

Capítulo 17- Infiltração e condutividade hidráulica K

17.1 Introdução

A infiltração é o processo pelo qual a água das chuvas, da neve derretida ou da irrigação penetra nas camadas superficiais do solo e se move para baixo em direção ao lençol d'água (Rawls, et al *in* Maidment, 1993). A infiltração é um fenômeno complexo, difícil de ser determinado com exatidão e que varia no tempo e no espaço.

A porosidade efetiva da mesma forma que a porosidade total é uma grandeza adimensional e pode ser expressa em porcentagem.

Tabela 17.1 - Porosidade típica de alguns materiais mais usados

Material	Porosidade (%)
Pedras britadas (<i>Blasted rock</i>)	30
Pedras britadas uniformemente graduadas	40 (mais usado)
Pedras graduadas maiores que ¾”(19mm)	30
Areia	25
Pedregulho	15 a 25

Fonte: Urbonas, 1993

17.2 Lei de Darcy

Em 1856 estudando a permeabilidade na zona saturada, Henry Darcy concluiu que para um filtro de área (A) comprimento (L), conforme a Figura (17.1) vale o seguinte:

$$Q = K \times A \times (h_1 - h_2) / L \quad \text{(Equação 17.1)}$$

$$Q = K \times A \times G \quad \text{(Equação 17.2)}$$

Sendo:

Q= vazão constante que passa pelo cilindro (m³/s; m³/dia);

h₁= carga hidráulica no piezômetro 1 (m) e

h₂= carga hidráulica no piezômetro 2 (m) e

z₁= cota do ponto P₁ (m)

z₂= cota do ponto P₂ (m)

L= distância entre os piezômetros 1 e 2

A= área da seção transversal do cilindro (m²)

ΔH= variação da carga hidráulica entre os piezômetros 1 e 2

K= condutividade hidráulica (m/s; m/h; mm/h; m/dia)

G= gradiente hidráulico= (h₁-h₂)/L

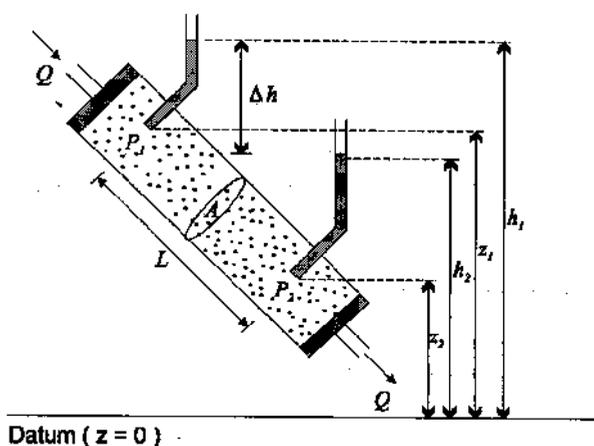


Figura 17.1 - Esboço esquemático do dispositivo usado por Darcy
Fonte: Hidrogeologia - conceitos e aplicações, 1996, p.3.

A equação de Darcy só vale para regime laminar.

Tabela 17.1 - Condutividade hidráulica K em função do tipo de solo

Tipo de solo	K mm/h	K m/dia
Areia	210,06	4,96
Areia franca	61,21	1,45
Franco arenoso	25,91	0,61
Franco	13,21	0,31
Franco siltoso	6,86	0,16
Franco argilo arenoso	4,32	0,10
Franco argiloso	2,29	0,05
Franco argilo siltoso	1,52	0,04
Argila arenosa	1,27	0,03
Argila siltosa	1,02	0,02
Argila	0,51	0,01

Fonte: Febusson e Debo, 1990 in *Georgia Stormwater Manual*, 2001

Tabela 17.1B- Valores típicos da condutividade K baseado na estrutura do solo

Tipo de solo	Condutividade K (m/h)
Material de boa infiltração	
Pedregulho	10 a 1000
Solo arenoso	0,1 a 100
Solo franco	0,01 a 1
Solo franco arenoso	0,05 a 0,5
Solo franco	0,001 a 0,1
Solo franco siltoso	0,0005 a 0,05
Material de calcário sedimentar (chalk)	0,001 a 100
Solo franco argiloso arenoso	0,001 a 0,1
Material de baixa infiltração	
Solo franco argiloso siltoso	0,00005 a 0,005
Solo argiloso	<0,0001
Argila, areia depositada por geleira (Till)	0,00001 a 0,01
Rocha	0,000001 a 0,1

Fonte: CIRIA, 2007

17.3 Métodos para medir a infiltração

Os mais conhecidos são:

- Infiltrômetro de duplo anel
- Infiltrômetro
- Método da ABNT

Infiltrômetro de duplo anel

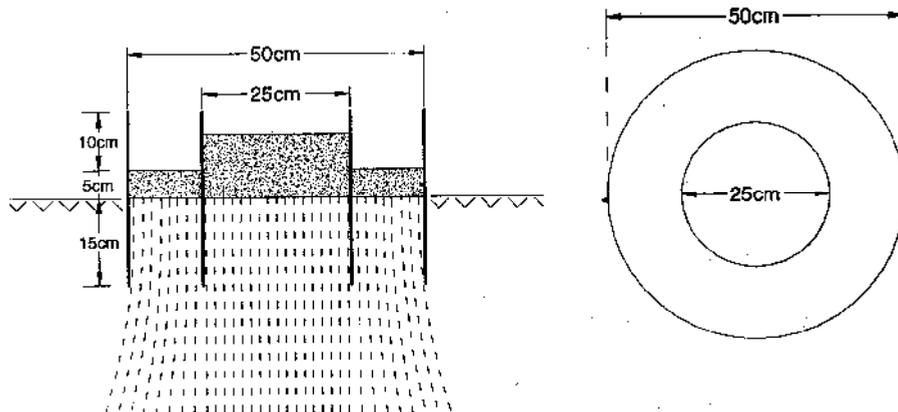


Figura 17.2- Infiltrômetro de duplo anel.

Fonte: Villela e Mattos, 1975.

Para se obter em campo os parâmetros da fórmula de Horton deve ser usado o *infiltrômetro de duplo anel* conforme Figura (17.2) e (17.3).

Aconselha-se que seja feito um teste para cada $0,7\text{km}^2$, ou seja, 1 teste para cada 70ha, conforme Drenagem Urbana, 1986.

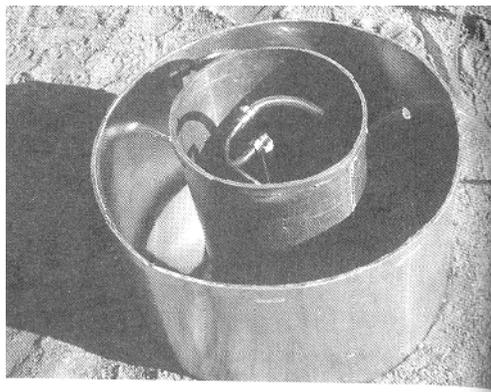


Figura 17.3 - Infiltrômetro de duplo anel conectado com aparato que mantém constante o nível de água em cada anel.

Fonte: Dingman, 2002.

Wanielista, 1997 diz que o teste com infiltrômetro deve ser feito em área menor que 2.000m^2 e cuidados especiais devem ser feitos para que os mesmos sejam representativos.

Conforme Martins e Paiva, 2001 o infiltrômetro de duplo anel consiste de dois anéis concêntricos, o de menor com 25cm de diâmetro e o maior com diâmetro de 50cm. Ambos com 30cm de altura. Devem ser instalados no solo com auxílio de marreta. Para isso, é necessário que as bordas inferiores dos anéis devem ser finas, cortadas em forma de bisel, para facilitar a penetração do solo causando a menor desestruturação possível.

Coloca-se água, ao mesmo tempo, nos dois anéis e, com uma régua graduada acompanha-se a infiltração vertical do cilindro interno, em intervalos de 5, 10, 15, 20, 30,

45, 60, 90, 120min, etc, que devem ser diminuídos se a velocidade de infiltração da água no solo for muito alta.

A lâmina d água no cilindro interno é maior que no cilindro externo. Isto se deve ao fato que a função do cilindro externo, é apenas a orientação das linhas de corrente.

Infiltrômetro

Uma maneira de quantificar a infiltração é através do Infiltrômetro da Figura (17.4) que consiste em um tubo de PV de diâmetro interno de 102mm e 4mm de espessura, com comprimento de 300mm, dentro do qual fica inserida amostra de solo indeformada do PET conforme Hirata et al, 2006.

As amostras são obtidas pela cravação direta desses equipamentos no solo, coletando-se assim o material sem deformá-lo consideravelmente.

Na sua extremidade inferior situa-se uma tampa afunilada (cap) receptora da água que atravessa o perfil do solo e o frasco amostrador, conectado ao PVC por uma mangueira de borracha, em direção ao qual se destina a água infiltrada. A amostra é sustentada por três hastes metálicas conforme Hirata et al, 2006.

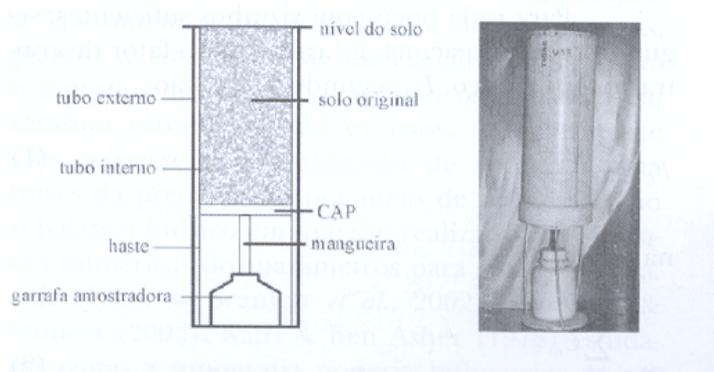


Figura 17.4 - Infiltrômetro

Hirata et al, 2006 concluíram que no aquífero livre e raso do Parque Ecológico localizado no município de São Paulo, os valores da recarga representam em media 27% das precipitações ocorridas, sendo rápido o processo de recarga.

Concluíram que a recarga é rápida embora haja diferença na estação seca e chuvosa

Estimativas de taxas de infiltração

O Manual de Drenagem Urbana de Denver recomenda em estudos preliminares que sejam usadas as taxas de infiltração da Tabela (17.2).

Tabela 17.2 - Estimativa de taxas de infiltração para estudos preliminares, recomendado pelo manual de drenagem urbana de Denver.

Período de retorno da tormenta	Primeira meia hora	Segunda meia hora até o término da tormenta
2 a 5 anos	25,4mm/h	12,7mm/h
10 a 100 anos	12,7mm/h	12,7mm/h

Fonte: Drenagem Urbana, 1986

Rubem Porto, no livro de Drenagem Urbana, 1995 recomenda as seguintes estimativas dos parâmetros de Horton e que constam do software denominado ABC4 conforme Tabela (17.3).

Tabela 17.3 - Estimativa de parâmetros da fórmula de Horton

Parâmetros da fórmula de Horton	Classificação hidrológica do solo segundo o <i>Soil Conservation Service</i> (SCS)			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
f_0	250	200	130	80
f_f	25	13	7	3
k	2	2	2	2

Fonte: Porto, in Drenagem Urbana, 1995

Segundo McCuen, 1997 o valor de f_0 é de 3 a 5 vezes o valor de f_f e cita ainda que os valores de k variam de 1/h até 20/h, enquanto que Akan,1993 cita que os valores de k variam de 0,67/h até 49/h sendo que na ausência de dados deve ser usado 4,14/h, conforme sugestão de Hubber e Dickinson, 1988.

Akan, 1993 recomenda que quando não se têm dados, pode-se estimá-los usando a Tabela (17.4).

Tabela 17.4- Estimativa da taxa de infiltração final de Horton

Tipo de solo	f_f (mm/h)
Solo argiloso com areia, silte e húmus	0 a 1,27mm/h
Solo arenoso argiloso	1,27mm/h a 3,81mm/h
Solo siltoso com areia, silte e húmus	3,81mm/h a 7,62mm/h
Solo arenoso	7,62mm/h a 11,43mm/h

Fonte: Akan,1993

Para efeitos práticos Tucci e Gens, 1995 admitem como valor mínimo de infiltração para plano de infiltração, ou seja, *filter strip* ou faixa de filtro gramada, o valor $f=8\text{mm/h}$, conforme Tabela (17.5).

Tabela 17.5 - Tabela de infiltração

Tipo de solo	Classificação do tipo de solo conforme SCS	Infiltração mínima (mm/h)
Areia	A	50 a 200
Marga	B	12,7 a 25
Sedimento margoso	C	3,8 a 6,3
Argiloso	D	< 1,3

Fonte: Tucci em Gens in Drenagem Urbana, 1995

Conforme pesquisas feitas por Tucci e Gens, 1995 usando simulador de chuva, foi determinado o escoamento superficial de diferentes superfícies urbanas que estão na Tabela (17.6). Observar que um chão batido não é permeável como costumeiramente se pensa e note-se que o escoamento superficial é maior no chão batido do que em *blockets* e paralelepípedo novo ou antigo.

Tabela 17.6 - Experimentos em superfícies urbanas de Genz, 1994.

Superfície	Declividade (%)	Coefficiente de escoamento C	Taxa de infiltração final (mm/h)	Precipitação simulada (mm/h)
Gramado	1 a 9	0,54 a 0,68	19 a 23	110 a 142
Chão batido	1,3	0,92 a 0,95		110 a 120
Paralelepípedo antigo	2 a 11	0,88 a 0,95		103 a 128
Paralelepípedo novo	4	0,58 a 0,63	18 a 23	114 a 124
Blockets	2	0,83 a 0,85	10 a 14	116 a 127

Fonte: Tucci e Gens in Drenagem, 1995.

O DNER no seu Manual de Drenagem mostra a Tabela (17.7).

Tabela 17.7 – Coeficientes de condutividade hidráulica K

Material	Granulométrica	Condutividade Hidráulica K		
		(cm/s)	(mm/h)	(m/s)
	(cm)			
Brita 5	7,5cm a 10cm	100	3600000	1
Brita 4	5 a 7,5	60	2160000	0,6
Brita 3	2,5 a 5	45	1620000	0,45
Brita 2	2 a 2,5	25	900000	0,25
Brita 1	1 a 2	15	540000	0,15
Brita 0	0,5 a 1	5	180000	0,05
Areia grossa	0,2 a 0,5	1×10^{-1}	3600	0,001
Areia fina	0,005 a 0,04	1×10^{-3}	36	0,00001
Silte	0,0005 a 0,005	1×10^{-5}	0,36	1E-07
Argila	Menor que 0,0005	1×10^{-8}	0,00036	1E-10

Fonte: Manual de Drenagem do DNER, 1990

O software HydroCAD apresenta a Tabela (17.8) para estimativa da condutividade hidráulica.

Tabela 17.8 - Condutividade hidráulica usada no programa HydroCAD 7.1

Tipo de solo	Condutividade hidráulica (mm/h)
Solo arenoso	21
Solo margoso arenoso	6
Solo arenoso margoso	3
Solo margoso	1,3
Solo argilo margoso	0,3

Fonte: <http://www.hydrocad.net/exfilt.htm>.

As normas alemãs e a CIRIA- *Construction Industry Research and Information Association* da Inglaterra apresentam a Tabela (17.9).

Tabela 17.9 - Sugestões para valores da condutividade hidráulica K (mm/h)

Descrição do solo	Normas alemãs		Dados da CIRIA	
	Mínimo (mm/h)	Máximo (mm/h)	Mínimo (mm/h)	Máximo (mm/h)
Pedregulhos grosso	33.000	100.000		
Média e fino pedregulhos	3.600	18.000	10	1.000
Pedregulho arenoso	1.000	10.000		
Areia grossa	1.000	3.000		
Areia média	200	1.000	0,1	100
Areia fina	36	360		
Solo franco arenoso			0,01	1
Solo silto arenoso	1	100		
Solo franco arenoso			0,005	0,05
Silte	0,03	20	0,0005	0,05
Solo siltoso	0,001	3,6		
Solo argiloso	0,0001	0,01	0,00005	0,005

Fonte: Alan A. Smith and Tai D. Bui

(*) CIRIA= Construction Industry Research and Information Association- Londres

17.4 Coeficiente de infiltração segundo a NBR 7229/93.

A NBR 7229/93 de “Construção e Instalação de Fossas sépticas e disposição dos efluentes finais” apresenta uma maneira prática de se estimar o coeficiente de infiltração em litros/m²/dia conforme Botelho, 1998.

O método a ser aplicado é o seguinte:

- Na profundidade onde vai estar a vala de infiltração fazer três escavações com formato de uma caixa paralelepípedo de 30cm x 30cm x 30cm.
- No dia anterior ao teste, encher as três caixas com água.
- No dia do teste encher as três caixas com água e deixar secar.
- Após secar, encher cada caixa com 15cm de água e medir o tempo que leva para abaixar o nível de água de 1cm.
- Adotar o menor dos três tempos, que será o tempo padrão de infiltração do solo na profundidade considerada.
- Com o tempo obtido entrar na Figura (17.5) e achar o coeficiente de infiltração do solo.

A Figura (17.5) mostra esquematicamente o paralelepípedo cujo lado é 30cm e o gráfico para se obter o coeficiente de infiltração conforme Tanaka, 1986.

Podemos aproximadamente supor que $f_i = K =$ coeficiente de infiltração.

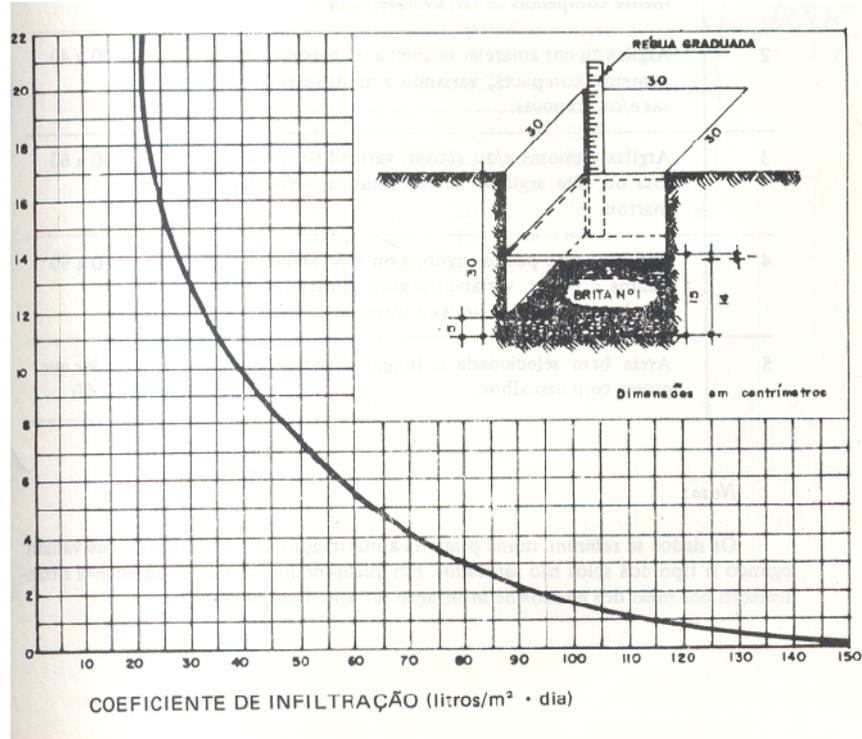


Figura 17.5 - Gráfico para determinação do coeficiente de infiltração
 Fonte: Tanaka, 1986

Tabela 17.10 - Coeficiente de infiltração em função do tempo em minutos

Tempo de infiltração para rebaixamento de 1cm (min)	Coeficiente de infiltração (litros/m ² /dia ou mm/dia)
22	22
20	23
18	24
16	25
14	27
12	33
10	40
8	47
6	57
4	73
2	100
1	110
0,5	130

Fonte: Botelho, 1998

Tabela 17.11 - Estimativa do coeficiente de infiltração de acordo com o tipo de solo local

Constituição provável do solo	Coefficiente de infiltração (litros/m ² /dia ou mm/dia)
Rochas, argilas compactadas	<20
Argilas de cor amarela ou marrom, medianamente compactas	20 a 40
Argila arenosa	40 a 60
Areia ou silte argiloso	60 a 90
Areia bem selecionada	>90

Fonte: Botelho, 1998

Tanaka, 1986 mostra no seu livro de “Instalações Prediais hidráulicas e sanitárias” a Tabela (17.12). As recomendações da NBR 7229/93 é que o comprimento das valas máximo seja de 30m e que o fundo das mesmas esteja, no **mínimo, a 1,5m do lençol freático.**

Faixa de variação de areia e britas.

Tabela 17.12 - Faixa de variação de diâmetro dos grânulos das areias e britas

Material	Tipo	Variação do diâmetro (mm)
Areia	Fina	0,075 a 0,42
	Média	0,42 a 1,20
	Grossa	1,20 a 4,80
Pedra britada	n° 1	4,80 a 12,5
	n° 2	12,5 a 25
	n° 3	25 a 50
	n° 4	50 a 76
	n° 5	76 a 100

Fonte: Tanaka, 1986

17.5 Bibliografia e livros consultados

-CIRIA. *The SUDS manual*. London, 2007, CIRIA C697, ISBN 978-0-86017-697-8

-HIRATA, RICARDO et al. *Mecanismos de controle de recarga em aquíferos sedimentares livres. Estudo na bacia hidrográfica do Alto Tietê, São Paulo, Brasil*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, volume 11, número 3. ISSN 1414-381X, julho a setembro de 2006.