

## Capítulo 75

### Recarga artificial das águas subterrâneas com dry well

Nitro PDF Trial  
www.nitropdf.com

## 75- Recarga artificial das águas subterrâneas com dry well

### 48.1 Introdução

O objetivo é que a recarga no pós-desenvolvimento seja a mesma do pré-desenvolvimento.

Para os efeitos de recarga de aquíferos subterrâneos em BMP (Best Management Practices) que iremos focar salientamos que as áreas aplicadas são pequenas e menores que 200ha (2km<sup>2</sup>).

A **infiltração** é o processo de movimento da água para dentro da interface solo-ar.

**Recarga** é o processo pelo qual a água se move da zona não saturada para a zona saturada. A área de recarga é aquela em que a água infiltra no solo e percola até atingir o aquífero subterrâneo. Na Figura (48.1) podemos ver que o **lençol freático** é o topo da zona de saturação.

Por definição **água subterrânea** é aquela que preenche os vazios do solo e das rochas.

A recarga das águas subterrâneas é um dos componentes do ciclo hidrológico menos documentado e entendido do que os outros conforme Gburck e Folmar, 199 in Fennessey. Infelizmente existe muita incerteza de como é feita a percolação da água entre a zona das raízes e o lençol freático.

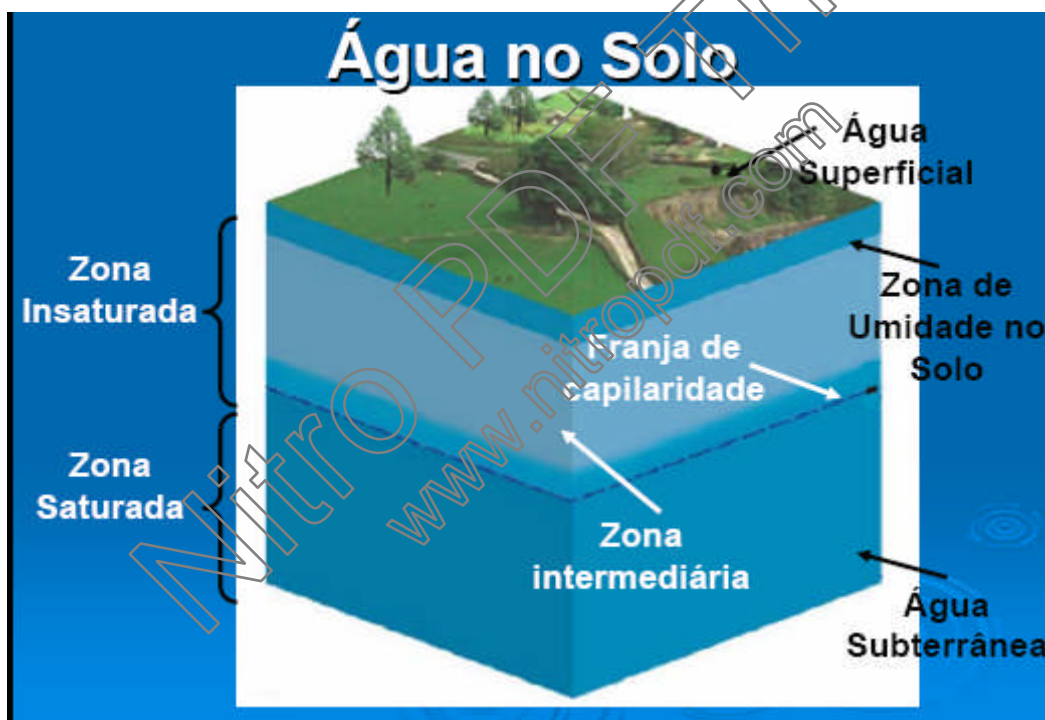


Figura 48.1- Distribuição da água abaixo da superfície do solo  
Fonte: Patrick Valverde Medeiros

Existe a recarga natural e a recarga artificial dos aquíferos subterrâneos e interessaremos somente pela recarga artificial.

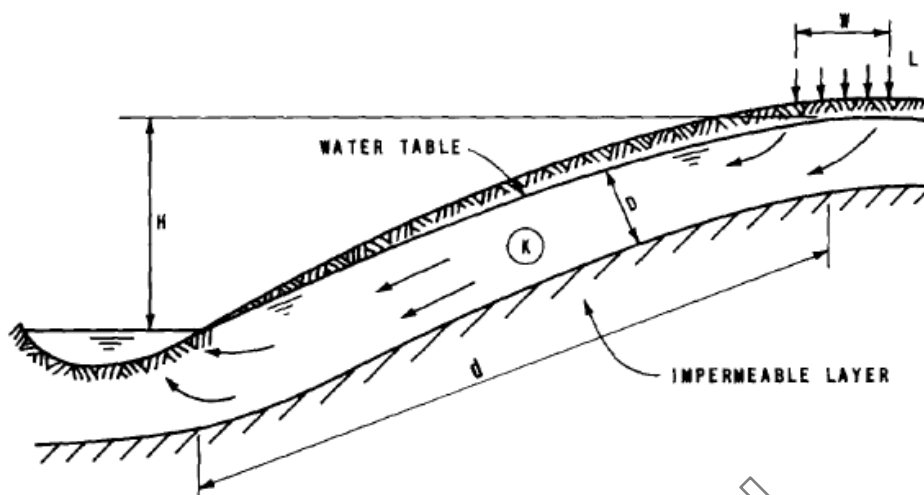


Figura 48.2- Esquema de recarga natural

A recarga natural conforme Figura (48.3) é praticamente de 30% a 50% da precipitação em climas temperados úmidos, 10% a 20% na região do Mediterrâneo e de 0 a 2% em climas áridos conforme Bouwer, 2000. A recarga natural varia de poucas horas ou dias, até 10.000anos ou mais em climas secos.

É importante salientar que 98% da água doce do mundo é água subterrânea. Para o século XXI a previsão é do uso das águas subterrâneas, armazenando-as não mais em barragens superficiais e sim em aquíferos subterrâneos e depois retirá-las com bombeamento- *Aquifer storage and recovery- ASR*.

Na Austrália temos desde 1997 o *Water Resources Act 1997* que inclui o ASR. Vários estados americanos possuem legislação sobre ASR.

#### 48.2 Tecnologias básicas para recarga das águas subterrâneas

As tecnologias básicas existentes para recarga das águas subterrâneas são quatro conforme Figura (48.3):

- **Reservatório de infiltração** que se situam na zona vadosa (zona aerada)
- **Trincheiras de infiltração** que se situam na zona vadosa
- **Poços secos de recarga (dry well)** situados na zona vadosa não atingindo o lençol freático.
- **Poços tubulares profundos de recarga** que penetram no lençol freático

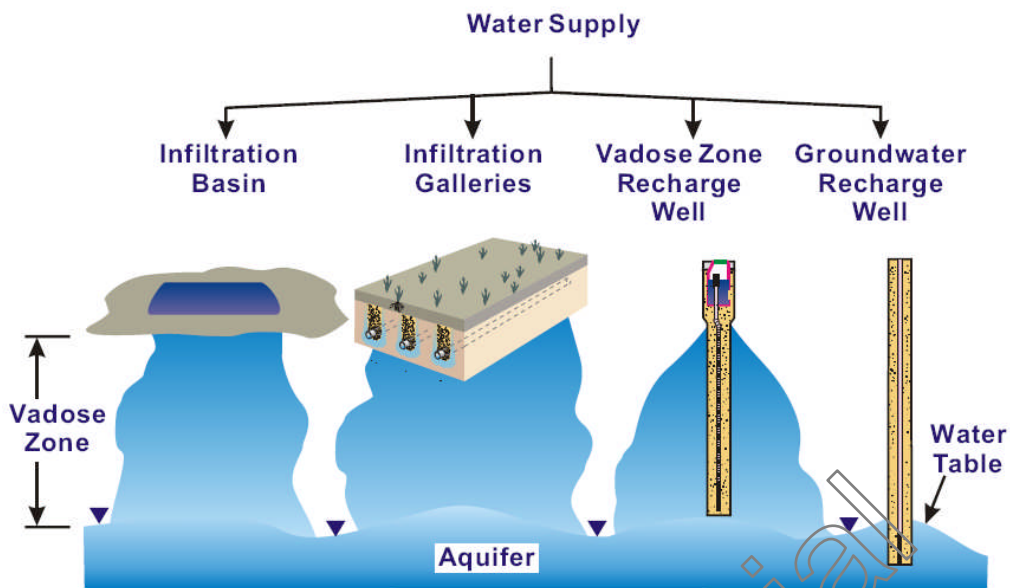
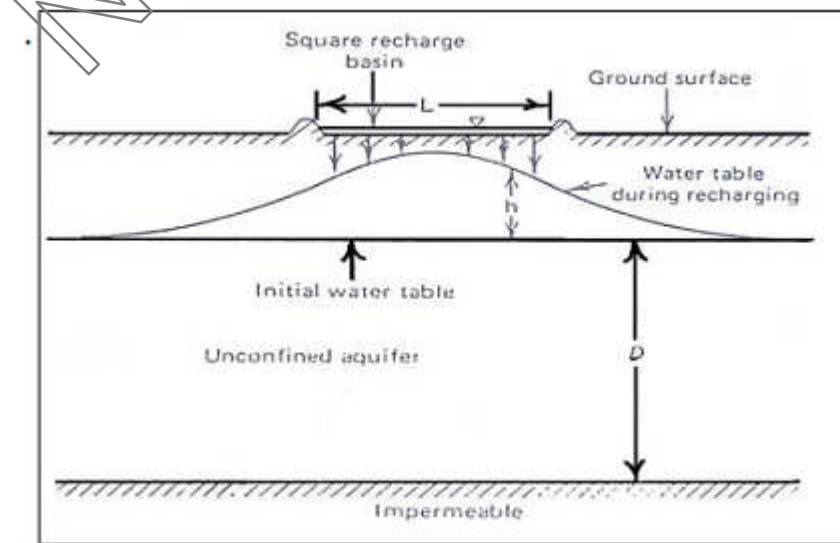


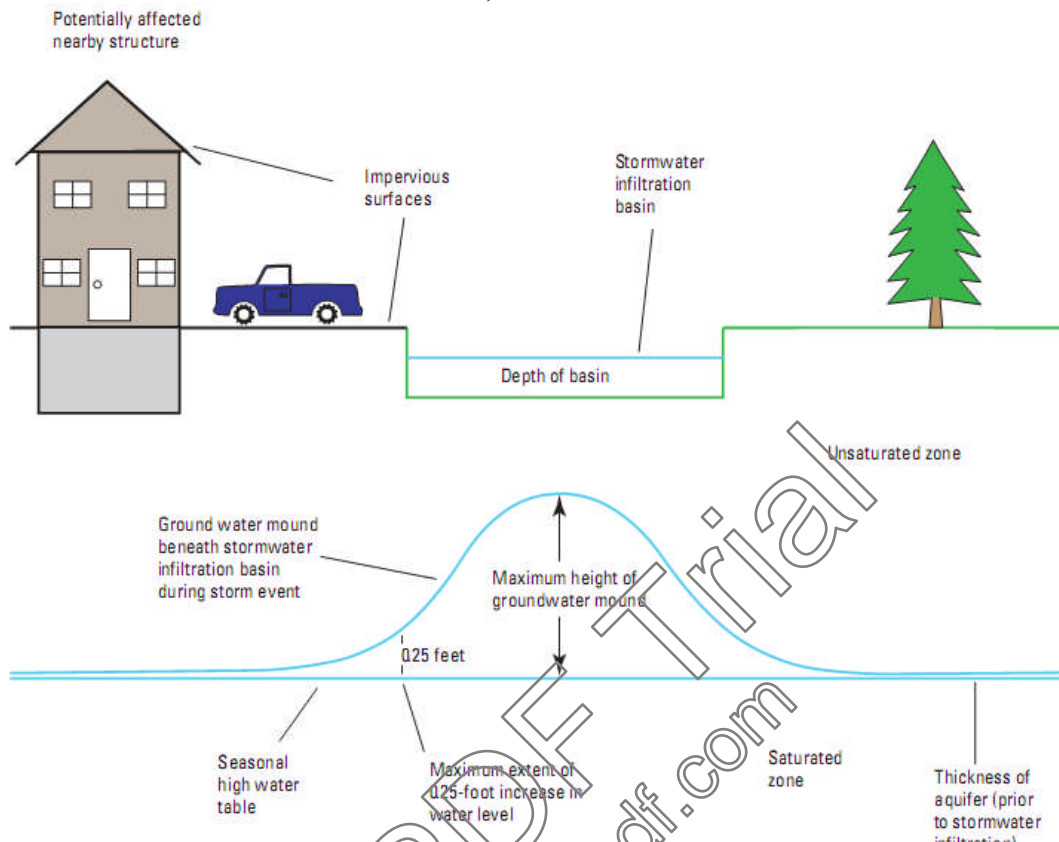
Figura 48.3- Esquema dos quatro tipos básicos de infiltração da esquerda para a direita: reservatório de infiltração, trincheira de infiltração, poço seco de recarga na zona vadosa e poço tubular profundo de recarga na zona saturada.

#### 48.4 Alçamento do lençol freático pela Equação de *Hantush*

Existe um lençol freático que tem altura "b", porosidade efetiva  $S_y$  e condutividade hidráulica K. Observar que a condutividade hidráulica K do aquífero saturado pode ser diferente daquela da zona de aeração. Queremos saber que com a infiltração da água no lençol freático como o mesmo sobe e saber se isto não vai ocasionar problema do escoamento devido a necessidade de se manter sempre no mínimo 1,50m do lençol freático até o fundo do reservatório de infiltração.



**Figura 48.12 Alçamento do lençol freático devido a recarga**  
 Fonte: Todd, 1990



**Figura 48.13- Esquema do alçamento do lençol freático**  
 Fonte: USGS, 2010

O parâmetro “v” será:

$$v = \frac{Kx b}{S_y}$$

$$b_1 = 0.5 x (h_i + h(t))$$

Sendo:

v = parâmetro (m<sup>2</sup>/dia)

b<sub>1</sub>= espessura do lençol freático no tempo t (m)

S<sub>y</sub>= porosidade efetiva (adimensional)

h<sub>i</sub>= altura inicial da espessura do lençol freático (m)=espessura do aquífero sem recaga.

Nota: não confundir a distância do fundo do poço de infiltração até o lençol freático com a espessura do lençol freático.

h(t)= altura no tempo t (m)

Hantush, 1967 in Chin, 2000 obteve a seguinte equação:

$$h_m^2(t) = h_i^2 + (2Nx v x t/K) x S^* ( W/ (8 v t)^{0.5} , L/(8 v t)^{0.5} )$$

Sendo:

h<sub>m</sub> = é a máxima altura do lençol freático no tempo t em relação a base (m)

h<sub>i</sub>= espessura do lençol freático

N= taxa de recarga (m/dia)

t= tempo (horas)

K= condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)

W= largura da trincheira (m)

L= comprimento da trincheira (m)  
v = parâmetro ( $m^2/dia$ )

Nitro PDF Trial  
www.nitropdf.com

**Tabela 48.2- Valores de de  $\alpha$  e  $\beta$  conforme função de erro**

$\alpha \backslash \beta$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.14	0.18	0.22	0.26	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.50	0.54	0.58	0.62
0.02	0.0041	0.0073	0.0101	0.0125	0.0146	0.0184	0.0216	0.0243	0.0267	0.0288	0.0306	0.0322	0.0337	0.0349	0.0361	0.0371	0.0380	0.0387
0.04	0.0073	0.0135	0.0188	0.0236	0.0278	0.0353	0.0416	0.0470	0.0518	0.0559	0.0596	0.0628	0.0657	0.0683	0.0705	0.0725	0.0743	0.0759
0.06	0.0101	0.0188	0.0266	0.0335	0.0398	0.0509	0.0602	0.0684	0.0754	0.0817	0.0871	0.0920	0.0963	0.1001	0.1035	0.1065	0.1091	0.1115
0.08	0.0125	0.0236	0.0335	0.0425	0.0508	0.0652	0.0776	0.0884	0.0978	0.1060	0.1133	0.1197	0.1254	0.1305	0.1350	0.1389	0.1425	0.1456
0.10	0.0146	0.0278	0.0398	0.0508	0.0608	0.0786	0.0939	0.1072	0.1188	0.1290	0.1381	0.1461	0.1532	0.1595	0.1650	0.1700	0.1744	0.1783
0.14	0.0184	0.0353	0.0509	0.0652	0.0786	0.1025	0.1232	0.1414	0.1573	0.1714	0.1839	0.1941	0.2048	0.2135	0.2212	0.2281	0.2343	0.2397
0.18	0.0216	0.0416	0.0602	0.0776	0.0939	0.1232	0.1490	0.1716	0.1916	0.2094	0.2251	0.2391	0.2515	0.2626	0.2724	0.2812	0.2890	0.2959
0.22	0.0243	0.0470	0.0684	0.0884	0.1072	0.1414	0.1716	0.1984	0.2222	0.2433	0.2621	0.2789	0.2938	0.3071	0.3189	0.3295	0.3389	0.3472
0.26	0.0267	0.0518	0.0754	0.0978	0.1188	0.1573	0.1916	0.2222	0.2494	0.2737	0.2954	0.3147	0.3320	0.3474	0.3612	0.3735	0.3844	0.3941
0.30	0.0288	0.0559	0.0817	0.1060	0.1290	0.1714	0.1094	0.2433	0.2737	0.3009	0.3252	0.3470	0.3665	0.3839	0.3995	0.4134	0.4257	0.4368
0.34	0.0306	0.0596	0.0871	0.1133	0.1391	0.1839	0.2251	0.2621	0.2954	0.3252	0.3520	0.3761	0.3976	0.4169	0.4341	0.4495	0.4633	0.4756
0.38	0.0322	0.0628	0.0920	0.1197	0.1461	0.1949	0.2391	0.2789	0.3147	0.3470	0.3761	0.4022	0.4256	0.4466	0.4654	0.4823	0.4973	0.5108
0.42	0.0377	0.0657	0.0963	0.1254	0.1532	0.2048	0.2515	0.2938	0.3320	0.3665	0.3976	0.4256	0.4508	0.4734	0.4937	0.5119	0.5281	0.5427
0.46	0.0349	0.0683	0.1001	0.1305	0.1595	0.2135	0.2626	0.3071	0.3474	0.3839	0.4169	0.4466	0.4734	0.4975	0.5161	0.5385	0.5559	0.5715
0.50	0.0361	0.0705	0.1035	0.1350	0.1650	0.2212	0.2724	0.3189	0.3612	0.4104	0.4553	0.4962	0.5334	0.5672	0.5977	0.6254	0.6503	0.6728
0.54	0.0371	0.0725	0.1065	0.1389	0.1700	0.2281	0.2812	0.3295	0.3735	0.4134	0.4495	0.4823	0.5119	0.5385	0.5626	0.5842	0.6036	0.6209
0.58	0.0380	0.0743	0.1091	0.1425	0.1744	0.2343	0.2890	0.3389	0.3844	0.4257	0.4633	0.4973	0.5281	0.5559	0.5810	0.6036	0.6238	0.6420
0.62	0.0387	0.0759	0.1115	0.1456	0.1783	0.2397	0.2959	0.3472	0.3941	0.4368	0.4756	0.5108	0.5427	0.5715	0.5975	0.6209	0.6420	0.6609
0.66	0.0394	0.0773	0.1136	0.1484	0.1718	0.2445	0.3020	0.3547	0.4027	0.4466	0.4865	0.5227	0.5556	0.5854	0.6122	0.6364	0.6582	0.6778
0.70	0.0401	0.0785	0.1154	0.1509	0.1849	0.2488	0.3075	0.3612	0.4104	0.4553	0.4962	0.5334	0.5672	0.5977	0.6254	0.6503	0.6728	0.6928
0.74	0.0406	0.0796	0.1117	0.1531	0.1876	0.2526	0.3123	0.3671	0.4172	0.4630	0.5048	0.5429	0.5774	0.6087	0.6371	0.6627	0.6857	0.7064
0.78	0.0411	0.0806	0.1185	0.1550	0.1900	0.2559	0.3166	0.3722	0.4232	0.4699	0.5125	0.5513	0.5865	0.6185	0.6475	0.6736	0.6972	0.7184
0.82	0.0415	0.0814	0.1198	0.1567	0.1921	0.2589	0.3203	0.3768	0.4286	0.4760	0.5192	0.5587	0.5946	0.6274	0.6567	0.6823	0.7074	0.7291
0.86	0.0419	0.0822	0.1209	0.1582	0.1940	0.2615	0.3237	0.3808	0.4333	0.4813	0.5252	0.5653	0.6017	0.6348	0.6648	0.6920	0.7165	0.7386
0.90	0.0422	0.0828	0.1219	0.1595	0.1957	0.2638	0.3266	0.3844	0.4374	0.4860	0.5305	0.5711	0.6086	0.6416	0.6721	0.6996	0.7245	0.7469
0.94	0.0425	0.0834	0.1228	0.1607	0.1971	0.2658	0.3292	0.3875	0.4411	0.4902	0.5351	0.5762	0.6136	0.6476	0.6784	0.7063	0.7316	0.7543
0.98	0.0428	0.0839	0.1236	0.1617	0.1984	0.2676	0.3314	0.3902	0.4442	0.4938	0.5392	0.5807	0.6184	0.6528	0.6840	0.7123	0.7378	0.7608
1.00	0.0429	0.0842	0.1239	0.1622	0.1990	0.2684	0.3324	0.3914	0.4457	0.4955	0.5410	0.5827	0.6206	0.6557	0.6865	0.7150	0.7406	0.7638
1.20	0.0437	0.0858	0.1263	0.1654	0.2030	0.2740	0.3396	0.4001	0.4558	0.5070	0.5540	0.5969	0.6362	0.6719	0.7044	0.7339	0.7605	0.7846
1.40	0.0441	0.0866	0.1275	0.1669	0.2049	0.2767	0.3431	0.4043	0.4608	0.5127	0.5603	0.6039	0.6438	0.6801	0.7132	0.7432	0.7704	0.7949
1.80	0.0444	0.0871	0.1283	0.1680	0.2062	0.2785	0.3454	0.4071	0.4641	0.5165	0.5645	0.6086	0.6489	0.6856	0.7190	0.7494	0.7769	0.8018
2.00	0.0444	0.0871	0.1284	0.1681	0.2064	0.2787	0.3457	0.4075	0.4645	0.5169	0.5651	0.6092	0.6495	0.6863	0.7198	0.7502	0.7778	0.8027
2.20	0.0444	0.0872	0.1284	0.1682	0.2065	0.2788	0.3458	0.4076	0.4646	0.5171	0.5653	0.6094	0.6497	0.6865	0.7200	0.7505	0.7781	0.8030
2.50	0.0444	0.0872	0.1284	0.1682	0.2065	0.2788	0.3458	0.4077	0.4647	0.5172	0.5653	0.6095	0.6498	0.6867	0.7202	0.7506	0.7782	0.8032
3.00	0.0444	0.0872	0.1284	0.1682	0.2065	0.2789	0.3458	0.4077	0.4647	0.5172	0.5654	0.6095	0.6499	0.6867	0.7202	0.7506	0.7782	0.8032

Fonte: Bouwer in Mays, 1999

**Tabela 48.3- continuação-Valores de de  $\alpha$  e  $\beta$  conforme função de erro**

$\alpha \backslash \beta$	0.62	0.66	0.70	0.74	0.78	0.82	0.86	0.90	0.94	0.98	1.00	1.20	1.40	1.80	2.00	2.20	2.50	3.00
0.02	0.0387	0.0394	0.0401	0.0406	0.0411	0.0415	0.0419	0.0422	0.0425	0.0428	0.0429	0.0437	0.0441	0.0444	0.0444	0.0444	0.0444	0.0444
0.04	0.0759	0.0773	0.0785	0.0796	0.0806	0.0814	0.0822	0.0828	0.0834	0.0839	0.0842	0.0848	0.0858	0.0866	0.0871	0.0871	0.0872	0.0882
0.06	0.1115	0.1136	0.1154	0.1171	0.1185	0.1198	0.1209	0.1219	0.1228	0.1233	0.1239	0.1263	0.1275	0.1283	0.1284	0.1284	0.1284	0.1284
0.08	0.1456	0.1484	0.1509	0.1531	0.1550	0.1567	0.1582	0.1595	0.1606	0.1617	0.1622	0.1654	0.1669	0.1680	0.1681	0.1682	0.1682	0.1682
0.10	0.1783	0.1818	0.1849	0.1876	0.1900	0.1921	0.1940	0.1957	0.1971	0.1984	0.1990	0.2030	0.2049	0.2062	0.2064	0.2065	0.2065	0.2065
0.14	0.2397	0.2445	0.2488	0.2526	0.2559	0.2589	0.2615	0.2638	0.2658	0.2676	0.2684	0.2740	0.2777	0.2785	0.2787	0.2788	0.2788	0.2788
0.18	0.2959	0.3020	0.3075	0.3123	0.3166	0.3203	0.3237	0.3266	0.3292	0.3314	0.3324	0.3396	0.3431	0.3454	0.3457	0.3454	0.3454	0.3454
0.22	0.3472	0.3547	0.3612	0.3671	0.3722	0.3768	0.3808	0.3844	0.3875	0.3902	0.3914	0.4001	0.4043	0.4071	0.4075	0.4076	0.4077	0.4077
0.26	0.3941	0.4027	0.4104	0.4172	0.4232	0.4286	0.4333	0.4374	0.4411	0.4442	0.4457	0.4558	0.4608	0.4641	0.4645	0.4646	0.4647	0.4647
0.30	0.4368	0.4466	0.4553	0.4630	0.4699	0.4760	0.4813	0.4860	0.4902	0.4938	0.4955	0.5070	0.5127	0.5165	0.5159	0.5171	0.5172	0.5172
0.34	0.4756	0.4865	0.4962	0.5048	0.5125	0.5192	0.5252	0.5305	0.5351	0.5392	0.5410	0.5540	0.5603	0.5645	0.5651	0.5653	0.5653	0.5654
0.38	0.5108	0.5227	0.5334	0.5429	0.5523	0.5587	0.5633	0.5711	0.5762	0.5807	0.5827	0.5969	0.6039	0.6086	0.6092	0.6094	0.6095	0.6095
0.42	0.5427	0.5556	0.5672	0.5774	0.5865	0.5946	0.6017	0.6080	0.6136	0.6184	0.6206	0.6362	0.6438	0.6489	0.6495	0.6497	0.6498	0.6499
0.46	0.5715	0.5854	0.5977	0.6087	0.6185	0.6272	0.6348	0.6416	0.6476	0.6528	0.6552	0.6719	0.6801	0.6856	0.6863	0.6865	0.6867	0.6867
0.50	0.5975	0.6122	0.6254	0.6371	0.6475	0.6567	0.6648	0.6721	0.6784	0.6840	0.6865	0.7044	0.7132	0.7190	0.7198	0.7200	0.7202	0.7202
0.54	0.6209	0.6364	0.6503	0.6627	0.6736	0.6833	0.6920	0.6996	0.7063	0.7123	0.7150	0.7379	0.7432	0.7494	0.7502	0.7505	0.7506	0.7506
0.58	0.6420	0.6482	0.6528	0.6572	0.6617	0.6662	0.6707	0.6752	0.6797	0.6842	0.6887	0.7064	0.7117	0.7179	0.7187	0.7188	0.7188	0.7188
0.62	0.6609	0.6678	0.6729	0.6774	0.6819	0.6864	0.6909	0.6954	0.6999	0.7044	0.7089	0.7266	0.7319	0.7381	0.7389	0.7390	0.7390	0.7390
0.66	0.6778	0.6853	0.6910	0.6957	0.7004	0.7051	0.7098	0.7145	0.7192	0.7239	0.7286	0.7463	0.7516	0.7578	0.7586	0.7587	0.7587	0.7587
0.70	0.6929	0.7100	0.7272	0.7447	0.7546	0.7660	0.7762	0.7852	0.7932	0.8002	0.							

#### Exemplo 48.4

Dimensionar um reservatório de infiltração *on line* com bacia de área de  $3.000\text{m}^2$  (0,3ha), com área impermeável do terreno  $AI=50\%$ ,  $K=13\text{mm/h}=0,30\text{m/dia}$ , porosidade efetiva igual a 0,1, tempo de concentração de  $t_c=10\text{min}$ , usando a equação de chuva de Natal, RN para  $Tr=5\text{anos}$  considerando a que o lençol freático está a 5,00 de profundidade e que a espessura do lençol freático é de 7,00m.

O reservatorio foi dimensionado com volume  $25,2\text{m}^3$  e dimensões 6,4m x 12,8m com 0,31m de profundidade.

Vamos considerar que a espessura do aquífero seja  **$b=7,00\text{m}$**  e  $K=0,30\text{m/dia}=13\text{mm/h}$  e porosidade efetiva  $S_y=0,10$ .

Queremos infiltrar em dois dias a altura de 0,31m, que nos dará  $0,31/2=0,16\text{m/dia}$ , ou  $25,2/2=12,6\text{m}^3/\text{dia}$ .

Portanto:

$$Q= 12,6\text{m}^3/\text{dia}$$

$$Kt=0,30\text{m/dia}$$

$$W=6,40\text{m (largura)}$$

$$L=12,8\text{m (comprimento)}$$

A taxa de infiltração será:

$$N= Q/ (L \times W)$$

$$N= 12,6/ (12,8 \times 6,4)=0,15 \text{ m/dia}$$

O parâmetro  $v$  será:

$$v= K \times b / S_y= 0,30 \times 7,0 / 0,1 = 21 \text{ m}^2/\text{dia}$$

Hantush, 1967 in Chin, 2000 apresenta a equação:

$$h_m^2(t) = h_i^2 + (2Nxv \times t/K) \times S^* (W/(8vt)^{0,5}, L/(8vt)^{0,5})$$

$$h_m^2(t) = 7^2 + (2 \times 0,15 \times 21 \times t/0,30) \times S^* (6,4 / (8 \times 21 t)^{0,5}, 12,8 / (8 \times 21 t)^{0,5})$$

$$h_m^2(t) = 49 + 21 \times t \times S^* (0,49/t^{0,5}, 0,99/t^{0,5})$$

Para  **$t= 2 \text{ dia}$**  teremos:

$$h_m^2(t) = 49 + 21 \times 2\text{dia} \times S^* (0,49/t^{0,5}, 0,99/t^{0,5})$$

$$h_m^2(t) = 49 + 42 \times S^* (0,49/2^{0,5}, 0,99/2^{0,5})$$

$$h_m^2(t) = 49 + 42 \times S^* (0,28, 0,70)$$

$$\alpha = 0,28$$

$$\beta = 0,70$$

Entrando na Tabela (48.3) com os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  e fazendo as *interpolações* achamos o valor **0,43**.

$$h_m^2(t) = 49 + 42 \times 2\text{dia} \times 0,43 = 49 + 36,12 = 85,12\text{m}$$

$$h_m = 9,22\text{m}$$

Portanto, a espessura do aquífero com a recarga será de 9,22m e como antes a espessura era de 7,00m, então houve alteamento do aquífero de 2,22m

Portanto, o aquífero que tinha 7m passou para 9,22m, isto é, subiu 2,22m, que não apresenta perigo pois, existe do reservatório até o nível do lençol freático a distância de 1,20m. Do exemplo podemos compreender a necessidade de que a distancia do fundo do reservatório de infiltração até o lençol freático seja no mínimo 1,20m.



#### 48.8 Poços secos (*dry wells*) executados na zona vadosa para infiltração de esgoto tratado (terciário).

Os primeiros poços secos executados na zona vadosa foram feitos em 1990 no estado do Arizona na cidade de Scottsdale e funcionam muito bem até hoje. Ainda o uso dos *dry wells* é muito limitado.

A vida útil de um *dry well* é de 20 anos conforme Metcalf e Eddy, 2007.

O *dry well* pode ser usado para infiltração de águas pluviais ou de esgotos sanitários após o tratamento terciário. Quando o *dry well* for usado para infiltração de esgotos sanitários devem ser tomados alguns cuidados.

É importantíssimo para o bom funcionamento de um *dry well* é que os esgotos sejam tratados pelo sistema MBR (*membrane bioreactors*) que é o uso de membranas junto com o lodo ativado e isto evitará o *clogging* (entupimento).

Os poços secos executados na zona vadosa possuem diâmetros de 1,00m a 2,00m e com profundidades de 10m a 50m, sempre situados acima do lençol freático para permitir a infiltração das águas.

A construção é feita por métodos manuais ou mecânicos de escavação e o poço é preenchido com agregados de diâmetros grandes e pequenos.

A causa do *clogging* conforme Metcalf e Eddy, 2007 são basicamente três:

- *Clogging* devido a ação biológica: o uso de cloração de 2mg/L a 5mg/L evitará o problema.
- *Clogging* devido a entrada de ar: é necessário deixar um aerador de cerca de 75mm e que os efluentes sejam lançados no fundo do poço através de um tubo de plástico com cerca de 450mm de diâmetro.
- *Clogging* devido ao sólido total em suspensão: o uso de tratamento como o MBR resolverá o problema.

Os *dry well* geralmente são feitos em locais onde no solo temos menos que 20% de argila ou que tenha menos de 40% de argila e silte juntos.

A declividade do terreno não pode passar de 15%.

Se existe um hotspot, isto é, um posto de gasolina, oficina mecânica ou local de potencial contaminação do aquífero subterrâneo, não deverá ser feita a recarga.

Deve ficar no mínimo a 3,00m de algum prédio.

É recomendado que o tempo de infiltração da água no solo seja de no máximo 48h.

Deve ser feito estudo para achar a condutividade hidráulica  $K$  na profundidade do *dry well* sendo uma amostra para cada 500m<sup>2</sup> e no mínimo duas amostras.

### 75.1 Dry well em três dimensões

Vamos explicar como se acha a profundidade  $h_{max}$  de um dry well em 3D baseado no The Suds Manual da Ciria, 2007.

Pode ser aplicado a soakway, poço de infiltração, poço de infiltração retangular, poço de infiltração circular.

O objetivo é acharmos a profundidade máxima  $h_{max}$  que podemos ter, fornecendo-se as dimensões do dry well, a condutividade hidráulica  $K$  e demais dados locais

Conforme Ciria, 2007 o período de retorno recomendado para estudos do dry well é de 10anos, o que significa que há probabilidade de 10% do sistema não atender a demanda.

O uso do dry well está na propriedade individual e observamos que a condutividade hidráulica é um grande fator de insucesso de tais sistemas se os dados não forem coletados da melhor maneira possível.

Enfatizamos ainda a necessidade de um pre-tratamento para evitarmos problemas nos dry wells.

Conforme Ciria, 2007 a equação básica para acharmos a profundidade máxima da água em um sistema de 3D é:

$$h_{max} = a [ \exp(-b.D) - 1 ]$$

Sendo:

$h_{max}$  = altura máxima da profundidade da água, devendo-se descontar a parte não molhada (m)

$D$  = duração da chuva em horas

$$a = A_b / P - i - A_D / P \cdot k$$

$$b = P \cdot k / (n \cdot A_b)$$

Sendo:

$a$  = coeficiente auxiliar 1

$A_b$  = área da base do dry well retangular ou circular (m<sup>2</sup>)

$P$  = perímetro do dry well retangular (m)

$i$  = intensidade da chuva (mm/h) para duração  $D$  e período de retorno  $T_r=10$ anos

$A_D$  = área a ser drenada (m<sup>2</sup>). É a área total impermeável a ser drenada.

$k$  = condutividade hidráulica do solo (mm/h)

$b$  = coeficiente auxiliar 2

$n$  = porosidade efetiva. Se houve pedra britada adotar  $n=0,35$ . Caso não haja pedra britada usamos  $n=1$ , pois a infiltração é feita diretamente no solo do fundo ou das paredes.

$A_b$  = área da base do dry well retangular ou circular (m<sup>2</sup>)

### Exemplo 75.1

Dada uma área com 890m<sup>2</sup>, condutividade hidráulica K=3,5mm/h, AI= 0,57 (57%) e vamos usar a equação de chuva de Natal obtida pela Universidade de Viçosa por interpolação de acordo com o programa Pluvio 2.1.

Adotamos o período de retorno Tr=10anos.

A equação de chuva a ser usada será:

$$I = 586,66 \times Tr^{0,26} / (t+15)^{0,68}$$

Sendo:

I= intensidade de chuva (mm/h)

Tr= período de retorno (anos). Adotado Tr=10anos

t=tempo de duração da chuva (min)

Como a maioria dos problemas em hidráulica, o cálculo é feito por tentativas variando a duração da chuva de hora em hora até atingirmos 24h.

Foi suposta dry well retangular com 2,00m de largura por 15m de comprimento.

Calcula-se h<sub>max</sub> para a equação em 3D do Cirra, 2007 e verifica-se se a profundidade é aceitável e verifica-se também o tempo de esvaziamento da metade do volume do dry well é menor que 24h. Observemos que a CIRIA, 2007 recomenda o esvaziamento da metade do volume em menos que 24h..

Tr (anos)	Duração chuva	Tc (min)	I (mm/h)	P	Area total	C	AD	V(m3)	k (mm/h)	K(m/dia)
10	1	60	56,7	56,7	890,0	0,57	507,3	28,7	3,5	0,084
10	2	120	38,0	76,0	890,0	0,57	507,3	38,6	3,5	0,084
10	3	180	29,6	88,8	890,0	0,57	507,3	45,0	3,5	0,084
10	4	240	24,7	98,6	890,0	0,57	507,3	50,0	3,5	0,084
10	5	300	21,4	106,8	890,0	0,57	507,3	54,2	3,5	0,084
10	6	360	19,0	113,3	890,0	0,57	507,3	57,7	3,5	0,084
10	7	420	17,1	120,0	890,0	0,57	507,3	60,9	3,5	0,084
10	8	480	15,7	125,6	890,0	0,57	507,3	63,7	3,5	0,084
10	9	540	14,5	130,8	890,0	0,57	507,3	66,3	3,5	0,084
10	10	600	13,6	135,5	890,0	0,57	507,3	68,7	3,5	0,084
10	11	660	12,7	139,9	890,0	0,57	507,3	71,0	3,5	0,084
10	12	720	12,0	144,0	890,0	0,57	507,3	73,1	3,5	0,084
10	13	780	11,4	147,9	890,0	0,57	507,3	75,0	3,5	0,084
10	14	840	10,8	151,6	890,0	0,57	507,3	76,9	3,5	0,084
10	15	900	10,3	155,1	890,0	0,57	507,3	78,7	3,5	0,084
10	16	960	9,9	158,5	890,0	0,57	507,3	80,4	3,5	0,084
10	17	1020	9,5	161,7	890,0	0,57	507,3	82,0	3,5	0,084
10	18	1080	9,2	164,8	890,0	0,57	507,3	83,6	3,5	0,084
10	19	1140	8,8	167,7	890,0	0,57	507,3	85,1	3,5	0,084
10	20	1200	8,5	170,6	890,0	0,57	507,3	86,5	3,5	0,084
10	21	1260	8,3	173,3	890,0	0,57	507,3	87,9	3,5	0,084

10	22	1320	8,0	176,0	890,0	0,57	507,3	89,3	3,5	0,084
10	23	1380	7,8	178,6	890,0	0,57	507,3	90,6	3,5	0,084
10	24	1440	7,5	181,1	890,0	0,57	507,3	91,9	3,5	0,084

Largura	Comprimento	Perimetro	Ab	Porosidade n	a	b	hmax(m)	m3/dia	horas infiltração
2	15	34	30	1	-240,70	0,004	0,95	84,0	8,2
2	15	34	30	1	-161,10	0,004	1,27	112,3	8,2
2	15	34	30	1	-125,27	0,004	1,48	130,7	8,3
2	15	34	30	1	-104,23	0,004	1,64	144,7	8,3
2	15	34	30	1	-90,16	0,004	1,77	156,2	8,3
2	15	34	30	1	-79,98	0,004	1,88	165,9	8,4
2	15	34	30	1	-72,22	0,004	1,98	174,4	8,4
2	15	34	30	1	-66,07	0,004	2,06	182,0	8,4
2	15	34	30	1	-61,06	0,004	2,14	188,9	8,4
2	15	34	30	1	-56,88	0,004	2,21	195,1	8,5
2	15	34	30	1	-53,34	0,004	2,28	200,9	8,5
2	15	34	30	1	-50,29	0,004	2,34	206,2	8,5
2	15	34	30	1	-47,63	0,004	2,39	211,1	8,5
2	15	34	30	1	-45,29	0,004	2,45	215,8	8,6
2	15	34	30	1	-43,21	0,004	2,50	220,1	8,6
2	15	34	30	1	-41,34	0,004	2,54	224,2	8,6
2	15	34	30	1	-39,66	0,004	2,59	228,1	8,6
2	15	34	30	1	-38,14	0,004	2,63	231,8	8,7
2	15	34	30	1	-36,75	0,004	2,67	235,3	8,7
2	15	34	30	1	-35,48	0,004	2,71	238,6	8,7
2	15	34	30	1	-34,30	0,004	2,74	241,8	8,7
2	15	34	30	1	-33,22	0,004	2,78	244,8	8,8
2	15	34	30	1	-32,22	0,004	2,81	247,8	8,8
2	15	34	30	1	-31,28	0,004	2,84	250,5	8,80

### Equação de Zangar

A taxa de recarga na zona vadosa pode ser calculada usando a Equação de Zangar conforme Bouwer, 2002. Na concepção de Zangar, 1953 salienta que o escoamento da água no dry Wall é **no fundo, mas também nas paredes.**

$$Q = (2 \pi K L_w^2) / [\ln(2L_w/r_w) - 1]$$

Sendo:

Q= taxa de recarga (m<sup>3</sup>/dia)

K= condutividade hidráulica (m/dia) obtido em testes.

L<sub>w</sub>= profundidade da água no poço (m)

r<sub>w</sub>= raio do poço (m)

ln= logaritmo neperiano.

L<sub>w</sub> > 10 x r<sub>w</sub>

#### Exemplo 48.7

Dimensionar a taxa de recarga em m<sup>3</sup>/dia de um *dry well* com diâmetro de 0,30m e profundidade de 8m em local com solo com condutividade hidráulica de 25mm/h.

Vamos usar a equação de Zangar:

$$Q = (2 \pi K L_w^2) / [\ln(2L_w/r_w) - 1]$$

K= 25mm/h= 0,6m/dia

L<sub>w</sub>= 8,00m

r<sub>w</sub>= 0,30/2= 0,15m

Q= (2 π 0,6x 8<sup>2</sup>) / [ln(2x8/0,15) -1 ]=21m<sup>3</sup>/dia

Verificação: 10 x r<sub>w</sub>= 10 x 0,15= 1,5m

O comprimento L<sub>w</sub> tem que ser maior que 10r<sub>w</sub> e, portanto está OK.

#### Exemplo 48.8

Dimensionar a taxa de recarga em m<sup>3</sup>/dia de um poço de infiltração com 6,00m de diâmetro e profundidade de 3,00m sendo a condutividade hidráulica K=25m/h.

Primeiramente verifiquemos se podemos usar ou não a equação de Zangar.

10 x r<sub>w</sub>= 10 x (6,00/2)= 10 x 3= 30m

L<sub>w</sub>= 3,00m

Como L<sub>w</sub> não é maior que 10 vezes o raio, então não se aplica a equação de Zangar.

Usaremos então a equação de Darcy

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

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

Sendo:

Q= vazão constante que passa pelo cilindro (m<sup>3</sup>/s; m<sup>3</sup>/dia);

h<sub>1</sub>= carga hidráulica no piezômetro 1 (m) e

h<sub>2</sub>= carga hidráulica no piezômetro 2 (m) e

z<sub>1</sub>= cota do ponto P<sub>1</sub> (m)

z<sub>2</sub>= cota do ponto P<sub>2</sub> (m)

L= distância entre os piezômetros 1 e 2

A= área da seção transversal do cilindro (m<sup>2</sup>)

$\Delta H$ = variação da carga hidráulica entre os piezômetros 1 e 2  
 $K$ = condutividade hidráulica (m/s; m/h; mm/h; m/dia)  
 $G$ = gradiente hidráulico =  $(h_1-h_2)/L$

O valor de  $G= 1$

$$Q= K \times A$$

$K=25\text{mm/h}=0,6\text{m/dia}$

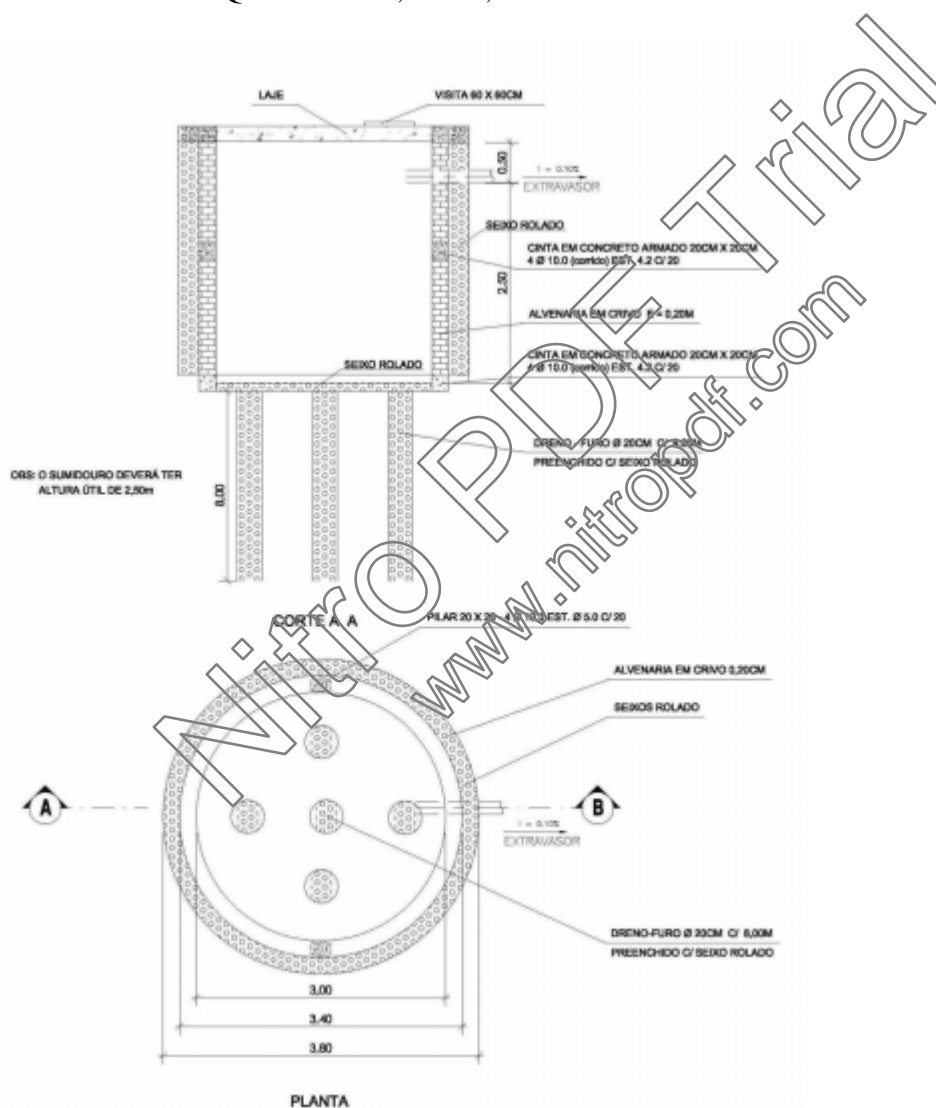
$A$ =area da superfície e do fundo

Area do fundo=  $\text{PI} \times D^2/4= 3,1416 \times 6^2/4= 28,3\text{m}^2$

Area lateral do poço=  $\text{PI} \times D \times h= 3,1416 \times 6,00 \times 3,00= 56,5\text{m}^2$

Area total=  $28,3\text{m}^2 + 56,5\text{m}^2= 84,8\text{m}^2$

$$Q= K \times A = 0,6 \times 84,8= 51\text{m}^3/\text{dia}$$



**Figura 48.20- Figura de poço de infiltração**  
Fonte: Plano Diretor de Manejo de águas pluviais de Natal, 2009

#### **48.9- Dimensionamento do sistema dry well situado em zona vadosa, não saturada e acima do lençol freático.**

O nosso objetivo é infiltrar águas pluviais na região vadosa do solo, isto é, na região não saturada ou até atingirmos a região saturada.

A fórmula só é válida quando o comprimento  $L_w$  for maior que 10 x raio do poço. A distância entre um poço e outro é no mínimo de cinco diâmetros.

##### **Concepção**

A ideia é termos um reservatório de pedras britadas de aproximadamente 0,20m de altura e sobre estas pedras vai o geotêxtil. Sobre o geotêxtil vai terra e a grama propriamente dita. A chuva caindo sobre o gramado se infiltra rapidamente para o reservatório de pedra que encaminhará a água para o dry well e o mesmo levará a água para ser infiltrada.

Haverá uma malha de furos de brocas perfurados manualmente, dimensionados para que não haja estagnação da água de chuva.

A concepção do projeto é fazer brocas manuais com profundidade de até 6,00m e diâmetro que varia de 0,15m a 0,30m em solo acima do lençol freático.

No furo perfurado pelas brocas colocaremos tubos de PVC perfurado com furos ou ranhuras até atingir o fundo conforme modelo de Zangar, 1953..

Dentro do tubo jogaremos um geotêxtil (bidim) e lançaremos mistura de pedra 1 e 2.

##### **Chuva**

Vamos usar duração de chuva de 1h para períodos de retorno de 5anos, 25anos e 100anos. A sugestão é que a água de chuva se infiltre rapidamente e se acumule no reservatório de pedra britada.

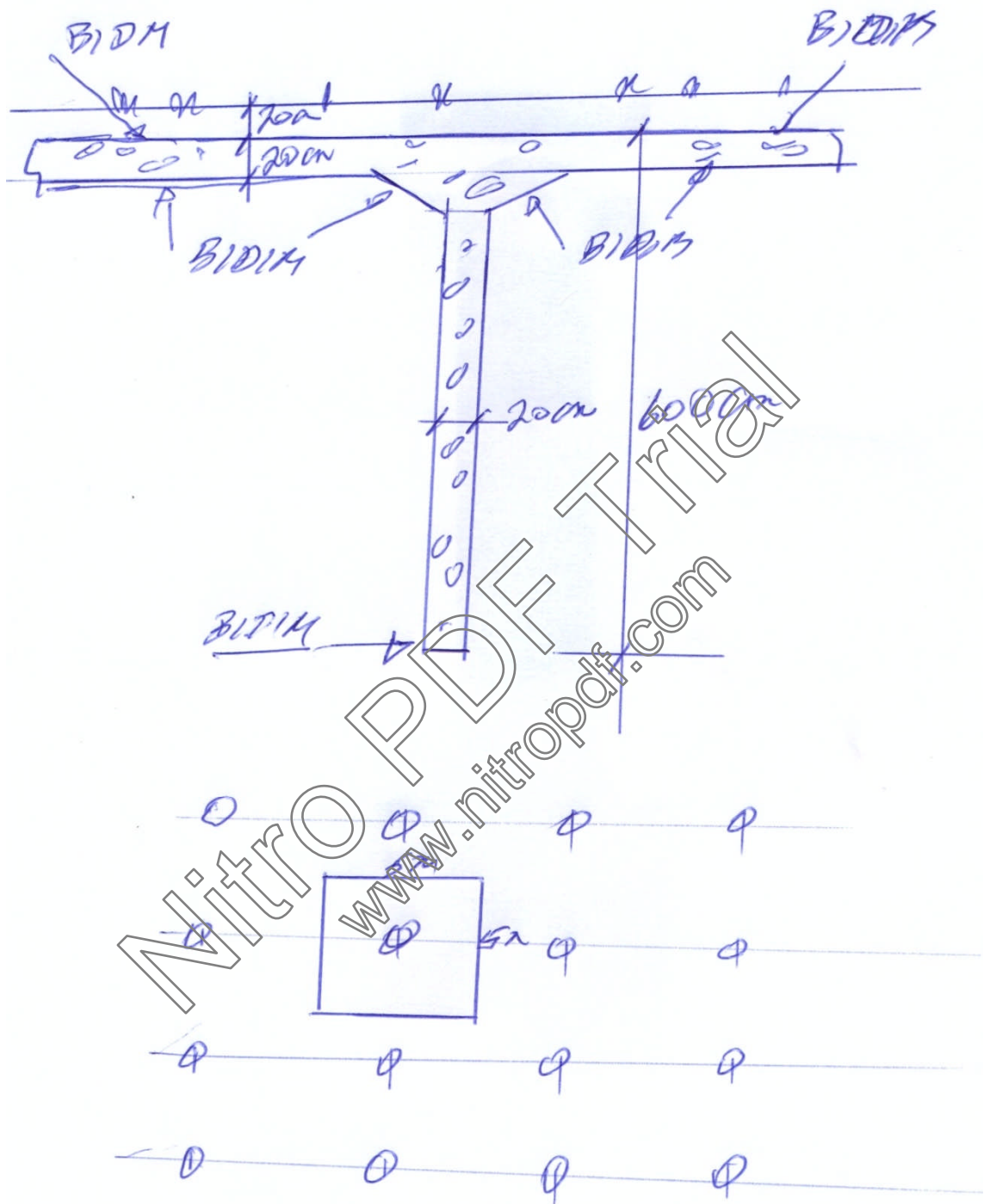


Figura 48.21- Esquema do dry well



### Dimensionamento do sistema dry well situado em zona vadosa, não saturada e acima do lençol freático.

Vamos chamar a precipitação  $P$  (m) sobre a área  $A$  ( $m^2$ ) num determinado tempo  $D$  (h).

O equilíbrio de volume será o volume da precipitação num determinado tempo que será igual ao volume armazenado no reservatório de britada e mais o volume infiltrado no *dry well* calculado como equação de Zangar.

$$V_c = V_R + V_{dry}$$

$V_c$  = volume da precipitação num determinado tempo ( $m^3$ )

$V_R$  = volume de água armazenada nas pedras britadas ( $m^3$ )

$V_{dry}$  = volume diário a ser infiltrado no *dry well* ( $m^3$ /dia)

$$V_c = P \cdot A \cdot D$$

Sendo:

$V_c$  = volume precipitado na área  $A$  em determinado tempo  $D$  em  $m^3$ .

$D$  = duração da chuva em horas

$A$  = área que levará água para o reservatório de pedra britada e que abastecerá o *dry well* em  $m^2$

$P$  = precipitação num determinado tempo  $D$  (m)

$$V_R = h \cdot n \cdot A$$

Sendo:

$V_R$  = volume armazenado no reservatório de pedra britada ( $m^3$ )

$h$  = altura do reservatório de pedra britada (m)

$n$  = porosidade efetiva das britas no reservatório (adimensional)

O volume no *dry well*  $V_{dry}$  será igual a vazão diária infiltrada pelo mesmo com a equação de Zangar.

$$V_{dry} = Q$$

$$Q = (2 \pi K L_w^2) / [ \ln(2L_w/r_w) - 1 ]$$

Sendo:

$V_{dry}$  = volume que se infiltra no *dry well* ( $m^3$ ) em um dia

$Q$  = taxa de recarga ( $m^3$ /dia)

$K$  = condutividade hidráulica (m/dia) obtido em testes.

$L_w$  = profundidade da água no poço (m)

$r_w$  = raio do poço (m)

$\ln$  = logaritmo neperiano.

Condição proposta por Zangar, 1953 pois teremos menos erros.  $L_w \geq 10 \times r_w$

A equação original de Zangar, 1953 aparece o seno hiperbólico que dá o mesmo resultado da equação acima com logaritmo neperiano. Observar que temos que achar a função inversa do seno hiperbólico que é  $\operatorname{arsinh}$  em planilha Excel.

$$Q = (2 \pi K L_w^2) / [ \operatorname{arsinh}^{-1}(L_w/r_w) - 1 ]$$

Q= volume (m<sup>3</sup>/dia)

n= porosidade efetiva=0,35

h= altura do reservatório de pedra britada (m). Varia de 0,15m 0,30m.

A= área de seção circular de lado= PI x b<sup>2</sup>/4

b= diametro da area circular (m)

D= duração da chuva (h). Geralmente D=1h.

P= precipitação da região para 1h de duração e Tr=5anos

### Raio b

O raio b proposto por Zangar, 1953 é dado pela equação:

$$K \cdot \text{PI} \times b^2 = Q$$

$$b = [Q / (K \times 3,1416)]^{0,5}$$

Sendo:

b= raio do círculo de abrangência do dry well (m)

Q= vazão de infiltração (m<sup>3</sup>/dia)

K= coeficiente de permeabilidade (m<sup>3</sup>/dia)

Zangar, 1953 sugere a equação:

$$b = Lw \times (2 / [\text{senh}^{-1} (Lw/rw) - 1])$$

### Exemplo 48.9

Calcular a taxa de recarga de um poço seco com 50m de profundidade, raio de 1,00m e condutividade hidráulica de 0,48m/dia

$$Q = (2 \pi K Lw^2) / [\ln(2Lw/rw) - 1]$$
$$Q = (2 \pi \times 0,48 \times 50^2) / [\ln(2 \times 50/1,00) - 1] = 2091 \text{m}^3/\text{dia}$$

**Exemplo 48.10** Calcular a taxa de recarga de um poço seco com 2,5m de profundidade, raio de 0,30m e condutividade hidráulica de 0,0288m/dia (20mm/h= 1,2mm/h=28,8 L/dia x m<sup>2</sup>).

$$Q = (2 \pi K Lw^2) / [\ln(2Lw/rw) - 1]$$
$$Q = (2 \pi \times 0,0288 \times 2,5^2) / [\ln(2 \times 2,5/0,30) - 1] = 0,45 \text{m}^3/\text{dia}$$

### Exemplo 48.11

Dado Q= 0,45m<sup>3</sup>/dia

K= 0,0288m/dia =1,2mm/h= 28,8 L/m<sup>2</sup> x dia

$$b = [Q / (K \times 3,1416)]^{0,5}$$

$$b = [0,45 / (0,0288 \times 3,1416)]^{0,5}$$

b= 2,23 m

Diâmetro do círculo 2 x b= 2 x 2,23m= 4,47m

Area do círculo (m<sup>2</sup>)= A=PI x 4,47<sup>2</sup>/4= 15,67m<sup>2</sup>

Volume de chuva (m<sup>3</sup>)= P x D= (51,8mm/1000) x 1,00h= 0,81m<sup>3</sup>

Volume no reservatório de brita britada (m<sup>3</sup>)= h x n x A=0,10 x 0,35 x 15,67=0,55m<sup>3</sup>

Volume diário infiltrado no dry well (m<sup>3</sup>)= 0,45m<sup>3</sup>

Tempo de esvaziamento (dias) = (Volume de chuva – Volume reservatório de pedra)/ Volume infiltrado no *dry well* =  $(0,81\text{m}^3 - 0,55\text{m}^3) / 0,45\text{m}^3 = 0,58$  dias = 13h < 48h OK

$$b = L_w \times (2 / [\sinh^{-1} (L_w/r_w) - 1])$$

$$b = 2,5 \times (2 / [\sinh^{-1} (2,5/0,15) - 1]) = 1,99\text{m}$$

Portanto, o resultado é muito semelhante ao obtido de  $b=2,23\text{m}$

Metcalf e Eddy, 2007 apresenta outras duas equações devidas a Zangar e citados por Bouwer e Jackson, 1974. As equações são as seguintes:

$$Q = (K \times 2 \times \pi \times L_w^2) / \{ \ln [ L_w/r_w + (L_w^2/r_w^2 - 1)^{0,5} - 1 ] \} \quad \text{para } S_i \gg L$$

Sendo:

K= condutividade hidráulica (m/dia)

Q= vazão ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )

$L_w$ = profundidade da água dentro do *dry well* (m)

Ln= logaritmo neperiano

$r_w$ =raio do poço (m)

$S_i$ = distância do fundo do *dry well* até a área impermeável (m). Observar que não leva em conta o nível do lençol freático conforme se pode ver na Figura (48.16)

Para um **poço de infiltração (dry well) raso** isto é,  $S_i < 2L_w$  então podemos fazer uma simplificação:

$$K = [3 \times Q \times \ln (L_w/r_w)] / [ \pi \times L_w \times (3 \times L_w + 2 \times S_i) ] \quad S_i < (2 \times L_w),$$

$$Q = K \times [ \pi \times L_w \times (3 \times L_w + 2 \times S_i) ] / (3 \ln (L_w/r_w)) \quad S_i < (2 \times L_w),$$

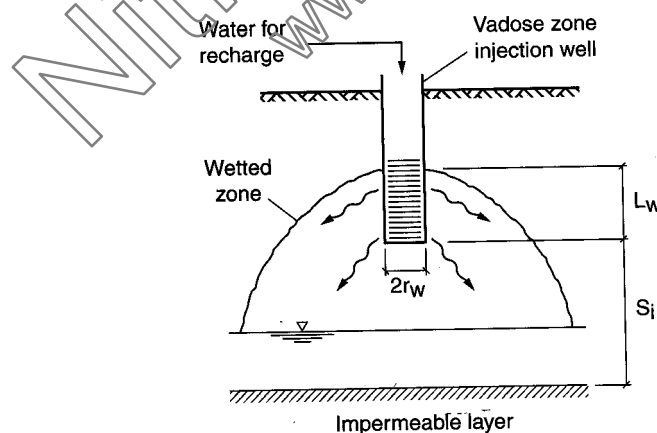


Figura 48.22- Esquema de um poço seco executado na zona vadosa

#### Exemplo 48.12

Dimensionar um *dry well* (poço de infiltração) com diâmetro de 4,00m ( $r_w=4,00/2=2,00$ ), profundidade de  $L_w=3,00$ m e  $K=25$ mm/h= $0,6$ m/dia. Supõe-se que o lençol freático está a 7,00m de profundidade e, portanto o valor de  $S_i=7,0-3,0=4,0$ m usando a equação de Metcalf-Eddy. Ver Figura (48.22).

Verifiquemos primeiramente se obtém as relações  $S_i < 2 \times L_w$

$$2 \times L_w = 2 \times 3 = 6$$

Como  $S_i=4 < 6$  OK.

Nitro PDF Trial  
www.nitropdf.com

#### 48.22 Fórmulas empíricas para a recarga média anual

Possuímos a recarga de vários locais, sendo a mais comum a das chuvas, que é a recarga natural, mas existe a recarga de canal (infiltração), de irrigação e de reservatórios de infiltração.

Na Índia Kumar e Seethpathi, 2002 fizeram uma fórmula empírica com 8% de precisão (para a região) que fornece a recarga das águas das chuvas.

$$Rr = 1,37 (P - 388)^{0,76}$$

Sendo:

Rr= recarga do aquífero subterrâneo devido somente a águas das chuvas (mm/ano)

P=precipitação média anual da estação (mm)

#### Exemplo 48.24

Estimar a recarga devida as chuvas para local com 1500mm.

$$Rr = 1,37 (P - 388)^{0,76}$$

$$Rr = 1,37 (1500 - 388)^{0,76} = 283\text{mm}$$

Também na Índia em 1970 Krishna Rao elaborou as seguintes equações empíricas para P e Rr em milímetros:

**Rr= 0,20 x (P-400)** para áreas com precipitações entre 400mm e 600mm

**Rr= 0,25 x (P-400)** para áreas com precipitações entre 600mm e 1000mm

**Rr= 0,35 x (P-600)** para áreas com precipitações maiores que 1000mm

Sendo:

Rr= recarga devida as chuvas (mm)

P= precipitação (mm)

#### Exemplo 48.25

Estimar a recarga devida as chuvas para local com 1.771mm- Cidade de Campos do Jordão, Estado de São Paulo.

$$Rr = 0,35 x (P - 600) = 0,35 x (1771 - 600) = 410\text{mm} \text{ (Por Meyboom achamos 502mm)}$$

#### 48.23 Bibliografia e livros consultados

- CRITICAL AQUIFER RECHARGE AREAS (CARAS). *Chapter 6: Critical aquifer recharge areas. Executive report- Best available science*, volume I, february, 2004.
- DELLEUR, JACQUES W. *The handbook of groundwater engineering*. 1999. ISBN 0-8493-2698-2.
- FENNESSEY, LARRY. *Hydrologic budgets for development scale areas in Pennsylvania*.
- FENNESSEY, LAWRENCE A. J. et al. *The NRCS curve number, a new look at an old tool*. Villanova University, outubro de 2001.
- McCUEN, RICHARD H. *Hydrologic analysis and design*. 2a ed. Prentice Hall, 1998
- PLANO DIRETOR DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS DE NATAL, RN, 2009
- REICHARDT, KLAUS E TIMM, LUIZ CARLOS. *Solo, planta e atmosfera- conceitos, processos e aplicações*, 2004. Editora Manole.
- ZANGAR, CARL N. *Theory and problems of water percolation*. United States Department of the Interior – Bureau of Reclamation. Denver, Colorado, abril de 1953, 87 páginas.
- CIRIA, 2007- *THE SUDS MANUAL*. ISBN 978-86017-697-8 elaborado por Woods-Ballard, B; Kellagher, R; Martin, P; Jefferis, C; Bray, R; Shaffer, P. CIRIA C697. London, www.ciria.org.

Nitro PDF Trial  
www.nitropdf.com