

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LARISSA FERNANDES COSTA**

**SIMULAÇÃO E PROJETO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL**

**Recife**

**2015**

**LARISSA FERNANDES COSTA**

**SIMULAÇÃO E PROJETO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco.

**Recife**

**2015**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

C837s Costa, Larissa Fernandes.  
Simulação e projeto de pavimentação permeável / Larissa Fernandes  
Costa. – Recife: O Autor, 2015.  
76f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Coorientador: Doutorando Artur Paiva Coutinho.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.

Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Infiltração. 3. Drenagem Urbana. 4. Pavimento permeável. 5. Hydrus-ID. 6. Modelagem. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). II. Coutinho, Artur Paiva (Coorientador). III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO  
DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S) : 1 - LARISSA FERNANDES COSTA

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador:** Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

**Examinador 1:** Artur Paiva Coutinho

**Examinador 2:** Paulo Frassinete de Araújo Filho

**Examinador 3:** Pedro Oliveira da Silva

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:** SIMULAÇÃO E PROJETO DE  
PAVIMENTO PERMEÁVEL

**LOCAL:** CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG - GALPÃO DE  
HIDRÁULICA

**HORÁRIO DE INÍCIO:** 16:00 horas

Em sessão pública, após exposição de cerca de.....minutos, o(s)  
candidato(s) foi (foram) argüido(s) oralmente pelos membros da  
banca, sendo considerado(s):

**1) (..) aprovado(s),** pois foi demonstrado suficiência de  
conhecimento e capacidade de sistematização no tema da  
monografia e o texto do trabalho aceito

**(..) Sem revisões.**

**(..) Com revisões,** a serem feitas e verificadas pelo orientador  
no prazo máximo de 30 dias.(o verso da folha da ata poderá ser  
utilizado para pontuar revisões).

**2) (..) reprovado(s).**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada  
pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife,.....de.....de 20....

Orientador:.....

Examinador 1:.....

Examinador 2:.....

Examinador 3:.....

Candidato 1.....

Dedico esse trabalho a cidade do Recife que vem enfrentando situações caóticas em dias chuvosos, onde a cidade, que já possui engarrafamentos diários, pára devido aos alagamentos caudados pela falta de planejamento na infra-estrutura.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Zé Grandão (Érico Costa) e Momozinha (Norma Nei), e às minhas irmãs, Quita (Érica), Germany (Germana) e Juca (Júlia), que sempre me deram muito amor, apoio e oportunidades de sempre seguir em frente e crescer. Que me ajudaram nas fases difíceis e que aguentaram todos os meus estresses.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado ajudando a superar mais uma fase da minha vida. Especialmente aos meus amigos, Pai (José Junior) e Bubinha (Paulo Bandeira), que sempre me apoiaram desde o início da faculdade, e aos meus amigos Tiago Andrade e André Marques que me ajudaram com os muitos trabalhos e as muitas provas nessa reta final do curso.

Ao meu querido professor, coorientador e amigo, “Doutor” Artur Paiva Coutinho, pelas longas conversas de incentivo e pela imensa ajuda na elaboração desse trabalho. E ao meu orientador, Jaime Cabral, também pela ajuda na elaboração desse trabalho e por sempre buscar sua melhoria.

A minha Universidade, que mesmo com seus problemas, me proporcionou momentos maravilhosos de aprendizado que levarei para toda a vida.

"Cada (tic-tac) es un segundo de la vida que pasa, huye, y no se repite. Y hay en ella tanta intensidad, tanto interés, que el problema es sólo saberla vivir. Que cada uno lo resuelva como pueda."

(Frida Kahlo)

## RESUMO

O aterramento do mangue na região da cidade do Recife teve como intuito sua urbanização. Porém, o aumento da densidade populacional juntamente ao processo de urbanização sem um planejamento adequado faz com que o sistema de drenagem urbana venha apresentando grandes problemas, não atendendo a demanda de água escoada através do solo impermeabilizado. As medidas estruturantes compensatórias estão sendo estudadas e utilizadas para diminuir a impermeabilização do solo das grandes cidades, controlando o escoamento superficial e aumentando o volume de água infiltrada. Portanto, elas possuem o objetivo de evitar a sobrecarga do sistema de drenagem, evitando alagamentos nos grandes centros urbanos. O pavimento permeável é uma medida compensatória, onde parte da água infiltrada vai para um reservatório de pedra, no intuito de diminuir o volume de água escoada e aumentar o volume das águas subterrâneas. Esse trabalho consiste em fazer um estudo sobre o efeito da heterogeneidade sobre as variáveis de fluxo de um pavimentos permeável. Foram realizadas simulação numéricas utilizando o programa Hydrus-1D, onde foram analisados quatro cenários com diferentes condições de contorno: escoamento superficial e drenagem livre na base; escoamento superficial e lençol freático na base; carga hidráulica na superfície e drenagem livre na base; e carga hidráulica na superfície e lençol freático na base. Portanto, o trabalho consiste em demonstrar o comportamento das variáveis de fluxo quando se considera um subleito homogêneo ou subleito heterogêneo. Nesse trabalho, utiliza-se o método da chuva envelope para o dimensionamento de uma estrutura de infiltração. Como metodologias tridimensionais de infiltração, utilizou-se o método BEST. No tocante ao dimensionamento, para uma condutividade hidráulica de 50mm/h. A aplicação do método da chuva envelope para uma i-d-f característica da cidade do Recife, apresentou volumes necessários para a camada de reservatório do pavimento permeável entre 11,93 e 18,069 m<sup>3</sup>.

### **PALAVRAS CHAVE:**

Infiltração. Drenagem Urbana. Pavimento Permeável. Hydrus-1D. Modelagem.

**ABSTRACT**  
**SIMULATION AND PROJECT OF PAVEMENT PERMEABLE**

The mangrove grounding in Recife city of the region was to order its urbanization. However, the increase in population density along the urbanization process without adequate planning makes the urban drainage system has been presenting major problems, not meeting water demand drained through the sealed soil.

Compensatory structural measures are being studied and used to reduce soil sealing of large cities, controlling runoff and increasing the volume of infiltrated water. Therefore, they have the goal of preventing overload of the drainage system to avoid flooding in urban centers.

The permeable pavement is a compensatory measure, where part of the infiltrated water goes to a stone reservoir, in order to reduce the volume of runoff water and increase the volume of groundwater.

This work consists of a study on the effect of heterogeneity on flow variables of permeable pavements. Were carried out numerical simulation using the Hydrus-1D program, which analyzed four scenarios with different boundary conditions: runoff and free drainage at the base; runoff and groundwater at the base; hydraulic load on the surface and free drainage at the base; and hydraulic load on the surface and groundwater base. Therefore, the work is to demonstrate the behavior of the flow variables when considering a homogeneous or heterogeneous subgrade.

In this work, we use the method of rain envelope for the design of an infiltration structure. As three-dimensional infiltration methods was used BEST method.

Regarding the design for a hydraulic conductivity of 50 mm / h. Application of rain envelope method for i-d-f feature of the city of Recife, presented volumes required for pavement reservoir layer permeable between 11.93 and 18.069 m<sup>3</sup>.

**KEYWORDS:**

Infiltration. Urban Drainage. Permeable Pavement. Hydrus-1D. Modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Impactos da urbanização (adaptado de Hall, 1986).....	15
<b>Figura 2:</b> Efeito da urbanização no hidrograma da bacia (Schueler, 1987).....	19
<b>Figura 3:</b> Perfil de uma bacia de retenção (CASQA, 2003).....	20
<b>Figura 4:</b> Tipo de armazenamento de água dos telhados (adaptado de aU, 2008).....	21
<b>Figura 5:</b> Vala de infiltração (WSUD, 1999).....	21
<b>Figura 6:</b> Trincheira de infiltração (Melo, 2011) .....	22
<b>Figura 7:</b> Pavimento permeável (Melo, 2011) .....	22
<b>Figura 8:</b> Infiltrômetro (Villela e Mattos, 1975) .....	25
<b>Figura 9:</b> Problemas de águas pluviais em vias da Cidade do Recife.....	26
<b>Figura 10:</b> Precipitação pluviométrica para o ano de 2011 para a cidade do Recife. Dados da estação LAMEPE/ITEP.....	28
<b>Figura 11:</b> Localização do pavimento permeável piloto. Estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE-CTG-UFPE.....	29
<b>Figura 12:</b> Estrutura do pavimento permeável (Coutinho, 2011).....	30
<b>Figura 13:</b> retirada de solo natural para execução do pavimento permeável piloto.....	30
<b>Figura 14:</b> Pavimento permeável preenchido até a camada de brita e posterior aplicação da camada de geotêxtil drenante .....	31
<b>Figura 15:</b> Camada de areia e execução do revestimento em blocos intertravados de concreto vazados .....	31
<b>Figura 16:</b> Preenchimento das juntas do revestimento com argamassa .....	32
<b>Figura 17:</b> Esquematização das simulações realizadas e os gráficos gerados em cada uma delas. ....	36
<b>Figura 18:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há escoamento superficial e drenagem livre no subleito.....	37
<b>Figura 19:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há escoamento superficial e drenagem livre no subleito.....	37
<b>Figura 20:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há escoamento superficial e lençol freático no subleito.....	38
<b>Figura 21:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há escoamento superficial e lençol freático no subleito.....	38
<b>Figura 22:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e drenagem livre no subleito .....	39
<b>Figura 23:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e drenagem livre no subleito .....	39
<b>Figura 24:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e lençol freático no subleito .....	40
<b>Figura 25:</b> Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e lençol freático no subleito .....	40
<b>Figura 26:</b> Aplicação do método da chuva envelope .....	43
<b>Figura 27:</b> Fluxo na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.....	47

<b>Figura 28:</b> Fluxo na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.....	48
<b>Figura 29:</b> Pressão na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito..	49
<b>Figura 30:</b> Pressão na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.....	49
<b>Figura 31:</b> Infiltração acumulada, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.....	50
<b>Figura 32:</b> Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito. ....	51
<b>Figura 33:</b> Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito. ....	52
<b>Figura 34:</b> Fluxo na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.....	53
<b>Figura 35:</b> Pressão na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.....	54
<b>Figura 36:</b> Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito. ....	54
<b>Figura 37:</b> Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito. ....	56
<b>Figura 38:</b> Fluxo na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.....	57
<b>Figura 39:</b> Fluxo na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.....	57
<b>Figura 40:</b> Pressão na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleito homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.....	58
<b>Figura 41:</b> Pressão na saída do pavimento, em função do tempo, para subleito homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.....	59
<b>Figura 42:</b> Infiltração acumulada, em função do tempo, para subleito homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.....	59
<b>Figura 43:</b> Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito. ....	60
<b>Figura 44:</b> Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito. ....	61
<b>Figura 45:</b> Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito. ....	62

<b>Figura 46:</b> Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito. ....	63
<b>Figura 47:</b> Comportamento da umidade volumétrica em função do tempo para um subleito homogêneo do pavimento permeável. ....	64
<b>Figura 48:</b> Comportamento da umidade volumétrica em função do tempo para um subleito homogêneo do pavimento permeável. ....	65
<b>Figura 49:</b> Ajuste da infiltração acumulada ao método de BEST. ....	66
<b>Figura 50:</b> Aplicação do método da chuva envelope para tempos de retorno de 2, 5, 10e 25 anos. Infiltração obtida a partir do método BEST .....	67

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Parâmetros Hidráulicos das camadas do pavimento permeável (Coutinho, 2011) .	32
<b>Tabela 2:</b> Classificação da textura, massa específica do solo, massa específica das partículas do solo e porosidade teórica para os solos do revestimento e subleito do pavimento permeável. (Coutinho, 2011).....	33
<b>Tabela 3:</b> Propriedades hidrodinâmicas do solo heterogêneo estimadas pelo Hydrus -1D a partir do software Rosetta. ....	34
<b>Tabela 4:</b> Características granulométricas para o solo utilizado nesse estudo. ....	44
<b>Tabela 5:</b> Desempenho do modelo de BEST.....	65
<b>Tabela 6:</b> Parâmetros hidráulicos para o método BEST.....	66
<b>Tabela 7:</b> Volume a armazenar no pavimento permeável (m <sup>3</sup> ) .....	67

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVOS .....	17
2.1	Justificativa.....	17
2.2	Objetivo geral .....	17
2.3	Objetivos específicos .....	17
3	REVISÃO DE LITERATURA .....	18
3.1	Medidas compensatórias .....	20
3.1.1	<i>Medidas estruturais</i> .....	20
3.1.2	<i>Medidas estruturantes</i> .....	23
3.2	Pavimento Permeável .....	23
3.2.1	<i>Geotêxtil drenante</i> .....	24
3.3	Infiltração .....	25
3.3.1	<i>Infiltrômetros</i> .....	25
4	METODOLOGIA .....	26
4.1	Área de estudo .....	26
4.2	Precipitação .....	27
4.3	Descrição do modelo experimental.....	29
4.3.1	<i>Pavimento permeável piloto</i> .....	29
4.3.2	<i>Etapas construtivas do pavimento piloto</i> .....	30
4.3.3	<i>Propriedades hidráulicas do pavimento piloto</i> .....	32
4.3.4	<i>Subleito do pavimento piloto</i> .....	32
4.4	Hydrus – 1D.....	34
4.5	Hipóteses e considerações adotadas nas simulações numéricas no hydrus-1D ..	35
4.5.1	<i>Cenário 1</i> .....	37
4.5.2	<i>Cenário 2</i> .....	38
4.5.3	<i>Cenário 3</i> .....	39
4.5.4	<i>Cenário 4</i> .....	40
4.6	Dimensionamento de um pavimento permeável .....	41
4.6.1	<i>Definição do problema do dimensionamento do pavimento permeável</i> .....	42
4.6.2	<i>Método de Infiltração Tridimensional e aximétrica – Método BEST</i> .....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	47
5.1	Modelagem .....	47

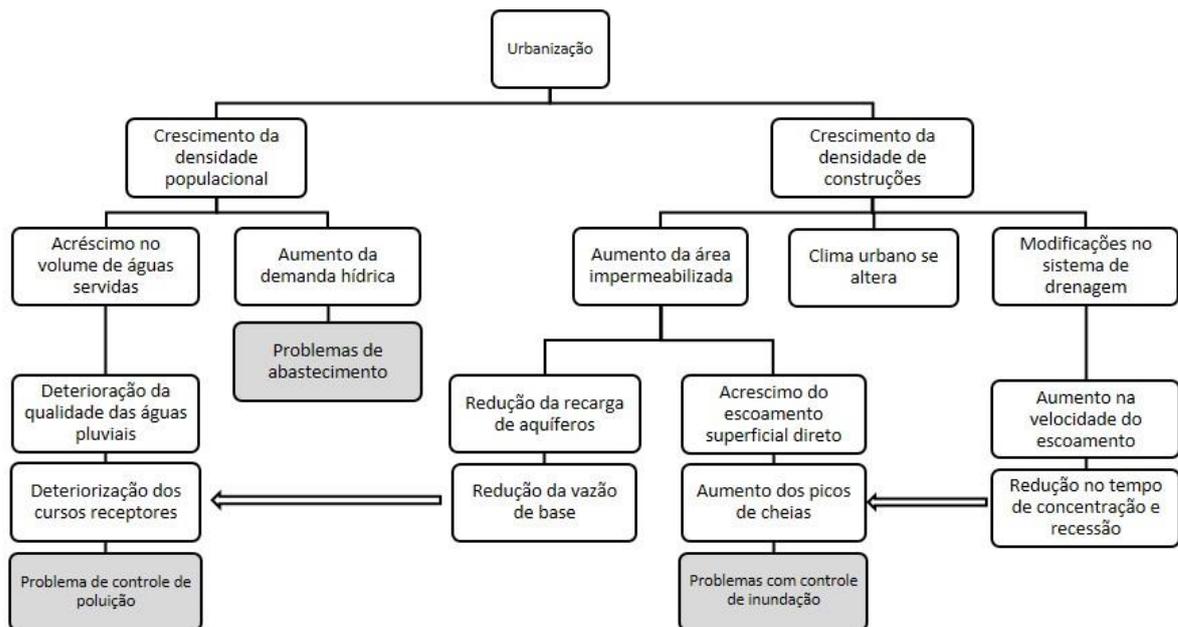
5.1.1	<i>Escoamento superficial e drenagem livre no subleito.....</i>	<i>47</i>
5.1.2	<i>Escoamento superficial e lençol freático no subleito.....</i>	<i>52</i>
5.1.3	<i>Carga hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.....</i>	<i>56</i>
5.1.4	<i>Carga hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.....</i>	<i>61</i>
5.2	<b>Dimensionamento do Pavimento .....</b>	<b>65</b>
6	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>68</b>
7	<b>RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>73</b>
	<b>Apêndice A – Cenário 2.....</b>	<b>73</b>
	<b>Apêndice B – Cenário 4 .....</b>	<b>74</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A industrialização no Brasil durante as décadas de 60 e 70 impulsionou o alto crescimento da população urbana. Esse crescimento se deu de forma acelerada e sem planejamento, trazendo como consequência a ocupação de áreas de risco (regiões ribeirinhas, morros e encostas) sem o acompanhamento igualitário das infraestruturas urbanas para os serviços de saneamento.

A elevada urbanização vem modificando a cobertura natural do solo, onde a vegetação é substituída em geral por superfícies impermeáveis, principalmente por concreto e asfalto. Do ponto de vista hidrológico os principais impactos decorrentes da urbanização são o aumento dos volumes do escoamento superficial e o aumento da velocidade do escoamento da água trazendo como consequências, alagamentos e inundações. Esses impactos ocorrem devido à diminuição da possibilidade de infiltração e armazenamento de água no solo e a não existência do atrito que antes havia com a vegetação. Além disso, a densa urbanização produz uma maior quantidade de lixo, que armazenado inadequadamente poderá resultar na deterioração da qualidade das águas superficiais e deterioração dos componentes da rede de drenagem. A impermeabilização da superfície também provoca o aumento da temperatura, esta absorve mais calor da radiação solar que o solo natural, causando desconforto térmico nos grandes centros urbanos. Os impactos causados pelo elevado grau de urbanização estão representados esquematicamente na Figura 1.

**Figura 1:** Impactos da urbanização (adaptado de Hall, 1986)



A solução mais tradicional utilizada no controle de alagamentos nos centros urbanos é a canalização, que substitui os caminhos naturais por galerias artificiais que nem sempre garantem um escoamento rápido das águas pluviais.

A bacia normalmente começa a ser urbanizada à jusante (áreas mais planas). Assim, as primeiras canalizações também são feitas nessa área. A medida que a urbanização cresce em sentido à montante, a canalização segue esse curso e a área que antes serviam de armazenamento natural em época de cheias transfere suas águas para jusante. Portanto, é demandando um rendimento maior da rede à jusante, sendo as vezes necessário o seu remodelamento, resultando em custos mais elevados. Dessa forma essa medida não é definitiva, apenas transfere a inundação de um ponto a outro.

Visto isso, surgiram tecnologias sustentáveis para o manejo das águas pluviais urbanas, no intuito de reduzir o volume e a velocidade do escoamento superficial. Essas tecnologias, também chamadas de medidas alternativas ou medidas compensatórias (BAPTISTA e BARRAUD, 2005), tentam reconstruir a vazão de solo natural, onde as águas das chuvas voltam a ser interceptada antes de chegarem a rede de drenagem. Essa prática diminui os custos de implantação e de manutenção do sistema.

As principais tecnologias sustentáveis utilizadas para diminuir ou compensar o impacto gerado pela urbanização são os pavimentos permeáveis, reservatórios de retenção e retenção, trincheiras filtrantes, dentre outras.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Justificativa**

As falhas e até mesmo o colapso do sistema convencional de drenagem urbana baseado na transferência de escoamento para a jusante, levaram a mudança de paradigma e a utilização de novas tecnologias fundamentadas na infiltração e no aumento da capacidade de armazenamento das águas pluviais urbanas em detrimento ao uso da canalização. Um dos pilares das técnicas compensatórias é a drenagem da água de escoamento superficial por infiltração. A infiltração é um fenômeno que depende essencialmente do tipo de solo e das heterogeneidades associada ao solo. Nesse contexto, é importante a existência de trabalhos que verifiquem o impacto da heterogeneidade do solo nos processos de infiltração que ocorrem em uma técnica compensatória.

### **2.2 Objetivo geral**

Analisar o efeito da heterogeneidade hidrodinâmica do subsolo nos processos de transferência numa técnica compensatória de infiltração

### **2.3 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos estão definidos a seguir:

- Avaliar o efeito da heterogeneidade do subleito de um pavimento piloto, considerando diferentes solicitações hidrológicas na superfície: escoamento superficial e carga hidráulica;
- Avaliar o efeito da heterogeneidade do subleito de um pavimento piloto, considerando diferentes condições no limite inferior do pavimento permeável;

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Os processos de industrialização no Brasil ocorreram de forma tardia, e com ele, na década de 60, aconteceu um grande índice de migração do campo para a cidade. A população rural que vinha para as cidades buscava melhores condições de vida, como ofertas de emprego, sistemas básicos de educação, saúde, transporte e saneamento básico. Porém, como possuíam baixa qualificação, esses imigrantes eram considerados como mão-de-obra barata, e não recebiam boa remuneração por suas atividades. Com o custo de vida elevados nas cidades, esse trabalhadores acabavam se instalando de forma desordenada na periferia, gerando vários problemas de infraestrutura urbana.

Segundo Carneiro e Miguez (2011), a urbanização que ocorreu no Brasil é chamada de urbanização anômala ou desintegrada, onde não há a integração entre a cidade e o campo, criando anomalias setoriais e urbanas com o aparecimento das sub-habitações de periferias pobres e sem infraestrutura.

Na cidade do Recife esse cenário não foi diferente, as áreas de planícies constituídas por pequenas ilhas foram sendo ampliadas com aterros sucessivos para ampliar as áreas de moradia, comércio e circulação de pessoas e veículos. Até os dias de hoje a ocupação da cidade se dá de forma desordenada, onde percebe-se a falta de política governamental capaz de vencer os desafios. A população da cidade é maior que sua capacidade, contando com um grande número de habitações precárias em áreas de risco com infraestrutura de saneamento precária e um elevado estado de degradação ambiental (Cabral e Alencar, 2005). Os autores ainda afirmam: *“A falta de planejamento urbano com visão de futuro e de uma política de controle ambiental contribuiu decisivamente para os problemas de drenagem da cidade, inclusive forçando a adoção de soluções não muito apropriadas.”*

Um dos grandes problemas de infraestrutura das grandes cidades brasileiras é o mau funcionamento da rede de drenagem (redes de micro e macro drenagem). Esse mal funcionamento amplifica o efeito de severas enchentes, gera grandes áreas de alagamento, causando prejuízos e expondo a população a riscos diversos.

De acordo com Carneiro e Miguez (2011), o sistema de drenagem tem como objetivo a coleta, o manejo e a disposição das águas pluviais em corpos d'água aptos a sua recepção. Além disso, o sistema de drenagem urbana interage com os sistemas de saneamento ambiental. Em ambos os casos, não haverá bom funcionamento se o sistema de coleta de lixo está deficiente.

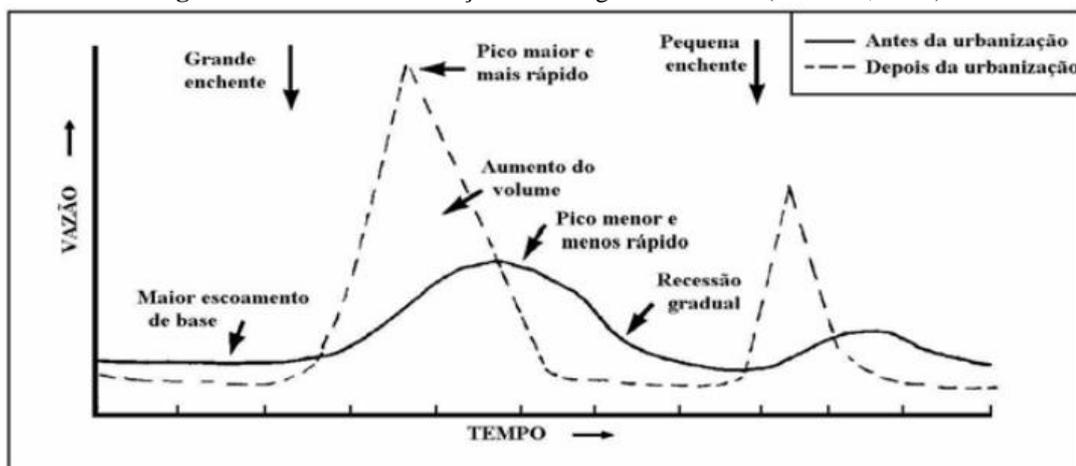
Segundo Cabral e Alencar (2005), cerca de 1% do lixo produzido na cidade do Recife não é coletado pela falta de educação ambiental da população, que joga os papeis e sacos plásticos nas ruas e canais, trazendo problemas significativos para a drenagem urbana.

O sistema de drenagem está subdividido em microdrenagem e macrodrenagem, onde o primeiro é o sistema de condutos construídos para receber e conduzir as águas das chuvas provenientes das construções, vias, praças, etc. Já o segundo é a rede de drenagem natural, existente anteriormente a urbanização, como rios e córregos, que podem ser modificados e complementados por obras de canalização, barragens, diques, etc. (Carneiro e Miguez, 2011).

Nos terrenos naturais, antes da ocupação humana, as águas das chuvas tendem a escoar para um curso de água permanente ou se acumulam no solo para posterior infiltração, portanto as cheias são fenômenos naturais que ocorrem em períodos de chuvas. Porém com a urbanização essas cheias são agravadas pela substituição da camada natural do solo por concreto e asfalto, pela ocupação de áreas ribeirinhas e planícies inundáveis, disposição de esgoto e lixo nas redes de drenagem, etc.

Essas modificações humanas do meio acarretam mudanças na situação original de equilíbrio, aumentando e adiantando o pico de cheia (Figura 2), pois a possibilidade de infiltração diminui, gerando um aumento de volume e de velocidade das águas disponíveis para escoamento.

**Figura 2:** Efeito da urbanização no hidrograma da bacia (Schueler, 1987)



As inundações das ruas afetam o tráfego de pedestres e carros nas vias, podem causar danos aos edifícios e a infraestrutura urbana, gerar proliferação de doenças e causar a deterioração da qualidade das águas dos rios, lagos e córregos.

Atualmente são inúmeras as técnicas de controle de alagamento no âmbito de manejo sustentável das águas pluviais, onde são usadas medidas estruturais e estruturantes ou não estruturais.

### 3.1 Medidas compensatórias

#### 3.1.1 Medidas estruturais

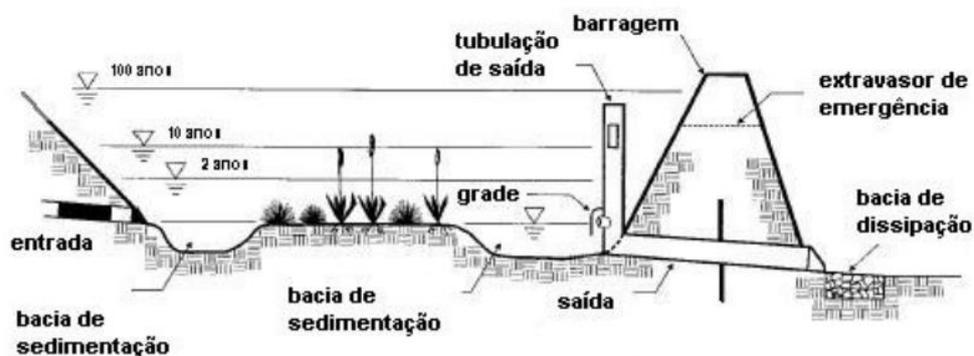
As ações de controle de alagamentos classificadas como estruturais ocorrem graças a construção de obras hidráulicas, como a construção de reservatórios e o uso de técnicas de infiltração e de percolação.

#### Medidas de Armazenamento

As medidas de armazenamento tem como finalidade a retenção de parte do volume da água escoada no intuito de reduzir o pico do hidrograma, amortecendo a vazão ao longo do tempo. As obras mais usuais são:

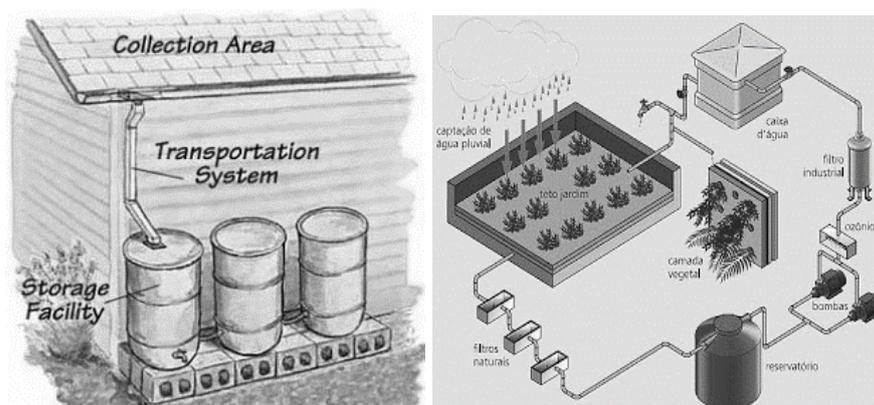
- Reservatório de Detenção: aquele que detém temporariamente parte do volume de água escoada que será drenada por um dispositivo de descarga para que haja um controle de vazão de saída (Figura 3).

**Figura 3:** Perfil de uma bacia de detenção (CASQA, 2003)



- Reservatório de Retenção: aquele que detém parte do volume da água escoada, mantendo uma lâmina de água mínima constante, ou seja um volume morto. Tem como finalidade o amortecimento da vazão das águas escoadas, diminuição da deposição de sedimentos nos dispositivos de drenagem e a depuração de poluentes.
- Armazenamento de água dos telhados: utilizado em áreas densamente povoadas, consiste em armazenar parte da água da chuva que cai sobre os telhados com finalidade de diminuir o escoamento superficial. Esse armazenamento pode ser feito no próprio telhado, através da implantação dos telhados verdes, ou pode ir diretamente para um dispositivo de infiltração ou barril de chuva (Figura 4).

**Figura 4:** Tipo de armazenamento de água dos telhados (adaptado de aU, 2008)



### **Medidas de Infiltração**

Segundo Carneiro e Miguez (2011), as medidas de infiltração consistem em retardar o escoamento superficial criando condições para aumentar a capacidade de infiltração e percolação da água. As medidas mais utilizadas para tal fim são: reflorestamento, construção de valo de infiltração, uso de pavimento permeável e utilização de trincheiras de infiltração.

- **Reflorestamento:** consiste em melhorar a qualidade e a distribuição da água nas cidades, onde se verifica modificações em parcela do balanço hídrico. Ajudam a atenuar o microclima da região, são utilizadas como áreas de lazer e preservam a flora e fauna. Além disso, ajudam na diminuição da erosão do solo, minimizando o assoreamento causado pelo transporte de sólidos no sistema de drenagem.
- **Vala de infiltração:** construída para acumular o fluxo de água adjacente e permitir sua infiltração ao longo de seu comprimento (Figura 5). São geralmente utilizadas paralelamente a estradas, estacionamentos e conjuntos habitacionais.

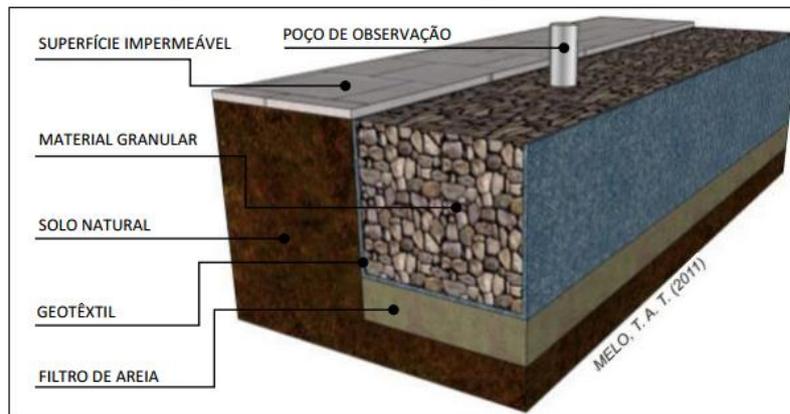
**Figura 5:** Vala de infiltração (WSUD, 1999)



- **Trincheira de infiltração:** consiste no armazenamento de água até sua total infiltração no solo com a finalidade de diminuir o escoamento superficial e

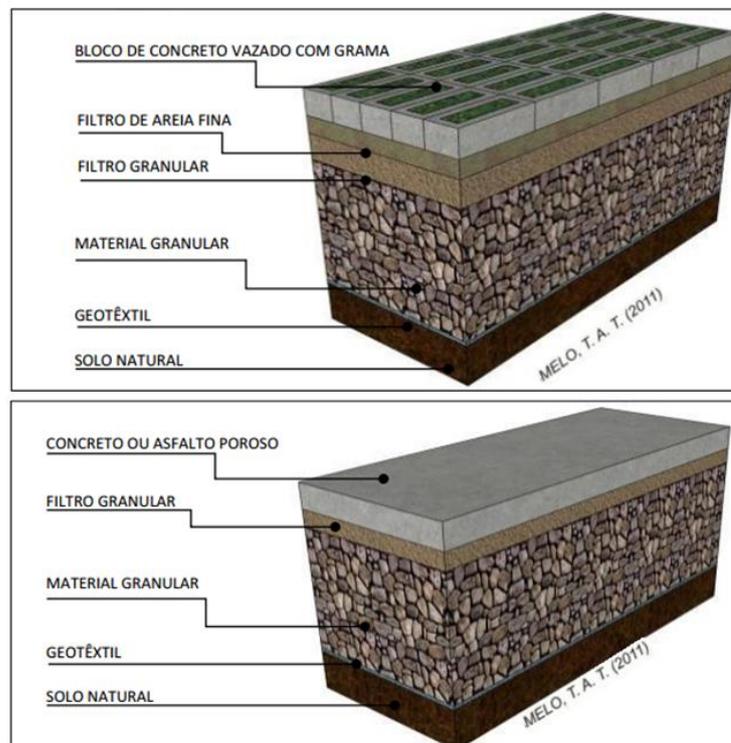
aumentar a recarga do lençol freático, além de reduzir significativamente a quantidade de sólidos em suspensão (Figura 6). São utilizadas em áreas residenciais e comerciais onde o solo é permeável.

**Figura 6:** Trincheira de infiltração (Melo, 2011)



- Pavimentos Permeáveis: dispositivo utilizado para desviar o escoamento superficial através de uma superfície permeável para dentro de um reservatório de pedra abaixo da superfície, reduzindo os efeitos de impermeabilização da bacia urbana (Figura 7). São utilizados em passeios, estacionamentos, ruas de pequeno tráfego e áreas de lazer.

**Figura 7:** Pavimento permeável (Melo, 2011)



### **3.1.2 Medidas estruturantes**

As medidas estruturantes são aquelas de caráter preventivo que juntamente com as medidas estruturais podem diminuir os prejuízos causados por alagamentos. Destacam-se dentro das medidas estruturantes:

- Limpeza de logradouros e coleta de lixo, evitando o carreamento de sólidos grosseiros para a rede pluvial, diminuindo sua obstrução e/ou assoreamento;
- Educação ambiental vinculada às escolas, universidades, centro comunitários, meios de comunicação, governo;
- Zoneamento de área de alagamento e gestão dessas planícies, regulamentando o uso e ocupação dessas áreas;
- Planejamento de ações emergenciais e alertas de alagamentos;
- Construções a prova de enchentes;
- Seguro contra inundações.

## **3.2 Pavimento Permeável**

Denomina-se pavimento permeável um dispositivo utilizado como uma medida compensatória para reduzir o escoamento superficial, onde parte das águas é infiltrada para um reservatório de pedra. Esse sistema melhora a qualidade da água e contribui para o aumento da recarga de águas subterrâneas.

Tradicionalmente, os pavimentos permeáveis são construídos com as seguintes camadas:

- Revestimento poroso: camada superficial do pavimento que pode ser de concreto (poroso, ecológico e asfáltico) ou blocos intertravados (vazado e não vazado). Essa camada deve resistir às cargas estáticas e móveis dos veículos.
- Camada filtrante: posterior ao revestimento, é uma camada que pode ser de areia e serve para evitar a passagem de partículas maiores para o reservatório, evitando seu entupimento.
- Reservatório: camada posterior à camada de areia que possui a função de armazenamento. Devido a sua função deve ser composta por material de grande porosidade.
- Geotêxtil: possui a função de evitar que ocorra carreamento da areia para os espaços entre o agregado graúdo do reservatório, evitando seu entupimento.

Além disso, esse material reduz a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

### ***3.2.1 Geotêxtil drenante***

A preocupação com o meio ambiente vem se tornando cada vez mais frequente, onde são exigidas medidas para eliminar ou mitigar os efeitos negativos de qualquer fonte poluidora.

A grande urbanização e a impermeabilização do solo gera um aumento no volume de água escoada superficialmente, que é considerada como uma fonte de poluição difusa. Segundo Cabral et al. (2010), estudos recentes provaram que essas fontes poluidoras difusas constituem focos significativos de poluição. Os autores complementam:

“A dimensão e o tipo de acumulação dos poluentes nas superfícies pavimentadas dependem do próprio pavimento, do volume de tráfego, das atividades de manutenção, de variáveis sazonais e do uso da área adjacente.”

A poluição difusa ocorre devido a lavagem das ruas, carreando os poluentes acumulados nas superfícies. Muitos desses poluentes são características do tipo de pavimento, produtos de combustão dos veículos, perdas do sistema de lubrificação, degradação dos pneus, perdas de produtos transportados e produtos resultantes da corrosão e desgaste de componentes do veículo. Além disso, se destacam poluentes provenientes de fontes como poluição atmosférica, erosão do solo, indústrias, lixo e, animais e vegetação transportadas pela chuva e vento. (Cabral et al., 2010).

Os poluentes encontrados com maior frequência nas águas pluviais de áreas urbanas são os metais pesados, como chumbo, cobre e zinco; os hidrocarbonetos, oriundos do processo de combustão de combustíveis e óleos e; partículas sólidas, como poeira, areia, plásticos, etc. Geralmente ocorre a adsorção desses metais pesados e hidrocarbonetos às partículas sólidas.

Os geotêxteis são um tipo de geossintético feitos de um produto têxtil permeável, constituído por fibras oriundas da fusão de polímeros. No pavimento permeável estudado utilizou-se esse material entre as camadas de areia e o reservatório de brita, Figura 9, tendo como objetivo evitar entupimento desse último por partículas em suspensão na água infiltrada. Visto que os metais pesados e hidrocarbonetos geralmente se adsorvem a essas partículas, há uma redução desses poluentes infiltrados no solo.

Portanto, a utilização de pavimento permeável reduz a quantidade de poluentes que seriam carregados para os corpos d'água superficiais, pois parte do escoamento superficial irá infiltrar, e reduz a contaminação do solo e de corpos de água subterrânea com metais pesados, hidrocarbonetos e partículas sólidas, devido a utilização de geotêxteis para retenção de parte dos mesmos.

### 3.3 Infiltração

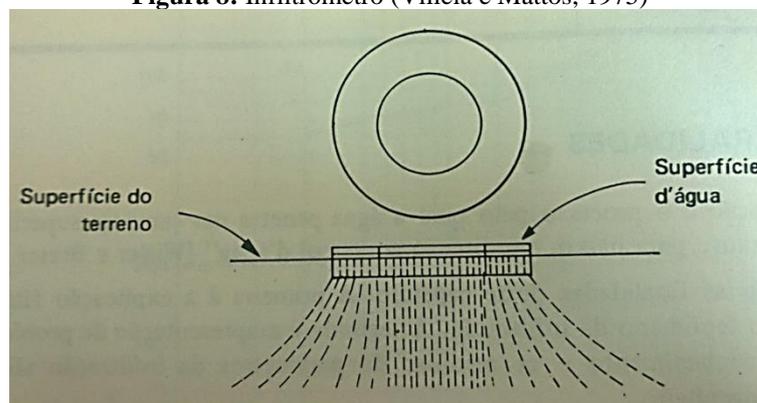
Infiltração é o fenômeno de penetração da água da superfície para o interior do solo (Siveira et al., 2009). Esse fenômeno ocorre nas camadas de solo próximas a superfície, movendo-se através dos vazios e sob ação da gravidade para baixo, até atingir uma camada que a retenha (Pinto et al., 2008).

Em um solo natural com diversas camadas entre a superfície e a zona de acumulação, com diferentes texturas e estruturas e apresentando comportamentos hidráulicos distintos o fenômeno da infiltração pode ser mais complexo (Silveira et al., 2009). Isso ocorre, pois são vários os fatores que interferem a infiltração como, tipo do solo, seu estado compactação e seu grau de umidade; altura de retenção superficial e espessura da camada saturada; cobertura vegetal; temperatura; entre outros.

Para cálculo da infiltração são utilizadas várias equações como equação de Horton, equação de Green e Ampt, equação de Philip e, as equações gerais de Darcy (solo saturado) e de Richards (solo não saturado).

#### 3.3.1 Infiltrômetros

**Figura 8:** Infiltrômetro (Villela e Mattos, 1975)



Segundo Pinto et al. (2008), os infiltrômetros são aparelhos utilizados para determinação direta da capacidade de infiltração local do solo (Figura 8). São tubos cilíndricos curtos que podem ser utilizados concêntricos ou não. Esses tubos são de chapa metálica e possuem diâmetros entre 200 e 900 mm.

Ainda de acordo com os autores, no caso de utilização de um tubo, este deve ser cravado até uma profundidade maior ou igual à da penetração da água ao longo do tempo do ensaio, evitando o erro causado pela dispersão lateral da água. Durante esse tempo, uma camada de 5 a 10 mm de espessura de água deve permanecer sobre o solo.

A capacidade de infiltração é determinada uma vez que se sabe a taxa de aplicação da água adicionada e esta é dividida pela área da seção transversal do tubo (Pinto et al., 2008).

Quando utilizados os tubos concêntricos, a água é adicionada nos dois compartimentos ao mesmo tempo, mantendo a mesma lâmina d'água mencionada anteriormente. O cilindro externo é utilizado para promover a quantidade de água necessária ao espalhamento lateral devido a capilaridade, deixando a infiltração ser medida em relação a área do cilindro interno, ou seja, atenua o efeito de dispersão da água deste tubo (Villela e Mattos,1975).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de estudo

**Figura 9:** Problemas de águas pluviais em vias da Cidade do Recife



A Região Metropolitana do Recife (RMR) é formada por 14 cidades e apresenta uma população de 3.887.261 habitantes (IBGE/2014), estando 41,38% dessa população concentrada na cidade do Recife, ou seja, 1.608.488 habitantes (IBGE/2014). Essa cidade, com uma densidade demográfica de 7.039,64 hab/km<sup>2</sup>, é densamente urbanizada, com concentração principalmente na área central e nos bairros da praia na Zona Sul, onde quase não se percebe área verde, prevalecendo edificações e ruas pavimentadas.

Recife situa-se em uma grande planície fluvio-marinha de baixa altitude, cotas variando de 1,0 até 10,0m acima do mar, e cercada por morros. Devido a essas características é considerada uma zona de captura de drenagem superficial (Figura 9).

Do ponto de vista do clima, o município se encontra no litoral-mata atlântica, cujo clima é o tropical quente úmido. A precipitação pluviométrica é considerada alta em relação a Região Nordeste do Brasil, apresentando uma média de 2.450,7mm/ano com período de chuva entre março e agosto.

Essas características resultam no alto risco de inundações e alagamentos que tem como principais causas:

- Chuvas torrenciais na própria área da cidade e/ou contribuição de chuvas das áreas vizinhas mais elevadas;
- Inundações naturais do rio;
- Variação das marés;
- Impermeabilização do solo, gerando grandes volumes de escoamento e ocasionando baixos índices de infiltração das águas das chuvas;
- Drenagem urbana precária devido à falta de planejamento no crescimento da cidade;
- Falta de educação ambiental da população que depositam seus resíduos sólidos e líquidos de forma errônea.

Esse risco pode ser agravado quando houver causas associadas.

## **4.2 Precipitação**

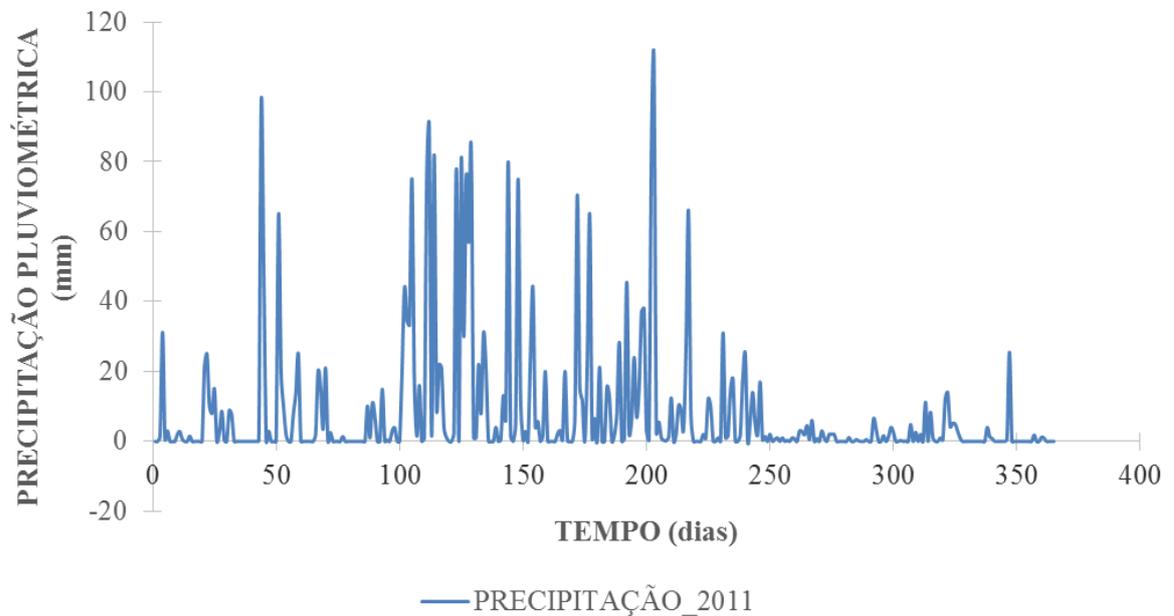
Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos através de informações coletadas no posto pluviométrico da Várzea, através do LAMEPE/ITEP<sup>1</sup>, em Recife, no ano de 2011.

---

<sup>1</sup> Atualmente a Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC é o órgão responsável pelo fornecimento dos dados pluviométricos da cidade do Recife, substituindo o desativo Laboratório de Meteorologia de Pernambuco - LAMEPE.

Esses dados podem ser observados através da Figura 10, onde está representada a evolução da precipitação pluviométrica diária para o referido ano.

**Figura 10:** Precipitação pluviométrica para o ano de 2011 para a cidade do Recife. Dados da estação LAMEPE/ITEP.

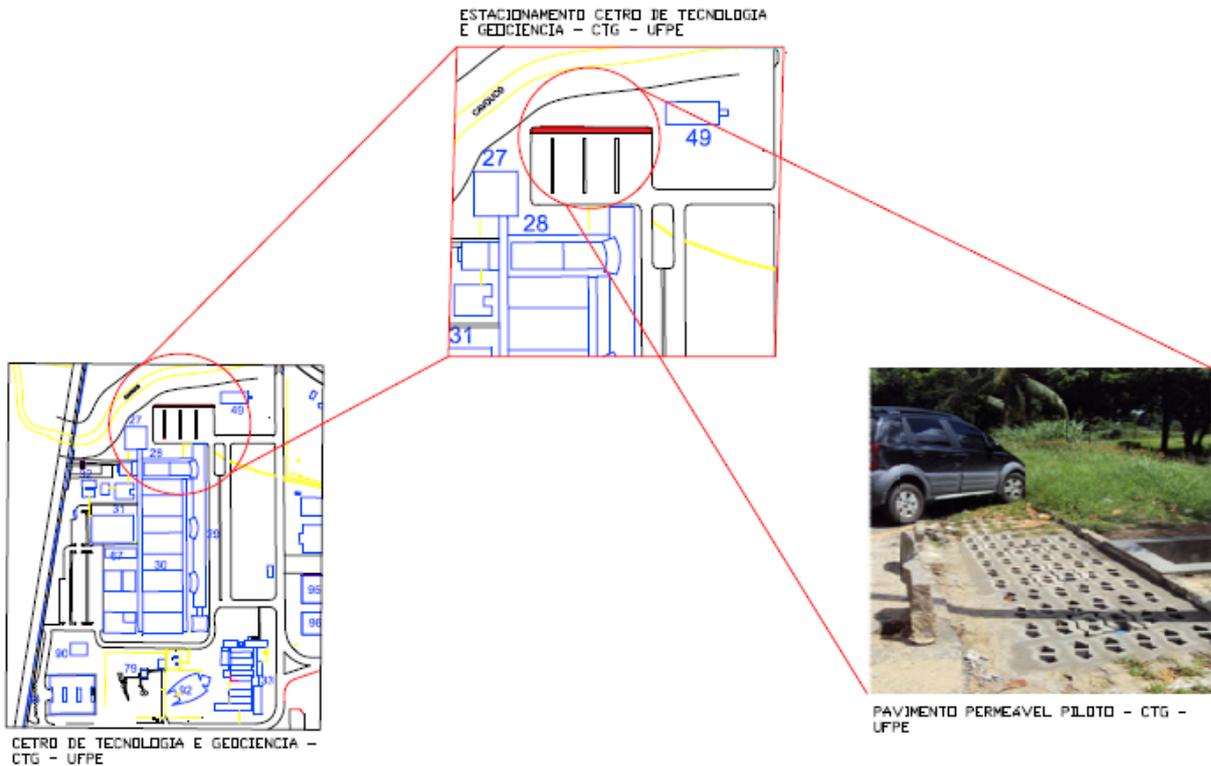


Verificou-se um período mais chuvoso entre 50 a 250 dias, ou seja, entre os meses de março a agosto, o que é característico da cidade do Recife.

### 4.3 Descrição do modelo experimental

#### 4.3.1 Pavimento permeável piloto

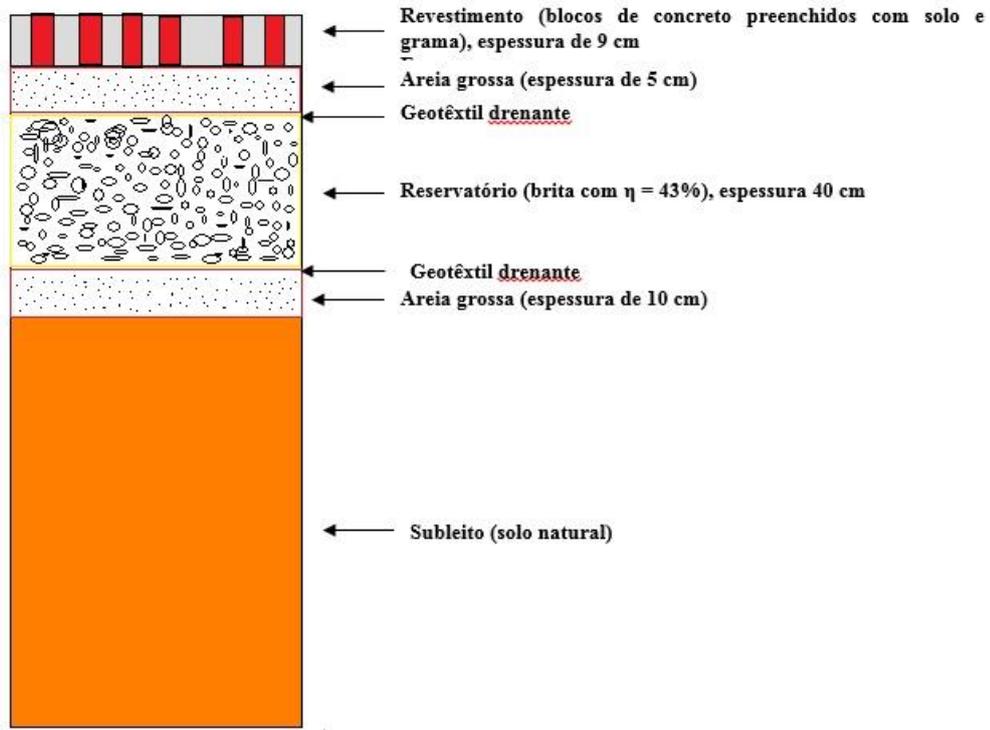
**Figura 11:** Localização do pavimento permeável piloto. Estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE-CTG-UFPE.



Foi utilizado o modelo experimental de pavimento permeável localizado no estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociência (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Figura 11).

O pavimento piloto possui 3,0 m de comprimento, 1,5 m de largura e 64 cm de profundidade distribuído em quatro camadas. A primeira camada é a de revestimento, com 9 cm, seguida de 5 cm de areia grossa, 40 cm de brita e 10 cm de areia grossa. Na Figura 12 está representado o perfil desse pavimento.

**Figura 12:** Estrutura do pavimento permeável (Coutinho, 2011)



#### 4.3.2 Etapas construtivas do pavimento piloto

O processo construtivo do pavimento permeável em estudo consistiu nas seguintes etapas:

- Escavação: uma vala com dimensões 3,0 m de comprimento por 1,5 m de largura e com 64 cm de profundidade foi escavada, como mostra a Figura 13.

**Figura 13:** retirada de solo natural para execução do pavimento permeável piloto



O equipamento no centro da vala escavada consiste em um tubo de alumínio que foi previsto inicialmente para o monitoramento diário da umidade volumétrica no perfil de solo com a sonda de nêutrons. Esse equipamento foi danificado, impossibilitando a coleta dos dados de umidade.

- Execução das camadas: na Figura 14 nota-se que a vala escava foi preenchida com as camadas de 10 cm de areia grossa, geotêxtil e 40 cm do reservatório de brita e posterior aplicação de uma nova camada do geotêxtil (bidim). Na Figura 15 observa-se a execução de 5 cm de areia grossa da camada drenante e a aplicação do revestimento em blocos intertravados de concreto vazados. Na Figura 16 está representada a execução das juntas dos blocos, onde foi utilizada argamassa para seu preenchimento. Na Figura 11, também pode ser observado a instalação de poços de observação dos níveis de água no interior do pavimento. Além dessa instrumentação e do equipamento de monitoramento da umidade volumétrica, já mencionados, foram instalados 7 tensiômetros de cápsula porosa para medir o potencial matricial do solo.

**Figura 14:** Pavimento permeável preenchido até a camada de brita e posterior aplicação da camada de geotêxtil drenante



**Figura 15:** Camada de areia e execução do revestimento em blocos intertravados de concreto vazados



**Figura 16:** Preenchimento das juntas do revestimento com argamassa

### 4.3.3 Propriedades hidráulicas do pavimento piloto

Para a seção do pavimento permeável, representada pela Figura 9 foram utilizadas as propriedades hidráulicas do solo conforme mostra a Tabela 1. Como o objetivo de um pavimento permeável é permitir uma recarga rápida do reservatório, as condutividades hidráulicas de suas camadas devem ser maiores que as condutividades do solo natural.

**Tabela 1:** Parâmetros Hidráulicos das camadas do pavimento permeável (Coutinho, 2011)

Camada	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	N	Ksat(cm/dia)
<b>Revestimento</b>	0,081	0,555	0,0441	1,5261	314,36
<b>Areia</b>	0,0508	0,5442	0,05764	2,4905	314,36
<b>Brita</b>	0,0339	0,43	0,0362	5,423	314,36
<b>Areia</b>	0,0508	0,5442	0,05764	2,4905	314,36
<b>solo natural</b>	0,05357	0,53049	0,03	1,42472	77,68

O Hydrus-1D4 não apresenta a possibilidade da utilização de brita, cascalho ou qualquer outro material com partículas de diâmetro superior ao de areia grossa. Portanto, foi adotada uma camada de areia para representar a camada de brita, porém adotando os parâmetros da brita mencionados na Tabela 1.

### 4.3.4 Subleito do pavimento piloto

Para o subleito foram verificadas duas hipóteses: subleito homogêneo e subleito heterogêneo, ambos possuindo uma profundidade de 3 metros. O solo natural heterogêneo se

comporta de tal forma até 90 cm de profundidade, quando passa a se comportar como solo homogêneo.

Foram realizadas análises granulométricas, com a utilização de ensaios de peneiramento e sedimentação, para a caracterização do solo utilizado para preenchimento dos blocos do revestimento e da camada do subleito do pavimento permeável. Verificou-se que há uma predominância de areia (com percentuais acima de 70%) principalmente entre 30 e 40 cm de profundidade. Além disso, verificou-se um baixo percentual de argila e silte. (Coutinho, 2011)

A classificação da textura de acordo com Embrapa (2006), a densidade do solo e as densidades das partículas para as profundidades de 0 a 100 centímetros dos solos do revestimento e do subleito do pavimento estão representados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Classificação da textura, massa específica do solo, massa específica das partículas do solo e porosidade teórica para os solos do revestimento e subleito do pavimento permeável. (Coutinho, 2011)

<b>Profundidade (cm)</b>	<b>Classificação Textural</b>	<b><math>\rho_s(\text{g/cm}^3)</math></b>	<b><math>\rho_p(\text{g/cm}^3)</math></b>	<b><math>\eta(\%)</math></b>
<b>Revestimento</b>	Areia franca	1,1	2,66	58,64
<b>0 – 10</b>	Areia franca	1,33	2,64	49,62
<b>10 -20</b>	Areia franca	1,48	2,68	44,78
<b>20-30</b>	Areia franca	1,46	2,62	44,27
<b>30-40</b>	Areia franca	1,4	2,64	46,97
<b>40-50</b>	Franco arenoso	1,35	2,58	47,67
<b>50-60</b>	Areia franca	1,4	2,64	46,97
<b>60-70</b>	Areia franca	1,7	2,6	34,62
<b>70-80</b>	Areia franca	1,58	2,675	40,93
<b>80-90</b>	Areia franca	1,47	2,61	43,6%
<b>90-100</b>	Areia franca	1,55	2,60	40,38

Utilizando os dados da Tabela 2, como dados de entrada no Hydrus-1D foi possível obter as características hidrodinâmica para o subleito heterogêneo, conforme Tabela 3. Para o

subleito homogêneo foi adotada a média das características hidrodinâmicas encontradas para o subleito heterogêneo.

**Tabela 3:** Propriedades hidrodinâmicas do solo heterogêneo estimadas pelo Hydrus -1D a partir do software Rosetta.

<b>Profundidade (cm)</b>	<b><math>\Theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)</math></b>	<b><math>\Theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)</math></b>	<b><math>\alpha(1/\text{cm})</math></b>	<b>n</b>	<b>Ks(cm/dia)</b>
<b>0 – 10</b>	0,0545	0,5305	0,0304	1,4084	227,82
<b>10 -20</b>	0,0537	0,5243	0,0271	1,4032	219,31
<b>20-30</b>	0,0524	0,5295	0,0323	1,4147	241,98
<b>30-40</b>	0,0532	0,5408	0,0404	1,4901	283,42
<b>40-50</b>	0,0584	0,5292	0,0254	1,4007	197,96
<b>50-60</b>	0,0539	0,5264	0,0282	1,4042	222,2
<b>60-70</b>	0,0518	0,525	0,0299	1,4073	235,48
<b>70-80</b>	0,0518	0,5355	0,038	1,4527	270,49
<b>80-90</b>	0,0542	0,5386	0,0369	1,4485	257,38
<b>90-100</b>	0,0518	0,5251	0,03	1,4074	235,60
<b>Média</b>	0,05357	0,53049	0,03	1,42372	239,164
<b>Desvio padrão</b>	0,00198944	0,00591	0,00498	0,0299	25,4173013

#### 4.4 Hydrus – 1D

O Hydrus-1D é um programa computacional usado para simular o movimento unidimensional de água, calor e solutos em um meio saturado variável. O programa utiliza elementos finitos para resolver numericamente as equações de Richards e do transporte de soluto. Além disso, esse programa inclui modelagem inversa para estimar os parâmetros hidráulicos e de transporte.

Para um meio poroso, parcialmente saturado e isotérmico, a rotina para o movimento uniforme e unidimensional da água é descrita por uma forma modificada da Equação de Richards, Equação 01. Nessa equação não é considerado os efeitos da fase gasosa e o efeito do gradiente térmico do fluxo do líquido.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (01)$$

Onde, h = potencial matricial da água no solo, L;  $\theta$  = umidade volumétrica da água, L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>; t = tempo, T; x = coordenada espacial, L; S = termo de sumidouro, L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup> T<sup>-1</sup>;  $\alpha$  = ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical (ou seja,  $\alpha = 0^\circ$  para fluxo vertical,  $90^\circ$  para fluxo horizontal e  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  para fluxo inclinado); K = condutividade hidráulica.

Para um solo não-saturado, as propriedades hidráulicas  $\theta$  (h) e K (h) são de maneira geral função não lineares do potencial mátrico ou da umidade volumétrica. O programa HYDRUS-1D permite o uso de cinco modelos analíticos para as propriedades hídras: Brooks e Corey (1966); van Genuchten (1980); Vogel e Cislerová (1988), Kosuki (1996); e Durner (1994).

#### **4.5 Hipóteses e considerações adotadas nas simulações numéricas no hydrus-1D**

Para a simulação hidráulica do escoamento superficial no pavimento permeável, utilizou-se como condições de contorno na fronteira superior dois casos: condições atmosféricas, analisando as possibilidades de escoamento superficial, onde a precipitação pluviométrica foi utilizada como variável; e carga hidráulica gerada pelo acúmulo de água na superfície. Na condição de contorno na fronteira inferior também foram utilizadas duas condições: drenagem livre, ou seja, o fluxo na base igual a condutividade hidráulica; e presença de lençol freático com fluxo na base diferente da condutividade hidráulica. A evaporação foi desprezada, devido aos curtos tempos de simulação.

Foram simulados os seguintes condições para o pavimento permeável usando o Hydrus-1D:

- Solo natural homogêneo ou heterogêneo juntamente com a camada de reservatório, utilizando as características hidrodinâmicas do solo mencionadas anteriormente na Tabela 3 e com as características hidrodinâmicas idênticas a do módulo experimental do pavimento permeável, antes citadas na Tabela 1.

- O software Hydrus-1D não apresenta a possibilidade da utilização de brita, cascalho ou qualquer outro material com diâmetro das partículas superior ao de uma areia grossa, portanto, foi utilizada no programa uma camada de areia com porosidade igual à da brita utilizada no experimento.
- Do mesmo modo que no item anterior, o Hydrus-1D, não apresenta a possibilidade da utilização do revestimento em concreto. Para isso, foi realizada uma caracterização hidráulico-hidrológica da camada de solo existente entre os espaços vazios dos blocos intertravados de concreto.
- Para todos os casos, o modelo adotado para descrever as propriedades hidráulicas do solo foi o de van Genuchten (1980).

Além dessas condições utilizadas para o pavimento permeável, foram simuladas no Hydrus-1D quatro cenários avaliando o comportamento da movimentação da água para o pavimento com subleito homogêneo e com subleito heterogêneo. Para cada cenário foram gerados sete gráficos, ou seja, analisadas sete variáveis, no intuito de explorar a semelhança desse comportamento entre os diferentes tipos de subleitos.

A Figura 17 representa esquematicamente como foram feitas as simulações e o que foram exploradas delas.

**Figura 17:** Esquematisação das simulações realizadas e os gráficos gerados em cada uma delas.

<b>SIMULAÇÕES</b>			
<b>CENÁRIO 1:</b> Escoamento superficial e drenagem livre na base	<b>CENÁRIO 2:</b> Escoamento superficial e lençol freático na base	<b>CENÁRIO 3:</b> Carga hidráulica superficial e drenagem livre na base	<b>CENÁRIO 4:</b> Carga hidráulica superficial e lençol freático na base
<b>GRÁFICOS GERADOS</b>			
GRÁFICO 1: fluxo na condição de contorno superior em função do tempo GRÁFICO 2: fluxo na condição de contorno inferior em função do tempo GRÁFICO 3: pressão na condição de contorno superior em função do tempo GRÁFICO 4: pressão na condição de contorno inferior em função do tempo GRÁFICO 5: infiltração acumulada em função do tempo GRÁFICO 6: potencial total em função da profundidade GRÁFICO 7: umidade volumétrica em função da profundidade			

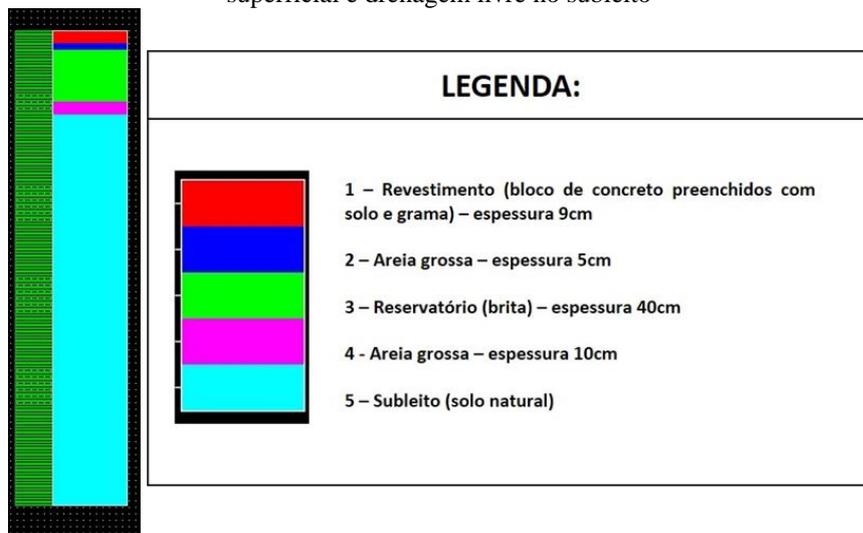
Dos gráficos gerados na modelagem serão analisadas as variáveis globais (fluxo, pressão e infiltração), as quais variam em função das condições de contorno propostas, como também, serão analisadas as variáveis que dependem das características do perfil, como potencial total e umidade volumétrica.

#### 4.5.1 Cenário 1

Nesse cenário foi simulada a dinâmica da água para o pavimento permeável com subleito homogêneo e com subleito heterogêneo, admitindo que há escoamento superficial como condição de contorno superior e drenagem livre como condição de contorno inferior do perfil.

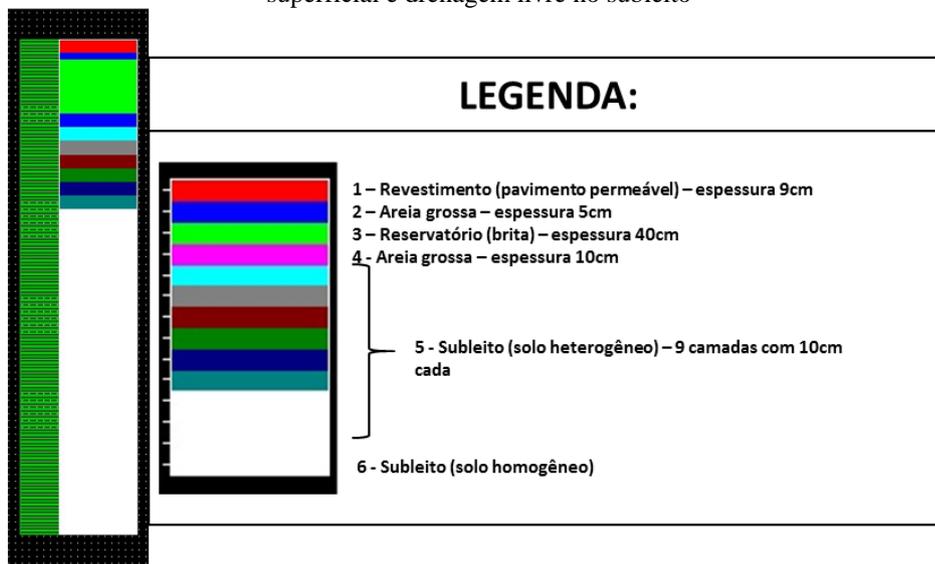
O perfil do pavimento piloto com subleito homogêneo, utilizado na simulação no Hydrus-1D para o cenário 1, está representado na Figura 18.

**Figura 18:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há escoamento superficial e drenagem livre no subleito



O perfil do pavimento piloto com subleito heterogêneo, descrito no modelo experimental e utilizado na simulação no Hydrus-1D para o cenário 1, está representado na Figura 19.

**Figura 19:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há escoamento superficial e drenagem livre no subleito



#### 4.5.2 Cenário 2

Nesse cenário foi simulada a dinâmica da água para pavimento permeável com subleito homogêneo e com subleito heterogêneo, admitindo que há escoamento superficial na fronteira superior e lençol freático na fronteira inferior.

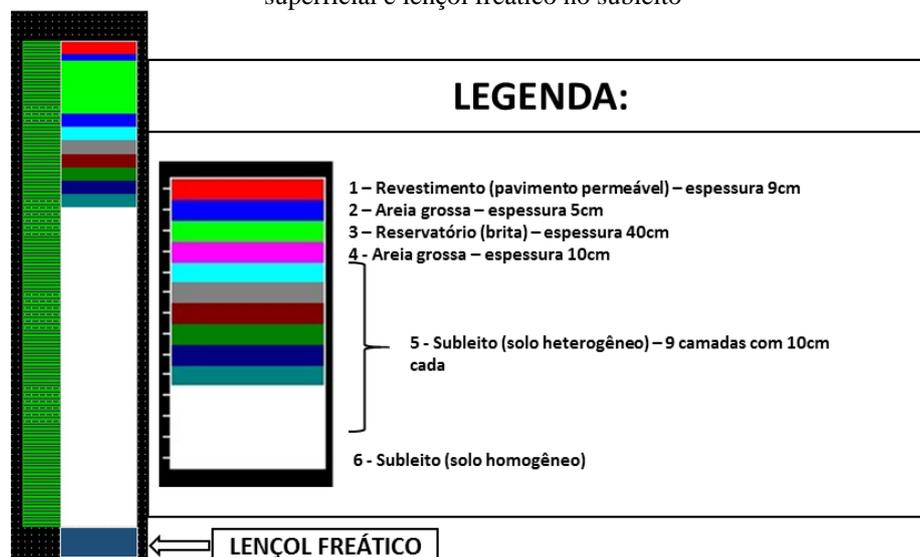
O perfil do pavimento piloto com subleito homogêneo, descrito no modelo experimental e utilizado na simulação no Hydrus-1D para a o Cenário 2, está representado na Figura 20.

**Figura 20:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há escoamento superficial e lençol freático no subleito



O perfil do pavimento piloto com subleito heterogêneo, descrito no modelo experimental e utilizado na simulação no Hydrus-1D para o cenário 2, está representado na Figura 21.

**Figura 21:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há escoamento superficial e lençol freático no subleito

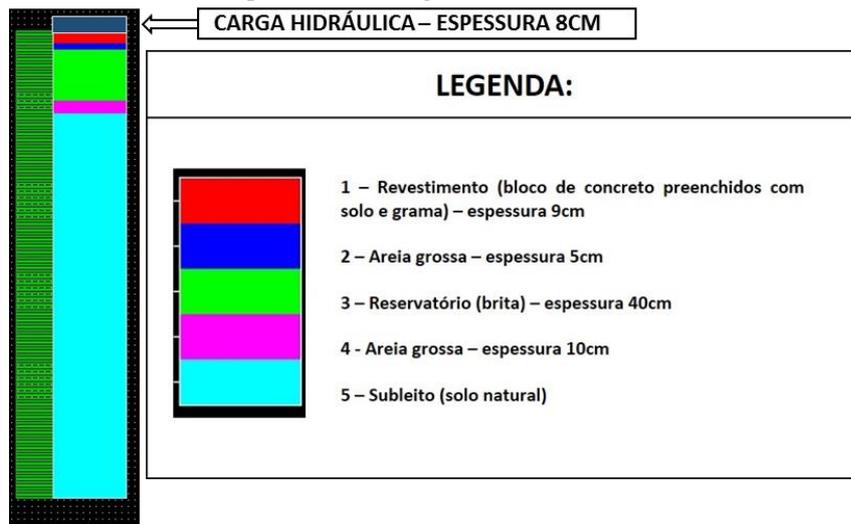


### 4.5.3 Cenário 3

Nesse cenário foi simulada a dinâmica da água para pavimento permeável com subleito homogêneo e com subleito heterogêneo, admitindo que há uma carga hidráulica na fronteira superior e drenagem livre na fronteira inferior.

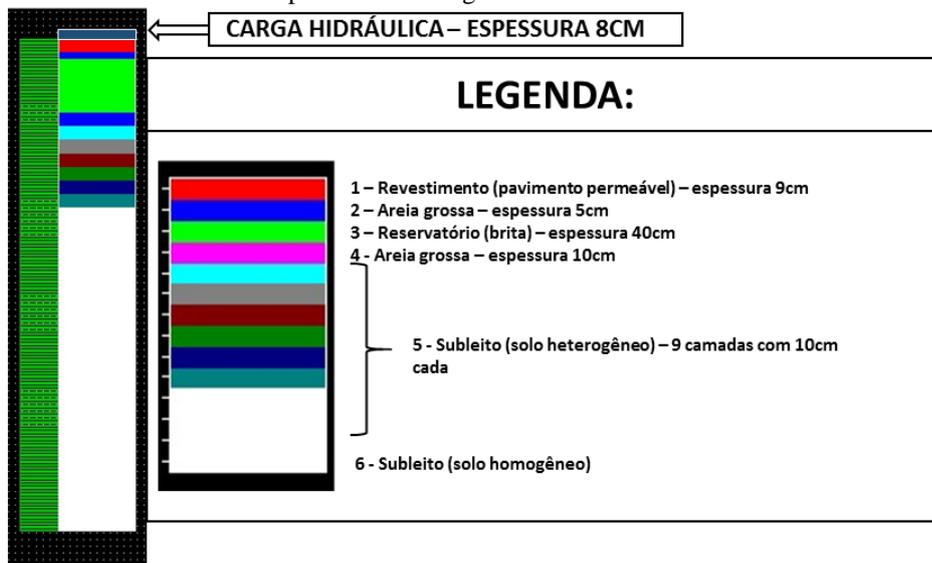
O perfil do pavimento piloto com subleito homogêneo, descrito no modelo experimental e utilizado na simulação no Hydrus-1D para a o Cenário 3, está representado na Figura 22.

**Figura 22:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e drenagem livre no subleito



O perfil do pavimento piloto com subleito heterogêneo, descrito no modelo experimental e utilizado na simulação no Hydrus-1D para o cenário 3, está representado na Figura 23.

**Figura 23:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e drenagem livre no subleito



#### 4.5.4 Cenário 4

Nesse cenário foi simulada a dinâmica da água para pavimento permeável com subleito homogêneo e com subleito heterogêneo, admitindo que há uma carga hidráulica na fronteira superior e lençol freático na fronteira inferior.

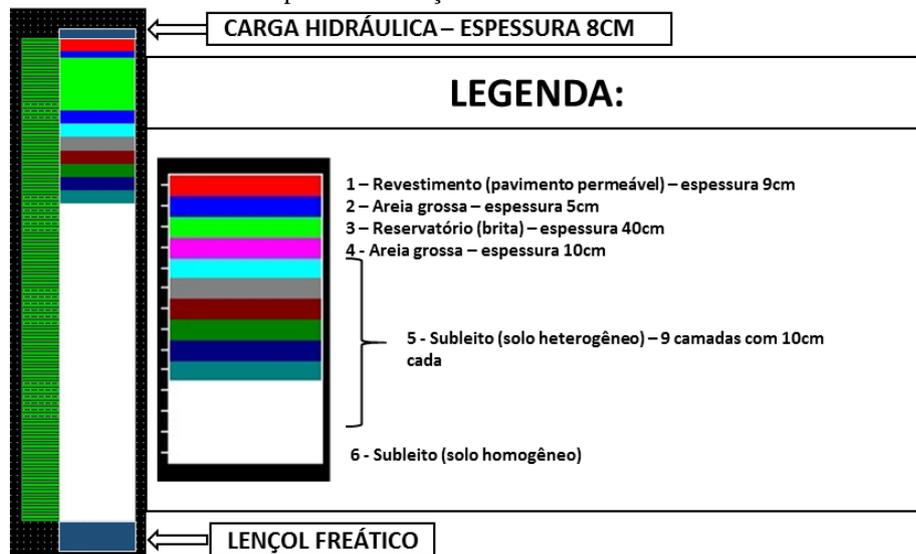
O perfil do pavimento piloto com subleito homogêneo, descrito no modelo experimental e utilizado na simulação no Hydrus-1D para a o Cenário 4, está representado na Figura 24.

**Figura 24:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito homogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e lençol freático no subleito



O perfil do pavimento piloto com subleito heterogêneo, descrito no modelo experimental e utilizado na simulação no Hydrus-1D para o cenário 4, está representado na Figura 25.

**Figura 25:** Perfil do pavimento permeável piloto com subleito heterogêneo, admitindo que há carga hidráulica superficial e lençol freático no subleito



#### 4.6 Dimensionamento de um pavimento permeável

As condições para a implantação das técnicas de infiltração dependem dos fatores relacionados ao solo. Para (Azzout et al (1994),) são condições necessárias para a implantação das técnicas de infiltração: solos classificados no grupo A ou B do Soil Conservation Service(SCS); condutividade hidráulica maior que 8 mm/h; lençol freático a uma profundidade máxima de 1 a 1,2 m.

As metodologias de dimensionamento clássicas são baseadas nos métodos dos volumes, método da simulação e no método da chuva envelope (Azzout et al (1994)). Para esses casos, o dimensionamento depende fundamentalmente das características climatológicas como a precipitação pluviométrica e da capacidade de drenagem dos solos que são geralmente avaliadas a partir do cálculo da condutividade hidráulica saturada e lâmina de infiltração acumulada.

Essas duas últimas informações são obtidas através de ensaios experimentais de infiltração e servem para obter parâmetros sobre a viabilidade de implantação de dispositivos de infiltração, além de obtenção de parâmetros para o dimensionamento e determinação de elementos que indiquem a necessidade de manutenção ou até mesmo o cálculo de indicadores sobre o desempenho hidráulico do dispositivo de infiltração (Deschene et al,2004).

A obtenção da taxa de infiltração básica ou condutividade hidráulica saturada é determinada utilizando-se diversos métodos de experimentação, os quais são utilizados para obtenção da curva de infiltração. Os métodos experimentais de infiltração (infiltrometria de anel duplo, infiltrômetro de anel simples (Lassabatère et al., 2006), infiltrometria a disco (Antonino et al., 2001), Ângulo (Jaramillo et al., 2000), permeâmetro de Guelph (Montenegro & Montenegro, 2004) e método do poço invertido (são os mais utilizados para a obtenção das propriedades hidrodinâmicas, eles se diferenciam pela escala da infiltração obtida (monodimensional, tridimensional).

A aplicação do infiltrômetro de duplo anel gera infiltrações unidimensionais, devido a imposição de uma carga hidráulica no anel externo, o que permite adotar a hipótese de uma infiltração unidirecional no anel interno. Para esse caso o tratamento da informação é realizado com modelos de infiltração unidimensionais como Philip (1957), Horton(1933), Kostiakov, etc. Infiltrômetros a disco e infiltrômetros de anel simples fornecem um infiltração multidirecional, para esses casos as informações hidráulicas são obtidas a partir de modelos como o Beerkam (Lassabatère et al., 2006).

#### 4.6.1 Definição do problema do dimensionamento do pavimento permeável

O problema consiste em determinar o volume necessário para um pavimento permeável, visando compensar totalmente uma área impermeável de 250m<sup>2</sup>. O espaço disponibilizado para a construção do pavimento possui comprimento de 50 metros e largura de 1 metro. O material da camada de armazenamento a ser utilizado consta de uma brita com porosidade de 37%.

#### Método de Dimensionamento

Para o dimensionamento do sistema de infiltração utilizou-se nesse trabalho o método das chuvas. Para a aplicação do método das chuvas é necessário o conhecimento da curva de altura pluviométrica associada a uma duração e um tempo de retorno  $H(t,T)$  e da condutividade hidráulica saturada. A curva  $H(t,T)$  é obtida a partir de uma equação de intensidade duração e frequência (Equação 3). Nesse trabalho, é utilizado a  $i$ - $d$ - $f$  (Equação 2) determinada por Azevedo e Ramos (2010).

$$i(d, T) = \frac{1423,97 T^{0,1124}}{(t+21)^{0,7721}} \quad (2)$$

$$\text{Com, } H(d, T) = i(d, T) \cdot d \quad (3)$$

Onde,  $i(d, T)$  e  $H(d, T)$  são respectivamente a intensidade de precipitação e a altura de precipitação associada a uma duração em minutos  $d$  e a um tempo de retorno em anos ( $T$ ).

Da mesma maneira, a vazão de saída ( $Q_s$ ) é relacionada com a condutividade hidráulica saturada do solo onde vai ser implantado o sistema de infiltração a partir da seguinte relação (Equação 4).

$$Q_s = A_{inf} k_s \quad (4)$$

Onde,  $K_s$  é a condutividade hidráulica satura e  $A_{inf}$  é a área de infiltração que é dada pelo produto do comprimento pela altura (Equação 5).

$$A_{inf} = 2 \cdot \frac{c}{2} h \quad (5)$$

O fluxo de infiltração ( $q'_s$ ) é dado pela razão entre a vazão de saída por infiltração e a área de contribuição (Equação 6).

$$q'_s = \frac{Q_s}{A_{dren}} \quad (6)$$

Adotando a hipótese que o entorno do pavimento permeável encontra-se saturado, assume-se que o fluxo de infiltração é constante durante todo o período de funcionamento do pavimento permeável. Tem-se que o fluxo de saída acumulado é o produto do fluxo de infiltração pelo tempo (Equação 7).

$$q_s(t) = q'_s t \quad (7)$$

Assim, a altura da camada de reservatório necessária para o pavimento permeável ( $h_{efe}$ ), denominada nesse trabalho de altura efetiva é dada pela maximização da diferença entre a altura de precipitação para uma dada duração e para um tempo de retorno determinado e o fluxo de saída (Equação 8).

$$h_{efe} = \max(H(t, T) - q_s(t)) \quad (8)$$

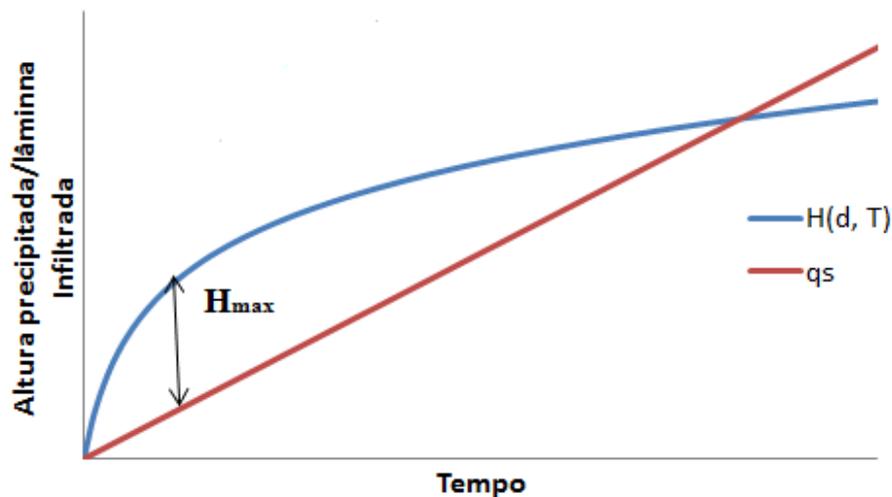
O processo de cálculo da altura efetiva é iterativo, uma vez que se deve atender a condição do espaço disponível para a construção do pavimento permeável (Equações 9 e 10).

$$S_{efe} = h_{efe} A_{dre} \quad (9)$$

$$S_{sup} = h L C \eta \quad (10)$$

Com  $S_{efe} \leq S_{sup}$ .

**Figura 26:** Aplicação do método da chuva envelope



### **Informações de infiltração**

Descrita em Lassabatere et al., (2006), o ensaio consiste em cravar um anel metálico no solo a profundidade de um centímetro. Inicialmente é retirada uma amostra deformada para o cálculo das condições iniciais de umidade. Após, um volume conhecido de água é vertido no anel interno e simultaneamente um cronometro é acionado permitindo a medida do tempo de infiltração. O ensaio continua vertendo-se e anotando o tempo de infiltração de cada volume constante de água. A finalização se dá a partir da verificação de intervalos de tempo constantes após um mínimo de 16 pontos.

Para o uso do método Beerkan, serão necessários dados adicionais aos da curva de infiltração acumulada. Esses dados são a curva granulométrica, a densidade do solo, e a massa específica das partículas.

Para todos esses métodos, a hipótese é que o solo é homogêneo e rígido. Para esse estudo, foi realizado ensaio de infiltração para um solo com características granulométricas constantes na Tabela 4.

**Tabela 4:** Características granulométricas para o solo utilizado nesse estudo.

Fração granulométrica (%)			Ps	Classificação textural
Areia	Silte	Argila	[g.cm <sup>3</sup> ]	
69,80	20,82	9,38	1,36	Franco-Arenoso

#### ***4.6.2 Método de Infiltração Tridimensional e aximétrica – Método BEST***

##### **A BEST - Algoritmo e análise dos dados (Lassabatère et al., 2006)**

##### **Determinação dos parâmetros de forma (m, n e η)**

Assumindo a similaridade de forma entre a curva de distribuição do tamanho das partículas  $F(D)$  e da curva de retenção da água no solo  $\theta(h)$ , Haverkamp & Parlange (1986) apresentaram a Equação 11 para expressar  $F(D)$ .

$$F(D) = \left[ 1 + \left( \frac{D}{D_{0.05}} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{com} \quad M = 1 - \frac{2}{N} \quad (11)$$

Sendo, D o diâmetro da partícula [L], D<sub>g</sub> o parâmetro de escala do tamanho das partículas [L] e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

**Determinação dos parâmetros de normalização ( $\theta_s$ ,  $K_s$  e  $h_g$ ).**

Para uma fonte de água circular com dado potencial de pressão da água sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme ( $\theta_0$ ), a infiltração acumulada tridimensional I(t) e a taxa de infiltração q(t) podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Equações 12 e 13) e estacionário (Equações 14 e 15) (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [aS^2 + bK_s]t \quad (12)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [aS^2 + bK_s] \quad (13)$$

$$I_{+\infty}(t) = [aS^2 + K_s] \cdot t + c \frac{S^2}{K_s} \quad (14)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = aS^2 + K_s \quad (15)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (16)$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (17)$$

$$c = \frac{a}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right] \cdot (1-\beta)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (18)$$

Sendo, S a sorvidade [L T<sup>-1/2</sup>], r o raio do cilindro [L];  $\gamma$  igual a 0,75 e  $\beta$  igual a 0,6.

Para determinação de  $K_s$  e S, o BEST utiliza equações equivalentes às Equações (12) e (13), representadas abaixo pelas Equações (19) e (20), obtidas pela substituição de  $K_s$  em função

da sorvidade  $S$  e da taxa de infiltração no regime estacionário  $q_{+\infty}$ , (Equação 15) nas Equações (12) e (13).

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b) \cdot S^2 + bq_{+\infty}]t \quad (19)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a(1-b) \cdot S^2 + bq_{+\infty}] \quad (20)$$

O ajuste da Equação (19) aos dados experimentais da infiltração acumulada ( $I_{\text{exp}}(t)$ ) é obtido pela minimização da clássica função objetivo, dada pela Equação 21.

$$f_1(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (21)$$

Nessa equação,  $k$  é o número considerado de pontos no regime transitório. O algoritmo usado na minimização de  $f_1(S, K_s, k)$  é o de Marquardt (1963) e o desempenho dos ajustes é analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM) na Equação (22).

$$\text{EQM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k (I_{\text{exp}}(t_i))^2}} \quad (22)$$

Após a determinação de  $\eta_s$  e  $K_s$ , o parâmetro  $h_g$  é obtido pela seguinte Equação 23 (Lassabatère et al., 2006):

$$h_g = \frac{S^2}{c_p (\theta_s - \theta_0) \left[ 1 - \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \right]} \cdot K_s \quad (23)$$

Onde,  $c_p$  é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas  $n$ ,  $m$  e  $\eta$  dos modelos (de Condappa et al., 2002; Lassabatère et al., 2006):

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Modelagem

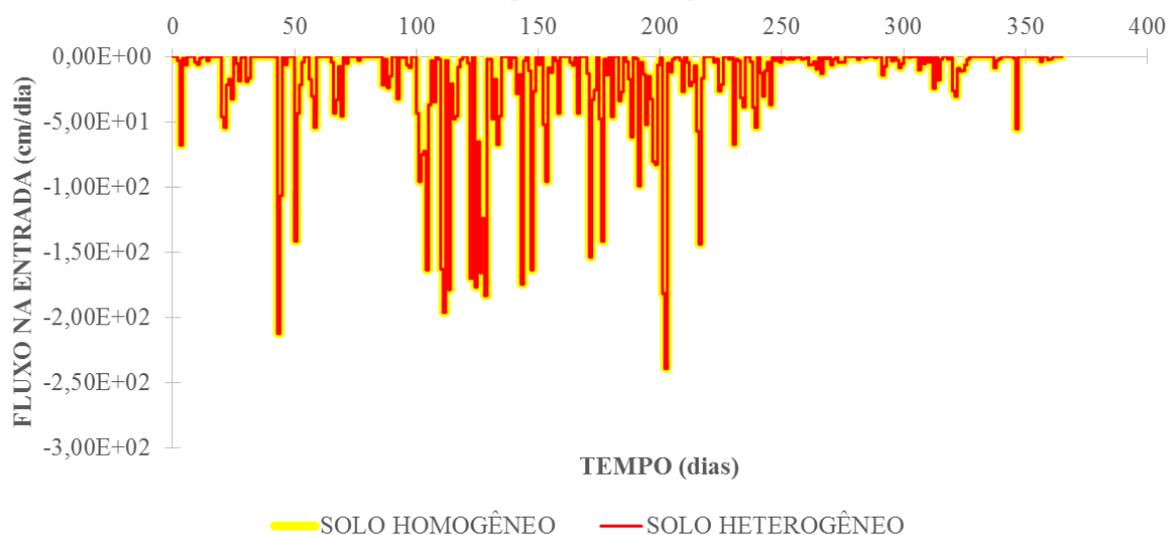
#### 5.1.1 Escoamento superficial e drenagem livre no subleito

O primeiro caso analisado foi para perfil piloto com subsolo de homogêneo e heterogêneo com escoamento superficial no limite superior e drenagem livre no limite inferior. Após modelagem no programa Hydrus-1D foram criados sete gráficos sobrepondo os resultados para os diferentes tipos de subleito.

#### Fluxo na entrada do pavimento piloto

O primeiro gráfico gerado foi o do fluxo na entrada do pavimento permeável piloto, ou seja, a velocidade da movimentação da água pelo limite superior, representada na Figura 27.

**Figura 27:** Fluxo na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.



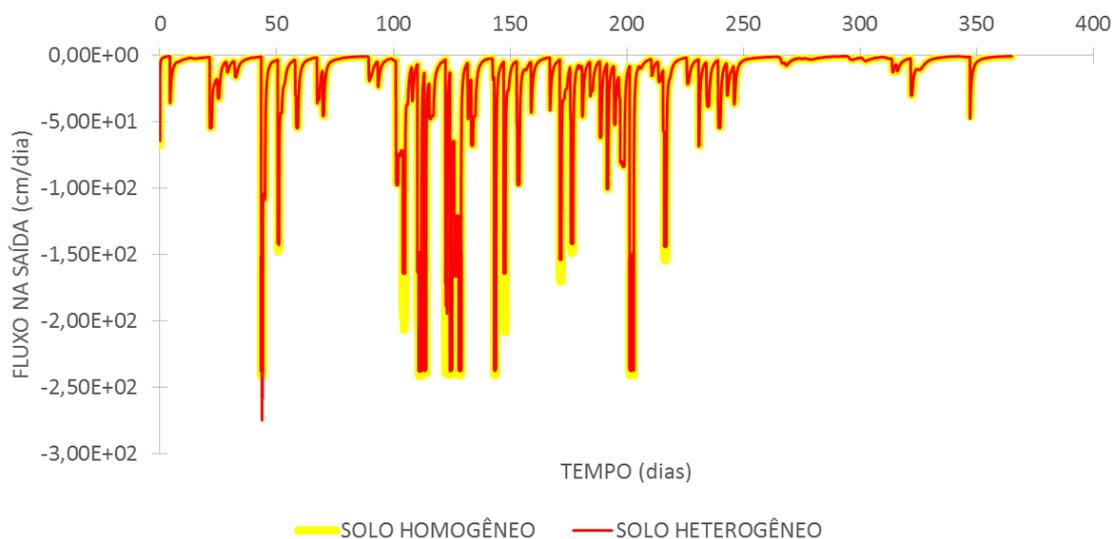
Na análise desse primeiro gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento do fluxo de água na entrada do pavimento durante o tempo, pois as camadas superficiais para os diferentes subleitos modelados são iguais.

Se feita uma comparação desse gráfico com o da Figura 10, observa-se que os maiores fluxos na condição de contorno superior se encontram entre período de 50 e 250 dias, o qual se caracteriza como os de maiores precipitações pluviométricas ocorridas no ano analisado.

### **Fluxo na saída do pavimento piloto**

O segundo gráfico gerado foi o do fluxo na saída do pavimento permeável piloto, ou seja, a velocidade da movimentação da água pelo limite inferior, representada na Figura 28.

**Figura 28:** Fluxo na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.



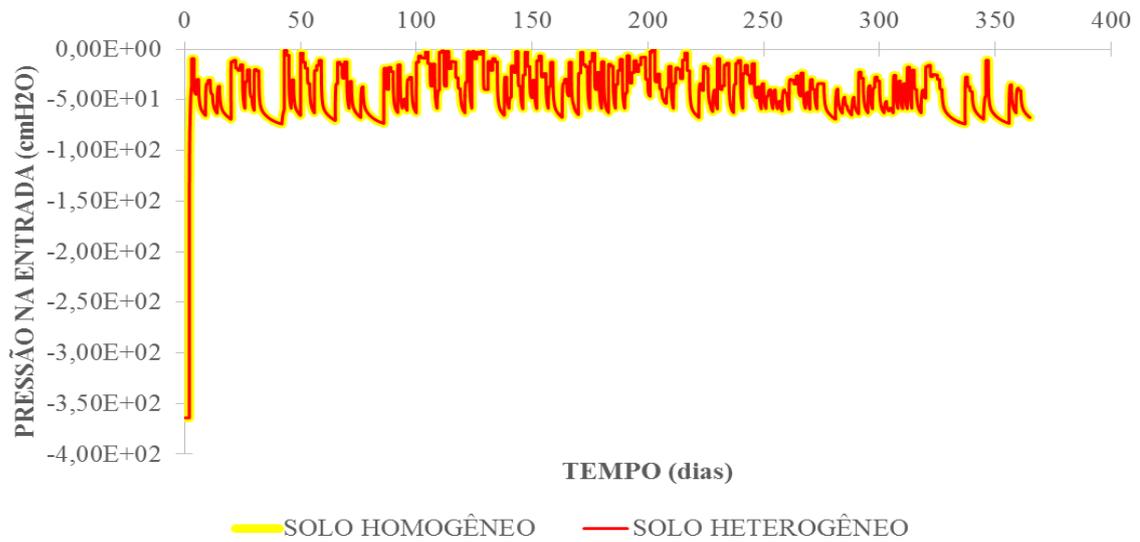
No gráfico da Imagem 28 verificou-se que o fluxo na base do pavimento com subleito homogeneizado apresenta-se maior que o fluxo em subleito natural em vários dias no intervalo entre 100 e 250 dias. A maior diferença foi verificada no tempo de aproximadamente 150 dias, onde ocorreu uma variação de cerca de 21% entre os dois subleitos estudados, ou seja, ao utilizar uma homogeneização os valores serão superestimados.

O único ponto onde a velocidade de infiltração no subleito heterogêneo sobressai o homogêneo foi verificado no tempo de aproximadamente 45 dias, onde a variação verificada foi de aproximadamente 14% entre os dois tipos de subleitos.

### **Pressão na entrada do pavimento piloto**

O terceiro gráfico gerado foi o da pressão na entrada do pavimento permeável piloto, ou seja, a pressão gerada no limite superior do pavimento, representado na Figura 29.

**Figura 29:** Pressão na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.

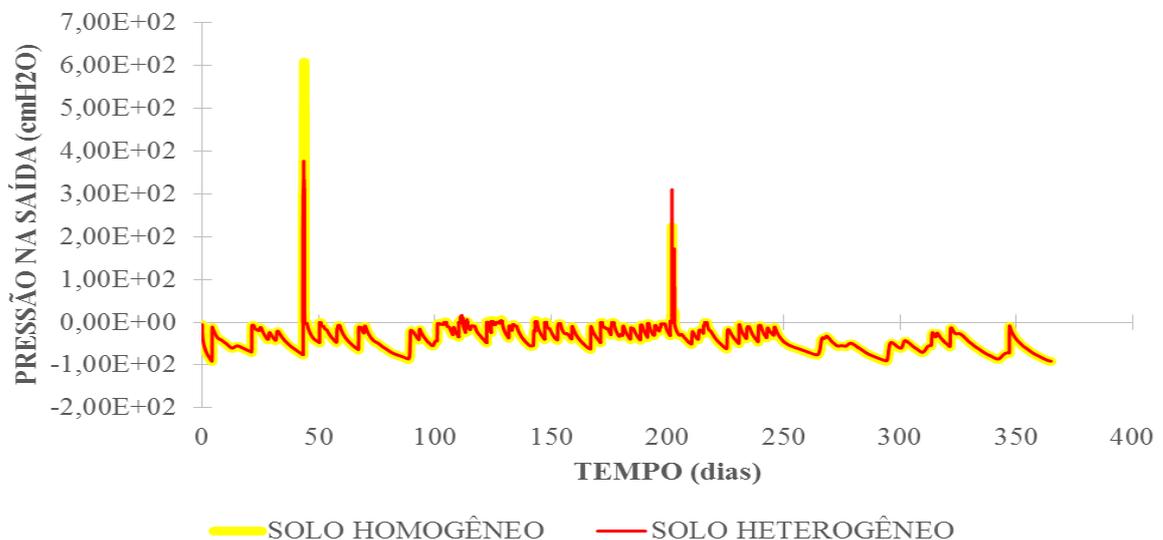


Na análise desse terceiro gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento da pressão da água na superfície durante o tempo para os diferentes subleitos modelados, pois as camadas superficiais são iguais nos dois tipos de subleitos. Isso demonstra que o subleito apresenta pouca influência sobre o comportamento hidráulico na superfície do pavimento permeável. Esse fato ocorre provavelmente devido a espessura da camada de reservatório e também devido ao fato de se utilizar um fluxo diário.

#### Pressão na saída do pavimento piloto

O quarto gráfico gerado foi o da pressão na saída do pavimento permeável piloto, ou seja, a pressão gerada no limite inferior do pavimento, representado na Figura 30.

**Figura 30:** Pressão na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.



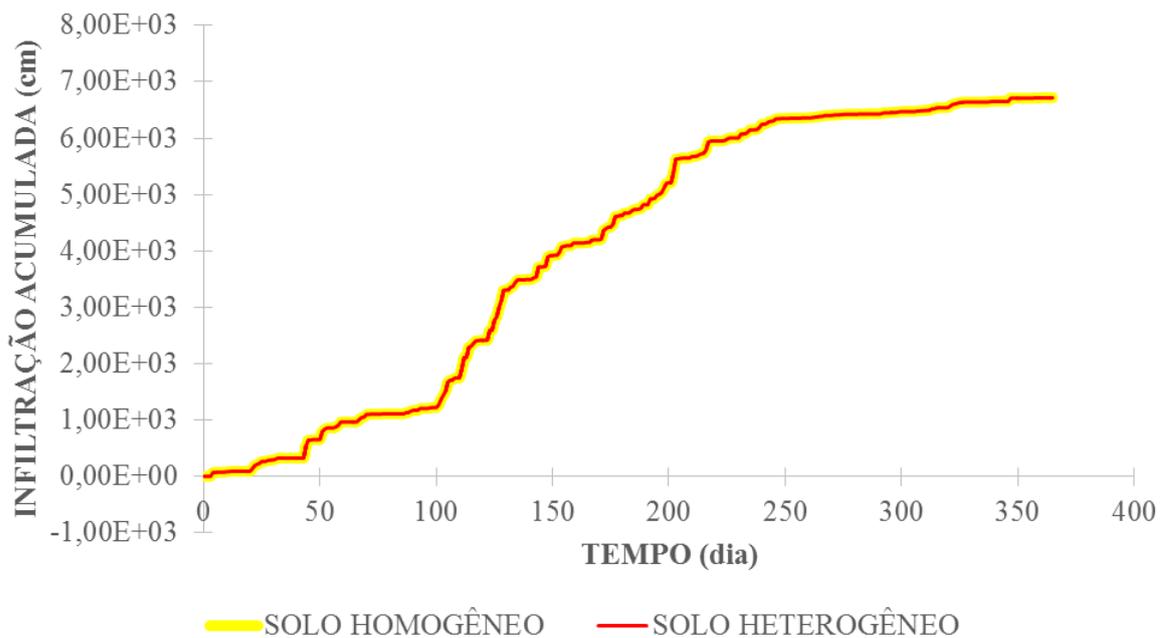
Na análise desse quarto gráfico, observou-se uma discrepância entre os valores de pressão para o tempo aproximadamente de 43 dias, onde foi verificada uma superestimação de 37% para o pavimento com subleito homogêneo. Em aproximadamente  $t=202$  dias, também houve uma diferença de pressão entre os diferentes tipos de subleitos modelados, sobressaindo de 28% a pressão ocorrida no subleito heterogêneo quando comparado ao homogêneo. Essas diferenças ocorreram no tempo em que as precipitações foram mais intensas, ver Figura 10.

Para os outros tempos não foram verificadas mudanças significativas.

### **Infiltração acumulada no pavimento piloto**

O quinto gráfico gerado foi o da infiltração acumulada no pavimento permeável piloto, representado na Figura 31.

**Figura 31:** Infiltração acumulada, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.

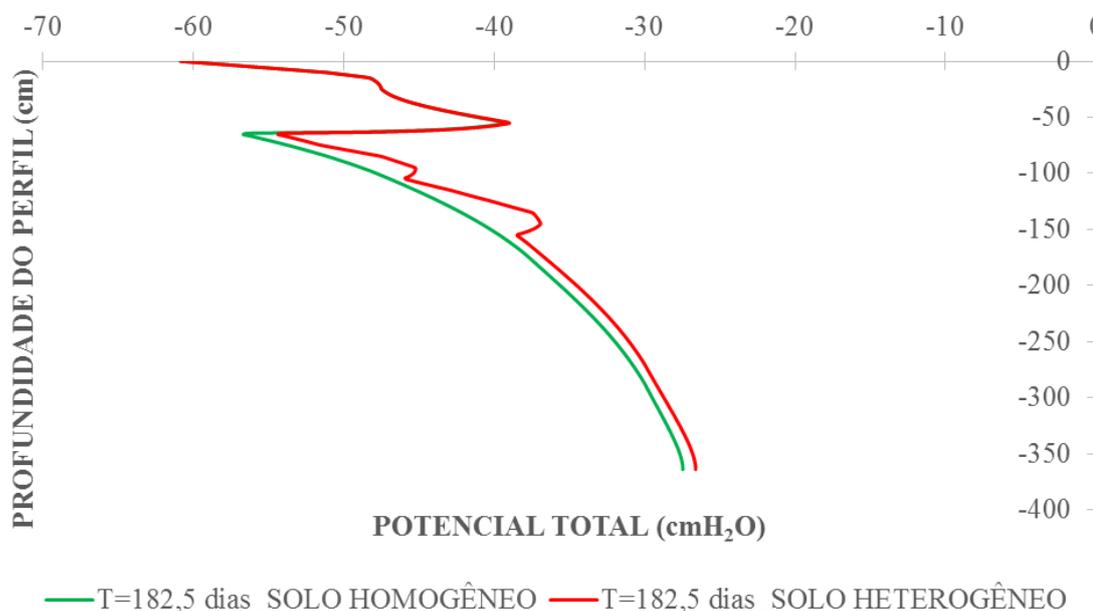


Na análise deste quinto gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento do fluxo de água durante o tempo para os diferentes subleitos modelados. Essa semelhança ocorre pois, não foram consideradas perdas do sistema na modelagem no Hydrus-1D4.

### **Potencial total do pavimento piloto**

O sexto gráfico gerado foi o do potencial total do pavimento permeável piloto para o tempo igual a 185,5 dias, representado na Figura 32.

**Figura 32:** Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.



Na análise desse gráfico verificaram-se grandes diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, sendo que elas só começaram a aparecer em profundidade aproximada de 66 cm. Visto que o pavimento permeável possui uma profundidade de 64 cm, o início das discrepâncias entre as duas curvas representa o começo da camada do subleito, manifestando alterações em relação ao potencial total entre subleito homogêneo e heterogêneo.

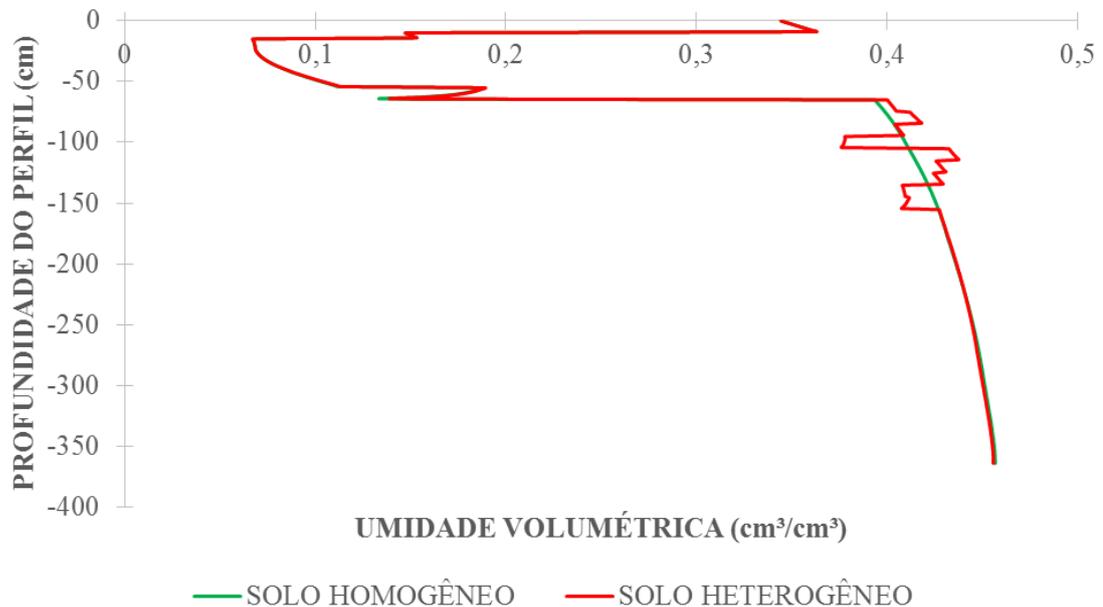
Observou-se também que a curva para o subleito homogêneo é uniforme e a do subleito heterogêneo possui variações antes de atingir sua uniformidade. Essas variações ocorrem aproximadamente entre 66 cm e 158 cm, profundidade onde se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva potencial total.

A maior variação ocorreu na profundidade de aproximadamente 182 cm, onde a variação de potencial total mostrou ser 9,77% maior no subleito homogêneo. Essa diferença indica que a análise de homogeneização do solo está subestimada, uma vez que o subleito homogêneo apresenta um menor armazenamento de água, ou seja, está mais seco.

#### **Umidade volumétrica do pavimento piloto**

O sétimo gráfico gerado foi o de umidade volumétrica do pavimento permeável piloto, ou seja, o volume de água contido no perfil em função da sua profundidade, representado na Figura 33.

**Figura 33:** Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e drenagem livre no subleito.



Na análise desse gráfico foram verificadas grandes diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, principalmente nas profundidades entre 66 cm e 158 cm. Observou-se que o solo homogêneo se comporta de forma uniforme e o subleito heterogêneo possui variações antes de atingir sua uniformidade. Isso ocorre, pois, nessa profundidade se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva umidade volumétrica.

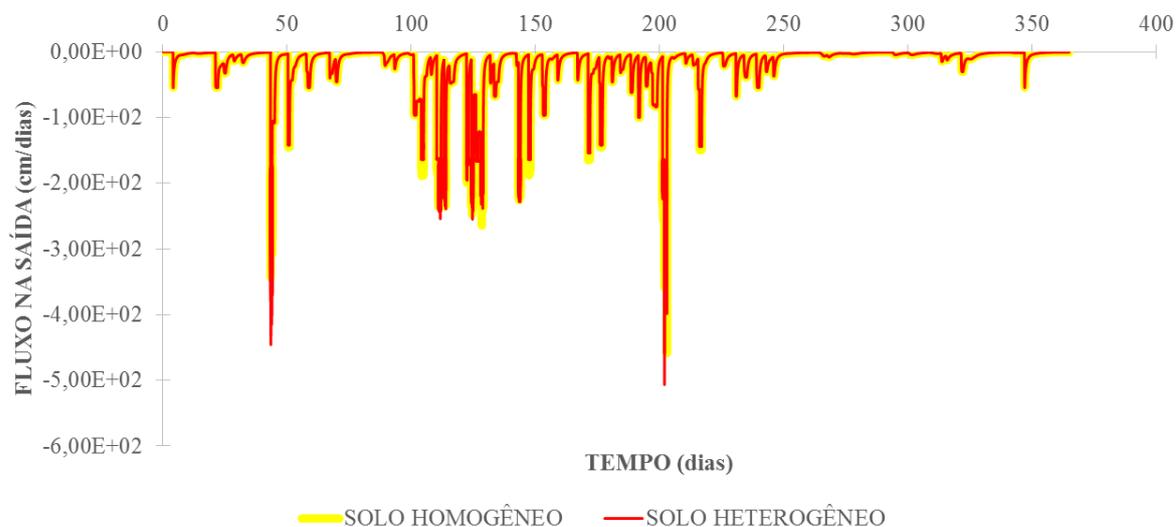
### ***5.1.2 Escoamento superficial e lençol freático no subleito***

O segundo cenário analisado foi a modelagem para um perfil piloto com subleito homogêneo e heterogêneo com escoamento superficial no limite superior e lençol freático no limite inferior.

#### **Fluxo na saída do pavimento piloto**

O gráfico gerado foi o do fluxo na saída do pavimento permeável piloto, ou seja, a velocidade da movimentação da água pelo limite inferior na presença de lençol freático, representada na Figura 34.

**Figura 34:** Fluxo na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.



Nesse caso, verificaram-se maiores fluxos na saída do subleito homogeneizado, em alguns tempos no intervalo entre 100 e 200 dias, onde essas diferenças não foram grandes, cerca de 10% em relação ao solo natural.

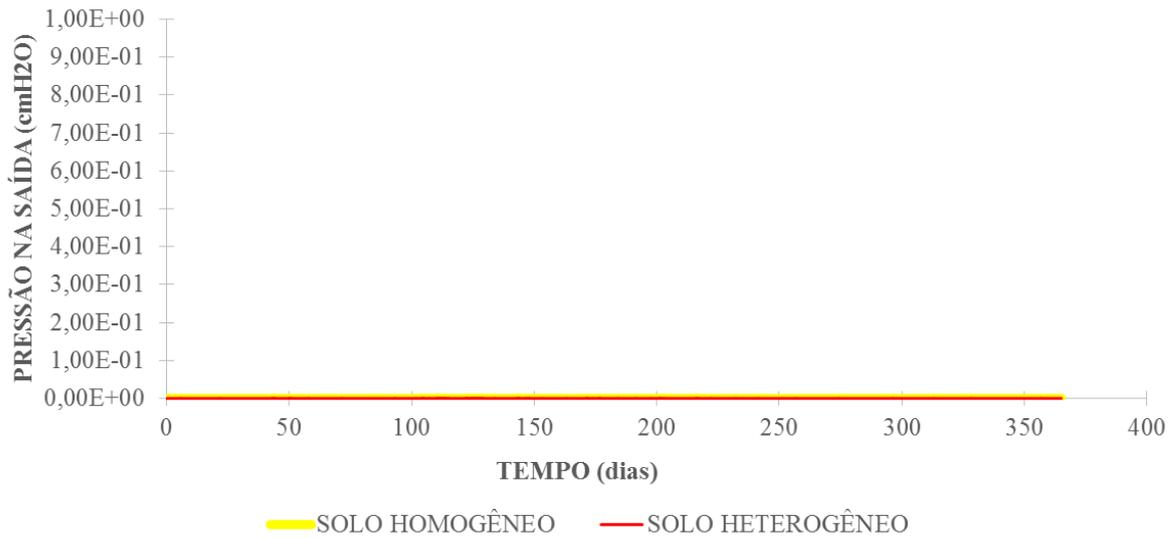
As maiores diferenças, comparando os dois tipos de subleitos, ocorreram em aproximadamente 45 dias, com uma variação de cerca 22% e em aproximadamente 200 dias, com uma variação de cerca de 29%, mostraram que a homogeneização do subleito esta subestimada.

Fazendo uma análise comparativa entre o cenário 1, Figura 28, e o cenário 2, Figura 34, observou-se que em aproximadamente 45 dias a diferenças entre o fluxo entre os dois tipos de subleito foi praticamente igual para os dois casos. Porém a situação inverteu para o tempo de aproximadamente 202 dias, onde se verificou que no primeiro cenário havia uma superestimação quando utilizado o solo homogeneizado e para o cenário 2 há uma subestimação, sobressaindo o fluxo na saída do subleito natural.

### **Pressão na saída do pavimento piloto**

O gráfico gerado foi o da pressão na saída do pavimento permeável piloto, ou seja, a pressão gerada no limite inferior do pavimento na presença de lençol freático, representado na Figura 35.

**Figura 35:** Pressão na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.

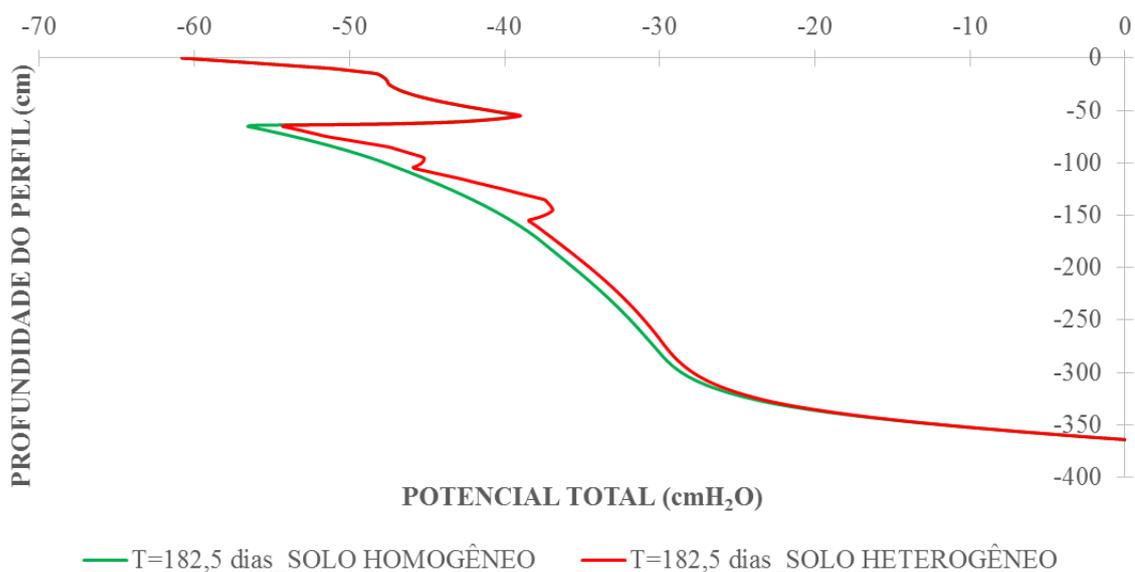


Na análise desse gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento da pressão de água na saída do pavimento durante o tempo, pois a pressão é constante devido a existência do lençol freático.

#### Potencial total do pavimento piloto

O gráfico gerado foi o do potencial total do pavimento permeável piloto para o tempo igual a 185,5 dias, representado na Figura 36.

**Figura 36:** Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.



Na análise desse gráfico verificaram-se grandes diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, sendo que elas só começaram a aparecer em profundidade aproximada de

66 cm. Visto que o pavimento permeável possui uma profundidade de 64 cm, o início das discrepâncias entre as duas curvas representa o começo da camada do subleito, manifestando alterações em relação ao potencial total entre subleito homogêneo e heterogêneo.

Observou-se também que a curva para o subleito homogêneo é uniforme e a do subleito heterogêneo possui variações antes de atingir sua uniformidade. Essas variações ocorrem aproximadamente entre 66 cm e 158 cm, profundidade onde se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva potencial total.

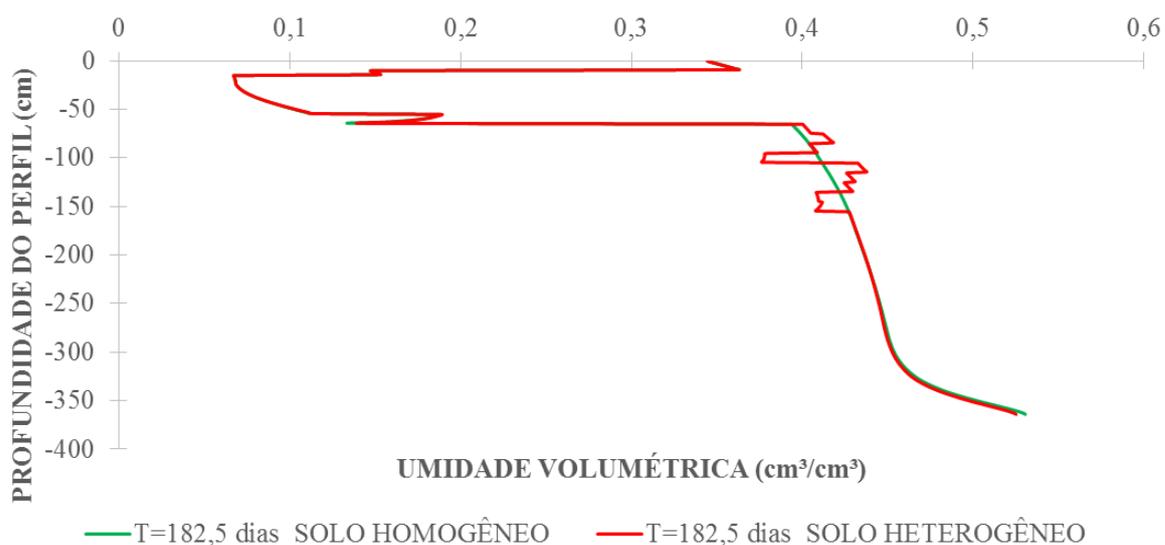
A maior variação ocorreu na profundidade de aproximadamente 145 cm, onde a variação de potencial total mostrou ser 9,35% maior no subleito homogêneo. Essa diferença indica que a análise de homogeneização do solo está subestimada, uma vez que o subleito homogêneo apresenta um menor armazenamento de água, ou seja, está mais seco.

Fazendo uma análise comparativa entre os gráficos do cenário 1, Figura 32, e o segundo cenário, Figura 36, observou-se que quase não houve diferença entre a variação máxima entre as curvas para subleitos diferentes. Porém, diferentemente do primeiro caso, o gráfico da Figura 36 possui potencial nulo na profundidade máxima analisada. Isso acontece devido a existência de lençol freático que torna o potencial nesse ponto constante.

#### **Umidade volumétrica do pavimento piloto**

O gráfico gerado foi o de umidade volumétrica do pavimento permeável piloto, ou seja, o volume de água contido no perfil em função da sua profundidade na presença de lençol freático como condição de contorno inferior, representado na Figura 37.

**Figura 37:** Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=185,5 dias e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.



Na análise desse gráfico foram verificadas grandes diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, principalmente nas profundidades entre 66 cm e 158 cm. Observou-se que o solo homogêneo se comporta de forma uniforme e o subleito heterogêneo possui variações antes de atingir sua uniformidade. Isso ocorre, pois, nessa profundidade se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva umidade volumétrica.

Fazendo uma análise comparativa entre os gráficos do cenário 1, Figura 33, e o segundo cenário, Figura 37, observou-se que quase não houve diferença entre a variação máxima entre as curvas para subleitos diferentes. Ocorreu apenas um acréscimo de umidade nos últimos centímetros analisados, decorrente do fluxo de água ascendente do lençol freático para essas camadas por meio de capilaridade.

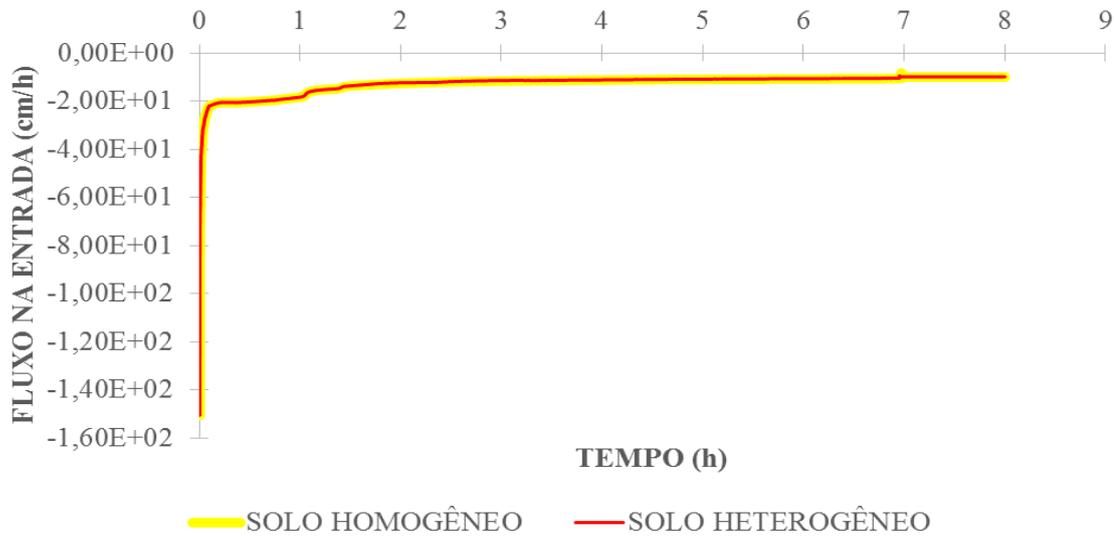
### 5.1.3 Carga hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito

O terceiro cenário analisado foi a modelagem para um perfil piloto com subleito homogêneo e heterogêneo com carga hidráulica no limite superior e drenagem livre no limite inferior. Após modelagem no programa Hydrus-1D foram gerando gráficos sobrepondo os resultados para os diferentes tipos de subleito.

#### Fluxo na entrada do pavimento piloto

O gráfico gerado foi o do fluxo na entrada do pavimento permeável piloto, ou seja, a velocidade da movimentação da água pelo limite superior, representada na Figura 38.

**Figura 38:** Fluxo na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.



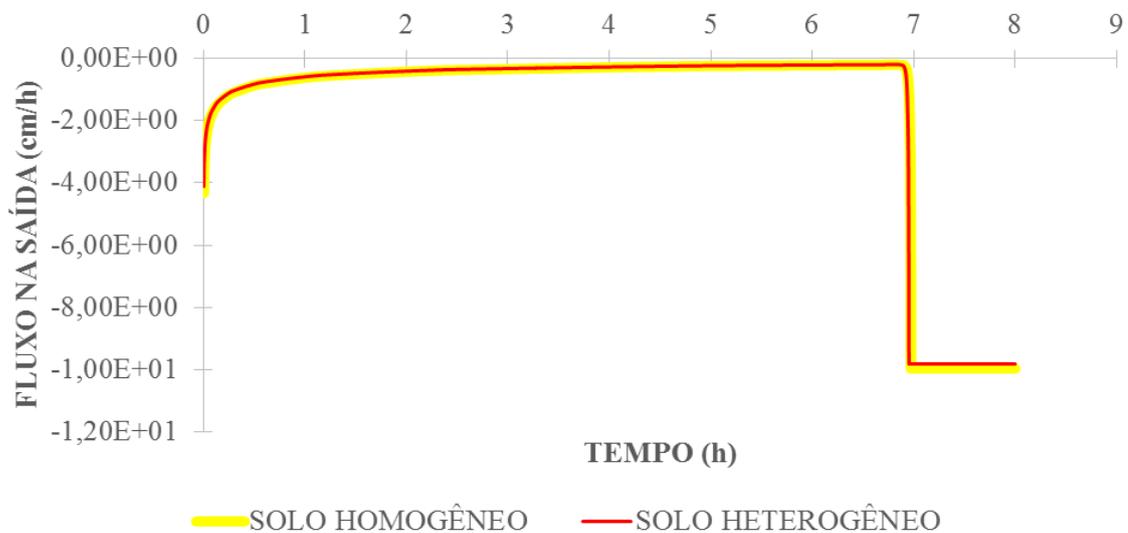
Na análise desse gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento do fluxo de água na entrada do pavimento durante o tempo, pois as camadas superficiais para os diferentes subleitos modelados são iguais.

Observou-se que o fluxo foi diminuindo em função do tempo. Esse fato ocorre devido a saturação das camadas superficiais.

#### **Fluxo na saída do pavimento piloto**

O gráfico gerado foi o do fluxo na saída do pavimento permeável piloto, ou seja, a velocidade da movimentação da água pelo limite inferior, representada na Figura 39.

**Figura 39:** Fluxo na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.



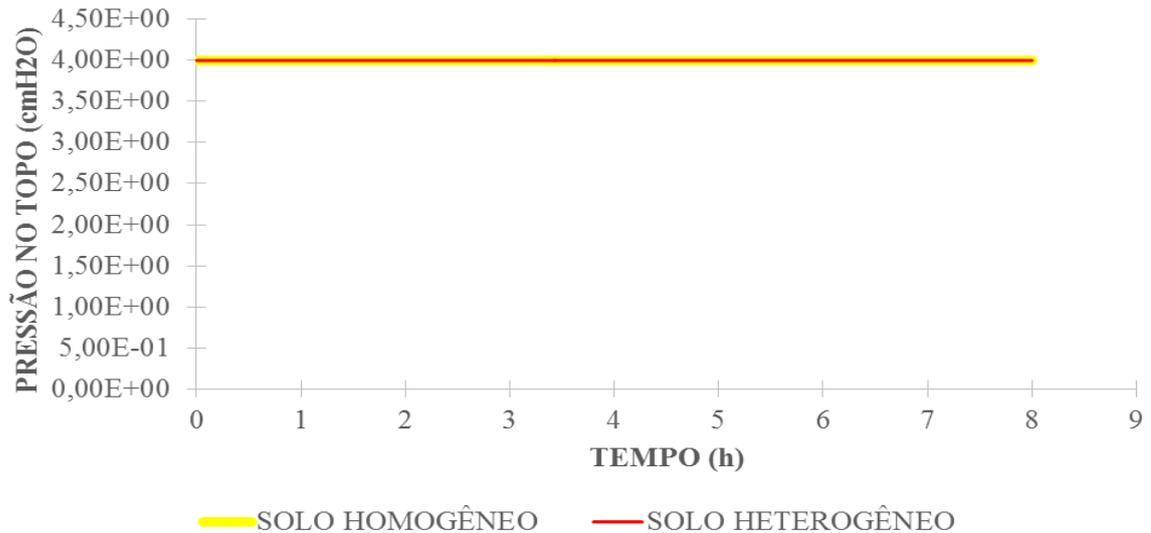
Na análise desse gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento do fluxo de água na saída do pavimento durante o tempo.

Observou-se que o fluxo na saída atingiu seu regime permanente em  $t=7h$ .

#### Pressão na entrada do pavimento piloto

O gráfico gerado foi o da pressão na entrada do pavimento permeável piloto, ou seja, a pressão gerada no limite superior do pavimento, representado na Figura 40.

**Figura 40:** Pressão na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleito homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.

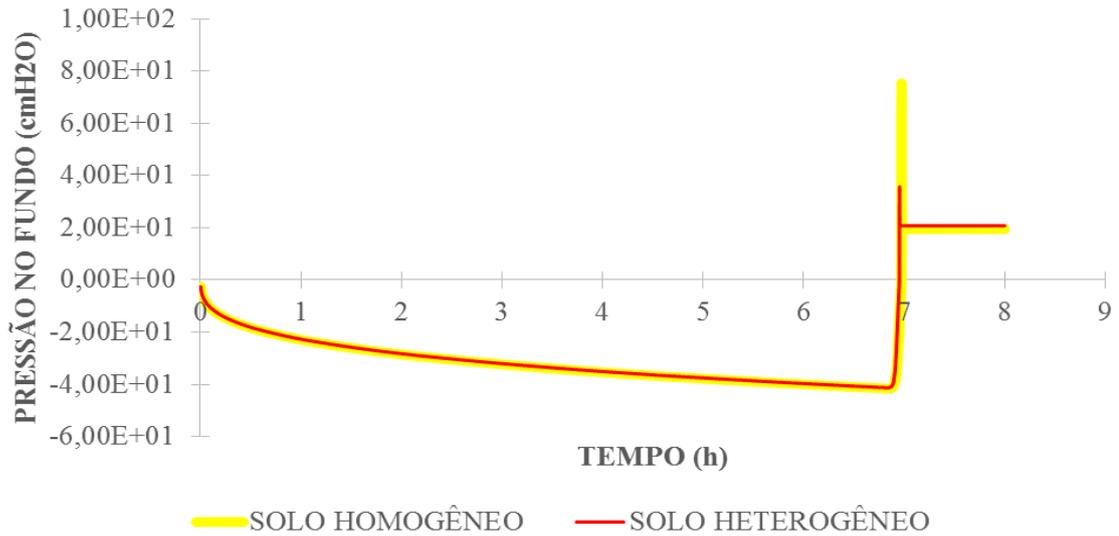


Na análise desse gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento da pressão de água na entrada do pavimento durante o tempo, pois a pressão é constante devido à existência da carga hidráulica.

#### Pressão na saída do pavimento piloto

O gráfico gerado foi o da pressão na saída do pavimento permeável piloto, ou seja, a pressão gerada no limite inferior do pavimento, representado na Figura 41.

**Figura 41:** Pressão na saída do pavimento, em função do tempo, para subleito homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.

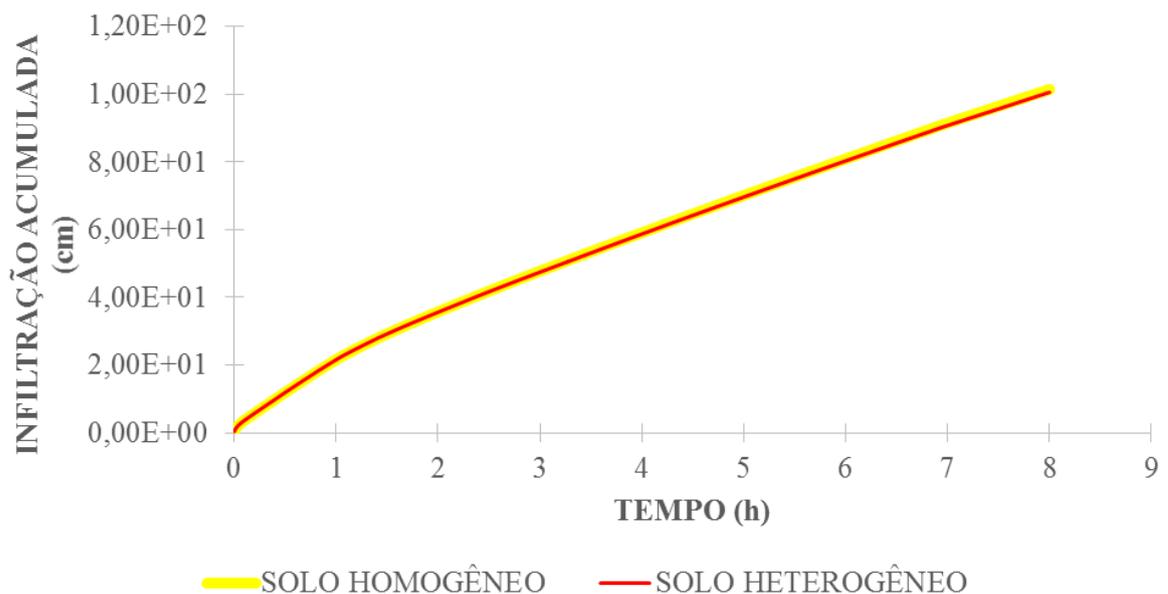


Na análise desse gráfico, observou-se uma diferença entre os valores de pressão para o tempo aproximadamente de 7 horas, onde foi verificada uma superestimação de 53% para o pavimento com subleito homogêneo.

#### **Infiltração acumulada no pavimento piloto**

O quinto gráfico gerado foi o da infiltração acumulada no pavimento permeável piloto, representado na Figura 42.

**Figura 42:** Infiltração acumulada, em função do tempo, para subleito homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.

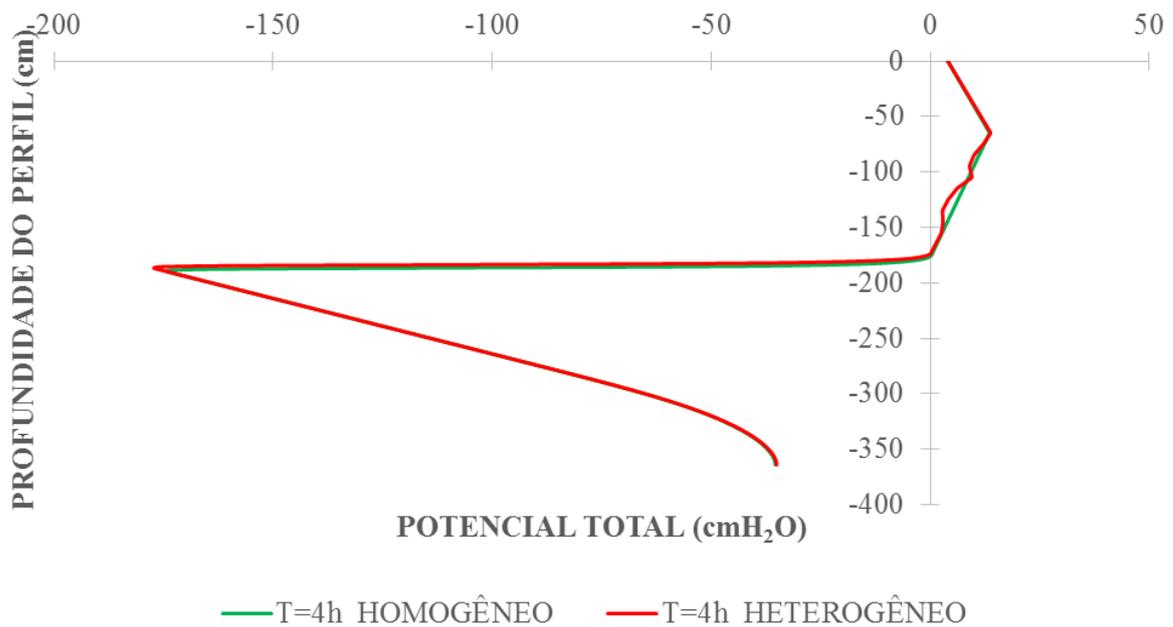


Na análise desse gráfico não foi verificada diferença significativa em relação ao comportamento do fluxo de água durante o tempo para os diferentes subleitos modelados. Essa semelhança ocorre, pois, não foram consideradas perdas do sistema na modelagem no Hydrus-1D4.

### **Potencial total do pavimento piloto**

O gráfico gerado foi o do potencial total do pavimento permeável piloto para o tempo igual a 4 h, representado na Figura 43.

**Figura 43:** Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.



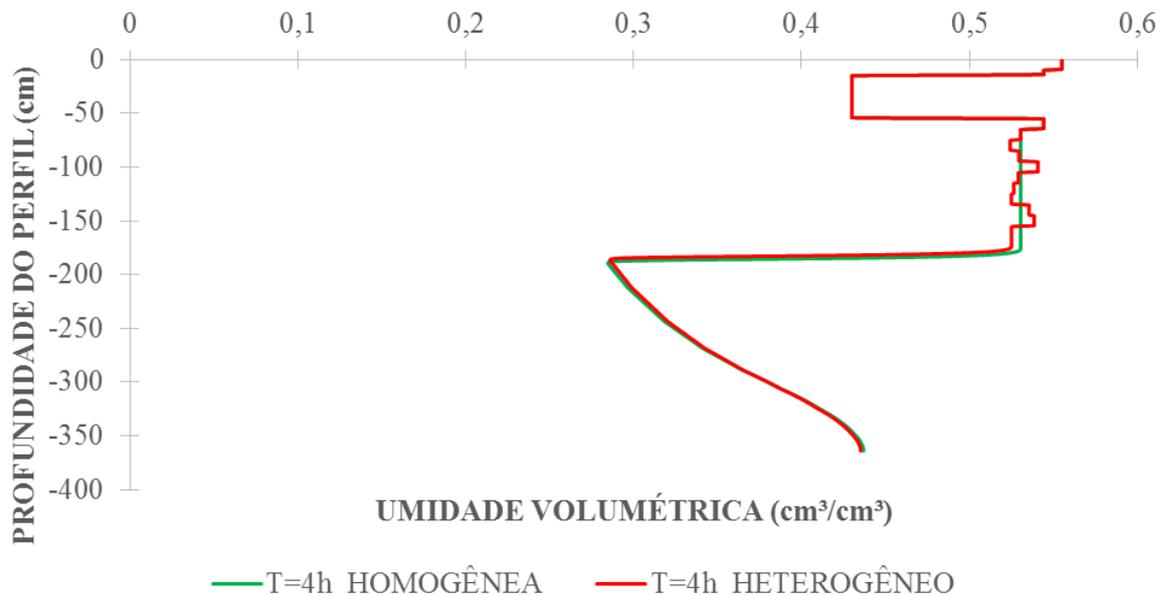
Na análise desse gráfico verificaram-se pequenas diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, sendo que elas só começaram a aparecer em profundidade aproximada de 66 cm. Visto que o pavimento permeável possui uma profundidade de 64 cm, o início das discrepâncias entre as duas curvas representa o começo da camada do subleito, manifestando alterações em relação ao potencial total entre subleito homogêneo e heterogêneo.

Observou-se também que a curva para o subleito homogêneo é uniforme e a do subleito heterogêneo possui variações antes de atingir sua uniformidade. Essas variações ocorrem aproximadamente entre 66 cm e 158 cm, profundidade onde se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva potencial total.

### Umidade volumétrica do pavimento piloto

O gráfico gerado foi o de umidade volumétrica do pavimento permeável piloto, ou seja, o volume de água contido no perfil em função da sua profundidade, representado na Figura 44.

**Figura 44:** Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e drenagem livre no subleito.



Na análise desse gráfico foram verificadas grandes diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, principalmente nas profundidades entre 66 cm e 158 cm. Observou-se que o solo homogêneo se comporta de forma uniforme e o subleito heterogêneo possui descontinuidades antes de atingir sua uniformidade. Essas descontinuidades na umidade volumétrica ocorrem devido a diferença entre os parâmetros hidráulicos das estratificações. Nesse caso, as descontinuidades são observadas em situações onde o perfil está saturado, mostrando que a diferença de porosidade entre as camadas gera uma repercussão sobre as estimativas do armazenamento de água no subleito. Isso ocorre, pois, nessa profundidade se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva umidade volumétrica.

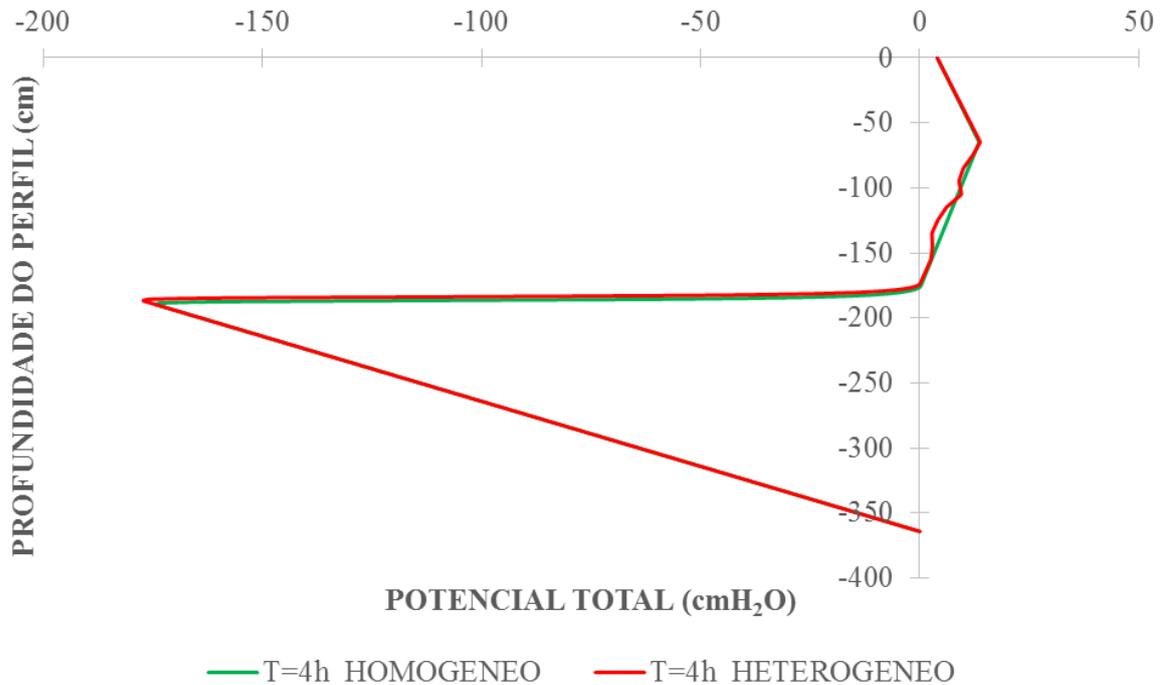
#### ***5.1.4 Carga hidráulica na superfície e lençol freático no subleito***

O quarto cenário analisado foi a modelagem para um perfil piloto com subleito homogêneo e heterogêneo com carga hidráulica no limite superior e lençol freático no limite inferior. Após modelagem no programa Hydrus-1D foram gerando gráficos sobrepondo os resultados para os diferentes tipos de subleito.

### Potencial total do pavimento piloto

O gráfico gerado foi o do potencial total do pavimento permeável piloto para o tempo igual a 4 horas, representado na Figura 45.

**Figura 45:** Potencial total, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.



Na análise desse gráfico verificaram-se pequenas diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, sendo que elas só começaram a aparecer em profundidade aproximada de 66 cm. Visto que o pavimento permeável possui uma profundidade de 64 cm, o início das discrepâncias entre as duas curvas representa o começo da camada do subleito, manifestando alterações em relação ao potencial total entre subleito homogêneo e heterogêneo.

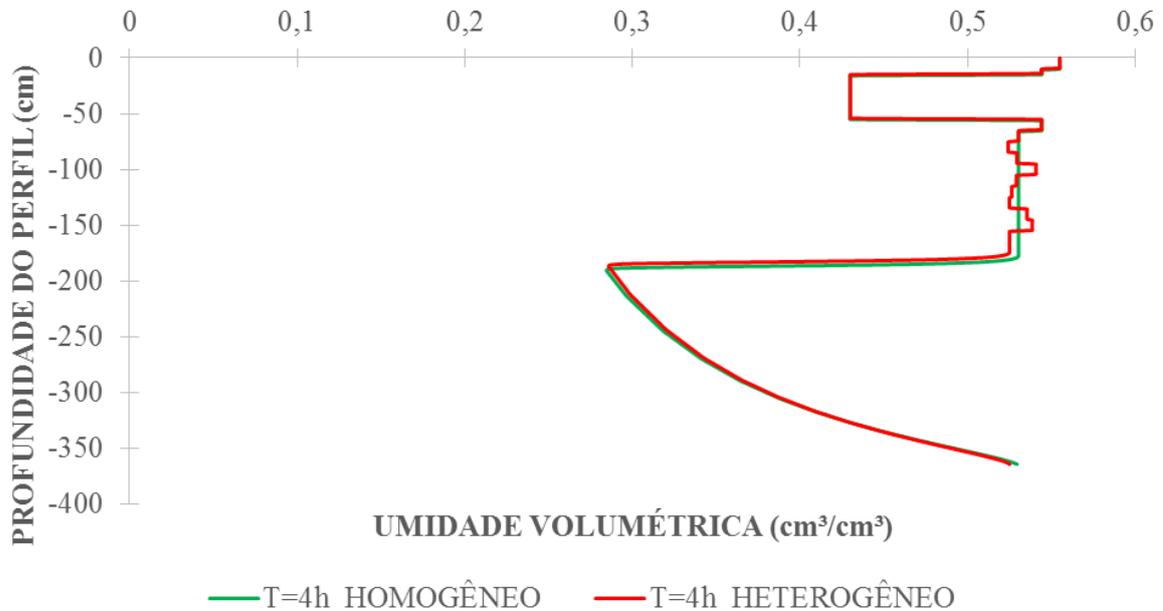
Observou-se também que a curva para o subleito homogêneo é uniforme e a do subleito heterogêneo possui variações antes de atingir sua uniformidade. Essas variações ocorrem aproximadamente entre 66 cm e 158 cm, profundidade onde se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva potencial total.

Fazendo uma análise comparativa entre os gráficos do cenário 3, Figura 43, e o quarto cenário, Figura 45, observou-se que esse último possui potencial nulo na profundidade máxima analisada. Isso acontece devido a existência de lençol freático que torna o potencial nesse ponto constante.

### Umidade volumétrica do pavimento piloto

O gráfico gerado foi o de umidade volumétrica do pavimento permeável piloto, ou seja, o volume de água contido no perfil em função da sua profundidade, representado na Figura 46.

**Figura 46:** Umidade volumétrica, em função da profundidade do perfil, para T=4 horas e para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.



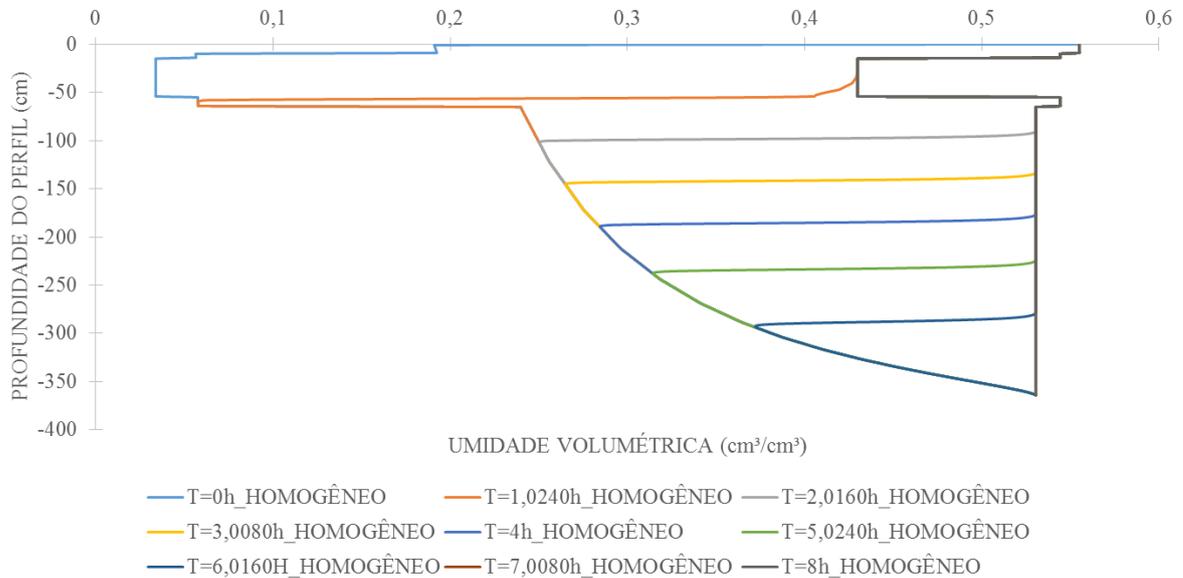
Na análise desse gráfico foram verificadas grandes diferenças entre os dois tipos de subleitos modelados, principalmente nas profundidades entre 66 cm e 158 cm. Observou-se que para o solo homogêneo, o perfil de umidade volumétrica se comporta de forma contínua e o subleito heterogêneo possui variações antes de atingir sua uniformidade. Isso ocorre, pois, nessa profundidade se encontram as 9 camadas, com 10 cm cada, dos diferentes tipos de solo que compõem o subleito heterogêneo, demonstrando que as diferenças nos parâmetros hidráulicos dessas camadas provocam mudanças no comportamento da curva umidade volumétrica.

Fazendo uma análise comparativa entre os gráficos do cenário 3, Figura 44, e o quarto cenário, Figura 46, observou-se que quase não houve diferença entre a variação máxima entre as curvas para subleitos diferentes. Ocorreu apenas um acréscimo de umidade nos últimos centímetros analisados, decorrente do fluxo de água ascendente do lençol freático para essas camadas por meio de capilaridade.

Para o cenário 4 também foi analisado o comportamento da umidade volumétrica em função do tempo, ou seja, o comportamento da infiltração da água nas camadas do pavimento permeável estudado. Ressalta-se que para tal foram considerados 9 tempos distintos.

O primeiro caso estudado foi o pavimento sobre subleito homogêneo, e seu resultado se encontra na Figura 47.

**Figura 47:** Comportamento da umidade volumétrica em função do tempo para um subleito homogêneo do pavimento permeável.



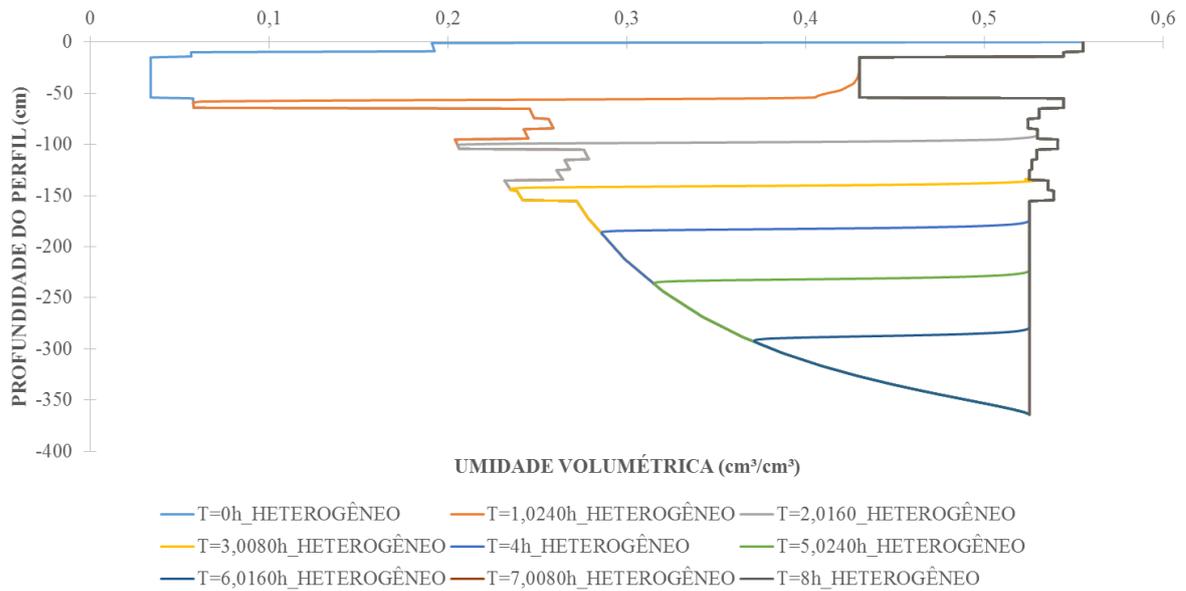
Verificou-se que inicialmente ( $t=0$ ) a umidade encontra-se concentrada na superfície do perfil devido à carga hidráulica depositada na superfície. À medida que o tempo passa, essa água infiltra pelas camadas, umedecendo-as até as camadas mais profundas, tendendo a um escoamento no regime uniforme na base do perfil. Esse regime foi atingido em aproximadamente  $t=7h$ , onde houve a sobreposição das curvas para  $t=7,0080h$  e  $t=8h$ .

Portanto, o deslocamento das curvas para baixo em função do tempo indica o avanço da frente de umidade (molhamento) e o deslocamento para direita indica o aumento do armazenamento da água no solo (saturação).

Além disso, observou-se a rápida infiltração da água pelo pavimento permeável, principalmente entre 19 e 54 cm de profundidade, região onde se encontra o reservatório de brita.

O segundo caso estudado foi o pavimento sobre subleito heterogêneo, e seu resultado se encontra na Figura 48.

**Figura 48:** Comportamento da umidade volumétrica em função do tempo para um subleito homogêneo do pavimento permeável.



O comportamento desse gráfico em relação ao fluxo da água com o tempo, umedecendo as camadas, se comporta de forma semelhante ao analisado gráfico anterior, havendo variações apenas nas camadas heterogêneas que constituem o subleito aqui estudado. Essas variações ocorrem devidas as diferentes características hidrográficas dessas camadas, fazendo-as se comportarem de maneira distinta em relação ao nível umidade de cada uma.

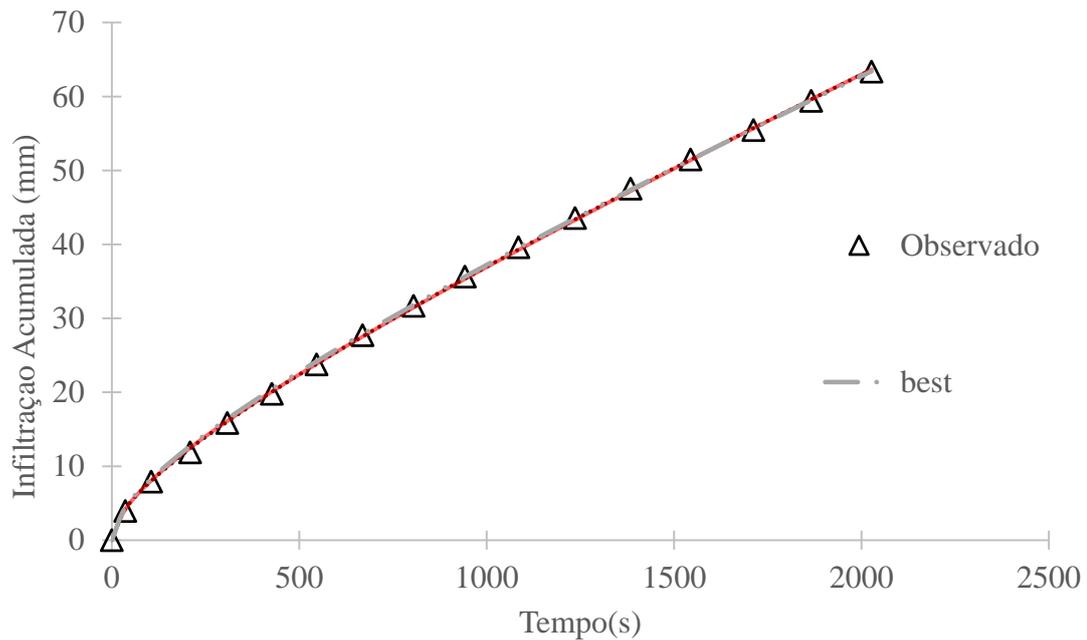
Verificou-se que, como no gráfico anterior, a infiltração atinge seu regime permanente em aproximadamente  $t=7h$ , fato que também pode ser percebido no gráfico da Figura 47.

## 5.2 Dimensionamento do Pavimento

A infiltração acumulada experimental e ajustada pelos métodos Best é apresentada na Figura 49. Observa-se que o solo apresentou uma lâmina infiltrada de aproximadamente 70 mm em aproximadamente 2000 segundos. Além disso, o método BEST foi capaz de descrever bem a curva de infiltração, com coeficiente de determinação de até 99,98% (Tabela 5).

**Tabela 5:** Desempenho do modelo de BEST

Índice	R <sup>2</sup>	CW	IC	RD	CMR
BEST	99.98	98.04	98.04	0,9832	0.006079

**Figura 49:** Ajuste da infiltração acumulada ao método de BEST.

Os parâmetros hidráulicos estão apresentados na Tabela 6. O método Best apresentou condutividade hidráulica saturada de 50 mm/h. O solo pode ser classificado hidrológicamente como pertencente ao grupo A do SCS.

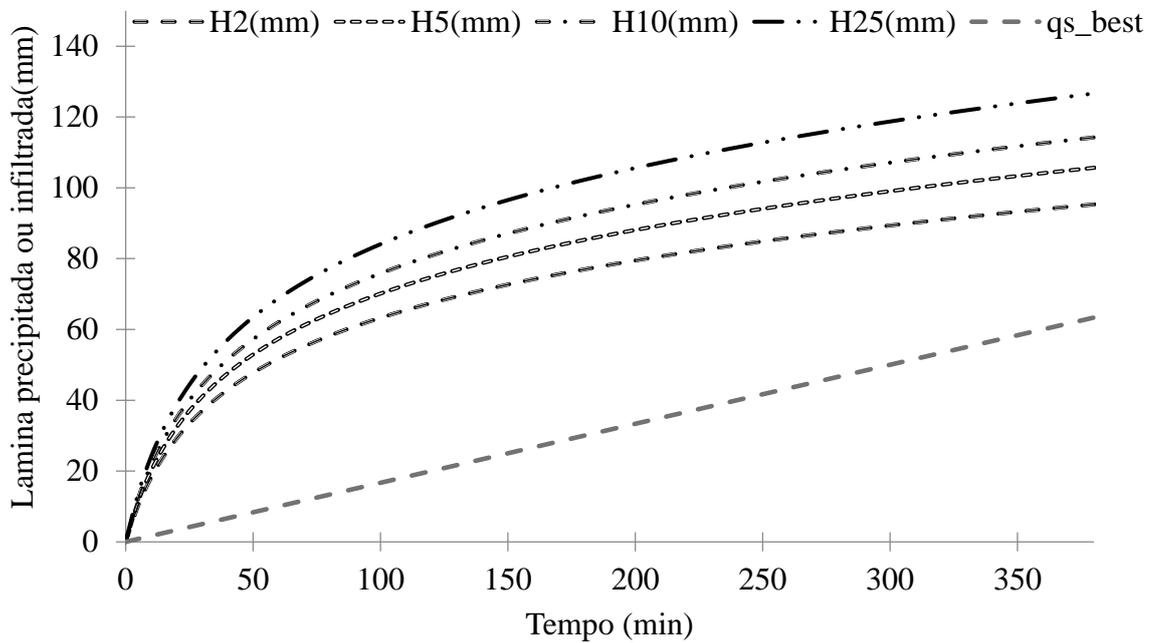
**Tabela 6:** Parâmetros hidráulicos para o método BEST

Método	n	m	$\eta$	$\theta_0$	$\theta_s$	S	hg	Ks	Grupo
	[-]	[-]	[-]	[cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ]	[mm.s <sup>-1</sup> ]	[mm]	[mm.h <sup>-1</sup> ]	Hidrológico
Best	2,24	0,11	11,5	0,083	0,450	0,63	-34,4	50,0	A

## **Dimensionamento**

A Figura 50 ilustra a aplicação do método da chuva envelope para cada tempo de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos.

**Figura 50:** Aplicação do método da chuva envelope para tempos de retorno de 2, 5, 10e 25 anos. Infiltração obtida a partir do método BEST



A Tabela 7 demonstra os volumes obtidos com a aplicação do método da chuva envelope. Observa-se que as diferenças máximas entre as curvas da lâmina precipitada acumulada e da vazão de saída por infiltração permite uma estimativa de volumes necessários para o pavimento permeável entre 11,93 e 18,069 m<sup>3</sup>.

**Tabela 7:** Volume a armazenar no pavimento permeável<sup>2</sup> (m<sup>3</sup>)

Tr(anos)	2	5	10	25
Volume da camada de reservatório do pavimento permeável (m <sup>3</sup> )	11,925	13,888	15,566	18,069

<sup>2</sup> Volumes a armazenar maiores que o volume máximo disponível para uma profundidade inicial de 1 m (aumentar a profundidade e recalculer os volumes)

## 6 CONCLUSÕES

Nos quatro cenários modelados no Hydrus-1D verificou-se que não há diferenças significativas entre modelar utilizando pavimento permeável com subleito homogêneo ou subleito heterogêneo, isso em relação a análise de variáveis globais, isto é: como fluxo da água nas condições de contorno superior e inferior, pressão nas condições de contorno superior e inferior e infiltração acumulada, ambos em função do tempo.

Porém levando em consideração as variáveis como umidade volumétrica e potencial total, ambas em relação a profundidade, verificou-se alterações significativas em relação a utilização de pavimento permeável com subleito homogêneo e pavimento permeável com subleito heterogêneo na modelagem no Hydrus-1D. Essa diferença ocorre devido às diferenças entre as propriedades hidráulicas das várias camadas do subleito heterogêneo.

Portanto, é confiável a homogeneização do subleito nas modelagens no Hydrus-1D, visto que proporcionará resultados semelhantes ao do solo natural, quando as variáveis a serem analisadas são as globais da movimentação da água pelo pavimento. Porém, não é aconselhável usar esse método quando se desejar explorar as variáveis como umidade volumétrica e potencial total que influenciam o armazenamento da água no solo, visto que há discrepâncias entre o uso do solo natural (heterogêneo) e um solo homogeneizado.

No tocante ao dimensionamento, para uma condutividade hidráulica de 50 mm/h. A aplicação do método da chuva envelope para uma i-d-f característica da cidade do Recife, apresentou volumes necessários para a camada de reservatório do pavimento permeável entre 11,93 e 18,069 m<sup>3</sup>.

## **7 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O estudo foi feito para o fluxo unidimensional de água, porém recomenda-se realizar o mesmo estudo utilizando os programas computacionais Hydrus-2D e Hydrus-3D, para verificar se o comportamento das variáveis de fluxo para pavimentos permeáveis, testando as hipóteses de subleito homogêneo e subleito heterogêneo, são semelhante ao ocorrido no presente estudo.

Sugere-se também realizar o mesmo estudo utilizando fluxos horários para os casos 1 e caso 2, visto que foram utilizados fluxos diários, e verificar se houve alguma alteração em relação às conclusões obtidas nesse presente trabalho.

Recomenda-se também verificar essa hipótese para o caso de transferência de solutos e metais pesados da superfície ao subleito do pavimento permeável.

## REFERÊNCIAS

- ANGULO-JARAMILLO\*, R.; VANDERVAERE, JEAN-PIERRE .; ROULIER, S.;THONY, JEAN-LOUIS.; GAUDET, JEAN-PAUL .; VAUCLIN, M. (2000). **Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers A review and recent developments**. Soil & Tillage Research 55 (2000) 1±29.
- ANTONINO, A.C.D.; ÂNGULO- JARAMILLO, R.; SOUSA, E.S.; NETTO, A.M.; CARNEIRO, C.J.G.; MONTENEGRO, A.A.A. (2001). **Determinação da condutividade hidráulica e da sorvida utilizando um infiltrometro a disco**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.2, p.247-253, 2001.
- AZZOUT Y. BARRAUD S., CRES FN, ALFAKIH E. (1994). **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. Paris : éd. Tec & Doc de Lavoisier, 372 p.
- BAPTISTA, M.B; NASCIMENTO N.O; BARRAUD S.(2005) **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 266 p.
- BAPTISTA, M.B; NASCIMENTO N.O; BARRAUD S.(2005) **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 266 p.
- CABRAL, J.J.S.P.; ALENCAR, A.V. (2005). **Recife e a convivência com as águas**, in “Gestão do Território e Manejo Integrado das ÁGUAS urbanas”, Ministério das Cidades. Brasília – DF.
- CABRAL, J.J.S.P; ALENCAR, A.V. **Recife e a convivência com as águas**. Convênio Brasil-Itália, ed. Gráfica Brasil. Brasília - DF, 2011.
- CABRAL, J.J.S.P; SANTOS, L.L; GAMA, A. **Avaliação da qualidade das águas pluviais urbanas num bairro em Recife**. Recife, 2010.
- CARNEIRO, P.M; MIGUEZ, M.G. **Controle de inundações em bacias hidrográficas metropolitanas**. São Paulo: Annablume, 2011. ISBN 978-85-391-0227-3.
- CASQA – CALIFORNIA STORMWATER QUALITY ASSOCIATION (2003). Estudo de caso: **California Stormwater BMP handbook – new development and redevelopment**. Disponível em: <[www.cabmphandbook.com](http://www.cabmphandbook.com)>.

COUTINHO, A.P. Pavimento permeável como técnica compensatórias para drenagem urbana na cidade do Recife. Dissertação de mestrado, CTG, UFPE, 2011.

DE CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J.M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; HAVERKAMP, R. 2002. **Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés**. Rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés – LTHE, Grenoble: Université de Grenoble, 2002, 82p.

DESCHENE, M.; BARRAUD, S.; BARDIN, J-P. (2004). **Indicators for hydraulic and pollution retention assessment of stormwater infiltration basins**. Journal of Environmental Management 71 (2004) 371–380.

HALL, M.J. **Urban Hydrology**. Elsevier, Essex, 1986.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.R. **Predicting the water retention curve from particle size distribution: I Sandy soils without organic matter**. Soil Science, Baltimore, v.142, p.325–335, 1986.

HORTON, R., 1933. **The role of infiltration in the hydrologic cycle**. American Geophysical Union Transactions 14, 446–460.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>

LAMEPE/ITEP – LABORATÓRIO DE METEOROLOGIA DE PERNAMBUCO / INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO. **Climatologia**. Disponível em: <[www.itep.br/lamepe.asp](http://www.itep.br/lamepe.asp)>

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J.M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. **BEERKAN. Estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST**. Soil Science Society of American Journal, Madison, v.70, p.521-532, 2006.

MARQUARDT, D.W. **An algorithm for least squares estimation of non linear parameters**. SIAM Journal on Applied Mathematics, Philadelphia, v.11, p.431-441, 1963.

MELO, T.A.T. Jardim de Chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas. Dissertação de mestrado, CTG, UFPE, 2011

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A. **Aproveitamento sustentável de aquíferos aluviais no semi-árido**. In: Cabral, J. J. S.; Ferreira, J. P. C. L.; Montenegro, S. M. G. L.; Costa, W. (ed.). **Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento**. Recife: UFPE, 2004. cap.2, p.61-117.

PHILIP, J.R.(1957). **The theory of Infiltration: 5**. The Influence of the Initial Moisture Content. Soil Science, v.4, n.84, p.329-339, 1957.

PINTO, L.S.P; HOLTZ, A.C.T; MARTINS, J.A; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. ISBN 978-85-212-0154-0.

SAYEGH, S. **Corpo Vivo: harmonia, nome do novo edifício comercial do Triptyque arquitetos, significa mais que a simples referência à rua onde fica. Reflete o espírito intercambiável e fluido de sua arquitetura**. Revista 57 aU – Arquitetura e Urbanismo, ed 174, setembro 2008. Disponível em: <[www.au.pini.com.br](http://www.au.pini.com.br)>

SCHUELER, T.R. Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMP's. Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, 1987.

SILVEIRA, A.L; LOUZADA, J.A; BELTRAME, L.F. Cap. 9, Infiltração e armazenamento no solo in TUCCI, C.E.M. **Hidrologia ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009.

SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.-Y.; ROSS, P.J.; HAVERKAMP, R. **Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory**. Water Resources Research, v.30, p.2925-2929, 1994.

VILLELA, S.M; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WATER SENSITIVE URBAN DESIGNE – WSUD (1999). Estudo de caso: **Lynbrook Estate**. Disponível em: <<http://wsud.melbournewater.com.au/>>.

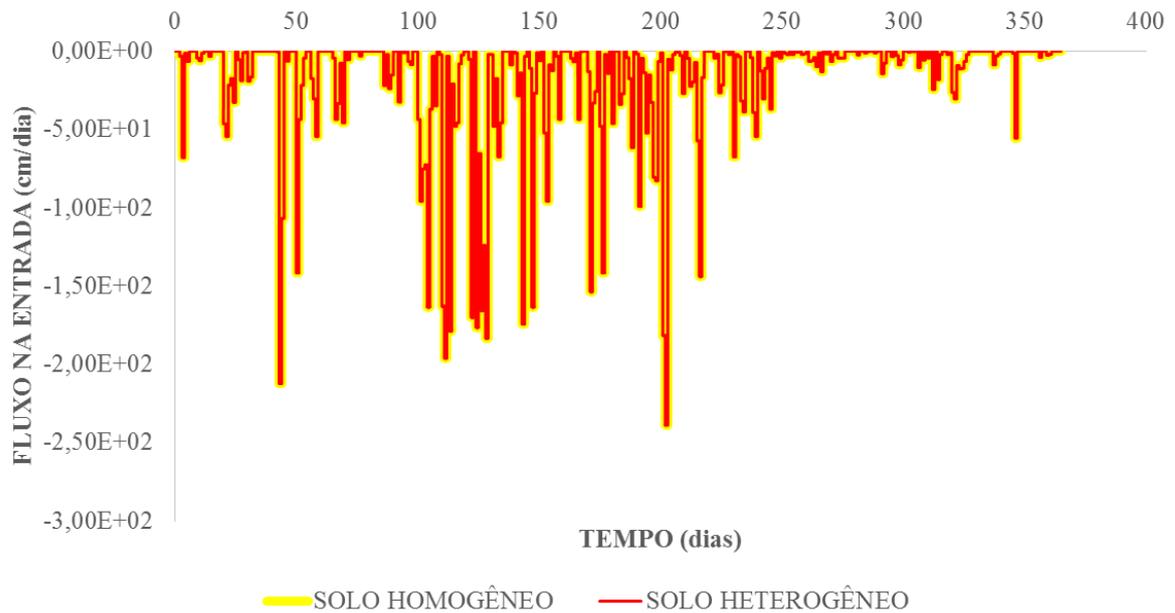
## APÊNDICES

### Apêndice A – Cenário 2

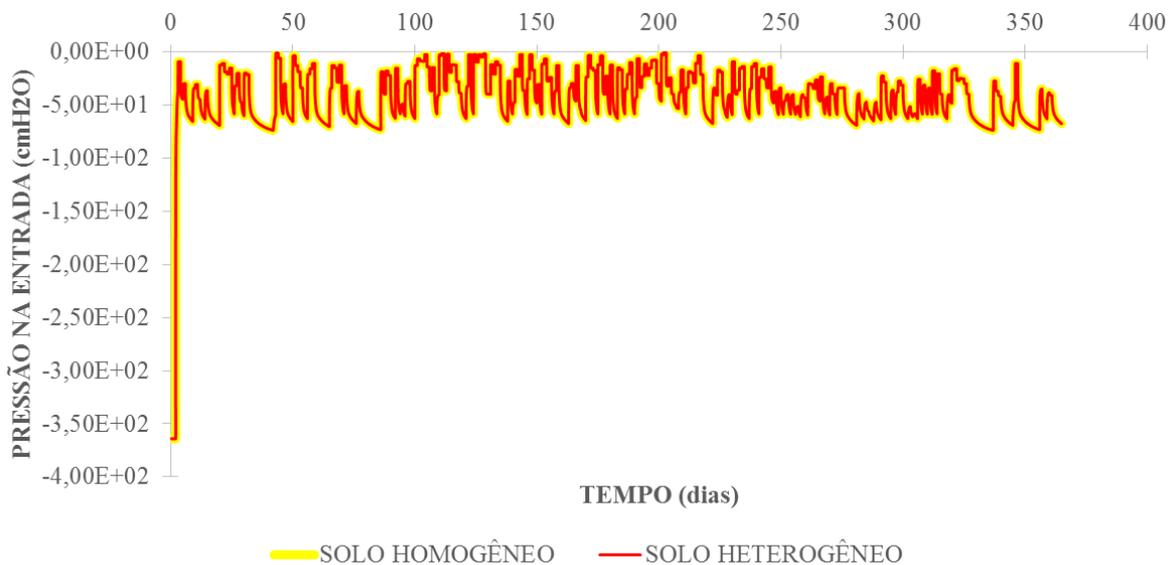
Curvas geradas para o cenário 2, onde foram adotadas as seguintes condições de contorno:

- Superior: escoamento superficial;
- Inferior: lençol freático.

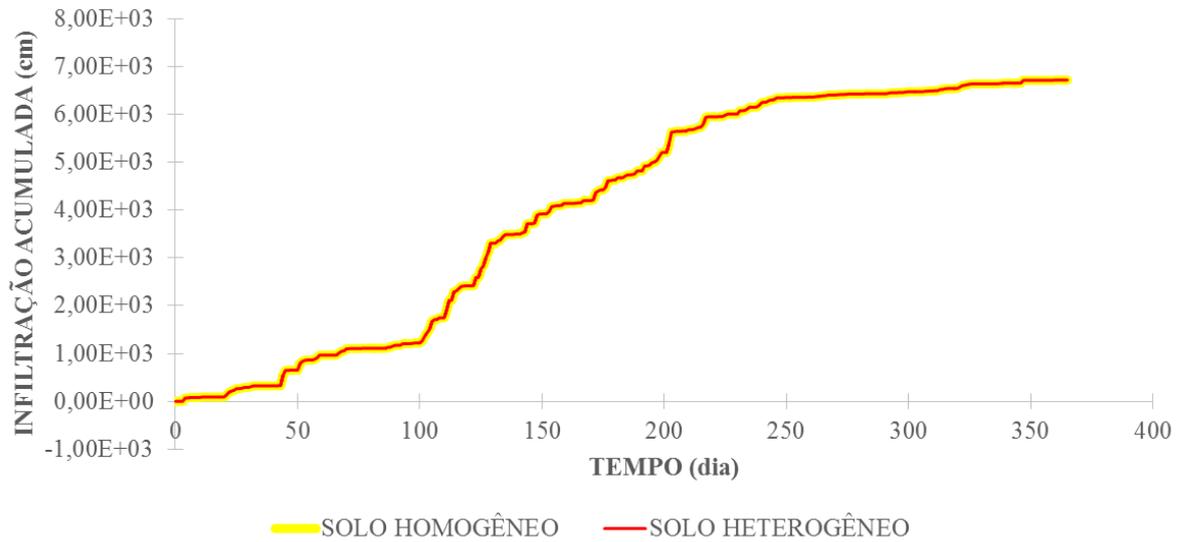
Fluxo na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.



Pressão na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.



Infiltração acumulada, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando escoamento superficial e lençol freático no subleito.

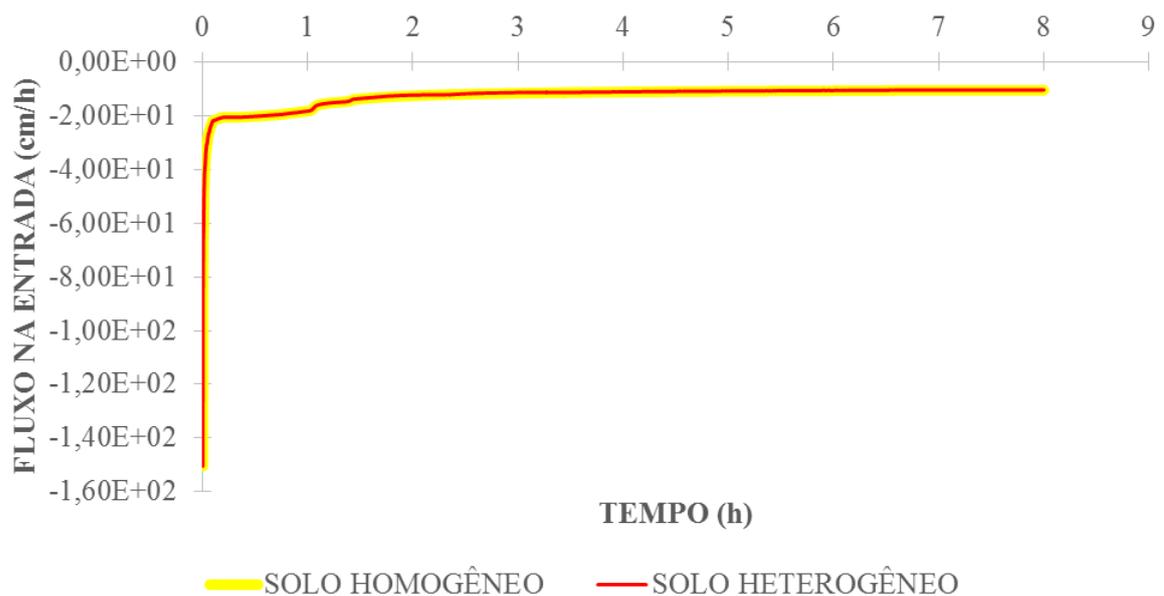


#### Apêndice B – Cenário 4

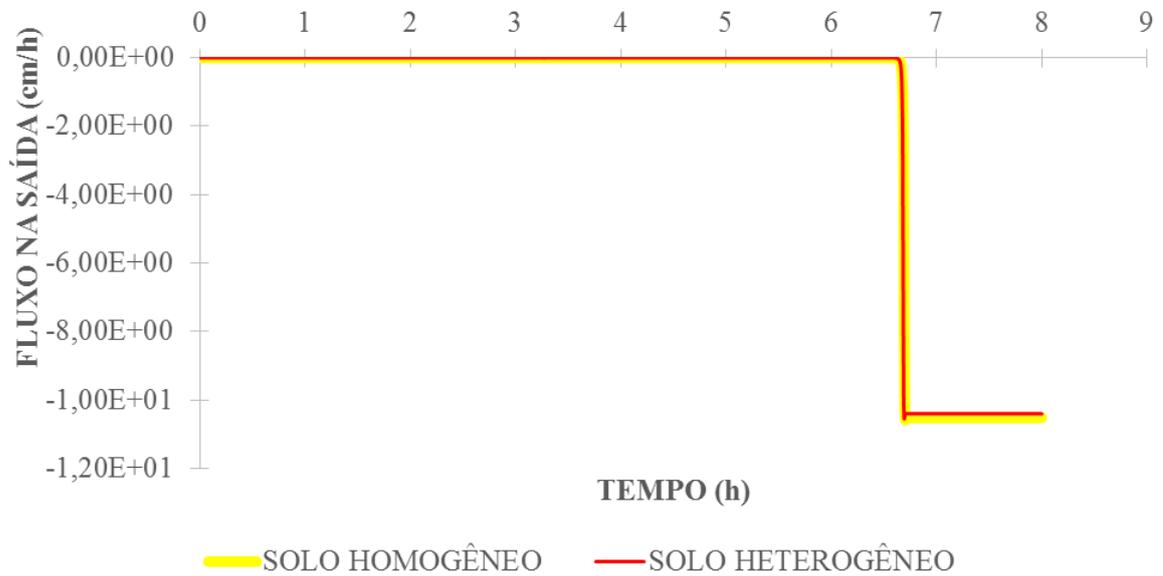
Curvas geradas para o cenário 4, onde foram adotadas as seguintes condições de contorno:

- Superior: carga hidráulica na superfície;
- Inferior: lençol freático.

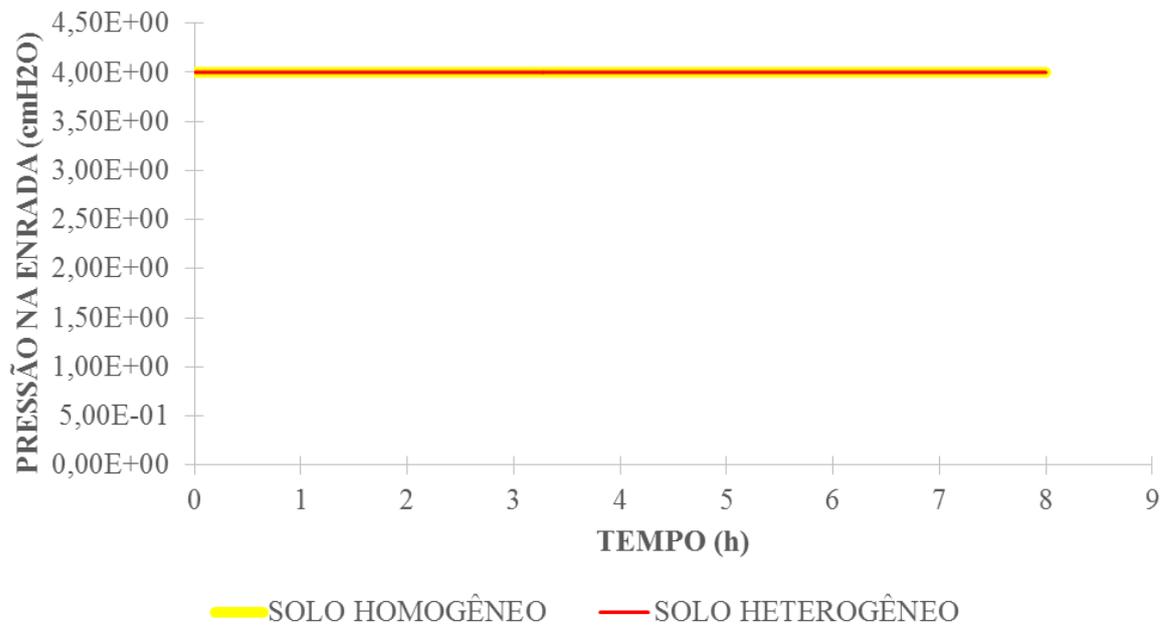
Fluxo na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.



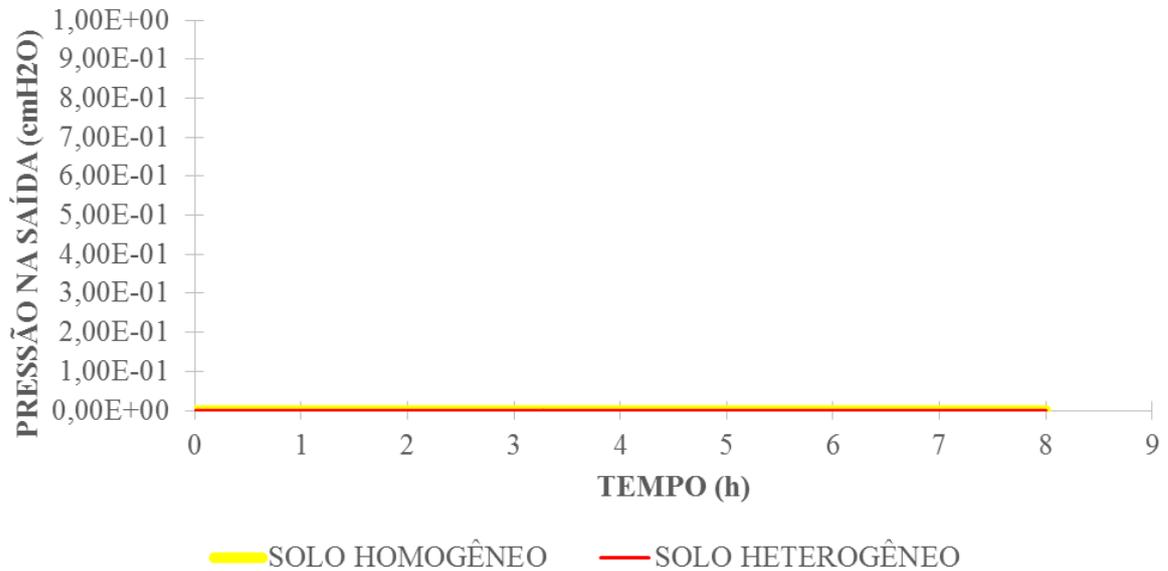
Fluxo na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.



Pressão na entrada do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.



Pressão na saída do pavimento, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.



Infiltração acumulada, em função do tempo, para subleitos homogêneo e heterogêneo, adotando camada hidráulica na superfície e lençol freático no subleito.

