



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELOS FÍSICOS DE AQUÍFERO EM ESCALA REDUZIDA PARA ESTIMATIVA DE
PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS EM LABORATÓRIO**

Tereza Cristina Ferreira Campos Morato Filpi

MONOGRAFIA nº 293

Ouro Preto, agosto de 2018

**MODELOS FÍSICOS DE AQUÍFERO EM ESCALA
REDUZIDA PARA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS
HIDRODINÂMICOS EM LABORATÓRIO**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe (interino)

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca

MONOGRAFIA

Nº 293

MODELOS FÍSICOS DE AQUÍFERO EM ESCALA REDUZIDA PARA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS EM LABORATÓRIO

Tereza Cristina Ferreira Campos Morato Filpi

Orientador

Prof.º Dr.º Paulo Galvão

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2018

OURO PRETO

2018

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Tereza Cristina Ferreira Campos Morato Filpi

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

Filpi, Tereza Cristina

Modelos físicos de aquífero em escala reduzida para estimativa de parâmetros hidrodinâmicos em laboratório/ Filpi, Tereza Cristina- Ouro Preto: UFOP: 2017/2

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

1. Hidrogeologia. 2. Modelos Físicos. 3. Modelagem Numérica. I. Galvão, Paulo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. III. Modelos físicos de aquífero em escala reduzida para estimativa de parâmetros hidrodinâmicos em laboratório

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Modelos Físicos de Aquífero em Escala Reduzida para Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos em Laboratório

AUTORA: TEREZA CRISTINA FERREIRA CAMPOS MORATO FILPI

ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria Sílvia C. Barbosa

Aprovada em: 22 de agosto de 2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão



DEGEO/UFOP

MSc. Ana Maciel de Carvalho



DEGEO/UFOP

Dra. Vanessa Almeida de Godoy



DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 22/08/2018

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto, à Escola de Minas e ao Departamento de Geologia pelo ensino gratuito e de qualidade. Aos professores do DEGEO, em especial ao Prof. Dr. Paulo Galvão por toda paciência e por tudo que me ensinou e ajudou durante todo tempo que trabalhamos juntos.

Agradeço a todos que me ajudaram na árdua tarefa de montar todos os modelos que foram estudados neste trabalho, em especial ao Caio e as Minas. Agradeço, por fim, a minha mãe, pela paciência e por todo apoio durante todo o meu tempo na faculdade; essa conquista é para ela.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	X
SUMÁRIO	xi
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	17
RESUMO.....	18
INTRODUÇÃO	23
1.1 APRESENTAÇÃO	23
1.2 OBJETIVOS	24
1.3 JUSTIFICATIVA	24
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. CONCEITO DE MODELO FÍSICO	25
2.2. CONCEITOS BÁSICOS EM HIDROGEOLOGIA	26
2.2.1 Águas Subterrâneas e sua origem	26
2.2.2 Tipos de Aquífero	29
2.2.3 Geologia da água subterrânea	30
2.2.4 Parâmetros atuantes no armazenamento das águas subterrâneas	31
2.2.5 Movimento das Águas Subterrâneas	32
METODOLOGIA	35
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
3.2 DEFINIÇÃO, CONSTRUÇÃO E EXECUÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS	35
3.3 PROJETO DE CONSTRUÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS	35
3.3.1 Modelo para cálculo de porosidade efetiva (ne)	35
3.3.2 Modelo da Lei de Darcy	37
3.3.3 Modelo de rede de fluxo	39
3.3.4 Modelo de aquífero	40
RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 MODELOS DE POROSIDADE TOTAL E EFETIVA	43
4.1.1 Modelo preenchido com areia média à grossa	43

4.1.2 Modelo preenchido com areia fina	44
4.2 MODELOS DE LEI DE DARCY	44
4.3 MODELO DE AQUÍFEROS	48
CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICES	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação do ciclo hidrológico da água em superfície e em subsuperfície (fonte: Fonte:<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>). 27

Figura 2.2 Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as zonas de umidade (modificado de Bear & Verreijt, 1987, retirado em Feitosa et al, 2008). 28

Figura 2.3 Tipos de aquíferos em que o aquífero A representa um aquífero não confinado (freático ou livre), o aquífero B representa um aquífero confinado, os números 3 e 4 representam aquíferos suspensos, o número representa a principal área de recarga do aquífero B, o número 5 representa um poço tubular surgente e os números 2 e 7 poços tubulares (retirado de Feitosa et al., 2008). 30

Figura 2.4 Aparato instrumental para ilustrar a Lei de Darcy, onde Q é a vazão do fluido, Δh é a diferença de altura atingida pelo fluido nos dois piezômetros, Δl é a distância entre os piezômetros, z_1 e z_2 é a distância de cada piezômetro da saída do fluido e θ o ângulo do piezômetro com a base do experimento(modificado de Freezy e Cherry, 1979). 32

Figura 2.5 Rede de fluxo de um aquífero em duas dimensões, em seção com corte vertical através de um sistema homogêneo, isotrópico, sobre uma camada impermeável (modificado de Freezy e Cherry, 1979). 34

Figura 3.1 Modelo de porosidade efetiva pronto; A- representa o modelo com areia de granulometria média, B- representa o modelo com areia de granulometria fina. Em ambas as figuras I-representa o funil de separação com as respectivas areias, II- Becker para coletar a água drenada por gravidade, III- algodão colocado para impedir que o sedimento escape do funil. 36

Figura 3.2 Modelo preenchido com areia de granulometria fina para representar a lei de Darcy. Em I- areia de granulometria fina, saturada em água; II- tubos de acrílico para representar os piezômetros; III- Becker com fundo furado, acoplado a mangueira de silicone, por onde é feita introdução de água no sistema; IV- tampa da garrafa, vedada, com mangueira de silicone acoplada por onde ocorre a saída de água do sistema. 38

Figura 3.3 Modelo preenchido com areia de granulometria média á grossa para representar a lei de Darcy. Em I- areia de granulometria média à grossa, saturada em água; II- tubos de acrílico para representar os piezômetros; III- Becker com fundo furado, acoplado a

mangueira de silicone, por onde é feita introdução de água no sistema; IV- tampa da garrafa, vedada, com mangueira de silicone acoplada por onde ocorre a saída de água do sistema. 39

Figura 3.4 Modelo de Rede de Fluxo elaborado. I- areia de granulometria média à grossa (mesmo intervalo granulométrico dos experimentos anteriores); II- tubos de acrílicos que representam piezômetros em meio homogêneo; III- Leito de Rio, representando a descarga; IV- lente de areia de granulometria grossa (intervalo granulométrico entre 1,4-2,17mm); V- lente de argila; VI- parte acoplada ao modelo, por onde é feita a entrada de água lateral no sistema através de furos de 6mm de diâmetro. 40

Figura 3.5 Projeto realizado no Corel Draw para o modelo do aquífero que foi montado. As laterais em azul indicam a entrada de água no modelo. Os poços em azul representam poços de monitoramento e piezômetros. Os poços em vermelho indicam locais para provável injeção de plumas de contaminação no modelo. As diferentes camadas de granulometrias variadas estão marcadas no desenho, assim como o local do lago e do rio. 41

Figura 3.6 Modelo de aquífero pronto. I: recarga de água, feita com mangueira de silicone, acoplada a uma torneira mantida em vazão constante; II: descarga de água, forjando um rio; III: Lago; IV: poços para representar piezômetros e poços de contaminantes 42

Figura 4.1 Modelo de Rede de Fluxo em execução. As linhas de fluxo estão marcadas na figura, sendo possível perceber a diferença no comportamento do fluxo no lado heterogêneo (a esquerda na figura) e no lado homogêneo (a direita na figura). Em linha tracejada temos as linhas equipotenciais 46

Figura 4.2 Modelo de Rede de Fluxo em execução com corante aplicado apenas através dos piezômetros. Em destaque em branco o fluxo descrito pelo corante em direção a drenagem ao sair dos poços, em preto temos o nível da água em cada piezômetro. 47

Figura 4.3 Modelo de aquífero em execução, estando a recarga de água constante. Em destaque é possível observar a linha piezométrica que se mantém constante, estando em maior cota no lago e diminuindo em direção ao rio. A recarga está sendo feita apenas pela lateral direita do modelo. 49

Figura 4.4 Modelo de aquífero em execução, estando a recarga de água constante. A sequência de figuras mostra a evolução do fluxo gerado pelo corante aplicado nos poços. 50

Figura A1.1 Material utilizado para experimento de aquisição da porosidade efetiva das frações de areia grossa e fina que serão posteriormente utilizadas nos outros modelos físicos. a)

Funil de Separação de 1000ml b) Funil de Separação no suporte c) Algodão colocado na base do funil d) Becker utilizado para coletar água durante o experimento, posicionada abaixo da montagem. 57

Figura A1.2 Ambos os modelos de porosidade preenchidos com areia de granulometria média e fina respectivamente. 58

Figura A1.3: Material utilizado para a construção de um dos modelos de Lei de Darcy. Foram construídos dois modelos de Lei de Darcy, sendo um preenchido por areia de granulometria média, segundo tabela 1.2 e o segundo preenchido por areia de granulometria fina, segundo tabela 1.2. 60

Figura A1.4: Montagem da primeira etapa da montagem do modelo de Lei de Darcy a) duas garrafas pets de 3000ml de volume b) pequenos cortes feitos na parte inferior da garrafa c) uniu-se as duas garrafas com uso de cola epóxi incolor d) união reforçada por fita vedarosca e) impermeabiliza-se a fita rosca com uso de cola de silicone incolor f) finaliza-se a união com fita isolante reforçada g) união finalizada entre as duas garrafas. 61

Figura A1.5: Tubo que irá representar o piezômetro no sistema do modelo de Lei de Darcy. Para impedir entrada de areia no mesmo, cola-se um pequeno pedaço de tecido. 62

Figura A1.6: Montagem do sistema que será utilizado para introduzir água ao modelo. a) Utiliza-se um Becker de plástico furado em sua base, no furo introduz-se um pedaço de mangueira de silicone, que é colada com cola epóxi incolor; b) após a cola seca, reforça-se com cola de silicone incolor, para impedir vazamentos de água; c) a outra ponta da mangueira será introduzida no furo de uma das tampas das garrafas pets, sendo em seguida, a ponta da mangueira revestida por um pedaço de tecido; d) aplica-se cola de silicone, na parte interna da tampa, com cuidado pois a tampa será rosqueada na garrafa novamente; e) antes de rosquear o sistema de entrada no modelo, aplica-se fita vedarosca na boca da garrafa; f) após fazer a conexão do sistema ao modelo, aplica-se cola de silicone para impedir vazamentos de água; g) sistema conectado ao modelo; h) sistema pronto antes de ser conectado ao modelo. 63

Figura A1.7: Forma que o sistema de saída da água do modelo foi feito. a) material utilizado para construção do mesmo; b) insere-se na tampa, já furada, uma das extremidades da mangueira de silicone recobrimo a mesma com um tecido em seguida; c) aplica-se cola de silicone transparente no interior da tampa para impedir vazamento de água; d) sistema pronto antes de ser conectado ao modelo; e) após cobrir a boca da garrafa pet com fita vedarosca, coloca-se a tampa com a mangueira conectada e aplica-se cola silicone incolor para impedir vazamentos; f) sistema conectado a boca de saída da água do modelo. 64

Figura A1.8: Forma como é introduzido o tubo que representa os piezômetros no sistema: a e b) com auxílio de estilete, cria-se dois cortes em X na garrafa, com distância entre 10 e 15 cm; c e d) introduz-se os dois tubos nos furos e piga-se uma gota de cola instantânea apenas no contato do tubo com a garrafa; e) aplica-se cola de silicone ao redor para que não ocorra vazamentos de água. Aguarda-se 24h para secagem completa. 65

Figura A1.9: Modelo preenchido com areia fina. I) ambas as garrafas pets coladas; II) tubos de acrílico representando os piezômetros; III) Becker em que é feita a entrada de água no sistema; IV) saída de do modelo. 66

Figura A2.0: Modelo preenchido com areia média. I) ambas as garrafas pets coladas; II) tubos de acrílico representando os piezômetros; III) Becker em que é feita a entrada de água no sistema; IV) saída de do modelo. 66

Figura A2.1: Modelo físico para visualização da rede de fluxo. O lado A foi preenchido com areia de granulometria média junto com uma lente de argila (D) e uma lente de areia grossa (E) formando o lado heterogêneo do modelo. O lado B foi preenchido com areia de granulometria média e possui dois piezômetros (C). F representa o rio do modelo. 67

Figura A2.2: Projeto utilizado como base para preenchimento do modelo de aquífero. Os poços em azul representam os piezômetros e os poços em vermelho serão os utilizados para introdução de corante no sistema, representando contaminantes. 68

Figura A2.3: Modelo de aquífero pronto. I: recarga de água, feita com mangueira de silicone, acoplada a uma torneira mantida em vazão constante; II: descarga de água, forjando um rio; III: Lago; IV: poços para representar piezômetros e poços de contaminantes. 69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Tabela de classificação das peneiras utilizadas em ensaios granulométricos e suas aberturas em mm segundo ABNT 2003. 37

Tabela 3.2 Tabela com os limites de fração do solo pelo tamanho dos grãos, segundo ABNT 2003**Erro!** **Indicador** **não definido.**

RESUMO

Existe certa dificuldade dos alunos, tanto na graduação quanto na pós-graduação, em compreender conceitos sobre o comportamento hidráulico e o funcionamento dos mais variados tipos de aquíferos. Devido à complexidade que existe para analisar tal comportamento do aquífero em campo via poços de monitoramento, bem como a logística que envolve essas atividades, uma alternativa viável é o uso de modelos físicos em escala reduzida, ajudando na melhor compreensão hidrogeológica e de sua interação com a água superficial. Este tipo de técnica é comum nas engenharias civil, mecânica, hidráulica, dentre outros cursos, bem como em universidades estrangeiras, como nas universidades de Waterloo, no Canadá, e de Nebraska, nos EUA. Assim, o objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é desenvolver modelos físicos em escala reduzida para, além de demonstrar de forma prática os fenômenos hidráulicos mais importantes, também calcular e estimar parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos em

laboratório. Desta forma, foram confeccionados quatro modelos físicos, levando em consideração os modelos teóricos mais clássicos: 1) modelo de porosidades total e efetiva; 2) modelo baseado no experimento da Lei de Darcy; 3) modelo de rede de fluxo da água subterrânea; e 4) modelo de tipos de aquíferos. Seguindo a ordem dos modelos (do mais simples ao mais complexo), ao chegar-se no mais complexo, que retrata dois tipos de aquíferos diferentes, a tentativa seria ter controle sobre a maioria dos parâmetros hidráulicos já previamente calculados nos modelos anteriores, ao pretender-se detectar e eliminar qualquer erro durante a execução. Os resultados vistos nos modelos foram os esperados, conforme as teorias clássicas propõem. Foi possível estimar parâmetros hidráulicos, como porosidades e condutividades hidráulicas, entender o comportamento das linhas de fluxo e suas equipotenciais, a relação entre níveis piezométricos, cotas da descarga e recarga, e o que a heterogeneidade gera no comportamento das águas subterrâneas. Por essas razões e baixos custos de construção, os modelos foram considerados como uma ferramenta didática para serem usados na transmissão de conceitos hidrogeológicos aos mais diferentes públicos.

Palavras chave: modelos teóricos, modelos físicos, parâmetros hidrogeológicos.

1.1 APRESENTAÇÃO

Devido à certa escassez ou baixa qualidade das águas superficiais, o recurso hídrico subterrâneo torna-se vital, sendo de fundamental importância o desenvolvimento de modelos que possam auxiliar no conhecimento geral e que simulem situações reais, possibilitando o planejamento e a gestão destes recursos (CETESB, 2004).

Entende-se por modelo a reprodução abstrata, conceitual, gráfica ou visual de algumas ou todas as características físicas de um comportamento natural em escala adequada (Wendland & Rüber, 1998). O modelo pode ser: *físico*, representando o sistema por meio de um protótipo em escala menor; *analógico*, baseando-se na analogia de diferentes processos físicos; e *matemático*, que irá representar a natureza via equações matemáticas.

Além dessa classificação geral, pode-se classificar os modelos em: *conceitual e empírico*, que consiste no conjunto de suposições que mesclam valores calculados com dados observados na natureza e estabelecem regras para a relação entre eles; *estocástico*, que leva em conta variedades e probabilidades de eventos aleatórios; e *determinístico*, que são modelos que se baseiam em determinações e se subdividem em duas categorias: *analítico*, utilizado para problemas específicos de geometria simples, com parâmetros homogêneos e relações lineares e *numérico*, usado na solução de problemas gerais, independentemente de sua complexidade geométrica e de seus parâmetros físicos (Freezy e Cherry, 1979; Feitosa et al., 2008).

Todos os tipos de modelos podem ser usados para representar situações hidrogeológicas reais, bem como situações fictícias criadas apenas para que se entenda melhor o comportamento hidráulico dos mais variados tipos de aquíferos. Outra possível aplicação desses modelos é no auxílio de alunos de graduação e pós-graduação a compreender de forma mais clara conceitos de hidrogeologia. Nesses casos, modelos físicos em escala reduzida representando situações hidrogeológicas são os mais indicados para aulas e trabalhos práticos, facilitando a compreensão de conceitos teóricos, bem como tornando o estudo mais participativo, sendo uma alternativa interessante para ser adotado em diversas instituições de ensino.

Apesar de os modelos físicos hidrogeológicos serem pouco difundidos nas universidades de Geologia e Engenharia Geológica no Brasil, é sabido que universidades estrangeiras, como a Universidade de Waterloo, no Canadá, de Nebraska nos EUA e Universidade de Lisboa, em Portugal, os utilizam com mais frequência, a fim de ajudar no

entendimento de conceitos que são melhor compreendidos ao serem observados em ação, fora dos livros teóricos. A partir do uso de modelos hidrogeológicos, é possível prever direções preferenciais de fluxo de água subterrânea, analisar alternativas de locação de postos (Cleary, 2007) e dar suporte no planejamento e previsões de situações reais (Feitosa et al., 2008). No entanto, é preciso sempre lembrar que a modelagem é uma representação simplificada de uma realidade mais complexa, possuindo desvantagens, como a simplificação, aproximação e generalização dos processos e parâmetros físicos, além de exigir que se tenha certa familiaridade com os conceitos empregados no modelo conhecendo também as limitações da modelação.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi o desenvolvimento de modelos físicos em escala reduzida simulando várias condições hidrogeológicas a fim de melhor compreender com detalhes os comportamentos hidráulicos do aquífero e suas particularidades, como rede de fluxo, parâmetros hidrodinâmicos e recarga e descarga do aquífero.

Os objetivos específicos são: 1) compreender melhor a dinâmica da água subterrânea de maneira geral; 2) calcular parâmetros hidrodinâmicos (permeabilidade, condutividade hidráulica, transmissividade, porosidade efetiva) de aquíferos porosos; e 3) desenvolver os modelos físicos e estimar os dados em laboratório para comparação com os dados teóricos.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de modelos físicos em menor escala pode representar de forma prática o comportamento e o funcionamento hidráulico da água em subsuperfície, facilitando a compreensão dos fenômenos hidrogeológicos, bem como o cálculo de parâmetros hidrogeológicos a partir da visualização em seção transversal do aquífero dentro da sala de aula ou em laboratório. Tal abordagem na hidrogeologia é pouco usada atualmente nos cursos de Engenharia Geológica ou Geologia no país.

Os modelos físicos confeccionados são de baixo custo e de fácil montagem e reprodução, podendo ser replicados em outras instituições de ensino. Na área acadêmica, podem servir como elementos de ensino e compreensão do comportamento efetivo da água no subsolo, bem como sua interação com a água superficial. Fora da área acadêmica, este tipo de modelo pode auxiliar no melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos, além de detalhar melhor os modelos conceituais já existentes em cada área.

2.1. CONCEITO DE MODELO

Segundo Tucci (1998), modelo é a “representação de algum objeto ou sistema, em uma linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com objetivo de entendê-los e buscar suas principais respostas para diferentes entradas”. E modelo hidrológico, definido por Maidment (1993), é a representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Dessa forma, a modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico e suas variáveis e processos físicos envolvidos.

Segundo Lobo Ferreira (1998), os modelos podem ser divididos em três grandes grupos: os *icônicos*, que representam a realidade a partir das suas propriedades mais relevantes a uma escala diferente e se assemelham a um protótipo; os *analógicos*, que utilizam um conjunto de propriedade para representar algo; e os *simbólicos*, mais conhecidos como modelos matemáticos ou numéricos (LNEC, 2013).

Para a montagem de um modelo hidrogeológico, deve-se levar em consideração alguns pontos: qual o problema que será representado, qual o objetivo e quais respostas deseja-se alcançar, se o modelo é realmente necessário, se há dados para montagem e execução do modelo, se é possível verificar os resultado que o modelo irá fornecer, quais os processos hidrogeológicos serão considerados (escoamento, transporte de calor e gás, escoamento multifásico, transporte de vários elementos com reações químicas etc.). Além disso, todos os tipos de modelos estão sujeitos a limitações, tendo vantagens e desvantagens ao longo do processo, que serão afetados de acordo com o problema que levou a construção do modelo, assim como o tipo de modelo optado para a montagem.

Modelos físicos podem ter várias utilizações, como realizar análises diretas devido a não ser possível a investigação em campo, complementar as informações que tenham sido coletadas em campo e formular cenários para simulações, a fim de observar o efeito de diferentes situações existentes e possíveis (LNEC, 2013).

Sendo assim, a modelagem pode ser dividida em etapas: inicia-se com a suposição e/ou escolha do problema físico a ser tratado, cria-se o modelo conceitual simples deste problema e, em seguida, coleta-se os dados necessários que serão utilizados (campo, laboratório etc.) e, então, se escolhe o tipo de modelo que será construído. Com os modelos já prontos, faz-se as interpretações dos resultados.

Para a construção dos modelos físicos, propõe-se o uso de materiais que sejam facilmente adquiríveis e que permitam o controle e manipulação das variáveis que afetam o sistema, na tentativa de que os modelos possam ser explorados de uma forma análoga aos processos naturais e permitam simular processos atuais e futuros, além de permitirem a exploração de alternativas para problemas que possam existir, na tentativa de auxiliar na gestão de recursos da área de estudo (LNEC, 2013).

Os modelos em escalas reduzidas, de fácil construção, podem ser explorados no ensino universitário em aulas laboratoriais de hidrogeologia, na transmissão de um processo hidrogeológico ao público ou utilizado por gestores para exemplificar medidas que podem ser tomadas quanto a gestão de recursos hídricos de uma área. Devem, portanto, ser didáticos e permitir uma boa visualização e compreensão do sistema de circulação das águas subterrâneas e da migração de poluentes. Já os modelos em maior escala, geralmente mais complexos, podem ser utilizados em laboratórios de investigação para estudos de situações reais como forma de compreender e calibrar modelos numéricos e para simular processos de escoamento e de transporte de poluentes no intuito de minimizar a contaminação de certa área (LNEC, 2013)

2.2. CONCEITOS BÁSICOS EM HIDROGEOLOGIA

2.2.1 Águas Subterrâneas e sua origem

Toda a água subterrânea que existe em nosso planeta teve sua origem relacionada ao ciclo hidrológico, ou seja, ao sistema em que a natureza faz com que a água circule dos oceanos e da atmosfera para o continente, onde, em seguida, ela retornará para os oceanos de maneira superficial e subterrânea. Tal sistema (Figura 2.1) é governado em solo e subsolo pelo tipo e densidade da cobertura vegetal e na atmosfera e superfícies líquidas por elementos e fatores climáticos, como umidade relativa do ar e temperatura (Feitosa et al., 2008).

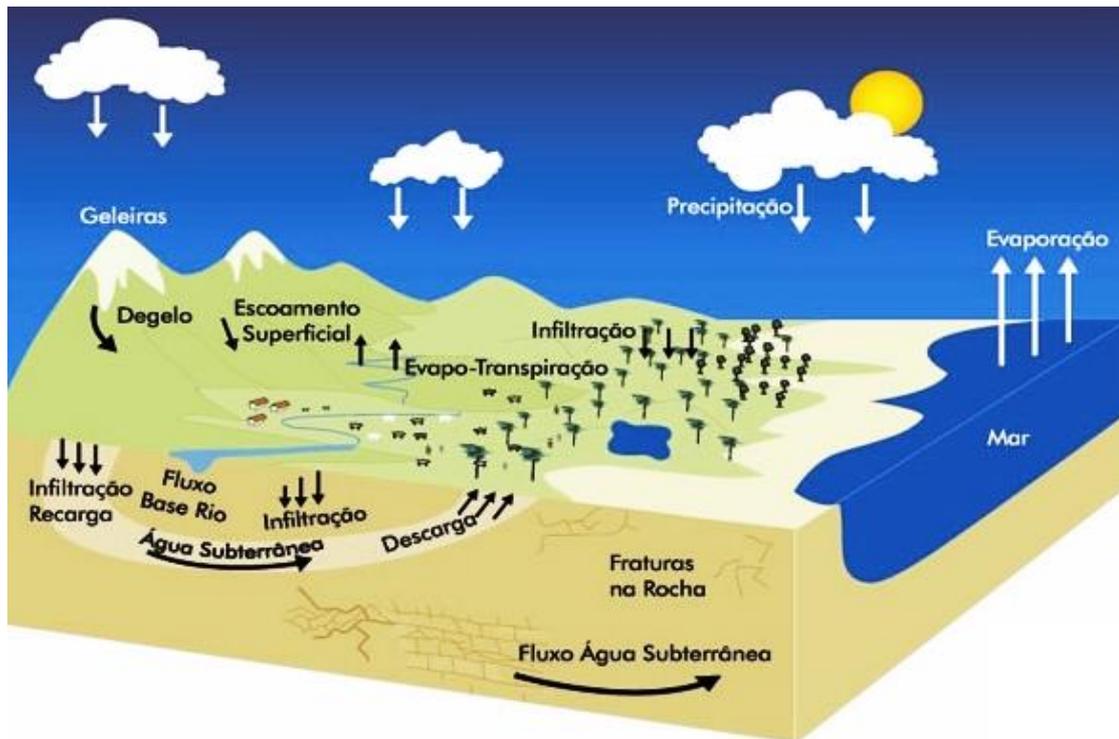


Figura 2.1 Representação do ciclo hidrológico da água em superfície e em subsuperfície (Fonte: <http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>).

Ao entrar na porção subterrânea do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida em duas zonas horizontais (Figura 2.2): *saturada* e *não saturada* (ou de *aeração*), que são determinadas de acordo com a proporção relativa de espaço poroso que a água ocupa. A *zona saturada* (*zona de saturação*) possui todos os vazios porosos preenchidos com água e está situada logo abaixo do nível freático, este definido como lugar geométrico onde a água se encontra sob pressão atmosférica. *Zona não saturada* (*zona de aeração* ou *zona vadosa*) possui poros parcialmente preenchidos por gases, principalmente vapor d'água e situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno (Feitosa et al., 2008).

Esta zona se subdivide em três outras zonas: 1) *capilar*, que se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água, de espessura variada, dependente principalmente do tamanho dos poros e da homogeneidade do terreno, em que, nas proximidades da superfície freática, pode vir a encontrar-se quase saturada, enquanto que nas partes mais distantes da superfície freática possui apenas seus poros menores preenchidos por água; 2) *intermediária*, compreendida entre o limite da ascensão capilar e o limite do alcance das raízes das plantas; 3) *de água do solo* (*de evapotranspiração*), possuindo espessura variada por se encontrar entre os extremos radiculares e o limite do terreno, é a zona utilizada pelas plantas para as funções de nutrição e transpiração, com os poros parcialmente preenchidos por água capilar isolada ou suspensa (Feitosa et al., 2008).

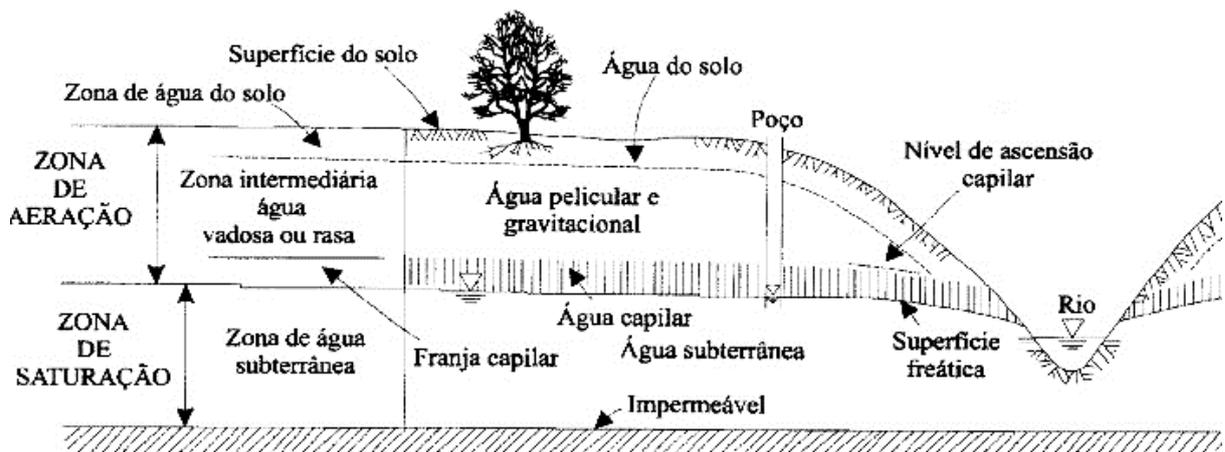


Figura 2.2 Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as zonas de umidade (modificado de Bear & Verreijt, 1987, retirado em Feitosa et al, 2008).

Ao se fazer o estudo da água no solo em laboratório, é possível analisar e quantificar o teor de umidade que é retido no solo. A razão pela qual a água é retida no solo pode estar ligada a três forças distintas: 1) *de atração elétrica*; 2) *capilar*; e 3) *gravitacional*. A *força de atração elétrica* pode existir sob duas formas: 1) água higroscópica que gera porções isoladas adsorvidas pela superfície dos grãos dos sólidos e é recuperada apenas pela forma de vapor; e 2) água pelicular que forma uma película sobre a superfície dos grãos e sobre a água higroscópica e pode ser desprendida por centrifugação. Tais tipos de água não geram interesse hidrogeológicos por não se moverem por ação da gravidade e por não serem extraídas por meio de bombeamento (Feitosa et al, 2008).

Apesar de toda a água situada abaixo da superfície terrestre ser evidentemente subterrânea, em hidrogeologia, é denominado água subterrânea apenas a água que circula na zona saturada, ou seja, abaixo da superfície freática. Tendo esta informação como base, é denominado *aquífero* uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas desta água se movimentem em seu interior em condições naturais. *Aquicludo* será a formação que contém água, porém é incapaz de transmiti-la sob condições naturais. *Aquitardo* é uma camada ou formação semipermeável, delimitada em topo e/ou base por uma camada de maior permeabilidade; logo, é uma camada onde é possível a ocorrência de drenança ou filtração vertical. Por fim, *aquífgos* são as formações impermeáveis onde não é possível o armazenamento ou transmissão da água (Cleary, 2007).

2.2.2 Tipos de Aquífero

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com a pressão das águas em suas superfícies limítrofes, bem como em função da sua capacidade de transmissão de água (Figura 2.3) (Feitosa et al., 2008).

O *aquífero confinado*, ou sob pressão, é o aquífero no qual a pressão da água no topo é maior que a pressão atmosférica. Subdivide-se em dois tipos: aquífero confinado não drenante e confinado drenante. Aquífero confinado não drenante é um aquífero cujas camadas limítrofes, superior e inferior, são impermeáveis. Nestes casos, o nível da água subterrânea fica acima da base da camada confinante superior, sendo que esta superfície pode estar abaixo ou acima do nível do solo. Caso a superfície esteja acima do solo, o poço tubular perfurado recebe o nome de jorrante ou surgente. Um aquífero confinado drenante é aquele no qual uma das camadas limítrofes é semipermeável, o que permite a entrada ou a saída de fluxos pelo topo ou pela base a partir de drenança ascendente ou descendente (Feitosa et al., 2008).

Aquífero livre, conhecido também como freático ou não confinado, é aquele cujo limite superior é uma superfície freática, onde os poros se encontram apenas sob pressão atmosférica. Os aquíferos livres podem atuar como área de recarga em aquíferos confinados, pois a infiltração de água da chuva gera excessos de água nos mesmos. Assim como os aquíferos confinados, os aquíferos livres também podem ser classificados como drenantes, quando possuem base semipermeável, ou não drenantes, quando possuem base impermeável (Feitosa et al. 2008).

Aquífero suspenso é um caso especial de aquífero livre que se forma sobre uma camada impermeável ou semipermeável que possui extensão limitada e situa-se entre uma zona freática regional e o nível do terreno. Dessa forma, estes aquíferos podem existir em caráter temporário, à medida que a água dos poros é drenada para um freático adjacente (Feitosa et al., 2008).

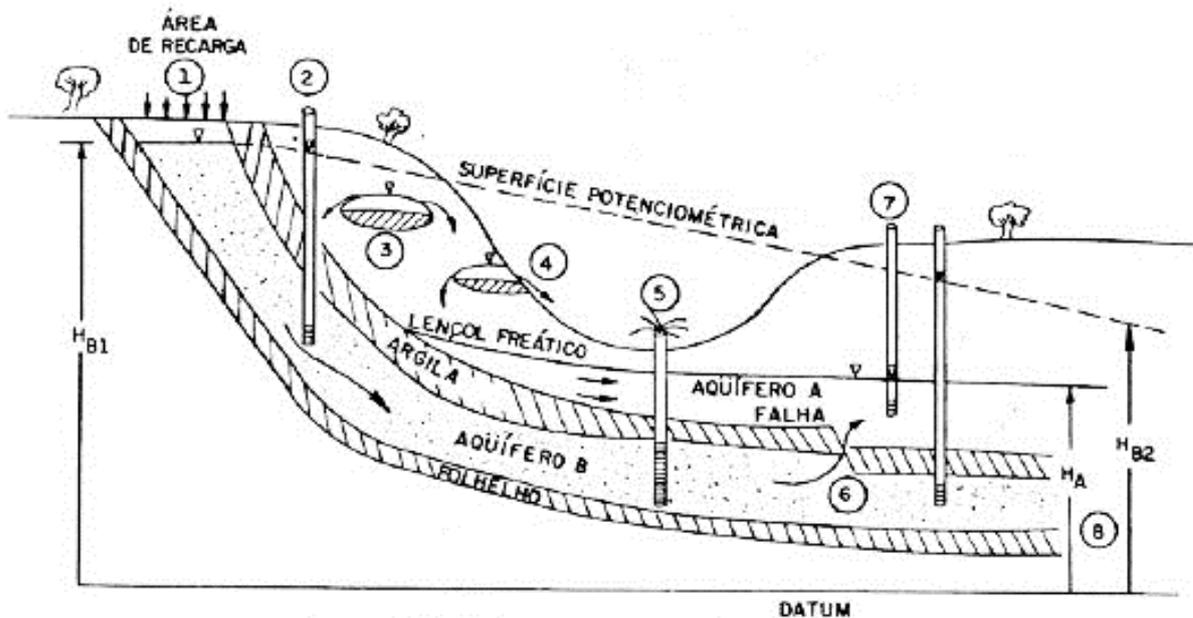


Figura 2.3 Tipos de aquíferos em que o aquífero A representa um aquífero não confinado (freático ou livre), o aquífero B representa um aquífero confinado, os números 3 e 4 representam aquíferos suspensos, o número 1 representa a principal área de recarga do aquífero B, o número 5 representa um poço tubular surgente e os números 2 e 7 poços tubulares (retirado de Feitosa et al., 2008).

2.2.3 Geologia da água subterrânea

A geologia local influencia diretamente os aquíferos de uma região, condicionando as formas de recarga, de estocagem, de circulação e de descarga, além de influenciar a qualidade das águas subterrâneas e determinar as formas de captação destas águas e os materiais que serão utilizados para revestimentos de poços, filtros e outros (Feitosa et al., 2008).

A ocorrência de água subterrânea em sedimentos inconsolidados é vantajosa para o aproveitamento desta por ter facilidade para perfuração de poços, por apresentar, na maioria das vezes, os níveis de água pouco profundos e por frequentemente estar ligada a locais de favorável recarga a partir de rios, lagoas e até mesmo água de chuva, já que, por serem pouco consolidados, estes depósitos possuem alta capacidade de infiltração e uma maior porosidade efetiva e permeabilidade (Feitosa et al., 2008).

No caso de ocorrência em sedimentos já consolidados, as rochas mais importantes como aquíferos são as que apresentam boa ou regular permeabilidade. Dessa forma, rochas com baixa capacidade de transmissão de água, como arenitos argilosos e siltitos, irão se comportar como aquitardes, enquanto que folhelhos e argilitos, por serem impermeáveis, são classificados como aquiocludes (Feitosa et al., 2008).

2.2.4 Condições de Contorno

Os contornos mais comuns usados na modelagem de águas subterrâneas são: divisores de água na bacia, que representam linhas de fluxo divergentes; vales, que representam linhas de fluxo convergente; corpos de água de grande volume, como oceano, lagoas e rios que possuam carga hidráulica conhecida; contornos geológicos e contato de rochas impermeável ou falhas; e condição de fluxo nula (Wels et al., 2012).

2.2.5 Parâmetros atuantes no armazenamento das águas subterrâneas

Porosidade (η), também chamada de porosidade volumétrica ou porosidade total, é dada pela seguinte equação: $\eta = \frac{V_v}{V_T}$, onde V_v é o volume de vazios e V_T é o volume total de um solo ou rocha. De acordo com os tipos de rochas ou solos, existem três tipos de porosidades: 1) *primária*, condicionada pela existência de vazios inerentes à matriz da rocha ou solo, também conhecida como porosidade intersticial ou intragranular, que possui dimensões milimétricas, mas que, por ocorrerem em grande quantidade, se tornam importantes em área no aquífero; 2) *secundária*, que é produzida por fenômenos posteriores que atuaram no solo ou rocha, também conhecidas como fissuras, fraturas, falhas e outras formas de rachaduras em rochas cristalinas; e 3) *terciária*, que ocorre no meio cárstico, onde os vazios ocupados pela porosidade primária ou secundária são aumentados por dissolução ocasionada pela própria água acidificada em rochas mais solúveis, como, por exemplo, calcários ou dolomitos (Feitosa et al., 2008).

Porosidade efetiva (η_e) é a razão entre volume de água liberado pelos vazios da rocha a partir de forças gravitacionais atuantes (V_g) e o volume total da rocha (V_T), podendo ser descrita pela equação $\eta_e = \frac{V_g}{V_T}$. Ainda ocorre a retenção de parte da água de saturação dos vazios na superfície dos grãos, devido a força de atração molecular ser mais forte que a força gravitacional, sendo conhecida como *retenção específica* (S_r). A soma de S_r e de η_e é igual a porosidade total da rocha, ou seja, $\eta = \eta_e + S_r$.

Coefficiente de armazenamento (S) em aquíferos confinados é dado pelo volume de água liberado por um prisma de seção unitária e altura igual à espessura do aquífero, sob o efeito de uma variação unitária do nível potenciométrico, geralmente varia da faixa de 10^{-5} a 10^{-3} . Já em aquíferos livres é representado pela porosidade efetiva ou pela produção específica com valor oscilando entre 2 e 30% (Feitosa et al. 2008).

Condutividade hidráulica (K) leva em consideração as características do meio (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas e as características do fluido

de escoamento (viscosidade e massa específica). Em meio isotrópico pode-se ter K numericamente igual à vazão do fluido que atravessa a área. Pode ser escrita como sendo $K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{\sigma}$, em que K é a condutividade hidráulica, k é a permeabilidade do meio, ρ é a massa específica do fluido, g é a aceleração da gravidade, μ é a viscosidade dinâmica (absoluta) e σ é a viscosidade cinemática ($\frac{\mu}{\rho}$) (Feitosa et al. 2008).

A *transmissividade* (T) é a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero, ou seja, é a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero de largura conhecida e submetido a um gradiente hidráulico também conhecido. Em aquíferos confinados, pode ser dada como $T = K \cdot b$, onde T é a transmissividade, K a condutividade hidráulica e b a espessura do aquífero (Feitosa et al. 2008).

2.2.5 Movimento das Águas Subterrâneas

Lei de Darcy

Henry Darcy, em 1856, desenvolveu um experimento de laboratório para analisar o fluxo de água através das areias (Figura 2.4). Os resultados deste experimento foram generalizados na postulação da Lei de Darcy (Freezy e Cherry, 1979).

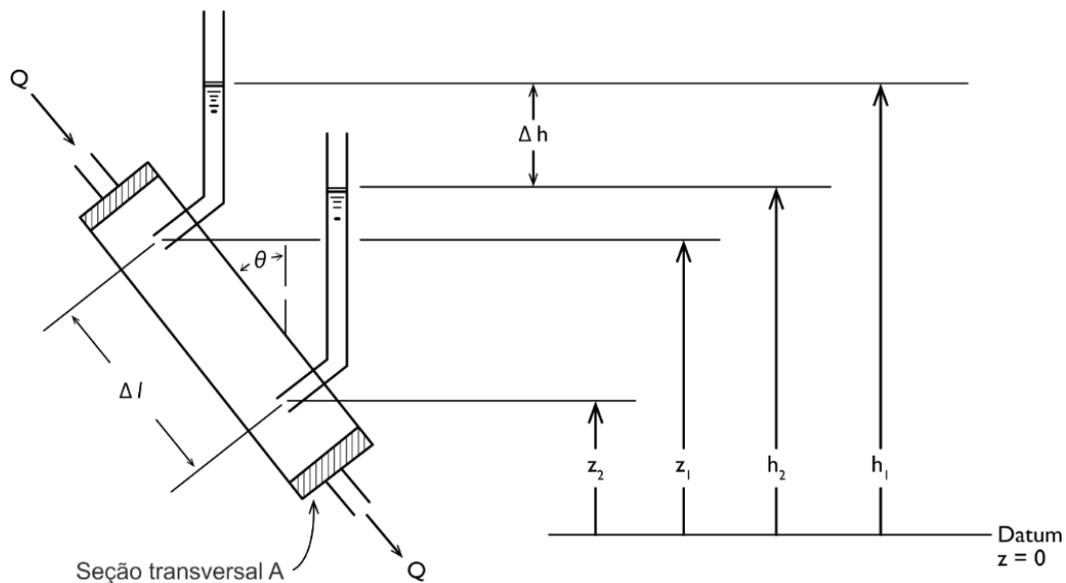


Figura 2.4 Aparato instrumental para ilustrar a Lei de Darcy, onde Q é a vazão do fluido, Δh é a diferença de altura atingida pelo fluido nos dois piezômetros, Δl é a distância entre os piezômetros, z_1 e z_2 é a distância de cada piezômetro da saída do fluido e θ o ângulo do piezômetro com a base do experimento (Freezy & Cherry, 1979)

Considerando que um cilindro experimental de seção transversal A é preenchido com areia e tamponado em cada extremidade e equipado com tubos de entrada e saída e um par de

manômetros. A água deve ser introduzida no sistema e fluir através dele, de forma que todos os poros estejam preenchidos por água e que a vazão de entrada do fluxo Q seja igual à vazão de saída. Ao definir-se um datum $z=0$, as elevações de entrada nos manômetros serão dadas por z_1 e z_2 e as respectivas alturas do fluido nos mesmos serão h_1 e h_2 . A distância entre os manômetros será de Δl . A velocidade da vazão específica através do cilindro será dada pela equação abaixo:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Se têm as dimensões de $Q=L^3/T$ e as de $A=L^2$, v terá as dimensões dadas em L/T (Freezy e Cherry, 1979)

Em suas experiências, Darcy constatou que v é diretamente proporcional à h_1-h_2 , se têm-se um Δl constante. Caso tenha-se h_1-h_2 constante têm-se v inversamente proporcional a Δl . Dessa forma, têm-se $v \propto \Delta h$ e $v \propto 1/\Delta h$. Sendo assim, a Lei de Darcy pode ser escrita da seguinte forma:

$$v = -K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Na equação acima, h é chamado de carga hidráulica e sua forma diferencial (dh/dl) será o gradiente hidráulico. K é uma constante de proporcionalidade que deve ser a propriedade do solo que compões o cilindro, ao se manter o gradiente hidráulico constante, a vazão específica será maior para alguns solos que para outros, dessa forma, teremos $v \propto K$. Esta constante é conhecida como condutividade hidráulica e costuma ter valores altos para areia e cascalho e baixos para argila e para maioria das rochas. Sua dimensão é dada em termos de L/T e está relacionada ao meio e ao fluido que passa através do meio (Freezy e Cherry, 1979).

Uma segunda forma de se escrever a Lei de Darcy é dada por:

$$Q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} A$$

Ao substituir $dh/dl=i$ (gradiente hidráulico), a equação será dada por $Q= -KiA$.

A Lei de Darcy é válida para fluxo de água subterrânea em qualquer direção no espaço. Voltando na Figura 2.4, caso tenha-se o gradiente hidráulico e a condutividade hidráulica constante, v não depende do ângulo θ , sendo verdadeiro até para valores de $\theta > 90^\circ$, quando o fluxo está sendo forçado contra a gravidade através do cilindro (Freezy e Cherry, 1979).

A Lei de Darcy não é importante apenas para análise do fluxo de água subterrânea, como também possui aplicação para muitos outros fluxos em meio poroso, como o fluxo de umidade

em solo, usado por físicos de solo, engenheiros agrônômicos e especialistas em mecânicas de solos. Também é usada na descrição do fluxo de petróleo e gás em formações geológicas profundas e é usada por analistas de reservatório de petróleo. É ainda utilizada na concepção de filtros pelos engenheiros químicos, na concepção de cerâmicas porosas por cientistas de materiais e por biocientistas para descrever o escoamento de fluídos corporais através dos poros da pele (Freezy e Cherry, 1979).

Rede de fluxo

Em estudos bidimensionais, para melhor visualização e entendimento do escoamento subterrâneo, costuma-se traçar redes de fluxo para mostrar a direção e o sentido da velocidade ao longo da região analisada. Dessa forma, as redes de fluxo são utilizadas para dar uma ideia do escoamento no meio poroso (Figura 2.5). Além disso, é possível traçar o vetor velocidade em vários pontos de um desenho de uma determinada área e, então, traçar um vetor proporcional, de forma que, ao se fazer as redes de fluxo em computadores, seja possível obter o módulo, direção e sentido do vetor velocidade de um fluxo (Feitosa et al., 2008).

Também é preciso entender o que representam as *linhas de fluxo*, *linhas equipotenciais* e *tubo de fluxo* (Figura 2.5). As *linhas de fluxo* são linhas imaginárias do caminho percorrido por uma partícula no aquífero, resultado da união de vários vetores de fluxo. As *linhas equipotenciais* representam linhas imaginárias de mesma carga hidráulica, sendo sempre ortogonais às linhas de fluxo e seu deslocamento ocorre da linha equipotencial de maior valor para a de menor valor. Por fim, o *tubo de fluxo* é o volume/área compreendido entre duas linhas de fluxo.

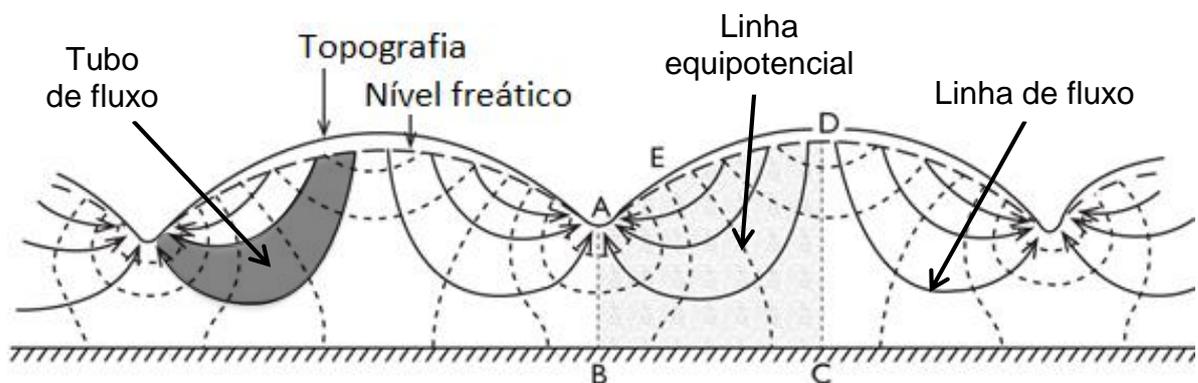


Figura 2.5 Rede de fluxo de um aquífero em duas dimensões, em seção com corte vertical através de um sistema homogêneo, isotrópico, sobre uma camada impermeável (modificado de Freezy e Cherry, 1979).

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

As principais bases de consulta bibliográfica foram os livros “Hidrogeologia: conceitos e aplicações” (Feitosa et al., 2008), “Groundwater” (Freezy e Cherry, 1979) e “Águas Subterrâneas” (Cleary, 1989). Também foi realizada a análise de trabalhos anteriores sobre o uso e construção de modelos físicos em hidrogeologia e em outras áreas, como Hidrologia básica e Engenharia Civil. Para melhor compreensão dos modelos, foram revistos conceitos de hidrogeologia, que auxiliaram na montagem dos modelos físicos.

3.2 DEFINIÇÃO, CONSTRUÇÃO E EXECUÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS

Definiu-se a construção de quatro modelos físicos. Foram eles: 1) modelo para cálculo da porosidade efetiva de dois intervalos granulométricos específicos de areia; 2) modelo para demonstração e cálculo dos parâmetros existentes na Lei de Darcy; 3) modelo do comportamento da rede de fluxo em aquíferos livres homogêneos e heterogêneos; e 4) modelo do comportamento de diferentes tipos de aquíferos (livre e confinado) em um mesmo terreno e suas relações com a água superficial, demonstrando também áreas de recargas e descargas, e plumas de contaminação.

3.3 PROJETO DE CONSTRUÇÃO DOS MODELOS FÍSICOS

3.3.1 Modelo para cálculo de porosidade efetiva (n_e)

A porosidade efetiva é a relação entre volume total de espaços vazios interconectados (drenado por gravidade, V_d) e o volume total (V_t) de uma rocha ou sedimento ($n = V_d/V_t$), geralmente, relatada em fração decimal ou porcentagem (Freezy e Cherry, 1979). A partir dessa premissa, utilizou-se dois funis de separação com capacidade de 1000 ml e um suporte para cada um dos funis. Em cada um deles, colocou-se um algodão, a fim de se evitar que ocorra escape do sedimento pela base do funil. Utilizou-se, também, um Becker para cada montagem, para coletar a água drenada (Figura 3.1) (para mais detalhes, ver Apêndice A).

Para o modelo de porosidade efetiva com areia grossa, utilizou-se areia retida nas peneiras #14, #16 e #20, conforme classificação da Tabela 1.1. Para o modelo realizado com

areia fina, utilizou-se a areia retida nas peneiras #65, #115, #150 (Tabela 1.1). Para classificação das areias em grossa e fina, seguiu-se a tabela granulométrica da ABNT (Tabela 1.2). Estas granulometrias de areia foram adotadas nos outros modelos.

Ambos os funis de separação foram preenchidos completamente com suas respectivas granulometrias de areias, no caso, 100% secas. Em seguida, acrescentou-se água no modelo até a completa saturação das areias. Após a saturação, foi aberta a torneira inferior e verificou-se, no Becker, a quantidade de água drenada por gravidade, calculando-se, assim, o valor das porosidades total e efetiva dos dois intervalos de areia.

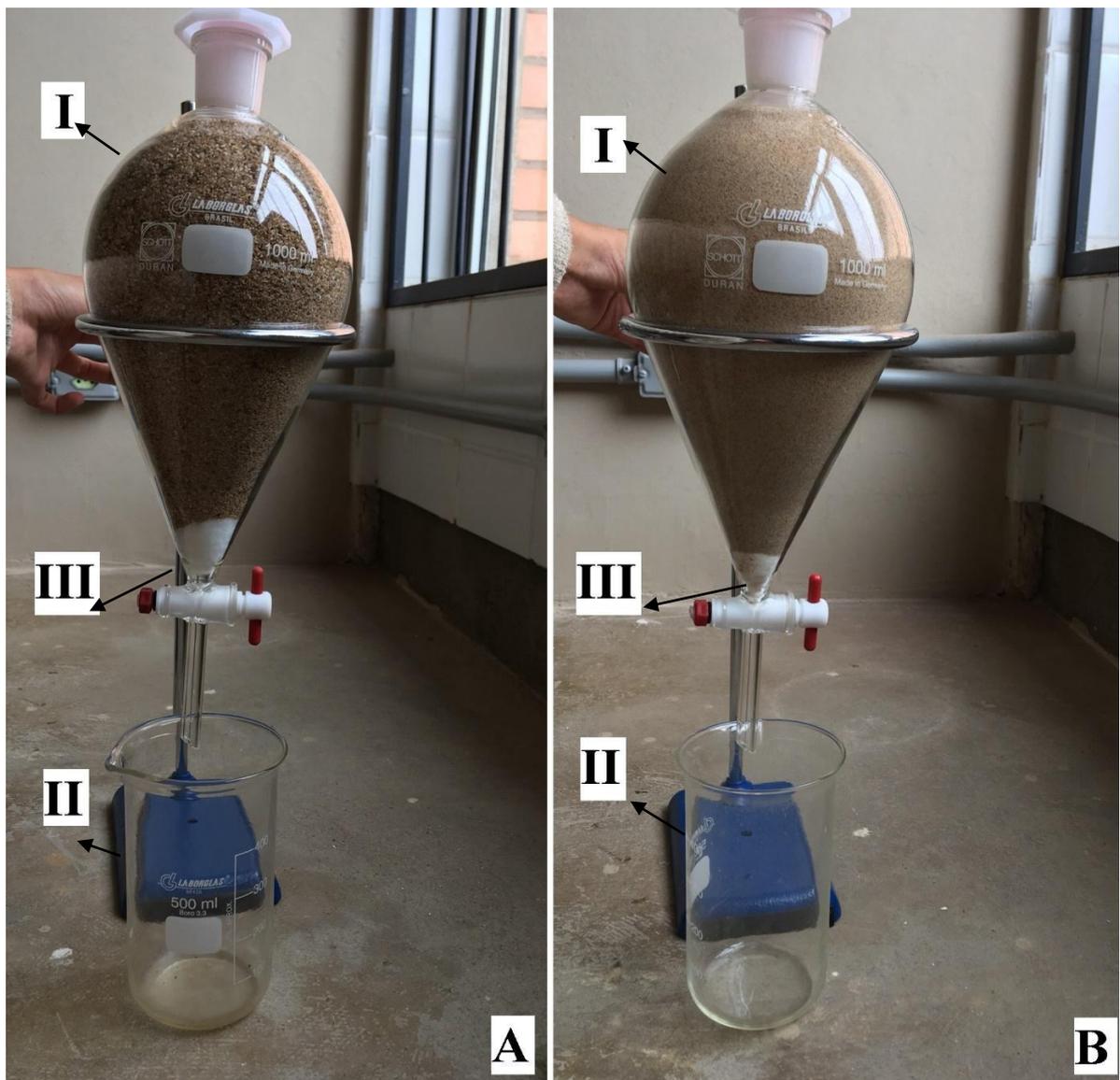


Figura 3.1 Modelo de porosidade efetiva pronto; *A*- representa o modelo com areia de granulometria média, *B*- representa o modelo com areia de granulometria fina. Em ambas as figuras I-representa o funil de separação com as respectivas areias, II- Becker para coletar a água drenada por gravidade, III- algodão colocado para impedir que o sedimento escape do funil

Tabela 3.1 Tabela de classificação das peneiras utilizadas em ensaios granulométricos e suas aberturas em mm segundo ABNT 2003.

ASTM USS	MESH TYLER	Abertura mm	FIO mm	ASTM USS	MESH TYLER	Abertura mm	FIO mm
4"	--	100,000	6,300	8	8	2,360	1,000
3 1/2"	--	90,000	6,300	10	9	2,000	0,900
3"	--	75,000	6,300	12	10	1,700	0,800
2 1/2"	--	63,000	5,600	14	12	1,400	0,710
2"	--	50,000	5,000	16	14	1,180	0,630
1 3/4"	--	45,000	4,500	18	16	1,000	0,560
1 1/2"	--	37,500	4,500	20	20	0,850	0,500
1 1/4"	--	31,500	4,000	25	24	0,710	0,450
1"	--	25,000	3,550	30	28	0,600	0,400
3/4"	--	19,000	3,150	35	32	0,500	0,315
5/8"	--	16,000	3,150	40	35	0,425	0,280
1/2"	--	12,500	2,500	45	42	0,355	0,224
--	--	10,000	2,500	50	48	0,300	0,200
3/8"	--	9,500	2,240	60	60	0,250	0,160
5/16"	--	8,000	2,000	70	65	0,212	0,140
1/4"	--	6,300	1,800	80	80	0,180	0,125
3,5	3,5	5,600	1,600	100	100	0,150	0,100
4	4	4,750	1,600	120	115	0,125	0,090
5	5	4,000	1,400	140	150	0,106	0,071
6	6	3,350	1,250	170	170	0,090	0,063
7	7	2,800	1,120				

Tabela 3.2 Tabela com os limites de fração do solo pelo tamanho dos grãos, segundo ABNT 2003.

Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos segundo a ABNT	
Fração Limites	
Matacão	25 cm a 1 m
Pedra	7,6 cm a 25 cm
Brita	4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	1,2 mm a 4,8 mm
Areia média	0,3 mm a 1,20 mm
Areia fina	0,05 mm a 0,3 mm
Silte	0,005 mm a 0,05 mm
Argila inferior a	0,005 mm

3.3.2 Modelo da Lei de Darcy

A partir da Lei de Darcy ($Q = -K \frac{dh}{dl} A$), e com base nos intervalos granulométricos dos ensaios anteriores, foram desenvolvidos dois modelos do experimento de Darcy, para estimar valores de condutividade hidráulica (K) das areias, bem como o gradiente hidráulico ($i = \frac{dh}{dl}$). Para a montagem de cada modelo, foram utilizadas 2 garrafas pets com o fundo cortado, dois tubos de acrílico, mangueira de silicone e um Becker de plástico furado na base. Os tubos de acrílico foram utilizados como piezômetros (para leitura dos níveis de cargas hidráulicas, h), enquanto que o Becker (acoplado na entrada do experimento com mangueira de silicone) fez o papel de recarga de água do experimento (para detalhes, ver Apêndice A).

Com os modelos prontos, preencheu-se o primeiro com areia de granulometria fina, de mesmo intervalo granulométrico utilizado no modelo de porosidade efetiva (Figura 3.2), e o segundo modelo com areia de granulometria média à grossa, também de mesmo intervalo granulométrico utilizado no modelo de porosidade efetiva (Figura 3.3).

Para a execução do experimento, introduziu-se, de forma constante, água no sistema, via Becker, durante um tempo cronometrado. Mediu-se o nível d'água atingido nos piezômetros (valores de h) e a vazão da água (Q) na saída do sistema no intervalo de tempo medido. A partir destes dados coletados e da porosidade efetiva de cada intervalo granulométrico já calculados, utilizando a Lei de Darcy, estimou-se os valores de K , utilizados posteriormente nos outros modelos de rede de fluxo, de aquíferos e nos modelos numéricos. O valor da área da seção (A) foi calculada a partir da equação $A = \pi.r^2$, sendo r o raio da garrafa pet. Os valores de K também foram, posteriormente, comparados com valores tabelados por Health (1982), em Freezy e Cherry (1979), para validação.

Vale ressaltar que o experimento foi executado três vezes, tanto para granulometria fina, quanto para a de granulometria média à grossa. Os valores de K adotados foram a média dos três experimentos.

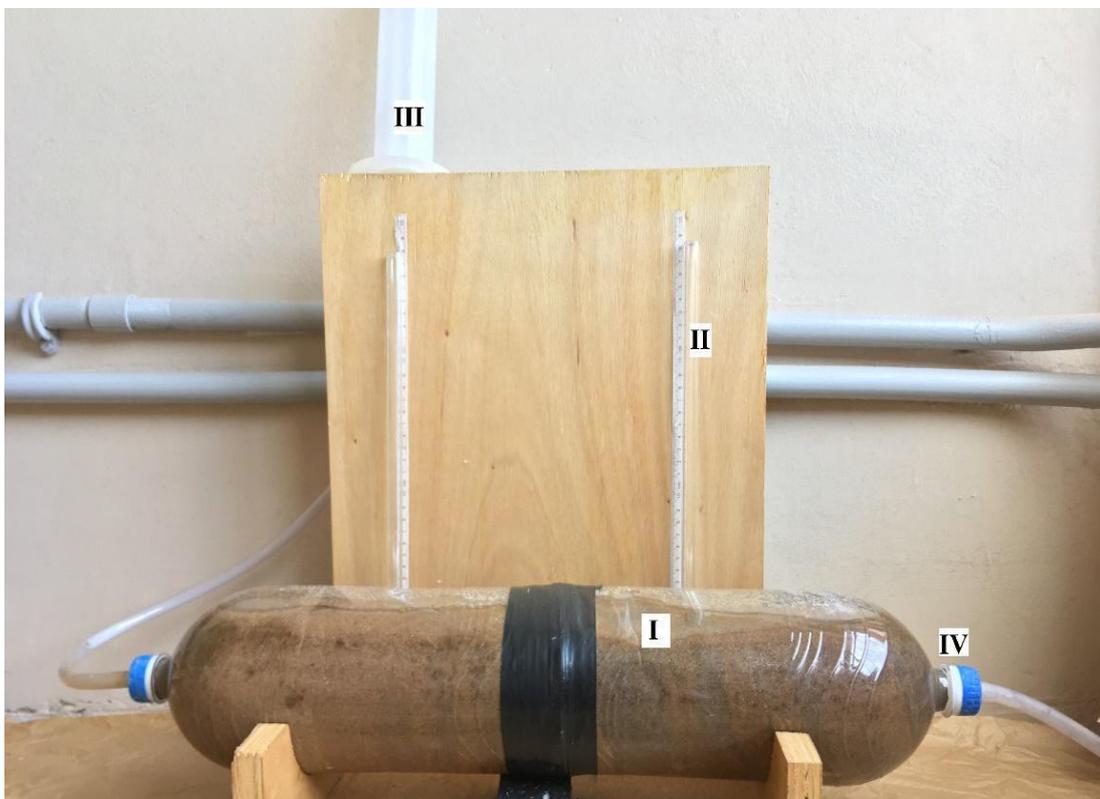


Figura 3.2 Modelo preenchido com areia de granulometria fina para representar a lei de Darcy. Em I- areia de granulometria fina, saturada em água; II- tubos de acrílico para representar os piezômetros; III- Becker com fundo furado, acoplado a mangueira de silicone, por onde é feita introdução de água no sistema; IV- tampa da garrafa, vedada, com mangueira de silicone acoplada por onde ocorre a saída de água do sistema.

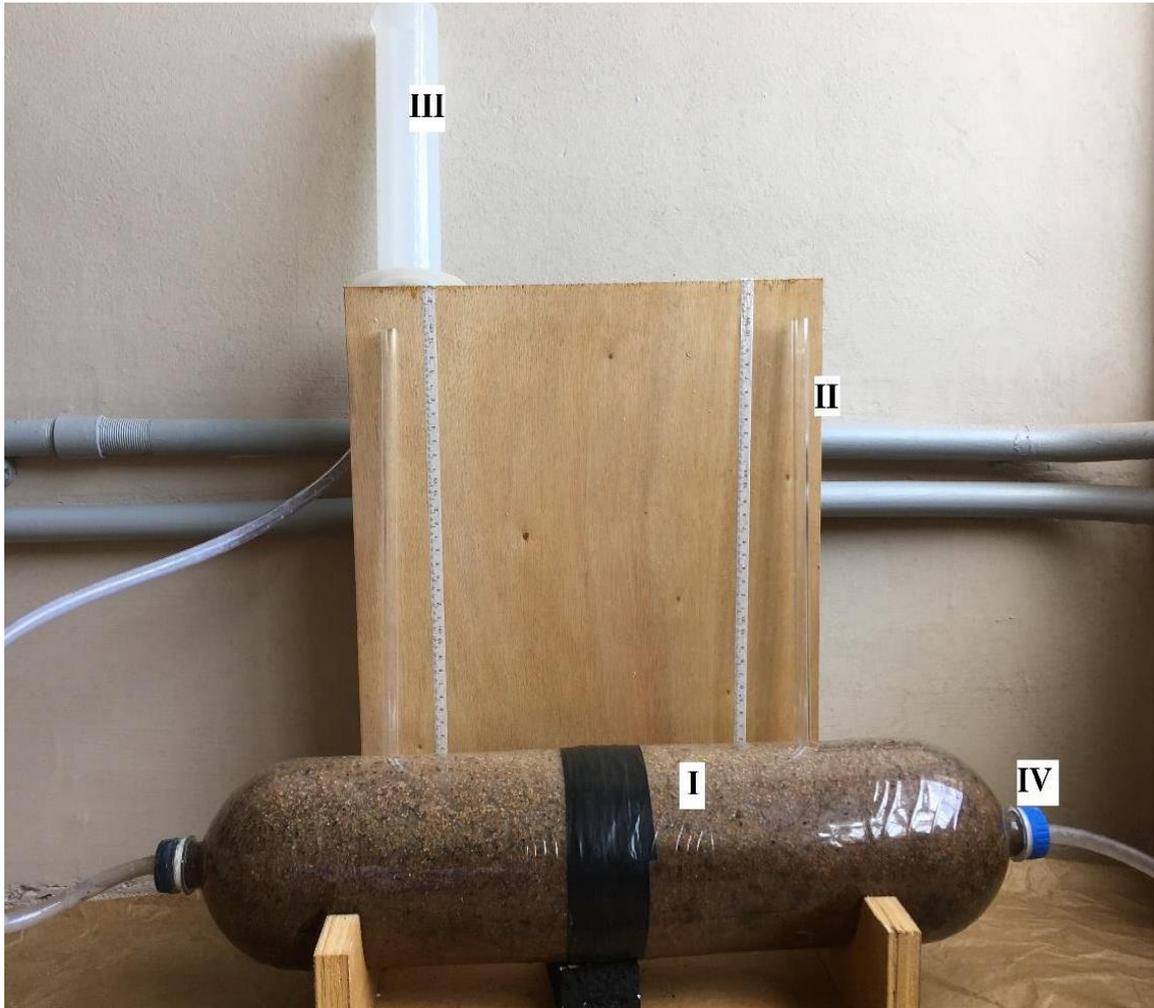


Figura 3.3 Modelo preenchido com areia de granulometria média à grossa para representar a lei de Darcy. Em *I*- areia de granulometria média à grossa, saturada em água; *II*- tubos de acrílico para representar os piezômetros; *III*- Becker com fundo furado, acoplado a mangueira de silicone, por onde é feita introdução de água no sistema; *IV*- tampa da garrafa, vedada, com mangueira de silicone acoplada por onde ocorre a saída de água do sistema.

3.3.3 Modelo de rede de fluxo

Para o modelo de rede de fluxo, utilizou-se peças em acrílico (folhas) medindo 60 cm de comprimento e 40 cm de altura, todas com 5 mm de espessura. Nas laterais, foram acopladas entradas laterais, via ranhuras, para a recarga de água no experimento (Apêndice A).

Para simular um cenário de rede de fluxo em zona de descarga de aquífero, foi representado, no centro do modelo, um rio (descarga do sistema). Assim, o modelo foi preenchido, do lado direito desse rio, apenas com areia de granulometria média a grossa, a mesma dos ensaios anteriores, para observar a rede de fluxo (linhas de fluxo de água e de equipotenciais) apenas em região homogênea e isotrópica. No lado esquerdo do rio, o modelo foi preenchido com a mesma areia média a grossa, mas adicionado duas lentes, uma de areia grossa (de intervalo diferente dos ensaios anteriores) e outra de argila, para analisar o comportamento em um contexto de heterogeneidade e anisotropia (Figura 3.4).

Foram anexados, na área homogênea e isotrópica do modelo, dois tubos de acrílico próximos ao rio simulando piezômetros, cada um com profundidades diferentes, para observar fluxos ascendentes em zonas de descargas.

Para facilitar a visualização das linhas de fluxo em todo o experimento, misturou-se na água a ser introduzida, um corante líquido. A injeção da água foi feita a partir do uso de dois filtros de separação retos com capacidade de 500 ml, pelas laterais do modelo (Figura 3.4).

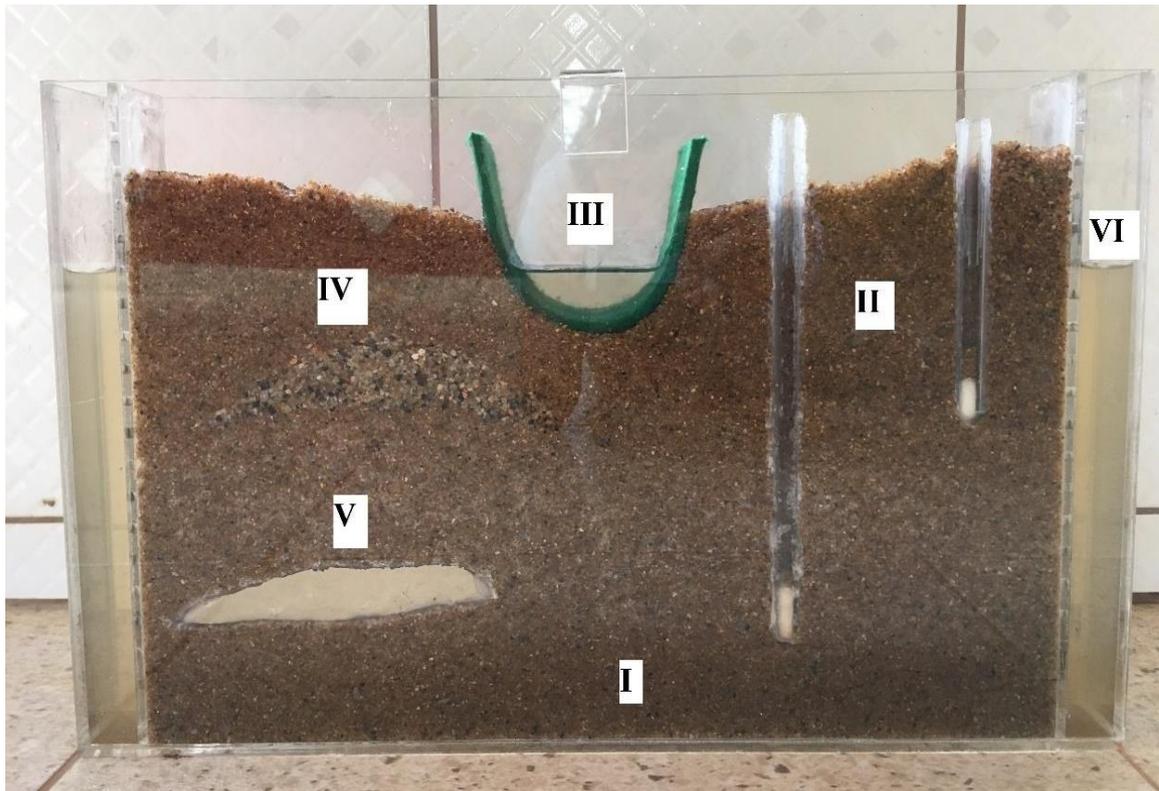


Figura 3.4 Projeto realizado no Corel Draw para o modelo do aquífero que foi montado. As laterais em azul indicam a entrada de água no modelo. Os poços em azul representam poços de monitoramento e piezômetros. Os poços em vermelho indicam locais para provável injeção de plumas de contaminação no modelo. As diferentes camadas de granulometrias variadas estão marcadas no desenho, assim como o local do lago e do rio.

3.3.4 Modelo de aquífero

Para a montagem do modelo de aquífero, utilizou-se peças em acrílico medindo 80 cm de comprimento e 50 cm de altura, todas com 5 mm de espessura (Apêndice A).

Antes da execução do modelo, foi pensado em um projeto para preenchimento do modelo, para decidir o local de cada faixa granulométrica de areia (média e fina, conforme especificado anteriormente), posicionamento de lentes de argila, das áreas de recarga e descarga dos aquíferos, de poços de monitoramento, lagoa, e o desenho esquemático do modelo (Figura 3.5). Os procedimentos para injeção e visualização da água fluindo no modelo foram os mesmos adotados no modelo de rede de fluxo.

Utilizando o projeto (Figura 3.5) como base, iniciou-se o preenchimento do modelo (para detalhes sobre a montagem, ver Apêndice 1). Para execução do experimento, saturou-se o modelo por completo em água. Para avaliar o fluxo da água, injetou-se corante preto em poços específicos presentes no aquífero que funcionam como plumas de contaminantes em diferentes profundidades do aquífero.

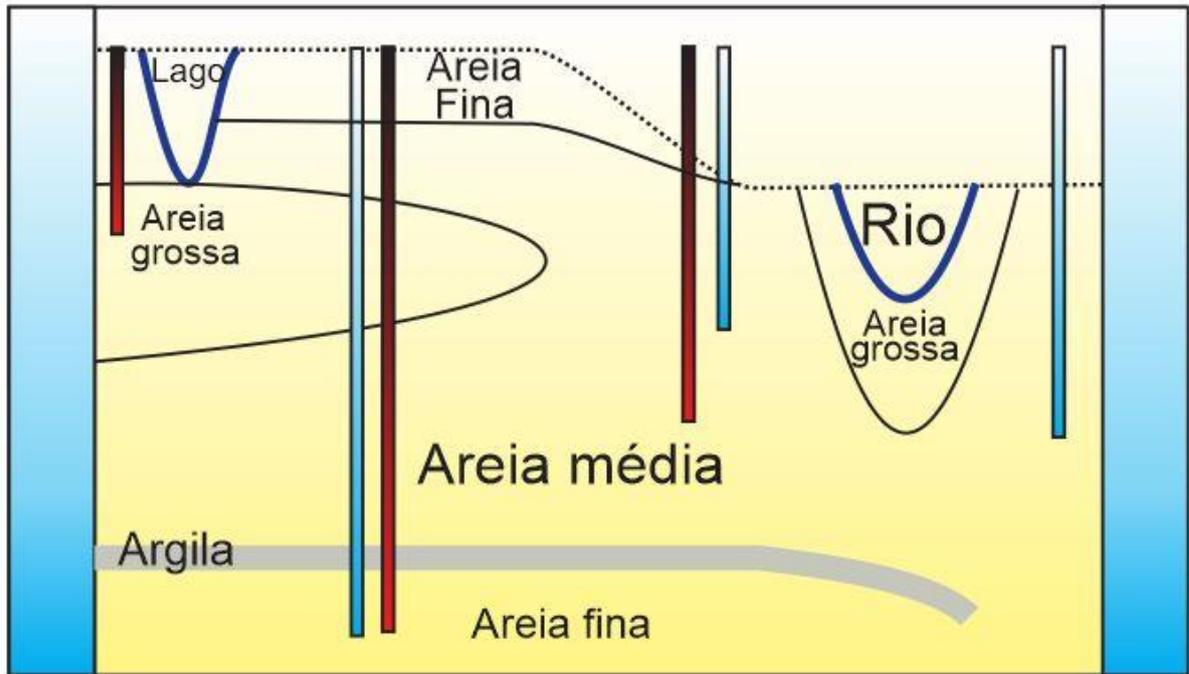


Figura 3.5 Projeto realizado no Corel Draw para o modelo do aquífero que foi montado. As laterais em azul indicam a entrada de água no modelo. Os poços em azul representam poços de monitoramento e piezômetros. Os poços em vermelho indicam locais para provável injeção de plumas de contaminação no modelo. As diferentes camadas de granulometrias variadas estão marcadas no desenho, assim como o local do lago e do rio.

Utilizando o projeto (Figura 3.5) como base, iniciou-se o preenchimento do modelo, para detalhes sobre a montagem (Apêndice 1). Para execução do experimento, saturou-se o modelo por completo com água. Para avaliar o fluxo da água, injetou-se corante preto em poços específicos presentes no modelo para simular plumas de contaminantes em diferentes profundidades do aquífero.

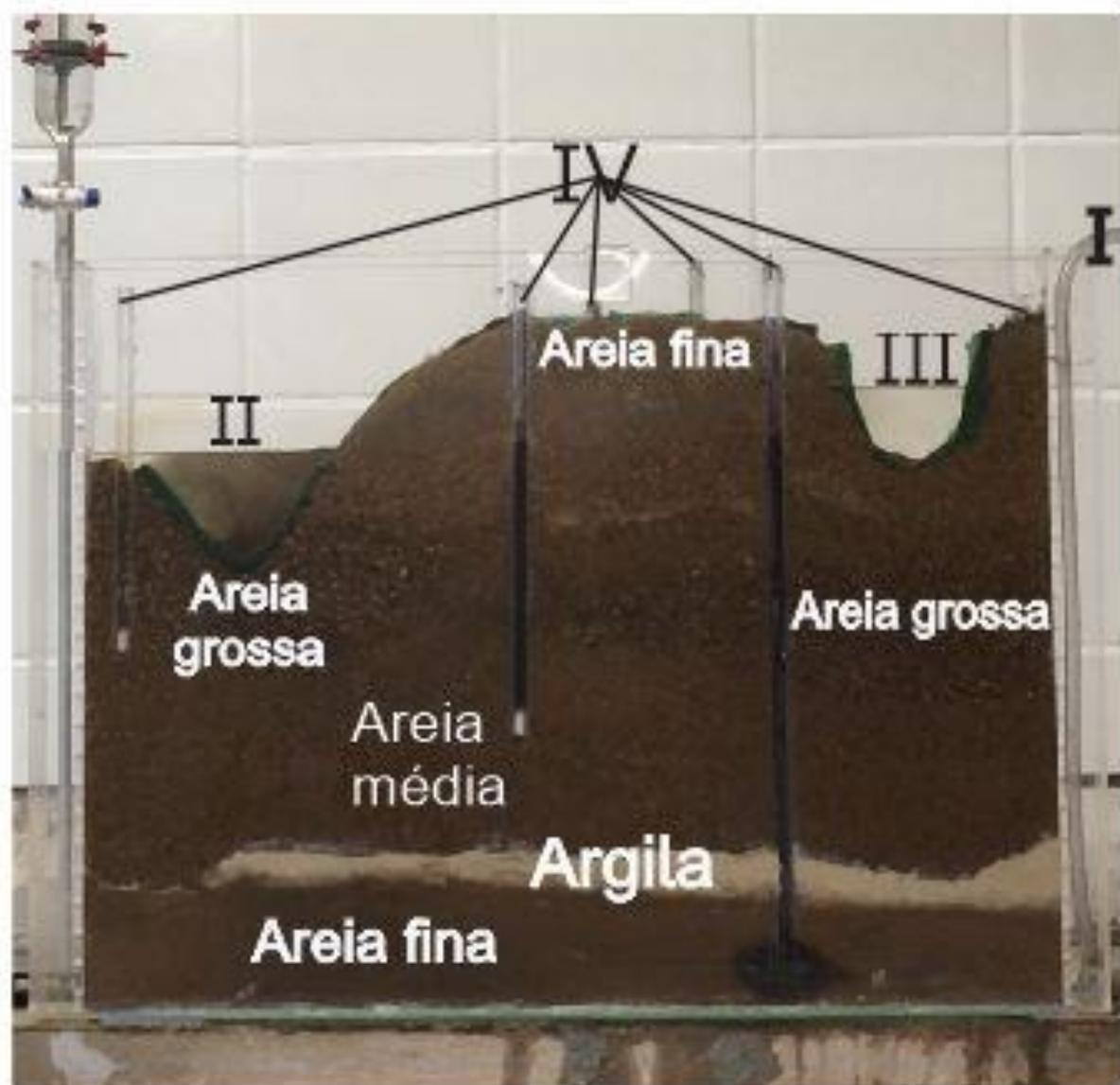


Figura 3.6 Modelo de aquífero pronto. I: recarga de água, feita com mangueira de silicone, acoplada a uma torneira mantida em vazão constante; II: descarga de água, forjando um rio; III: Lago; IV: poços para representar piezômetros e poços de contaminantes.

4.1 MODELOS DE POROSIDADE TOTAL E EFETIVA

O modelo de porosidade efetiva foi realizado para calcular a porosidade efetiva de dois diferentes intervalos granulométricos de areia que foram utilizados nos experimentos seguintes. Sendo assim, após a montagem completa dos dois modelos, iniciou-se a saturação da areia com água em ambos. Para melhor visualizar os resultados, fez-se cada experimento separadamente.

4.1.1 Modelo preenchido com areia média à grossa

Para saturar a areia do modelo, foi necessário introduzir um total de 678 ml de água. O recipiente total, conforme apresentado anteriormente, possui capacidade total de 1000 ml. Logo, 678 ml corresponde a 67,8% do volume total do funil de separação em que a areia foi colocada.

Destes 678 ml, após aproximadamente 15 minutos da total saturação da areia, foi recolhido, no Becker milimetrado posicionado abaixo do funil de separação, 540 ml de água. Dessa forma, a água retida pela areia foi de 138 ml.

Para cálculo da porosidade total (η) do modelo de areia grossa, utilizou-se a quantidade de água que foi necessária para introduzir no experimento até completa saturação da areia, em um volume total de 1000 ml (volume do funil de separação utilizado no experimento), conforme equação abaixo:

$$\eta = \frac{V_v}{V_i} = \frac{678 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0,678 = 67,8\%$$

Para cálculo da porosidade efetiva (η_e), utilizou-se a fórmula: $\eta_e = \frac{V_d}{V_i}$, ou seja, a porosidade efetiva é igual ao volume de água drenado, dividido pelo volume total da areia, indicando o valor de 54%, conforme cálculo abaixo:

$$\eta_e = \frac{V_d}{V_i} = \frac{540 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0,54 = 54\%$$

4.1.2 Modelo preenchido com areia fina

Para saturar a areia do modelo, foi necessário introduzir um total de 660 ml de água, dando intervalos de 5 a 10 minutos, pois a infiltração da água na areia ocorreu de forma mais lenta. O recipiente também possui volume total de 1000 ml, logo, 660 ml corresponde a 66% do volume total do funil de separação em a areia foi colocada.

$$\eta = \frac{V_v}{V_i} = \frac{660 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0,660 = 66,0\%$$

Destes 660 ml foi recolhido 12,5 ml de água no Becker milimetrado posicionado abaixo do funil de separação. Dessa forma, ficaram retidos 647,5 ml de água. Como no experimento anterior, tem-se o cálculo, abaixo, indicando o valor de 1,25%:

$$\eta_e = \frac{V_d}{V_i} = \frac{12,5 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0,0125 = 1,25\%$$

4.2 MODELOS DE LEI DE DARCY

Foram construídos dois modelos baseados na Lei de Darcy: um preenchido com areia fina e outro preenchido com areia média à grossa. Como as garrafas utilizadas em ambos eram iguais, a área utilizada nos cálculos em ambos os experimentos foi dada por $A = \pi \times 0,06^2 \text{ m} = 0,0113 \text{ m}^2$.

Os experimentos foram executados três vezes, tendo os resultados obtidos detalhados nas Tabela 4.1 (areia média a grossa) e Tabela 4.2 (areia fina), a fim de se calcular o valor médio de Q , K e i . Após os experimentos, também foi feita uma comparação entre os valores de K estimados nos modelos físicos e o K descrito por Health (Tabela 4.3).

Ao comparar os três valores de K encontrados para a areia de granulometria média à grossa com os valores da tabela, pode-se perceber que o valor está exatamente no intervalo de areia lavada média à grossa, com um K médio de $13,93 \frac{\text{m}}{\text{dia}}$ (ou $1,6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$). Com os valores de K encontrados para a areia fina, notou-se que o valor está no intervalo da areia fina limpa, com um K médio de $1,17 \frac{\text{m}}{\text{dia}}$ (ou $1,3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$). Ambas as médias das condutividades hidráulicas foram depois usadas no modelo de rede de fluxo e de aquíferos.

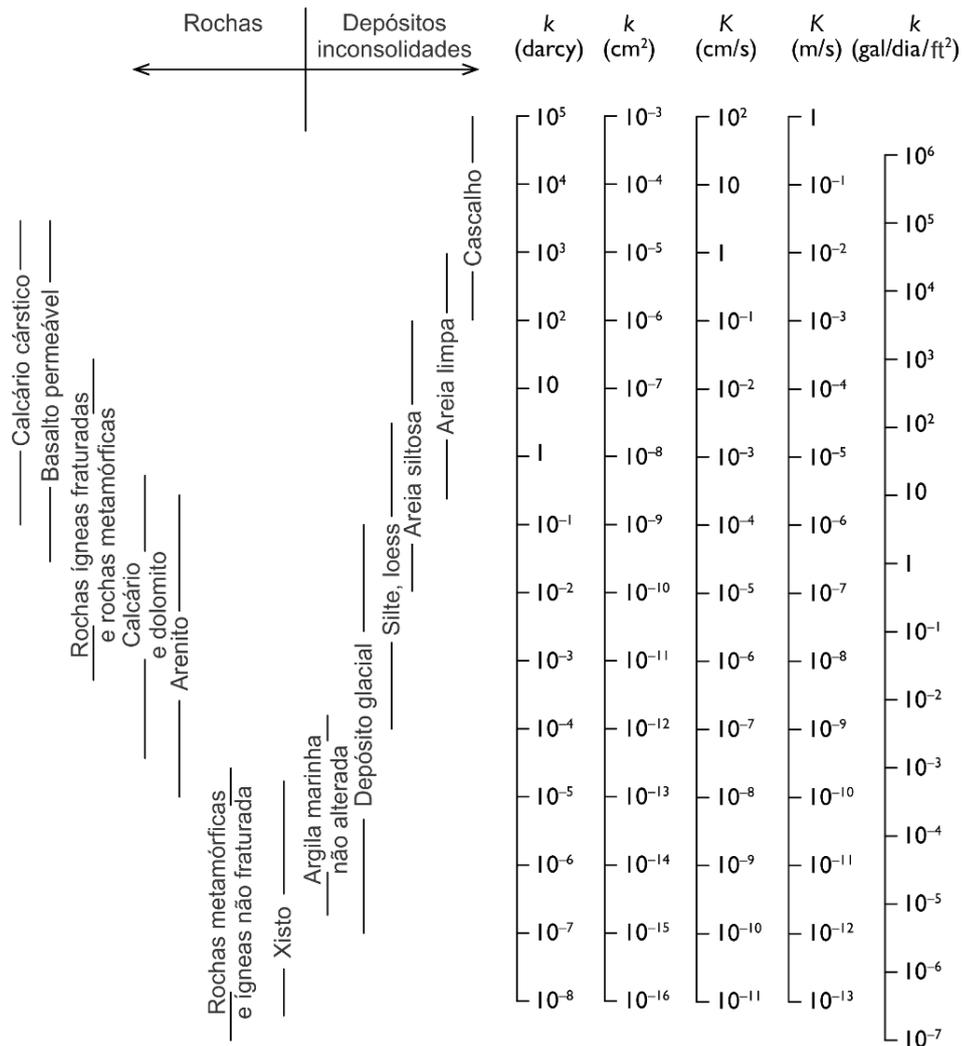
Tabela 4.1 Tabela dos dados coletados durante o experimento da Lei de Darcy preenchido com areia grossa.

	Primeira execução	Segunda execução	Terceira execução
Distância entre piezômetros (L)	31 cm = 0,31 m	31 cm = 0,31 m	31 cm = 0,31 m
Área	0,0113 m ²	0,0113 m ²	0,0113 m ²
Altura piezômetro 1 (h ₁)	18,0 cm = 0,180 m	22,5 cm = 0,225 m	17,0 cm = 0,170 m
Altura piezômetro 2 (h ₂)	15,0cm = 0,150 m	19,0 cm = 0,190 m	13,0 cm = 0,130 m
Δh	3,0 cm = 0,03 m	3,5 cm = 0,035 m	4,0 cm = 0,04 m
i = Δh/L	9,6 x 10 ⁻²	1,12 x 10 ⁻¹	1,29 x 10 ⁻¹
Vazão (Q)	1.8 x 10 ⁻² m ³ /dia	1.8 x 10 ⁻² m ³ /dia	1,6 x 10 ⁻² m ³ /dia
K = Q/Ai	16,59 m/dia	14,22 m/dia	10,98 m/dia

Tabela 4.2 Tabela dos dados coletados durante o experimento da Lei de Darcy preenchido com areia fina.

	Primeira execução	Segunda execução	Terceira execução
Distância entre piezômetros (L)	23 cm = 0,23 m	23 cm = 0,23 m	23 cm = 0,23 m
Área	0,0113 m ²	0,0113 m ²	0,0113 m ²
Altura piezômetro 1 (h ₁)	15,0 cm = 0,15 m	21,0 cm = 0,210 m	19,0 cm = 0,190 m
Altura piezômetro 2 (h ₂)	14,5 cm = 0,145 m	11,0 cm = 0,110 m	17,0 cm = 0,170 m
Δh	0,5 cm = 0,005 m	10,0 cm = 0,10m	2,0 cm = 0,02 m
i = Δh/L	2,2 x 10 ⁻²	4,34 x 10 ⁻¹	2,2 x 10 ⁻¹
Vazão (Q)	3,2 x 10 ⁻³ m ³ /dia	3,6 x 10 ⁻³ m ³ /dia	3,7 x 10 ⁻³ m ³ /dia
K = Q/Ai	1,28 m/dia	0,73 m/dia	1,50 m/dia

Tabela 4.3 Tabela dos dados de K saturados para vários materiais geológicos, segundo Health (1982).



4.3 MODELO REDE DE FLUXO

Para a execução do modelo de rede fluxo, foi necessário, primeiro, saturar todo o sistema em água pura. Em seguida, introduziu-se uma mistura de água e corante na cor preta, para que as linhas de fluxo fossem realçadas no sistema.

Ao introduzir a mistura pelas laterais do sistema, após um tempo, foi possível notar as linhas de fluxo ascendentes em direção ao “rio” presente no sistema. No lado homogêneo, estas linhas de fluxo são semelhantes e laminares (sub-horizontais), e começam a ascender ao atingirem o que seria o meio quase exato do modelo, formando com o lado heterogêneo uma espécie de divisor de água subterrâneo (Figura 4.1).

No lado heterogêneo, é possível notar que as linhas de fluxo penetram muito pouco na lente de argila, devido a sua baixa permeabilidade. Já na lente composta por areia de granulometria maior, que possui uma maior porosidade específica um valor de K maior, é possível notar que as linhas de fluxo aumentam seu grau ascensão, formando um ângulo maior, quase vertical, mostrando um aumento de velocidade de propagação da água ao passarem pela faixa (Figura 4.1).



Figura 4.1 Modelo de Rede de Fluxo em execução. As linhas de fluxo estão marcadas na figura, sendo possível perceber a diferença no comportamento do fluxo no lado heterogêneo (a esquerda na figura) e no lado homogêneo (a direita na figura). Em linha tracejada temos as linhas equipotenciais.

Em uma segunda execução, para que o modelo não fosse colorido completamente pela mistura com corante, injetou-se corante apenas nos poços de monitoramento presente no lado homogêneo. Dessa forma, foi possível notar o caminho exato realizado pelo corante até sua chegada no “rio” presente no modelo. Para que a execução ocorresse da forma correta, o modelo estava saturado em água, mantendo os níveis de água nas laterais constantes.

Durante a execução, percebeu-se que o nível do piezômetro acompanhava sempre o nível da linha de fluxo em que coletava água, não tendo relação com a cota em que estava.

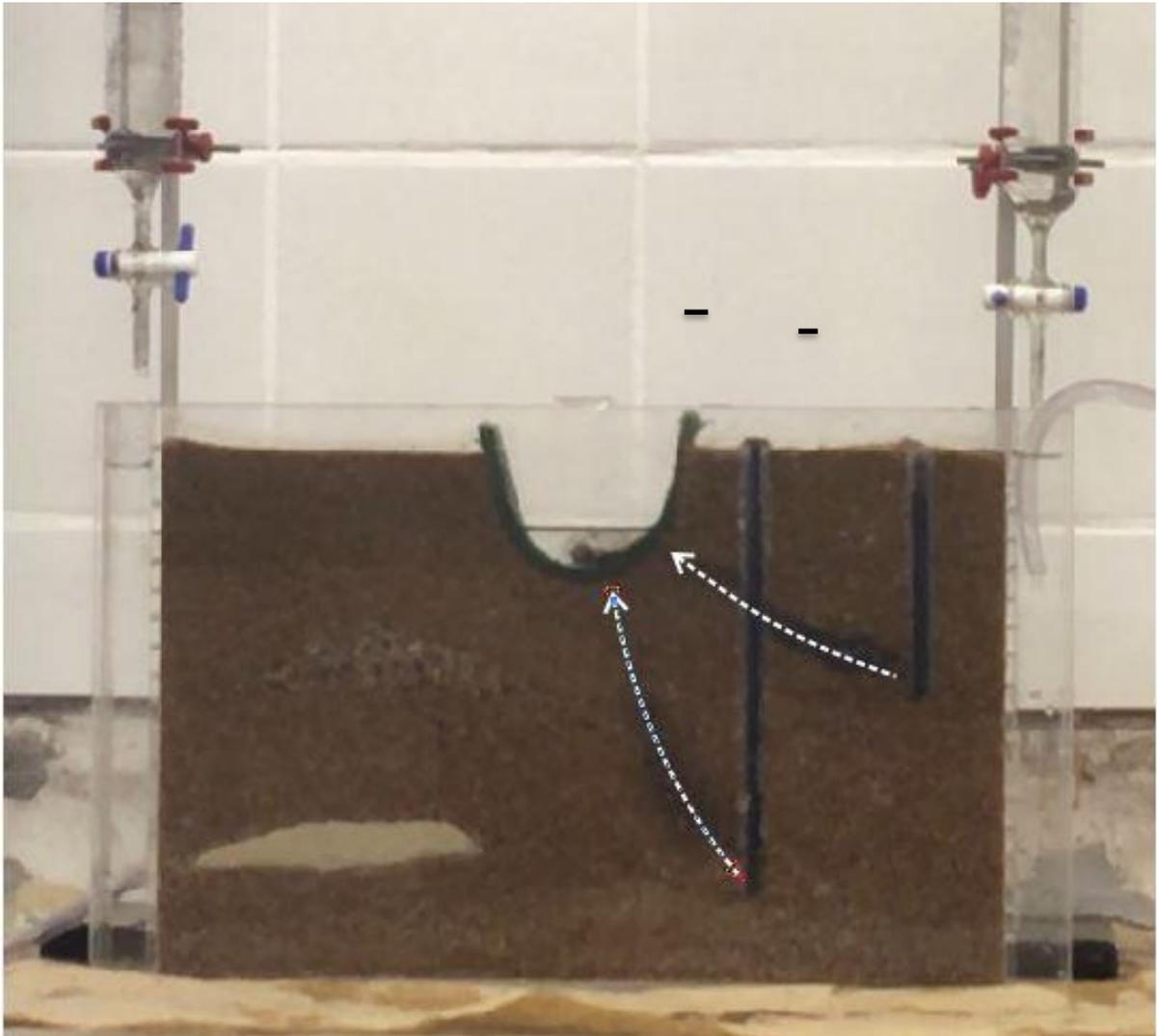


Figura 4.2 Modelo de Rede de Fluxo em execução com corante aplicado apenas através dos piezômetros. Em destaque em branco o fluxo descrito pelo corante em direção a drenagem ao sair dos poços, em preto temos o nível da água em cada piezômetro.

Ao comparar o fluxo observado utilizando corante apenas nos poços e o fluxo observado ao adicionar corante em todo o sistema, pode-se notar a semelhança nas linhas de fluxo descritas em ambas as situações, conforme seria esperado, levando-se em consideração a teoria.

Junto com as linhas de fluxo, é possível notar que os tubos de fluxo formados no lado homogêneo são semelhantes e paralelos, enquanto que no lado heterogêneo, devido às diferentes linhas de fluxo, os tubos de fluxo diferem e não são simétricos (Figura 4.1).

Como o esperado na teoria, ao observar-se as linhas equipotenciais pode-se notar que o fluxo do corante se desloca sempre partindo de uma linha de maior valor para a de menor valor, no sentido da descarga do modelo (Figura 4.1).

Quando o experimento está sendo executado, temos uma maior parte do modelo exemplificando a zona saturada, enquanto nas proximidades do rio, ocorre a zona de capilaridade, que se encontra quase saturada e está em contato com a superfície freática. Nesta zona observa-se que a água sofre ascensão direta para o rio, esta zona, permanece durante toda a execução do experimento parcialmente saturada.

Ao cessar a entrada de água pelas laterais, mantendo a descarga do fluxo de água no rio, percebeu-se que se cria, então, uma zona de aeração no modelo. Ocorre um rebaixamento no nível freático até que se atinja uma cota abaixo da cota do rio e, então, cesse também a descarga do sistema, e nossa área saturada passa a estar toda abaixo deste novo nível freático.

4.3 MODELO DE AQUÍFEROS

Para a execução do modelo aquíferos foi necessário primeiro saturar toda a areia com água. A injeção de água no sistema foi feita apenas pela lateral direita, com uso de uma mangueira acoplada em uma torneira mantida com vazão constante durante o experimento para que o nível piezométrico também se mantivesse constante (Figura 4.3).

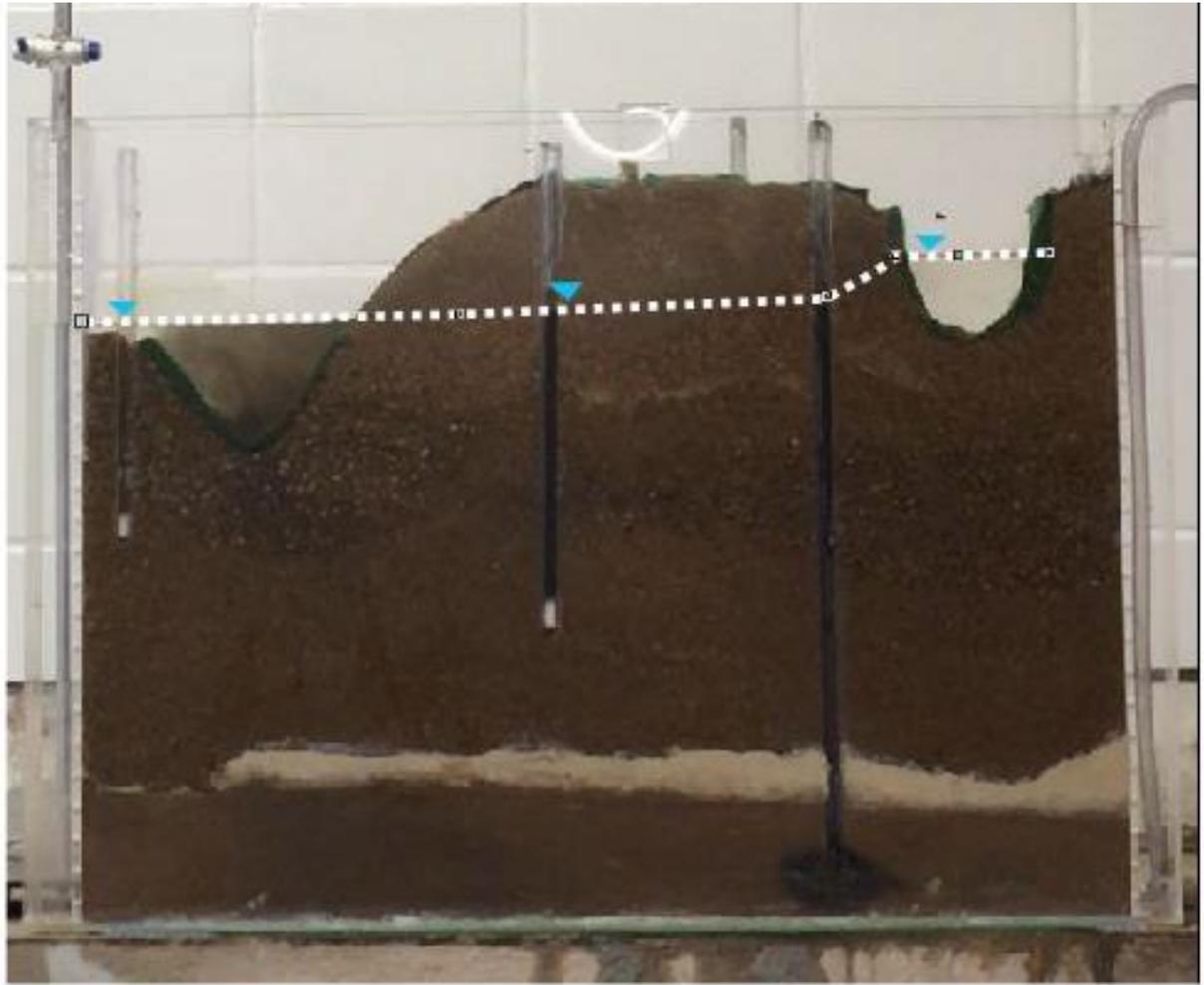


Figura 4.3 Modelo de aquífero em execução, estando a recarga de água constante. Em destaque é possível observar a linha piezométrica que se mantém constante, estando em maior cota no lago e diminuindo em direção ao rio. A recarga está sendo feita apenas pela lateral direita do modelo.

A continuação do experimento, injeta-se nos poços corante na cor preta para que seja destacado o caminho que o fluxo do corante irá percorrer no modelo. Nesse modelo o interesse não é apenas em observar a rede de fluxo, por isso o corante não é adicionado ao sistema pela lateral, como foi feito no modelo anterior.

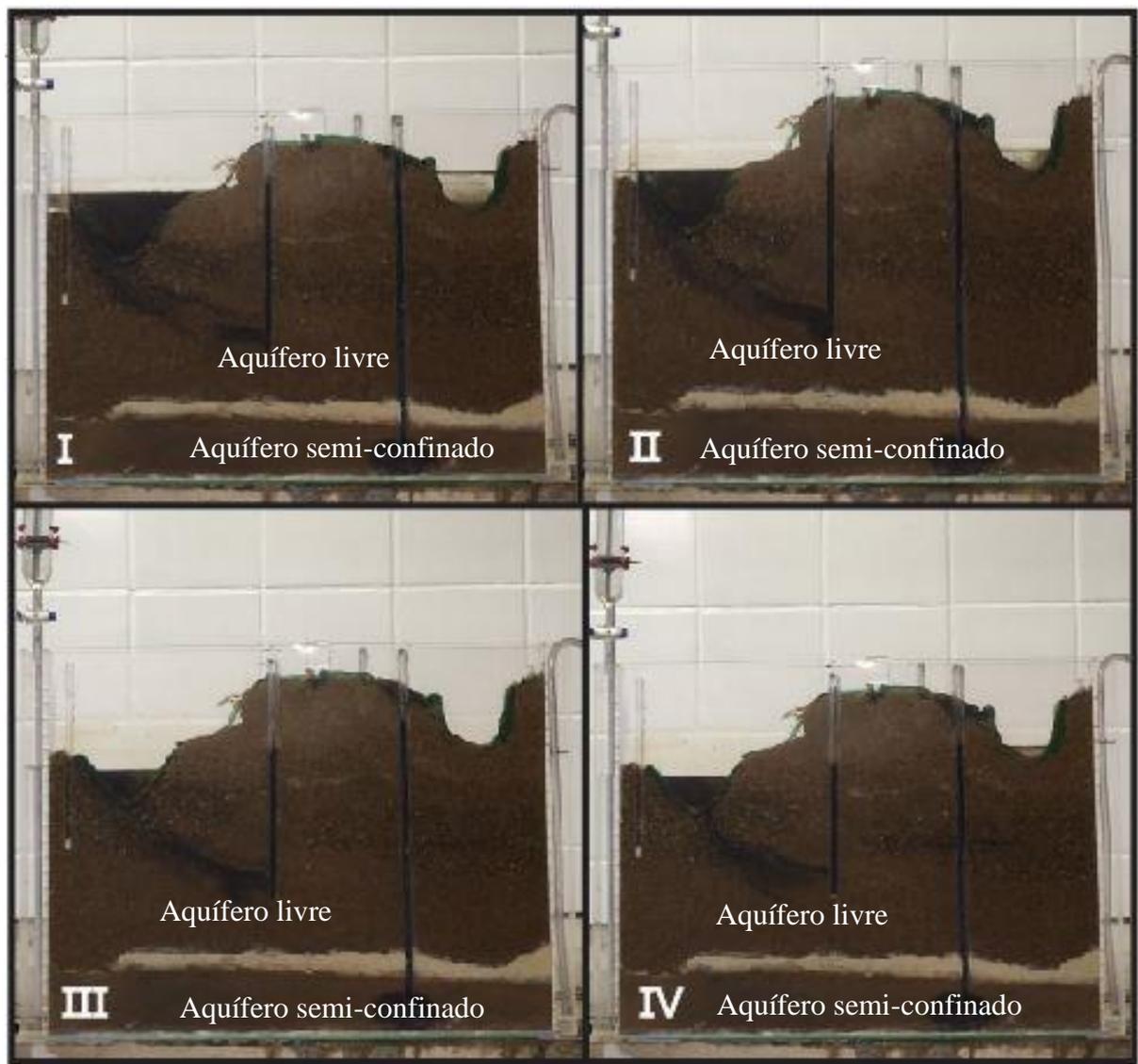


Figura 4.4 Modelo de aquífero em execução, estando a recarga de água constante. A sequência de figuras mostra a evolução do fluxo gerado pelo corante aplicado nos poços.

Ao se observar a Figura 4.4, é possível notar que nas 4 fotos da sequência, o corante pouco movimentou-se no aquífero semi-confinado. Isso ocorre porque nessa área do modelo usou-se uma areia de granulometria fina, de alta porosidade total e baixa porosidade efetiva, com K de baixos valores, ou seja, o movimento da água nessa porção é muito lento, enquanto que na porção de areia de granulometria maior, o K com valores maiores faz com que o fluxo seja mais rápido e a dispersão do corante seja mais perceptível.

Além disso, o corante utilizado no experimento é um corante que sofre dispersão e não apenas ascensão. Tal característica pode ser percebida também no modelo de rede fluxo, pois o caminho que o corante percorre não é retilíneo e uniforme em direção a descarga, sofrendo dispersões longitudinal e transversal na areia em todo seu trajeto.

Neste modelo as duas zonas (saturada e de aeração) ficam um pouco mais evidentes, pois tem-se um desnível de cota no modelo. A topografia não retilínea e o fato da descarga estar situada em cota menor que o lago faz com o nível piezométrico (Figura 4.3) dividir de maneira clara a zona de aeração, acima, e a zona saturada abaixo. Assim como no modelo de rede de fluxo, tal divisão está diretamente relacionada à própria recarga, que faz com o nível piezométrico se mantenha constante em uma dada altura. Logo, ao cessar a recarga, faz-se com que aumente a zona de aeração.

Foi possível realizar a montagem e execução de todos os modelos físicos propostos. Nos quatro modelos, obteve-se resultados esperados, conforme a teoria propõe. Para a montagem dos projetos, pode-se dizer que se aumentou a dificuldade da montagem a medida que se aumentou a complexidade dos modelos e das informações que por ele foram fornecidas.

Ao fim da montagem e execução dos projetos, notou-se como o corante utilizado nos modelos de rede de fluxo e de aquífero sofre muita dispersão, dificultando algumas vezes a avaliação dos resultados. Com a execução dos modelos, foi possível estimar alguns dos principais parâmetros do movimento da água subterrânea, sendo eles, as porosidades total e efetiva, a condutividade hidráulica, verificar o comportamento das linhas de fluxo e das linhas equipotenciais, a relação entre níveis piezométricos e cota da descarga e a continuidade da recarga, bem como observar o que a heterogeneidade gera no comportamento das águas subterrâneas.

Foi possível medir as porosidades total e efetiva das duas granulometrias de areia utilizadas nos outros modelos. A porosidade efetiva da areia média encontrada foi igual a 54% e para areia fina 1,25%, e a porosidade total da areia média 67,8% e para areia fina 66%. A partir destes resultados, o volume de água retido na areia mais fina foi maior que o volume retido na areia média. Ao voltar-se na teoria, diz-se que grãos bem selecionados e mais finos possuem maior quantidade de espaços vazios e uma maior interação entre si gerando o que faz com a porosidade efetiva seja menor, se comparada com sedimentos de maior granulometria.

Em seguida, com o modelo da Lei de Darcy, obteve-se o valor K a partir da média dos três valores obtidos nas três execuções do experimento para cada granulometria de areia, sendo a média do valor para areia média igual $13,93 \frac{m}{dia}$ e a média do valor para areia fina $1,17 \frac{m}{dia}$. Ao comparar esses valores com a Tabela 4.3 deste trabalho, ambos os valores se encontram no intervalo para areia limpa, e que em ambos os casos era o que se esperava para os valores estimados em laboratório.

Com o modelo da rede de fluxo e do aquífero, ficou nítido a relação direta entre recarga, descarga e nível piezométrico dos aquíferos, além da relação do fluxo com a porosidade efetiva dos constituintes do aquífero e comportamento da rede de fluxo, as linhas equipotenciais e os tubos de fluxo.

Com relação ao modelo de aquíferos, tem-se ainda mais nítido a relação direta entre recarga e descarga e o nível piezométrico dos aquíferos, porém entra nessa relação uma nova variável que seria a diferença de cota entre o rio (descarga) e o lago, deixando claro que para que seja possível observar a água no lago, é preciso que o nível piezométrico esteja acima da base do lago, caso contrário, ele estará completamente seco. Porém, ao se colocar corante no poço ao lado do lago, em profundidade abaixo da base do lago, o corante não chega a atingir o lago, migrando em sentido ascendente para o rio. Com o modelo de aquífero, ainda se tem de forma clara que a velocidade de propagação do corante é muito menor na areia fina, não chegando o corante a deixar o aquífero semi-confinado do sistema durante todo o experimento, isso devido a maior retenção específica da areia mais fina e ao corante estar sujeito a sofrer dispersão durante o percurso até o rio.

Por fim, o trabalho mostrou-se eficiente quanto aos objetivos propostos, recomendando-se a execução futura de uma modelagem numérica simples para comprovação dos modelos físicos projetados, primeiro, teoricamente e, depois, confirmados em laboratório. Devido à simplificação dos modelos físicos, a sugestão é a modelagem numérica baseada em um regime de fluxo estacionário em um modelo de diferenças finitas, utilizando o software Visual Modflow.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 248 , Agregados – Determinação da composição granulométrica, válida a partir de 01.09.2003
- BEAR, J. AND VERRUIJT, A., Modeling Groundwater Flow and Pollution, Reidel, Kluwer, 1ª edição, 1987.
- CETESB, 2004. Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo.
- CLEARY, R. W. Águas subterrâneas - Prince Groundwater, inc; Clean Enviromental Brasil, 1ª edição, 2007, capítulos 1, 2, 3 e 4.
- FEITOSA, F. A. C; MANOEL FILHO, J. Coordenadores, Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, 3ª edição, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Labhid-UFPE, Fortaleza, 2008.
- FREEZE AND CHERRY, Groundwater - Prentice Hall Englewood Cliffs, 1979, Capítulo 2 – Propriedades e Princípios Físicos, traduzido por Gomes, R. M.; Galvão, P. e Oliveira Everton.
- GIAMPÁ, C; GONÇALVES, V. Águas subterrâneas e poços tubulares profundos, 2ª edição, 2013.
- LNEC MODELOS FÍSICOS E ENSAIOS LABORATORIAIS PARA O ESTUDO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Lisboa, 2013.
- LOUSADA, E.; CAMPOS, J. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. Revista Brasileira de Geociências, v. 35, n. 3, p. 407-414, 2005. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/viewFile/9469/9671>.
- MAIDMENT, D.R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F; Parks, B.o.; Steyaert, L.T.; ed. Enviromental modeling with GIS. New York, OxfordUniversity Press, 1993. Cap. 14, p. 147-167.
- SANTOS, L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações, 2009.
- SOARES, J.; RENNÓ, C., Modelos Hidrológicos Para Gestão Ambiental, capítulo 2: Conceitos básicos de modelagem hidrológica, 2000.
- TRESSOLDI, M. Uma contribuição à caracterização de maciços rochosos fraturados visando a proposição de modelos para fins hidrogeológicos e hidrogeotectônicos, 1991.
- TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

WENDLAND, E; RUBER, O. Hydrogeologic Modelle, Lehrstuhl für Angewandte Hydrogeologie, Ruhr, Universität Bochum, 1998.

BRASIL – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2007.

<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>,

Acessado em 12/11/2017.

Construção dos modelos físicos

i. Cálculo de porosidade efetiva (n_e)

Para o estudo e cálculo da porosidade total e efetiva, utilizou-se:

- Dois funis de separação com capacidade de 1000 ml (Figura 1.1a)
- Suporte para cada um dos funis (Figura 1.1b)
- Colocou-se um algodão em cada funil, a fim de se evitar que ocorra escape do sedimento pela base do funil. (Figura 1.1c)
- Um Becker para cada montagem, posicionado o abaixo das mesmas para coletar a água drenada. (Figura 1.1d).

Para o modelo de porosidade efetiva com areia grossa, utilizou-se areia retida nas peneiras #14, #16 e #20, conforme classificação da Tabela 1.1 abaixo. Para o modelo realizado com areia fina, utilizou-se a areia retida nas peneiras #65, #115, #150. Para classificação das areias em grossa e fina, seguiu-se a tabela granulométrica da ABNT (Tabela 1.2).

Ambos os funis foram preenchidos completamente com suas respectivas granulometrias de areias, no caso, 100% secas. Em seguida, acrescentou-se 1000 ml de água no mesmo. Ao fim do experimento verifica-se a quantidade de água que saiu do sistema e calculou-se o valor da porosidade efetiva da areia.

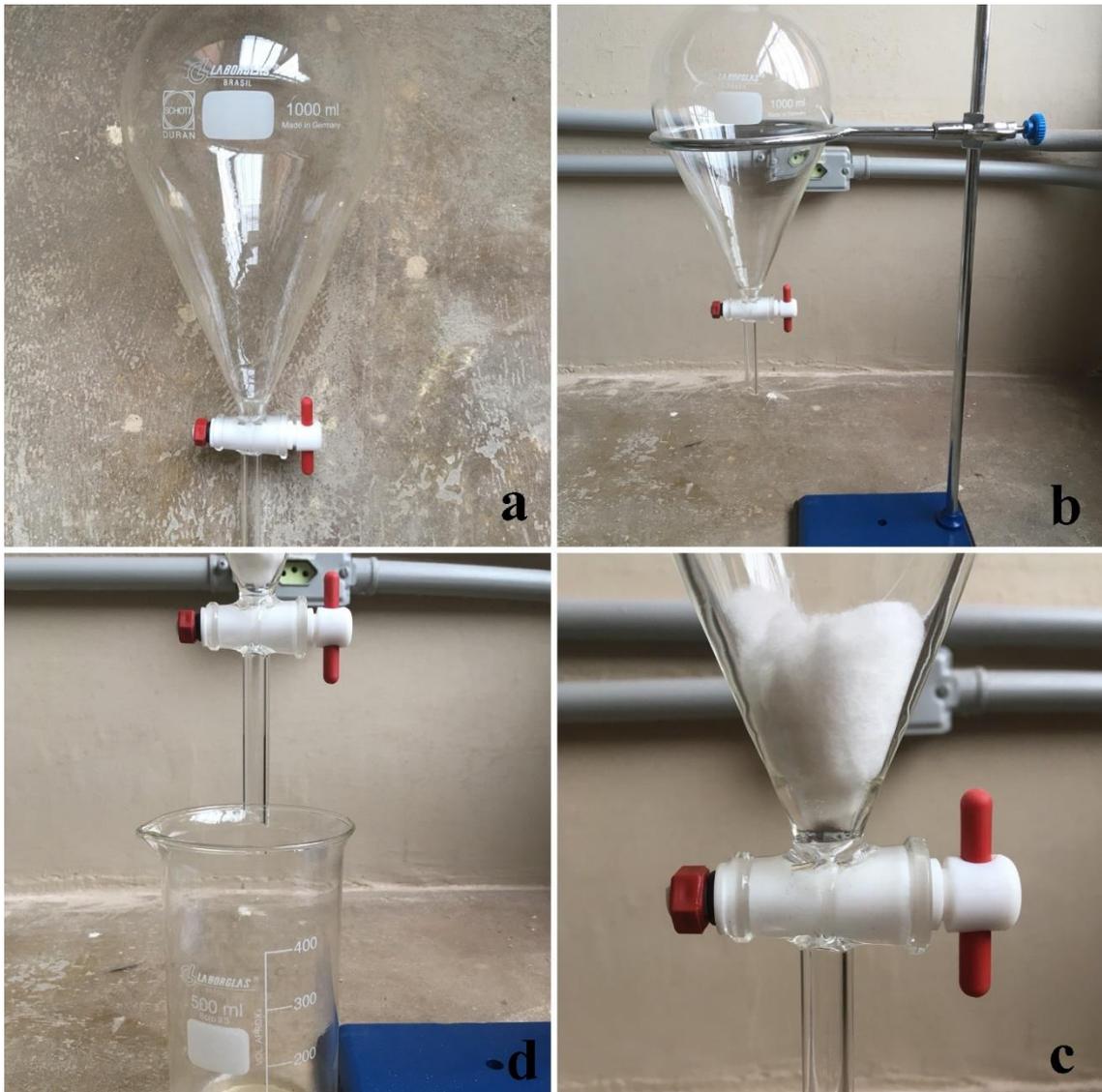


Figura A1.1 Material utilizado para experimento de aquisição da porosidade efetiva das frações de areia grossa e fina que serão posteriormente utilizadas nos outros modelos físicos. a) Funil de Separação de 1000ml b) Funil de Separação no suporte c) Algodão colocado na base do funil d) Becker utilizado para coletar água durante o experimento, posicionada abaixo da montagem



Figura A1.2 Ambos os modelos de porosidade preenchidos com areia de granulometria média e fina respectivamente.

Tabela A1.1 Tabela de classificação das peneiras utilizadas em ensaios granulométricos e suas aberturas em mm, segundo ABNT 2003.

Abertura	Tyler	ASTM E11-1995	ISO 3310-01 1997	Abertura	Tyler	ASTM E11-1995	ISO 3310-01 1997
mm	Mesh		mm	µm	Mesh		µm
125	-	5 in.	125	850	20	Nº. 20	850 R40/3
106	-	4.24 in.	106 R40/3	710	24	Nº. 25	710
100	-	4 in.	100 R 20	600	28	Nº. 30	600 R40/3
90	-	3 1/2 in.	90	500	32	Nº. 35	500
75	-	3 in.	75 R40/3	425	35	Nº. 40	425 R40/3
63	-	2 1/2 in.	63	355	42	Nº. 45	355
53	-	2.12 in.	53 R40/3	300	48	Nº. 50	300 R40/3
50	-	2 in.	50 R/20	250	60	Nº. 60	250
45	-	1 3/4 in.	45	212	65	Nº. 70	212 R40/3
37,5	-	1 1/2 in.	37,5 R40/3	180	80	Nº. 80	180
31,5	-	1 1/4 in.	31,5	150	100	Nº. 100	150 R40/3
25	-	1 in.	25 R20	125	115	Nº. 120	125
22,4	-	7/8 in.	22,4	106	150	Nº. 140	106 R40/3
19,0	-	3/4 in.	19 R40/3	90	170	Nº. 170	90
16,0	-	5/8 in.	16	75	200	Nº. 200	75 R40/3
13,2	-	0.530 in.	13,2 R40/3	63	250	Nº. 230	63
12,5	-	1/2 in.	12,5 R20	53	270	Nº. 270	53 R40/3
11,2	-	7/16 in.	11,2	45	325	Nº. 325	45
9,50	-	3/8 in.	9,5 R40/3	38	400	Nº. 400	38 R40/3
8,00	2,5	5/16 in.	8,0	32	450	Nº. 450	32 R20/3
6,70	3	0.265 in.	6,7 R40/3	25	500	Nº. 500	25 R20/3
6,30	-	1/4 in.	6,3 R20	20	635	Nº. 635	20 R20/3
5,60	3,5	No. 3.1/2	5,6				
4,75	4	No. 4	4,75 R40/3				
4,00	5	No. 5	4				
3,35	6	No. 6	3,35 R40/3				
2,80	7	No. 7	2,8				
2,36	8	No. 8	2,36 R40/3				
2,00	9	No. 10	2				
1,70	10	No. 12	1,7 R40/3				
1,40	12	No. 14	1,4				
1,18	14	No. 16	1,18 R40/3				
1,00	16	No. 18	1				

in - polegada = 25,40 mm
µm - micrometro = 0,001 mm

Tabela A1.2 Tabela com os limites de fração do solo pelo tamanho dos grãos, segundo ABNT 2003.

Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos segundo a ABNT	
Fração Limites	
Matacão	25 cm a 1 m
Pedra	7,6 cm a 25 cm
Brita	4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	1,2 mm a 4,8 mm
Areia média	0,3 mm a 1,20 mm
Areia fina	0,05 mm a 0,3 mm
Silte	0,005 mm a 0,05 mm
Argila inferior a	0,005 mm

ii. Modelo da Lei de Darcy

Para a montagem de cada modelo, foram utilizadas (Figura A1.3)

- Duas garrafas pets com o fundo cortado
- Dois tubos de acrílico com tecido colado em uma de suas extremidades
- Mangueira de silicone
- Um Becker de plástico furado na base



Figura A1.3: Material utilizado para a construção de um dos modelos de Lei de Darcy. Foram construídos dois modelos de Lei de Darcy, sendo um preenchido por areia de granulometria média, segundo tabela 1.2 e o segundo preenchido por areia de granulometria fina, segundo tabela 1.2.

A montagem do modelo seguiu as seguintes etapas:

1) juntou-se as duas garrafas pets de volume 3 l, de fundo cortado (Figura 1.4a), com auxílio de cola epóxi incolor (Figura 1.4c). Para facilitar o encaixe, realiza-se pequenos cortes na parte inferior da garrafa (Figura 1.4b). Quando a cola epóxi secou por completo, colocou-se fita vedarosa em toda união das garrafas (Figura 1.4d). Em seguida, impermeabilizou-se a fita vedarosa com o uso de cola de silicone (Figura 1.4e). Para finalizar, colocou-se fita isolante preta reforçada em toda área de união das garrafas (Figura 1.4f e g);

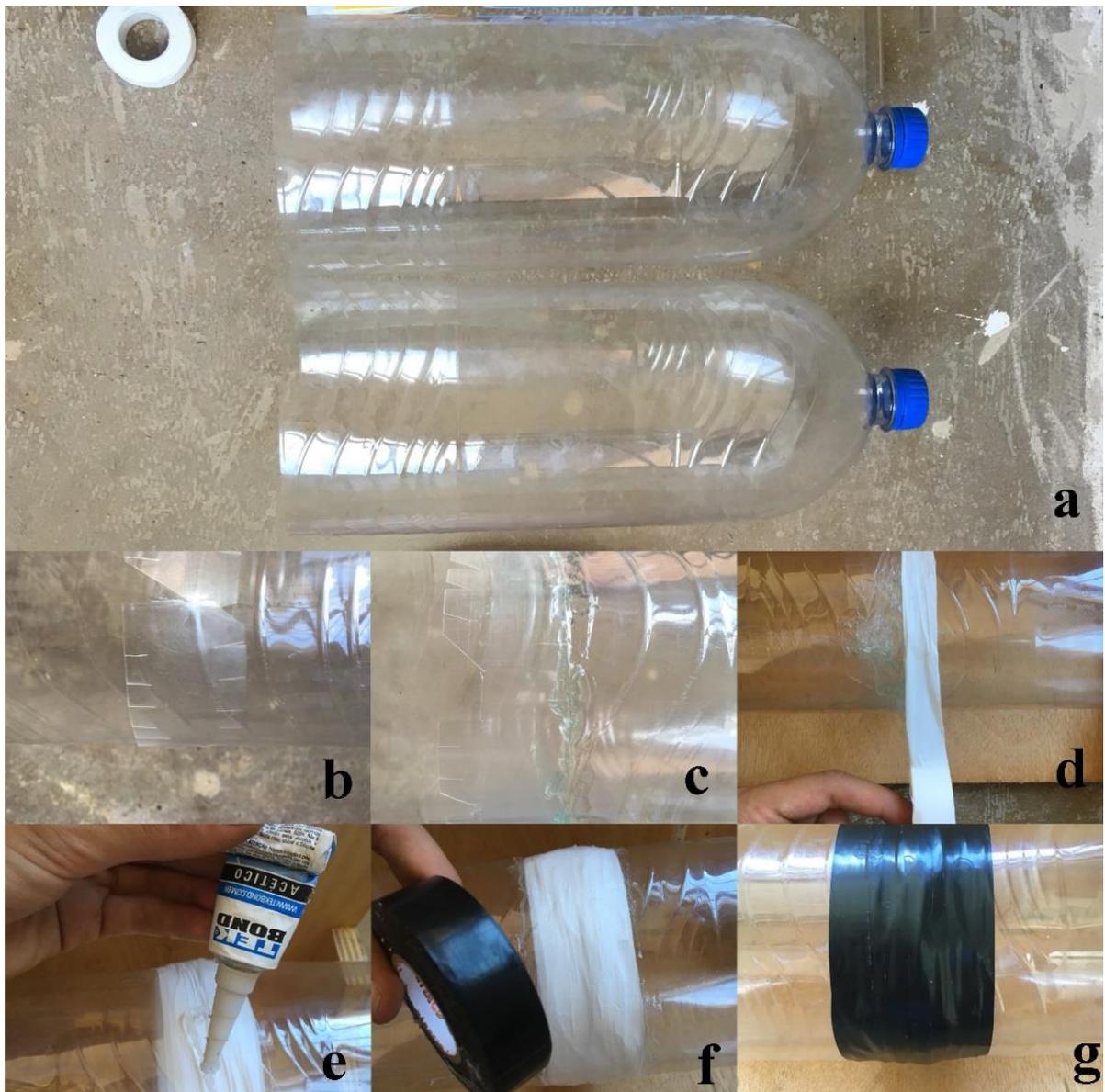


Figura A1.4: Montagem da primeira etapa da montagem do modelo de Lei de Darcy a) duas garrafas pets de 3000ml de volume b) pequenos cortes feitos na parte inferior da garrafa c) uniu-se as duas garrafas com uso de cola epóxi incolor d)união reforçada por fita vedarosa e) impermeabiliza-se a fita rosca com uso de cola de silicone incolor f) finaliza-se a união com fita isolante reforçada g) união finalizada entre as duas garrafas.

2) Para impedir que, ao ser introduzido no sistema, suba qualquer quantidade de areia nos tubos que representarão os piezômetros, colou-se na extremidade um retalho de tecido (Figura 1.5).

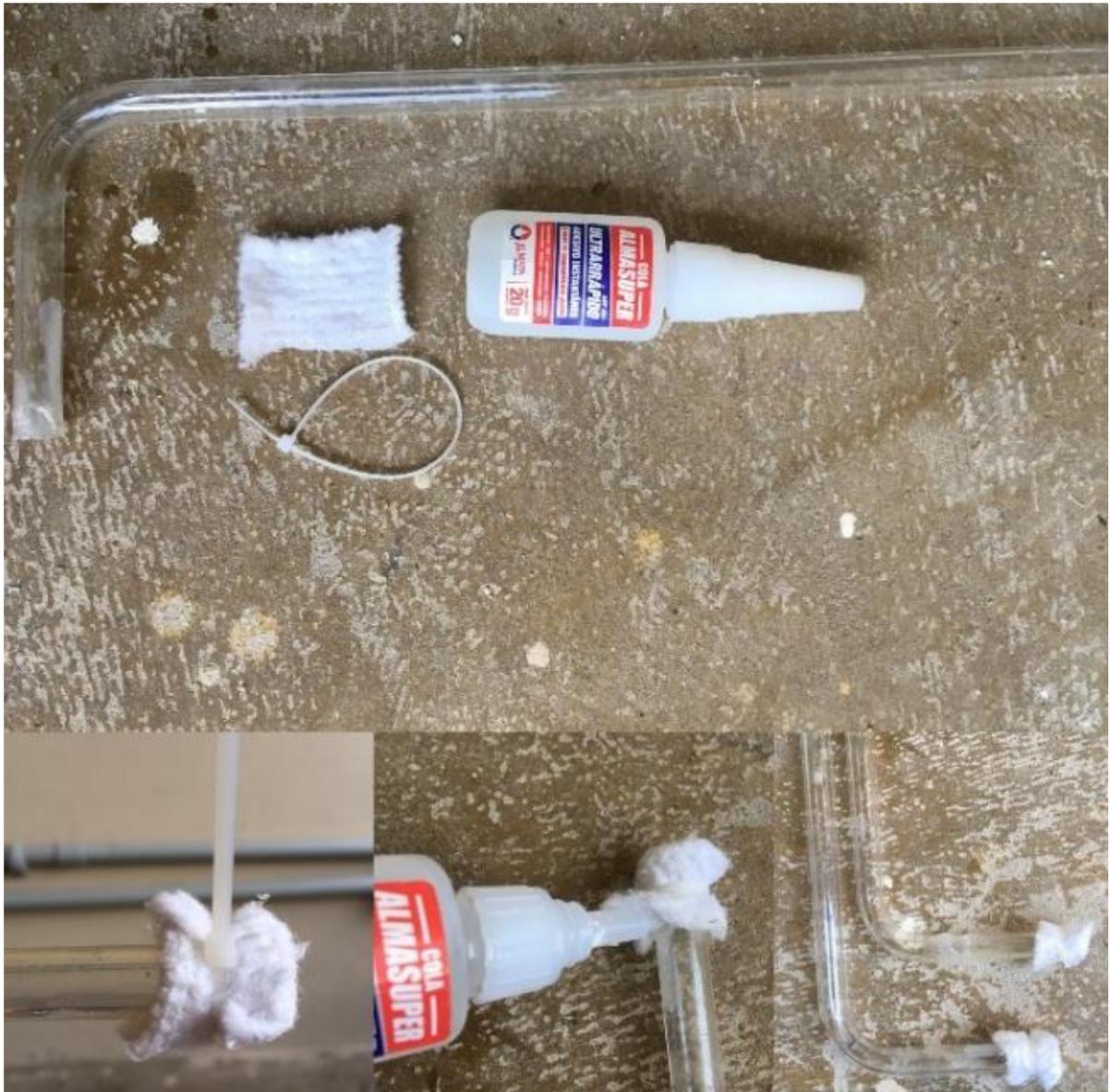


Figura A1.5: Tubo que irá representar o piezômetro no sistema do modelo de Lei de Darcy. Para impedir entrada de areia no mesmo, cola-se um pequeno pedaço de tecido.

3) Para a entrada de água no sistema, furou-se um Becker plástico com auxílio de uma furadeira com broca de número 8 (8 mm de diâmetro) e, em seguida, cortou-se um pedaço de mangueira de silicone e introduzindo-a no furo. Em seguida, colou-se a mangueira com uso de cola epóxi incolor e reforçando-a com cola de silicone incolor. Para finalizar, furou-se uma das tampas da garrafa pet com auxílio de uma tesoura de ponta, introduzindo a outra extremidade da mangueira neste furo. Em seguida, para impedir que entre areia na mangueira, colou-se um

pedaço de tecido em sua extremidade. Para finalizar, usou-se cola de silicone dentro da tampa, para impedir vazamentos de água (Figura 1.6).

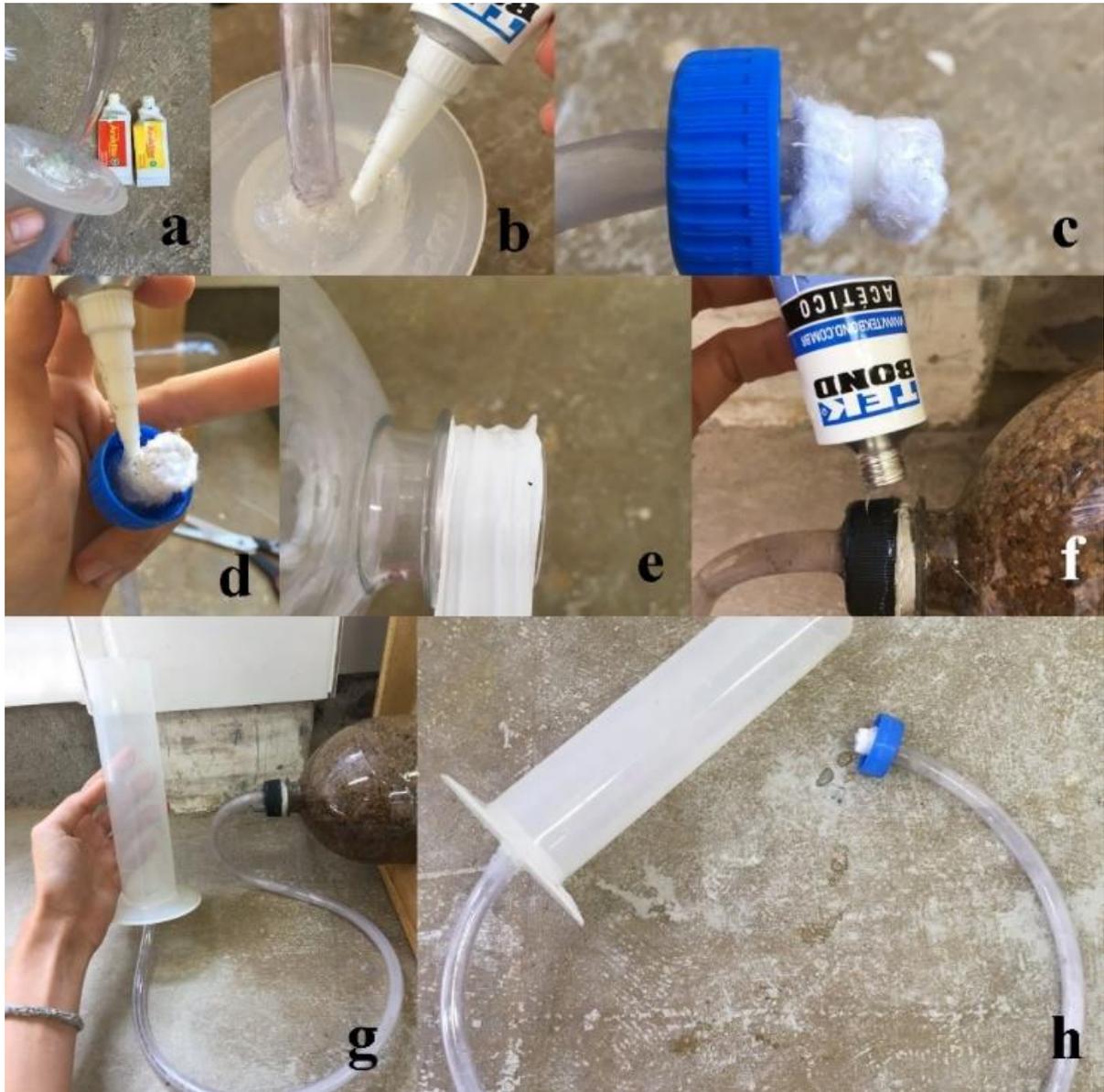


Figura A1.6: Montagem do sistema que será utilizado para introduzir água ao modelo. a) Utiliza-se um Becker de plástico furado em sua base, no furo introduz-se um pedaço de mangueira de silicone, que é colada com cola epóxi incolor; b) após a cola seca, reforça-se com cola de silicone incolor, para impedir vazamentos de água; c) a outra ponta da mangueira será introduzida no furo de uma das tampas das garrafas pets, sendo em seguida, a ponta da mangueira revestida por um pedaço de tecido; d) aplica-se cola de silicone, na parte interna da tampa, com cuidado pois a tampa será rosqueada na garrafa novamente; e) antes de rosquear o sistema de entrada no modelo, aplica-se fita vedarosa na boca da garrafa; f) após fazer a conexão do sistema ao modelo, aplica-se cola de silicone para impedir vazamentos de água; g) sistema conectado ao modelo; h) sistema pronto antes de ser conectado ao modelo.

4) Para a saída da água, fura-se a outra tampa da garrafa pet com auxílio de uma tesoura de ponta, introduz-se um pedaço de mangueira de silicone no furo. Em seguida cola-se um pedaço de tecido nesta extremidade, para impedir a passagem de areia, finalizando com cola de silicone para impedir vazamentos de água (Figura1.7).

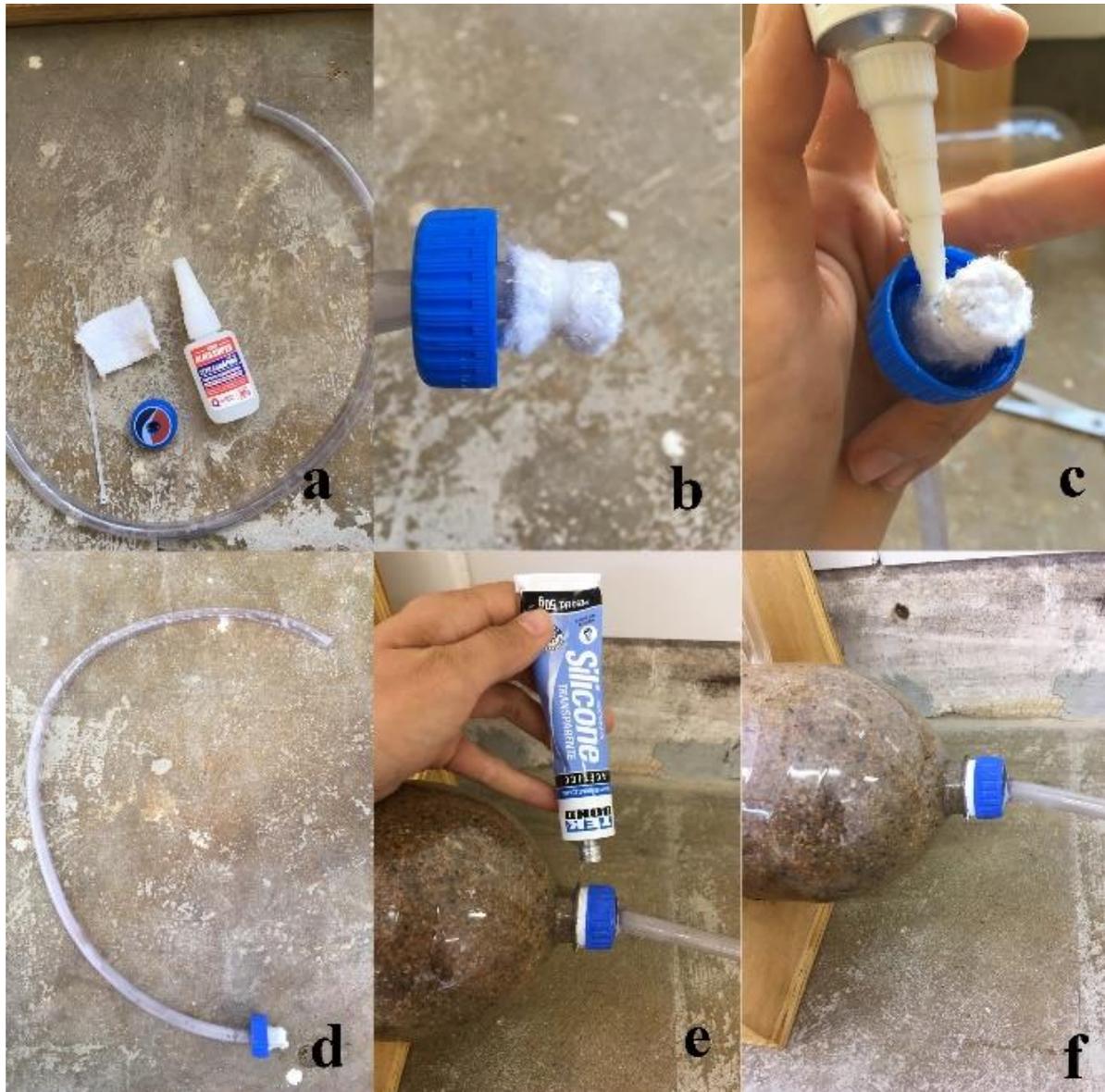


Figura A1.7: Forma que o sistema de saída da água do modelo foi feito. a) material utilizado para construção do mesmo; b) insere-se na tampa, já furada, uma das extremidades da mangueira de silicone recobrendo a mesma com um tecido em seguida; c) aplica-se cola de silicone transparente no interior da tampa para impedir vazamento de água; d) sistema pronto antes de ser conectado ao modelo; e) após cobrir a boca da garrafa pet com fita vedarosa, coloca-se a tampa com a mangueira conectada e aplica-se cola silicone incolor para impedir vazamentos; f) sistema conectado a boca de saída da água do modelo.

5) Para o modelo que será preenchido com areia média, usa-se areia com granulometria entre 0,871mm e 1,15mm peneirada com peneiras segundo Tabela 1.1. Para o modelo que será preenchido com área fina, utiliza-se areia de granulometria compreendida entre 0,105mm e 0,210mm peneirada com peneiras segundo Tabela 1.1. Para introduzir as areias, é necessário uso de um funil pequeno. 6) Ao se fechar o modelo, para evitar vazamentos pelas tampas da garrafa, usa-se fita vedarosca e cola de silicone incolor (Figura 1.7 “e” e “f”). 7) Para introduzir os tubos no modelo, com auxílio de uma tesoura ou estilete, faz –se dois cortes em X, com distância entre eles de aproximadamente 30cm. Após introduzir os tubos, deve-se usar cola epóxi e cola de silicone transparente, para que o tubo não se movimente e para que não ocorra vazamentos de água (Figura 1.7).

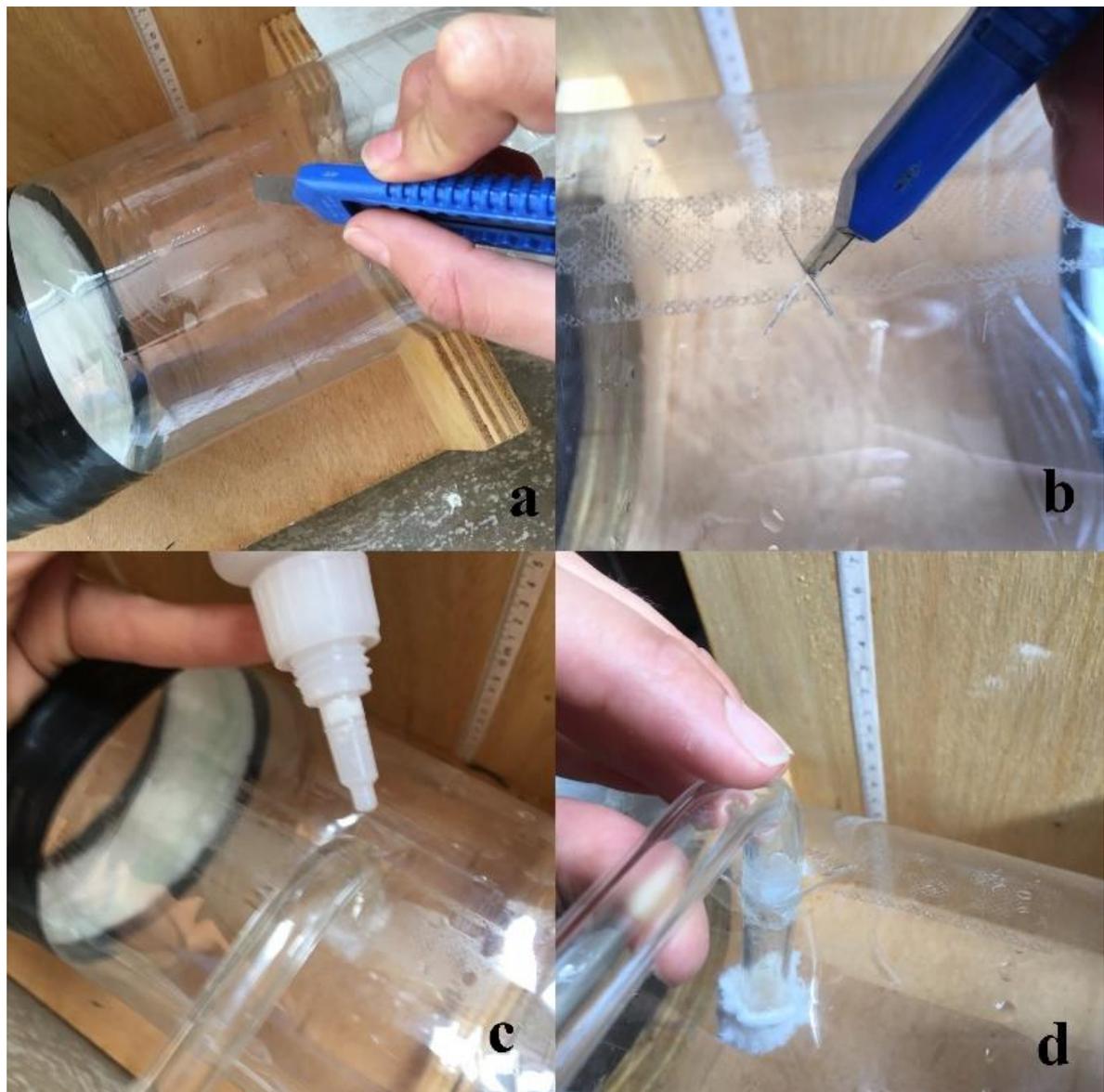


Figura A1.8: Forma como é introduzido o tubo que representa os piezômetros no sistema: a e b) com auxílio de estilete, cria-se dois cortes em X na garrafa, com distância entre 10 e 15 cm; c e d) introduz-se os dois tubos nos furos e põe-se uma gota de cola instantânea apenas no contato do tubo com a garrafa; e) aplica-se cola de silicone ao redor para que não ocorra vazamentos de água. Aguarda-se 24h para secagem completa.

Os modelos prontos são então preenchidos com suas respectivas granulometrias de areia e em seguida executados (Figura1.9 e Figura2.0).

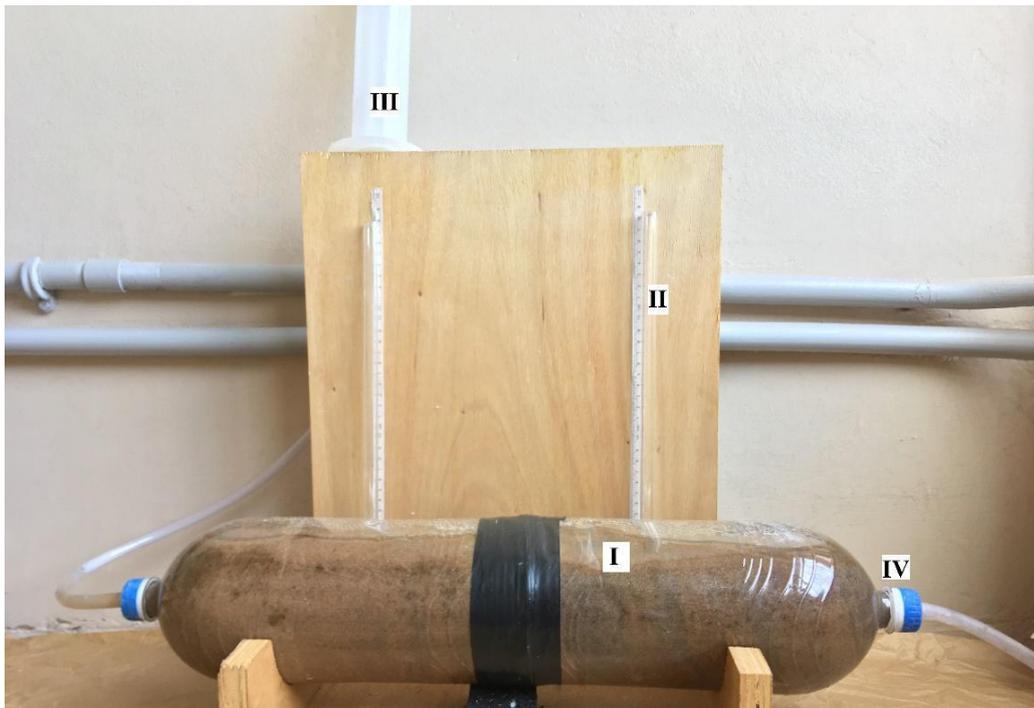


Figura A1.9: Modelo preenchido com areia fina. I) ambas as garrafas pets coladas; II) tubos de acrílico representando os piezômetros; III) Becker em que é feita a entrada de água no sistema; IV) saída de do modelo.

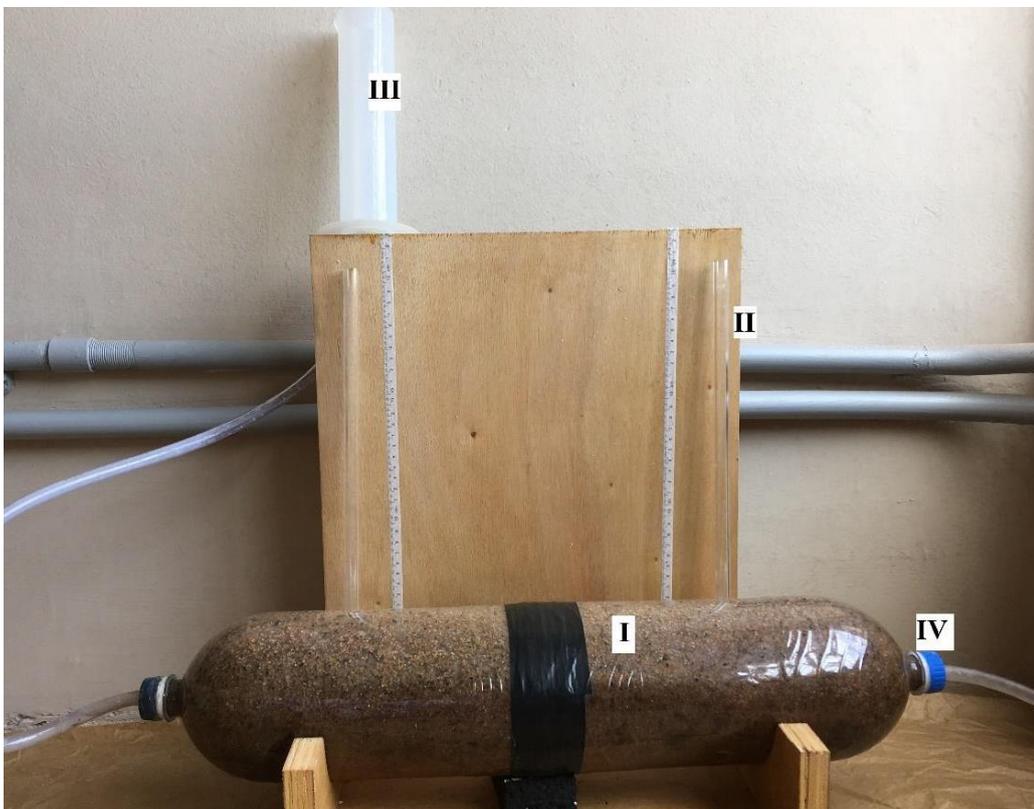


Figura A2.0: Modelo preenchido com areia média. I) ambas as garrafas pets coladas; II) tubos de acrílico representando os piezômetros; III) Becker em que é feita a entrada de água no sistema; IV) saída de do modelo.

iii. Modelo de rede de fluxo

Para o modelo de rede de fluxo foi utilizado um “aquário” feito com acrílico de 5mm de espessura medindo 40 cm de altura, 60 cm de comprimento e 6 cm de profundidade. Em cada lateral do modelo existe um compartimento medindo 5 cm de largura e 5 cm de comprimento, por onde a água é colocada no sistema. A água entra no “aquário” através dos furos presentes nas laterais desse compartimento.

Para preenchimento do modelo utilizou-se areia nas seguintes granulometrias:

- 1) Areia média com granulometria variando entre 0,871 mm e 1,14 mm;
- 2) Areia fina com granulometria variando entre 0,105 mm e 0,271 mm. Ambas foram classificadas utilizando-se peneiras segundo tabela 1.2.

O modelo foi dividido em duas partes (Figura 2.1): uma metade homogênea, utilizando-se apenas areia de granulometria média; e a segunda metade heterogênea em que foi utilizado areia de granulometria média, uma lente de argila e uma lente de areia de granulometria grossa (1,40 mm e 2,00 mm, separada da mesma forma que as outras duas areias).

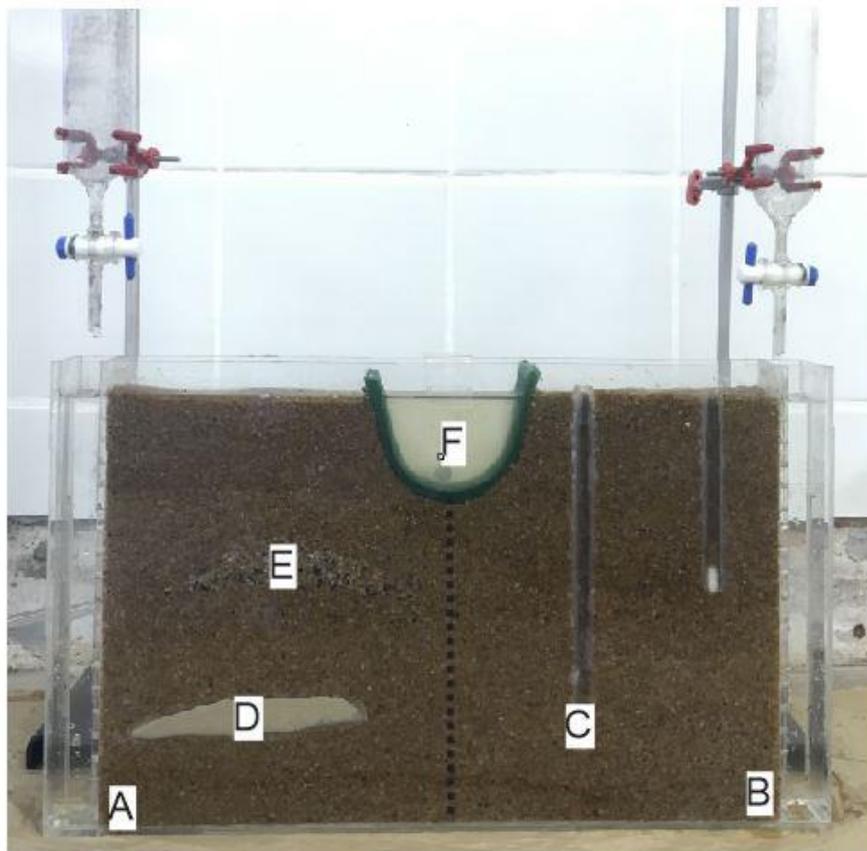


Figura A2.1: Modelo físico para visualização da rede de fluxo. O lado A foi preenchido com areia de granulometria média junto com uma lente de argila (D) e uma lente de areia grossa (E) formando o lado heterogêneo do modelo. O lado B foi preenchido com areia de granulometria média e possui dois piezômetros (C). F representa o rio do modelo.

iv. Modelo de aquífero

Para o modelo de rede de fluxo foi utilizado um “aquário” feito com acrílico de 5mm de espessura medindo 50 cm de altura, 80 cm de comprimento e 6 cm de profundidade. Em cada lateral do modelo existe um compartimento medindo 5 cm de largura e 5 cm de comprimento, por onde a água é colocada no sistema. A água entra no “aquário” através dos furos presentes nas laterais desse compartimento.

Antes de preencher o modelo criou-se um projeto simples com auxílio do programa Corel Draw X6 que foi utilizado como base durante a montagem do modelo final (Figura 2.2).

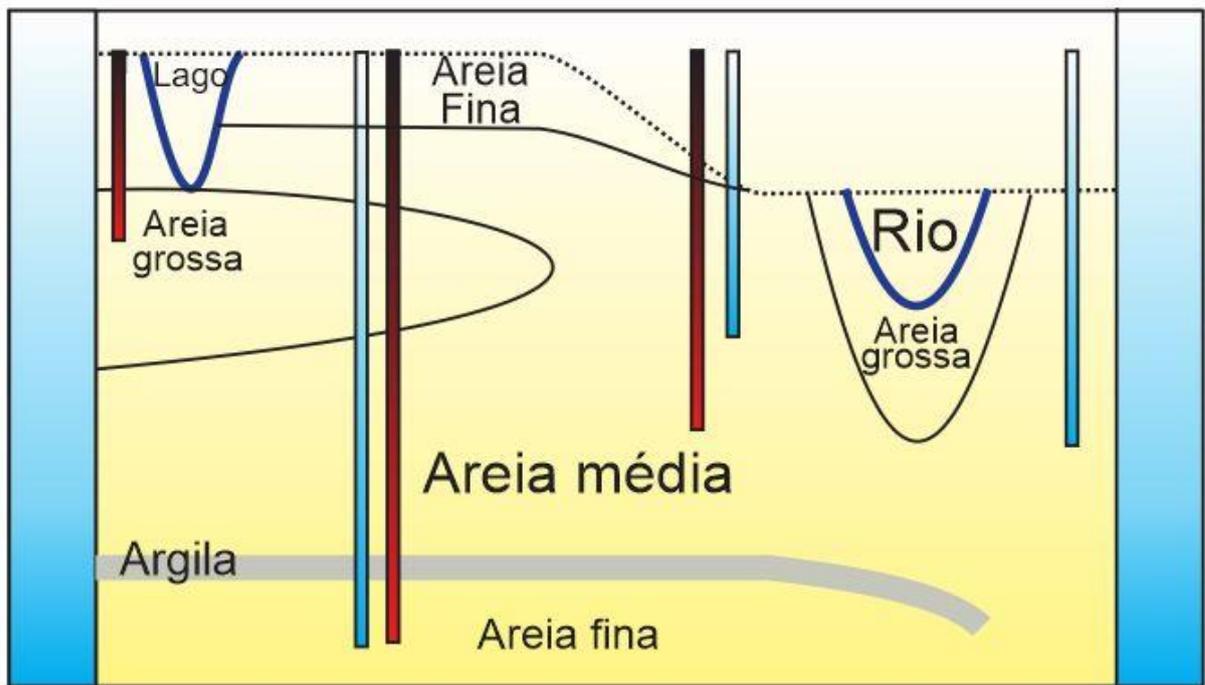


Figura A2.2: Projeto utilizado como base para preenchimento do modelo de aquífero. Os poços em azul representam os piezômetros e os poços em vermelho serão os utilizados para introdução de corante no sistema, representando contaminantes.

Seguindo o modelo (Figura 2.2) como base, montou-se o modelo em no “aquário”, respeitando as lentes de diferentes granulometrias e a diferença de cota entre o lago e rio.

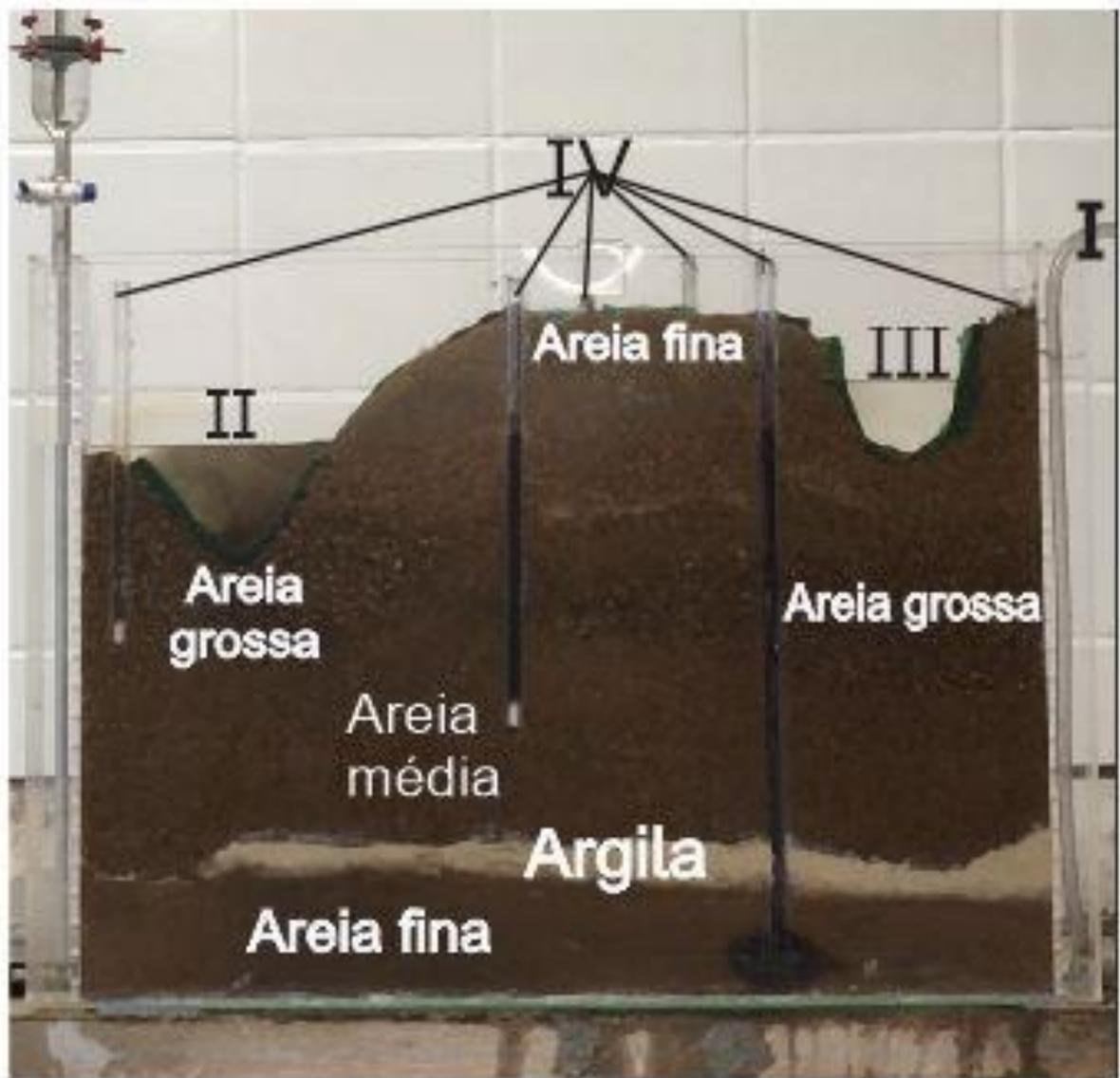


Figura A2.3: Modelo de aquífero pronto. I: recarga de água, feita com mangueira de silicone, acoplada a uma torneira mantida em vazão constante; II: descarga de água, forjando um rio; III: Lago; IV: poços para representar piezômetros e poços de contaminantes.