

## **7. INFILTRAÇÃO**

## 7 - INFILTRAÇÃO

### 7.1 - Conceituação Geral

Uma gota de chuva pode ser interceptada pela vegetação ou cair diretamente sobre o solo. A quantidade de água interceptada somente pode ser avaliada indiretamente e é normalmente pequena em relação a precipitação total.

A água que atinge o solo poderá evaporar, penetrar no solo ou escoar superficialmente. A quantidade evaporada durante as chuvas intensas é desprezível em relação ao total precipitado.

A água infiltrada sofrerá a ação de capilaridade e será retida nas camadas superiores do solo se esta prevalecer sobre a força da gravidade. A medida que o solo se umedece a força da gravidade passa a prevalecer e a água percola em direção às camadas mais profundas. O conhecimento deste processo é essencial para o dimensionamento de projetos de irrigação e será visto em maiores detalhes em outra seção deste texto.

Os principais fatores que influem no processo de infiltração são:

- **umidade do solo** - quanto mais saturado estiver o solo, menor será a infiltração.
- **geologia** - a granulometria do solo condiciona a sua permeabilidade. Quanto mais fino for o solo menor será a infiltração.
- **ocupação do solo** - os processos de urbanização e devastação da vegetação diminuem drasticamente a quantidade de água infiltrada ocorrendo o contrário com a aplicação de técnicas adequadas de terraceamento e manejo do solo.
- **topografia** - declives acentuados favorecem o escoamento superficial direto diminuindo a oportunidade de infiltração.
- **depressões** - a existência de depressões provoca a retenção da água diminuindo a quantidade de escoamento superficial direto. A água retida infiltra no solo ou evapora.

### 7.2 - Métodos de Avaliação

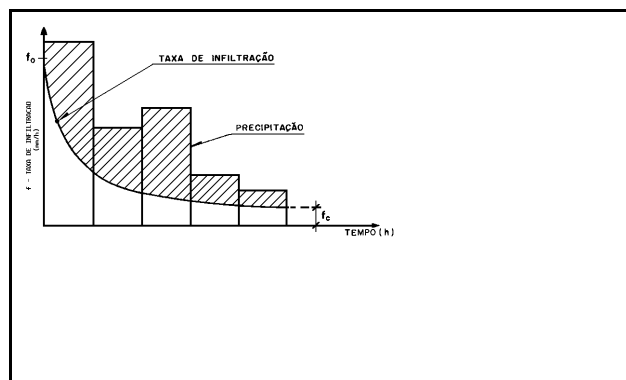
Apresenta-se a seguir os diversos métodos para quantificar a infiltração no solo.

#### a) Fórmula de Horton

O fenômeno da infiltração pode ser representado matematicamente pela conhecida fórmula de HORTON, que é a seguinte:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt} \quad (7.1)$$

$f_0$  = taxa de infiltração no instante inicial, em mm/h  
 $f_c$  = taxa de infiltração constante quando  $t \gg 4$ , em mm/h  
 $f$  = taxa de infiltração no tempo  $t$ , em mm/h  
 $k$  = constante que depende do tipo de solo  
 $t$  = intervalo de tempo em horas



**Figura 7.1 - VARIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO COM O TEMPO SEGUNDO HORTON**

A expressão só é válida quando o suprimento de água ao solo é sempre superior a taxa de infiltração conforme indicado na Figura 7.1.

Nesta figura a área hachurada indica a parcela da chuva que não se infiltra e que portanto irá se transformar em escoamento superficial direto.

A quantidade de água infiltrada até o instante "t" é dada pela integral da expressão 7.1

$$F(t) = \int_0^t [f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}] dt$$

ou seja:

$$F(t) = f_c \cdot t + \frac{f_0 - f_c}{k} - \frac{f_0 - f_c}{k} \cdot e^{-kt} \quad (7.2)$$

A expressão permite calcular a quantidade de água infiltrada quando ocorre uma chuva de intensidade  $i$  ( $i > f$ ) e duração  $t$  desde que se conheçam os valores de  $f_0$ ,  $f_c$  e  $k$ . Indicações destes valores serão fornecidas adiante.

#### b) Método Índice $\tau$

Outro método simples de uso bastante corrente é o chamado "método do índice  $\tau$ ". O índice  $\tau$  nada mais é do que a taxa de infiltração "f" suposta constante ao longo do tempo conforme indica a Figura 7.2.

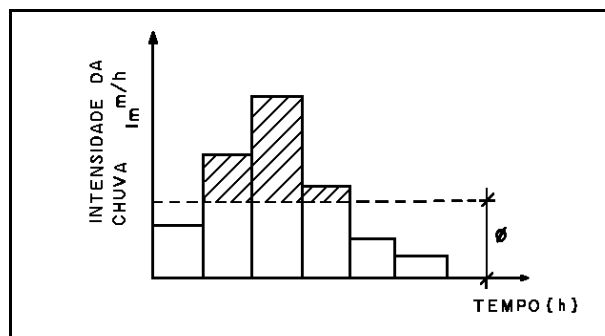


Figura 7.2 - ÍNDICE  $\iota$  DE INFILTRAÇÃO

O índice  $\iota$ , embora seja uma aproximação grosseira do modelo de HORTON, pode ser utilizado sem introduzir grandes erros em estudos de cheias pois usualmente ocorrem quando o solo já foi umedecido por chuvas anteriores. Neste caso o valor inicial  $f_0$  de HORTON aproxima-se de  $f_c$  o que torna a hipótese de  $\iota$  - cte mais realista.

O índice  $\iota$  pode ser determinado quando se dispõe de registros simultâneos de chuva e vazão como indicado na Figura 7.3.

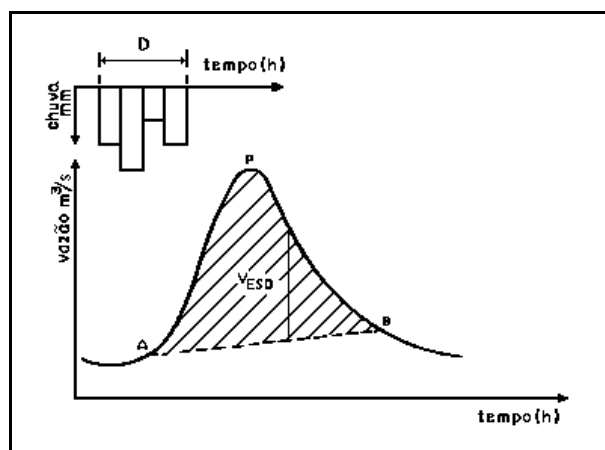


Figura 7.3 - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE  $\iota$

Nessa Figura tem-se:

D = duração da chuva, em horas;

H = chuva total precipitada durante o tempo D, em mm;

VESD = volume de escoamento superficial direto (área da figura APB), em  $m^3$ .

Sendo "A" a área da bacia hidrográfica tem-se:

volume total precipitado

$$VT = A \times H$$

volume do Escoamento Superior Direto

$$VESD = \text{área ABP}$$

Volume Infiltrado

$$VI = VT - VESD$$

Lâmina Infiltrada

$$LI = VI/A$$

Índice

$$\iota = LI/D$$

Quando se dispõe de diversos registros como os da Figura 7.3 o índice  $\tau$  médio representa uma estimativa bastante confiável das perdas médias por infiltração.

### c) Métodos do SCS

Outro método de utilização corrente que se aplica especialmente quando não se dispõem de dados hidrológicos é o do "Soil Conservation Service" (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Este método foi adaptado para as condições do Estado de São Paulo e acha-se descrito em detalhes no boletim técnico do DAAE V2 n°2 Mai/Ago 1979 - pág. 82.

A fórmula proposta pelo SCS é:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, P > 0,2S \quad (7.3)$$

Q = escoamento superficial direto em mm

P = precipitação em mm

S = retenção potencial do solo em mm

O valor de "S" depende do tipo e da ocupação do solo e pode ser determinado facilmente por tabelas próprias.

A quantidade de 0,2S é uma estimativa de perdas iniciais ( $A_i$ ) devidas à interceptação e retenção em depressões. Por esta razão impõe-se a condição  $P > 0,2S$ .

Para facilitar a solução da equação 7.3 faz-se a seguinte mudança de variável:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25.4}} \quad (7.4)$$

CN é chamado de "número de curva" e varia entre 100 e 0.

O parâmetro CN depende basicamente dos seguintes fatores:

- c.1 - Tipo de solo
- c.2 - Condições de uso e ocupação do solo
- c.3 - Umidade antecedente do solo

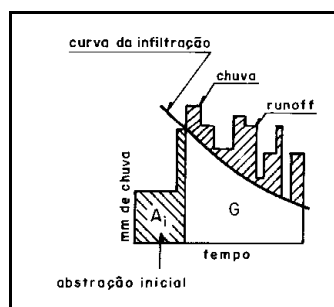


Figura 7.4

$$Q = \frac{(P - A_i)^2}{P - A_i + S}$$

com  $P \geq A_i$  ;  $S \geq A_i + G$   
e  $G = P - A_i - Q$

as curvas deste gráfico são para o caso  $A_i = 0,2S$  de modo que

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

### c.1 - Tipos de solo e condições de ocupação

O SCS distingue em seu método 4 grupos hidrológicos de solos. A adaptação do trabalho daquela entidade para o Estado de São Paulo, mencionada, classificou 5 tipos de solos como se segue:

Embora adaptada para as condições do Estado de São Paulo a classificação que se segue é bastante geral e poderá ser aplicada a outras regiões do Brasil.

**GRUPO A** - Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

**GRUPO B** - Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas este limite pode subir a 20% graças a maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.

**GRUPO C** - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30% mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser 40% e 1,5m. Nota-se a cerca de 60cm de profundidade camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

**GRUPO D** - Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

**GRUPO E** - Solos barrentos como C, mas com camada argilosa impermeável ou com pedras. Pode também não possuir tal camada, mas apresenta teor total de argila superando 40%. No caso de terras roxas este teor pode alcançar 60% (no caso D, 45%).

### c.2 - Condições de Uso e Ocupação do Solo

A Tabela 7.1 a seguir fornece valores de CN para os diferentes tipos de solo e respectivas condições de ocupação.

Essa Tabela refere-se à condição II de umidade antecedente do solo.

### c.3 - Condições de Umidade Antecedente do Solo

O método do SCS distingue 3 condições de umidade antecedente do solo:

CONDIÇÃO I - solos secos - as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15mm.

CONDIÇÃO II - situação média na época das cheias - as chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 e 40mm.

CONDIÇÃO III - solo úmido ( próximo da saturação ) - as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 40mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

A Tabela 7.2 permite converter o valor de CN para condição I ou III, dependendo das necessidades do projetista.

TABELA 7.1 - Numeração das Curvas de Escoamento Superficial de Chuvas Intensas Conforme o Complexo Hidrológico do Solo com a sua Cobertura Vegetal (Condição II de umidade antecedente)

| COBERTURA VEGETAL OU<br>OU TIPO DE USO<br>DO SOLO   | DEFESA<br>CONTRA<br>A<br>EROSÃO | SITUAÇÃO<br>HIDROLÓGICA<br>DA<br>INFILTRAÇÃO | GRUPO HIDROLÓGICO<br>DO SOLO |    |    |    |    |
|---|---------------------------------|--|------------------------------|----|----|----|----|
|   |                                 |  | A                            | B  | C  | D  | E  |
| Arado, quase sem<br>cobertura vegetal   | SR<br>C                         | Boas<br>Boas                                 | 65                           | 80 | 88 | 92 | 95 |
|   |                                 |  | 65                           | 78 | 88 | 90 | 92 |
| Cultivos de ciclo<br>curto e arações<br>frequentes  | SR                              | Más  | 80                           | 72 | 81 | 87 | 90 |
|   | SR                              | Boas   | 52                           | 66 | 75 | 82 | 85 |
|   | C                               | Más  | 56                           | 65 | 78 | 84 | 87 |
|   | C                               | Boas   | 48                           | 60 | 72 | 78 | 82 |
|   | CT                              | Más  | 52                           | 62 | 74 | 80 | 84 |
|   | CT                              | Boas   | 45                           | 55 | 67 | 75 | 80 |
| Cultivos de ciclo<br>médio, arações<br>anuais   | SR                              | Más  | 58                           | 65 | 73 | 82 | 88 |
|   | SR                              | Boas   | 54                           | 62 | 70 | 79 | 85 |
|   | C                               | Más  | 55                           | 64 | 72 | 78 | 84 |
|   | C                               | Boas   | 50                           | 60 | 67 | 75 | 83 |
|   | T                               | Más  | 52                           | 62 | 70 | 77 | 82 |
|   | T                               | Boas   | 48                           | 55 | 65 | 73 | 80 |
| Semeação densa ou a<br>lanço; cobertura curta,<br>mas densa, como a das<br>leguminosas e dos<br>postos em rodízio | SR                              | Más  | 56                           | 64 | 72 | 80 | 86 |
|   | SR                              | Boas   | 50                           | 58 | 66 | 76 | 82 |
|   | C                               | Más  | 54                           | 60 | 69 | 76 | 83 |
|   | C                               | Boas   | 48                           | 56 | 64 | 72 | 80 |
|   | T                               | Más  | 50                           | 58 | 65 | 75 | 80 |
|   | T                               | Boas   | 40                           | 52 | 60 | 70 | 70 |
| Pastagem velha com<br>arbustos  | C<br>C<br>C                     | Más  | 65                           | 70 | 78 | 85 | 90 |
|   |                                 | Médias                                       | 60                           | 66 | 75 | 82 | 87 |
|   |                                 | Boas   | 56                           | 62 | 72 | 79 | 84 |
|   |                                 | Más  | 55                           | 62 | 70 | 78 | 86 |
|   |                                 | Médias                                       | 42                           | 59 | 67 | 75 | 82 |
|   |                                 | Boas   | 50                           | 56 | 64 | 72 | 79 |
| Mata,<br>Capoeira velha   |                                 | Más  | 32                           | 40 | 55 | 67 | 76 |
|   |                                 | Boas   | 18                           | 25 | 42 | 58 | 70 |
| Gramados tratados   |                                 | Más  | 65                           | 72 | 78 | 84 | 88 |
|   |                                 | Boas   | 59                           | 67 | 74 | 81 | 86 |
| Estradas de terra   | SR                              | Más  | 80                           | 85 | 90 | 93 | 95 |
|   | C                               | Boas   | 74                           | 80 | 86 | 90 | 92 |

SR = sulcos retos

C = cultivo acompanhando as curvas de nível  
 T = terraceamento

**TABELA 7.2- Conversão das Curvas CN para as diferentes Condições de Umidade do solo**

| NUMERAÇÃO DAS CURVAS PARA AS CONDIÇÕES DE SATURAÇÃO |     |     |
|---|-----|-----|
| I   | II  | III |
| 100   | 100 | 100 |
| 87  | 95  | 99  |
| 78  | 90  | 98  |
| 70  | 85  | 97  |
| 63  | 80  | 94  |
| 57  | 75  | 91  |
| 51  | 70  | 87  |
| 45  | 65  | 83  |
| 40  | 60  | 79  |
| 35  | 55  | 75  |
| 31  | 50  | 70  |
| 27  | 45  | 65  |
| 23  | 40  | 60  |
| 19  | 35  | 55  |
| 15  | 30  | 50  |
| 12  | 25  | 45  |
| 9   | 20  | 39  |
| 7   | 15  | 33  |
| 4   | 10  | 26  |
| 2   | 5   | 17  |
| 0   | 0   | 0   |

**c.4 - Roteiro de Cálculo**

- 1 - Determinar as condições de saturação do solo;
- 2 - Determinar grupo hidrológico do solo;
- 3 - Através da Tabela 7.1 da cobertura vegetal e do grupo hidrológico, determinar o CN para a condição II;
- 4 - Transformar o CN para a condição desejada pela Tabela 7.2;
- 5 - Uma vez com a curva CN conhecida e com a precipitação total, a Figura 7.4, fornece o escoamento superficial.

**d) Coeficientes da fórmula de Horton oriundos da classificação hidrológica dos solos**

A experiência do SCS permite a indicação de valores aproximados de  $f_0$ ,  $f_c$  e  $k$  da fórmula de HORTON (ver Tabela 7.3).

**TABELA 7.3- Aplicação da Fórmula de Horton para Diferentes Tipos de Solos**

|  |
|--|
|  |
|--|

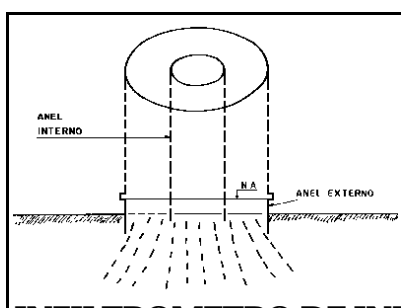


| Parâmetros da Fórmula de Horton                        | Classificação Hidrológica do Solo (SCS) |        |        |        |
|--|---|--------|--------|--------|
|  | Tipo A                                  | Tipo B | Tipo C | Tipo D |
| taxa de infiltração inicial do solo seco: $f_0$ (mm/h) | 250                                     | 200    | 130    | 80     |
| taxa de infiltração final do solo úmido: $f_c$ (mm/h)  | 25                                      | 13     | 7      | 3      |
| fator de forma-expoente K                              | 2                                       | 2      | 2      | 2      |

#### d) Medição Direta da Capacidade de Infiltração

A maneira mais precisa de determinar a capacidade de infiltração é através da medição da diferença entre a quantidade de água precipitada e o escoamento superficial, o que pode ser feito por meio de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas representativas. Para o caso de irrigação não há necessidade de muita precisão, podendo-se determiná-la com o auxílio de infiltrômetro, que é mais rápido. Tais infiltrômetros podem ser de dois tipos: de inundação e de aspersão.

O infiltrômetro de inundação consta de dois anéis concêntricos medindo respectivamente ao redor de 40 a 16 cm de diâmetro que são cravados no terreno até uma profundidade de 10 a 15 cm. A cravação não deve ser feita por percussão, o que além de provocar a penetração irregular do cilindro, vai rompendo a estrutura da camada de solo em contato com o cilindro. A melhor maneira é utilizar um macaco hidráulico, que é colocado sobre uma tábua apoiada no cilindro. A finalidade do cilindro externo é manter verticalmente o fluxo de água do cilindro interno, onde é feita a medição da capacidade de infiltração. Aplica-se água em ambos os cilindros mantendo uma lâmina líquida de 1 a 5 cm, sendo que no cilindro interno mede-se o volume aplicado a intervalos fixos de tempo. A figura 7.5 mostra um esquema da instalação para medição da capacidade de infiltração do solo com o infiltrômetro de inundação, evidenciando o efeito do cilindro externo na manutenção do fluxo vertical da água do cilindro interno.



**Figura 7.5 - INFILTROMETRO DE INUNDAÇÃO**

Uma maneira bastante prática de se manter o nível d'água e proceder as medições do volume infiltrado no cilindro interno é utilizar um garrafão graduado, emborcado. Tal garrafão possui uma rolha com um tubo de tal sorte que deslocando-se tal tubo, pode-se manter a lâmina d'água na altura desejada.

Imediatamente após iniciada a aplicação de água, aciona-se o cronômetro e a intervalos fixos de tempo, geralmente 10 minutos, procede-se à leitura do nível d'água no garrafão. A medição deve prosseguir até que a variação do nível d'água com o tempo permaneça praticamente constante. Para o cálculo da capacidade de infiltração emprega-se a seguinte equação:

$$V = h \cdot a \quad (7.6)$$

onde:

V = volume infiltrado durante o tempo t, em cm<sup>3</sup>;

a = área do cilindro interno, em cm<sup>2</sup>;

h = altura de água infiltrada, em cm.

Pode-se portanto obter:

$$h = \frac{V}{a} \quad (7.7)$$

Para calcular a capacidade de infiltração basta, transformar o valor "h", altura de infiltração, em "f", capacidade de infiltração, que é expressa em mm/h, pela relação:

$$f = \frac{60 h}{t} \quad (7.8)$$

Os resultados obtidos com o infiltrômetro de inundação não são absolutos, devido aos seguintes fatores:

- a) ausência do efeito da compactação produzido pela água da chuva;
- b) efeito do ar retido no tubo;
- c) deformação da estrutura do solo devido a cravação do cilindro. Para efeito das avaliações necessárias para fins de irrigação os resultados obtidos com o procedimento acima, são plenamente satisfatórios.