos, confinados ou cativos.

Localização geográfica e pressão



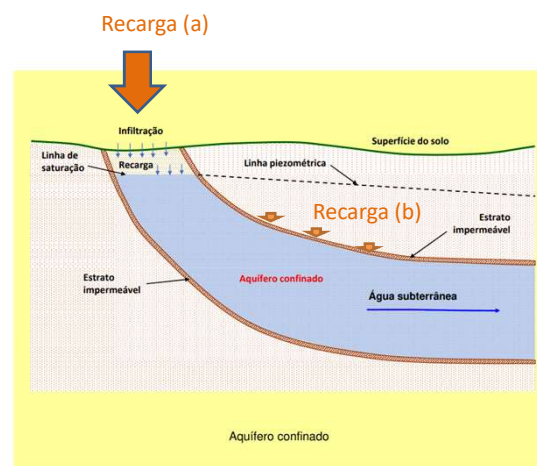
- O **aquífero livre** apresenta-se com um extrato superior permeável, através do qual é recarregado, sendo inferiormente limitado por uma rocha permeável ou semipermeável.
- Encontram-se, em geral, em profundidades pequenas, sendo quase sempre limitados pela própria superfície ou pelo limite de acumulação da água.
- Esse tipo de aquífero é o de mais fácil extração de recursos hídricos, sendo, muitas vezes, chamado de aquífero freático.

Os **aquíferos suspensos** são um caso particular do aquífero livre, formados por uma base inferior impermeável e uma base superior permeável ou semipermeável, sem a capacidade de transmitir, acumular ou receber mais água.



Já os **aquíferos confinados** são aqueles cercados por camadas impermeáveis e mantidos sob uma pressão interna superior à pressão atmosférica. Quando perfurados, os seus poços costumam jorrar água em velocidade razoável em razão dessa pressão superior.

Secção de Eng.º Rural



O aquífero confinado é recarregado por uma área específica (a) ou por drenagem lenta através da camada semi permeável que o confina (b)

Secção de Eng.º Rural

6/48

3. Parâmetros hidrodinâmicos fundamentais dos aquíferos

Tipo	Designação
Função capacitiva	Porosidade ϕ e Porosidade eficaz ϕ_e Coeficiente de armazenamento (S)
Função transmissiva	Condutividade hidráulica (K) Transmissividade (T)
Piezometria e gradiente	Nível piezométrico (h) Gradiente hidráulico (i)
Caudal e velocidade	Caudal (Q) Velocidade efetiva de circulação (v_e)

Função capacitiva

Porosidade, ϕ , [-]

$$\phi = \frac{V_v}{V_T} \cdot 100$$

É a razão entre o *volume de vazios* e o volume total ocupado pela rocha. Na zona saturada a água subterrânea preenche todos os poros, logo a porosidade é uma medida direta da água contida na rocha, por unidade de volume.

Porosidade efetiva ou eficaz ou cedência específica, ϕ_e , [-]

$$\phi_e = \frac{V_e}{V_T} \cdot 100$$

É a razão entre o *volume de água que drena de uma rocha saturada devido à força da gravidade* e o volume total ocupado pela rocha. Corresponde à água gravítica ou livre, ou seja aquela que não está ligada à rocha por forças de adesão, coesão e capilaridade.

Retenção específica, S_r , [-]

$$S_r = \frac{V_R}{V_T} \cdot 100$$

É a razão entre o *volume de água que fica retido na rocha contra a força de gravidade* e o volume total ocupado pela rocha. Corresponde à capacidade de campo definida para os solos

O teor em água à saturação natural corresponde à soma das cedência e retenção específicas

Valores seleccionados de porosidade, porosidade efectiva e retenção específica, em percentagem por volume (Fonte: Schwartz e Zhang, 2003)

Material	Porosidade ϕ	Porosidade efectiva ϕ_e	Retenção específica S_r
Solo	55	40	15
Argila	50	2	48
Areia	25	22	3
Cascalho	20	19	1
Calcário	20	18	2
Arenito (semi-consolidado)	11	6	5
Granito	0,1	0,09	0,01
Basalto (jovem)	11	8	3

Armazenamento específico (specific storage), S_s [m^{-1}] de um aquífero saturado

$$S_s = \rho_w g (\alpha + \phi \beta)$$

α = coeficiente de compressibilidade (vertical) do meio poroso [$LM^{-1}T^2$],

ϕ = porosidade do meio,

β = coeficiente de compressibilidade da água [$LM^{-1}T^2$].

Quando a pressão do fluido decresce no meio poroso, o **volume do fluido expande-se** e o **esqueleto mineral contrai-se**. O armazenamento específico é o volume de água que o aquífero liberta (ou recebe), por unidade de superfície do aquífero, por unidade de espessura do aquífero (ou seja, por unidade de volume do aquífero) e por baixa (ou subida) unitária do nível piezométrico.

Coefficiente de armazenamento (storativity), S [-]

é o volume de água que o aquífero liberta (ou recebe), por unidade de superfície do aquífero e por baixa (ou subida) unitária do nível piezométrico.

Num aquífero confinado $S = S_s \cdot e$

Num aquífero freático $S = S_s \cdot e + \phi_e$

O valor de $S_s \cdot e$ varia entre 10^{-3} e 10^{-5} . Como o valor de ϕ_e varia normalmente entre 0,1 e 0,3 temos que $\phi_e \gg S_s \cdot e$, considerando-se normalmente, para os aquíferos freáticos:

$$S \approx \phi_e$$

9/48

Exercício:

Uma amostra de meio poroso saturado tem o valor de 2000 cm^3 . Depois deste volume ter drenado por gravidade, o volume passou a ser 1650 m^3 . Depois de este volume ter sido seco em estufa, o volume toma o valor de 1500 cm^3 . Determine o armazenamento específico, a cedência específica e a porosidade da amostra em %.

(17.5 %, 7.5%, 25%)

Exercício:

Nas águas subterrâneas de uma bacia, com 31 km^2 , há dois aquíferos sobrepostos. Dos testes hidráulicos obteve-se a seguinte informação:

- O aquífero superior apresenta uma espessura de 150 m e uma cedência específica de 0.12 (ou 12 %)
- O aquífero inferior apresenta um coeficiente de armazenamento de 4×10^{-4} . e uma perda máxima de piezométrica de 45 m

Qual a quantidade de água que pode ser recuperada dos aquíferos?

(5.58 x 10⁸ m³)

Função transmissiva**Permeabilidade, coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, k [m/d, cm/s, m/s):**

Traduz a maior ou menor facilidade com que um aquífero se deixa atravessar pelo água.

Não é uma característica intrínseca do meio pois também depende das características do fluido que o atravessa.

Quando o fluido é a água é usual designar-se por condutividade hidráulica.

Permeabilidade intrínseca, específica ou absoluta, k_i [m², cm², etc) :

É uma característica intrínseca do meio poroso pois não depende das características do fluido que o atravessa.

$$k_i = K \frac{\mu}{\rho g} = K \times 1.023 \times 10^{-7}$$

Transmissividade

Corresponde à capacidade de um aquífero para transmitir água em toda a sua espessura saturada, expressa-se em m²/dia:

$$T = K e$$

Em que:

K é a condutividade hidráulica (m/d);

e é a espessura saturada do aquífero (m).

A **transmissividade** é o parâmetro que mais condiciona o fluxo da água subterrânea sendo por isso o parâmetro hidrodinâmico mais usado na avaliação de recursos hídricos subterrâneos. Determina-se *in situ* através de ensaios de caudal em obras de captação.

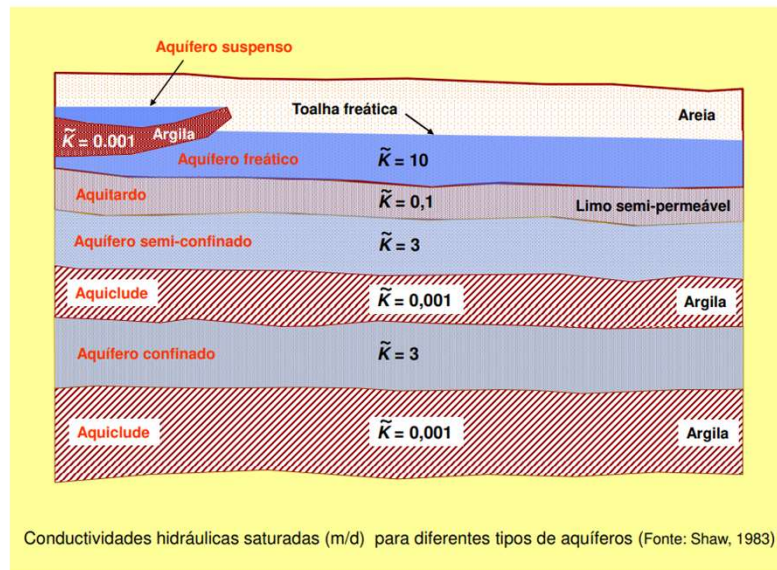
Resistência hidráulica, C (dia)

É o inverso da condutividade hidráulica, para toda a espessura do aquífero ou estrato do aquífero

$$C = \frac{1}{K} e$$

Tabela 29 - Porosidade vs Permeabilidade.

Tipo de rocha	Porosidade (%)	Permeabilidade (m/d)
Cascalheira	30	> 1000
Areia	35	10 a 5
Argila	45	< 0,001



De acordo com os parâmetros hidrodinâmicos obtidos em ensaios de bombagem que caracterizam a função transmissiva dos aquíferos, podemos classificar qualitativamente os mesmos ao nível da sua condutividade hidráulica (K) e transmissividade (T) recorrendo a tabelas (construídas a partir de numerosos ensaios) como as que seguem:

Tabela 31 - Valores de condutividade hidráulica (K) de aquíferos e sua classificação.

K (m/dia)	Classificação
$K < 10^{-2}$	Muito baixa
$10^{-2} < K < 1$	Baixa
$1 < K < 10$	Média
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muito alta

Tabela 32 - Valores de transmissividade (T) de aquíferos e sua classificação.

T (m ² /dia)	Classificação
$T < 10$	Muito baixa
$10 < T < 100$	Baixa
$100 < T < 500$	Média
$500 < T < 1000$	Alta
$T > 1000$	Muito alta

Exercício:

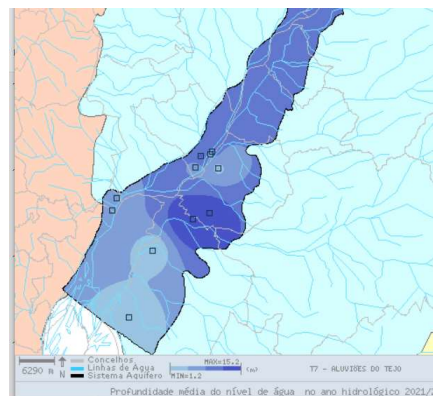
A transmissividade calculada através de teste hidráulico a um aquífero confinado é de $0.0134 \text{ m}^2/\text{s}$. A espessura do aquífero é 13 m.

- a) Determine a condutividade hidráulica do aquífero;
b) Determine a permeabilidade intrínseca do aquífero.

 (0.00103 m/s) $(1.05 \times 10^{-10} \text{ m}^2)$ **Piezometria e gradiente**

Interpretação dos fluxos na água subterrânea: direção e sentido

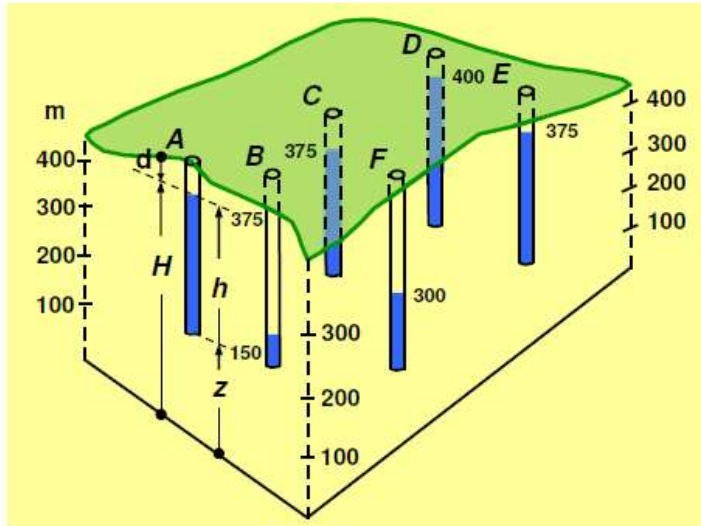
- Aquíferos freáticos :
mapa de profundidade da toalha freática, contendo isolinhas de profundidade
- Aquíferos confinados:
mapa de superfície piezométrica, contendo isolinhas de piezométrica



Como se obtêm?

Piezometria e gradiente

A profundidade da toalha freática (aquífero livre) e a piezométrica (aquífero confinado) são medidas em poços

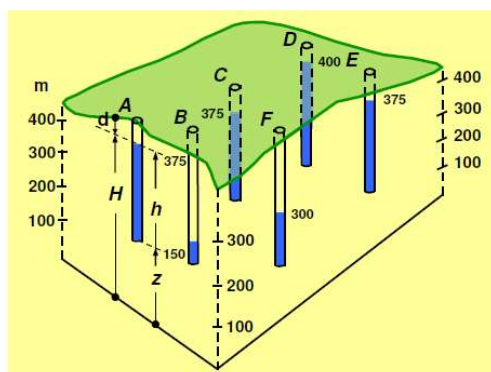


h = piezométrica
 H = carga hidráulica

Secção de Eng.º Rural

17/48

Piezometria e gradiente



h = piezométrica
 H – carga hidráulica

Conhecendo:

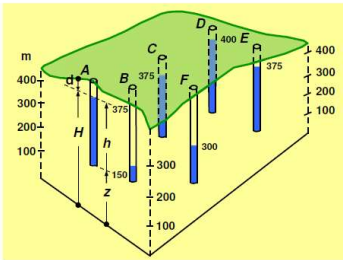
- as cotas do terreno,
- o comprimento dos piezómetros,
- e a profundidade a que se encontra a água,

pode calcular-se a **carga hidráulica H** .

Secção de Eng.º Rural

18/48

Piezometria



h = piezométrica
 H – carga hidráulica

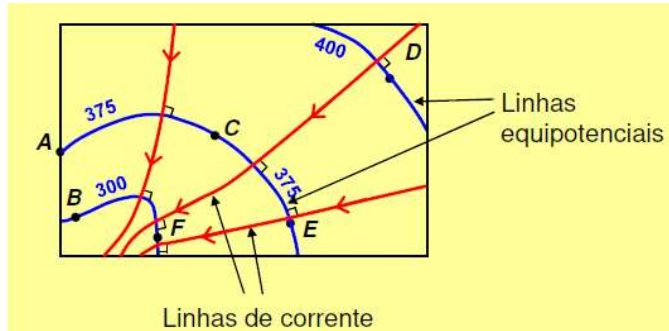
Conhecendo:

- as cotas do terreno,
- o comprimento dos piezómetros,
- e a profundidade a que se encontra a água,

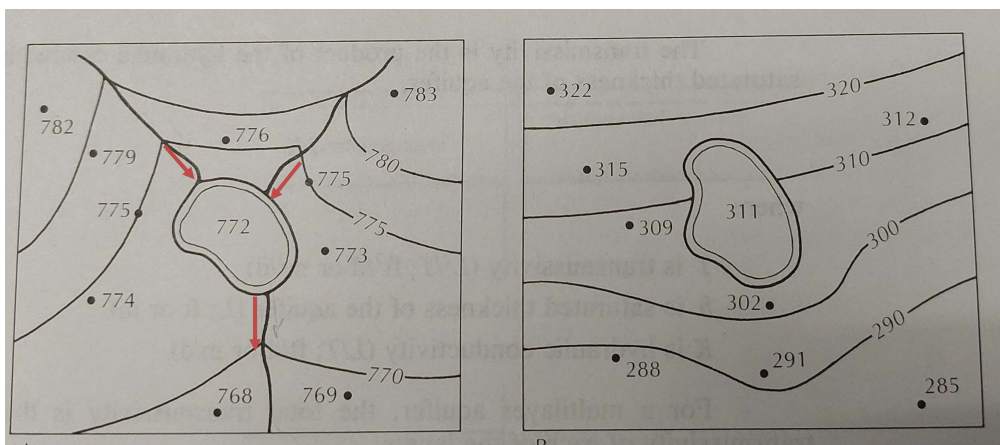
pode calcular-se a **carga hidráulica H** .

Carga hidráulica \Leftrightarrow energia total da água

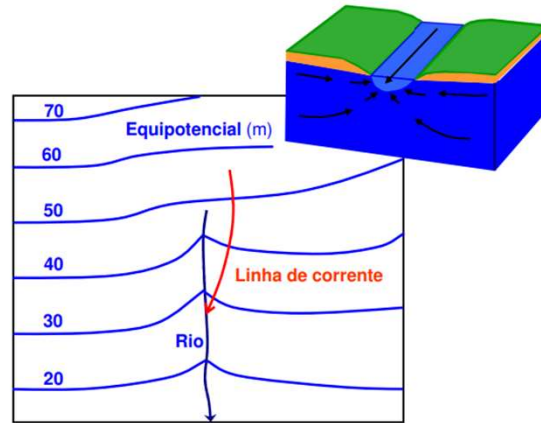
o fluxo de água dá-se no sentido dos maiores para as menores cargas hidráulicas



Exemplos



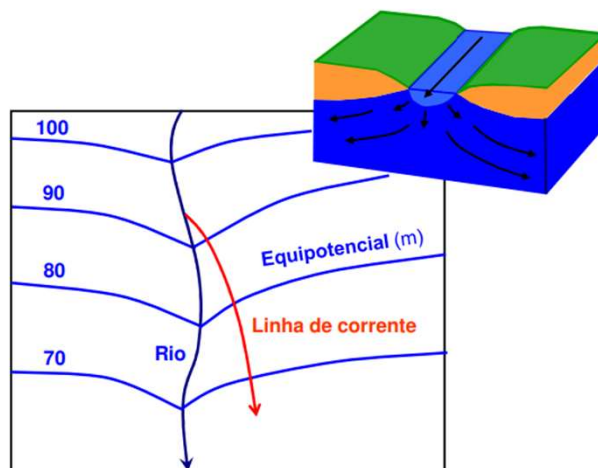
Interação Rio - Aquífero



Curso de água alimentado pelo aquífero – Superfície da água abaixo da carga hidráulica dos aquíferos adjacentes (Fonte: Schwart & Zhang, 2003)

Secção de Eng.º Rural

21/48

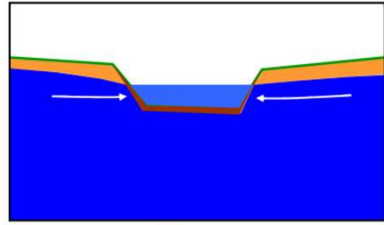


Curso de água que alimenta o aquífero – Superfície da água acima da carga hidráulica dos aquíferos adjacentes (Fonte: Schwart & Zhang, 2003)

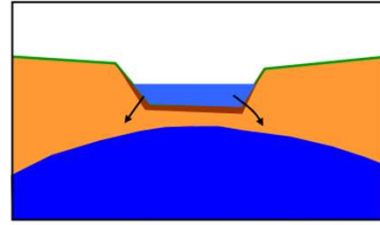
Secção de Eng.º Rural

22/48

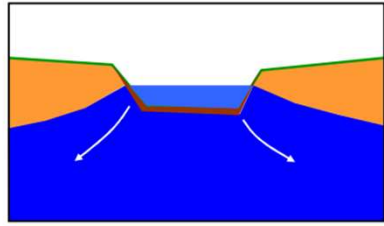
Tipos de interação rio-aquífero



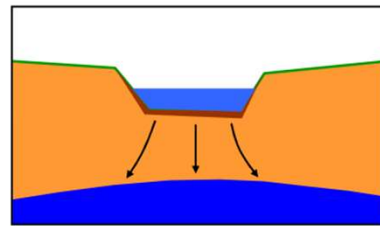
Rio em conexão hidráulica com o aquífero, alimentado por este



Rio desconectado de aquífero próximo da superfície, a alimentar este



Rio em conexão hidráulica com o aquífero, a alimentar este



Rio desconectado de aquífero profundo, a alimentar este

Fonte: Schwartz e Zhang (2003)

23/48

Gradiente e fluxos

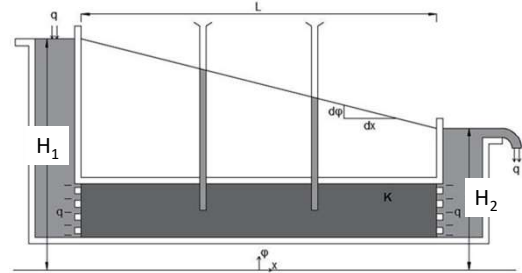
A Lei de Darcy é uma das equações fundamentais para o estudo da hidráulica do escoamento subterrâneo.

“o escoamento da água através dum meio poroso saturado homogêneo e isotrópico é proporcional ao gradiente do potencial hidráulico ou gradiente hidráulico”



$$v = K \frac{H_1 - H_2}{L}$$

Em que:
 v é a velocidade de escoamento (m/dia);
 H é o potencial hidráulico ou carga (m);
 (H₁-H₂) é a perda de carga (m);
 L é a distância entre os pontos onde H₁ e H₂ foram medidas (m);
 K é uma constante de proporcionalidade (m/dia), condutividade hidráulica.



Como o valor da velocidade é muito baixo, a componente da carga cinemática pode ser desprezada, e H é então igual à cota piezométrica, h. O valor de Δh/L é o gradiente hidráulico, i = grad (h).

$$v = -Ki$$

O sinal negativo exprime que o escoamento é no sentido contrário ao do sentido positivo do gradiente hidráulico

A partir da lei de Darcy, pode exprimir-se o CAUDAL ESPECÍFICO (caudal por unidade de largura do aquífero) pela fórmula:

$$q = -K e i$$

Em que o caudal específico q vem expresso em m^2 /dia.
O gradiente hidráulico depende da orientação.

A lei de Darcy pode ser escrita de forma generalizada como:

$$v_x = -K_x i_x$$

Em que:

v_x é a velocidade de escoamento no sentido x (m/dia);

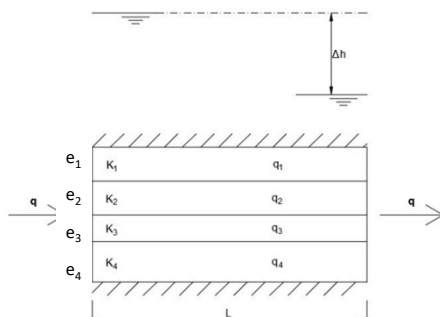
K_x é a permeabilidade no sentido x ;

$i_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}$ é o gradiente hidráulico no sentido x .

Podem escrever-se expressões análogas para v_y e v_z . Note-se que no caso dum aquífero isotrópico será $K_x = K_y = K_z = K$ (Hipólito & Vaz, 2011).

Meios estratificados

Estratificação em direção paralela ao fluxo



Para cada uma das camadas j pode escrever-se:

$$q_j = -K_j e_j i = -K_j e_j \frac{\Delta h}{L}$$

Em que q_j é o caudal específico da camada j .
O caudal total q que atravessa as várias camadas é dado por:

$$q = \sum_j q_j = - \sum_j (K_j e_j) \frac{\Delta h}{L}$$

Para todo o aquífero com espessura total e e no qual o caudal q se processa com a mesma perda de carga total Δh , pode escrever-se a lei de Darcy como:

$$q = -K_{eq} \sum_j e_j \frac{\Delta h}{L}$$

Em que K_{eq} é a permeabilidade equivalente de todo o aquífero, dada por:

$$K_{eq} = K_h = \frac{1}{e} \sum_j (K_j e_j)$$

Exercício:

11.1. Considere um subsolo com 5 estratos:

- Camada 1: areia média, $K = 5 \text{ m/dia}$, espessura 10 m;
- Camada 2: argila, $K = 0.01 \text{ m/dia}$, espessura 5 m;
- Camada 3: areia grosseira, $K = 20 \text{ m/dia}$, espessura 15 m;
- Camada 4: argila, $K = 0.005 \text{ m/dia}$, espessura 10 m;
- Camada 5: areia fina, $K = 1 \text{ m/dia}$, espessura 30 m;

O subsolo tem o comprimento de 1 km (gradiente $i = 0.001$).
carga total na direção vertical é de 1 m. Calcule para cada camada:

A perda de

- a perda de carga Δh ;
- a resistência hidráulica horizontal;
- a resistência hidráulica vertical;
- a transmissividade;
- o caudal específico (horizontal);
- a permeabilidade equivalente (horizontal).

Soluções:

a)

Camada	$\Delta h \text{ (m)}$
1	0.010
2	0.005
3	0.015
4	0.010
5	0.030

b)

Camada	$c_h \text{ (dia)}$
1	200
2	100000
3	50
4	200000
5	1000

c)

Camada	$c_v \text{ (dia)}$
1	2
2	500
3	0.75
4	2000
5	30

d)

Camada	$T \text{ (dia}^{-1}\text{)}$
1	50
2	0.05
3	300
4	0.05
5	30

e)

Camada	$q_{hor} \text{ (m}^2\text{/dia)}$
1	0.05
2	0.00005
3	0.3
4	0.00005
5	0.03

f)

Camada	$K_{eq \text{ hor}} \text{ (m/dia)}$
1	0.71429
2	0.00071
3	4.28571
4	0.00071
5	0.42857
Total	5.43

Secção de Eng.º Rural

27/48

1.4 Captações de água subterrânea

Entende-se por **captação de água subterrânea** qualquer dispositivo que permita extrair a água contida num sistema aquífero, quer seja por gravidade, por bombagem, ou qualquer outro sistema de elevação:

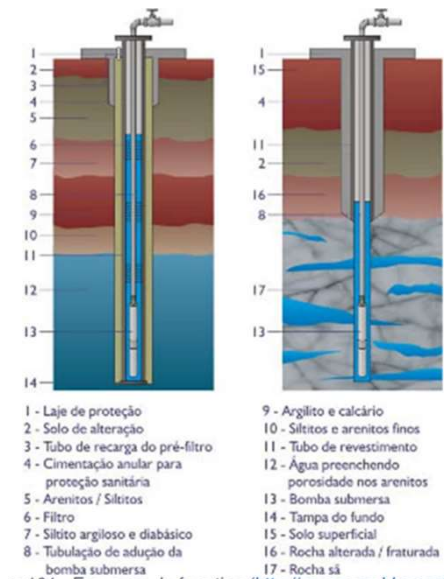
- Furos;
- Galerias;
- Fontes de encosta ou nascentes;
- Poços.

Secção de Eng.º Rural

28/48

Furos

A captação de águas subterrâneas profundas faz-se através de furos, não atingindo, no entanto, normalmente profundidades superiores a 300 m.



Secção de Eng.º Rural

29/48

Galerias



Trata-se de uma perfuração sub-horizontal de grande diâmetro (1,5x2m) com uma profundidade muito maior do que o diâmetro (comprimentos desde 500 m a 3000 m, até intercetarem o nível de saturação). A água penetra ao longo da obra criando um fluxo aproximadamente paralelo e horizontal. A água captada circula por gravidade.

Secção de Eng.º Rural

30/48

Nascentes

Quando a superfície do aquífero intersecta a superfície do terreno, a água brota naturalmente à superfície e constitui aquilo que se costuma designar por nascente, que é a fonte de água e não a captação propriamente dita.

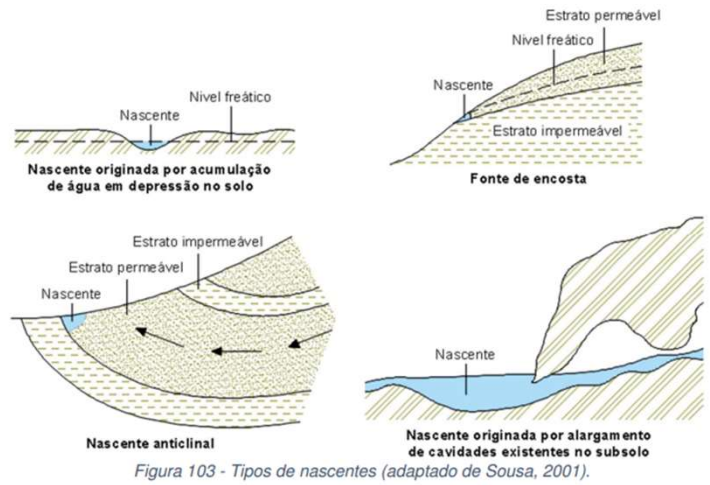


Figura 103 - Tipos de nascentes (adaptado de Sousa, 2001).

Poços

A captação da água subterrânea por meio de poços caracteriza-se por provocar o escoamento que se processa radialmente no interior do maciço poroso que contém o aquífero (ou lençol de água subterrâneo).

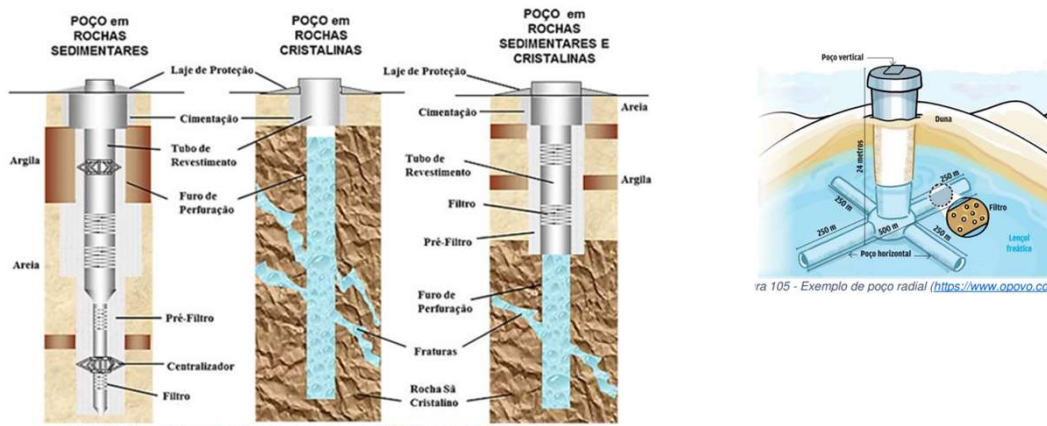


Figura 104 - Exemplos de poços comuns (<http://www.soluaguas.com.br>).

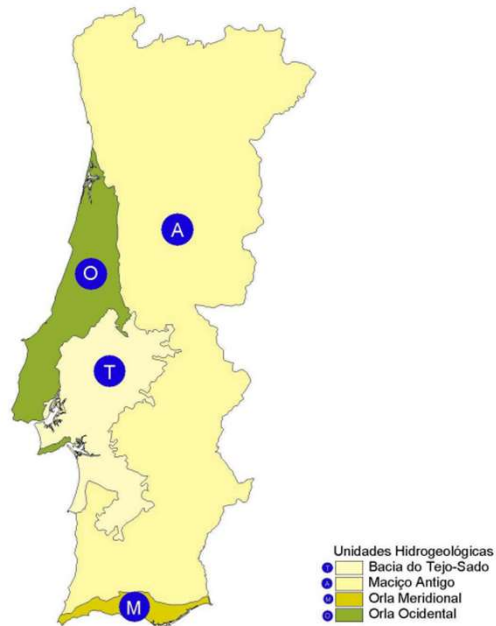
Figura 105 - Exemplo de poço radial (<https://www.opovo.com>)

A captação feita por meio de poços pode ser realizada:

- com o aproveitamento do aquífero freático, que é o primeiro a ser encontrado quando se faz uma escavação e que, conforme já visto, contém a água no interior do maciço poroso sujeita à pressão atmosférica;
- com o aproveitamento do aquífero artesiano, onde a pressão da água é superior à atmosférica por se encontrar confinada entre camadas impermeáveis. De acordo com o aquífero que se utiliza como fonte de suprimento, o poço é então denominado freático ou artesiano.

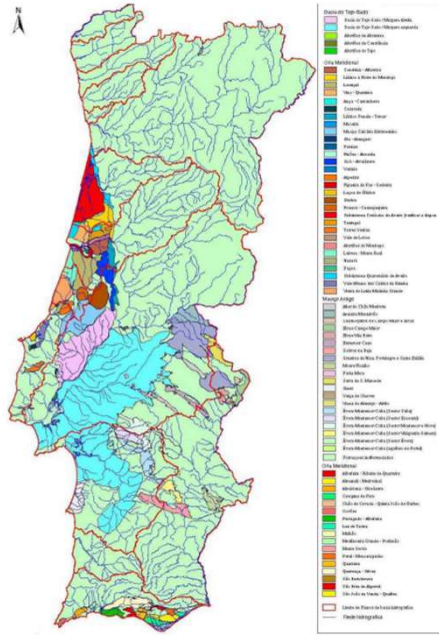
1.5 Utilização da base de dados do SNIRH para pesquisa de informações sobre as unidades hidrogeológicas de Portugal Continental

<https://snirh.apambiente.pt/>

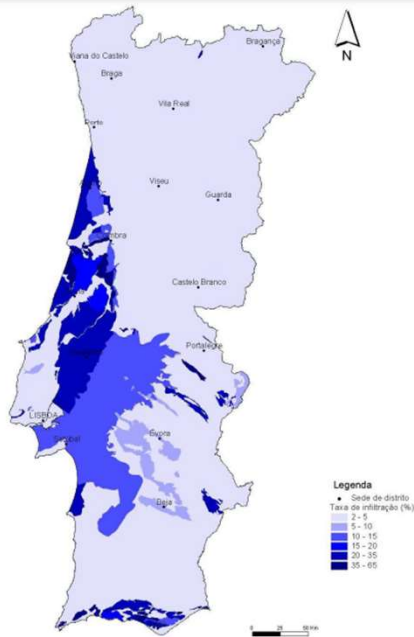


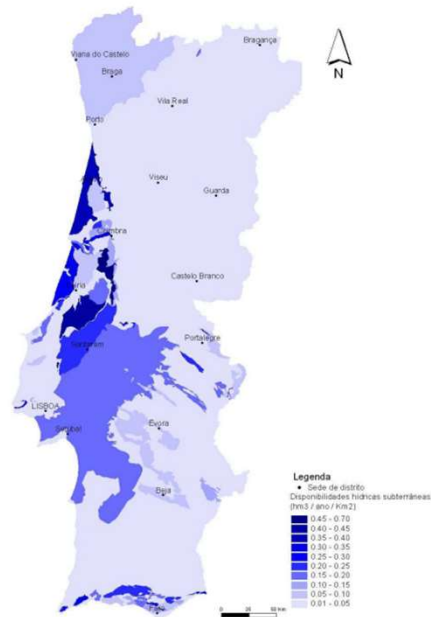
Unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (**Fonte:** INAG, 2001)

Sistemas Aquíferos em Portugal Continental (Fonte: INAG, 2001)



Taxas de Recarga Média Anual em Portugal Continental (Fonte: INAG, 2001)





Disponibilidades Hídricas Subterrâneas de Portugal (Fonte: INAG, 2001)

Secção de Eng.ª Rural

37/48

Referências Bibliográficas

Instituto da Água (INAG) (2001). *Plano Nacional da Água*.

Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry e J.R. Williams (2009). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. Theoretical Documentation. Version 2009.

Schwartz, F.W. & H. Zhang (2003). *Fundamentals of Ground Water*, John Wiley & Sons, Inc.

Shaw, E.M. (1983). *Hydrology in Practice*, Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd.

Secção de Eng.ª Rural

38/48