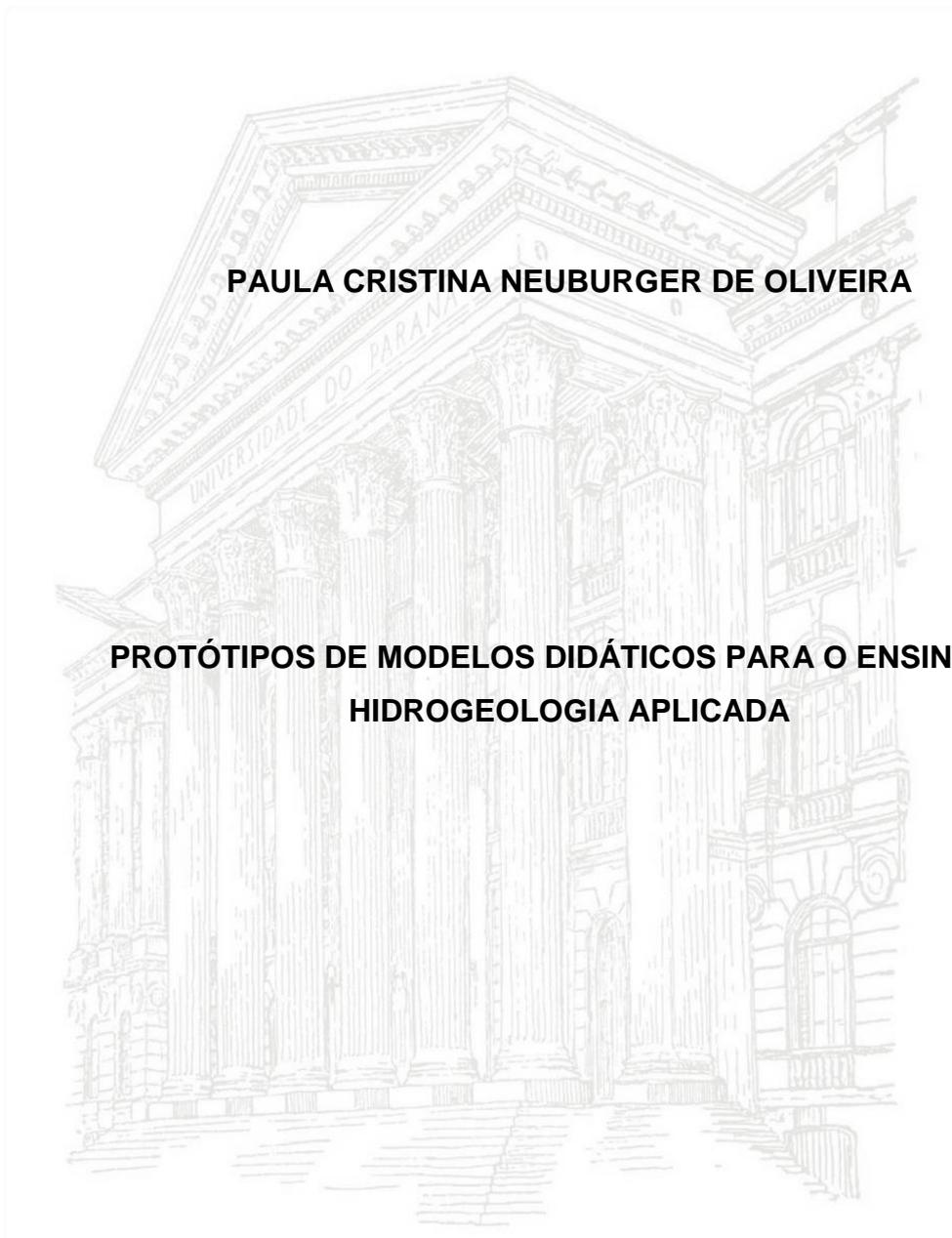


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
CURSO DE GEOLOGIA**

**PAULA CRISTINA NEUBURGER DE OLIVEIRA**

**PROTÓTIPOS DE MODELOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DE  
HIDROGEOLOGIA APLICADA**



**CURITIBA**

2017

**PAULA CRISTINA NEUBURGER DE OLIVEIRA**

**PROTÓTIPOS DE MODELOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DE HIDROGEOLOGIA  
APLICADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Geologia da Universidade Federal do  
Paraná como requisito parcial à obtenção do  
grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof.Dr. Eduardo Chemas Hindi

**CURITIBA**

2017

Ao meu pai João e à minha avó Alcina (*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho teve apoio logístico e financeiro do Professor Orientador Eduardo Chemas Hindi, que não mede esforços para levar educação de qualidade aos seus alunos. Agradeço ao professor todo o suporte e incentivo durante a graduação, os quais foram fundamentais para minha formação acadêmica e pessoal.

Agradeço à família, especialmente ao meu pai, por compartilharem esta trajetória comigo, acreditando em mim e me dando suporte em todos os sentidos. Mesmo quando estiveram sob dificuldades, sempre agiram de forma positiva, com palavras de amparo, o que me fez continuar a busca pelo sonho da graduação.

Parte fundamental desta conquista também são os amigos, os próximos e os distantes, com quem compartilhei momentos de sofrimento e de alegria ao longo dessa graduação. Em especial, agradeço à Letícia, ao Alberto, à Pirata, à Daiane, à Janaína, à Taís, ao Sérgio, à Laisa, à Andreina, e à Julia, pela amizade incondicional e pelo apoio na realização deste trabalho.

Também agradeço à UFPR e ao departamento de Geologia, que proporcionaram esta oportunidade de pesquisa e de formação acadêmica. Sou especialmente grata à Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis da UFPR, que sempre ofereceu suporte para minha manutenção na universidade.

## RESUMO

O ensino de hidrogeologia aplicada requer estímulos práticos, com recursos capazes de simular situações reais do ambiente subterrâneo. Neste contexto, foram construídos dois protótipos de modelos de aquífero granular e um permeâmetro de carga constante para complementar a metodologia de ensino de Hidrogeologia. Os modelos consistem em reproduzir, em escala reduzida, o movimento do fluxo subterrâneo em condições livres e confinantes, e em ambientes homogêneos. O permeâmetro tem por objetivo realizar medições de condutividade hidráulica e de permeabilidade intrínseca de materiais inconsolidados. Para a construção dos equipamentos, os principais materiais utilizados foram placas e um tubo de acrílico. As unidades reservatório foram representadas por areias de diferentes granulometrias e a unidade confinante foi montada com argila para cerâmica. Foram adicionados corantes de anilina aos experimentos para auxiliar o monitoramento do fluxo dos fluidos através dos sedimentos. Os modelos de aquífero granular mostraram-se eficientes para simulação de condições de fluxo em ambiente natural, sendo possível observar o nível potenciométrico e freático, bem como o fluxo de contaminantes em condições de fluxo estacionário e transiente. O permeâmetro de carga constante apresentou problemas de impermeabilização, o que inviabilizou a realização de experimentos para o momento deste trabalho. Os experimentos foram registrados em vídeos, para permitir suas demonstrações em outras ocasiões.

**Palavras chave:** protótipo, modelo, aquífero, permeâmetro, fluxo.

## **ABSTRACT**

Teaching applied hidrogeology requires practical stimulations, with the use of resources which are able to simulate the underground environment. In this context, two prototypes of granular aquifer models and a constant head permeameter were built, as materials to complement the teaching methodology of Applied Hidrogeology I (GC147), from the Geology course at Parana Federal University. The models are capable to reproduce, in a reduced scale, the groundwater flow movement, under unconfined and confined conditions and homogeneous environments. The permeameter goal is to measure the hydraulic conductivity and intrinsic permeability of unconsolidated materials. To build the equipment, the main utensils used were acrylic sheets and an acrylic tube. The reservoir units were represented by sand of various diameters and the confining layer was built with ceramics clay. Aniline dyes were added to help demonstrating the fluid flow through the sediments. The granular aquifer models were efficient to simulate flow conditions in a natural environment, with the possibility to observe the potentiometric level and the water table, as well as the contaminants flow under steady and transient flow conditions. The constant head permeameter showed waterproofing problems, which made the experiments unfeasible for this work. The experiments were recorded in videos, in order to be demonstrated in other occasions.

*Keywords:* prototype, model, aquifer, permeameter, flow.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Seção geológica e modelo conceitual elaborado para modelagem numérica. .5	5
Figura 2: a) Modelo vertical utilizado para análise de drenagem agrícola. B) Modelo vertical utilizado para análise de intrusão marinha. ....6	6
Figura 3: Modelo quase tridimensional. ....6	6
Figura 4: Elementos de um permeâmetro de carga constante. ....8	8
Figura 5: Representação de aquíferos livre e confinado. .... 11	11
Figura 6: a) Projeto de construção do aquífero granular com condições confinante e livre; b) Projeto de construção do aquífero granular para demonstração de fluxo..... 14	14
Figura 7: Projeto de construção do permeâmetro de carga constante. .... 15	15
Figura 8: a) Colagem das placas de acrílico em ângulo de 90 graus; b) Utilização de seringa de injeção para colagem. ....16	16
Figura 9: Testes de vazamentos nas caixas construídas. .... 16	16
Figura 10: Relação entre linhas de fluxo e equipotenciais. .... 17	17
Figura 11: a) Vista frontal da caixa preenchida com areia e água; b) Vista superior da caixa preenchida com areia e água. .... 18	18
Figura 12: Adição de corantes de anilina para visualização do fluxo da água..... 19	19
Figura 13: a) Teste de resistência da caixa à água (vista frontal); b) Teste de resistência da caixa à água (vista superior).....20	20
Figura 14: Modelo de aquífero montado com areia e argila simulando unidades reservatório e aquitarde.....20	20
Figura 15: a) Tubo de acrílico utilizado para construção do permeâmetro de carga constante; b) Montagem inicial do permeâmetro; c) Estrutura do permeâmetro montada para realização de experimentos.....21	21
Figura 16: a) Constatação de vazamento no permeâmetro; b) Alocação do material para demonstração da estrutura necessária para o experimento.....23	23
Figura 17: Nivel da água atingido no poço 2 após fluxo de água através da unidade confinada. ....23	23
Figura 18: a) Experimento após 10 minutos da aplicação de corante no tanque séptico e no poço 1; b) Aplicação de corante nos poços 2 e 3 c) Experimento após 26 minutos do início d) Experimento após 15 horas e 10 minutos.....25	25
Figura 19: a) Início do experimento b) Experimento após 12 minutos; c) Experimento após 44 min d) Experimento após 13 horas e 5 minutos.....26	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais utilizados para a confecção dos modelos de aquífero granular e do permeâmetro de carga constante.....	13
---	----

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 JUSTIFICATIVA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 MODELOS DIDÁTICOS .....	3
2.2 PERMEÂMETROS .....	7
2.3 CONCEITOS HIDROGEOLÓGICOS ABORDADOS .....	9
2.3.1 O CICLO HIDROLÓGICO E A ÁGUA SUBTERRÂNEA .....	9
2.3.2 AQUÍFEROS, AQUITARDES E AQUICLUDES .....	10
2.3.3 AQUÍFEROS LIVRES E CONFINADOS .....	10
2.3.4 CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS .....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	13
3.1 MODELO DE FLUXO .....	17
3.2 MODELO DE AQUÍFERO GRANULAR .....	19
3.3 PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE .....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	23
4.1 MODELO DE AQUÍFERO GRANULAR .....	23
4.1.1 RECARGA E POTENCIOMETRIA DA UNIDADE CONFINADA .....	23
4.1.2 CONTAMINANTES .....	24
4.2 MODELO DE FLUXO .....	25
4.3 PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE .....	26
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	26
REFERÊNCIAS .....	28

## 1. INTRODUÇÃO

A hidrogeologia foi definida originalmente por Lamarck (1802) como a ciência que descreve a influência da água na morfologia da superfície da Terra. O conceito atual, definido por Joseph Lucas, em 1877, entende esta ciência como um ramo da geologia que estuda as águas subterrâneas, abordando sua distribuição e as interações em relação ao ambiente geológico (Manoel Filho 2008a). O estudo de águas subterrâneas é fundamental para a compreensão das formas de ocorrência, do comportamento hidrodinâmico, das formas de exploração e de qualidade dos aquíferos e das suas relações com mudanças ambientais e atividades antrópicas (Iritani & Ezaki 2010).

De acordo com Fetter (1994), os estudos clássicos em hidrogeologia abordam tratamentos matemáticos de fluxo através de meios porosos ou uma descrição geológica geral sobre a distribuição de rochas por onde a água subterrânea circula, considerando, em geral, condições ideais. A hidrogeologia aplicada propõe o estudo de variáveis que se aproximam de situações reais, apresentando, por exemplo, propostas de planos para o aproveitamento da água subterrânea, determinação de zonas de captação em um campo de poços para prevenir contaminação, caracterização de plumas de água subterrânea contaminada, entre outros.

Em geral, o ensino de Hidrogeologia é feito por meio de aulas expositivas, exercícios práticos e aulas de campo. Como proposta de complementação ao método de ensino, foram construídos dois protótipos de modelos físicos de aquíferos e um permeâmetro de carga constante, para serem usados como recursos práticos que proporcionem uma melhor compreensão e interação pelos alunos com os temas abordados.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A hidrogeologia aplicada trata dos aspectos práticos da área de hidrogeologia. Como exemplos, têm-se a hidráulica de poços, os métodos de perfuração, os sistemas de bombeamentos, entre outros. Algumas situações previstas nestas temáticas são passíveis de reprodução em laboratório, através da utilização de modelos que simulem condições encontradas em ambiente subterrâneo.

Os modelos físicos são importantes ferramentas para a compreensão e a mensuração de processos e propriedades naturais. Rahn & Davis (1996) mencionam que estes modelos estimulam o interesse e o envolvimento dos alunos, visto o aumento da disposição dos mesmos ao trabalhar com informações obtidas por meios próprios, comparando-se a quando utilizam somente dados da literatura.

No ensino de hidrogeologia aplicada, estes equipamentos podem auxiliar na fundamentação e compreensão dos controles hidrogeológicos que envolvem a migração da água subterrânea e sua interação com o meio em escala reduzida (Diniz Filho et al. 2008). Contudo, a atual abordagem da disciplina não conta recursos desta natureza, os quais têm muita utilidade para análise de fenômenos e processos, principalmente aqueles sem uma representação matemática apropriada (Cabral & Demetrio 2008).

Com os modelos de aquífero, foi compreendida a interação entre o fluxo da água subterrânea e os contaminantes em diferentes contextos geológicos de interação água-rocha. Para isso, os materiais construídos são demonstrativos de aquífero granular (porosidade primária) em situações confinantes e não confinantes, onde foram representadas condições de ambientes homogêneos. Os modelos permitem abordar temas como fluxo da água subterrânea, nível potenciométrico e freático, condições artesianas e livres de aquíferos granulares. O permeâmetro de carga constante tem por objetivo determinar condutividade hidráulica e permeabilidade intrínseca de materiais granulares inconsolidados.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto consistiu em confeccionar dois modelos físicos de aquíferos, para demonstração do fluxo de fluidos em ambiente granular e homogêneo, e de um permeâmetro de carga constante para a ensino de Hidrogeologia Aplicada, a fim de difundir a compreensão da aplicação de conceitos hidrogeológicos. Desse modo, pretende-se colaborar para despertar do interesse pela área em questão e para complementar a formação profissional dos alunos. Além disso, os produtos obtidos poderão servir de base para estudos futuros na área de hidrogeologia e hidrogeologia aplicada.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MODELOS DIDÁTICOS

Em uma definição simples, modelos são reproduções de um determinado fenômeno para uma proposta específica (Gilbert et al. 2000). Em ciências, esta representação está associada à simplificação de objetos, sejam eles parte de um sistema ou um sistema completo. Os modelos podem ter diversos tamanhos a depender do fenômeno que se tem interesse em representar, dependendo do tema tratado.

Na literatura, o método de ensino através de modelos está inserido no contexto do ensino baseado em investigação. Neste conceito, os alunos são estimulados a formularem suas próprias questões relacionadas ao conteúdo e a guiarem sua pesquisa em busca de respostas. Com isso, os professores buscam provocar a curiosidade e o raciocínio dos alunos, ao invés de simplesmente fornecer instruções diretas. Alunos estimulados por este método apresentam mais facilidade em aplicar seu conhecimento em situações reais (Towns & Sweetland 2008).

Justi (2006) menciona a importância da elaboração de modelos na construção do conhecimento científico. Em aulas de química, a autora menciona que o resultado desta prática é observado em discussões de estudos de caso, a partir das atitudes dos alunos nas diversas etapas do processo e das reflexões dos mesmos ao serem questionados sobre os temas. Ribeiro et al. (2014) relata a aplicação de modelos para o ensino das temáticas dos “Ciclos de vida e das Bacias hidrográficas”, onde os alunos construíram mapas de conceitos antes e depois da finalização do projeto. Houve diferenças importantes entre os mapas de conceitos pré-teste e pós-teste elaborados por grupos de controle e experimentais. Com isso, compreendeu-se que os estudantes do grupo experimental apresentaram melhor desempenho no desenvolvimento de raciocínio científico, bem como no recolhimento de fatos, explicação e geração de argumentos.

Outro exemplo foi a experiência de Rahn & Davis (1996), com a implantação de um campo de poços operacionais em *South Dakota School of Mines and Technology* para o estudo de nível estático, superfície potenciométrica, bombeamento, testes de traçadores, modelamento de fluxo e transporte. Os levantamentos foram realizados pelos próprios alunos e geraram produtos base para

o desenvolvimento de modelos hidrogeológicos digitais. Os autores mencionam que o campo foi fundamental para as práticas de ensino e de pesquisa na área em questão.

De acordo com Diniz Filho et al. (2008), em modelos conceituais, pode-se obter dados analíticos que servirão para expressar, de forma aproximada, aspectos como composição química natural de águas subterrâneas de determinado aquífero, em determinada situação geográfica, servindo de referência para ações de controle ambiental e de atividades antropogênicas. Os modelos conceituais possibilitam a agregação de aspectos estudados, auxiliando a compreensão de controles hidrogeológicos que demonstrem variações naturais de composição química de águas subterrâneas de uma área.

Cabral & Demetrio (2008) mencionam que na elaboração de um modelo conceitual, deve-se observar os seguintes itens:

- natureza dos sistemas aquíferos;
- caracterização dos limites dos modelos;
- identificação das condições de contorno;
- levantamento dos valores dos parâmetros hidrogeológicos e;
- levantamento das entradas e saídas hídricas (áreas de recarga e descarga).

Os seguintes parâmetros e variáveis também devem ser considerados:

- geometria – que estabelece a cota da base, o topo e a localização dos limites;
- variáveis externas – que são as recargas, as condições de contorno, as condições iniciais, a carga piezométrica e vazão de poços;
- variáveis de estado – deve-se considerar a velocidade, a concentração, a temperatura, as áreas de recarga e descarga, as relações entre aquíferos, a conexão com a água superficial, os coeficientes de armazenamento e transmissividade;
- parâmetros – trata-se da condutividade hidráulica, da capacidade de infiltração, da resistência hidráulica (camada semiconfinante) e da viscosidade;

- constantes – são a massa específica, o coeficiente de compressibilidade e a aceleração da gravidade.

Modelos conceituais podem ser classificados em tridimensionais, bidimensionais horizontais, bidimensionais verticais e quase tridimensionais. A figura 1 apresenta um exemplo de modelo conceitual do sistema aquífero da planície do *Snake River* (Cabral & Demetrio, 2008).

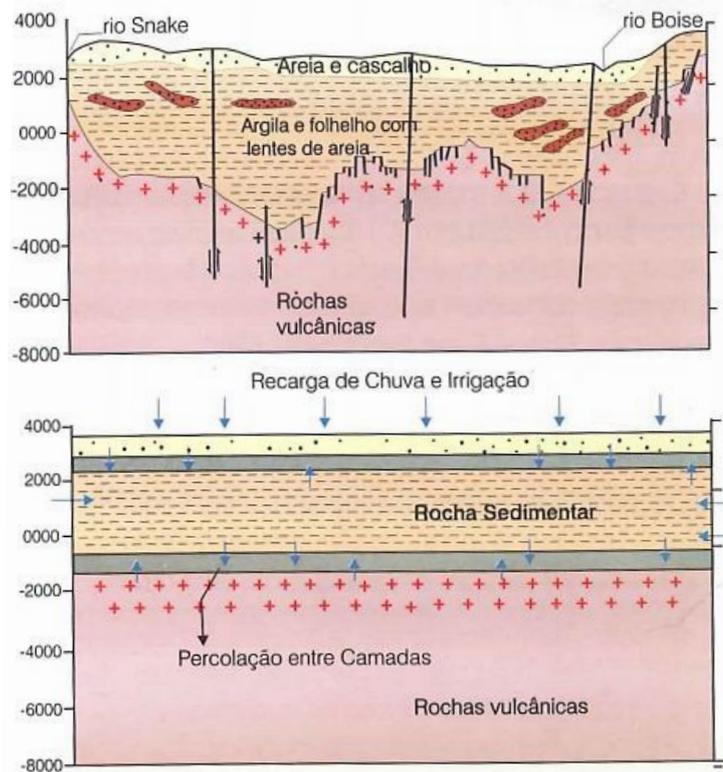


Figura 1: Seção geológica e modelo conceitual elaborado para modelagem numérica (Retirado de Cabral & Demetrio 2008 modificado de Lindholm 1986).

Modelos tridimensionais têm importância na análise das componentes de fluxo vertical, enquanto modelos bidimensionais horizontais consideram invariabilidade na direção vertical e, em simulações computacionais, são utilizadas equações com base nas variáveis X e Y. Os modelos bidimensionais verticais são utilizados quando características físicas e hidrogeológicas permanecem constantes ao longo de uma direção. A figura 2 ilustra dois exemplos de modelos verticais, aplicados para análise de drenagem agrícola e de intrusão marinha.

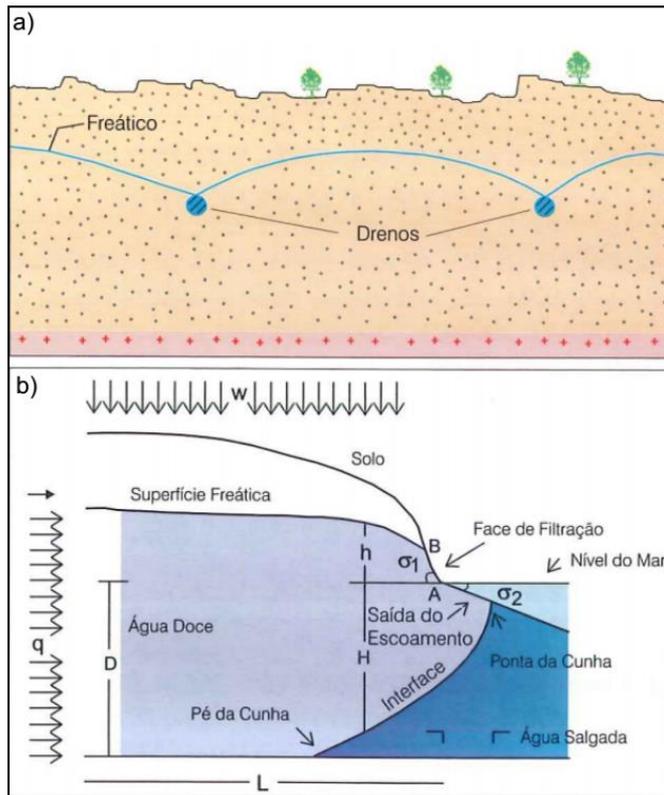


Figura 2: a) Modelo vertical utilizado para análise de drenagem agrícola. B) Modelo vertical utilizado para análise de intrusão marinha (Retirado de Cabral & Demetrio 2008 adaptado de Cabral & Wrobel 1993).

Por último, o modelo quase tridimensional simula vários aquíferos superpostos intercalados com outras camadas semipermeáveis. Nesse modelo, desconsideram-se as cargas hidráulicas e a capacidade de armazenamento das camadas confinantes (Figura 3).

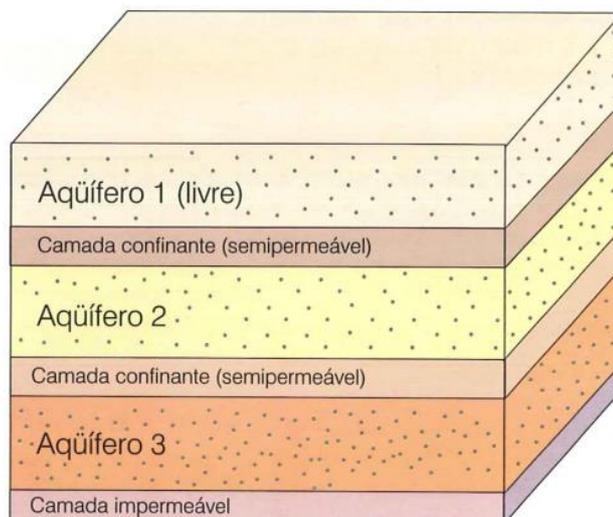


Figura 3: Modelo quase tridimensional, onde as propriedades de drenança das camadas confinantes são usadas para conectar os aquíferos 1, 2 e 3 (Cabral & Demetrio 2008).

## 2.2 PERMEÂMETROS

De acordo com Fetter (1994), permeâmetros são equipamentos que permitem medir a condutividade hidráulica de materiais em laboratório com carga constante ou variável. Permeâmetros de carga constante são utilizados para sedimentos não coesivos, com coeficiente de permeabilidade (k) superiores a  $10^{-4}$  cm s<sup>-1</sup> (Reddy 2002).

Para o funcionamento do permeâmetro de carga constante, a água armazenada em um reservatório a carga constante flui, através da amostra colocada no permeâmetro, a uma taxa contínua. Com isso, determina-se a condutividade hidráulica aplicando-se uma variação da lei de Darcy (equação 1). O fluido drenando do permeâmetro (V) é coletado em um recipiente graduado e registrado o intervalo de tempo decorrido. Assim,  $Qt = V$ .

$$Qt = \frac{-KAt(h_A - h_B)}{L} \quad \text{Equação 1}$$

Substituindo-se Qt por V e utilizando-se h para  $-(h_A - h_B)$ , obtém-se a condutividade hidráulica do meio poroso que constitui a amostra:

$$K = \frac{VL}{Ath} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V é o volume de água liberada no intervalo de tempo t (cm<sup>3</sup> ; s);

L é o comprimento da amostra (cm);

A é a área da seção da amostra (cm<sup>2</sup>);

h é a carga hidráulica (cm);

K é a condutividade hidráulica (cm/s).

A figura 4 ilustra o funcionamento de um permeâmetro de carga constante.

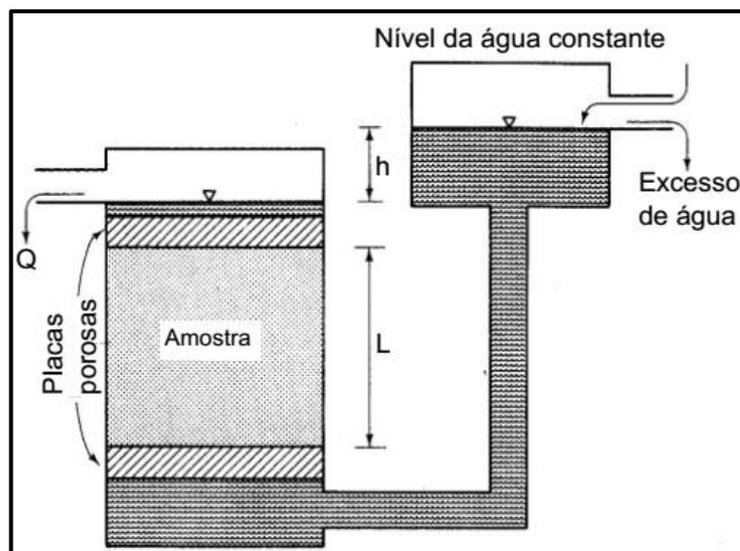


Figura 4: Elementos de um permeômetro de carga constante (Adaptado de Fetter 1994).

Para que a análise se aproxime das condições da amostra em campo, é necessário que a carga hidráulica não seja maior que a metade do comprimento ( $L$ ) da amostra. Caso contrário, pode-se obter um número de *Reynolds* muito alto, equivalente a fluxo turbulento, invalidando a Lei de Darcy para o experimento (Fetter 1994).

Embora a condutividade hidráulica ( $K$ ) descreva o movimento de um fluido através de materiais geológicos, este parâmetro não representa a permeabilidade do meio. A condutividade hidráulica depende de propriedades do fluido e do sedimento em análise. Portanto, para experimentos com materiais submetidos a diferentes temperaturas e, assim, diferentes condições de viscosidade, e para diferentes materiais, faz-se necessário conhecer a permeabilidade intrínseca, a qual é apenas dependente das propriedades do material geológico. A permeabilidade intrínseca é uma função do tamanho da abertura dos poros. Quanto menor o diâmetro dos sedimentos, maior a área que entra em contato com a água (Fetter 1994).

Conforme demonstrado por Hubbert (1956), a relação entre a condutividade hidráulica e a permeabilidade intrínseca segue as seguintes condições:

- O fluxo é proporcional ao peso específico do fluido ( $\rho g$ ), ou seja, um líquido mais denso tende a produzir maior força de fluxo sob a ação da gravidade;
- O fluxo é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) do fluido;
- O fluxo é proporcional à diâmetro das partículas ao quadrado ( $d^2$ );
- O fluxo é proporcional ao tamanho dos poros das partículas ( $C$ );

Com a combinação das características dos sedimentos, a permeabilidade intrínseca pode ser expressa conforme a equação 3, em que “k” é expressa em L<sup>2</sup> (área):

$$k = Cd^2 \quad \text{Equação 3}$$

A equação 4 demonstra a relação entre a condutividade hidráulica e a permeabilidade intrínseca:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad \text{Equação 4}$$

### 2.3 CONCEITOS HIDROGEOLÓGICOS ABORDADOS

Os modelos hidrogeológicos e o permeâmetro oferecem suporte para o aprendizado de conceitos hidrogeológicos fundamentais, como a relação da água subterrânea com o ciclo hidrológico, a percolação da água subterrânea em meios homogêneos e heterogêneos, o nível potenciométrico e freático, conceitos de aquíferos livres e confinados, bem como, simulações de recarga e descarga de aquíferos.

#### 2.3.1 O CICLO HIDROLÓGICO E A ÁGUA SUBTERRÂNEA

O ciclo hidrológico é controlado, no solo e no subsolo, pela ação da gravidade, pelo tipo e densidade da cobertura vegetal, assim como por elementos e fatores climáticos na atmosfera, dentre os quais estão os ventos, a temperatura do ar, a umidade relativa do ar e a radiação solar (Manoel Filho 2008a).

De acordo com Fetter (1994), não é possível descrever o início e o fim do ciclo hidrológico, adotando-se o oceano como o local de início do ciclo devido à maior quantidade de água armazenada. O volume de água que evapora da superfície do oceano varia de acordo com a localização geográfica, sendo maior próxima às zonas equatoriais, onde a radiação do sol é mais intensa. Esta água é considerada pura, pois o sal marinho é deixado para trás durante o processo. A água, então, movimenta-se na atmosfera até atingir condições propícias para sua condensação, quando ela se transforma em gotas e cai em forma de chuva, granizo

ou neve. Ao chegar ao substrato, esta água tem diferentes destinos, dentre os quais a infiltração e percolação nos solos e rochas, processo relacionado às áreas de recarga dos aquíferos (Barbosa Júnior, 1999).

Logo abaixo da superfície, os poros do solo possuem água e ar, em uma região chamada de zona vadosa ou zona de aeração. A água pode fluir por esta zona, em um processo chamado interfluxo, ou pode retornar à superfície por evaporação. O excesso de água da zona vadosa é direcionado para baixo, por drenagem gravitacional, passando pelo substrato através de uma franja de capilaridade. Nesta região, a saturação de água é próxima à 100%. Ao atingir determinada profundidade, os poros das rochas tornam-se completamente saturados. O topo dessa porção é, então, chamado de nível freático e a água armazenada na zona de saturação é chamada de água subterrânea (Fetter 2014).

De acordo com Manoel Filho (2008a), o estudo das águas subterrâneas inclui tanto a movimentação da água em formações saturadas quanto em meios não saturados, onde a umidade é um elemento importante para o ciclo hidrológico e para processos geológicos.

### 2.3.2 AQUÍFEROS, AQUITARDES E AQUICLUDES

Aquíferos são definidos como a unidade geológica permeável que permite o fluxo da água em quantidades significativas com gradientes hidráulicos ordinários. Aquicludes, por outro lado, são unidades geológicas saturadas incapazes de transmitir quantidades significativas de água sob as mesmas condições. Já o termo aquitarde é empregado para designar camadas menos permeáveis em uma sequência estratigráfica, onde a permeabilidade dessas camadas pode ser o suficiente para permitir fluxo significativo de água em escala regional, mas não é adequada para a instalação de poços de produção (Freeze & Cherry 1979).

### 2.3.3 AQUÍFEROS LIVRES E CONFINADOS

De acordo com Manoel Filho (2008a), os aquíferos livres são aqueles com limite superior definido pela superfície de saturação ou freática, onde todos os pontos estão submetidos à pressão atmosférica. Nos aquíferos confinados, a pressão no topo da zona de saturação é superior à pressão atmosférica, de modo que o nível da água em poços penetrantes em aquíferos confinados se eleva acima

da zona saturada podendo, em certos casos extravasar na superfície. Nestas condições, o poço é classificado como artesiano e diz-se que o aquífero está sob condições artesianas. Esses aquíferos podem ocorrer em rochas sedimentares (arenitos ou carbonatos), e rochas ígneas e metamórficas (Freeze & Cherry 1979, Manoel Filho 2008a). A figura 5 representa as condições descritas acima.

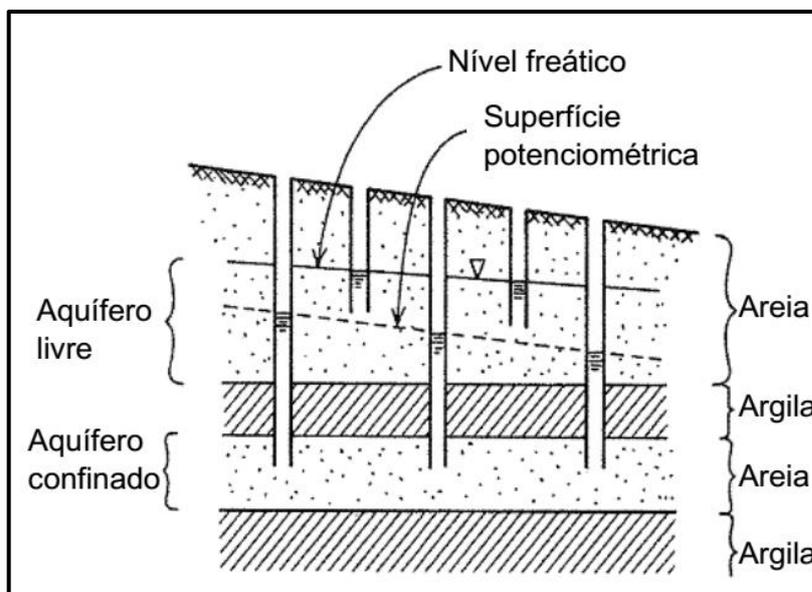


Figura 5: Representação de aquíferos livre e confinado. (Adaptado de Freeze & Cherry 1979).

A natureza e a distribuição dos aquíferos e aquitardes são controlados pelos elementos litológicos, estratigráficos e estruturais das rochas com que a água interage (Manoel Filho 2008a). Sendo assim, em estudos de água subterrânea, é necessário compreender o contexto geológico com o qual a mesma se relaciona, pois as condições de porosidade e condutividade hidráulica são parâmetros de ampla variação (Fetter 1994).

Observa-se uma vantagem de aproveitamento na ocorrência de águas subterrâneas em sedimentos inconsolidados. Isso ocorre devido à facilidade de perfuração ou escavação, ao nível freático mais raso, e à sua localização em regiões favoráveis à recarga a partir de rios, riachos, lagoas e das chuvas. Além disso, segundo Fetter (1994), as condutividades hidráulicas associadas a estes ambientes estão entre as mais altas dos materiais terrestres. Entre os sedimentos inconsolidados mais importantes, são os aluviões, as dunas e, em menor escala, os depósitos coluviais. Coberturas eluviais também possuem características hidrogeológicas em comum com alúvios e colúvios, embora não sejam classificadas como depósitos sedimentares (Manoel Filho 2008a).

As rochas sedimentares estão no domínio dos sedimentos consolidados, sendo as mais importantes para a formação de aquíferos, aquelas que possuem permeabilidade boa e regular. Pode-se citar os arenitos, que formam aquíferos regionais com grande capacidade de armazenamento, e as rochas carbonáticas. Nas rochas carbonáticas, a porosidade e a permeabilidade são fortemente influenciadas por fraturas, que aumentam consideravelmente sua capacidade de transmissão da água subterrânea. As rochas ígneas e metamórficas não possuem porosidade primária. Aquíferos formados em meios cristalinos são essencialmente dependentes de porosidade e permeabilidade secundárias, que são formadas por variações nas condições de tensão relacionadas a episódios geológicos (Freeze & Cherry 1979, Manoel Filho 2008a).

#### 2.3.4 CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS

De acordo com Manoel Filho (2008b), poluentes são substâncias que ameaçam a saúde, a segurança e o bem-estar (questões econômicas), causam prejuízo para o ambiente aquático, modificam as propriedades de águas receptoras para determinados fins ou modificam normas de qualidade previamente estabelecidas.

Em regiões de alta densidade populacional e uso intensivo da terra, a água subterrânea torna-se especialmente vulnerável à poluentes. Qualquer atividade em que compostos químicos ou rejeitos podem ser lançados no ambiente, apresenta potencial de atingir a água subterrânea e os aquíferos (EPA 1993).

Devido à necessidade crescente de diminuir a quantidade de resíduos em superfície, tem-se procurado ambientes subterrâneos para sua destinação. Com isso, as técnicas mais utilizadas para disposição de resíduos são injeções de líquidos por poços profundos e aterros sanitários para resíduos sólidos, o que pode levar à contaminação da água subterrânea. Além disso, o ambiente subterrâneo também pode ser atingido por vazamentos de reservatórios, que são amplamente utilizados como sistemas de deposição de resíduos, e por lixiviação de resíduos de animais, fertilizantes e pesticidas de solos agrícolas (Freeze & Cherry 1979).

O fluxo de contaminantes depende de suas propriedades químicas, físicas e biológicas, com tendência a seguir o mesmo caminho percorrido pela água

subterrânea. Alguns contaminantes não seguem o mesmo fluxo devido às propriedades acima mencionadas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a confecção dos protótipos de modelos físicos de aquíferos e do permeâmetro, os principais materiais utilizados estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Materiais utilizados para a confecção dos modelos de aquífero granular e do permeâmetro de carga constante.

Material	Quantidade
Caixas de acrílico 40 cm x 60 cm x 15 cm	2
Tubo de acrílico 10 cm (diâmetro) x 30 cm (altura) x 5 mm (espessura)	1
Seringas de 5 ml	Diversas
Agulhas de injeção	Diversas
Torneiras de plástico para filtro	4
Mangueiras transparentes	5 m
Cola para acrílico S-320	100 ml
Cola para acrílico S-330	50 ml
Catalisador de cola para acrílico S-330	5 ml
Barras rosqueadas de metal (50 cm)	4
Conexões hidráulicas	Diversas
Areias de diferentes granulometrias	60 kg
Argila para cerâmica	5 kg

A princípio, foram projetados quatro modelos de aquíferos e um permeâmetro de carga constante. Porém, a construção limitou-se a dois modelos (granular e de fluxo) e ao permeâmetro, devido à limitação de tempo para a finalização e entrega deste trabalho. Apresentam-se nas figuras 6a e b os planos de construção dos modelos de aquífero granular e de fluxo subterrâneo.

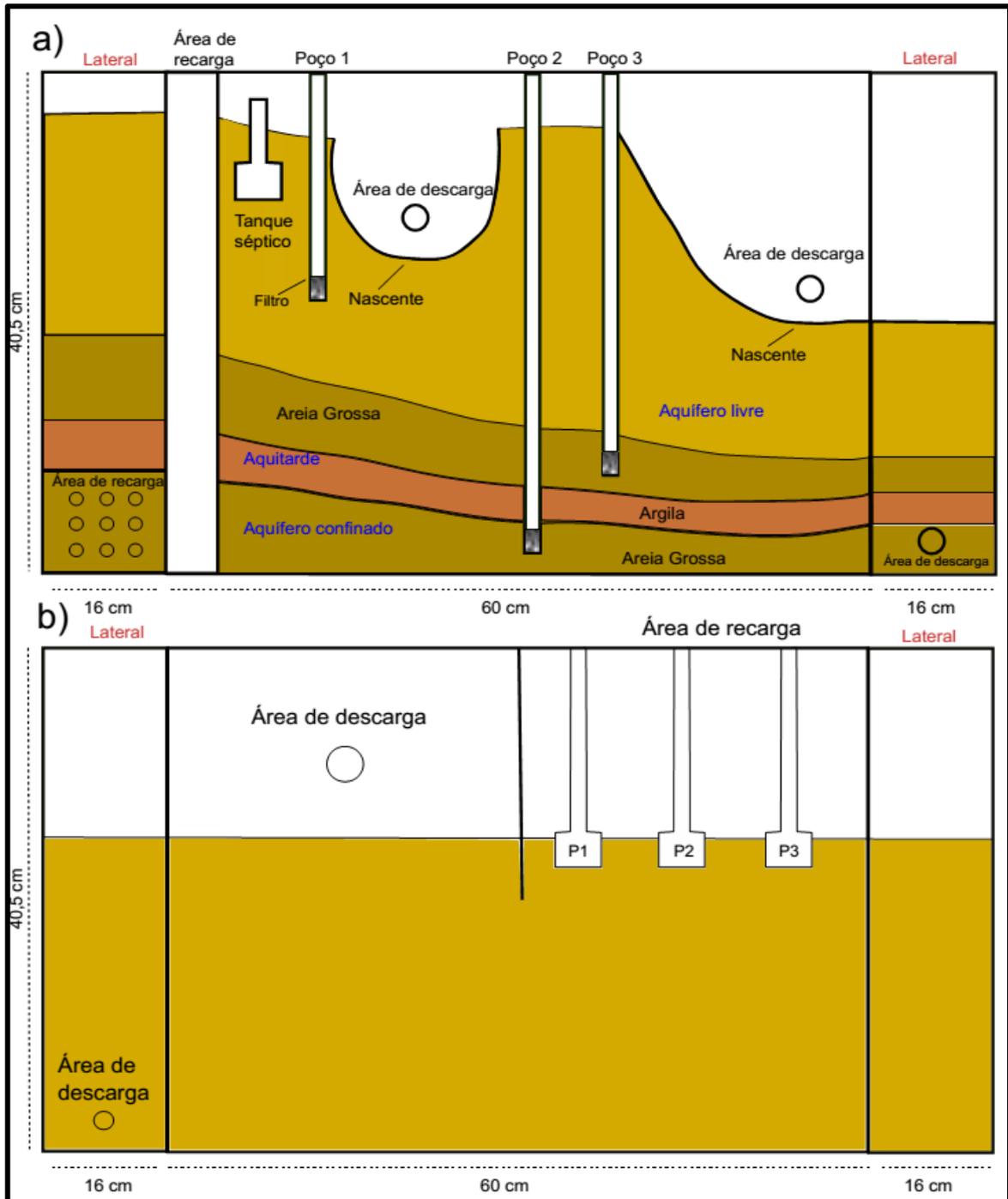


Figura 6: a) Projeto de construção do aquífero granular com condições confinante e livre; b) Projeto de construção do aquífero granular para demonstração de fluxo.

Na figura 7, apresenta-se o projeto de construção do permeâmetro de carga constante.

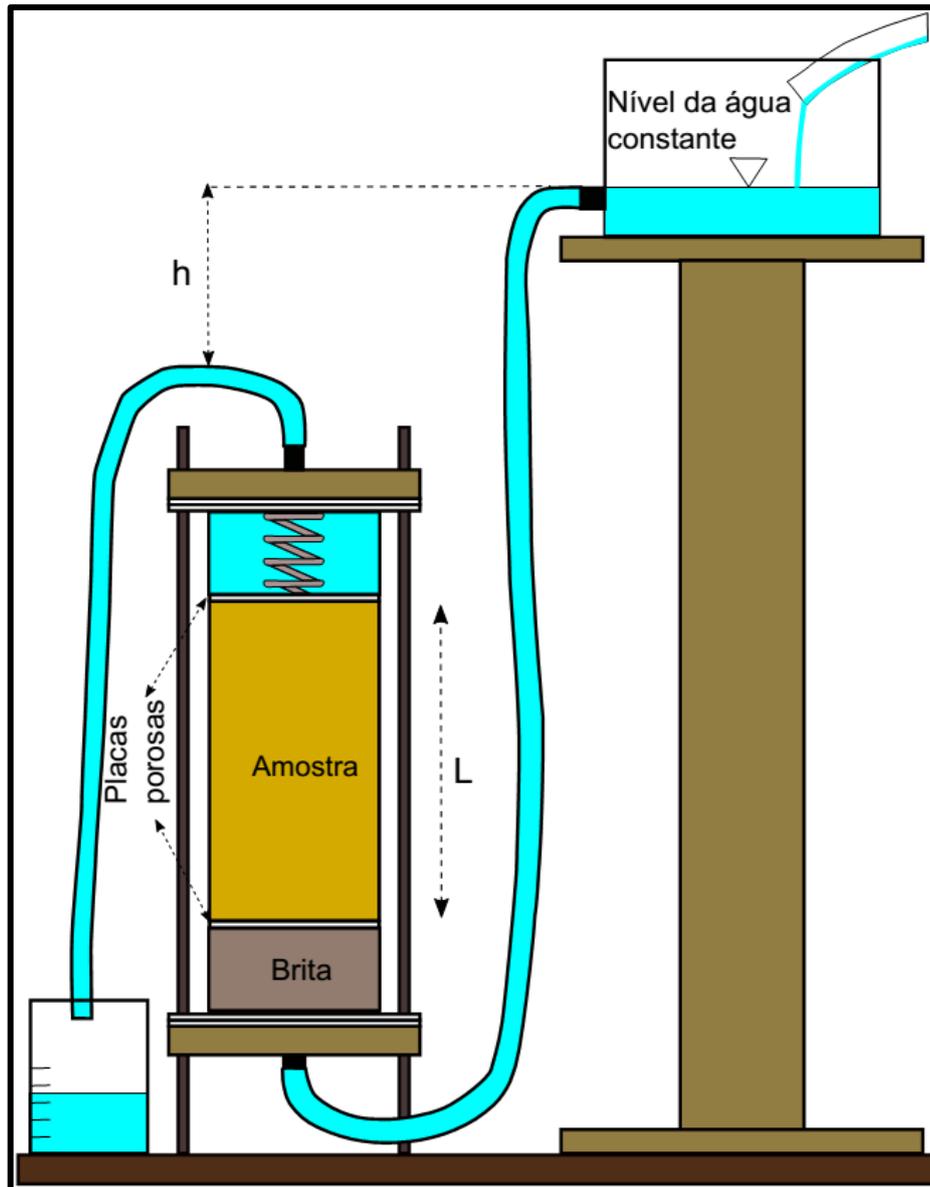


Figura 7: Projeto de construção do permeômetro de carga constante.

Os modelos foram baseados em projetos semelhantes desenvolvidos por outras instituições, com algumas adaptações em função da disponibilidade de materiais. O modelo de fluxo em aquífero granular livre foi baseado no projeto “*Practical Engineering*”, de Grady Hillhouse e o modelo de aquífero granular em condições confinantes e livres foi baseado no projeto do “*Texas Water Development Board*” (2016). O permeômetro de carga constante seguiu especificações da ASTM D 2434 (*Standard Test Method for permeability of Granular Soils* (ASTM 2006).

A primeira etapa consistiu na montagem das caixas de acrílico, que formam a parte externa dos modelos. Utilizou-se um gabarito de madeira para garantir que as

paredes das caixas formassem um ângulo de 90 graus entre si (Figura 8a). As laterais das caixas foram encaixadas e coladas com cola para acrílico S-320 e S-330, utilizando-se seringas e agulhas de injeção para este procedimento (Figura 8b).

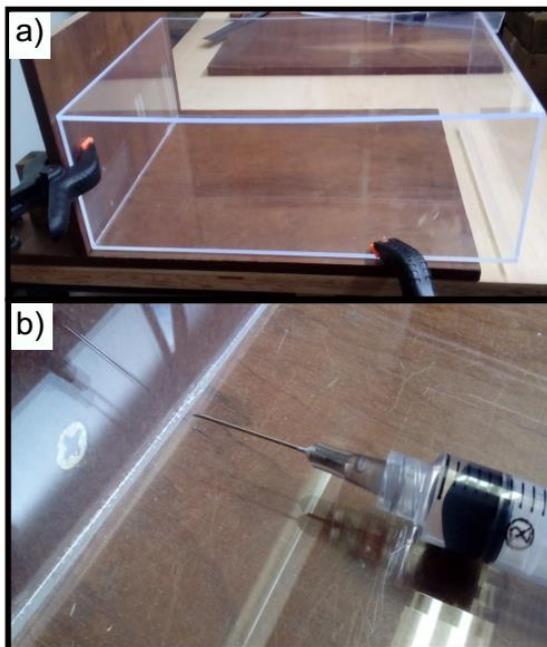


Figura 8: a) Colagem das placas de acrílico em ângulo de 90 graus; b) Utilização de agulha de injeção para colagem.

Após a colagem, foi utilizada cola para acrílico S-330 nas partes internas das caixas, para selar a passagem de água entre as frestas. Esta cola foi preparada em solução com proporção 1:10, sendo uma porção de catalisador para 10 de cola.

Após estes processos, as caixas foram preenchidas com água para identificar possíveis vazamentos. Houve duas ocorrências devido à falta de cola S-330 no local, o que foi prontamente consertado (Figura 9).



Figura 9: Testes de vazamentos nas caixas construídas.

Além disso, foi verificado que as paredes laterais (de 60 cm de comprimento) começaram a abaular quando a água atingiu 20 cm. Contudo, esta situação foi minimizada devido às placas de acrílico internas aos modelos, as quais foram adicionadas posteriormente.

No modelo de aquífero granular e de fluxo, foram feitos furos de 1,6 cm no centro da porção lateral das caixas a partir de 3 cm da base. Além disso, o modelo de fluxo recebeu um furo de 2,6 cm de diâmetro a 40 cm da base para manter o nível de descarga constante, enquanto o modelo de aquífero granular recebeu dois furos adicionais de 1,6 cm, a 31 e a 25 cm da base, para auxiliar a observação do nível da água superficial. Em todos os furos, foram instaladas conexões e torneiras para drenagem da água. A parte de trás das torneiras foi recobertas com filtro de *nylon* para evitar seu entupimento no contato com os sedimentos.

### 3.1 MODELO DE FLUXO

O modelo de fluxo consiste em uma caixa com uma divisória de 20 cm de altura em sua parte intermediária, para criar uma barreira ao fluxo subterrâneo. O protótipo foi planejado segundo o preceito de que o fluxo da água segue caminho perpendicular às linhas equipotenciais, do nível potenciométrico mais alto para o mais baixo (Figura 10). Esta regra só é aplicada para meios isotrópicos, com escalas iguais nas duas direções (Cabral 2008).

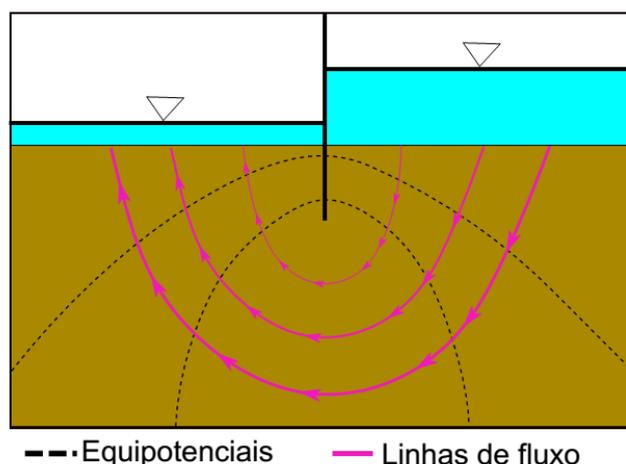


Figura 10: Relação entre linhas de fluxo e equipotenciais.

Para que bolhas de ar não ficassem aprisionadas nos poros, o preenchimento dos modelos físicos foi feito adicionando-se água e areia misturadas. Este procedimento gerou estratificações milimétricas na areia, porém não houve

interferência nas características isotrópicas do material. As figuras 11a e b mostram a caixa após seu preenchimento com areia e água.

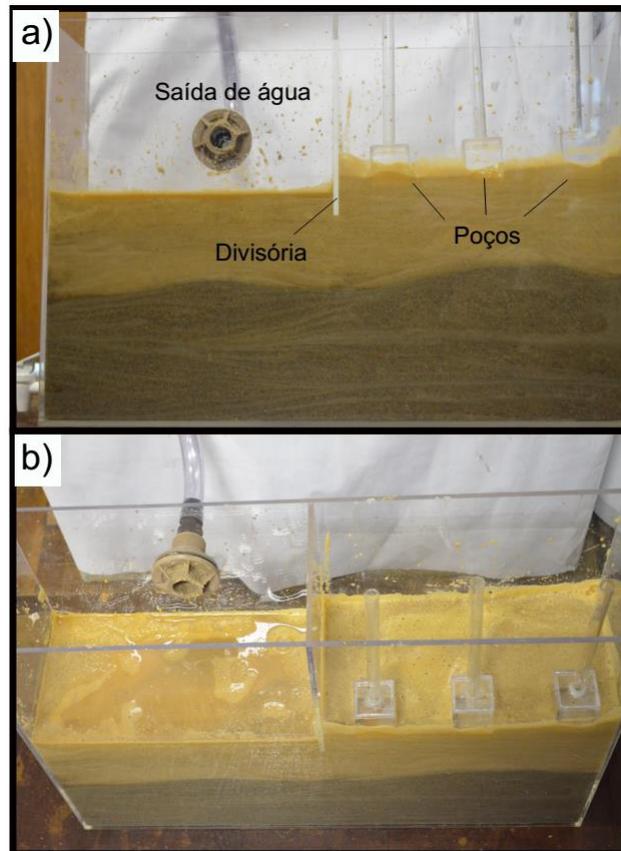


Figura 11: a) Vista frontal da caixa preenchida com areia e água; b) Vista superior da caixa preenchida com areia e água.

Ao atingir cerca de 28 cm de altura, foram adicionados corantes de anilina nas cores verde, azul e marrom nos poços instalados na superfície da areia, a fim de facilitar a visualização da trajetória do fluxo da água através da areia (Figura 12). Em seguida, foi inserida água no lado direito do modelo até que o nível potenciométrico ficasse mais elevado do que o do lado esquerdo, gerando, assim, a condição necessária para a ocorrência de fluxo entre as duas partes do modelo.

Todo o procedimento foi registrado em vídeo, para permitir a sua apresentação em outras ocasiões.



Figura 12: Adição de corantes de anilina para visualização do fluxo da água.

### 3.2 MODELO DE AQUÍFERO GRANULAR

Neste modelo foram acrescentadas duas placas de acrílico moldadas, perfuradas e protegidas em sua base para proporcionar a passagem da água e impedir a entrada de areia, com o objetivo de simular as condições naturais de formação de nascentes.

Outra finalidade dessas placas foi manter os sedimentos presos em uma cota superior sem que entrassem em colapso. Para simular a área de recarga do aquífero confinado, foi colocada uma placa de acrílico de dimensões 15 cm x 40 cm x 5 mm, em posição vertical, a 4 cm de uma das laterais do modelo. A entrada de água na camada confinada ocorre através de perfurações feitas na base dessa placa.

Em seguida, foram utilizados tubos de vidro para simular os poços no modelo de aquífero granular, os quais foram fixados na parede frontal, na posição vertical, com diferentes profundidades, para atingir níveis de camadas geológicas distintas. Um dos poços foi confeccionado simulando uma fossa séptica, conectado a um cubo de plástico com 3 cm de arestas. O cubo foi furado em sua base e recebeu tela de proteção de *nylon* para evitar a entrada de sedimentos. Após a montagem, a caixa foi preenchida com água novamente, para verificar sua resistência e verificar possíveis vazamentos (Figuras 13a e b).

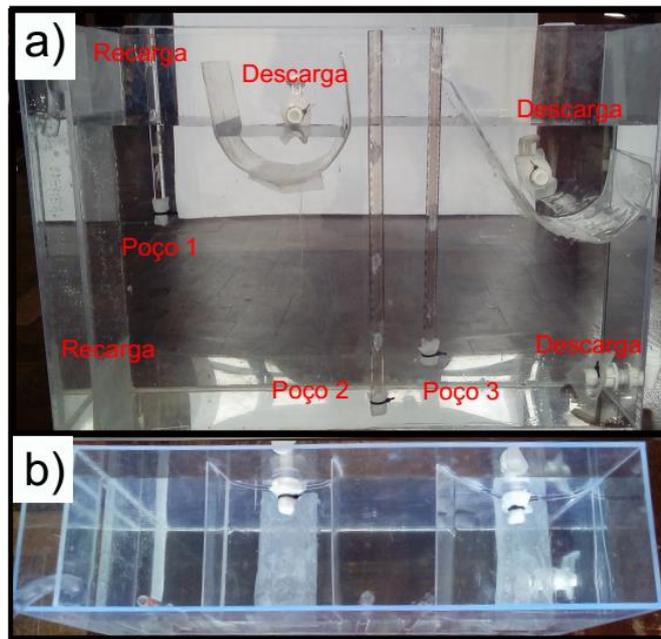


Figura 13: a) Teste de resistência da caixa à água (vista frontal); b) Teste de resistência da caixa à água (vista superior).

Após este procedimento, a parte basal do modelo foi preenchida com uma camada de 5 cm de areia (em sua porção mais espessa, à esquerda) com granulação muito grossa. Sobre esta porção, foi adicionada uma camada de argila de 2 cm de espessura, para atribuir o efeito de confinamento. Em seguida, foram colocadas duas camadas de areia muito grossa, de 5 cm em conjunto, seguidas por uma porção de areia média a grossa de 20 cm de espessura (Figura 14).

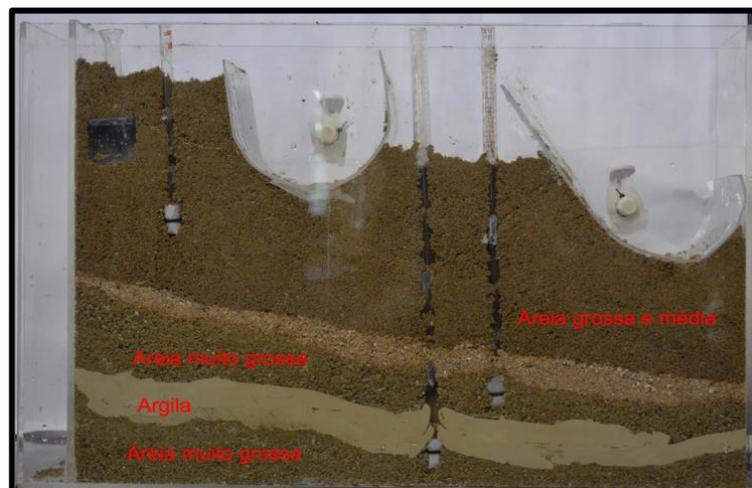


Figura 14: Modelo de aquífero montado com areia e argila simulando unidades reservatório e aquífero.

Em seguida, foi adicionada água com corante vermelho na área de recarga do aquífero confinado, até 38 cm de altura em relação à base. Após este passo, adicionou-se água na área de recarga dos aquíferos livres, até o nível freático atingir

35 cm de altura em relação à base da caixa. Na sequência, foram adicionados corantes nos tubos para a realização dos experimentos. Durante o experimento, o nível da água foi diminuído para simular situações naturais, quando se altera a quantidade de água na área de recarga de aquíferos.

Todo o procedimento foi registrado em vídeo, para que fosse possível sua posterior apresentação.

### 3.3 PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

Para a construção do permeâmetro de carga constante, foi utilizado um tubo de acrílico extrudado com 30 cm de comprimento, 10 cm de diâmetro interno e parede com 5 mm de espessura. Em sua base, foram coladas duas placas quadradas de acrílico de 15 cm x 15 cm x 0.5 cm, presas a um suporte de madeira, com um furo central de 3 cm de diâmetro, para a inserção de conexão com uma mangueira externa. O mesmo foi feito para o topo do permeâmetro, porém deixando-se esta porção passível de remoção. Quatro barras rosqueadas de metal com 50 cm de comprimento foram utilizadas para fixar a base e o topo ao tubo e para manter o tubo em posição vertical. As fases de construção do permeâmetros estão apresentadas nas figuras 15a, b e c.

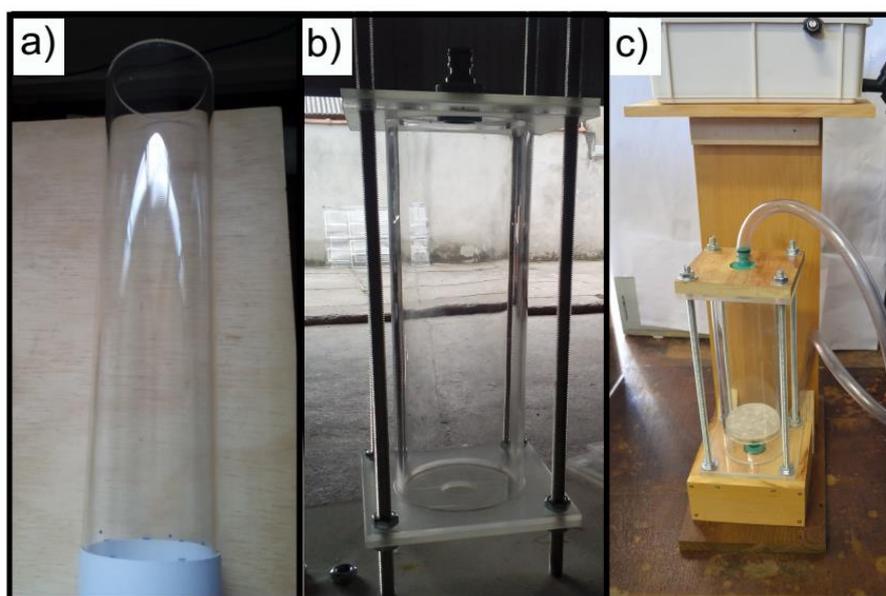


Figura 15: a) Tubo de acrílico utilizado para construção do permeâmetro de carga constante; b) Montagem inicial do permeâmetro; c) Estrutura do permeâmetro montada para realização de experimentos.

Foi confeccionada uma placa de acrílico, circular, com 10 cm de diâmetro, à qual foi colada uma tela de *nylon*. Esta peça serve para limitar o tamanho da

amostra e impede a passagem de areia para o local de entrada e saída de água, além de prevenir o desenvolvimento de fluxo turbulento na entrada de água na amostra. A placa da base foi colocada internamente sobre um suporte de acrílico situado a 5 cm da base do tubo.

Após estes passos, foi confeccionado um suporte de madeira para o permeâmetro tendo, na base, espaço suficiente para encaixar a mangueira de entrada de água. Em seguida, foi colocada uma caixa de plástico no topo do suporte de madeira para servir de reservatório de água. Esse reservatório tem dois orifícios, um superior e outro inferior. O superior serve de dreno de água, de modo que o nível da água no reservatório fique sempre constante. O inferior tem a função de fornecer água à carga constante para o permeâmetro, através de uma mangueira que se encaixa na base do tubo de acrílico. A água que flui através da amostra sai do permeâmetro por uma mangueira conectada na tampa superior, sendo coletada em um recipiente graduado para medição do volume de água escoado em um determinado intervalo de tempo.

Antes da realização do experimento, testou-se o permeâmetro para verificar a existência de vazamentos, preenchendo-o apenas com água. Foram detectados vazamentos no contato entre a placa superior e o tubo de acrílico, inviabilizando a realização do experimento para o momento (Figura 16a). Contudo, foi adicionado o material necessário para demonstração da preparação da amostra para realização de medida de condutividade hidráulica.

Na base do tubo, foi adicionada pedra britada fina até 5 cm de altura, para impedir fluxo turbulento na passagem da água pelo equipamento. Em seguida, foi adicionada a placa de acrílico porosa sobre o nível com brita, seguida por 20 cm amostra de areia na granulação média. Acima da amostra, foi inserida outra placa de acrílico porosa, pressionada por uma mola acoplada à parte superior do permeâmetro (Figuras 16b).

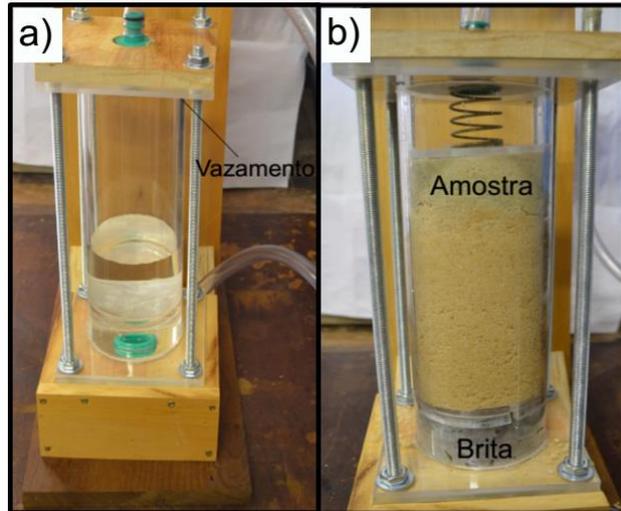


Figura 16: a) Constatação de vazamento no permeâmetro; b) Alocação do material para demonstração da estrutura necessária para o experimento.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MODELO DE AQUÍFERO GRANULAR

#### 4.1.1 RECARGA E POTENCIOMETRIA DA UNIDADE CONFINADA

A área de recarga do nível confinado funcionou como esperado, transmitindo água com corante para a porção com areia muito grossa na base do modelo. No contato entre a camada de argila e o poço de 38 cm, a vedação não ficou completa, restando vazios por onde a água penetrou e atingiu a camada de areia imediatamente acima, fazendo com que a pressão da água não fosse suficiente para se aproximar do nível potenciométrico esperado (Figura 17). No entanto, esse resultado é suficiente para demonstrar que a pressão no topo da zona de saturação dessa camada é superior à pressão atmosférica.

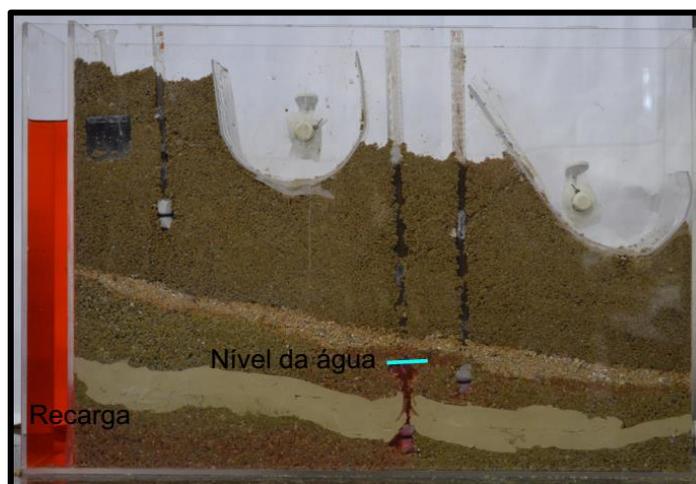


Figura 17: Nível da água atingido no poço 2 após fluxo de água através da unidade confinada.

Caso a camada de argila fosse capaz de impedir a passagem da água, seria esperado que o nível da água se aproximasse do nível da água na área de recarga, de acordo com o descrito por Freeze & Cherry (1979) sobre o conceito de superfície potenciométrica, em que ela somente é aplicável para fluxos horizontais em aquíferos horizontais. Tal condição só é atingida se a condutividade hidráulica do aquífero for muito maior que a das camadas confinantes, o que se reproduziu no protótipo em relação às condutividades hidráulicas do nível de areia muito grossa (reservatório confinado) e de argila.

O problema de construção do poço no protótipo também remete à situações reais, quando os poços projetados possuem deficiências construtivas que podem levar à conexões hidráulicas entre unidades de aquíferos diferentes, propiciando a passagem de contaminantes, como observado no modelo (Manoel Filho 2008b).

#### 4.1.2 CONTAMINANTES

Com a região basal dos poços saturada, observou-se a formação de uma mancha de espalhamento do corante adicionado, análoga à formação de plumas de contaminação em ambientes reais. Nos primeiros minutos, observou-se uma velocidade de aproximadamente 0,5 cm/min de migração, com direção preferencial para a base da caixa. A velocidade diminuiu proporcionalmente ao tempo decorrido a partir do momento de adição do corante. Não foi observado migração dos corantes em direção à área de água superficial sob as condições em que este experimento foi conduzido. O corante adicionado nos poços 2 e 3 também apresentaram velocidade de migração maior logo após sua aplicação, diminuindo a taxa de fluxo com o decorrer do tempo. Este fenômeno é coerente com o conceito de fluxo transiente, em que a extração da água proveniente do armazenamento do aquífero gera um rebaixamento contínuo da superfície potenciométrica ou freática, fazendo com que a direção ou a magnitude da velocidade do fluxo mude com o tempo (Freeze & Cherry 1979; Feitosa et al. 2008).

Com a diminuição da recarga da unidade livre, observou-se que o nível da água superficial também diminuiu, primeiramente na porção mais alta e posteriormente na mais baixa. A diminuição do fluxo subterrâneo foi atribuído à diminuição do nível freático, devido ao balanço hídrico possuir maior descarga do que recarga, diminuindo, assim, a pressão de água sobre o fluxo subterrâneo. As figuras 18a, b, c e d demonstram as situações descritas acima.

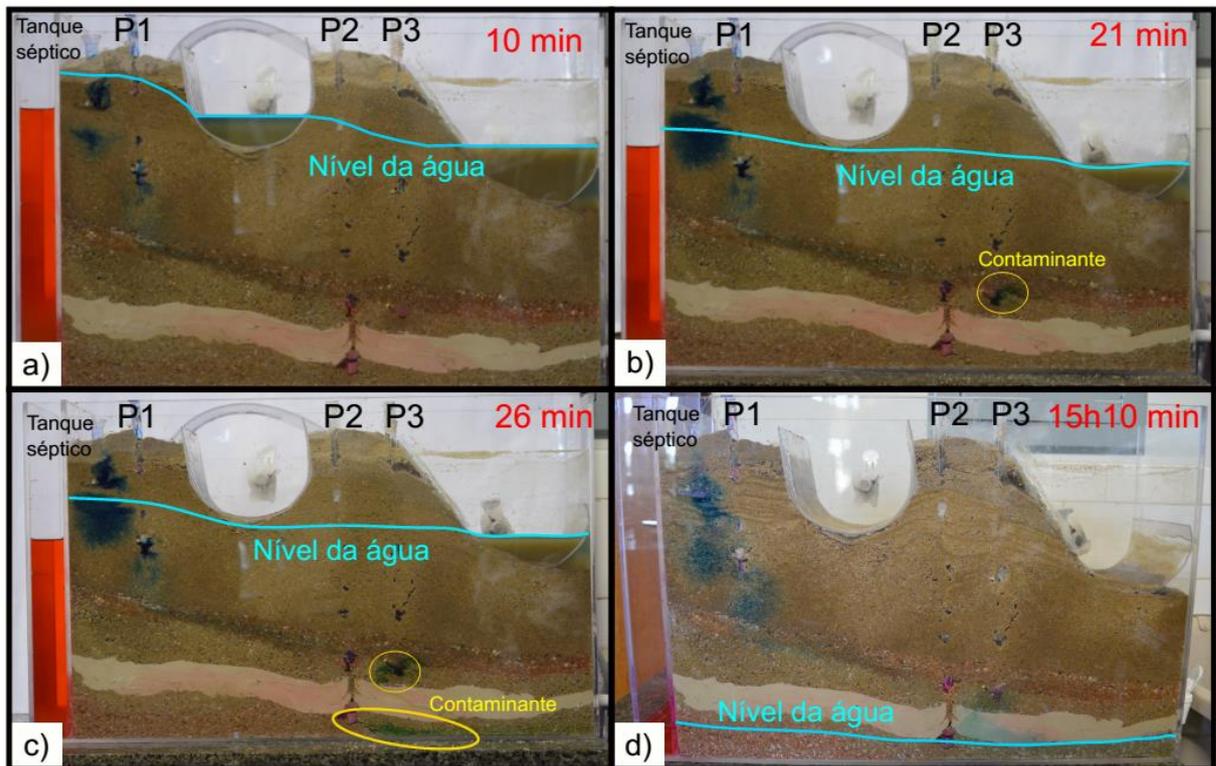


Figura 18: a) Experimento após 10 minutos da aplicação de corante no tanque séptico e no poço 1; b) Aplicação de corante nos poços 2 e 3, após 21 minutos da aplicação de corante no tanque séptico e no poço 1, notar a forma de dispersão do corante azul e o nível da água; c) Experimento após 26 minutos do início, notar a forma de dispersão do corante verde; d) Experimento após 15 horas e 10 minutos, notar o aspecto dos corantes dispersos e o nível da água.

## 4.2 MODELO DE FLUXO

Com a areia totalmente saturada, os corantes foram inseridos na superfície da areia, através dos poços instalados. Posteriormente, foi adicionada água ao lado direito da caixa até 38 cm de altura da base do modelo, acima da área de descarga localizada ao lado esquerdo do modelo. Com a adição de água em carga constante, foi observada sua rede de fluxo partindo do lado direito, com nível potenciométrico mais alto, para o lado esquerdo, com nível potenciométrico mais baixo, representando o escoamento de fluidos em meios porosos, de acordo com Cabral (2008). Essa condição é compatível com o conceito de fluxo de carga estacionária, quando se atinge o ponto em que a magnitude e a direção do fluxo são constantes ao decorrer do tempo (Freeze & Cherry 1979).

Observou-se que o corante verde, localizado a 3 cm da divisória, foi o primeiro a atingir o outro lado da caixa após 12 min de sua aplicação. O corante azul, inserido no poço central, a 15 cm da divisória, chegou ao outro lado após 44 min de sua adição. Não foi possível observar o percurso do corante marrom porque

este, ao se diluir, ficou com a mesma cor da dos sedimentos, dificultando sua distinção e, conseqüente observação do fluxo. Quando o nível da água estabilizou e se igualou em ambos os lados, foi observado que o fluxo também permaneceu constante, preservando o formato do caminho percorrido pelos corantes, principalmente de cor azul. Esses passos podem ser observados nas figuras 19 a, b, c e d.

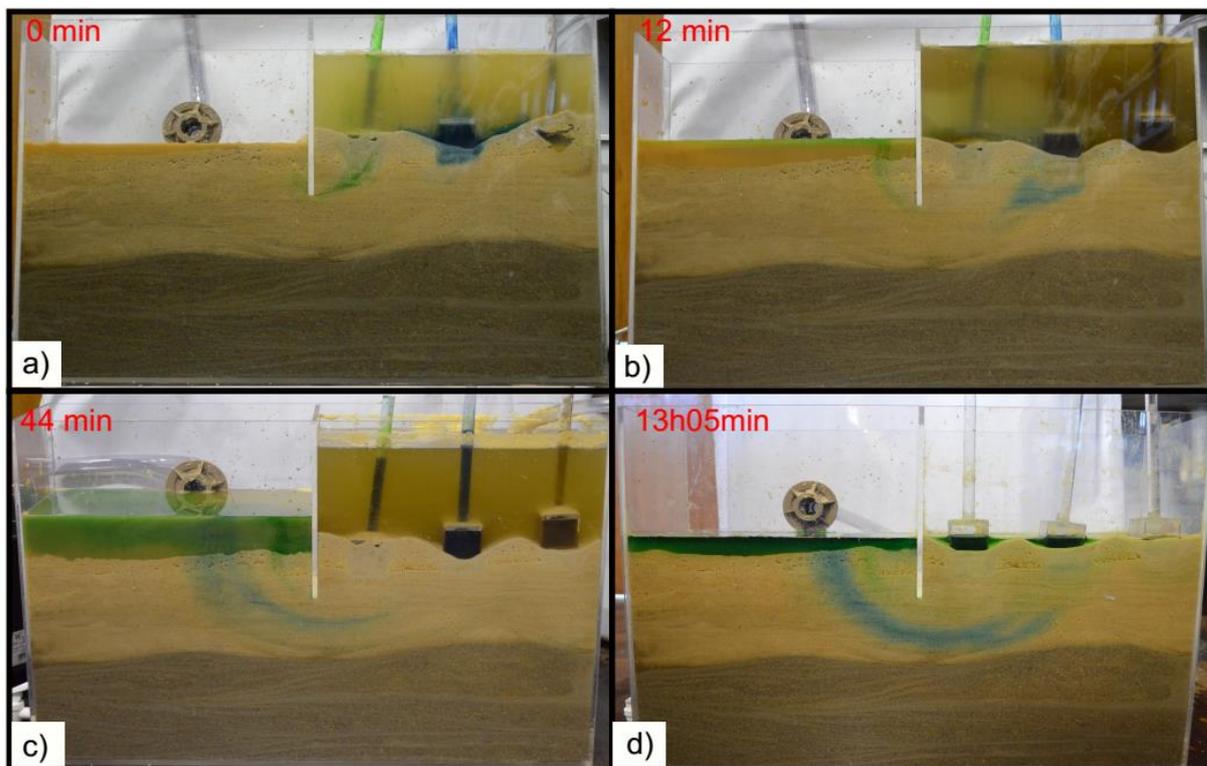


Figura 19: a) Início do experimento, com adição de corantes verde, azul e marrom na superfície da areia; b) Experimento após 12 minutos, nota-se que o corante verde já atingiu o outro lado da divisória; c) Experimento após 44 min, nota-se a chegada do corante azul ao outro lado da divisória; d) Experimento após 13 horas e 5 minutos, nota-se que o fluxo manteve-se estacionário quando o nível da água se igualou.

#### 4.3 PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

Devido ao vazamento constatado no teste com água, não foi possível realizar o experimento para medição o coeficiente de permeabilidade da amostra, pois a vazão resultante não refletiria corretamente as propriedades do material.

### 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados desse trabalho, conclui-se que na construção dos modelos devem-se levar em consideração todos os aspectos e materiais que envolvem a logística de sua execução e dos experimentos que se pretende realizar.

O material utilizado para os modelos mostrou-se eficiente, porém houve alguns problemas de construção, principalmente devido à dificuldade na usinagem e colagem de tipos distintos de acrílico. Cita-se, também, a entrada de sedimentos entre os poços e as paredes das caixas, devido ao formato cilíndrico dos tubos utilizados para representação dos poços. Recomenda-se dividir os tubos ao meio (“em formato de meia lua”) com as bordas bem fixadas às paredes para a representação dos poços, a fim de que seja possível visualizar o nível da água sem a interferência de sedimentos. Além disso, recomenda-se utilizar colas adequadas para cada tipo de material, especialmente para aqueles que forem fixados em acrílico extrudado, evitando a depreciação dos materiais e a garantia de ligas consistentes.

O permeâmetro apresenta as especificações necessárias para a realização de testes, porém recomenda-se utilizar borrachas impermeabilizantes em sua porção superior, para evitar vazamentos, possibilitando a realização de experimentos.

Com exceção do permeâmetro para a ocasião deste trabalho, os resultados dos experimentos mostraram-se satisfatórios para a demonstração de funcionamento de aquíferos em meios homogêneos em condições confinantes e livres, sendo úteis para a utilização na disciplina de hidrogeologia aplicada.

## REFERÊNCIAS

ASTM D2434-68. 2006. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (Withdrawn 2015). ASTM International, West Conshohocken, 9p.

BARBOSA JÚNIOR A. R., Água subterrânea – hidráulica de poços. In: BARBOSA JÚNIOR A. R. 2014. Elementos de hidrologia aplicada. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, 208-241.

CABRAL J. J. S. 2008. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA F. A. C., MANOEL FILHO J, FEITOSA E. C., DEMETRIO J. G. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Serviço Geológico do Brasil: Laboratório de hidrogeologia – UFPE/CTG, Rio de Janeiro, 687-705p.

CABRAL J. J. S., DEMETRIO, J. G. A. 2008. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA F. A. C., MANOEL FILHO J., FEITOSA E. C., DEMETRIO J. G. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Serviço Geológico do Brasil: Laboratório de hidrogeologia – UFPE/CTG, Rio de Janeiro, 687-705p.

DINIZ FILHO. J. B., CARVALHO JÚNIOR E. R., STEIN P., MELO JÚNIOR G., CARVALHO M. F. B., ROSÁRIO F. F., RIBEIRO FILHO J. C., CABRAL N. M. T., CARVALHO A. K. N. 2008. Atributos e modelo hidrogeológico conceitual do aquífero carbonático raso em áreas da Bacia Potiguar – RN/Brasil. XV Congresso Brasileiro de Águas subterrâneas, 20p.

EPA – Environmental Protection Agency. 1993. Wellhead protection: a guide for small communities. Office of Research and Development: Office of Water, Washington, 15p.

FEITOSA F. A. 2008. Testes de bombeamento em poços tubulares. In: FEITOSA F. A. C., MANOEL FILHO J., FEITOSA E. C., DEMETRIO J. G. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Serviço Geológico do Brasil: Laboratório de hidrogeologia – UFPE/CTG, Rio de Janeiro, 507-523p.

FEITOSA F. A., FEITOSA E. C., MANOEL FILHO J. 2008. Análise de fluxo para poços em meios homogêneos. In: FEITOSA F. A. C., MANOEL FILHO J., FEITOSA E. C., DEMETRIO J. G. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Serviço Geológico do Brasil: Laboratório de hidrogeologia – UFPE/CTG, Rio de Janeiro, 525-573p.

FETTER C. W. 1994. Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 615 p.

FREEZE R. A., CHERRY J. A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 624 p.

GILBERT J. K., BOULTER C. J., ELMER, R. 2000. Positioning models in science education and in design and technology education. In: GILBERT J. K., BOULTER C.

J. Developing models in science education. Kluwer Academic Publishers, Países Baixos, 3-17p.

HILLSOUSE G. Groundwater flow demonstration model. Practical Engineering. Disponível em <http://practical.engineering/>.

HUBBERT M. K. 1956. Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids. Aime, Petroleum Transactions, 207:222-239.

IRITANI M. A., EZAKI S. 2010. Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço. Instituto Geológico, São Paulo, 62p.

JUSTI R. 2006. La enseñanza de ciencias basada em la elaboración de modelos. Enseñanza de las ciencias, 24(2):173-184p.

LAMARCK J. B. 1802. Hydrogéologie. Paris: Musée d'Histoire Naturelle, Jardim des Plantes, 268p.

MANOEL FILHO J. 2008a. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA F. A. C., MANOEL FILHO J., FEITOSA E. C., DEMETRIO J. G. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Serviço Geológico do Brasil: Laboratório de hidrogeologia – UFPE/CTG, Rio de Janeiro, 53-91p.

MANOEL FILHO J. 2008b. Contaminação das águas subterrâneas. In: FEITOSA F. A. C., MANOEL FILHO J., FEITOSA E. C., DEMETRIO J. G. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Serviço Geológico do Brasil: Laboratório de hidrogeologia – UFPE/CTG, Rio de Janeiro, 381-392p.

RAHN P. H., DAVIS A. D. 1996. An educational and research well field. Journal of Geoscience Education, 44:506-517.

REDDY K. R. 2002 Engineering properties of soils based on laboratory testing. University of Illinois at Chicago: Department of civil engineering and materials engineering, 178p.

RIBEIRO J. P.M., VELÁSQUEZ L. N. M., CARVALHO FILHO C. A. C., FLEMING P. M. 2014. Análise da recarga no sistema aquífero granular e fissural na área do campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais. CPMTG. Geonomos, 22(2):28-43.

TEXAS WATER AND DEVELOPEMENTNT BOARD. 2016. Unconfined and confined aquifers. Disponível em <http://www.twdb.texas.gov/>.

TOWNS R., SWEETLAND J. 2008. Inspired issue brief: inquiry-based teaching. Center for inspired teaching, Washington, 5p.