

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAPEBA

BÁRBARA EUGÊNIA CANDIDO REIS

MICHELLI DELLARETTI AGUIAR COIMBRA

**USO DE UM SIMULADOR DE CHUVA PARA  
DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE  
MATERIAL GRANULAR ARENOSO**

OURO BRANCO - MG

JULHO-2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAPEBA

BÁRBARA EUGÊNIA CANDIDO REIS

MICHELLI DELLARETTI AGUIAR COIMBRA

**USO DE UM SIMULADOR DE CHUVA PARA  
DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE  
MATERIAL GRANULAR ARENOSO**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil

**Orientador:** Prof. Me. Emmanuel Kennedy Teixeira

OURO BRANCO - MG

JULHO-2015

BÁRBARA EUGÊNIA CANDIDO REIS  
MICHELLI DELLARETTI AGUIAR COIMBRA

USO DE UM SIMULADOR DE CHUVA PARA DETERMINAÇÃO  
DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO E COEFICIENTE DE  
ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE MATERIAL GRANULAR  
ARENOSO

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do grau de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL e aprovado em sua forma final pelo orientador e pelo Coordenador de TCC do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de São João Del-Rei.

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, aprovou este TCC:

---

Prof. Me. Emmannuel Kennedy da Costa Teixeira  
Orientador - UFSJ

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr. Eliane Prado Cunha Costa dos Santos  
Avaliadora - UFSJ

---

Prof. PhD. Heraldo Nunes Pitanga  
Avaliador – UFSJ

Ouro Branco-MG, 01/07/2015

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que nos guia e dá forças para seguirmos em frente;

Aos nossos pais e irmãs [Girleene, José Eugênio e Jô (Bárbara); Cássia, Luis e Tati (Michelli), que nos apoiam e se fazem presentes todos os dias, mesmo distantes;

Ao nosso orientador Emmanuel, pela paciência e aprendizado;

Aos técnicos dos laboratórios de Hidráulica e Hidrologia e Geotecnia, respectivamente, Elvis e Robinson, pela grande ajuda;

A UFSJ, pela oportunidade de realização do curso;

E aos amigos pela parceria e incentivo.

## RESUMO

A hidrologia tem cada vez mais aumentado sua aplicabilidade na solução de problemas de engenharia no que se diz respeito à exploração dos recursos hídricos. Em seu significado mais amplo, é a ciência que estuda as águas, especificamente da sua ocorrência, circulação e distribuição em todas as suas formas. Com a finalidade de facilitar os estudos de perdas de solos, de nutrientes e taxa de infiltração, foram criados os simuladores de chuva. Esse equipamento tem sido muito utilizado, pois com ele se tem um total controle sobre as características da chuva, como tempo de duração e intensidade. Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar a capacidade de infiltração de um material granular arenoso usando um simulador de chuva. Para isso, se fez necessária à calibração do aparato, analisando algumas das suas características como tamanho da gota, altura e tempo de queda, velocidade terminal da gota, intensidade da chuva simulada e energia cinética. Os resultados obtidos pelo experimento diferiram dos valores encontrados na literatura, justificados pela diferença de propriedades dos materiais, possíveis erros de leitura e pela perceptível não uniformidade de aspersão do simulador de chuvas. Com estes estudos, pode-se fazer a associação da infiltração com as obras de engenharia, estas que causam impacto no ambiente e ao mesmo tempo sofrem consequências desse dano.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. SIMULADOR DE CHUVAS .....	3
3.1. Revisão de literatura .....	3
3.1.1. Precipitação.....	3
3.1.2. Simulador de chuva .....	4
3.1.2.1. Calibração do Simulador .....	5
3.2. Materiais e métodos.....	9
3.2.1. Materiais .....	9
3.2.2. Calibração do rotâmetro.....	11
3.2.3. Determinação da equação do vertedor .....	11
3.2.4. Determinação do diâmetro da gota .....	12
3.2.5. Altura de queda .....	13
3.2.6. Tempo de queda.....	13
3.2.7. Velocidade terminal das gotas .....	13
3.2.8. Intensidade de chuva.....	13
3.2.9. Energia cinética.....	13
3.2.10. Coeficiente de uniformidade de Christiansen .....	13
3.3. Resultados e discussões .....	15
3.3.1. Calibração do Rotâmetro .....	15
3.3.2. Equação do vertedor .....	15
3.3.3. Diâmetro da gota.....	16
3.3.4. Tempo de queda e velocidade terminal das gotas.....	17
3.3.5. Energia cinética.....	18
3.3.6. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).....	18
4. INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	20
4.1. Revisão de literatura .....	20
4.1.1. O movimento da água no solo .....	20
4.1.2. Grandezas características .....	22
4.1.2.1. Capacidade de infiltração .....	22
4.1.2.2. Taxa de infiltração.....	22

4.1.3.	Fatores que interferem na capacidade de infiltração.....	24
4.1.3.1.	Condições da superfície .....	24
4.1.3.2.	Tipo de solo .....	24
4.1.3.3.	Condições do solo .....	25
4.1.3.4.	Temperatura .....	25
4.1.3.5.	Umidade inicial do solo.....	25
4.1.3.6.	Carga hidráulica .....	25
4.1.3.7.	Compactação do solo por máquina e/ou animais e pela ação da chuva .....	26
4.1.4.	Métodos de determinação da capacidade de infiltração .....	26
4.1.4.1.	Infiltrômetros de anel .....	26
4.1.4.2.	Simuladores de chuva.....	27
4.1.5.	Equações representativas da infiltração .....	27
4.1.5.1.	Equação de Horton (1940) .....	28
4.2.	Materiais e métodos.....	30
4.2.1.	Determinação da capacidade de infiltração .....	30
4.2.2.	Determinação do teor de umidade em função do tempo .....	31
4.3.	Resultados e discussões .....	33
4.3.1.	Capacidade de infiltração.....	33
4.3.2.	Umidade.....	36
5.	CONCLUSÃO .....	37
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

# 1. INTRODUÇÃO

Hidrologia, em seu significado mais amplo, é a ciência que estuda as águas. Especificamente da sua ocorrência, circulação e distribuição em todas as suas formas (líquida, sólida e gasosa). Os termos Hidrologia Aplicada e Engenharia Hidrológica têm sido bastante utilizados, uma vez que se percebeu a ampla aplicabilidade dessa ciência na solução de problemas de engenharia no que se diz respeito à exploração dos recursos hídricos.

Na Engenharia civil, essa ciência se faz importante não só para projetos e execução de obras hidráulicas. Ela está presente também em cálculos de drenagens (subterrâneas, superficiais e urbanas), no controle de bacias hidrográficas, rebaixamento de lençol freático e bacias de infiltração. Para o melhor entendimento da Hidrologia, é importante ressaltar os processos de circulação da água conhecido como ciclo hidrológico, os quais recebem os nomes de precipitação, interceptação, transpiração, evaporação, infiltração, percolação, armazenamento e escoamento.

A crescente impermeabilização da superfície do terreno, em decorrência da urbanização, provoca excesso da concentração de fluxo de água superficial ao longo das ruas, canais, vales e rios, as consequências disso são inundações, deslizamentos de encostas, danos ao meio ambiente, processo erosivos, perdas de vidas e materiais. Para reduzir esses efeitos, deve-se aumentar a infiltração da chuva no terreno, o que pode ser conseguido respeitando sempre uma área não impermeabilizada, buscando-se soluções de engenharia e usando-se materiais modernos e de construção alternativos.

Com a finalidade de facilitar os estudos de perdas de solos, de nutrientes e taxa de infiltração, foram criados os simuladores de chuva. Esse equipamento tem sido muito utilizado, pois com ele se tem um total controle sobre as características da chuva, como os diâmetros das gotas, altura e tempo de queda, velocidade terminal, tempo de duração, intensidade e energia cinética. Além disso, o equipamento pode produzir e reproduzir em qualquer tempo chuvas com diferentes características. E nada disso seria possível com chuvas naturais.

Assim, este trabalho foi realizado para medir a capacidade de infiltração de um material granular utilizando um simulador de chuvas. Para tanto, o simulador foi calibrado comparando suas características com as encontradas na literatura, e julgado se está adequado ou não para o uso.



## **2. OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo determinar a capacidade de infiltração de água de um material granular arenoso com o uso de um simulador de chuva.

### **2.1. Objetivos específicos**

Promover a calibração do simulador de chuva, determinar a capacidade de infiltração e ajustar uma curva de taxa de infiltração ao longo para um material granular arenoso.

### **3. SIMULADOR DE CHUVAS**

#### **3.1. Revisão de literatura**

##### **3.1.1. Precipitação**

Define-se precipitação como a água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre de qualquer forma, como chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada (HOLTZ, 1976, p.07). Os resíduos gerados pela precipitação são toda a água escoada nos rios e aquela presente em toda a superfície terrestre. A precipitação na forma de chuva é a mais importante e, portanto, a mais estudada, pois é a forma mais fácil de medir, já que há pequenas contribuições das outras formas e que a ocorrência de neve é incomum no país.

A precipitação é formada pelo resfriamento provocado pela elevação da massa de ar. Assim que se atinge seu ponto de saturação, são formadas pequenas gotas por condensação do vapor, que ficam suspensas produzindo as nuvens. Essas gotas só se transformam em precipitação propriamente dita, quando começa a coalescência, que é o processo onde as gotas se chocam e se aglutinam e, com isso, atingem um peso suficiente para vencer a força de sustentação e começarem a cair.

Existem três tipos de precipitação, e eles se diferenciam pela elevação da massa de ar. Precipitações frontais são as resultantes da elevação do ar quente sobre o ar frio, quando há o encontro de duas massas de ar diferentes. Essa diferença se dá pelo fato de a superfície terrestre ser aquecida de forma desigual. Esse tipo de precipitação, em geral, é de longa duração, baixas a moderadas intensidades e sua ocorre em grandes áreas. As precipitações convectivas são aquelas provocadas pelo desequilíbrio da atmosfera em regiões com massas de ar diferentes. Esse desequilíbrio é causado por vento ou por um superaquecimento, fazendo com que ocorra uma brusca e violenta elevação da massa de ar com menor densidade. Caracterizam-se por serem chuvas de grande intensidade, com curtas durações, concentradas em pequenas áreas, sendo típicas das regiões tropicais. Já as chuvas orográficas ocorrem com a elevação forçada da massa de ar devido às barreiras naturais, como as montanhas. São caracterizadas por baixas intensidades, longas durações e cobrem pequenas áreas.

Para a Engenharia Civil, os dois primeiros tipos de chuva são importantes para o dimensionamento de grandes obras hidráulicas, controle de cheias e secas. Já o último tipo é importante para pequenos cálculos, como o de drenagem urbana.

A quantidade de chuva é medida pontualmente por aparelhos que mensuram a água que é acumulada sobre a superfície plana e impermeável. Esses aparelhos podem ser o pluviômetro e o pluviógrafo.

As leituras feitas pelo observador do pluviômetro, normalmente, em intervalos de 24 horas, em provetas graduadas, são anotadas em cadernetas próprias que são enviadas à agência responsável pela rede pluviométrica, todo fim de mês. Elas se referem quase sempre ao total precipitado das 7 horas da manhã do dia anterior até às 7 horas do dia em que se fez a medida.

Os pluviogramas obtidos nos pluviógrafos fornecem o total de precipitação acumulado no decorrer do tempo e apresentam grandes vantagens sobre os medidores sem registro, sendo indispensáveis para o estudo de chuvas de curta duração. (HOLTZ, 1976, p.09).

Outras grandezas precisam ser analisadas para a medição pluviométrica, além da altura pluviométrica, como a duração da precipitação, período de retorno (tempo em que determinado evento volta a acontecer) e a intensidade de precipitação.

A intensidade de precipitação é calculada, pois a quantidade de precipitação é variável durante o tempo. Na prática, calcula-se a intensidade média no intervalo de tempo de duração da chuva, relacionando a altura pluviométrica com a duração da precipitação. É dada em unidade de comprimento por unidade de tempo.

### **3.1.2. Simulador de chuva**

Os simuladores de chuvas possuem a finalidade de facilitar os estudos da taxa de infiltração e das perdas de solo e perdas de nutrientes devido às precipitações. Esse equipamento vem sendo muito utilizado, pois com ele se tem um total controle sobre as características da chuva, como os diâmetros das gotas, altura e tempo de queda, velocidade terminal, tempo de duração, intensidade e energia cinética. Além disso, o equipamento pode produzir e reproduzir em qualquer tempo chuvas com diferentes características. E nada disso se torna possível com chuvas naturais.

Segundo Ribeiro et al. (2000 apud FARIA et al., 2013), vários tipos de simuladores têm sido propostos, podendo ser de variados tamanhos, pressurizados ou não e, alguns, totalmente automatizados. Os simuladores de grande porte requerem enorme aparato e

consequentemente um grande recurso financeiro, mão-de-obra e algumas complicações quanto ao seu abastecimento de água e transporte, o que os torna pouco práticos.

Segundo Montebeller et al. (2001 apud FARIA, C. et al., 2013), simuladores de chuva aplicam água via aspersão, podendo assim controlar a intensidade de precipitação, o tamanho e a velocidade de impacto das gotas sobre a parcela do solo que será estudada, as características de infiltração, escoamento superficial e produção de sedimentos.

### **3.1.2.1. Calibração do Simulador**

Os vários tipos de simuladores devem ser calibrados para que se caracterize a chuva a ser simulada. Para tanto, é determinado o diâmetro médio das gotas, altura e tempo de queda, velocidade terminal das gotas, energia cinética e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

#### **a) Tamanho das gotas**

Para determinação do diâmetro médio das gotas, pesa-se 100 gotas de chuva, e, considerando-se a massa específica da água igual a  $1\text{g.cm}^{-3}$ , obtém-se o volume das gotas. O raio das gotas é calculado pela Equação 1, considerando-se que as gotas têm o formato de uma esfera.

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times R^3 \quad (1)$$

Onde:

V = Volume das gotas ( $\text{cm}^3$ );

R = Raio das gotas (cm).

Segundo Meyer e Harmon (1979 apud FRAGA JUNIOR et al., 2008) o valor do diâmetro pode variar entre valores menores que 1,0 mm chegando até 7,0 mm. Isso se deve a vários fatores, o principal dele é a intensidade da chuva.

#### **b) Altura de queda**

É a distância existente entre a extremidade do aspersor e a superfície do solo. É representada pela letra Z.

### c) Tempo de Queda

O tempo de queda pode ser calculado com a Equação 2, proposta por Lima et al. (1993 apud RIBEIRO et al., 2007).

$$T = \operatorname{arccosh}[\exp(Z \times C)] \times (g \times C)^{-1/2} \quad (2)$$

Onde:

T = Tempo de queda (s);

Z = Altura de queda (m);

C = Coeficiente de atrito com o ar (adimensional);

g = Aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

O coeficiente de atrito com ar (C) pode ser calculado pela Equação 3, proposta por HILLS (1998 apud RIBEIRO et al., 2007).

$$C = \frac{(0,804 - 0,264D + 0,066D^2 - 0,004D^3)}{1,109D} \quad (3)$$

Onde:

D = Diâmetro médio da gota (mm).

Ribeiro et al. (2007), promovendo a calibração de um simulador de chuva, encontrou um tempo de queda de 0,72 segundos.

### d) Velocidade terminal das gotas

É a velocidade das gotas no momento em que elas encontram a superfície do solo. Pode ser estimada pela Equação 4, também proposta por Lima et al. (1993 apud RIBEIRO et al., 2007).

$$V = \left(\frac{g}{C}\right)^{1/2} \times \tanh \left[ T \times (g \times C)^{1/2} \right] \quad (4)$$

Onde:

V = Velocidade Terminal das gotas (m/s);

C = Coeficiente de atrito com o ar (adimensional);

$g$  = Aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

A velocidade terminal das gotas sofre o efeito tanto da altura de queda quanto do diâmetro da gota. À medida que o diâmetro cresce, a velocidade terminal aumenta até atingir um valor constante para uma determinada altura, valor este que se torna a velocidade terminal.

#### e) **Intensidade de chuva**

A intensidade ( $I$ ) de chuva pode ser medida conhecendo-se a vazão ( $Q$ ) e a área ( $S$ ) do recipiente de recebimento. É dada pela Equação 5.

$$I = \left[ \frac{Q}{S} \right] \times 60 \quad (5)$$

#### f) **Energia cinética**

Existem duas equações para o cálculo da energia cinética, ambas se baseiam na intensidade da chuva. A Equação 6 foi proposta por Foster et al. (1981, apud Ribeiro et al., 2007) e a Equação 7 por Wagner & Massambani (1988, apud Ribeiro et al., 2007).

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log I \quad (6)$$

$$EC = 0,153 + 0,0645 \log I \quad (7)$$

Onde:

$EC$  = Energia cinética da chuva (MJ/ha/mm);

$I$  = Intensidade da chuva (mm/ha).

Outra maneira de se calcular a energia cinética é conhecendo-se a velocidade terminal e a massa de água das gotas Equação 8, considerando-se o somatório de energia cinética de todas as gotas.

$$EC = \frac{m \times v^2}{2} \quad (8)$$

Onde:

$EC$  = Energia Cinética da gota ao tocar a superfície do solo (J);

$m$  = massa de cada gota (kg);

$v$  = velocidade da gota ao tocar a superfície (m/s).

Geralmente, em simuladores de chuva, a velocidade terminal não é atingida, por isso, esse último método fornece resultados mais confiáveis que os anteriores, já que estes foram obtidos para chuvas naturais onde a velocidade, pressupostamente, é atingida. (RIBEIRO et al., 2007, p.12).

Segundo Ribeiro et al. (2007), a energia cinética em sua calibração, calculada pela equação 8, foi de 4,53 MJ/ha. Para as Equações 6 e 7 as energias foram 8,22 MJ/ha e 8,01 MJ/ha, respectivamente.

### **g) Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)**

Este coeficiente indica a uniformidade da distribuição da precipitação, no caso de um simulador, nos aspersores. É calculado fazendo um tratamento estatístico descritivo nos dados coletadas em posições diferentes na superfície do solo em um determinado tempo. É calculado pela Equação 9.

$$CUC = 100 \times \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right] \quad (9)$$

Onde:

CUC = Coeficiente de uniformidade de Christiansen (%)

$x_i$  = dado coletado em cada pote;

$\bar{x}$  = média dos dados coletados;

$n$  = número de potes.

Segundo FARIA, C. et al., (2013), quanto mais o coeficiente de uniformidade se aproximar de 1 ou 100%, pode considerar que o simulador tem uma distribuição uniforme da precipitação em seus aspersores, atendendo às necessidades básicas de um simulador de chuva.

Segundo Meyer & Harmon (1979), um minissimulador de chuvas com um bico aspersor VeeJet 80-150 a 3,05 m da superfície do solo, com pressão constante de 41,0 kPa (6 lb/pol<sup>2</sup>) e com intensidade de 80,0 mm/h, produz chuvas semelhantes às naturais, com energia cinética de impacto de gotas de aproximadamente 275,0 kJ/ha/mm, com distribuição de gotas com 2,3 mm de diâmetro e velocidade terminal de 8,8 m/s. (FARIA, C. et al., 2013, p.784).

## **3.2. Materiais e métodos**

### **3.2.1. Materiais**

Para calibração do simulador de chuva foram utilizados os seguintes materiais:

- Simulador de chuva

O aparato de hidrologia recebe o nome de H313 da marca TecQuipment, possui as seguintes dimensões 2,40 m de comprimento x 1,00 m de largura x 1,80 m de altura. Dispõe de uma fonte de alimentação de energia elétrica para o acionamento da bomba. As Figuras 1 e 2 auxiliam no entendimento do funcionamento do aparato. O controle da precipitação se dá com o ajuste das válvulas “A” e “B”. No corpo do aparato foi colocado material granular arenoso retido por duas barreiras nas extremidades, modelando assim, a superfície de captação. Para que a água se distribua uniformemente por toda a superfície, a válvula “E” deve ser aberta. Se esta estiver fechada a precipitação ocorrerá apenas na parte superior da superfície. O corpo principal do aparato é envolto por placas de perspex (material de plástico resistente, leve e transparente) para limitar o spray. Além disso, o simulador possui um mecanismo de inclinação que permite a variação na inclinação da superfície de captação. O escoamento superficial passa por um vertedor retangular de soleira delgada Figura 3 abaixo do corpo principal. As barreiras nas extremidades possuem janelas removíveis (Figura 4) permitindo a passagem de água.

As dimensões da superfície de captação são 2,00 m de comprimento x 1,00 m de largura x 0,18 m de profundidade.

- Recipientes

Foram utilizados béqueres, provetas e baldes para a medição de volumes.

- Balança Analítica
- Termômetro
- Cronômetro

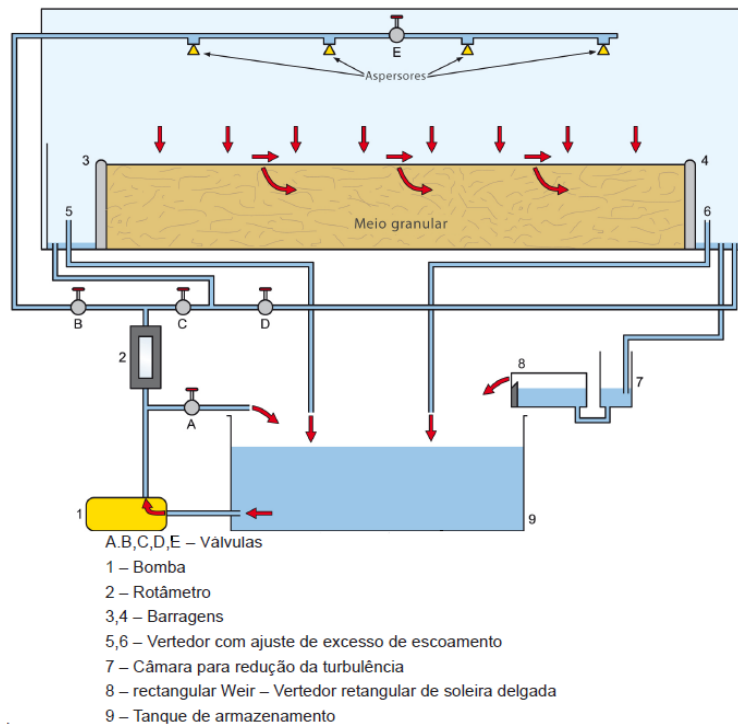


**Figura 1 - Aparato de Hidrologia H313**



Fonte: TecQuipment (2011).

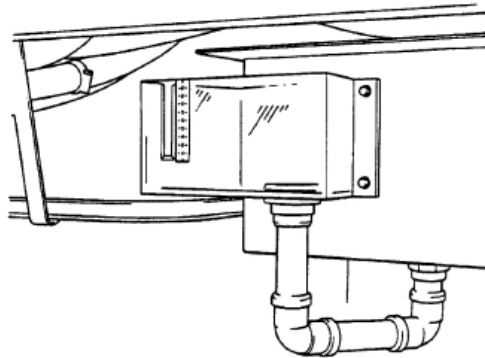
**Figura 2 - Esquema do Aparato sem poços e piezômetros**



- A,B,C,D,E – Válvulas
- 1 – Bomba
- 2 – Rotâmetro
- 3,4 – Barragens
- 5,6 – Vertedor com ajuste de excesso de escoamento
- 7 – Câmara para redução da turbulência
- 8 – rectangular Weir – Vertedor retangular de soleira delgada
- 9 – Tanque de armazenamento

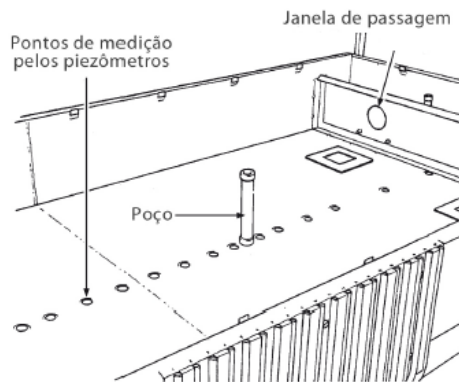
Fonte: TecQuipment (2011).

**Figura 3 - Vertedor de Soleira Delgada**



**Fonte: TecQuipment (2011).**

**Figura 4 - Vista do poço, pontos dos piezômetros e da janela de passagem**



**Fonte: TecQuipment (2011).**

### **3.2.2. Calibração do rotâmetro**

Para a verificação da vazão do rotâmetro foram coletadas amostras de volume de água em determinados tempos, calculando-se a vazão média das amostras. O resultado encontrado foi comparado com o observado no rotâmetro. Esse procedimento foi realizado para as vazões de 4,7,11,16 e 20,0 L/min.

### **3.2.3. Determinação da equação do vertedor**

No simulador de chuvas, há instalado um vertedor retangular, de parede delgada, com duas contrações, o qual é utilizado para medição da altura da lâmina d'água que escoa. Para o ajuste de uma equação desse vertedor, foram determinadas vazões de determinados tempos, utilizando o método direto gravimétrico, e medida a altura de lâmina de água no vertedor. A

equação de um vertedor retangular (Equação 10) pode ser simplificada ficando a vazão em função apenas da altura de lâmina, como mostra a Equação 11, já que os demais valores são constantes. A constante K foi calculada com auxílio da ferramenta solver no *software* MICROSOFT EXCEL 2013.

$$Q = \frac{2}{3} \times CQ \times \sqrt{2g} \times L \times H^{3/2} \quad (10)$$

$$Q = K \times H^{3/2} \quad (11)$$

Onde:

Q = Vazão do vertedor (m<sup>3</sup>/s);

CQ = Coeficiente de descarga;

g = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

L = Largura do vertedor (L= 0,013 m);

H = Altura de lâmina d'água (m).

#### **3.2.4. Determinação do diâmetro da gota**

Para a medição do diâmetro médio das gotas, tararam-se seis provetas e coletou-se 100 gotas de chuva em cada uma. Pesando-se as provetas cheias e subtraindo-se as taras, tem-se as massas das gotas.

A temperatura da água medida foi de 20°C. Para esse valor, a massa específica da água é de 0,99823 g/cm<sup>3</sup>.

O volume das 100 gotas foi calculado pela razão entre a massa de água das gotas e a massa específica da água a 20° C. O volume de cada gota foi calculado dividindo o valor anterior por 100. Com o volume de cada gota calculado, encontrou-se o raio, utilizando-se Equação 1. O diâmetro médio foi a média dos seis diâmetros.

### **3.2.5. Altura de queda**

Mediu-se a distância entre a superfície de captação e a extremidade do aspersor, encontrando-se 60,00 cm.

### **3.2.6. Tempo de queda**

O tempo de queda foi calculado conforme Equação 2, considerando-se a altura de queda medida no laboratório.

### **3.2.7. Velocidade terminal das gotas**

A velocidade terminal das gotas foi calculada conforme Equação 4, considerando-se o tempo de queda calculado.

### **3.2.8. Intensidade de chuva**

Utilizando-se uma vazão igual a 3,0 L/min e tendo-se a área da superfície de captação igual a 2,00 m<sup>2</sup>, pela Equação 5, tem-se uma intensidade de chuva de 90,00 mm/h. Essa intensidade de chuva foi utilizada, mesmo sendo um valor alto, devido a dificuldade de se produzir no simulador chuva de menor intensidade.

### **3.2.9. Energia cinética**

A energia cinética foi calculada utilizando-se a Equação 8, pois nesse trabalho se conhece a velocidade terminal e a massa de água das gotas.

### **3.2.10. Coeficiente de uniformidade de Christiansen**

Para a verificação da uniformidade da precipitação que ocorre em toda a superfície de captação, foram colocados béqueres em baixo de seis aspersores e medido o volume que cada

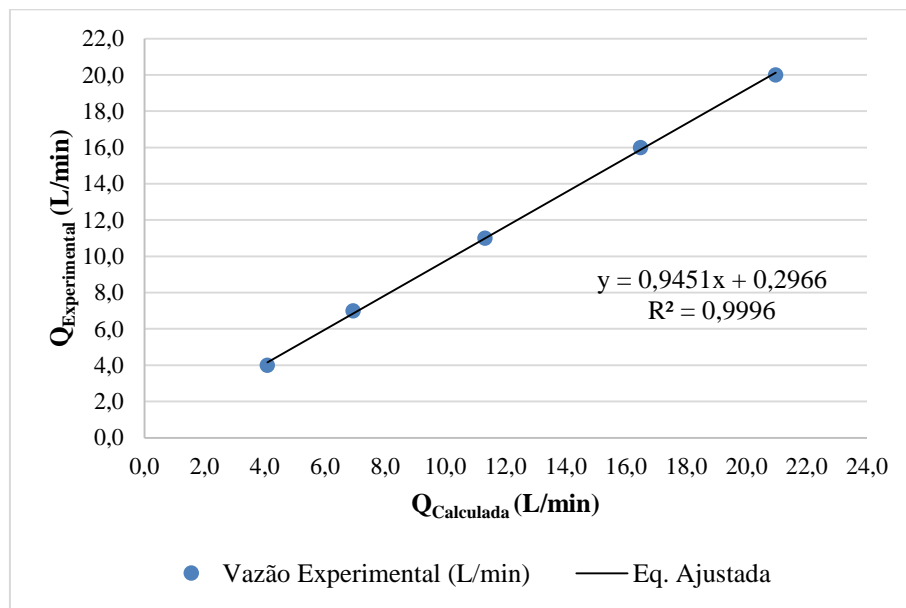
um coletou em 1,02 minutos. De posse destes seis valores de volume, fez-se o tratamento estatístico conforme a Equação 9.

### 3.3. Resultados e discussões

#### 3.3.1. Calibração do Rotâmetro

Com as vazões calculadas para os dados coletados em laboratório e as indicadas no rotâmetro do equipamento, fez-se o gráfico mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Dados para calibração do rotâmetro



Fonte: Próprio autor.

Com a Figura 5, observou-se um erro bem pequeno entre as vazões calculadas e as experimentais. Concluindo que o rotâmetro estava calibrado, e que as vazões indicadas por este, estavam corretas.

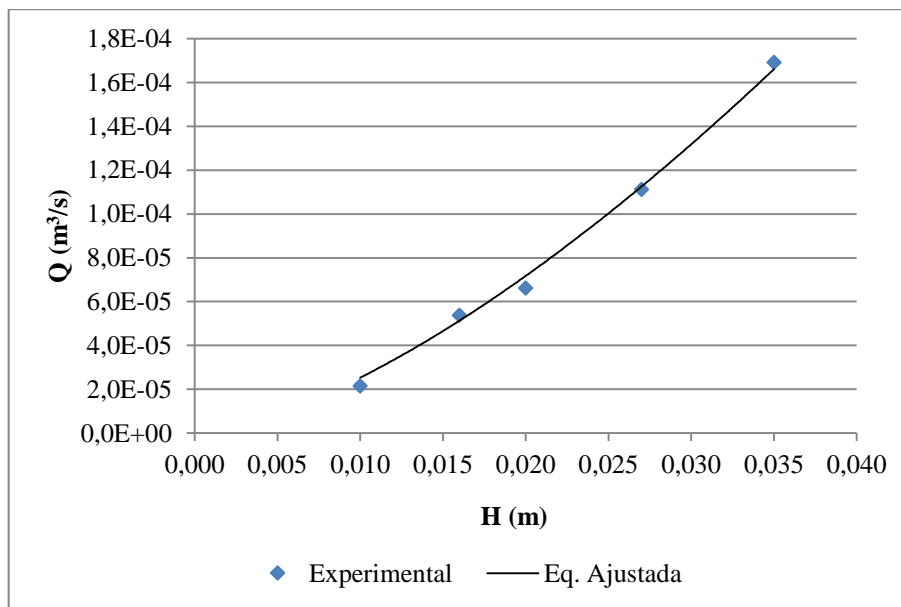
#### 3.3.2. Equação do vertedor

A equação do vertedor foi determinada pela Equação 11, como descrito em 3.2.3, encontrando um valor de K de 0,025356. Resultando na Equação 12.

$$Q = 0,025356 \times H^{3/2} \quad (12)$$

Com os valores experimentais de vazão e lâmina d'água no vertedor, gerou-se o gráfico da Figura 6. Nele, além dos das vazões experimentais, encontra-se a linha de tendência ajustada pela Equação 12.

**Figura 6 – Equação de ajuste do vertedor retangular utilizado**



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.3. Diâmetro da gota

Os resultados obtidos para determinação do diâmetro da gota estão apresentados na Tabela 1. Encontrou-se um diâmetro médio das gotas de 5,65 mm. Segundo Meyer e Harmon (1979 apud FRAGA JUNIOR et al., 2008) o valor do diâmetro pode variar entre valores menores que 1,0 mm chegando até 7,0 mm. Assim, o diâmetro da gota do simulador de chuva está dentro da normalidade.

**Tabela 1 – Determinação dos raios das gotas de chuva do simulador**

Massa da gota (g)	Volume da gota (cm <sup>3</sup> )	Raio da gota (mm)
0,094	0,094	2,82
0,103	0,103	2,90
0,100	0,100	2,88
0,089	0,089	2,77
0,095	0,095	2,84
0,086	0,086	2,74

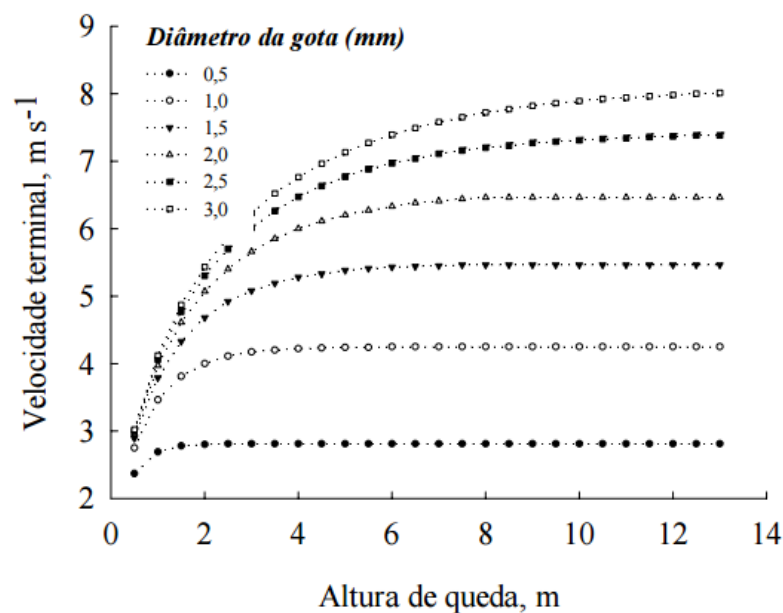
### 3.3.4. Tempo de queda e velocidade terminal das gotas

Utilizando-se a Equação 3, para o diâmetro da gota de 5,65 mm, encontrou-se o coeficiente de atrito com ar (C) de 0,1114. De posse desse valor, para altura de queda de 60,00 cm, utilizando-se a Equação 2, obteve-se tempo médio de queda da gota de chuva igual a 0,39 s.

Para este tempo de queda, utilizando-se a Equação 4, obteve-se uma velocidade média de queda da gota de 9,37 m/s.

Na Figura 7, é mostrado o efeito da altura de queda e do diâmetro da gota na sua velocidade terminal, com base nas equações proposta por Lima et al. (1993). Nela, observa-se que quanto maior o diâmetro da gota, maior deverá ser a altura de queda para que ela atinja a velocidade terminal. O maior diâmetro apresentado na Figura 7 é 3,00 mm, observa-se que para a gota de chuva desse diâmetro alcançar a velocidade terminal de, aproximadamente, 8,00 m/s, necessita-se de, aproximadamente, 10,00 m de altura de queda. Tem-se que o diâmetro de gota desse trabalho é 5,65 mm é superior ao maior diâmetro observado na figura. Assim, a altura de queda do simulador utilizado, a qual é 60,00 cm, é insuficiente para se alcançar a velocidade terminal. Ressalta-se que quando se realizam trabalhos envolvendo simulação de chuva, seria desejável que esse critério fosse atingido, podendo representar melhor as condições naturais.

**Figura 7 - Efeito da altura de queda e do diâmetro na velocidade da gota**



Fonte: Lima et al. (1993).



### 3.3.5. Energia cinética

Para os dados apresentados na Tabela 1, encontrou-se que a massa média de cada gota é 0,094 g. Para a velocidade média de queda de 9,37 m/s, utilizando-se a Equação 8, obteve-se energia cinética média de cada gota de chuva igual a  $4,15 \cdot 10^{-1}$  J.

Ribeiro et al. (2007), calculando a energia cinética de cada gota, encontrou um valor de  $1,16 \cdot 10^{-4}$  J. O valor encontrado para este trabalho foi considerado dentro da normalidade, levando em consideração que no trabalho citado, as gotas tinham um diâmetro menor e, conseqüentemente uma menor massa, e menor velocidade, resultando em uma energia cinética menor.

### 3.3.6. Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

A Tabela 2 apresenta os valores dos volumes de água coletados em seis dos oito aspersores do simulador de chuva. Feito o tratamento estatístico nos dados coletados, utilizando-se a Equação 9, obteve-se um CUC igual a 85,42%. Implicando numa distribuição não tão uniforme, mas já esperada. Pois já era visível a não uniformidade de aspersão.

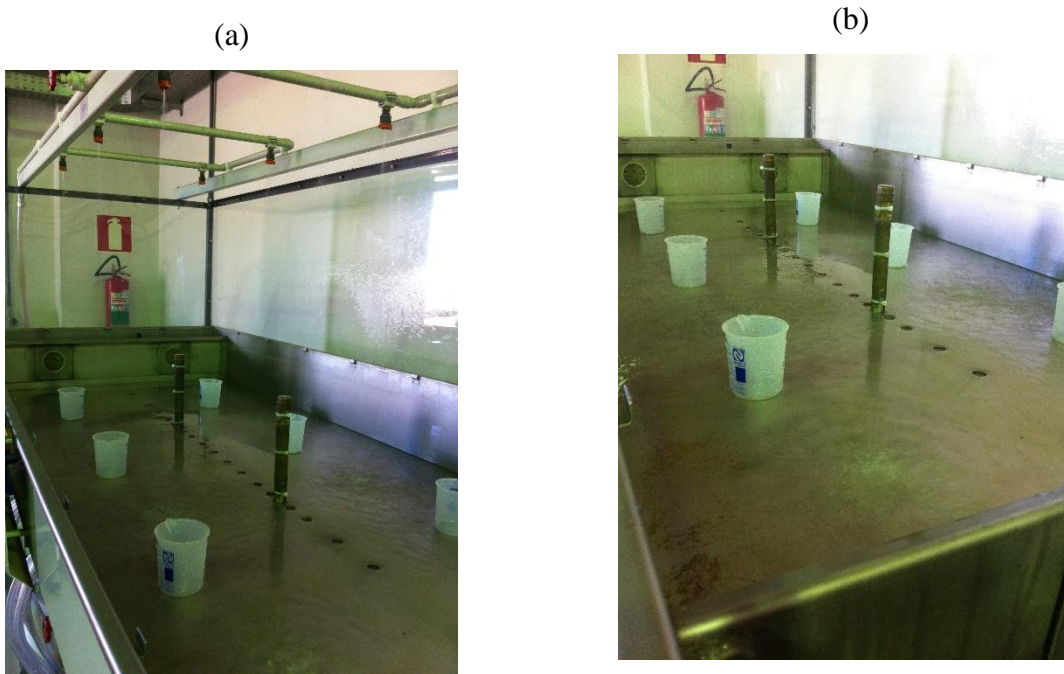
**Tabela 2 – Dados para o cálculo do coeficiente de uniformidade de Christiansen**

Aspersor	Volume (mL)
1	252,0
3	219,0
4	133,0
5	257,0
7	225,0
8	265,0
<b>Média</b>	<b>225,2</b>

Segundo Montebeller et al. (2001), a inúmeros pesquisadores consideram que valores acima de 80% são aceitáveis em relação à uniformidade de distribuição em simuladores de chuva. Como o valor encontrado foi de 85%, tem-se que o simulador teoricamente atende às necessidades básicas deste trabalho. Entretanto, percebeu-se, observando o funcionamento do simulador durante a realização dos experimentos, que a distribuição não é uniforme, pois o raio da superfície do material que recebe chuva é apenas o localizado abaixo do aspersor.

Assim, as regiões localizadas entre os aspersores não recebem água, como mostrado na Figura 8.

**Figura 8 - Distribuição da precipitação nos aspersores**



**Fonte: Próprio Autor.**

## 4. INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

### 4.1. Revisão de literatura

No processo do ciclo hidrológico ocorre uma redução da precipitação total à precipitação efetiva pelas chamadas abstrações hidrológicas, estas que incluem a parcela de chuva que se abate na área da bacia, e são elas, principalmente, a interceptação, o armazenamento em depressões do terreno, a infiltração, a evaporação e a evapotranspiração. Neste trabalho, especificamente neste tópico, a abstração hidrológica em estudo é a infiltração. (NAGHETTINI, 1984)

Diferentemente da percolação, que é o movimento da água entre os vazios do solo, a infiltração é definida com a passagem de água através da superfície do solo para o seu interior. Os poros ou vazios de um solo têm dimensões variáveis, sendo os de menor diâmetro chamados poros capilares, que retêm a água por tensão superficial entre os fragmentos de solo e o líquido, e os de maior diâmetro chamados poros gravitacionais, que permitem a descendência da água sob ação da gravidade. A percolação da água se dá pela combinação da força gravitacional e da capilaridade, ambas agindo verticalmente até que atinja camadas mais profundas.

À medida que a água infiltra, o perfil de umidade do solo é alterado gradativamente, aumentando a umidade das camadas de cima para baixo. E quando cessada, ocorre o fenômeno chamado redistribuição, no qual o perfil se inverte, ficando o solo com baixos teores de umidade próximos à superfície, e altos nas camadas mais profundas.

#### 4.1.1. O movimento da água no solo

No início da precipitação, a taxa de infiltração no solo é alta, principalmente se o solo estiver com umidade baixa, e tende a reduzir gradativamente com o tempo para um valor constante, denominado taxa de infiltração estável. Tal comportamento pode ser definido pela lei de Darcy, originalmente relacionada a solos saturados, representada pela Equação 14:

$$q = -K_0 \frac{\partial H}{\partial Z} \quad (14)$$

Onde:

$q$  = densidade de fluxo (mm/h);

$K_0$  = condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h);

$H$  = potencial total da água no solo (mm), e;

$Z$  = distância entre os pontos considerados (mm).

A razão entre a taxa de variação do potencial total de água no solo, ao longo da variação da distância percorrida pela água ( $\partial H/\partial Z$ ), denomina-se gradiente hidráulico, que é a força responsável pelo escoamento da água. A relação linear entre o gradiente hidráulico e o fluxo só é válida para o escoamento laminar, limitando-se também a velocidade de escoamento a baixas velocidades, ou seja, pequenos gradientes hidráulicos.

Para solos não-saturados, a equação de Darcy deve levar em consideração a variação da condutividade hidráulica do solo com a variação da umidade, denominada curva de condutividade hidráulica  $K(\theta)$ . E o potencial de água no solo é composto por uma parcela de potencial gravitacional e outra de potencial matricial da água no solo, definido pela Equação 15:

$$H = \Psi + Z \quad (15)$$

Onde:

$\Psi$  = potencial matricial de água no solo (mm); e

$Z$  = potencial gravitacional de água no solo (mm).

Nessas condições, a equação de Darcy fica definida:

$$q = -K(\theta) \cdot \frac{\partial}{\partial Z} (\Psi + Z) \quad (16)$$

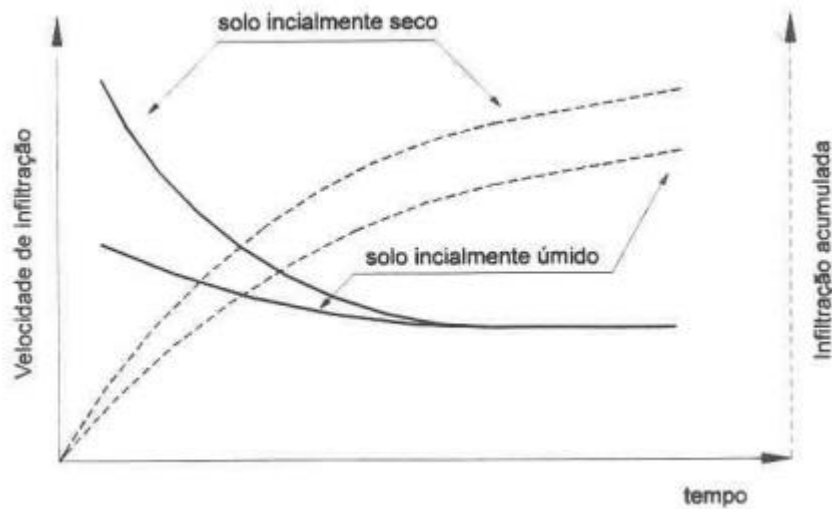
Onde:

$K(\theta)$  = condutividade hidráulica do solo para um teor de umidade  $\theta$  (mm/h).

No início do processo, a distância até o ponto de umedecimento é pequena, logo tem-se um gradiente hidráulico elevado e, portanto, uma alta taxa de infiltração. Ao longo do tempo a profundidade aumenta até que o gradiente hidráulico tenda a 1, fazendo a taxa de infiltração tender a um valor estável.

Quanto maior a umidade inicial, menor será a diferença de potencial matricial de água no solo, menor o gradiente hidráulico, e mais rapidamente a taxa de infiltração se tornará constante. A Figura 9 representa a variação da taxa de infiltração e a infiltração acumulada para diferentes teores de umidades iniciais.

**Figura 9 - Variação da taxa de infiltração e da infiltração acumulada em função do tempo para duas condições iniciais de umidade do solo**



Fonte: Silva e Carvalho (2006).

## 4.1.2. Grandezas características

### 4.1.2.1. Capacidade de infiltração

A capacidade de infiltração ( $f_p$ ) é definida pelo máximo volume de água que um solo, sob determinadas condições, pode absorver em unidade de tempo, por unidade de área. Se houver excesso de precipitação, a taxa de infiltração no solo pode alcançar seu valor máximo igual à capacidade de infiltração.

### 4.1.2.2. Taxa de infiltração

O volume de água por unidade de área (lâmina d'água) que atravessa a superfície do solo ao longo do tempo é chamada taxa de infiltração no solo, e é representada pela seguinte Equação 17:

$$TI = \frac{dI}{dt} \quad (17)$$

Onde:

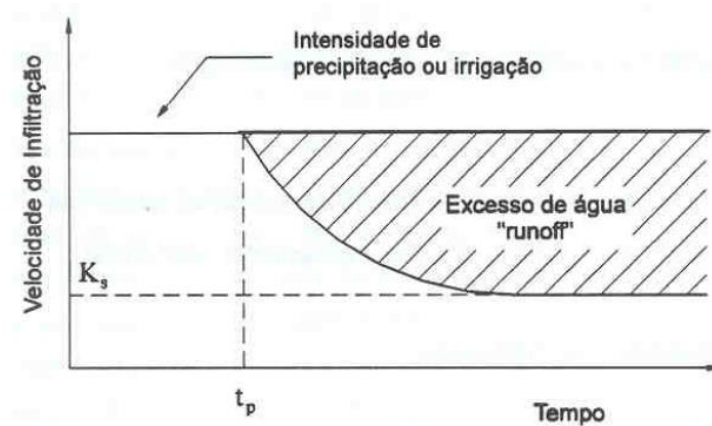
TI = Taxa de infiltração da água no solo (mm/h);

I = Infiltração acumulada (mm); e

T = tempo (h).

A intensidade de infiltração ( $f_i$ ) para um instante ( $t$ ) será igualada à capacidade de infiltração ( $f_p$ ) quando a intensidade de chuva ( $i$ ) se igualar ou for superior à ( $f_p$ ). Contrariamente, enquanto  $i \leq f_p$ , todo o volume precipitado infiltra no solo, aumentando o teor de umidade retido ou percolando para os aquíferos, e provocando progressiva redução na capacidade de infiltração. Em outras palavras, se uma taxa de infiltração elevada ocorrer em um solo que possui baixa capacidade de infiltração, a taxa de infiltração será equivalente à capacidade de infiltração do solo e a diferença gerada ficará empoçada na superfície que poderá, então, gerar escoamento superficial aplicado na taxa excedente. Já para o caso da intensidade de chuva ser menor que a capacidade de infiltração, a água penetra o solo até que este atinja a capacidade de infiltração. Persistindo a precipitação, a partir deste momento a infiltração começa a decrescer com o tempo, tendendo a um valor constante, caracterizado como a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ). O gráfico na Figura 10 representa esta situação.

**Figura 10 - Variação da velocidade de infiltração com o tempo**



Fonte: Silva e Carvalho (2006).

### 4.1.3. Fatores que interferem na capacidade de infiltração

A infiltração é um processo que depende de diversos fatores inter-relacionados, entre os quais se destacam: a duração e a intensidade da chuva, as características físicas e o teor de umidade do solo, a cobertura vegetal e o manejo da terra.

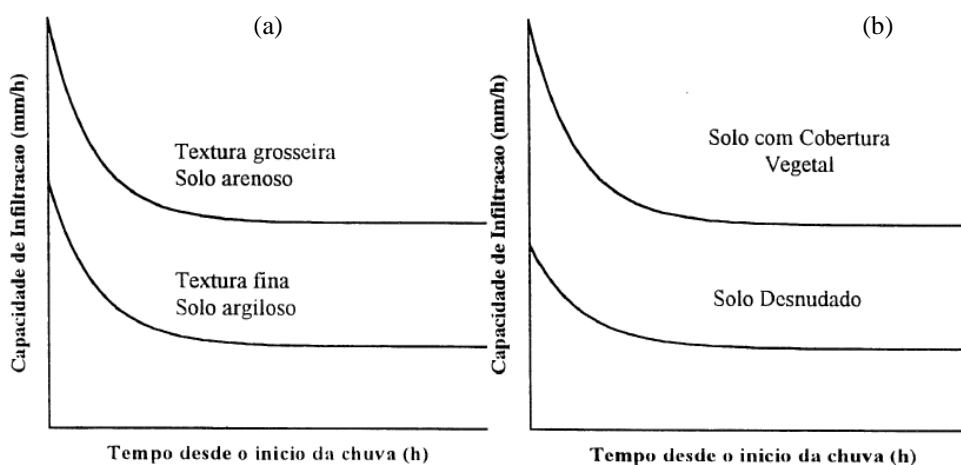
#### 4.1.3.1. Condições da superfície

Áreas urbanizadas apresentam menores velocidades de infiltração que áreas agrícolas, principalmente quando estas têm cobertura vegetal.

#### 4.1.3.2. Tipo de solo

A porosidade, tamanho das partículas de solo e o estado de fissuração das rochas influenciam diretamente na capacidade de infiltração do solo. Solos arenosos tem maior capacidade de drenagem da água gravitacional que solos argilosos devido aos grandes diâmetros dos poros, como demonstrado na Figura 11(a). Já a cobertura vegetal atenua o efeito impactante das gotas de chuva sobre o solo, cria condições favoráveis para proliferação de insetos e animais escavadores além de pequenas fissurações no solo formadas pelas raízes de plantas. A Figura 11(b) representa o aumento na capacidade de infiltração quanto à ocorrência da combinação dos efeitos da presença da vegetação.

Figura 11 - Interveniência do tipo de solo na variação da capacidade de infiltração

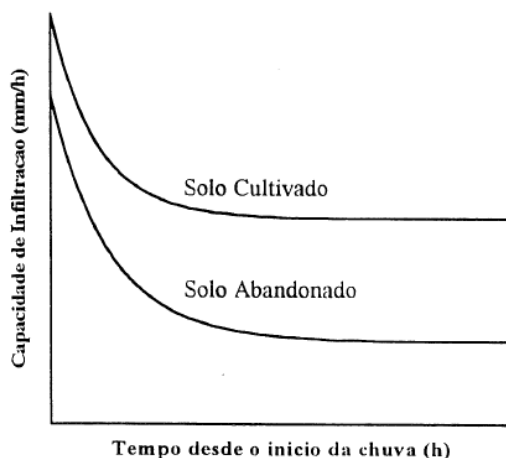


Fonte: NAGHETTINI (1997).

#### 4.1.3.3. Condições do solo

Terrenos arados ou cultivados favorecem a absorção de água pelo solo. O preparo do terreno pode aumentar a capacidade de infiltração do solo, quando feito adequadamente, caso contrário, pode se tornar inferior a um solo sem preparo, principalmente se houver remoção de cobertura vegetal existente. Verifica-se essa variação na Figura 12.

Figura 12- Interveniência do preparo do solo na variação da capacidade de infiltração



Fonte: NAGHETTINI (1997).

#### 4.1.3.4. Temperatura

A viscosidade da água varia de acordo com a temperatura, o que faz variar a capacidade de infiltração.

#### 4.1.3.5. Umidade inicial do solo

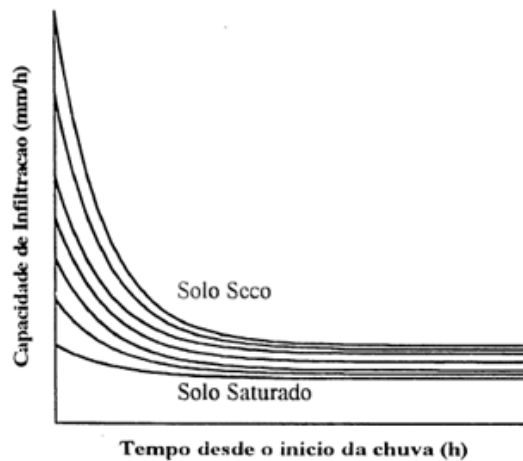
Quanto menor a umidade inicial do solo inicialmente, maior será a capacidade de infiltração (Figura 13).

#### 4.1.3.6. Carga hidráulica

Quanto maior a lâmina de água sobre a superfície do solo, maior deverá ser a taxa de infiltração.



**Figura 13 - Interveniência da umidade inicial do solo na variação da capacidade de infiltração**



Fonte: NAGHETTINI (1997).

#### **4.1.3.7. Compactação do solo por máquina e/ou animais e pela ação da chuva**

Solos nus podem se tornar parcialmente impermeáveis pela ação compactadora das atividades humanas e até das gotas de chuva. O tráfego de veículos, o desmatamento para exploração de área agrícolas, as impermeabilizações para urbanização, áreas de pastagem e o impacto provocado quando gotas de chuva atingem a superfície concorrem para o decréscimo da capacidade de infiltração. A intensidade da variação provocada pelas gotas de chuva depende da cobertura vegetal, com a energia cinética de precipitação e com estabilidade dos agregados do solo.

#### **4.1.4. Métodos de determinação da capacidade de infiltração**

Os métodos usados para medição da capacidade de infiltração são feitos através de infiltrômetros ou simuladores de chuva.

##### **4.1.4.1. Infiltrômetros de anel**

Os infiltrômetros são cilindros concêntricos cravados verticalmente no solo com um dispositivo de medição de volume da água aduzida ao cilindro interno.

A água é colocada, ao mesmo tempo nos dois anéis e, com uma régua graduada, faz-se a leitura da lâmina d'água no cilindro interno ou anota-se o volume de água colocado no anel, com intervalos de tempo pré-determinados. A diferença de leitura entre dois intervalos de tempo, representa a infiltração vertical neste período. (SILVA e CARVALHO, 2006, p.69).

O anel externo tem por finalidade evitar que a água infiltre pelas laterais do anel interno, interferindo assim no resultado do teste. Este termina quando a taxa de infiltração permanece constante (variando menos de 10% no intervalo de uma hora). Daí considera-se que o solo atingiu a taxa de infiltração estável. Para a estimativa da taxa de infiltração média basta fazer a divisão do volume do cilindro pela área e pelo intervalo de tempo. Erros consideráveis nesse cálculo podem ocorrer devido à ausência dos efeitos de compactação pelas gotas de chuva, a deformação estrutural do solo com a cravação dos cilindros, e a fuga de ar para a área externa dos tubos. Tais fatores podem ser evitados com o uso de simuladores de chuva ou corrigidos superestimando a taxa de infiltração.

#### **4.1.4.2. Simuladores de chuva**

Os simuladores de chuva podem produzir a precipitação artificial com o uso de aspersores, com intensidade constante e uniforme superior à capacidade de infiltração do solo, de modo a permitir o escoamento superficial. O objetivo então é medir a altura de lâmina d'água do escoamento superficial para subtraí-la da intensidade de precipitação e obter a taxa de infiltração.

Segundo Meyer e Harmon (1979 apud FRAGA JUNIOR et al., 2008), uma bem simulada requer que a distribuição de tamanho de gota seja perto de chuva natural, a velocidade terminal de impacto de gota seja próxima da chuva natural (50% das gotas constatadas em uma simulação), a aplicação de chuva deve ser uniforme, e a da água de modo contínuo na parcela experimental ou, no mínimo, executando duas aplicações por segundo compondo uma aplicação não intermitente e deve também permitir o uso de parcela experimental com área próxima a 0,50 m<sup>2</sup>.

#### **4.1.5. Equações representativas da infiltração**

Várias são as equações utilizadas que tentam descrever o processo de infiltração de água no solo, como, por exemplo, a equação de Kostiakov (1932), a equação potencial

modificada (Kostiakov-Lewis), a equação de Green Ampt e a equação de Horton (1940), a qual será descrita a seguir, pois foi utilizada nesse trabalho.

#### 4.1.5.1. Equação de Horton (1940)

Em bacias hidrográficas muito grandes, a intensidade de precipitação não é constante em toda sua área. Para tais bacias, a equação de Horton avalia a capacidade média de infiltração. Esta é estabelecida com base no ajuste da observação dos valores medidos. Admite-se que a infiltração é menor que a precipitação e é dada pela seguinte Equação 18:

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c) \exp(-kt) \quad (18)$$

Onde:

$f_p$  = valor instantâneo da capacidade de infiltração (mm/h);

$f_0$  = valor inicial (mm/h);

$f_c$  = valor mínimo (mm/h);

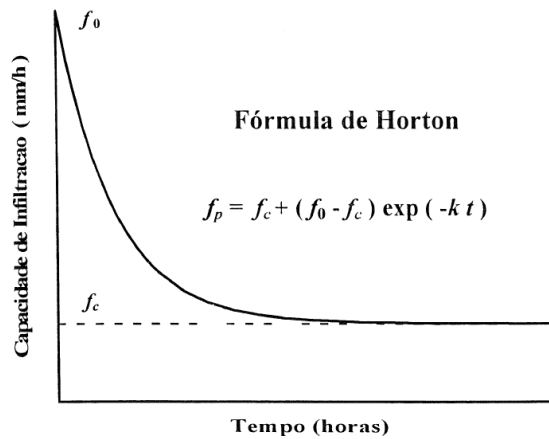
$t$  = tempo, contado a partir do início da chuva (h);

$k$  = constante característica do solo ( $h^{-1}$ ).

No início da precipitação, quanto  $t = 0$ ,  $f_p = f_0$  e para tempo de chuva muito grande,  $t \rightarrow \infty$ , o valor de  $f_p$  se aproxima do valor mínimo  $f_c$ , como mostra a Figura 14.

Os três parâmetros da Equação 18, capacidade de infiltração inicial, capacidade de infiltração final e a constante de decaimento exponencial podem ser determinados por medições locais em infiltômetros ou em simuladores de chuva. Para tanto, o valor de  $f_c$  é estimado através de um gráfico representativo da variação da capacidade de infiltração média no tempo. Decidido esse valor, escolhem-se dois pares ordenados de  $f_p$  e  $t$ , os quais, substituídos na Equação 18 formam um sistema de duas equações e duas incógnitas, que quando resolvido simultaneamente, fornecem os valores de  $f_0$  e  $k$ .

**Figura 14 - Variação da capacidade de infiltração com o tempo segundo a equação de Horton**



**Fonte: NAGHETTINI (1997).**

O volume infiltrado (F), pela fórmula de Horton, para um tempo (t) de chuva é dado por:

$$F = \int_0^t f \cdot dt = f_c \cdot t - \frac{f_0 - f_c}{k} (\exp(-kt) - 1) \quad (19)$$

Alguns valores típicos da capacidade de infiltração ao final de 1 hora de precipitação, de alguns tipos de solo, são demonstrados na Tabela 1, valores os quais se aproximam das capacidades finais de infiltração  $f_c$ .

**Tabela 3- Valores típicos da capacidade de infiltração após 1 hora de precipitação**

<b>Tipo de solo</b>	<b>fp (t=1) em mm/h</b>
Infiltração elevada (solos arenosos)	12,50 - 25,00
Infiltração média (solos siltsos)	2,50 - 12,50
Infiltração baixa (solos argilosos)	0,25 - 2,50

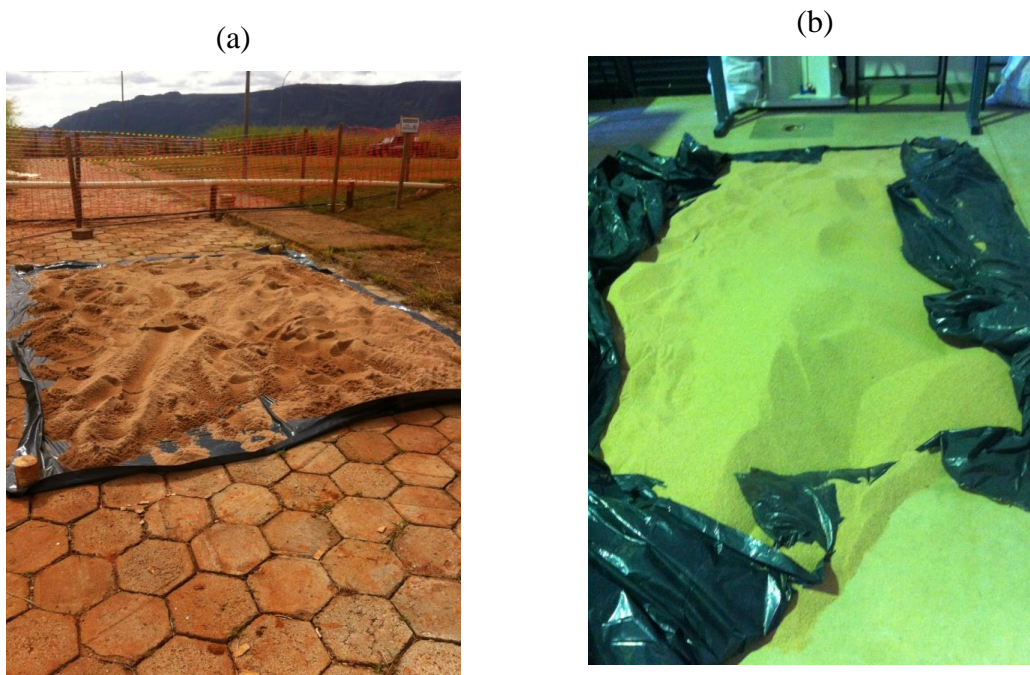
**Fonte: Lencastre & Franco (1984).**

## 4.2. Materiais e métodos

### 4.2.1. Determinação da capacidade de infiltração

A areia média/grossa disponível no laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de São João Del-Rei – Campus Alto Paraopeba, estava com alto teor de umidade, e para a realização do experimento, foi preciso secá-la e diminuir ao máximo a umidade dela para verificar a variação da capacidade de infiltração do solo com a variação da umidade. Para tanto, toda a areia foi espalhada para secagem, até que atingisse um baixo teor de umidade (Figura 15).

Figura 15- (a) Secagem da areia ao sol. (b) Secagem da areia em área coberta



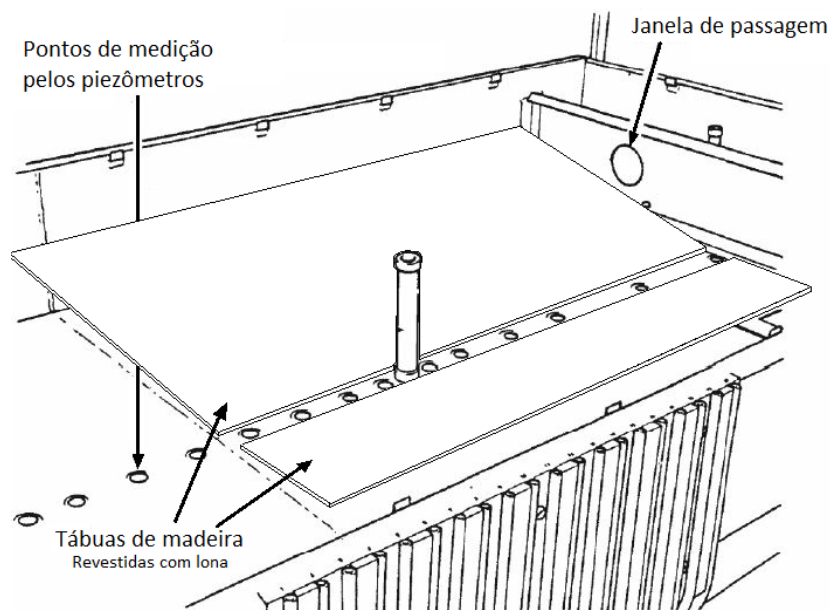
Fonte: Próprio autor.

Para medição dos volumes infiltrados, foram utilizados béqueres e baldes, os quais foram pesados em balanças analíticas. Tais medições foram feitas em intervalos de tempo cronometrados para determinação de vazões.

O método de medição da taxa de infiltração no solo utilizado foi o simulador de chuva. A intensidade de precipitação máxima gerada pela bomba do simulador foi menor que a capacidade de infiltração da areia, não tendo assim escoamento superficial. Por esse motivo, utilizaram-se os piezômetros centralizados longitudinalmente no fundo do simulador para

coleta de volumes de água infiltrada e percolada verticalmente no solo, medidos na unidade de tempo, desta forma foi possível calcular as vazões de infiltração, e com elas, a taxa de infiltração. A inclinação longitudinal do aparato hidráulico foi ajustada para 1% simulando a inclinação eventualmente existente em terrenos naturais, e para que não houvesse acúmulo de água na parte mais baixa do aparelho e não causar leitura errônea de dados, modificou-se a inclinação transversal do fundo (Figura 16) a fim de direcionar a água para os piezômetros, utilizando-se tábuas de madeira e impermeabilizando as bordas com silicone de vedação, onde foram feitas as medições de vazão.

**Figura 16 - Vista esquemática da inclinação transversal do aparato**



**Fonte: Próprio autor.**

Para o cálculo da capacidade de infiltração da areia, os dados coletados em laboratório foram analisados pela equação de Horton.

#### **4.2.2. Determinação do teor de umidade em função do tempo**

Durante uma hora e cinquenta minutos, 30 amostras da camada superficial do solo foram coletadas em três pontos da área de captação, em alguns intervalos de tempo, para determinação da variação da umidade durante a precipitação. As cápsulas utilizadas foram taradas (Figura 17). Após colocar as amostras dentro delas, foram aferidas as massas úmidas, e depois de 24 horas em estufa, foram medidas as massas secas. Com esses dados foram analisadas a variação da umidade com tempo.

**Figura 17 - Amostra de solo para determinação da umidade**



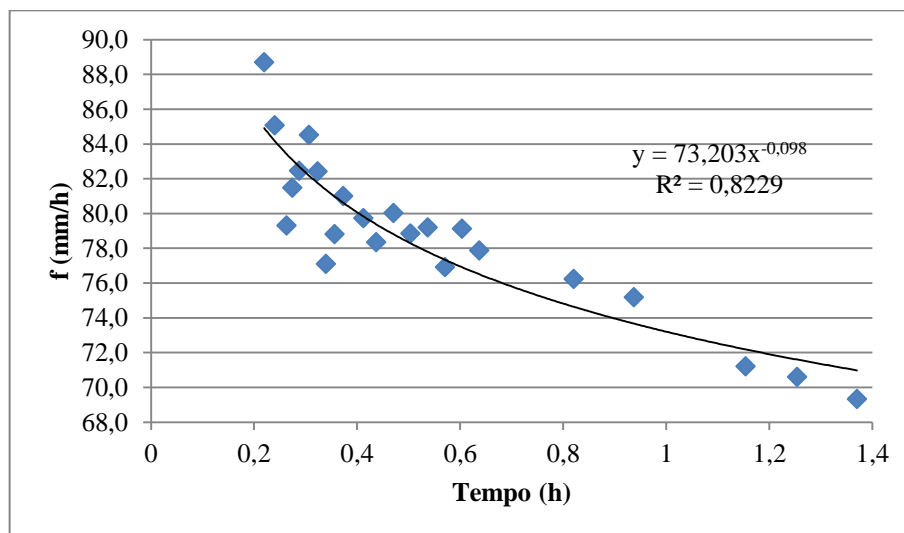
**Fonte: Próprio autor.**

### 4.3. Resultados e discussões

#### 4.3.1. Capacidade de infiltração

Foram medidos no experimento os volumes infiltrados no material granular em determinados intervalos de tempo. De posse desses valores, calcularam-se as vazões de infiltração, as quais divididas pela área de captação da chuva (2,00 m<sup>2</sup>) resultam na taxa de infiltração (f). A Figura 18 apresenta a variação da taxa de infiltração ao longo de 1,37 horas de chuva. Nele, observa-se, como esperado, o decaimento da taxa de infiltração.

Figura 18 - Variação da capacidade de infiltração no tempo



Fonte: Próprio autor.

Estudos realizados pelo SCS (Soil Conservation Service) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos chegaram aos valores de taxa de infiltração que constam na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do solo de acordo com SCS

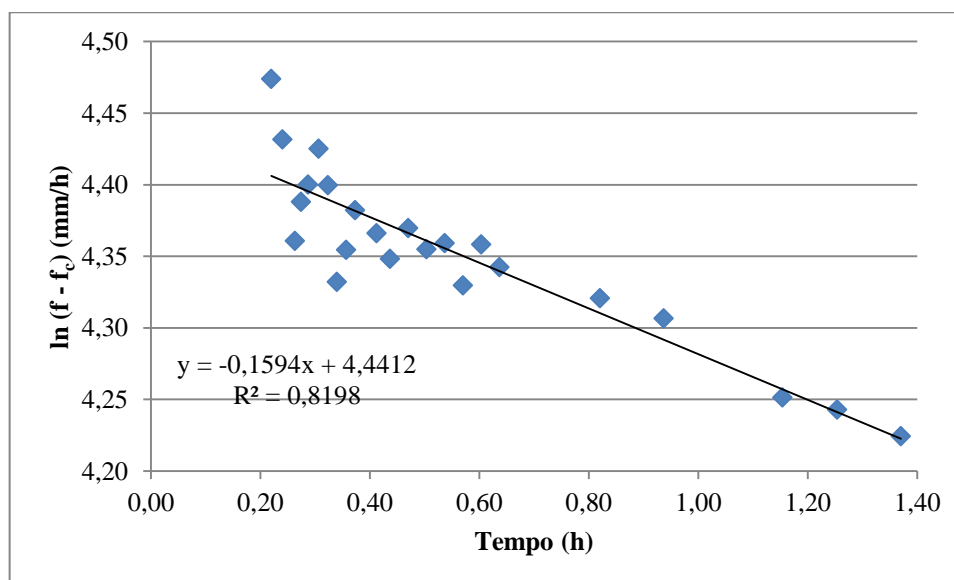
Condições do solo	Classificação do solo (SCS)			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
Taxa de infiltração do solo seco (mm/h)	250	200	130	80
Taxa de infiltração do solo úmido (mm/h)	25	13	7	3



Como pode ser observada na Figura 18, para o material granular praticamente seco, a taxa de infiltração inicial foi de 88,7 mm. Este valor se aproxima do observado na Tabela 4 para o tipo D de solo, sendo este tipo definido com solo compostos por argila plástica, quase impermeável. Esse resultado não é condizente com o tipo de solo utilizado, o qual se aproxima do tipo A, cuja característica é de um solo arenoso muito permeável. Uma possível justificativa para esse resultado é o fato da chuva do simulador se concentrar nas regiões que estão sob os aspersores. Assim, parte da água infiltrada pode ter percolado para as regiões secas que não estavam recebendo água diretamente do aspersor. Logo, parte do volume infiltrado ficou retido no aparelho, não sendo assim medido.

Para se ajustar a equação de Horton, arbitrou-se um valor qualquer para a taxa de infiltração final ( $f_c$ ), e fez a linearização da diferença entre a taxa de infiltração observada ( $f$ ) e a ( $f_c$ ). O resultado é apresentado na Figura 19. Nesta figura, estão apresentados os valores das constantes “a” e “b” da equação da reta, os quais são, respectivamente, -0,1594 e 4,4412. De posse desses valores, obtiveram-se os valores dos coeficientes  $k$  e  $f_0$  da equação de Horton, sendo, respectivamente, 0,1594 e 85, 88 mm/h. Para correção do valor de ( $f_c$ ), o qual foi arbitrado inicialmente, utilizou-se a ferramenta solver do *software Excel*, encontrando-se o valor de 1,00 mm/h.

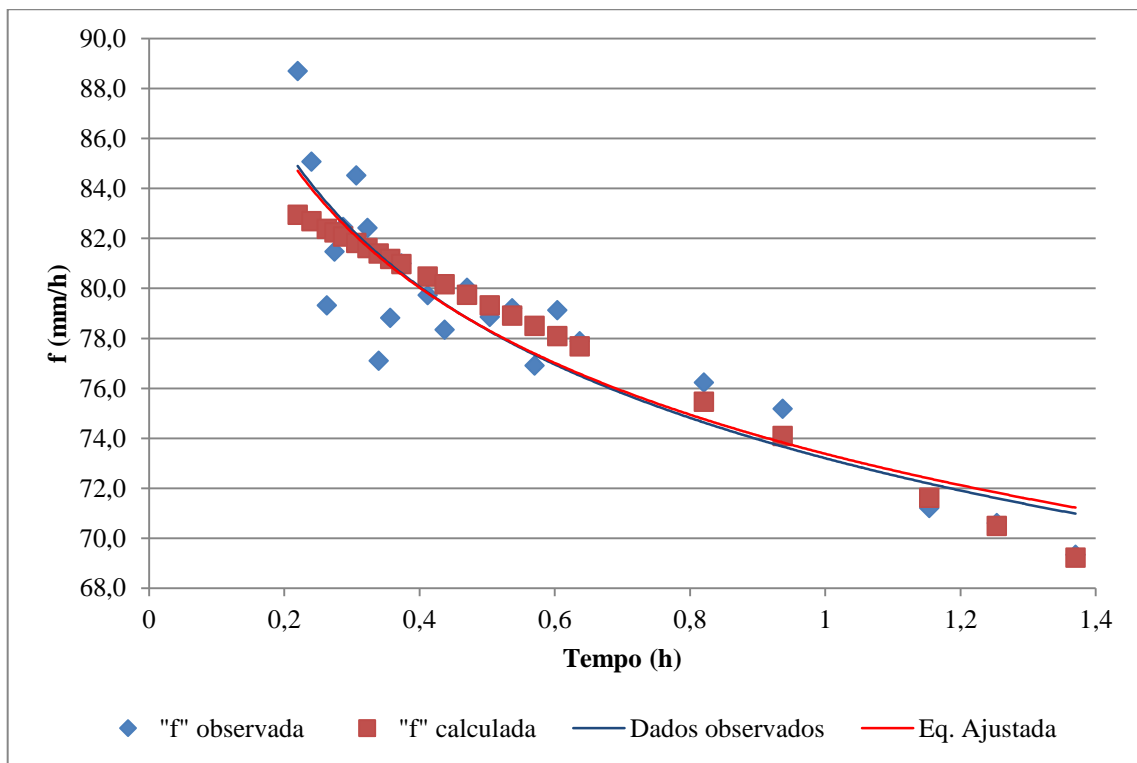
**Figura 19- Determinação dos parâmetros  $f_0$  e  $k$**



**Fonte: Próprio autor.**

Obtidos os valores de todos os parâmetros da equação de Horton, calculou-se os valores teóricos da capacidade de infiltração ( $f$ ) em relação ao tempo, e estes foram comparados com os valores medidos (Figura 20).

**Figura 20 - Comparação da variação da capacidade de infiltração observada e calculada ao longo de 1,37 horas**



**Fonte: Próprio autor.**

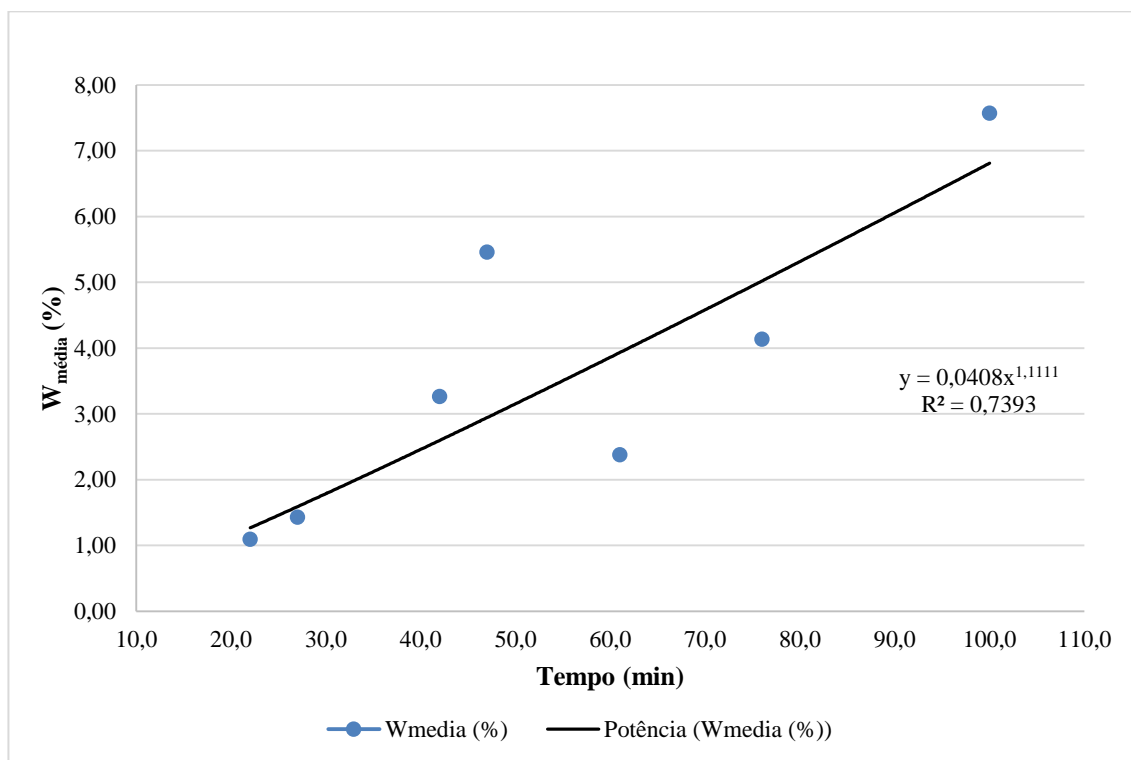
Na Figura 20, observam-se as linhas de tendência para os dados da taxa de infiltração observados experimentalmente e os calculados pela equação de Horton. Observa-se que as duas linhas de tendências praticamente coincidiram, o que pode mostrar que a equação se ajustou bem aos dados.

Os valores de capacidade de infiltração usualmente medidos para uma hora de precipitação em solos arenosos variam de 12,5 a 25,0 mm/h como disposto na Tabela 3. O valor dado pelo gráfico da Figura 20 para uma hora de precipitação é aproximadamente 73,37 mm/h, que se difere consideravelmente dos valores usuais encontrados. Porém, os dados da referida tabela se referem a solos arenosos que possuem em média 70% de areia em relação ao total de partículas sólidas, não sendo este o material utilizado neste trabalho, o qual é composto exclusivamente de areia. A areia como material granular, diferentemente dela como parte de um solo arenoso, possui um alto índice de vazios. Assim, como a percolação da água depois de infiltrada se dá nos vazios existentes no solo, a taxa de infiltração realmente deve ser maior que a encontrada na literatura.

### 4.3.2. Umidade

A Figura 21 apresenta a variação do teor de umidade da camada superficial do material granular ao longo do tempo. Como tem que ser, a umidade das camadas superficiais do material aumentou no decorrer da chuva. Para os dados, ajustou-se uma linha de tendência, sendo sua equação apresentada na figura. Como foram coletadas poucas amostras, a equação não se ajustou bem aos dados, como pode ser observado pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Entretanto, dever-se-ia aplicar um teste estatístico para se concluir se esse baixo valor de  $R^2$  realmente é não significativo, o que comprovaria que a equação não se ajustou bem aos dados.

Figura 21 - Variação da umidade com o tempo de precipitação



Fonte: Próprio autor.

## 5. CONCLUSÃO

Os valores de capacidade de infiltração encontrados no experimento se diferiram consideravelmente dos valores encontrados para comparação. Essa diferença se justifica pelo fato dos materiais também terem diferentes propriedades. Os dados da literatura são referentes a solos arenosos que possuem em média 70% de areia em relação ao total de partículas sólidas, não sendo este o material utilizado neste trabalho, o qual é composto exclusivamente de areia. Como a percolação da água depois de infiltrada se dá nos vazios existentes no solo, a taxa de infiltração no material granular arenoso realmente deve ser maior que a encontrada na literatura.

A diferença nos dados também pode ser resultante de interferência das características do simulador, que mesmo tendo sido considerado teoricamente adequado, percebeu-se que a distribuição da precipitação não é uniforme, pois o raio da superfície do material que recebe chuva é apenas o localizado abaixo do aspersor. E outro provável motivo, são as leituras imprecisas por consequência dos métodos utilizados para tal.

Com estes estudos pode-se fazer a associação da infiltração com as obras de engenharia, estas que causam impacto no ambiente e ao mesmo tempo sofrem consequências desse dano. A infiltração de água natural no solo é inevitavelmente reduzida por meio de obras urbanas, e quando infiltrada, sua trajetória muitas vezes também é interrompida ou alterada por obras como túneis e subsolos. Essas intervenções no meio físico podem intervir no equilíbrio ambiental favorecendo ou não o desenvolvimento sustentável, e respeitando ou desrespeitando as diretrizes de uso e ocupação do solo.

A engenharia, por meio de construções de calçadas, ruas edificações, entre outras obras civis, afeta a capacidade de infiltração natural do solo. Porém sua atuação deve anteceder todas essas intervenções no planejamento e projetando de forma preventiva.

A engenharia portanto, assume papel relevante na preservação da capacidade de infiltração do solo, amenizando problemas socioambientais como erosões, inundações e rupturas de encostas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, D. F.; SILVA, L.D.B. **Hidrologia**. Rio de Janeiro,2006. Disponível em: < <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf> >. Acesso em: 17 jun. 2015.

CARVALHO, J.C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; CARVALHO, E. T. L.; **Tópicos Sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicadas a Solos Tropicais**, Brasília, 2012.

FARIA, C.A.J. et al. **Construção e Calibração De Um Simulador De Chuva Portátil** – Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, n.17; 2013.

FRAGA JUNIOR, E. F. et al. **Validação de Equipamentos para Simulação de Chuvas**. Uberaba, 2008.

HOLTZ, A. C. T. et al. **Hidrologia Básica**. Rio de Janeiro: Edgard Blucher,1978. Disponível em: < <https://www.passeidireto.com/arquivo/3035573/hidrologia-basica> >. Acesso em: 17 jun.2015.

LIMA, L. A.; et al. **O Salpicamento de Latossolos Provocado por Gotas de Chuva**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24, 1993, Goiânia. Resumo expandidos... Goiânia: SBCS, 1993. v. 3, p. 161-162.

NAGHETTINI, M. **Notas de aula de HIROLOGIA APLICADA** (Apostila) Belo Horizonte, Papelaria Oficial 1997.

REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL. Campina Grande, v.3, n.2, p.131-134, 1999.

RIBEIRO, B. T., et al. **Calibração e Uso de Minissimulador de Chuvas para Estudos de Erosão e Poluição do Solo**. Lavras: UFLA, 2007.

TECQUIPMENT. **Manual do usuário do aparato de Hidrologia H313**. 2008.