

ANDRÉ DE OLIVEIRA ALMEIDA

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE INFILTRAÇÃO, PERCOLAÇÃO, RETENÇÃO E
EVAPORAÇÃO EM SOLOS ARENOSOS E RESIDUAIS UTILIZANDO
LISÍMETROS.**

**Guaratinguetá
2012**

ANDRÉ DE OLIVEIRA ALMEIDA

ANÁLISE DOS PROCESSOS DE INFILTRAÇÃO, PERCOLAÇÃO, RETENÇÃO E
EVAPORAÇÃO EM SOLOS ARENOSOS E RESIDUAIS UTILIZANDO LISÍMETROS.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^o Dr^o George de Paula Bernardes

Guaratinguetá
2012

A44
7a Almeida, André de Oliveira
Análise dos processos de infiltração, percolação, retenção e evaporação em solos arenosos e residuais / André de Oliveira Almeida – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
65 f. : il.

Bibliografia : f. 64-65

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes

1. Solos arenosos 2. Infiltração 2. Percolação I. Título

CDU 624.131.21

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE INFILTRAÇÃO, PERCOLAÇÃO,
RETENÇÃO E EVAPORAÇÃO EM SOLOS ARENOSOS E RESIDUAIS
UTILIZANDO LISÍMETROS.**

ANDRÉ DE OLIVEIRA ALMEIDA

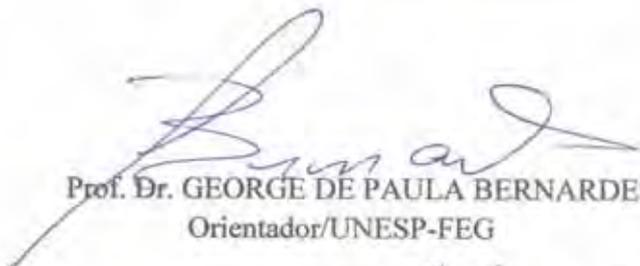
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUANDO EM ENGENHARIA CIVIL"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

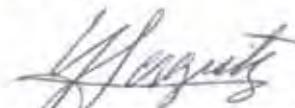


Prof. Dr. YSUMI TAGUTI
Coordenador

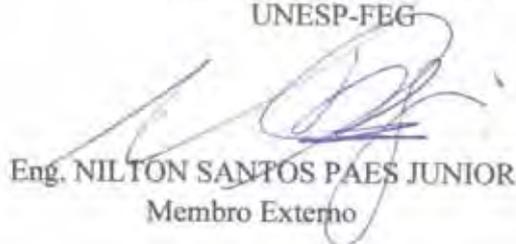
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. YSUMI TAGUTI
UNESP-FEG



Eng. NILTON SANTOS PAES JUNIOR
Membro Externo

Dezembro 2012

DADOS CURRICULARES

ANDRÉ DE OLIVEIRA ALMEIDA

NASCIMENTO	14.02.1990 – ITAJUBÁ / MG
FILIAÇÃO	Antonio Doniseti de Almeida Fátima Maria de Oliveira Almeida
2008/2012	Curso de Graduação Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá.

aos meus pais que sempre fizeram tudo ao alcance deles para que
eu pudesse realizar um sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo o que Ele me proporcionou.

Agradeço aos meus pais pelo grande esforço feito, por eu nunca ter passado necessidades e por ter acreditado que eu sou capaz. Agradeço as minhas irmãs pela ajuda e pelas preocupações durante a graduação.

Agradeço a minha namorada por ter passado esses últimos cinco anos comigo e aos meus amigos que sempre estavam prontos para uma palavra amiga.

Agradeço ao meu professor orientador pela oportunidade e auxílio.

ALMEIDA, A. O. Análise dos processos de infiltração, percolação, retenção e evaporação em solos arenosos e residuais utilizando lisímetros. 2012. 65 f. Trabalho de Graduação (Graduando em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A mobilidade da água no solo é um processo difícil de ser quantificado. Durante uma chuva, existe uma parcela da água que infiltra, sendo esta muito importante para recuperação do equilíbrio das águas subterrâneas. Esse trabalho estuda a mobilidade de água em solos arenosos e residuais com diferentes granulometrias através de experimentos montados em lisímetros. Os lisímetros foram montados em cilindros de acrílico com 11,3 cm de diâmetro e 25,0 cm de altura, a areia foi depositada pelo processo “sand rain”. Nos ensaios foi mantida uma carga hidráulica de dois centímetros acima do solo com o auxílio de um frasco de Mariotte. As parcelas de água foram avaliadas nos experimentos através de relações entre peso e volume medidas ao longo do tempo. Os dados foram obtidos monitorando os volumes de entrada e saída de água através de reservatórios calibrados e o peso do sistema por uma balança eletrônica. A frente de infiltração foi monitorada com o auxílio de uma câmera filmadora. Os resultados indicam que, quanto menor a granulometria da areia, menor a velocidade da frente de saturação, maior o volume retido, menor a taxa básica de infiltração e menor a velocidade de percolação. Por outro lado, a taxa de perda de massa de água no processo de evaporação, não apresentou diferença significativa com a variação da granulometria das amostras.

PALAVRAS-CHAVE: Infiltração, retenção, percolação, evaporação, solo arenoso, solo residual, lisímetro.

ALMEIDA, A. O. Analysis of the processes of infiltration, seepage, evaporation and retention in sandy soils and residual soils using lysimeters. 2012. 65 f. Graduate Work (Graduate in Civil Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The mobility of water in the soil is a difficult process to be quantified. During precipitation, there is a portion of the water that infiltrates, which is very important for recovering the groundwater balance. This work studies the mobility of water in sandy soils with different textures and residual soils through experiments mounted in lysimeters. The lysimeters were mounted on acrylic cylinder with 11.3 cm diameter and 25.0 cm in length. The sand was deposited using the process "sand rain". In the tests it was maintained a hydraulic head of two centimeters above the surface with the aid of a Mariotte flask. The portions of water were controlled in the experiments using relations between weight and volume measurements over time. The data were obtained by monitoring the input and output volumes of water through calibrated reservoir and system weight by an electronic balance. The infiltration front was monitored with the aid of a digital camera. The results indicate that the smaller the particle size of the sand, the lower the speed of the saturation front, the higher the retained volume, the smaller the basic rate of infiltration and the lowest speed of percolation. Moreover, the rate of water loss in the evaporation process indicated no significant difference with variation of the particle size of the samples.

KEYWORDS: Infiltration, retention, seepage, evaporation, sandy soil, residual soil, lysimeter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um lisímetro utilizado em ensaio de campo (Fonte: SKAGGS et al., 2006).....	17
Figura 2 - Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração (Fonte: Autor).....	18
Figura 3 - Exemplificação do experimento de Green-Ampt (1911) (Fonte: Autor).....	21
Figura 4 - Gráfico Ilustrativo da teoria de Horton (1940) (Fonte: Autor).....	24
Figura 5 - Ensaio em permeâmetro de carga constante (Fonte: Autor).....	25
Figura 6 - Figura esquemática do processo de capilaridade (Fonte: Autor).....	27
Figura 7 - Montagem do lisímetro (Fonte: Autor).....	30
Figura 8 - Ilustração dos reservatórios (Fonte: Autor).....	31
Figura 9 - Esquema do Ensaio (Fonte: Autor).....	33
Figura 10 - Foto do equipamento (Fonte: Autor).....	33
Figura 11 - Disposição dos corpos de prova (Fonte: Autor).....	34
Figura 12 - Watermark (Fonte: Autor).....	34
Figura 13 - Exemplo do avanço da frente de umedecimento (Fonte: Autor).....	35
Figura 14 – Posição da frente de umedecimento para o lisímetro 01 (Fonte: Autor) ..	36
Figura 15 – Posição da frente de umedecimento para o lisímetro 02 (Fonte: Autor) ..	37
Figura 16 - Resultado da infiltração para o lisímetro 03 (Fonte: Autor).....	38
Figura 17 - Resultado da infiltração para o lisímetro 04 (Fonte: Autor).....	38
Figura 18 - Resultado da infiltração para o lisímetro 05 (Fonte: Autor).....	39
Figura 19 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 01.....	41
Figura 20 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 02.....	42
Figura 21 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 03.....	43
Figura 22 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 04.....	44
Figura 23 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 05.....	45

Figura 24 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 01 (Fonte: Autor).....	47
Figura 25 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 02 (Fonte: Autor).....	47
Figura 26 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 03 (Fonte: Autor).....	48
Figura 27 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 04 (Fonte: Autor).....	49
Figura 28 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 05.....	49
Figura 29 - Gráfico de Horton para o lisímetro 01.....	51
Figura 30 - Gráfico de Horton para o lisímetro 02.....	51
Figura 31 - Gráfico de Horton para o lisímetro 03.....	52
Figura 32 - Gráfico de Horton para o lisímetro 04.....	52
Figura 33 - Gráfico de Horton para o lisímetro 05.....	52
Figura 34 - Volume de água no sistema para o lisímetro 01 (Fonte: Autor).....	53
Figura 35 - Volume de água no sistema para o lisímetro 02 (Fonte: Autor).....	54
Figura 36 - Volume de água no sistema para o lisímetro 03 (Fonte: Autor).....	54
Figura 37 - de água no sistema para o lisímetro 04 (Fonte: Autor).....	54
Figura 38 - Volume de água no sistema para o lisímetro 05 (Fonte: Autor).....	55
Figura 39 - Disposição das amostras para secagem (Fonte: Autor).....	56
Figura 40 - Corpo de prova com a camada superior seca (Fonte: Autor).....	57
Figura 41 - Variação da Temperatura durante o processo de evaporação (Fonte: Autor).....	57
Figura 42 - Evaporação para o lisímetro 01 (Fonte: Autor).....	58
Figura 43 - Evaporação para o lisímetro 02 (Fonte: Autor).....	58
Figura 44 - Evaporação para o lisímetro 03 (Fonte: Autor).....	58
Figura 45 - Evaporação para o lisímetro 04 (Fonte: Autor).....	59
Figura 46 - Resultado segundo Linacre (1977) (Fonte: Autor).....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação das amostras arenosas	29
Tabela 2 – Propriedades físicas das amostras de solo arenoso.....	35
Tabela 3 - Propriedades físicas da amostra de solo residual	35
Tabela 4 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 01	36
Tabela 5 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 02.....	37
Tabela 6 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 03.....	37
Tabela 7 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 04.....	38
Tabela 8 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 04.....	39
Tabela 9 - Parâmetros da amostra 01 para calculo de Green-Ampt (1911)	40
Tabela 10 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 01.....	40
Tabela 11 - Parâmetros da amostra 02 para calculo de Green-Ampt (1911)	41
Tabela 12 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 02.....	42
Tabela 13 - Parâmetros da amostra 03 para calculo de Green-Ampt (1911)	42
Tabela 14 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 03.....	43
Tabela 15 - Parâmetros da amostra 04 para calculo de Green-Ampt (1911)	43
Tabela 16 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 04.....	44
Tabela 17 - Parâmetros da amostra 05 para calculo de Green-Ampt (1911)	44
Tabela 18 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 05.....	45
Tabela 19 - Taxa de infiltração para o lisímetro 01	46
Tabela 20 - Taxa de infiltração para o lisímetro 02	47
Tabela 21 - Taxa de infiltração para o lisímetro 03	48
Tabela 22 - Taxa de infiltração para o lisímetro 04	48
Tabela 23 - Taxa de infiltração para o lisímetro 05	49
Tabela 24 - Equações geradas pelo método dos mínimos quadrados	50
Tabela 25 - Parâmetros para a equação de Horton (1940)	50
Tabela 26 - Equações de Horton (1940).....	51
Tabela 27 - Propriedades hidráulicas das amostras de solo arenoso.....	55
Tabela 28 - Propriedades hidráulicas das amostras de solo residual.....	56
Tabela 29 - Índices de Evaporação.....	59
Tabela 30 - Resultados segundo Linacre (1977).....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVO.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
	3.1 Classificação do solo.....	16
	3.2 Lisímetro.....	17
	3.3 Processo de Infiltração.....	18
	3.3.1 Darcy.....	20
	3.3.2 Green-Ampt.....	21
	3.3.3 Horton.....	23
	3.4 Percolação.....	24
	3.5 Evaporação.....	26
4	METODOLOGIA.....	29
	4.1 Escolha e preparo do solo.....	29
	4.2 Construção dos Lisímetros.....	30
	4.3 Construção dos Reservatórios.....	31
	4.4 Características físicas e hidráulicas das amostras.....	31
	4.5 Ensaio.....	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
	5.1 Propriedades físicas das amostras.....	35
	5.2 Infiltração.....	35
	5.3 Taxa de Infiltração.....	46
	5.4 Percolação.....	53
	5.5 Evaporação.....	56
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

A interferência antrópica no meio ambiente e a ocupação e utilização inadequada do meio físico vêm gerando a insustentabilidade dos recursos naturais (SANTOS et al., 2007). Dentro desse contexto, a compreensão dos processos hidrológicos é fundamental para que se avance nos estudos ambientais, na gestão dos recursos hídricos, no planejamento urbano e em projetos de obras hidráulicas. O tempo de residência da água nos diversos compartimentos da hidrosfera influencia, entre outros, na disponibilidade hídrica, na ocorrência de desastres como escorregamentos e inundações e na dinâmica de elementos como nutrientes e poluentes (MORAES et al., 2003).

O processo de infiltração corresponde à penetração da água no solo, através da superfície do terreno, da água proveniente da precipitação, que se move para o interior do solo sob a ação da gravidade, até atingir uma camada suporte, que a retém, gerando com isso um armazenamento de água no solo (PINTO et al., 1976).

Segundo Pereira et al. (1997), cada tipo de solo apresenta uma capacidade de armazenamento ou retenção (Capacidade de Campo) específica. Assim, as propriedades físicas do solo, em especial, a textura e estrutura granular, podem afetar significativamente a sua Capacidade de Campo. Solos com textura mais fina, em função da sua maior superfície específica, retêm maior quantidade de água se comparados aos solos de textura mais grossa. Além disso, o conteúdo de água no solo é função do tamanho e do volume dos seus poros, estando a umidade intimamente relacionada à pressão capilar (TUCCI, 1993).

Segundo Kirkhan et al (1984) in Carvalho et al (2007), os lisímetros são estruturas destinadas a medir, de maneira precisa, eventos de precipitação, evaporação e drenagem. De acordo com Faria et al (2006), dentre os vários métodos de medida de água no solo disponíveis, os lisímetros são utilizados para a determinação da evaporação ou evapotranspiração pelo balanço de massa ou volume de água e são considerados padrões para aferição dos demais.

Os lisímetros consistem de tanques contendo solo representativo da área de interesse, e são utilizados, sobretudo para medir os componentes do balanço de água no sistema solo-planta-atmosfera, sob tratos culturais e condições climáticas específicas (Faria et al, 2006).

Visando entender este mecanismo, este trabalho procurou quantificar, em escala laboratorial, as diferentes parcelas de água em função da granulometria de um solo arenoso e uma amostra de solo argiloso. As propriedades de infiltração, percolação, retenção e evaporação de água dependem das propriedades físicas das amostras e da água, assim como,

da condição de saturação do solo. Essas características de mobilidade e retenção de água foram determinadas em laboratório com o auxílio de lisímetro.

2 OBJETIVO

Este trabalho teve por objetivo, estudar o processo de infiltração, retenção e percolação em amostras de solo arenoso com diferentes granulometrias e uma amostra de solo residual através de experimentos montados em lisímetros. As parcelas de água foram avaliadas nos experimentos através de relações entre peso e volume.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Classificação do solo

A classificação do solo é um passo importante para a determinarmos dos parâmetros a serem utilizados nas análises e para interpretação dos resultados esperados. Segundo Pinto (2006) a classificação do solo baseia-se parâmetros físicos, jamais poderá ser uma informação mais completa do que os próprios parâmetros que o levaram a serem classificados. Ainda segundo Pinto (2006) quando um tipo de solo é citado, é necessário que a designação seja entendida por todos, ou seja, é necessário que exista um sistema de classificação.

Para o ponto de vista da engenharia, dois métodos de classificação são mais utilizados, o sistema de classificação AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Offices*) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos. Segundo Braja (2007) ambos os sistemas tem com base a textura e a plasticidade do solo e dividem o solo em duas categorias principais, de grãos finos e grossos quando separados na peneira #200.

O sistema de classificação AASHTO foi desenvolvido nos Estados Unidos da América como o sistema da Administração de Estradas Públicas. Esse método divide os tipos de solo em sete grupos, onde os três primeiros grupos representam solos granulares e os quatro últimos representam solos argilo-siltosos. Esse sistema tem com base os critérios o tamanho do grão e a plasticidade.

O Sistema unificado de Classificação de Solos na sua versão original foi proposto por Casagrande em 1942 com revisão em 1952. Esse sistema divide os solos em dois grandes grupos, o primeiro é o de solos de grãos grossos e o segundo é o de grãos finos.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados quatro amostra de solo granular separadas em um jogo de peneira composta pelas peneiras #16 (diâmetro 1,900 mm), #40 (diâmetro 0,420 mm), #50 (diâmetro 0,294 mm), #100 (diâmetro 0,147 mm) e #200 (diâmetro 0,074 mm) e uma amostra de solo residual.

A areia ou solo granular tem como principal componente o quartzo, quando apresenta granulometria maior possui a designação de seixo ou pedregulho. Outra forma de classificação é seu formato, podendo ser mais arredondados ou angulares. Essas características influenciam significativamente nas propriedades mecânicas, pois interferem na interação entre os elementos.

O solo residual ou solo silte-argiloso possui mais complexidade na sua classificação. Segundo Pinto (2006) são os índices de consistência que melhor indicam o comportamento argiloso.

3.2 Lisímetro

O lisímetro é um equipamento muito usado para o estudo de evapotranspiração de culturas diversas de plantas. Segundo Campeche (2002) esse equipamento vem sendo usado há três séculos para o estudo da relação água, solo e planta. Na figura 01 está representado um lisímetro utilizado em estudos agrícolas.

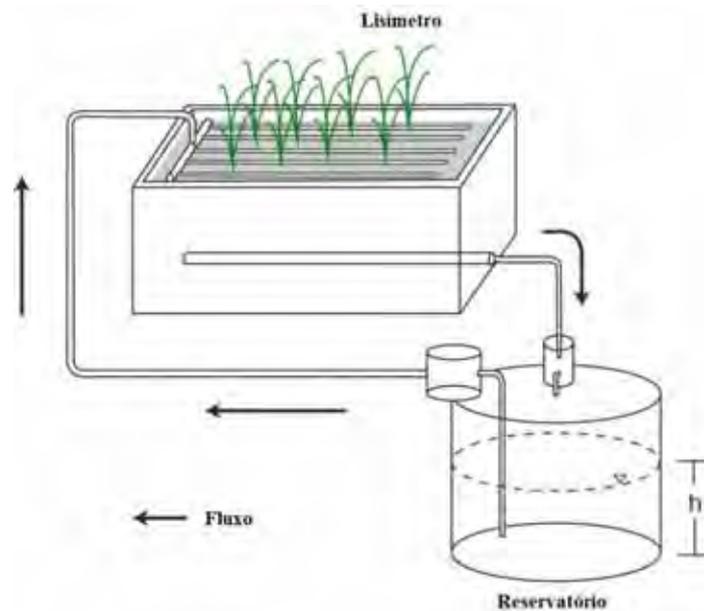


Figura 1 - Esquema de um lisímetro utilizado em ensaio de campo (Fonte: SKAGGS et al., 2006)

O equipamento, simples e de fácil manuseio, consiste de um corpo onde é colocado o solo e, posteriormente é colocada quantidade de água pré-estabelecida, na parte inferior do equipamento, há um reservatório graduado que capta a água percolada.

O lisímetro é baseado no sistema de ganho e perda de massa, podendo assim determinar as diferentes parcelas do processo de infiltração no solo, podendo ser adaptado para cada finalidade desejada.

3.3 Processo de Infiltração

O processo de infiltração se efetua quando após os eventos chuvosos, parte da água chega até a superfície do terreno, atravessando a vegetação direta ou indiretamente e penetrando no solo (MOLINARI, 2005).

Segundo Brandão (2006) “A Infiltração é um processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo. A modelagem deste processo é de grande importância prática, pois a taxa de infiltração da água no solo é um dos fatores que mais influenciam o escoamento superficial, responsável por processos indesejáveis, como a erosão e as inundações”.

Quando em processo de infiltração, o solo apresenta a configuração do perfil de umedecimento apresentado na figura 02.

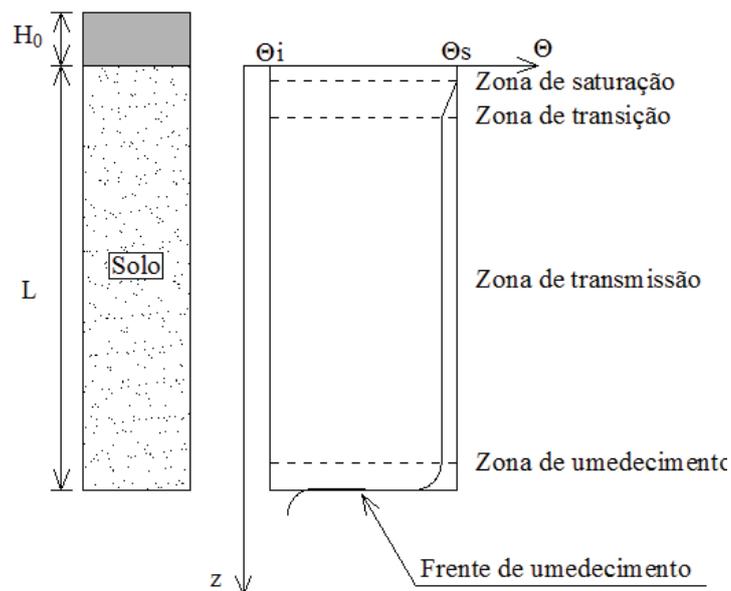


Figura 2 - Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração (Fonte: Autor)

Onde:

- **Zona de saturação** localiza-se logo abaixo da carga hidráulica. Essa camada tem espessura de aproximadamente 1,5 cm e apresenta-se no estado saturado (BRANDÃO, 2006);
- **Zona de transmissão** é uma camada com aproximadamente 5 cm onde há um decréscimo acentuado da umidade (BRANDÃO, 2006);

- **Zona de transmissão** é a região onde a água é transmitida para a região de menor teor de umidade sem apresentar uma espessura determinada (BRANDÃO, 2006);
- **Zona de umedecimento** é uma camada normalmente estreita com grande redução na umidade com o aumento da profundidade (BRANDÃO, 2006).
- **Frente de umedecimento** compreende uma pequena região na qual existe um grande gradiente hidráulico, havendo uma variação bastante abrupta da umidade. A frente de umedecimento representa o limite visível da movimentação de água no solo (CARVALHO, 2006).

Para quantificar a infiltração no solo é importante conhecer a umidade inicial, com isso a infiltração acumulada é conhecida e será igual ao volume de água infiltrado no solo por unidade de área, como mostrado na equação 01.

$$I = \int_0^z (\theta - \theta_i) dz \quad (01)$$

Onde:

- z - distância do fluxo;
- θ - umidade volumétrica ao longo da profundidade z ; e
- θ_i - umidade volumétrica presente no solo antes do início da infiltração.

A frente de infiltração f é definida como a lâmina de água (volume por unidade de área) que atravessa a superfície do solo por unidade de tempo, representando, portanto, a taxa de variação da infiltração acumulada ao longo do tempo, conforme apresentado na equação 02.

$$f = \frac{dI}{dt} \quad (02)$$

3.3.1 Darcy

Segundo Carvalho e Silva (2006) em um solo não-saturado o movimento da água pode ser descrito pela relação de Darcy segundo a equação 03.

$$q = -K_0 \frac{\partial H}{\partial z} \quad (03)$$

Onde:

- q – densidade de fluxo;
- K_0 – condutividade hidráulica do solo saturado;
- H – potencial total da água no solo; e
- z – profundidade.

A relação $\frac{\partial H}{\partial z}$ representa o gradiente hidráulico que quantifica a dificuldade da água de transpor o solo. O sinal negativo mostra que o fluxo vai do maior potencial para o de menor potencial.

Quando o solo se encontra em estado não-saturado a aplicação da equação de Darcy implica que haja uma variação no gradiente hidráulico do solo. Essa variação deve-se ao potencial total da água no solo, que é representada na equação 04.

$$H = \Psi + Z \quad (04)$$

Onde:

- Ψ – potencial matricial da água no solo; e
- Z – potencial gravitacional da água no solo.

Nessa condição temos:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial(\Psi + Z)}{\partial z} \quad (05)$$

Onde, $K(\theta)$ representa a condutividade hidráulica do solo para um teor de umidade θ .

3.3.2 Green-Ampt

O modelo desenvolvido por Green-Ampt (1911) é um dos mais empregados para o estudo da infiltração em solos. Este é baseado no modelo de Darcy, admitindo-se as seguintes considerações:

- Carga hidráulica constante (H_0);
- Perfil do solo homogêneo e infinito;
- Frente de umedecimento abrupta;
- Potencial de água no solo, na frente de umedecimento, constante no tempo e ao longo da profundidade considerada; e
- Perfil de umidade do solo saturado desde a superfície até a profundidade da frente de umedecimento. Abaixo desta profundidade o solo é considerado com umidade e potencial matricial constantes, iguais às condições anteriores ao início da infiltração.

Na figura 04 está ilustrada a distribuição da umidade proposta por Green-Ampt (1911).

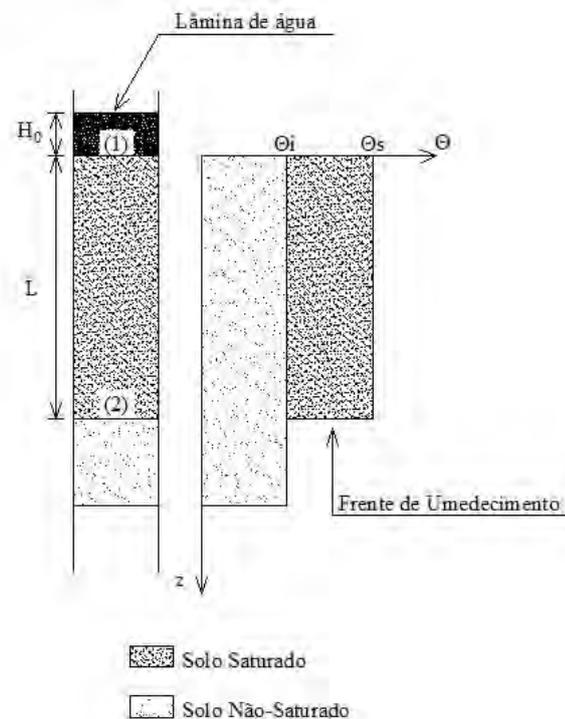


Figura 3 - Exemplificação do experimento de Green-Ampt (1911) (Fonte: Autor)

- Acima está presente a lamina de água de altura H_0 (carga hidráulica);
- Abaixo está o amostra que está dividida em solo saturado e não-saturado;

- No ponto (1) é a região de maior saturação porque o solo está em contato direto com a lamina d'água (Zona de Saturação);
- No ponto (2) é a região de expansão da zona de umedecimento. Região essa mostra a zona de transição entre o solo saturado e não-saturado e;
- Entre os pontos (1) e (2) está presente a zona de transmissão. Nessa região o solo já apresenta características de percolação constantes.

Segundo Brandão (2006), Green-Ampt (1911) determinou sua teoria baseando-se nas seguintes condições de contorno utilizando o plano da superfície do solo como referência:

$$\Psi_{t1} = z_1 + \Psi_{m1} + \Psi_{p1} = 0 + 0 + H_0 = H_0 \quad (06)$$

$$\Psi_{t2} = z_2 + \Psi_{m2} + \Psi_{p2} = -L + \Psi_f + 0 = -L + \Psi_f \quad (07)$$

Onde:

- Ψ_t – potencial total de água no solo;
- Ψ_m – componente matricial do potencial total;
- Ψ_p – componente de pressão do potencial total;
- L – profundidade da frente de umedecimento; e
- Ψ_f – potencial matricial da frente de umedecimento.

Para facilitar, o potencial matricial da frente de umedecimento deve ser considerado igual ao inicial que também é igual ao potencial logo abaixo da frente. Logo o gradiente de potencial, ao longo da profundidade z entre os pontos 1 e 2 pode ser escrito conforme a equação 08.

$$\frac{\Delta\Psi_z}{\Delta z} = \frac{\Psi_{t2} - \Psi_{t1}}{L} = \frac{-L + \Psi_f - H_0}{L} \quad (08)$$

Então o fluxo será;

$$q = -K_z \left(\frac{-L + \Psi_f - H_0}{L} \right) \quad (09)$$

Igualando-se (q) a taxa de infiltração (f), tem-se:

$$f = \frac{dI}{dt} = -K_s \left(\frac{-L + \Psi_f - H_0}{L} \right) \quad (10)$$

Como o valor da carga hidráulica é muito pequena comparada ao potencial gravitacional e matricial, pode-se considerar $H_0 = 0$ e os valores de potencial matricial são sempre negativos. Reorganizando a equação 10, temos;

$$f = K_s \left(\frac{L + \Psi_f}{L} \right) = K_s \left(1 + \frac{\Psi_f}{L} \right) \quad (11)$$

Integrando a equação 01 em L, temos a seguinte equação:

$$I = L (\theta_s - \theta_i) \quad (12)$$

Explicitando L na equação 12, e substituindo na equação 11, temos a formulação para o calculo da taxa de infiltração (equação 13).

$$f = K_s \left(1 + \Psi_f \frac{(\theta_s - \theta_i)}{I} \right) \quad (13)$$

Integrando-se a equação 13 em t, obtemos a infiltração acumulada, conforme a equação 14.

$$I(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (14)$$

3.3.3 Horton

Horton (1940) estudou a velocidade de avanço da frente de umedecimento em solos. O mesmo percebeu que a frente de infiltração, independentemente do solo, apresenta o mesmo comportamento de uma equação exponencial com expoente negativo que tende a um valor

constante diferente de zero. Esse valor, Fetter (1994) descreve que se aproxima da capacidade máxima de infiltração como pode ser visto na figura 04 e na equação 15.

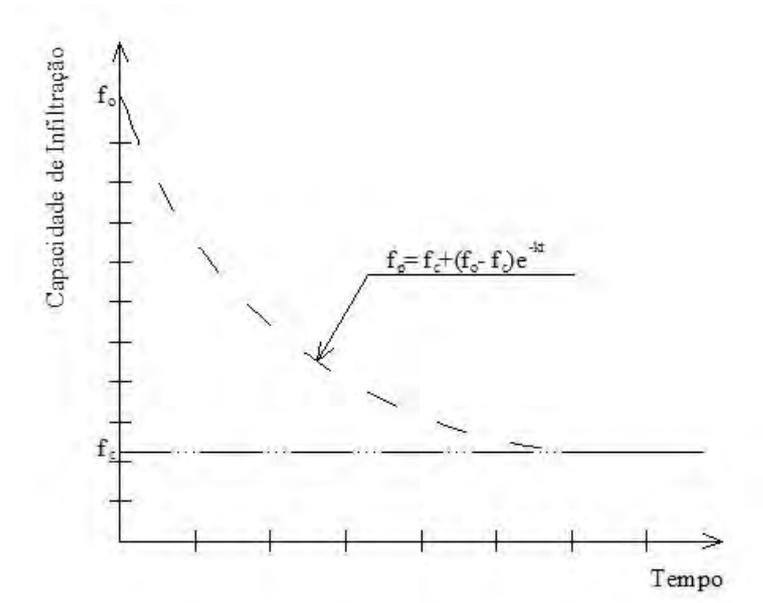


Figura 4 - Gráfico Ilustrativo da teoria de Horton (1940) (Fonte: Autor)

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\beta t} \quad (15)$$

Onde:

- f_p – Capacidade de infiltração em um determinado tempo;
- f_c – Capacidade de infiltração em equilíbrio (máxima);
- f_0 – Capacidade de infiltração inicial; e
- β – Constante que representa a taxa de decaimento da capacidade de infiltração.

3.4 Percolação

Após atingir a capacidade máxima de infiltração e o solo estiver saturado, a velocidade de infiltração passa a ser constante onde conseguimos determinar os parâmetros hidráulicos de percolação.

Para determinar as propriedades hidráulicas do solo, a lei mais utilizada é a Lei de Darcy para solos saturados. Darcy, em 1850, através de ensaios montados em permeâmetro,

figura 05, verificou como os diversos fatores geométricos influenciavam a vazão da água. Esses fatores geraram a equação representada pela equação 02 (PINTO, 2006).

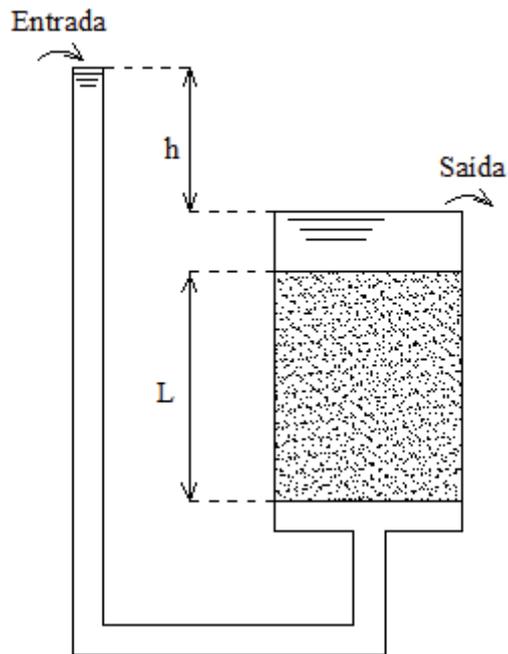


Figura 5 - Ensaio em permeâmetro de carga constante (Fonte: Autor)

$$Q = K_s \frac{h}{L} A \quad (16)$$

Onde:

- Q – vazão;
- K_s – coeficiente de permeabilidade do solo saturado;
- h – carga hidráulica;
- L – comprimento da amostra; e
- A – seção transversal do solo.

A relação h por L é chamada de gradiente hidráulico expresso pela letra i .

$$i = \frac{h}{L} \quad (17)$$

Substituindo a equação 17 na 16 tem-se:

$$Q = K_p i A \quad (18)$$

A vazão dividida pela área indica a velocidade com que a água sai do solo, A velocidade v é chamada de velocidade de percolação. Então a lei de Darcy fica expressa segundo a equação 19.

$$v = ki \quad (19)$$

3.5 Evaporação

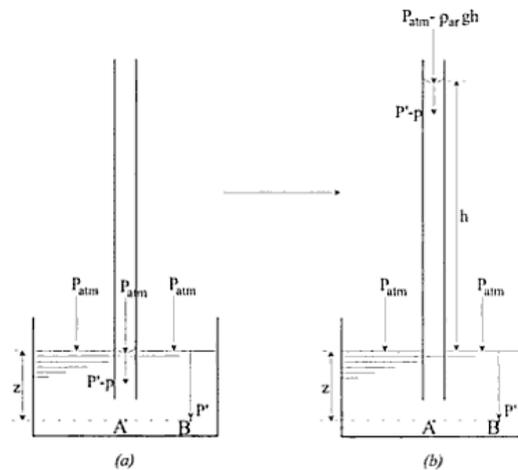
A evaporação assim como os demais processos faz parte do processo hidrológico. A água passa do estado líquido para o gasoso com o ganho de energia vinda tanto de fontes naturais como artificiais.

Quaglia (2005) divide o processo de evaporação em três etapas bem definidas:

1. Na primeira etapa o processo é dependente das condições externa ao solo, essa etapa é denominada estágio de evaporação potencial. A superfície do solo possui grande disponibilidade de água e são expostas as condições ambientais. Essa fase se finaliza quando se inicia a resistência da água a evaporação.
2. Na segunda etapa os fatores climáticos já não são os principais fatores. Nessa fase que mais se destacam são as propriedades físicas da amostra. Essa fase é denominada estágio de evaporação real, quando já não existe suficiente disponibilidade de água no solo. Na maioria dos casos a evaporação real é menor que a evaporação potencial.
3. A terceira fase ocorre quando o movimento da água está muito lento e uma condutividade hidráulica muito baixa. A evaporação torna-se, portanto, totalmente dependente das propriedades do solo.

A evaporação em solos é um assunto pouco estruturado devido ao grande número de variáveis que existem para influenciar o processo. Um fenômeno ligado ao próprio solo e não ao tempo é o fenômeno da capilaridade.

Segundo Pinto (2006) a capilaridade consiste no processo de ascensão do fluido, no caso a água, até uma determinada altura. A altura de ascensão capilar pode ser determinada igualando-se o peso da água no tubo com a resultante da tensão superficial que a mantém nesta posição acima do nível d'água livre, conforme visto na figura 04.



Ascensão da água num tubo capilar: (a) formação do menisco côncavo, (b) ascensão.

Figura 6 - Figura esquemática do processo de capilaridade (Fonte: Autor)

No solo, o efeito da capilaridade é constante, ele se dá pelo fato de haver vazios entre os grãos gerando tubos. Esses tubos servem como dutos por onde a água sobe até atingir a altura de ascensão capilar, podendo deixar o solo.

Esse processo auxilia no processo de evaporação, pois leva a água de camadas inferiores até a superior, onde pode sofrer os efeitos climáticos como a radiação; para poder evaporar-se. Caracterizando assim o estágio de evaporação real.

Linacre (1977) após vários experimentos chegou a uma modelação para o processo de evaporação que correlaciona fatores ambientais locais e o posicionamento geográfico da estação para estimar a evaporação (equação 08). Essa modelagem propõe um comportamento linear para a evaporação, independentemente do tipo e das propriedades físicas do solo.

$$E = \frac{\frac{K T_m}{(100 - A)} + 15(T - T_a)}{80 - T} \quad (20)$$

Onde:

- K – constante correlacionada com o processo de evaporação;
- $T_m = (T + 0,006h)$;
- T – temperatura média;
- h - elevação da estação;
- A – latitude da estação; e
- T_d – temperatura do ponto de orvalho.

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada foi desenvolvida baseada em experimentos já existentes para permeabilidade e em algumas observações feitas em laboratório. Cunha e Guerra (1996) no ensaio de infiltração em cilindro demonstrou que para determinar a permeabilidade de um solo é preciso saber as dimensões do corpo cilíndrico e a quantidade de água no sistema.

Cunha e Guerra (1996) no ensaio de infiltração simula o empoçamento no solo proporcionando uma carga constante de água, que no caso é de 2,0 cm. Essa lâmina é mantida com a regulação da água que sai de uma bureta. Esse ensaio é realizado sobre o solo sem o controle da velocidade da frente de infiltração e também da sua dispersão.

Para o presente estudo, com o propósito de controlar a frente de infiltração, o ensaio é desenvolvido em um lisímetro que fica disposto em cima de uma balança para ter o controle da entrada, saída e da retenção de água. A entrada de água é controlada por um reservatório superior equipado com um frasco de *Mariotte*.

4.1 Escolha e preparo do solo

Os solos foram escolhidos aleatoriamente, pois o propósito não era estudar um solo específico e sim a influência da granulometria. A seguir estão descritas as propriedades dos solos ensaiados em suas respectivas características após montagem dos lisímetros.

As amostras de solo foram inicialmente secas em estufa para facilitar o peneiramento. Em seguida, as amostras foram separadas em faixas de diâmetro de grãos segundo o jogo de peneiras (NBR 7171/84), composto pelas peneiras #16 (diâmetro 1,90 mm), peneira #40 (diâmetro 0,420 mm), peneira #50 (diâmetro 0,297 mm), peneira #100 (diâmetro 0,149 mm) e peneira #200 (diâmetro 0,074 mm). Antes da montagem dos lisímetros, as amostras foram lavadas para a retirada dos finos e impurezas aderentes aos grãos de areia. Quatro amostras de areia foram preparadas para a montagem dos lisímetros segundo a faixa de diâmetros de grãos indicadas na Tabela 01.

Lisímetro (número)	1	2	3	4
Peneira	#40	#50	#100	#200
Faixa de diâmetro (mm)	1,90 a 0,420	0,420 a 0,297	0,297 a 0,149	0,149 a 0,074

Tabela 1- Especificação das amostras arenosas

O solo residual utilizado foi retirado de uma área de empréstimo no município de Lorena, SP. O solo é um residual maduro de biotita gnaíse, vermelho, de classificação ML pelo Sistema Universal de Classificação do Solo. O solo foi inicialmente colocado em bandejas e secas ao ar e depois destorroadas segundo as recomendações da NBR 6457/86.

4.2 Construção dos Lisímetros

Para a construção dos lisímetros utilizaram-se cilindros de acrílico com 11,3 cm de diâmetro e 25,0 cm de altura. Na parte inferior sobre a base foi colocada uma camada de argila expandida para servir de apoio da tela metálica e do papel filtro de suporte da amostra, assim como, garantir um escoamento uniforme em toda a seção da amostra.

O solo foi depositado nos lisímetros pelo processo “*sand rain*” mantendo-se uma altura de queda de +/- 1,0 cm. O processo de deposição finalizou quando os corpos de prova alcançaram 18,0 cm de altura. Esse valor foi determinado segundo Cunha e Guerra (1996) que estabeleceu que a relação entre a altura e o diâmetro da amostra deve variar na razão de 1,5 a 2,0.

Para garantir uma distribuição de fluxo homogêneo em toda a seção do topo da amostra, foi colocado um papel filtro protegido com uma tela plástica. Por fim, o lisímetro apresenta a configuração exemplificada na figura 07.

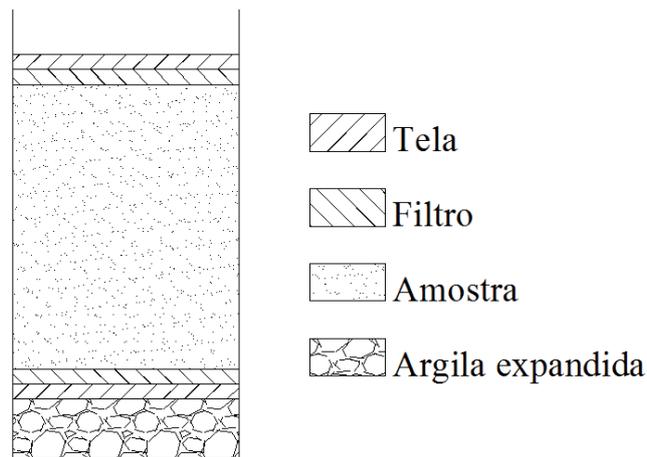


Figura 7 - Montagem do lisímetro (Fonte: Autor)

4.3 Construção dos Reservatórios

Os reservatórios foram construídos em recipientes de mesmo material e volume (garrafas PET). Os mesmos passaram por um processo anterior de calibração ao experimento no qual foram graduados com o auxílio de uma fita métrica.

O reservatório superior foi equipado com um tubo de *Mariotte* com a finalidade de manter a lâmina de água da parte superior igual a 2,0 cm. Na Figura 08 estão exemplificados os reservatórios montados.

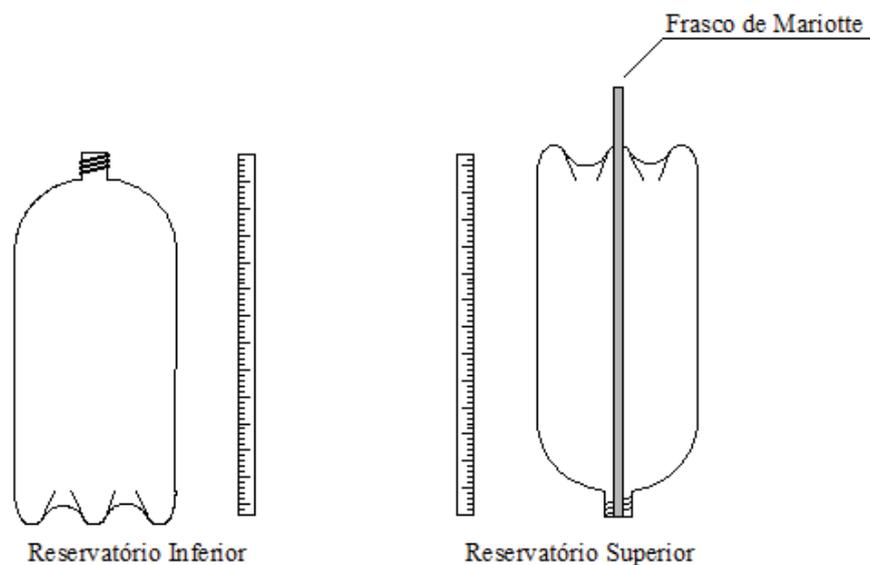


Figura 8 - Ilustração dos reservatórios (Fonte: Autor)

4.4 Características físicas e hidráulicas das amostras

Para determinar as propriedades físicas das amostras inicialmente foi feito o ensaio do picnômetro onde foi determinada a densidade dos grãos (G_s). Com o suporte e lisímetro pesados inicialmente, após colocarmos o solo temos o peso do solo, o volume, o peso específico e o índices de vazios.

Para determinar o índice de vazios é utilizada a relação presente da fórmula 21:

$$e = \frac{V_t - \frac{m_s}{G_s}}{\frac{m_s}{G_s}} \quad (21)$$

Onde:

- V_t – Volume total;
- m_s – massa de sólidos; e
- G_s – densidade dos grãos.

Para determinar a porosidade, utiliza-se o valor do índice de vazios, como está exposto na equação 22:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (22)$$

Para determinar a velocidade de percolação, utiliza-se a seguinte relação (equação 23), onde V_i é a velocidade de infiltração que é determinada pelo gráfico de percolação através de relação geométrica.

$$V_p = \frac{V_i t}{n} \quad (23)$$

O coeficiente de permeabilidade é determinado utilizando a lei de permeabilidade em solo saturado de Darcy conforme a equação 16. Explicitando K_s , temos:

$$K_s = \frac{Q \times L}{h \times A} \quad (24)$$

4.5 Ensaio

O ensaio inicia com a aplicação de uma carga hidráulica de dois centímetros segundo a recomendação de Cunha e Guerra (1996), sendo esta mantida constante pelo Frasco de Mariotte do reservatório superior. O controle do volume de água que entra no sistema e volume que sai do sistema em função do tempo foi realizado através de uma fita métrica colada na face dos reservatórios. A quantidade de água retida na areia foi monitorada pela

variação do peso utilizando uma balança eletrônica. A frente de saturação foi monitorada utilizando-se uma câmara filmadora.

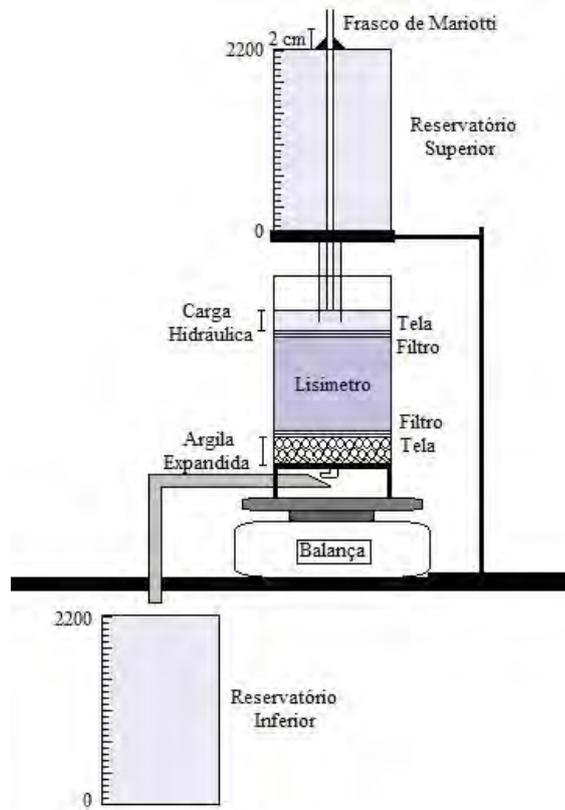


Figura 9 - Esquema do Ensaio (Fonte: Autor)



Figura 10 - Foto do equipamento (Fonte: Autor)

O ensaio prossegue com a análise da evaporação. Os corpos de prova ficaram expostos a uma condição que simula a realidade. As amostras foram dispostas de forma que só a superfície ficasse exposta ao sol, para isso foi utilizado uma placa de isopor onde foram encaixados os corpos de prova, conforme a figura 11. A temperatura foi monitorada 24 horas por dia durante 60 dias por um Watermark, figura 12.



Figura 11 - Disposição dos corpos de prova (Fonte: Autor)



Figura 12 - Watermark (Fonte: Autor)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Propriedades físicas das amostras

As propriedades físicas das amostras foram determinadas utilizando as relações de peso e volume, e os índices de vazios foram determinados pela equação 21. Todos os dados anteriormente mencionados estão expostos na tabela 02 e 03.

Lisímetro (número)	1	2	3	4	5
Peso de solo (g)	2.925	2.725	2.725	2.715	2.260
Volume (cm³)	1.805	1.805	1.805	1.805	1.805
Peso específico (g/cm³)	1,62	1,51	1,51	1,504	1,257
Densidade dos grãos	2,64	2,621	2,66	2,646	2,734
Índice de vazios	0,386	0,736	0,762	0,759	1,216

Tabela 2 – Propriedades físicas das amostras de solo arenoso

Lisímetro (número)	5
Peso de solo (g)	2.260
Volume (cm³)	1.805
Peso específico (g/cm³)	1,257
Densidade dos grãos	2,734
Índice de vazios	1,216

Tabela 3 - Propriedades físicas da amostra de solo residual

5.2 Infiltração

Para o estudo da infiltração e posteriormente da taxa de infiltração, foram utilizados as filmagens de cada ensaio onde mostram a evolução da frente de umedecimento. Na figura 13 está exemplificado um ensaio.



Figura 13 - Exemplo do avanço da frente de umedecimento (Fonte: Autor)

Os Resultados obtidos em laboratório para as diferentes amostras estão representadas nas tabelas e gráficos a seguir. Para tanto foi considerado o termino da infiltração quando a massa do sistema passou a ser constante.

O primeiro ensaio feito com o lisímetro 01 (amostra de areia com granulometria na faixa de diâmetro entre 1,900mm a 0,420mm) foi o mais rápido por apresentar maior granulometria do que os demais, como pode ser observado na tabela 4.

Frente de umedecimento #40			
Prof. (cm)	Tempo (s)	Prof. (cm)	Tempo (s)
0	0	10	54
1	3	11	64
2	5	12	74
3	9	13	86
4	14	14	98
5	19	15	111
6	24	16	126
7	30	17	141
8	37	18	157
9	45		

Tabela 4 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 01

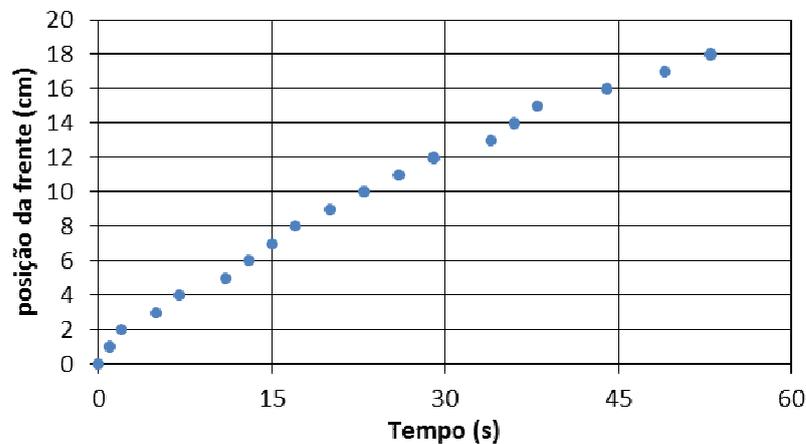


Figura 14 – Posição da frente de umedecimento para o lisímetro 01 (Fonte: Autor)

Para o lisímetro 02 com amostra de areia com granulometria na faixa de diâmetro entre 0,420mm a 0,297mm, a amostra começa a apresentar uma maior resistência a infiltração da água e os resultados possuem o mesmo comportamento do primeiro ensaio. Conforme tabela 05.

Frente de umedecimento #50			
Prof. (cm)	Tempo (s)	Prof. (cm)	Tempo (s)
0	0	10	54
1	3	11	64
2	5	12	74
3	9	13	86
4	14	14	98
5	19	15	111
6	24	16	126
7	30	17	141
8	37	18	157
9	45		

Tabela 5 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 02

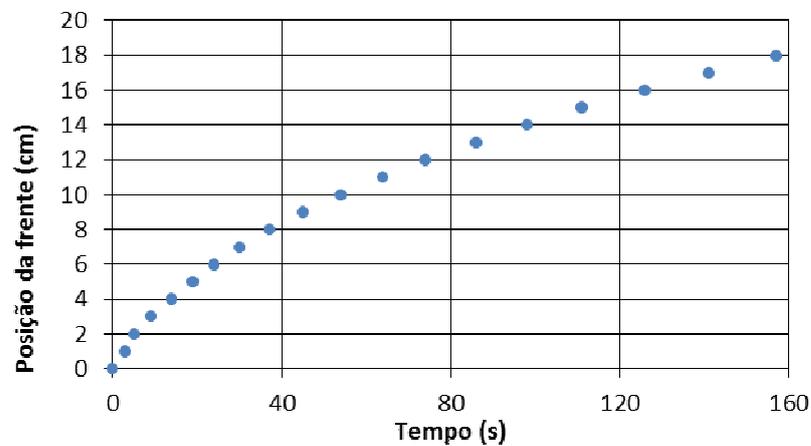


Figura 15 – Posição da frente de umedecimento para o lisímetro 02 (Fonte: Autor)

O lisímetro 03 teve quase o mesmo tempo de infiltração que o lisímetro 02, com uma diferença de aproximadamente 30 segundos. Essa amostra era de areia com granulometria na faixa de diâmetro entre 0,294mm a 0,149mm. Os resultados estão descritos na tabela 06.

Frente de Infiltração #100			
Prof. (cm)	Tempo (s)	Prof. (cm)	Tempo (s)
0	0	10	63
1	1	11	80
2	3	12	96
3	8	13	101
4	12	14	115
5	19	15	128
6	31	16	136
7	38	17	163
8	43	18	187
9	52		

Tabela 6 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 03

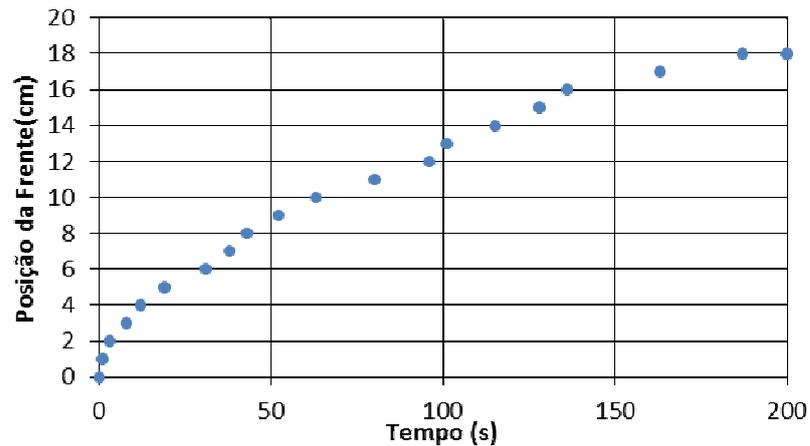


Figura 16 - Resultado da infiltração para o lisímetro 03 (Fonte: Autor)

Para o lisímetro 04, a amostra de areia mais fina, com granulometria na faixa de diâmetro entre 0,149mm a 0,074mm, não diferentes das outras amostras anteriores, apresentou um aumento no tempo de infiltração como pode ser observado na tabela 07.

Frente de Infiltração #100				
Prof. (cm)	Tempo (s)	Prof. (cm)	Tempo (s)	
0	0	10	115	
1	2	11	132	
2	6	12	154	
3	14	13	180	
4	21	14	203	
5	29	15	236	
6	44	16	254	
7	69	17	288	
8	80	18	320	
9	98			

Tabela 7 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 04

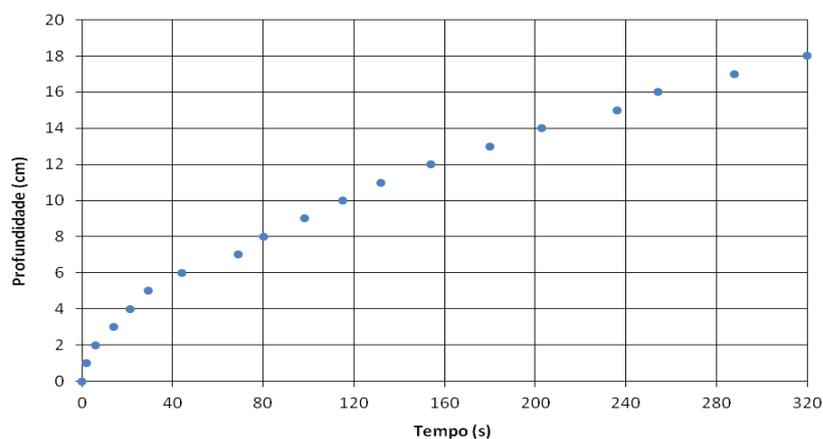


Figura 17 - Resultado da infiltração para o lisímetro 04 (Fonte: Autor)

O lisímetro 05 que continha a amostra de solo residual apresentou o mesmo comportamento dos demais, porém em um intervalo de tempo muito maior do que já estava sendo mostrado. Esse maior intervalo deve-se ao fato da amostra apresentar, de uma forma geral, uma granulometria muito pequena e também a coesão que dificultada a entrada de água no solo para ocupar os vazios. Os resultados estão presentes na tabela 08.

Frente de umedecimento Solo Residual			
Prof. (cm)	Tempo (s)	Prof. (cm)	Tempo (s)
0	0	9,8	852
1,6	27	11,7	1113
2,3	42,6	13,2	1411,2
3,5	110,4	15,2	1749,6
5,0	241,8	17,0	2091
6,7	411,6	18,2	2328
8,4	621		

Tabela 8 - Resultados da Frente de umedecimento para o lisímetro 04

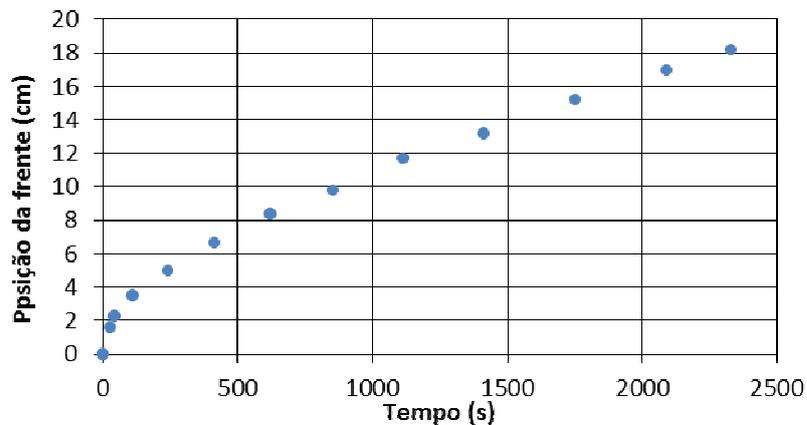


Figura 18 - Resultado da infiltração para o lisímetro 05 (Fonte: Autor)

Os comportamentos das curvas são parecidos, com ressalva para o do Lisímetro de número 1, pois a vazão do reservatório superior não foi suficiente para manter a carga hidráulica de 02 cm. Abaixo estão presentes as simulações segundo Green-Ampt (1996) segundo a equação 13.

Para determinar o tempo foi utilizada a relação básica da infiltração, equação 04. Como se deseja o tempo por camada é utilizado a taxa de infiltração média, então o tempo é calculado da segundo a equação 25.

$$\Delta t = \frac{I}{f_m} \quad (25)$$

Os parâmetros para a determinação da infiltração por Green-Ampt (1911) para o lisímetro de 01 a 05 estão presentes nas tabelas 27 e 28, onde o coeficiente de permeabilidade foi determinado pela relação geométrica do gráfico de percolação quando toda a amostra apresenta-se saturada. O potencial matricial (Ψ_f) foi determinado para que a curva se adequasse melhor aos dados laboratoriais. Os θ_s e θ_i foram determinados pelos dados laboratoriais.

K_s	Ψ_f	θ_s	θ_i
0,528 mm/s	1800 mm c.a.	27,9%	5%

Tabela 9 - Parâmetros da amostra 01 para cálculo de Green-Ampt (1911)

I (cm)	ΔI (cm)	i(mm/s)	im(mm/s)	Δt (s)	t acu (s)
0					0
1	1	32,45	24,47	0,41	0,41
2	1	16,49	13,83	0,72	1,13
3	1	11,17	9,84	1,02	2,15
4	1	8,51	7,71	1,30	3,44
5	1	6,91	6,38	1,57	5,01
6	1	5,85	5,47	1,83	6,84
7	1	5,09	4,80	2,08	8,92
8	1	4,52	4,30	2,33	11,25
9	1	4,07	3,90	2,57	13,82
10	1	3,72	3,58	2,80	16,61
11	1	3,43	3,31	3,02	19,63
12	1	3,19	3,09	3,24	22,88
13	1	2,98	2,90	3,45	26,33
14	1	2,81	2,73	3,66	29,99
15	1	2,66	2,59	3,86	33,85
16	1	2,52	2,46	4,06	37,91
17	1	2,41	2,35	4,25	42,16
18	1	2,30	1,15	8,69	50,85

Tabela 10 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 01

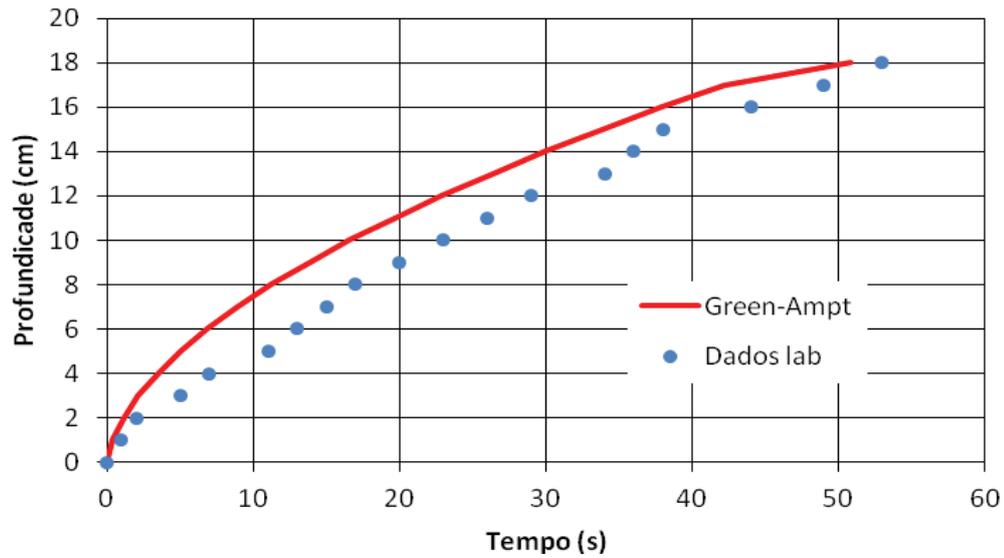


Figura 19 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 01

Utilizando a mesma sequência do raciocínio do lisímetro 01, foram determinados os parâmetros para a amostra do lisímetro 02.

K_s	Ψ_f	θ_s	θ_i
0,127 mm/s	1.800 mm c.a.	51,65%	5%

Tabela 11 - Parâmetros da amostra 02 para cálculo de Green-Ampt (1911)

I (cm)	ΔI (cm)	i(mm/s)	im(mm/s)	Δt (s)	t acu (s)
0					0
1	1	10,79	8,12	1,23	1,23
2	1	5,46	4,57	2,19	3,42
3	1	3,68	3,24	3,09	6,51
4	1	2,79	2,53	3,96	10,47
5	1	2,26	2,08	4,80	15,27
6	1	1,90	1,78	5,63	20,90
7	1	1,65	1,56	6,43	27,33
8	1	1,46	1,39	7,22	34,54
9	1	1,31	1,25	7,98	42,53
10	1	1,19	1,14	8,73	51,26
11	1	1,10	1,06	9,47	60,73
12	1	1,02	0,98	10,19	70,92
13	1	0,95	0,92	10,89	81,82
14	1	0,89	0,86	11,58	93,40
15	1	0,84	0,82	12,26	105,66

16	1	0,79	0,77	12,92	118,58
17	1	0,75	0,74	13,57	132,15
18	1	0,72	0,36	27,80	159,96

Tabela 12 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 02

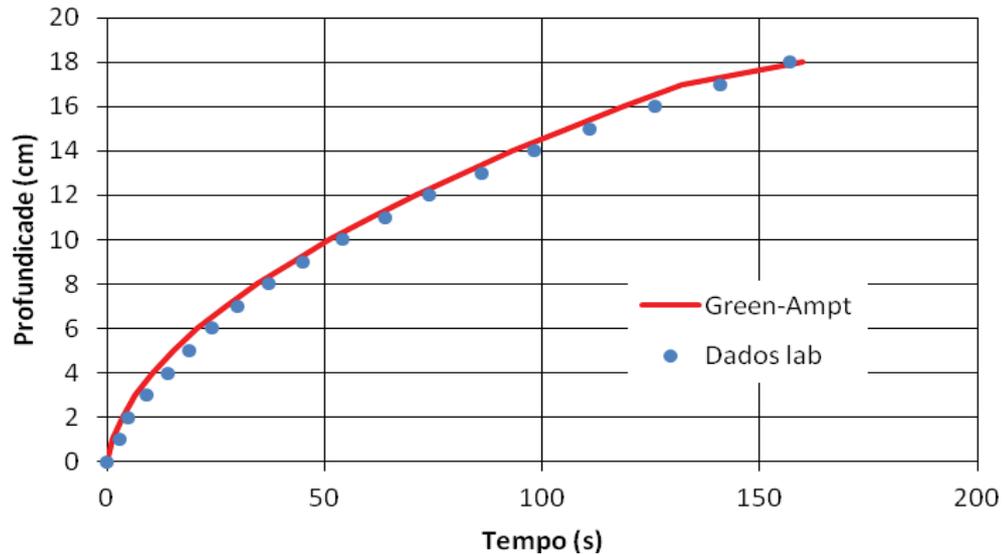


Figura 20 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 02

Abaixo estão presentes os resultados referentes ao lisímetro 03.

K_s	ψ_f	θ_s	θ_i
0,101 mm/s	1.800 mm c.a.	55,38%	5%

Tabela 13 - Parâmetros da amostra 03 para cálculo de Green-Ampt (1911)

I (cm)	ΔI (cm)	i (mm/s)	im (mm/s)	Δt (s)	t acu (s)
0					0
1	1	9,29	6,99	1,43	1,43
2	1	4,70	3,93	2,54	3,97
3	1	3,16	2,78	3,59	7,57
4	1	2,40	2,17	4,61	12,18
5	1	1,94	1,79	5,60	17,78
6	1	1,63	1,52	6,56	24,34
7	1	1,41	1,33	7,51	31,85
8	1	1,25	1,19	8,43	40,28
9	1	1,12	1,07	9,33	49,61
10	1	1,02	0,98	10,22	59,83
11	1	0,94	0,90	11,09	70,92
12	1	0,87	0,84	11,94	82,85

13	1	0,81	0,78	12,77	95,62
14	1	0,76	0,74	13,59	109,21
15	1	0,71	0,69	14,39	123,60
16	1	0,68	0,66	15,18	138,78
17	1	0,64	0,63	15,95	154,73
18	1	0,61	0,31	32,68	187,42

Tabela 14 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 03

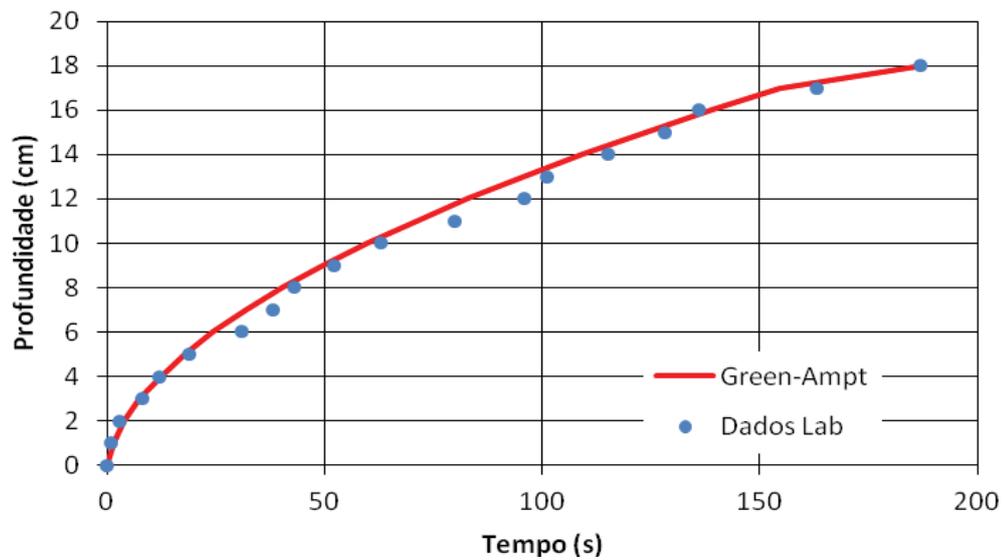


Figura 21 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 03

Nas tabelas 15 e 16 e na figura 22 estão apresentados os resultados de infiltração para o lisímetro 04.

K_s	Ψ_f	θ_s	θ_i
0,051 mm/s	2.000 mm c.a.	58,12%	5%

Tabela 15 - Parâmetros da amostra 04 para cálculo de Green-Ampt (1911)

I (cm)	ΔI (cm)	i(mm/s)	im(mm/s)	Δt (s)	t acu (s)
0					0
1	1	5,42	4,08	2,45	2,45
2	1	2,74	2,29	4,37	6,82
3	1	1,84	1,62	6,18	13,01
4	1	1,39	1,26	7,94	20,95
5	1	1,12	1,04	9,66	30,61
6	1	0,95	0,88	11,34	41,95

7	1	0,82	0,77	12,99	54,94
8	1	0,72	0,68	14,61	69,55
9	1	0,65	0,62	16,20	85,74
10	1	0,59	0,56	17,76	103,50
11	1	0,54	0,52	19,29	122,79
12	1	0,50	0,48	20,79	143,58
13	1	0,46	0,45	22,28	165,86
14	1	0,43	0,42	23,73	189,59
15	1	0,41	0,40	25,16	214,76
16	1	0,39	0,38	26,57	241,33
17	1	0,37	0,36	27,96	269,28
18	1	0,35	0,17	57,32	326,60

Tabela 16 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 04

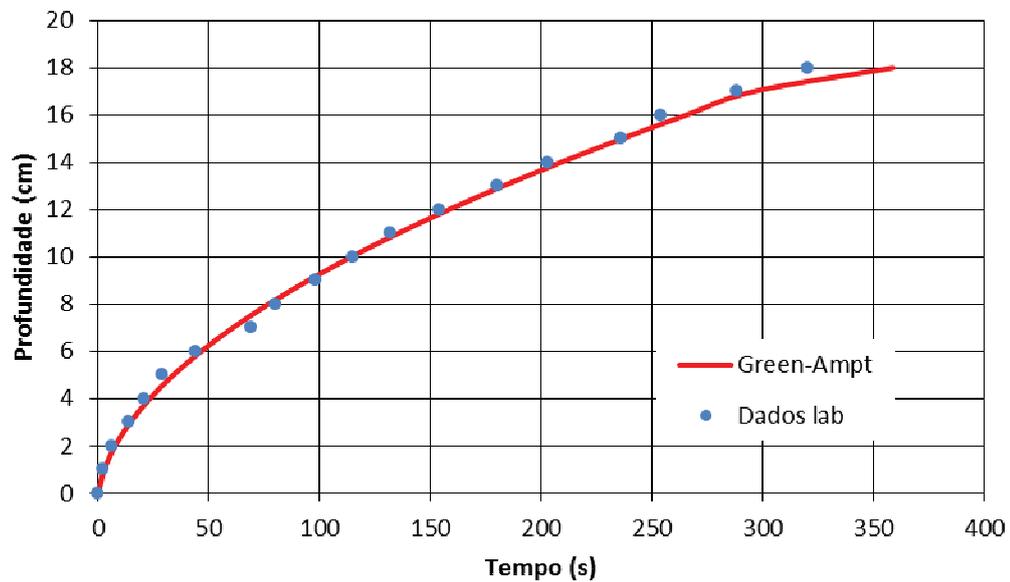


Figura 22 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 04

Abaixo estão presentes os resultados da amostra de solo residual.

K_s	ψ_f	θ_s	θ_i
0,008 mm/s	1.800 mm c.a.	54,00%	1,76%

Tabela 17 - Parâmetros da amostra 05 para cálculo de Green-Ampt (1911)

I (cm)	ΔI (cm)	i(mm/s)	im(mm/s)	Δt (s)	t acu (s)
0					0
1	1	0,81	0,61	16,50	16,50
2	1	0,41	0,34	29,41	45,91
3	1	0,27	0,24	41,61	87,51

4	1	0,21	0,19	53,43	140,95
5	1	0,17	0,15	64,98	205,92
6	1	0,14	0,13	76,28	282,20
7	1	0,12	0,11	87,35	369,55
8	1	0,11	0,10	98,22	467,77
9	1	0,10	0,09	108,88	576,65
10	1	0,09	0,08	119,36	696,00
11	1	0,08	0,08	129,64	825,65
12	1	0,07	0,07	139,75	965,40
13	1	0,07	0,07	149,69	1115,09
14	1	0,06	0,06	159,45	1274,54
15	1	0,06	0,06	169,06	1443,60
16	1	0,06	0,06	178,50	1622,10
17	1	0,05	0,05	187,78	1809,88
18	1	0,05	0,03	385,00	2194,88

Tabela 18 - Infiltração calculada por Green-Ampt (1911) para o lisímetro 05

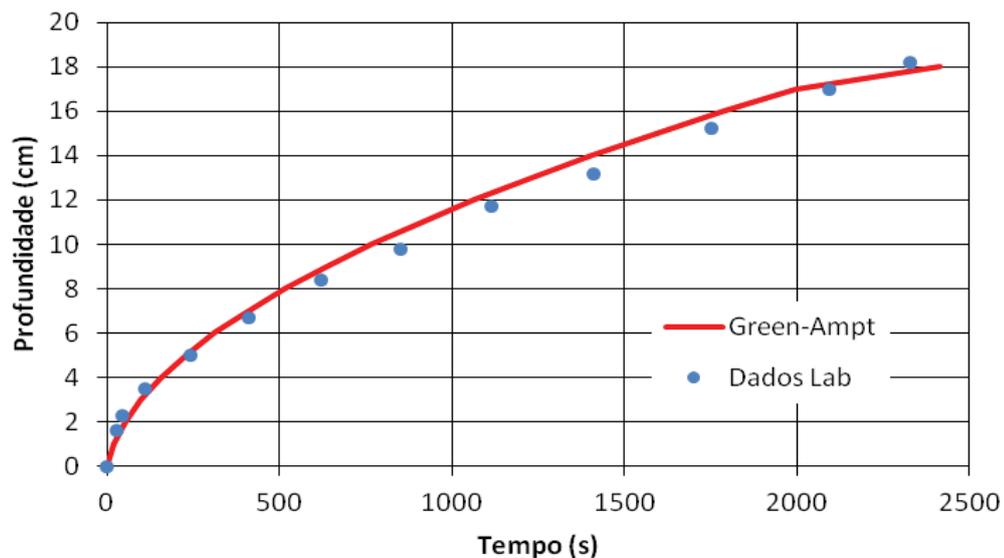


Figura 23 - Comparação entre os resultados de laboratório e a formulação de Green-Ampt para o lisímetro 05

Para um potencial matricial de 1800 mm c.a. os resultados obtidos no laboratório se aproximam da teoria de Green-Ampt (1911). Apresentando algumas variações que devem ser decorrentes da diferença entre leitura e o real, pois a frente de umedecimento não foi homogênea podendo assim ter mascarado alguns dos resultados.

O potencial matricial para a amostra de solo residual apresentou um valor atípico, isso se deve ao fato do processo de deposição do solo ser *saind rain* fazendo com que os vazios ficassem bem definidos, diminuindo-se assim o valor do potencial.

5.3 Taxa de Infiltração

A taxa de infiltração foi à parte de maior complexidade do experimento, pois como o controle era visual, possam ter ocorrido divergências entre as leituras e os valores reais. A taxa de infiltração foi determinada utilizando-se dos dados obtidos através da câmera filmadora.

Para determinar os valores da taxa de infiltração foram utilizados os dados já apresentados no tópico **5.2 Infiltração**. Para cada lisímetro foi gerado uma tabela de progresso da frende de umedecimento e dessas tabelas foram feitas as relações utilizando os intervalos de 1 a 1 cm.

A seguir estão às tabelas com os dados e os gráficos para todos os lisímetros estudados.

Taxa de infiltração #40			
$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)	$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)
1,000	0,5	0,333	21,5
1,000	1,5	0,333	24,5
0,333	3,5	0,333	27,5
0,500	6,0	0,200	31,5
0,250	9,0	0,500	35,0
0,500	12,0	0,500	37,0
0,500	14,0	0,167	41,0
0,500	16,0	0,200	46,5
0,333	18,5	0,250	51,0

Tabela 19 - Taxa de infiltração para o lisímetro 01

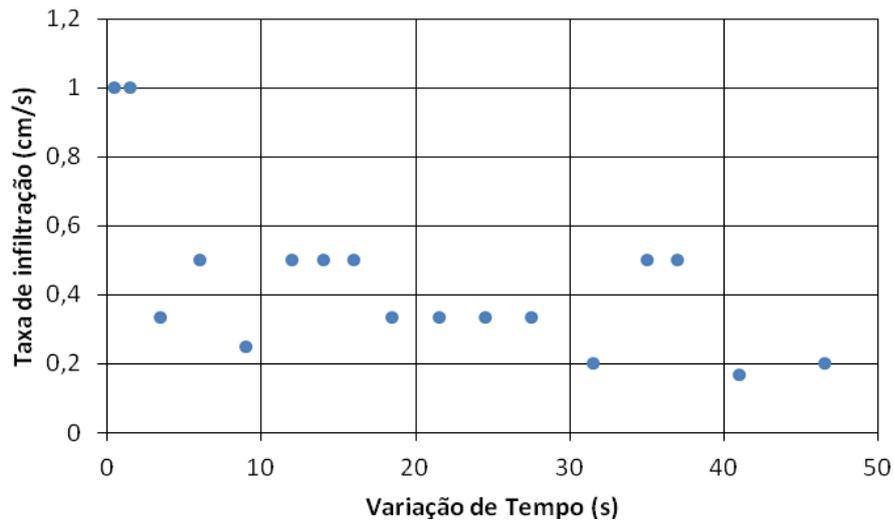


Figura 24 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 01 (Fonte: Autor)

Taxa de infiltração #50			
$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)	$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)
0,333	1,5	0,111	49,5
0,500	4,0	0,100	59,0
0,250	7,0	0,100	69,0
0,200	11,5	0,083	80,0
0,200	16,5	0,083	92,0
0,200	21,5	0,077	104,5
0,167	27,0	0,067	118,5
0,143	33,5	0,067	133,5
0,125	41,0	0,063	149,0

Tabela 20 - Taxa de infiltração para o lisímetro 02

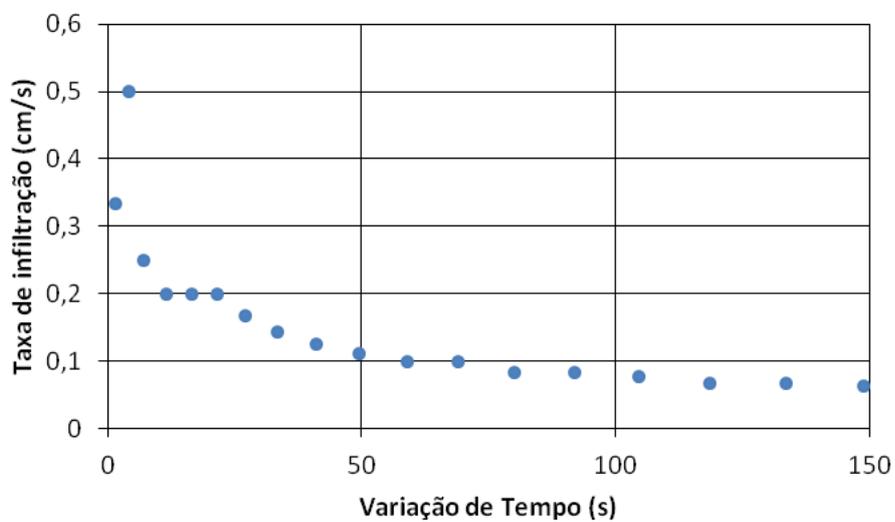


Figura 25 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 02 (Fonte: Autor)

Taxa de infiltração #100			
$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)	$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)
1,000	0,5	0,091	57,5
0,500	2,0	0,059	71,5
0,200	5,5	0,063	88,0
0,250	10,0	0,200	98,5
0,143	15,5	0,071	108,0
0,083	25,0	0,077	121,5
0,143	34,5	0,125	132,0
0,200	40,5	0,037	149,5
0,111	47,5	0,042	175,0

Tabela 21 - Taxa de infiltração para o lisímetro 03

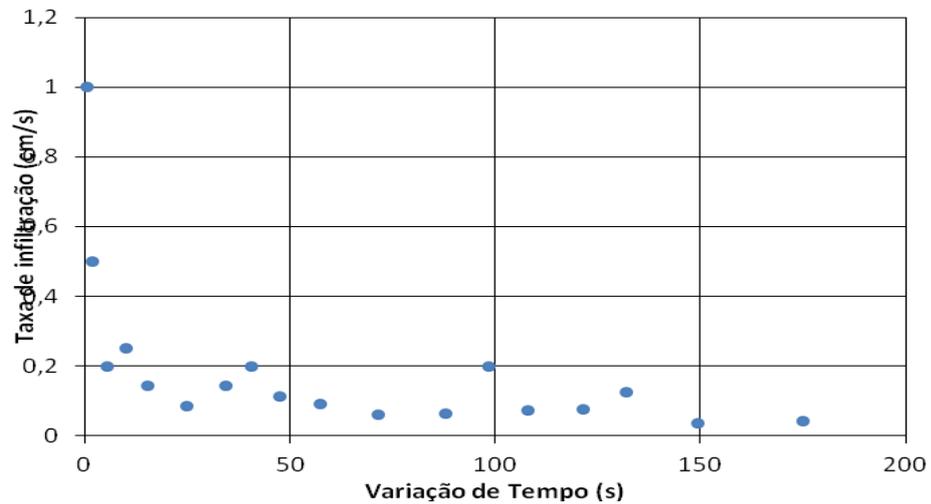


Figura 26 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 03 (Fonte: Autor)

Taxa de infiltração #200			
$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)	$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)
0,500	1,0	0,059	106,5
0,250	4,0	0,059	123,5
0,125	10,0	0,045	143,0
0,143	17,5	0,038	167,0
0,125	25,0	0,043	191,5
0,067	36,5	0,030	219,5
0,040	56,5	0,056	245,0
0,091	74,5	0,029	271,0
0,056	89,0	0,031	304,0

Tabela 22 - Taxa de infiltração para o lisímetro 04

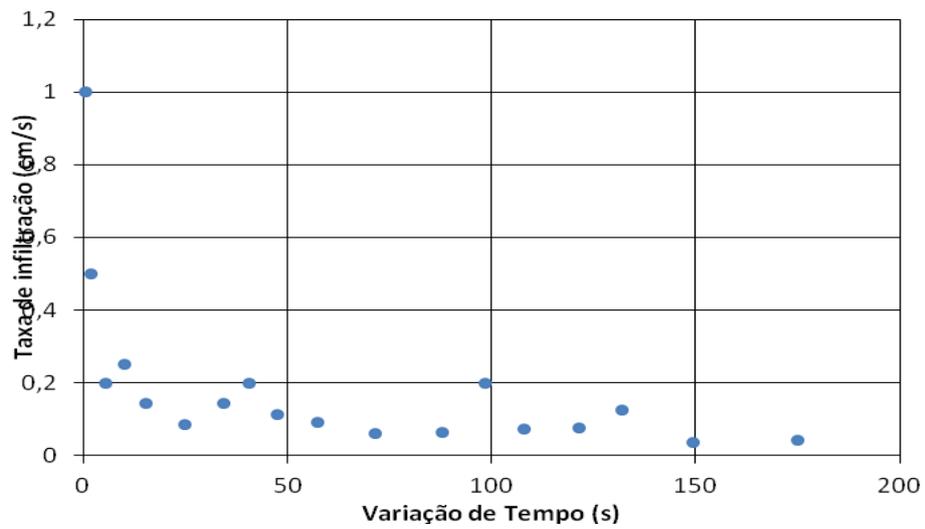


Figura 27 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 04 (Fonte: Autor)

Taxa de infiltração solo residual			
$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)	$\Delta\text{prof}/\Delta t$ (cm/s)	Δt (s)
0,148	13,5	0,003	736,5
0,057	34,8	0,002	982,5
0,026	76,5	0,002	1.262,1
0,011	176,1	0,001	1.580,4
0,006	326,7	0,001	1.920,3

Tabela 23 - Taxa de infiltração para o lisímetro 05

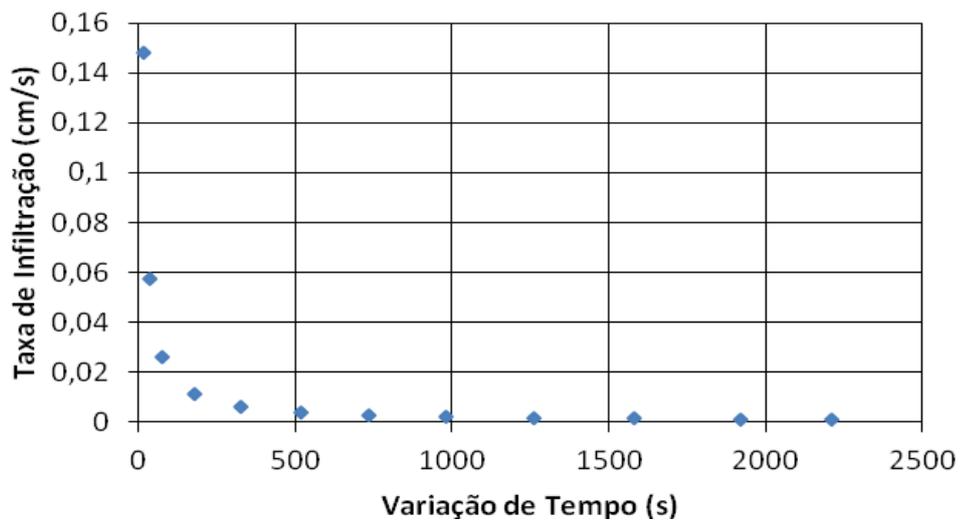


Figura 28 - Resultados laboratoriais da taxa de infiltração para o lisímetro 05

Os resultados apresentaram melhor precisão de acordo que o tamanho do grão diminuía, pois a velocidade de infiltração diminuía proporcionalmente. Para determinar uma melhor reta que se adapta aos pontos experimentais foi utilizado o método dos mínimos quadrados.

Esse método é utilizado no cálculo numérico para determinar equações matemáticas de dados gerados experimentalmente ou aleatoriamente. Ele normalmente é utilizado para fazer previsões a partir de dados concretos. Na tabela 13 estão as equações geradas para cada lisímetro.

Lisímetro	Equação	Lisímetro	Equação
1	$t = 0,598e^{-0,0206t}$	4	$t = 0,142e^{-0,0061t}$
2	$t = 0,255e^{-0,0115t}$	5	$t = 0,598e^{-0,0019t}$
3	$t = 0,263e^{-0,0112t}$		

Tabela 24 - Equações geradas pelo método dos mínimos quadrados

Com a finalidade de aplicar a teoria de Horton (1940) equação 15 inicialmente foram adotados os parâmetros obtidos nos experimentos e pelo método dos mínimos quadrados. Os parâmetros foram adotados da seguinte forma: f_c é igual taxa de infiltração no final do processo; f_0 é igual taxa de infiltração a 01cm da parte superior da amostra; e β é igual a velocidade de infiltração presente na tabela 27 em mm/s. Esse último parâmetro foi determinado através dos ensaios de laboratório. Os parâmetros estão descritos na tabela 25.

Lisímetro	f_c	f_0	β
1	0,19	1	0,590
2	0,06	0,33	0,140
3	0,04	1	0,112
4	0,03	0,5	0,061
5	0,001	0,15	0,019

Tabela 25 - Parâmetros para a equação de Horton (1940)

Para esses parâmetros temos as seguintes equações presentes na tabela 26.

Lisímetro	Equação	Lisímetro	Equação
1	$i = 0,19 + (0,81)e^{-0,890t}$	4	$i = 0,03 + (0,47)e^{-0,0660t}$
2	$i = 0,06 + (0,27)e^{-0,140t}$	5	$i = 0,001 + (0,15)e^{-0,019t}$
3	$i = 0,04 + (0,96)e^{-0,110t}$		

Tabela 26 - Equações de Horotn (1940)

Abaixo estão os gráficos que representam as equações geradas a partir dos parâmetros adotados. Os dados laboratoriais também foram representados para que as considerações possam ser feitas.

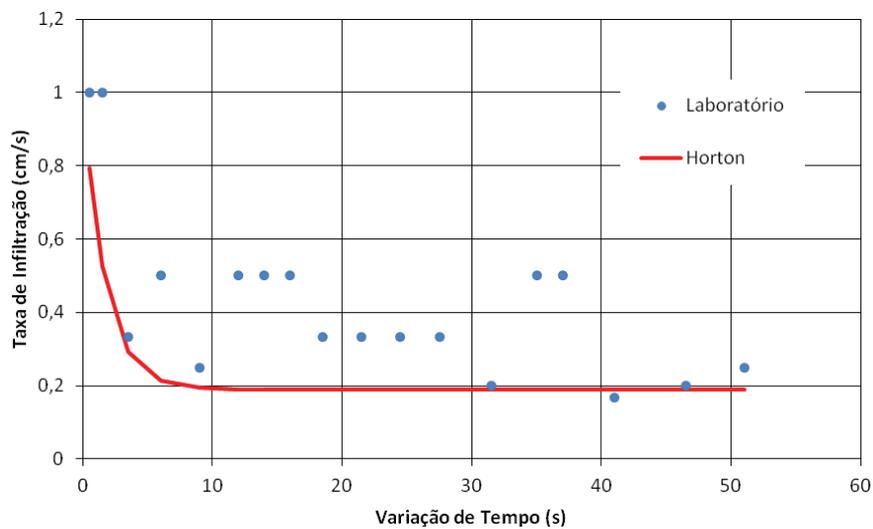


Figura 29 - Gráfico de Horton para o lisímetro 01

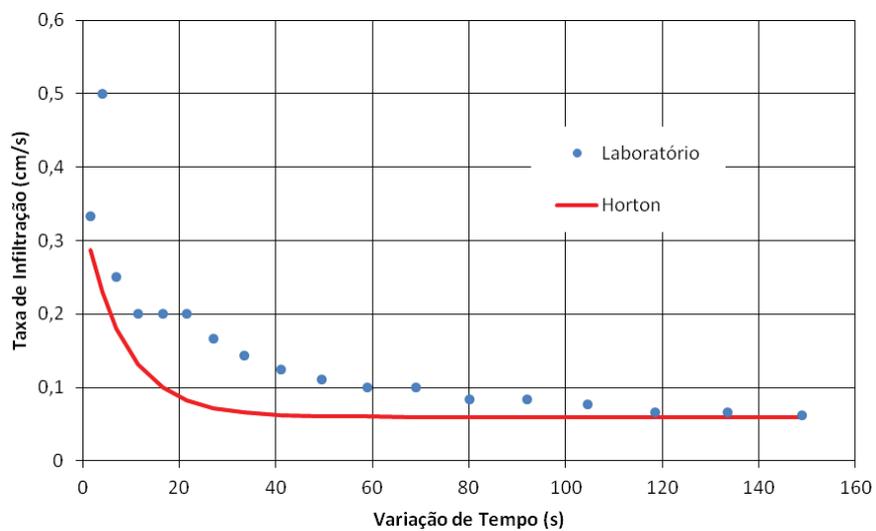


Figura 30 - Gráfico de Horton para o lisímetro 02

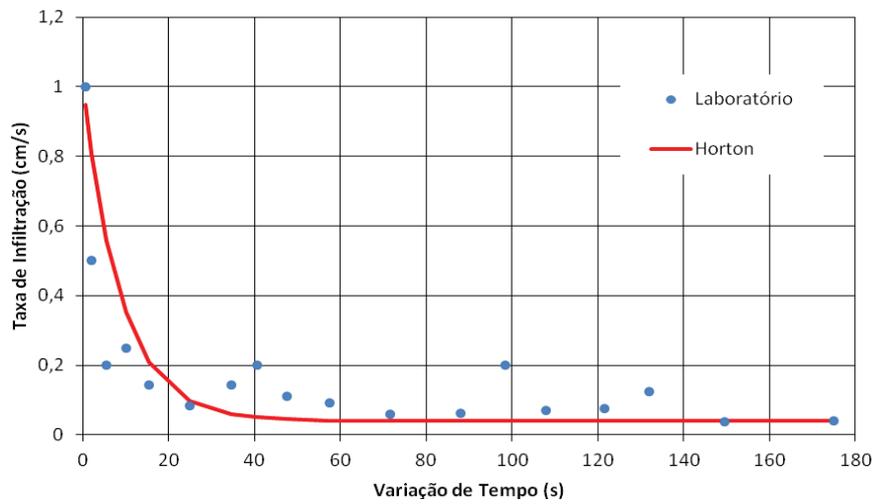


Figura 31 - Gráfico de Horton para o lisímetro 03

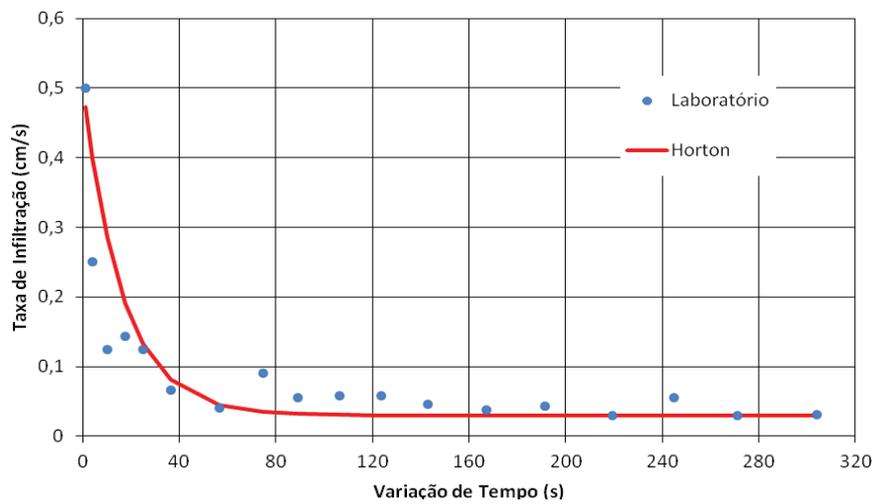


Figura 32 - Gráfico de Horton para o lisímetro 04

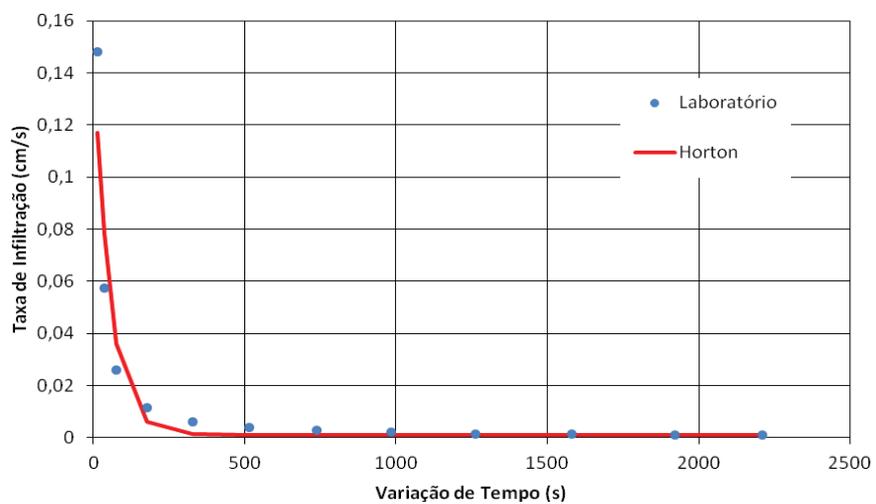


Figura 33 - Gráfico de Horton para o lisímetro 05

Com esses resultados pode-se observar que os valores propostos para a teoria empírica de Horton (1940) se aproximaram mais dos resultados laboratoriais quando os mesmos são correspondentes às amostras de menor granulometria. Isso se deve ao fato de que a velocidade de infiltração decresce diretamente proporcional a granulometria, gerando assim dados mais confiáveis.

O parâmetro β que é dado como um ponto empírico, quando utilizado com os valores das velocidades de infiltração em mm/s, obteve uma equação que se aproximou dos dados laboratoriais.

5.4 Percolação

Durante o processo de percolação, quando o solo se apresenta saturado, podemos determinar as propriedades hidráulicas do solo, como já foi exposto anteriormente, pela lei de Darcy e outras relações de propriedades do solo. Abaixo estão os gráficos que representam o volume de água que está entrando e o que está saindo do sistema.

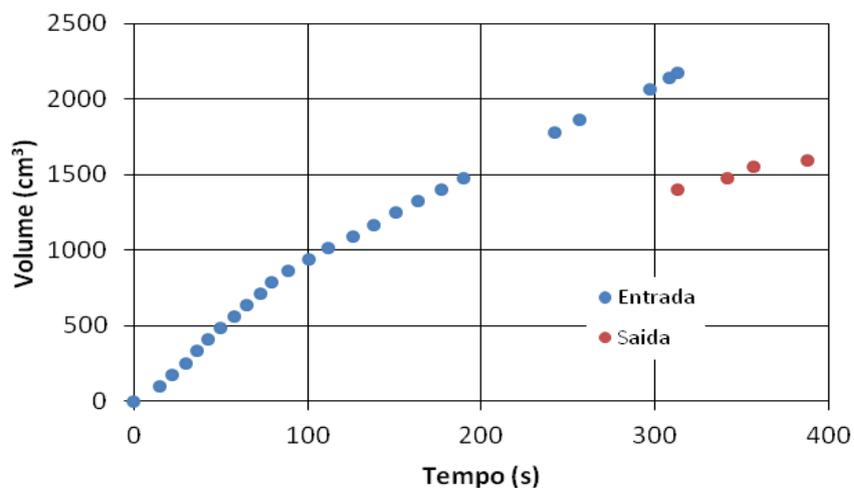


Figura 34 - Volume de água no sistema para o lisímetro 01 (Fonte: Autor)

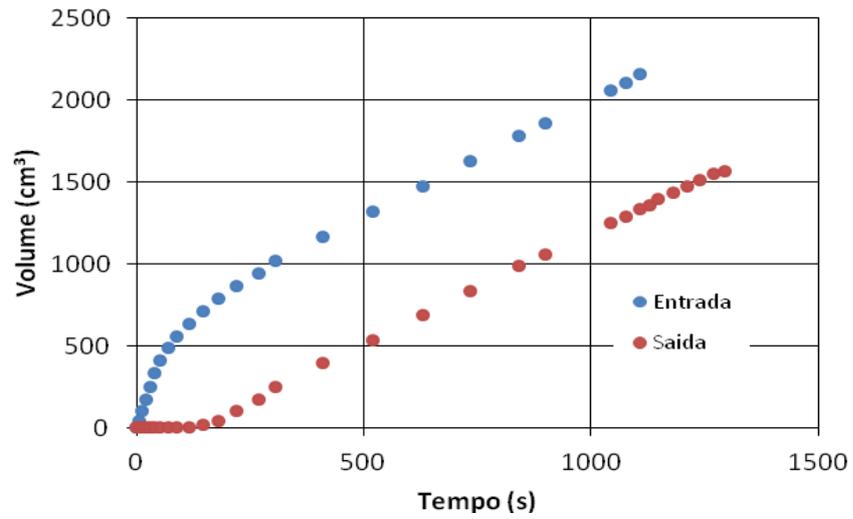


Figura 35 - Volume de água no sistema para o lisímetro 02 (Fonte: Autor)

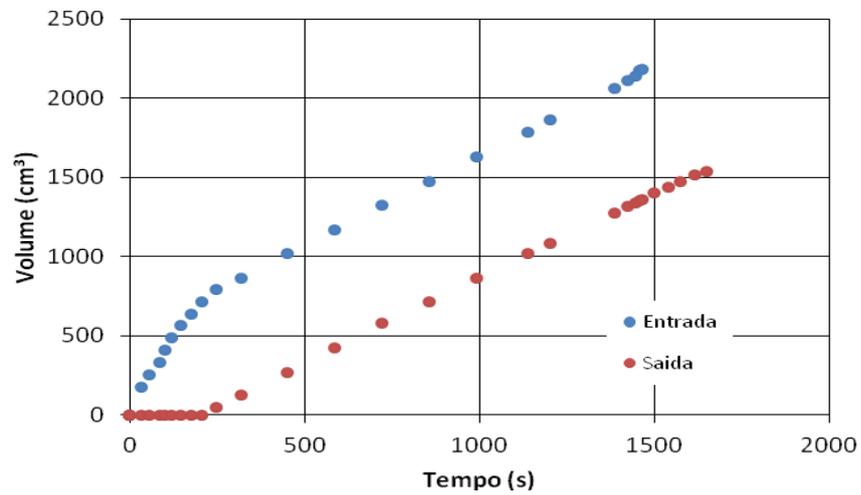


Figura 36 - Volume de água no sistema para o lisímetro 03 (Fonte: Autor)

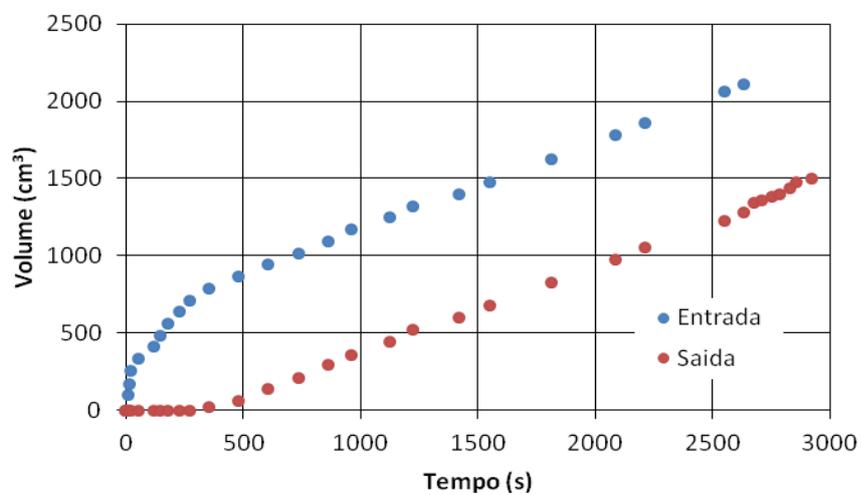


Figura 37 - de água no sistema para o lisímetro 04 (Fonte: Autor)

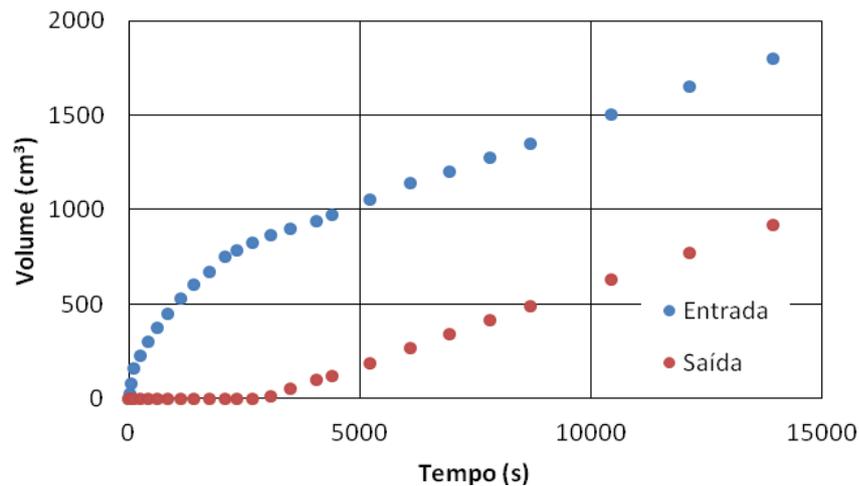


Figura 38 - Volume de água no sistema para o lisímetro 05 (Fonte: Autor)

O lisímetro de número 01, o qual foi preenchido com uma amostra de maior granulometria, apresentou uma velocidade de percolação maior que a do reservatório superior, não permitindo assim que formasse a carga hidráulica de 02 cm. Outro contratempo foi a rapidez com que ocorreu o experimento, algumas informações ficaram falhas.

O paralelismo entre as relas de entrada e saída mostra que não ocorreram perdas durante os processos, e que a diferença entre as cursas representa o volume de água retido inicialmente pela amostra. Através desse paralelismo, podemos chegar às propriedades hidráulicas do solo, como, velocidade de infiltração, vazão, porosidade, velocidade de percolação e coeficiente de permeabilidade.

Para determinar a porosidade utilizamos a equação 22 e para determinar a velocidade de percolação utilizamos a equação 23. O coeficiente de permeabilidade é determinado utilizando a equação 24.

Abaixo estão os resultados das propriedades hidráulicas dos materiais presente na tabela 27.

Lisímetro (número)	1	2	3	4
Velocidade de infiltração (cm/s)	0,059	0,014	0,011	0,006
Vazão (cm³/s)	5,878	1,415	1,129	0,563
Porosidade	0,279	0,424	0,432	0,432
Velocidade de percolação (cm/s)	0,210	0,033	0,026	0,013
Coefficiente de permeabilidade (cm/s)	0,053	0,013	0,010	0,005
Volume de água retido (cm³)	691,45	686,43	761,59	796,67

Tabela 27 - Propriedades hidráulicas das amostras de solo arenoso

Lisímetro (número)	5
Velocidade de infiltração (cm/s)	0,002
Vazão (cm³/s)	0,151
Porosidade	0,549
Velocidade de percolação (cm/s)	0,001
Coefficiente de permeabilidade (cm/s)	0,001
Volume de água retido (cm³)	876,43

Tabela 28 - Propriedades hidráulicas das amostras de solo residual

5.5 Evaporação

A evaporação é a etapa mais demorada de todo o processo, enquanto as demais ocorriam em questões de minutos, a evaporação ocorreu durante dois meses. As duas primeiras fases da evaporação possuem diferenças nítidas, como pode ser observado nas figuras 39 e 40.



Figura 39 - Disposição das amostras para secagem (Fonte: Autor)

Na figura 39 os corpos de prova tinham iniciado o processo de evaporação, quanto se encontram úmido por todo a sua profundidade, etapa essa denominada de evaporação potencial. Já na figura 40, os corpos de prova já apresentam resistência a evaporação, visto que a camada mais externa se encontra menos úmida. Essa fase denominada de evaporação real há o auxílio do efeito da capilaridade.



Figura 40 - Corpo de prova com a camada superior seca (Fonte: Autor)

A figura 38 representa o gráfico de temperatura por tempo gerado com os dados obtidos pelo WaterMark. Com temperatura média para o período de $23,72^{\circ}\text{C}$.

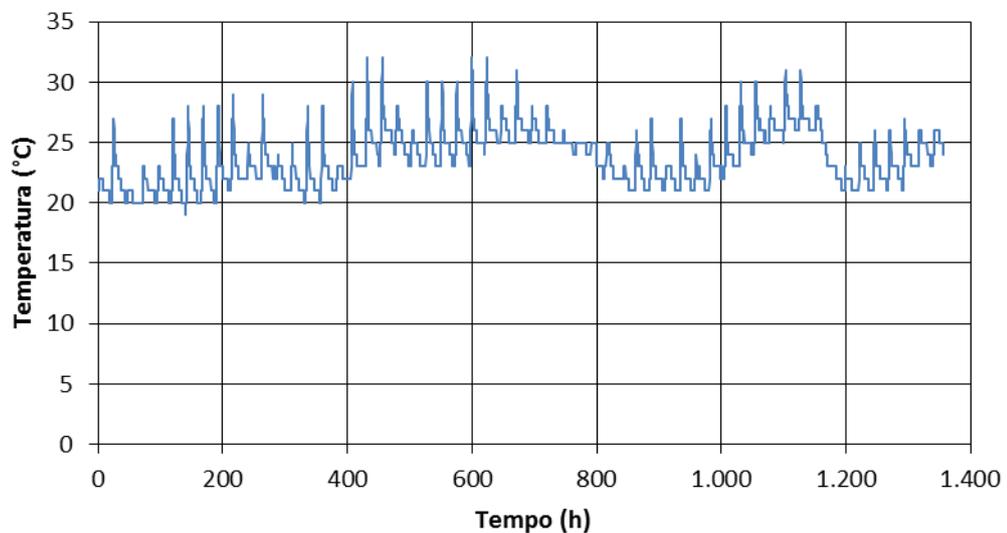


Figura 41 - Variação da Temperatura durante o processo de evaporação (Fonte: Autor)

Os dados de evaporação para os corpos de prova de 01 a 04 estão representados nas figuras 42, 43, 44 e 45. A amostra 05 não foi estudada visto que se tratava de um solo residual, podendo levar a um tempo muito elevado para o processo.

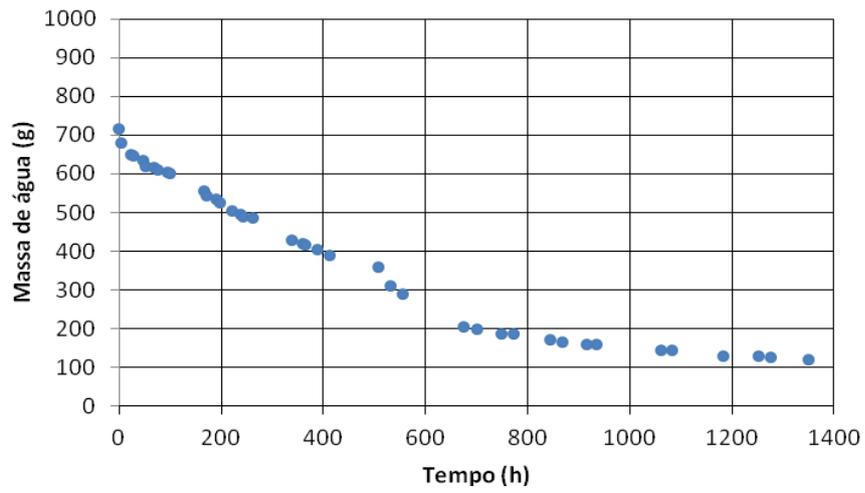


Figura 42 - Evaporação para o lisímetro 01 (Fonte: Autor)

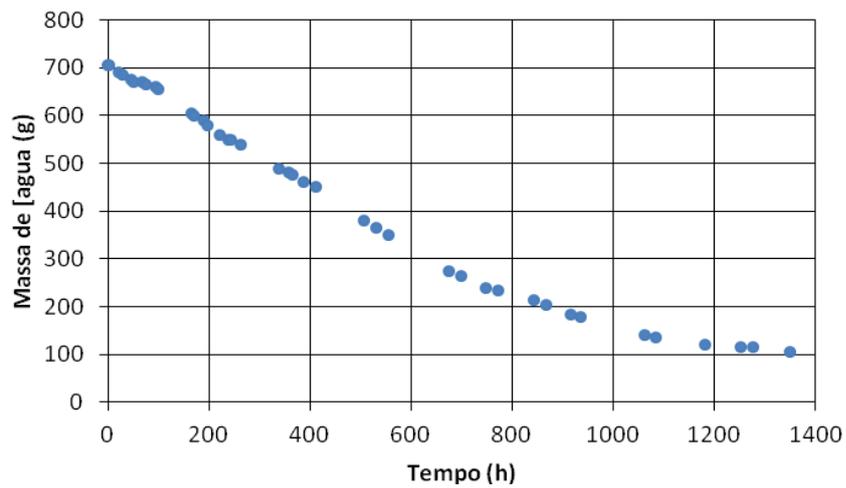


Figura 43 - Evaporação para o lisímetro 02 (Fonte: Autor)

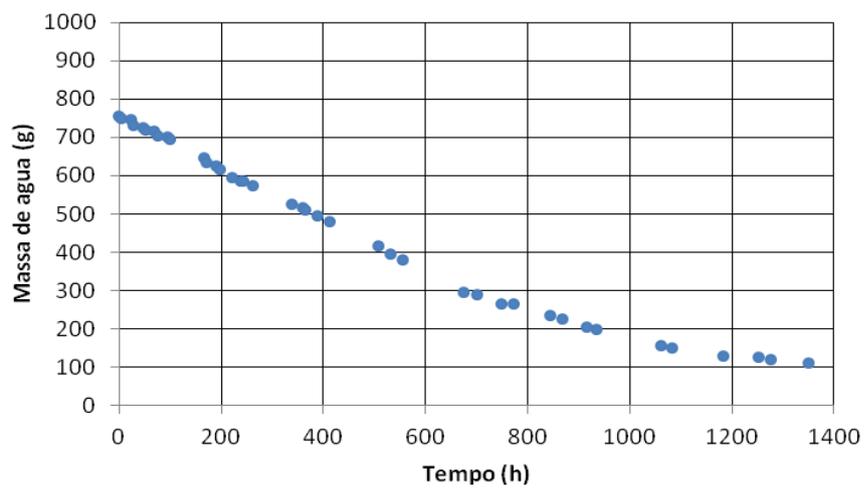


Figura 44 - Evaporação para o lisímetro 03 (Fonte: Autor)

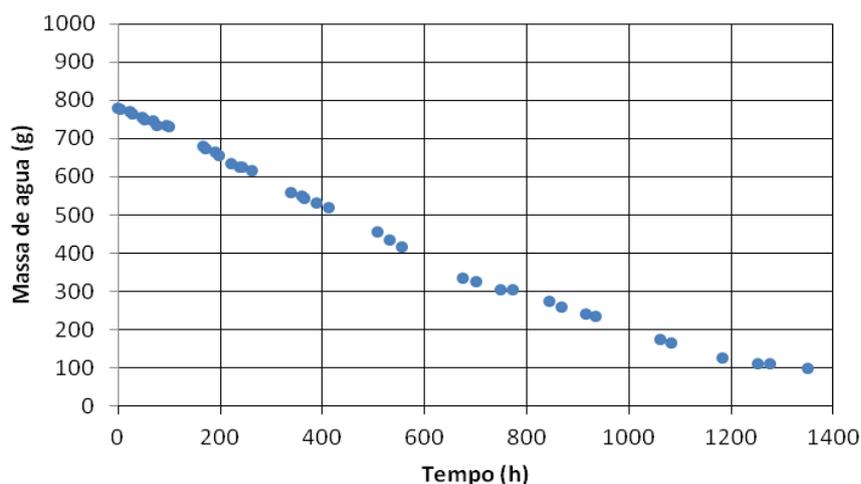


Figura 45 - Evaporação para o lisímetro 04 (Fonte: Autor)

Na tabela 29 estão presentes os valores correspondentes ao início da evaporação e a massa final, com a porcentagem de retenção respectiva.

Lisímetro	Volume retido inicial (cm ³)	Volume retido final (cm ³)	Volume evaporado (cm ³)	Porcentagem final retido
1	691,45	120,25	571,20	17,39%
2	686,43	105,22	581,21	15,33%
3	761,59	110,23	651,36	14,47%
4	796,67	100,21	696,46	12,58%

Tabela 29 - Índices de Evaporação

Pelos gráficos e pela tabela observa-se que quanto mais grosso o solo, mais água ele perde inicialmente para um mesmo intervalo de tempo. Analisando o período todo, os solos mais finos perderam mais água. Isso pode estar relacionado ao fato de que os dutos de capilaridade ficaram melhores definidos nos solos de menor granulometria. Os solos de maior granulometria ao perder umidade formam rachaduras, descaracterizando assim os dutos de capilaridade.

Como exposto anteriormente, Linacre (1977) propôs uma forma simplificada para o estudo de evaporação. Para tanto é necessário obter a temperatura de orvalho. O ponto de orvalho é a temperatura na qual o vapor da água presente no ar ambiente passado do estado gasoso para o líquido.

A temperatura de orvalho é definida da seguinte forma:

$$T_o = T - (14,55 + 0,114 \times T) \times [1 - (0,01 \times H)] - \{(2,5 + 0,007 \times T) \times [1 - (0,01 \times H)]\}^3 - (15,9 + 0,117) \times (1 - (0,01 \times H))^{4,4} \quad (26)$$

Onde:

- T – temperatura ambiente; e
- H – umidade relativa.

Na tabela 30 estão representados os valores de T_o por dia de ensaio. Sendo que T foi obtido com os dados do WaterMark e os dados de umidade relativa do ar foram retiradas do site CPTEC-INPE no dia 20/11/12 na base de dados da estação de Piquete.

n° do dia	T	H	To	n° do dia	T	H	To
1	21,20	99	21,03	30	25,92	100	25,92
2	22,13	98	21,79	31	25,67	92	24,26
3	20,34	97	19,83	32	24,90	52	14,44
4	21,25	91	19,71	33	24,69	98	24,35
5	21,48	71	16,10	34	23,56	100	23,56
6	21,81	97	21,29	35	22,83	5	-18,65
7	21,95	88	19,87	36	21,92	100	21,92
8	22,17	60	14,14	37	22,49	100	22,49
9	22,81	45	10,24	38	22,30	75	17,73
10	23,02	32	5,33	39	22,26	65	15,48
11	22,94	96	22,26	40	22,23	83	19,23
12	23,62	42	9,91	41	22,27	99	22,10
13	21,98	100	21,98	42	23,34	84	20,51
14	21,74	75	17,19	43	24,24	85	21,58
15	22,17	92	20,80	44	25,50	66	18,81
16	22,47	70	16,83	45	26,10	56	16,75
17	22,61	100	22,61	46	26,56	66	19,82
18	24,18	81	20,76	47	27,26	55	17,54
19	25,61	45	12,80	48	26,82	65	19,82
20	26,10	41	11,79	49	25,23	52	14,74
21	24,93	38	9,56	50	22,13	100	22,13
22	24,42	100	24,42	51	21,78	100	21,78
23	24,66	67	18,24	52	22,25	98	21,91
24	24,96	76	20,52	53	22,58	97	22,07
25	25,51	60	17,30	54	22,97	96	22,28

26	25,94	50	14,77	55	23,70	75	19,09
27	26,19	75	21,51	56	24,50	65	17,61
28	26,10	51	15,24	57	25,50	83	22,44
29	26,31	67	19,83				

Tabela 30 - Resultados segundo Linacre (1977)

Com a temperatura de orvalho definida, pode-se aplicar a equação de Linacre (1977), com os seguintes parâmetros de entrada:

- $K = 500$, pois se trata de evaporação;
- $h = 550\text{m}$; e
- $A = -22,75^\circ$.

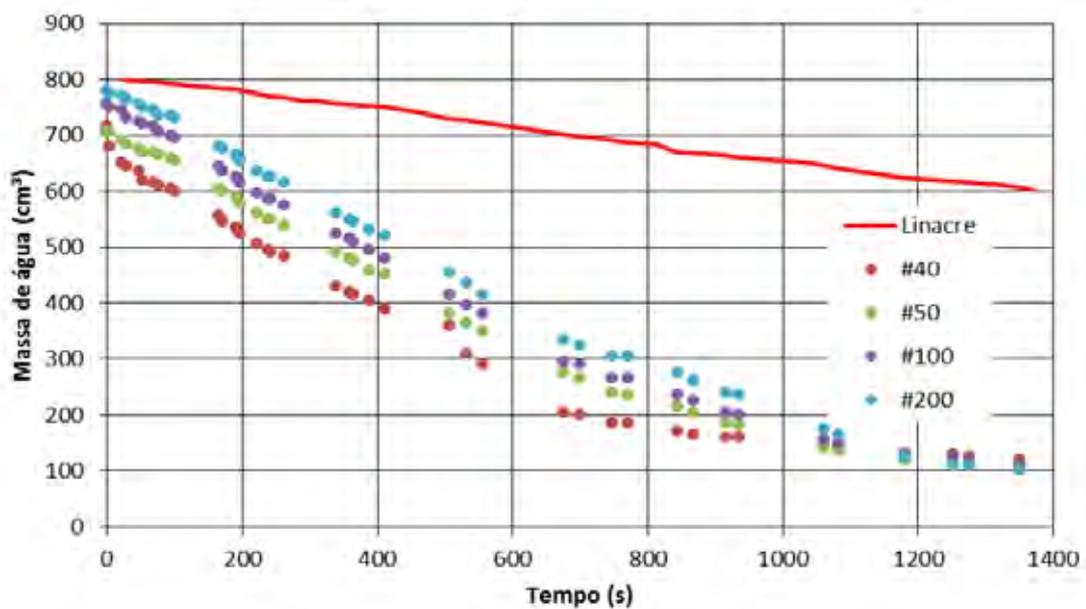


Figura 46 - Resultado segundo Linacre (1977) (Fonte: Autor)

A figura 46 apresenta o resultado segundo a formulação proposta por Linacre (1977). Para facilitar a análise foi considerado um volume inicial de 800 cm^3 de água. Esse resultado não retrata o que realmente ocorreu durante o ensaio, como pode ser observado comparando com os dados laboratoriais. A taxa de perda de massa inicial para os ensaios ficou por volta de 10 a 15 gramas ao dia, já a formulação de Linacre (1977) não apresenta uma perda grande no início..

A taxa de perda representada por Linacre (1977) se aproxima da taxa de perda do final dos ensaios, onde o solo apresenta uma camada superior menos umidade.

6 CONCLUSÕES

A metodologia de ensaio aplicada para o estudo da infiltração, percolação, retenção e evaporação através de lisímetros apresentou resultado satisfatório visto que essas diferentes parcelas puderam ser identificadas. O uso da câmera filmadora para o estudo da frente de umedecimento também apresentou resultado satisfatório, pois permite que o estudo dessa fase seja feito fora do local onde foi desenvolvido o experimento evitando-se o erro. O uso da balança foi de suma importância para a análise de controle de massa no sistema. O frasco de *Mariotte* manteve a carga hidráulica constante, como a literatura pede.

Durante o processo pode-se constatar que para os três primeiros processos (infiltração, retenção e percolação) a diferença de granulometria do solo arenoso influenciou no processo. Para a amostra de solo residual essa diferença foi notável, apresentado um processo bem mais lento. Os gráficos de volume de água no sistema mostram claramente as diferentes fases do processo o qual permite a determinação da taxa de infiltração, velocidade de percolação, bem como a quantidade de água retida na amostra.

Para o processo da evaporação, segundo os dados laboratoriais, não há diferença significativa na perda de água e no tempo total estudados. A perda gerou em torno de 85% da massa inicial retida.

A amostra arenosa de maior granulometria (grãos com diâmetro entre 1,900 mm e 0,420 mm) foi a que apresentou maior dificuldade de análise, pois apresentou uma vazão maior do que a proporcionada pelo reservatório superior, os dados obtidos para os processos de infiltração e percolação não foram satisfatório.

Os resultados segundo Green-Ampt apresentaram coerência entre os dados laboratoriais e a teoria, alguns pontos apresentaram pequenas divergências. Para a teoria empírica de Horton, onde chegou-se a formulação através dos resultados obtidos em laboratório, o resultado foi satisfatório com ressalva para o valor da constante de decaimento β , que apresentou módulo igual a da velocidade de infiltração expressa em mm/s.

Para o estudo da evaporação, a formulação simplificada de Linacre (1977) não obteve o resultado esperado. Esse fato pode estar ligado a baixa taxa de perda de água estipulada pela formulação, apesar de variar conforme o dia, a mesma apresenta um comportamento quase retilíneo. Os resultados laboratoriais apresentaram uma grande taxa de perda inicial, diminuindo com o passar do tempo.

Alguns cuidados devem ser tomados para futuros estudos. O primeiro é em relação ao frasco de *Mariotte*, pois ele pode desregular com o passar do tempo. Outro cuidado é

acrescentar, para o estudo da frente de umedecimento, um ou dois pontos de referencia, pois assim teriam mais dados, transformando assim, o experimento em um experimento mais seguro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAJA M. Das. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6 ed. Tradução All Tasks, revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo. Thomson Learning, 2007.

BRANDÃO, V. dos S. et al. **Infiltração da água no solo**. 3ed. Viçosa. Editora UFV, 2009. 120p.

CAMPECHE, L.F.S.M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da cultura da lima ácida "Tahiti" (Citrus latifolia Tan)**. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. 67p.

CARVALHO, D.F.; Silva, L.D.B. – **Hidrologia**, 2006, 117p.

CARVALHO, D.F.; Silva, L.D.B.; Guerra, J.M.G.; Cruz, F.M.; Souza, A.P. - Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, maio/ago. 2007.

CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. **Geomorfologia, exercícios, técnicas e aplicações**. Bertrand Brasil S.A., 1996. 350p.

FAJARDO, J.D.V.; Ferreira, S.J.F.; Miranda, S.A.V.; Marques filho, A.D. - Características hidrológicas do solo saturado na reserva florestal Adolpho Ducke - Amazônia Central. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 4, p. 677-684, 2010.

FARIA, R.T.D.; CAMPECHE, F. D. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 10, n. 1, p. 237-242, outubro 2006.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 3.ed. Prentice Hall, 1994. 691p.

KIRKHAM, R. R.; GEE, G. W.; JONES, T. L. Weighing lysimeters for long-term water balance investigations at remote sites. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 48, n. 5, p. 1203-5, 1984.

LINACRE, E.T. **A simple Formula for Estimating Evaporation rates in Various Climates, using Temperature Data alone**. Agricultural Meteorology, Elsevier Scientific Publishing Company, 1977, Netherland, V. 18, 409-424.

MOLINARI, D.C. Hidrologia superficial em encostas: Infiltração de água e movimentos de massa - o caso da fazenda Caipuru - Presidente Figueiredo – Amazonas. **Revista Discente Expressões Geográficas**, Florianópolis, SC, v. 1, p. 57-71, junho 2005.

MORAES, J.M.; Schuler, A.E.; Grandique, M.E.G.; Milde, L.C.; Groppo, J.D.; Martinelli, L.A.; Victoria, R.L. - . Propriedades físicas do solo na parametrização de um modelo hidrológico. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, março 2003.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Editora Edgar Blücher; Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar, 1976. 279p.

QUAGLIA, L. **Calibração de um lisímetro de pesagem para monitoramento da evaporação do solo sem cobertura vegetal**. 2005. 104p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2005.

SANTOS, G.V.; Análise hidrológica socioambiental da bacia hidrográfica do Córrego Romão dos Reis. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 31, n. 5, p. 931-940, 2007.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1993. 943p.