

Compreensão Conceitual e Visual de Cargas Hidráulicas e Fluxo de Água Subterrânea

Andrew J.B. Cohen e John A. Cherry

Tradutora: Thaís de Paula Marteleto

Compreensão Conceitual e Visual de Cargas Hidráulicas e Fluxo de Água Subterrânea

The Groundwater Project

Andrew J.B. Cohen

*Instituto de Tecnologia de New Jersey
Newark, New Jersey, USA*

John A. Cherry

*G360 Instituto de Pesquisa de Águas Subterrâneas
Guelph, Ontário, Canadá*

*Tradutora: Thaís de Paula Marteleto
Geóloga, UNICAMP*

*Compreensão Conceitual e
Visual de Cargas Hidráulicas
e Fluxo de Água Subterrânea*

*The Groundwater Project
Guelph, Ontário, Canadá*

Todos os direitos reservados. Esta publicação é protegida por direitos autorais. Nenhuma parte deste livro pode ser reproduzida em qualquer forma ou por qualquer meio sem a permissão por escrito dos autores (para solicitar a permissão, entre em contato com: permissions@gw-project.org). A distribuição e reprodução comercial são estritamente proibidas.

Os trabalhos do GW Project podem ser baixados gratuitamente em gw-project.org. Qualquer pessoa pode usar e compartilhar links do projeto gw-project.org para baixar seus materiais. Não é permitido disponibilizar documentos do GW-Project em outros sites, nem enviar cópias dos documentos diretamente para terceiros.

Copyright © 2020 Andrew J.B. Cohen e John A. Cherry (Os Autores)

Publicado por the Groundwater Project, Guelph, Ontário, Canadá, 2020.

Cohen, Andrew J.B.

Conceptual and Visual Understanding of Hydraulic Head and Groundwater Flow/Andrew J.B. Cohen and John A. Cherry - Guelph, Ontario, Canada, 2020.

68 pages. ISBN: 978-1-7770541-6-8

Tradução de Thaís de Paula Marteleto, 2022, 64 páginas.

ISBN: 978-1-77470-048-8

Inscreva-se na lista de e-mail do Groundwater Project e mantenha-se informado sobre o lançamento de novos livros, eventos e formas de como participar do Groundwater Project. Quando você se inscreve em nossa lista de e-mail, isso nos ajuda a construir uma comunidade global de águas subterrâneas. [Inscreva-se](#).



Editores principais: John Cherry e Eileen Poeter

Conselho: John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira e Eileen Poeter

Comitê Diretor: John Cherry, Ying Fan, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Warren Wood, e Yan Zheng.

Imagem de Capa: Cohen e Cherry, 2020

Tradução para o português: Thaís de Paula Marteleto

Dedicatória

Este livro é dedicado ao compartilhamento com generosidade do conhecimento da água subterrânea.

Prefácio The Groundwater Project

Os Membros e Parceiros da Água das Nações Unidas estabelecem seu tema anual com alguns anos de antecedência. O tema do Dia Mundial da Água em 22 de março de 2022 é “Águas subterrâneas: tornando o invisível visível”. Este tema é mais apropriado para a estreia dos primeiros livros Groundwater Project (GW-Project) em 2020, que têm o objetivo de tornar as águas subterrâneas visíveis.

O GW-Project, uma organização sem fins lucrativos registrada no Canadá em 2019, tem o compromisso de contribuir para o avanço na educação e traz uma nova abordagem para a criação e disseminação de conhecimento para compreensão e solução de problemas. O GW-Project opera o site <https://gw-project.org> como uma plataforma global para a democratização do conhecimento da água subterrânea e se baseia no princípio de que:

“O conhecimento deve ser gratuito e o melhor conhecimento deve ser o conhecimento disponibilizado livremente.” Anônimo

A missão do GW-Project é fornecer materiais educacionais acessíveis, estimulantes e de alta qualidade, gratuitamente online em vários idiomas, para todos que desejam aprender sobre a água subterrânea e entender como a água subterrânea se relaciona e sustenta os sistemas ecológicos e a humanidade. Este é um novo tipo de empreendimento educacional global, pois é baseado no voluntariado de profissionais de diferentes disciplinas e inclui acadêmicos, consultores e aposentados. O GW-Project envolve centenas de voluntários associados a mais de 200 organizações de mais de 14 países e seis continentes, com participação crescente.

O GW-Project é um empreendimento contínuo e continuará com centenas de livros sendo publicados online nos próximos anos, primeiro em inglês e depois em outros idiomas, para download onde quer que a Internet esteja disponível. As publicações do GW-Project também incluem materiais de apoio, como vídeos, palestras, demonstrações de laboratório e ferramentas de aprendizagem, além de fornecer, ou vincular a software de domínio público para várias aplicações de água subterrânea que apoiam o processo educacional.

O GW-Project é uma entidade viva, portanto as edições subsequentes dos livros serão publicadas de tempos em tempos. Os usuários são convidados a propor revisões.

Agradecemos por fazer parte da Comunidade do GW-Project. Esperamos ouvir de você sobre sua experiência com o uso dos livros e material relacionados. Aceitamos ideias e voluntários!

Comitê Diretor do The GW-Project
Outubro de 2020

Prefácio do John Cherry

A ciência da água subterrânea é complexa e muitos tipos de informações são necessários para uma compreensão abrangente. No entanto, a informação mais básica e importante é a carga hidráulica. Carga é a elevação da água em um poço em relação a uma superfície horizontal especificada (datum de elevação), como o nível do mar. Quando a carga é combinada com propriedades geológicas básicas, como condutividade hidráulica dentro do contexto da lei de Darcy, muito pode ser inferido sobre a direção do fluxo da água subterrânea, e este é um ponto de partida para investigar todos os tipos de situações da água subterrânea. Para medir a altura, nós perfuramos ou cavamos um buraco no lençol freático ou, para sistemas de águas subterrâneas profundas, fazemos um furo profundo e selamos com um tubo, de modo que a água flua da parte inferior do tubo que está aberta para o lençol freático sistema para cima no tubo sólido para um nível estável.

Este livro tem como objetivo o desenvolvimento de uma compreensão conceitual da carga hidráulica e da capacidade intuitiva associada para visualizar o fluxo de água subterrânea em 1D e 2D (dimensões) com base em dados de carga e informações sobre as condições geológicas básicas, como condutividade hidráulica. A fim de facilitar o desenvolvimento da intuição da água subterrânea, esquemas simples são usados, cada um representando um quebra-cabeça visual para que depois de estudar a sequência de quebra-cabeças e os exercícios intercalados da mesma forma, o leitor esteja preparado para interpretar os dados de cargas dos sistemas de água subterrânea no campo. Um dos objetivos é que o leitor seja capaz de esboçar diagramas como respostas a muitas formas de “quebra-cabeças” que relacionam a condutividade hidráulica e da carga. Este livro é mais eficaz quando usado em conjunto com o outro livro do The Groundwater Project, [Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow](#)[↗] (Woessner e Poeter, 2020).

O autor sênior é um hidrogeólogo consultor com ampla experiência e um interesse particular no desenho de figuras para exibir mais eficazmente as informações da água subterrânea em múltiplas dimensões e que ministrou cursos de hidrogeologia de contaminantes em nível universitário.

John Cherry, Líder do The Groundwater Project
Guelph, Ontário, Canadá, Outubro de 2020

Prefácio

A motivação para desenvolver este livro deriva da experiência dos autores no ensino de hidrogeologia. Especificamente, descobrimos que os fundamentos mais relevantes da ciência da água subterrânea, ou seja, a carga hidráulica e a lei de Darcy, embora simples na forma matemática, são muitas vezes desafiadores para os alunos conceituarem e visualizarem, que são habilidades essenciais necessárias para interpretar dados hidrogeológicos. Reconhecendo o poder do aprendizado visual, apresentamos vários esboços que relacionam a carga hidráulica e as propriedades geológicas para vários cenários de fluxo em meio poroso. Depois de estudar a sequência de figuras e exercícios intercalados, o leitor está preparado para interpretar os dados de carga que são coletados dos sistemas de água subterrânea no campo. Os exercícios requerem contemplação e integração de conceitos, não resolução de equações.

Prefácio da versão em português

Neste livro são apresentados conceitos fundamentais para o fluxo de água subterrânea de forma muito didática. Os autores Dr. Andrew Cohen e Dr. John Cherry exemplificaram em esquemas visuais detalhados os conceitos de carga hidráulica, gradiente hidráulico e sua implicação no fluxo da água subterrânea. Esse é mais um livro de leitura obrigatória para todos àqueles, sejam ainda iniciantes ou avançados, que desejam aprender mais sobre o mundo das águas subterrâneas.

Thaís de Paula Marteleto, voluntária do The Groundwater Project

Novembro de 2021

Agradecimentos

Agradecemos as seguintes pessoas por suas revisões completas e úteis para este livro:

- ❖ Peter Gray, Vice Presidente e Hidrogeólogo Sênior, MTE Consulting, Canadá;
- ❖ Jana Levison, Professora Associada, G360 Instituto de Pesquisa de Águas Subterrâneas, Escola de Engenharia, Universidade de Guelph;
- ❖ Eelco Lucas, Diretor, Instituto para Estudos de Águas Subterrâneas (IGS), Universidade de Free State, África do Sul;
- ❖ Jessica Meyer, Professora Assistente, Departamento de Ciências Ambientais e da Terra, Universidade de Iowa;
- ❖ Guy Patrick, Diretor, Patrick Consulting Incorporated, British Columbia, Canada;
- ❖ Elisha Persaud, Doutoranda em Engenharia de Recursos Hídricos, Universidade de Guelph;
- ❖ Kamini Singha, Professora, Departamento de Geologia e Engenharia Geológica, Escola de Minas do Colorado;
- ❖ Hugh Whiteley, Professor Adjunto, Engenharia, Universidade de Guelph, Canadá; e,
- ❖ William Woessner, Professor Emérito de Hidrogeologia, Universidade de Montana, Missoula, Montana, USA.

Agradecemos a supervisão deste livro por Amanda Sills e a Elhana Dyck pela edição, do The Groundwater Project, Guelph, Ontário, Canadá. Agradecemos a Eileen Poeter (uma voluntária do Groundwater Project da Escola de Minas do Colorado em Golden, Colorado, EUA) pela edição, edição do layout e produção deste livro. Agradecemos à Thaís de Paula Marteleto pela tradução deste livro para a língua portuguesa.

Agradecimentos da tradutora

A tradutora agradece a oportunidade de participar e colaborar do The Groundwater Project com a tradução deste livro para a língua portuguesa. A tradutora também agradece toda a equipe de suporte do The GW-Project pela revisão, edição e formatação desta versão do livro, em especial, à Amanda Sills, Emily Horodezny, Gabriel Amorim, Guilherme Brito e Everton de Oliveira.

Tabela de Conteúdos

COMPREENSÃO CONCEITUAL E VISUAL DE CARGAS HIDRÁULICAS E FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	I
DEDICATÓRIA	IV
PREFÁCIO THE GROUNDWATER PROJECT	V
PREFÁCIO DO JOHN CHERRY	VI
PREFÁCIO	VII
PREFÁCIO DA VERSÃO EM PORTUGUÊS	VIII
AGRADECIMENTOS	IX
AGRADECIMENTOS DA TRADUTORA	IX
TABELA DE CONTEÚDOS	X
1 NATUREZA E FINALIDADE DESTE LIVRO	1
2 CONSIDERAÇÕES FUNDAMENTAIS	2
2.1 LEI DE DARCY	2
2.2 GRADIENTE HIDRÁULICO COMO UMA MANIFESTAÇÃO DE OUTRAS VARIÁVEIS E CONDIÇÕES.....	7
2.2.1 Problema - Exemplo 1	9
2.3 COMPONENTES DA CARGA HIDRÁULICA.....	9
2.3.1 Problema - Exemplo 2	13
3 PERFIS DE CARGAS DE DARCY	14
4 LINHAS EQUIPOTENCIAIS E DIREÇÃO DE FLUXO	20
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	20
4.1.1 Problema - Exemplo 3	22
5 FLUXO CONSTANTE SATURADO NA ESCALA DE CAMPO	24
5.1 HIDRÁULICA DE FLUXO EM AQUÍFEROS CONFINADOS	25
5.1.1 Problema - Exemplo 4	26
5.2 HIDRÁULICA DE FLUXO EM AQUÍFEROS NÃO CONFINADOS	27
5.2.1 Problema - Exemplo 5	30
5.2.2 Problema - Exemplo 6	34
5.2.3 Problema - Exemplo 7	34
5.2.4 Problema - Exemplo 8	35
5.2.5 Problema - Exemplo 9	35
5.3 AQUÍFEROS E AQUITARDES.....	36
5.3.1 Problema - Exemplo 10	40
5.3.2 Problema - Exemplo 11	41
5.3.3 Problema - Exemplo 12	42
6 RESUMO.....	43
7 SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS EXEMPLOS	44
7.1.1 Solução do Problema – Exemplo 1	44
7.1.2 Solução do Problema - Exemplo 2.....	45
7.1.3 Solução do Problema - Exemplo 3.....	46
7.1.4 Solução do Problema - Exemplo 4.....	47
7.1.5 Solução do Problema - Exemplo 5.....	48
7.1.6 Solução do Problema - Exemplo 6.....	49
7.1.7 Solução do Problema - Exemplo 7.....	51

7.1.8	Solução do Problema - Exemplo 8.....	52
7.1.9	Solução do Problema - Exemplo 9.....	53
7.1.10	Solução do Problema - Exemplo 10	54
7.1.11	Solução do Problema - Exemplo 11	55
7.1.12	Solução do Problema - Exemplo 12	58
8	REFERÊNCIAS	61
	SOBRE OS AUTORES	62
	SOBRE A TRADUTORA	63

1 Natureza e Finalidade deste Livro

Este livro apresenta os conceitos mais básicos e essenciais da ciência da água subterrânea. Em particular, os fundamentos da lei de Darcy, carga hidráulica, gradiente hidráulico e contornos potenciométricos são apresentados de uma maneira com detalhes matemáticos mínimos, mas de uma maneira conceitual e visual que transforma a intuição em conhecimento. Este livro combina bem com o trabalho de Woessner e Poeter (2020), que apresenta os fundamentos com bases matemáticas. O livro apresenta o experimento de Darcy e a lei de Darcy no contexto dos gradientes de pressão hidráulica para estabelecer a pressão como o parâmetro-chave junto com a condutividade hidráulica para a compreensão do fluxo. Conceitualmente, mostra que os poços de água são piezômetros usados para medir a carga hidráulica. A ênfase está no fluxo constante e saturado, primeiro em uma dimensão (1D) e depois em duas dimensões (2D) para mostrar como as distribuições de carga e gradientes dentro da zona saturada da subsuperfície são influenciados pela variabilidade da condutividade hidráulica e os limites do domínio do fluxo. Uma ênfase é colocada na ilustração de como os perfis das cargas (distribuição vertical) e contornos potenciométricos são usados para inferir as direções do fluxo da água subterrânea em aquíferos onde o fluxo é geralmente horizontal, e em aquíferos onde geralmente é vertical. Este livro não discute as redes de fluxo de maneira formal, mas algumas figuras mostram redes de fluxo onde o lençol freático, as linhas equipotenciais (na visualização do mapa e seção transversal) e as linhas de fluxo são apresentadas, porque essas relações são fundamentais para a ciência da água subterrânea. O livro de Poeter e Hsieh (2020) explica as redes de fluxo e como construí-las. No geral, este livro fornecerá aos alunos a base necessária para visualizar os padrões de fluxo de água subterrânea com base na elevação da água medida em poços e considerando as propriedades geológicas básicas.

Uma vez que as medições de carga hidráulica podem ser obtidas no campo de forma relativamente fácil com o mínimo de incerteza, compreender a natureza espacial dos dados de carga é a chave para o desenvolvimento do pensamento hidrogeológico. Este livro inclui um conjunto de figuras esquemáticas simples com narrativa incorporada que ilustram pontos específicos. Além disso, exemplos de problemas são apresentados ao longo do livro; cada problema tem uma figura de esboço com perguntas feitas sobre o que a figura mostra e/ou ainda os problemas requerem esboços feitos pelo aluno. As respostas às perguntas são fornecidas no final do livro, juntamente com uma explicação da resposta correta. Para questões de múltipla escolha, é apresentada a justificativa de porque as outras escolhas estão incorretas, o que fornece uma oportunidade para um entendimento mais profundo. Os exemplos dos problemas requerem contemplação e integração de conceitos, não resolução de equações.

2 Considerações Fundamentais

2.1 Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy publicou resultados de experimentos de coluna com areia que ele realizou para entender melhor os princípios do fluxo de água através de filtros de areia, que foram usados no projeto de sistemas de abastecimento de água em Dijon, França (Darcy, 1856). Como resultado do experimento, Darcy descobriu uma relação matemática que relaciona o fluxo ao gradiente hidráulico. Essa relação matemática agora é conhecida como lei de Darcy; é a equação fundamental que descreve o fluxo de fluido através de meios porosos, incluindo águas subterrâneas. Ele descobriu que a taxa de fluxo de água através de uma coluna compactada com areia era uma função linear da perda de carga hidráulica no leito do filtro e não apenas a diferença na pressão da água. Além de sua relevância para a hidrologia das águas subterrâneas, a lei de Darcy forma a base quantitativa de muitas disciplinas de ciência e engenharia, incluindo ciência do solo, engenharia civil, engenharia de petróleo e engenharia química. A lei de Darcy é fundamental para compreender e prever o comportamento do fluxo de água subterrânea e é a base para interpretar medições como os níveis de água em poços.

Considere o aparato experimental mostrado na **Figura 1**. Embora o projeto experimental não seja igual ao de Darcy, o aparato é análogo no sentido de que as relações hidráulicas e matemáticas nascidas do experimento de Darcy são as mesmas.

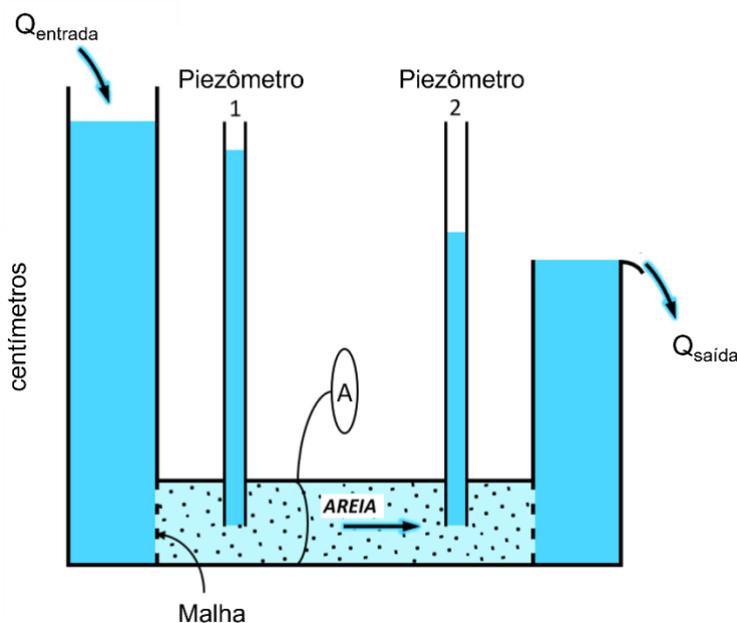


Figura 1 - Aparato experimental para ilustração da Lei de Darcy. A é a área da seção transversal do cilindro cheio de areia, $Q_{entrada}$ é o fluxo de entrada para o aparato e Q_{saida} é o fluxo para fora do aparato (Cohen e Cherry, 2020).

O aparato consiste em um cilindro de área transversal, A , que é preenchido com um meio poroso, como areia. A água é introduzida lentamente no compartimento esquerdo e gradualmente flui através do cilindro cheio de areia até que os espaços dos poros na areia estejam totalmente saturados. O nível da água em cada compartimento continua a subir até que o nível da água no compartimento direito alcance o topo e comece a fluir sobre a borda. Desta forma, embora a água continue a ser introduzida no compartimento esquerdo, a elevação da coluna de água no lado direito permanece fixa. O nível da água no compartimento esquerdo continua a aumentar até que a taxa de entrada, $Q_{entrada}$, seja igual à taxa de saída, $Q_{saída}$, momento em que a elevação em ambos os compartimentos se estabiliza. Ou seja, as condições de fluxo em *estado estacionário* são estabelecidas e Q é a taxa de fluxo volumétrico de água através do cilindro (isto é, volume por unidade de tempo, como metros cúbicos por segundo, galões por minuto, litros por segundo).

Piezômetros (neste caso, tubos abertos de pequeno diâmetro) são inseridos no cilindro. A extremidade superior de cada piezômetro é aberta para a atmosfera e a extremidade inferior é protegida de forma que a água possa entrar, mas os grãos de areia não. Após a inserção, o nível da água em cada piezômetro sobe para uma elevação estável. A elevação da água medida em cada piezômetro representa a carga hidráulica no ponto de medição, que neste caso é a extremidade aberta do piezômetro na areia. Posteriormente, exploraremos os vários componentes da carga hidráulica em meios porosos, que consiste na pressão no ponto de medição devido à coluna de água acima dela e na elevação do ponto de medição. Como discutiremos mais adiante, *as medições de pressão por si só não são suficientes para avaliar as condições da água subterrânea*.

A **Figura 2** é uma representação abreviada da configuração experimental que fornece uma estrutura para descrever a lei de Darcy. Se definirmos um datum arbitrário na elevação $z = 0$ (por exemplo, nível médio do mar), as elevações da água nos piezômetros são h_1 e h_2 . A distância entre os piezômetros é ΔL .

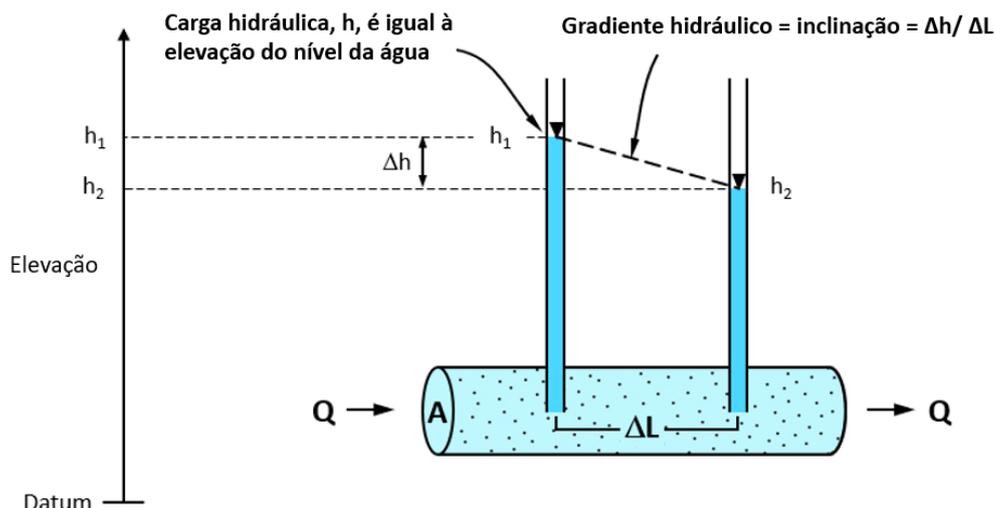


Figura 2 - Ilustração do gradiente hidráulico com base em dois pontos de medição. O gradiente hidráulico é definido pela distância entre os piezômetros e a diferença na carga hidráulica (Cohen e Cherry, 2020).

A lei de Darcy (Equação 1) afirma que a taxa de fluxo volumétrico, Q , é proporcional a: (1) à diferença na carga hidráulica ao longo de um intervalo de comprimento, ΔL ; (2) um coeficiente K (condutividade hidráulica), que é responsável pela restrição ao fluxo imposta pelo meio sólido e pela densidade e viscosidade do fluido que flui através do meio poroso (neste caso, água pela areia); e (3) à área da seção transversal perpendicular à direção do fluxo:

$$Q = -K \frac{(h_2 - h_1)}{\Delta L} A \quad (1)$$

O sinal negativo é responsável pelo fato de definirmos o fluxo como positivo na direção da queda de pressão decrescente (a água flui de elevações mais altas para elevações mais baixas). Por exemplo, na **Figura 2**, o termo $h_2 - h_1$ é negativo, portanto, a introdução do sinal negativo resulta em um valor positivo para Q .

A natureza e as propriedades da condutividade hidráulica são descritas com mais detalhes no livro [Groundwater Project book](#) de Woessner e Poeter (2020). O termo $(h_2 - h_1)/\Delta L$ pode ser expresso de forma mais geral como o *gradiente hidráulico*, conforme mostrado na Equação 2.

$$\Delta h / \Delta L \quad (2)$$

O gradiente hidráulico é frequentemente denotado com um i , que é representado pela inclinação da linha tracejada na **Figura 2**. A lei de Darcy pode, portanto, ser expressa como a Equação 3.

$$Q = -KiA \quad (3)$$

A lei de Darcy se aplica a condições de fluxo laminar (não turbulento), o que significa que a taxa de fluxo de água é lenta o suficiente para que as trajetórias das partículas de água não se cruzem à medida que migram através dos vazios interconectados do meio poroso. Por “partícula de água”, queremos dizer um agregado de moléculas de água

ocupando um volume suficientemente pequeno para que possa migrar através da rede interconectada de espaços de poros sem separação. Este volume pode ser da ordem de micrômetros cúbicos ou menos. A lei de Darcy é discutida em profundidade por Woessner e Poeter (2020).

Tendo estabelecido a relação básica descrita como lei de Darcy (Equação 3), observe que o gradiente hidráulico é independente da elevação absoluta do nível da água. Conforme mostrado na **Figura 3**, o gradiente é baseado apenas na diferença relativa na carga e não na magnitude de cada valor da carga.

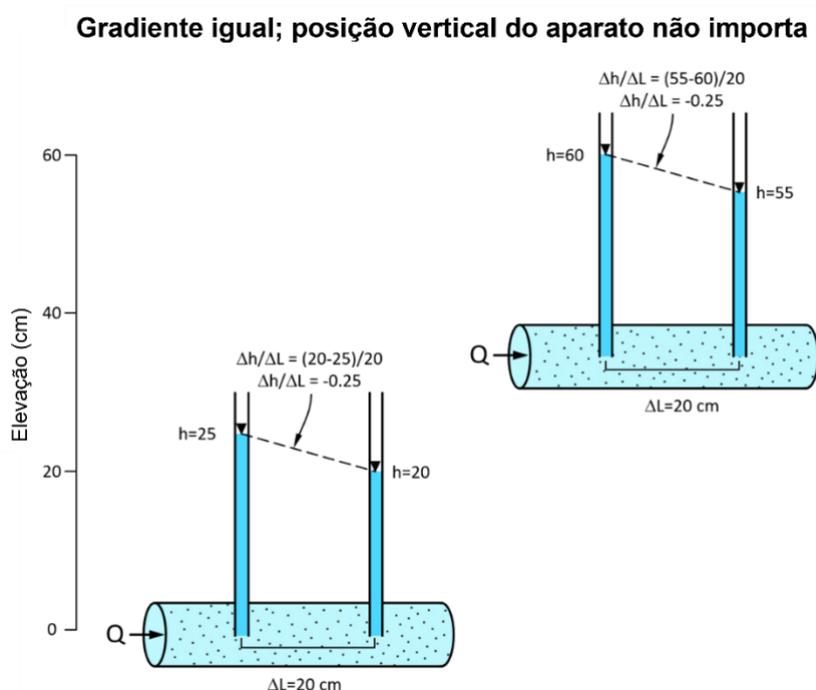


Figura 3 - Ilustração mostrando que o gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) não depende da elevação absoluta; depende apenas da diferença relativa da carga (Cohen e Cherry, 2020).

Além disso, a lei de Darcy é independente da orientação do aparato, porque o fluxo ocorre na direção do gradiente hidráulico. Por exemplo, conforme mostrado na **Figura 4**, a magnitude do gradiente hidráulico é a mesma em cada caso e a direção do fluxo é sempre paralela ao aparato.

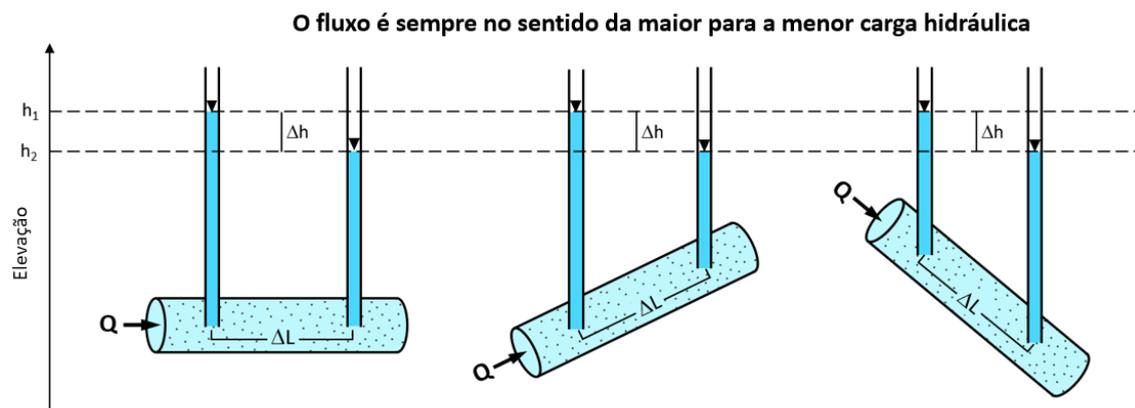


Figura 4 - Diferentes orientações de aparatos (cilindros) com o mesmo gradiente hidráulico: a magnitude do gradiente ($\Delta h/\Delta L$) é a mesma em cada caso e a direção do gradiente é paralela ao tubo em cada caso. A lei de Darcy é independente da orientação do aparato, então a taxa de fluxo, Q , é a mesma em cada caso, e a direção do fluxo é a mesma, neste caso, paralela ao aparato (Cohen e Cherry, 2020).

A **Figura 4** também ilustra um aspecto importante sobre como interpretamos as medições do gradiente hidráulico, e vale a pena observar desde o início. Nos casos mostrados acima, o gradiente é definido com referência a ΔL , que é a distância entre as medições ao longo do caminho do fluxo. No entanto, na prática, quando medimos os níveis de água em poços existentes ou instalamos novos poços para medir gradiente hidráulico, podemos não saber a direção do fluxo (na verdade, a direção do fluxo é uma das características mais fundamentais da água subterrânea que estamos tentando determinar). Considere os vários casos mostrados na **Figura 4**; se não formos capazes de observar a orientação do cilindro, tudo o que podemos deduzir das medições da altura manométrica é que há algum componente de fluxo na direção horizontal (para a direita), e é claramente possível que o fluxo também possa ter um componente ascendente ou descendente. Na verdade, podemos imaginar o caso em que a inclinação do cilindro é ainda mais acentuada do que os casos mostrados, de forma que o fluxo poderia ser quase vertical. Este exercício mental aponta uma consideração crítica necessária para interpretar os dados da carga hidráulica para inferir a direção do fluxo. Ou seja, precisamos ter algum conhecimento ou suposições sobre outros fatores que afetam o fluxo. Neste caso, é a orientação dos limites de confinamento (ou seja, os lados do cilindro); tal conhecimento fornece uma estrutura sobre a qual podemos interpretar os dados principais. Posteriormente neste livro, discutimos outros fatores relativos à interpretação das elevações do nível de água em poços, como a variação espacial da condutividade hidráulica e a localização e tipo de recarga e zonas de descarga, porque estes devem ser considerados para interpretar corretamente os dados de carga hidráulica.

2.2 Gradiente Hidráulico como uma Manifestação de Outras Variáveis e Condições

Gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta L$) é frequentemente expresso matematicamente em formato diferencial como dh/dL . O rearranjo da lei de Darcy usando esta formulação mostra que o gradiente hidráulico é uma função de Q , K e A :

$$-\frac{dh}{dL} = \frac{Q}{KA} \quad (4)$$

Portanto, uma mudança em qualquer uma dessas variáveis se manifestará como uma mudança no gradiente hidráulico:

$$-dh/dL \propto Q \quad (5)$$

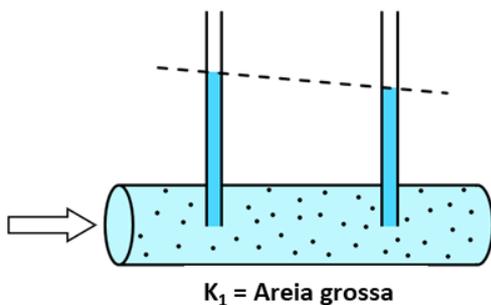
$$-dh/dL \propto 1/K \quad (6)$$

$$-dh/dL \propto 1/A \quad (7)$$

O sinal negativo se deve ao fato de que a água flui na direção da maior para a menor carga hidráulica, conforme descrito anteriormente. O termo $-dh/dL$ representa a inclinação da queda de carga na direção do fluxo (a “inclinação” do gradiente hidráulico).

A **Figura 5** resume esse conceito usando três cenários diferentes, mas especialmente uniformes. O gradiente hidráulico, que normalmente é medido por meio de níveis de água em poços, não é o parâmetro de controle que dita a vazão. Em vez disso, o gradiente hidráulico é uma manifestação dos efeitos combinados da geometria do sistema, das propriedades hidrogeológicas e da vazão imposta ao sistema.

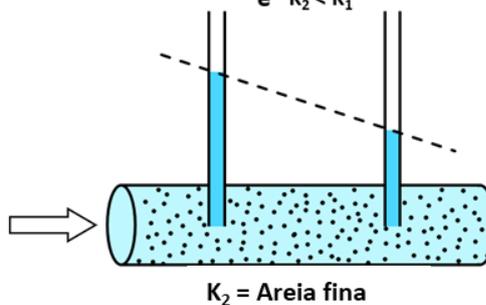
Baixa K causa um gradiente mais íngreme



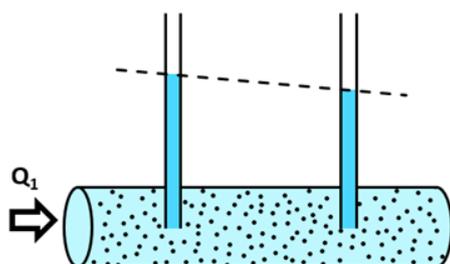
Gradiente hidráulico é mais íngreme, porque

$$-dh/dL \propto 1/K$$

$$\text{e } K_2 < K_1$$



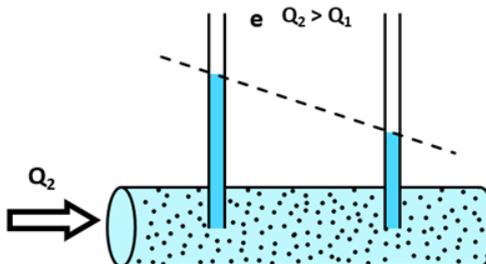
Alto Q causa um gradiente mais íngreme



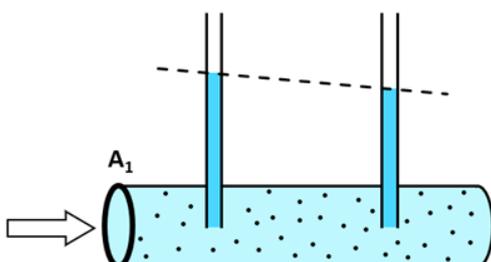
Gradiente hidráulico é mais íngreme, porque

$$-dh/dL \propto Q$$

$$\text{e } Q_2 > Q_1$$



Área menor causa um gradiente mais íngreme



Gradiente hidráulico é mais íngreme, porque

$$-dh/dL \propto 1/A$$

$$\text{e } A_2 < A_1$$

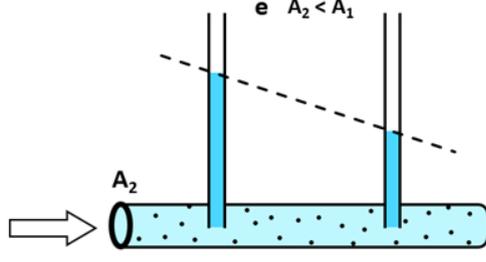


Figura 5 - Ilustração da dependência do gradiente hidráulico na condutividade hidráulica, taxa de fluxo e área. Em cada caso, o gradiente muda de acordo com a relação de proporcionalidade definida pela lei de Darcy (Cohen e Cherry, 2020).

No exemplo mostrado na **Figura 6**, $K_2 < K_1$ enquanto Q e A são constantes. Q é o mesmo em todos os locais ao longo do tubo porque a massa é conservada. Portanto, conforme indicado pela lei de Darcy, o gradiente na região de K_2 deve ser mais acentuado do que nas outras regiões. Este cenário simples é um exemplo de heterogeneidade; neste caso, a condutividade hidráulica não é uniforme.

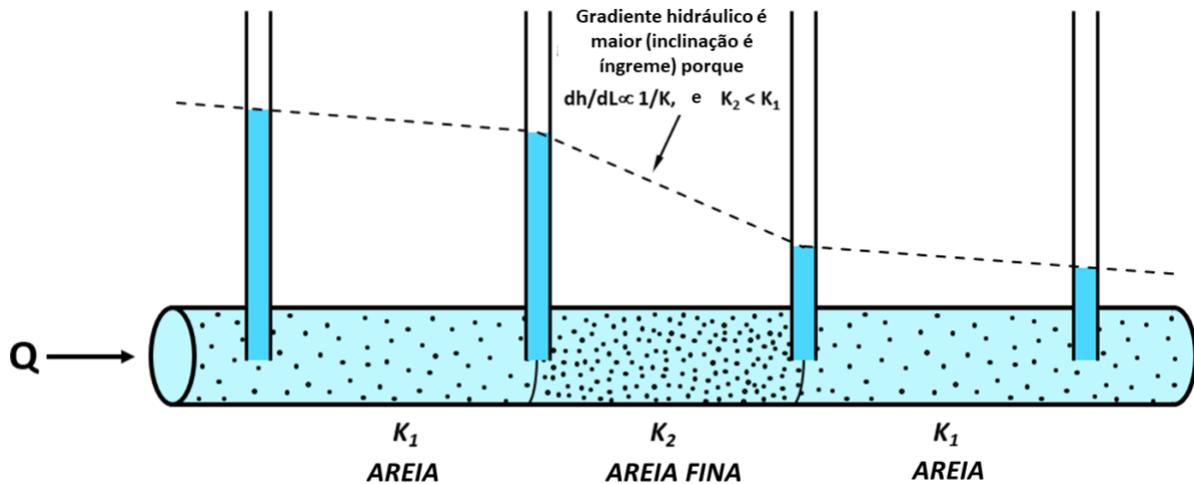
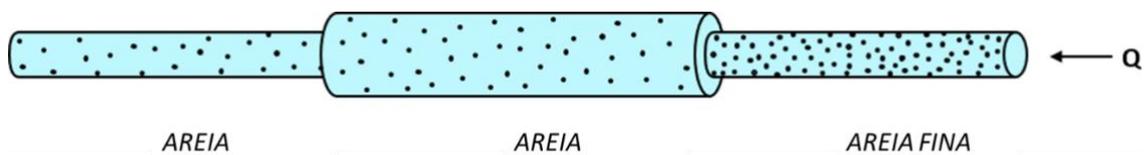


Figura 6 - Mudança no gradiente hidráulico devido à condutividade hidráulica variável. Nesse caso, o gradiente é mais acentuado na seção com menor K , pois o gradiente é inversamente proporcional a K (Cohen e Cherry, 2020).

2.2.1 Problema - Exemplo 1

Esboce o gradiente de carga hidráulica horizontal ao longo do comprimento do aparato mostrado aqui de maneira semelhante à forma como o gradiente é mostrado na **Figura 6** (não há necessidade de saber os valores de carga reais, então você pode criar seus próprios valores relativos).



[Clique aqui para ver a solução para o Problema - Exemplo 1](#)

2.3 Componentes da Carga Hidráulica

A **Figura 7** é uma modificação da configuração experimental descrita anteriormente e ilustrada na **Figura 1**. Se a água não fosse mais introduzida no lado esquerdo, o nível de água no compartimento esquerdo diminuiria gradualmente, o gradiente hidráulico diminuiria e fluiria através do cilindro ($Q_{saída}$) também diminuiria gradualmente de acordo

com a lei de Darcy. Essas condições de fluxo dependentes do tempo são chamadas de condições transitórias, que são relevantes para a modelagem de águas subterrâneas e testes de bombeamento, por exemplo. No cenário transitório representado na **Figura 7**, h_1 e $Q_{saída}$ podem ser expressos como uma função do tempo, $f(t)$, frequentemente denotado como $h_1=f(t)$ e $Q_{saída}=f(t)$. Eventualmente, os níveis de água em ambos os lados irão se equilibrar, o gradiente hidráulico será igual a zero e, portanto, a água não fluirá mais através do cilindro. A água está estática em todos os lugares.

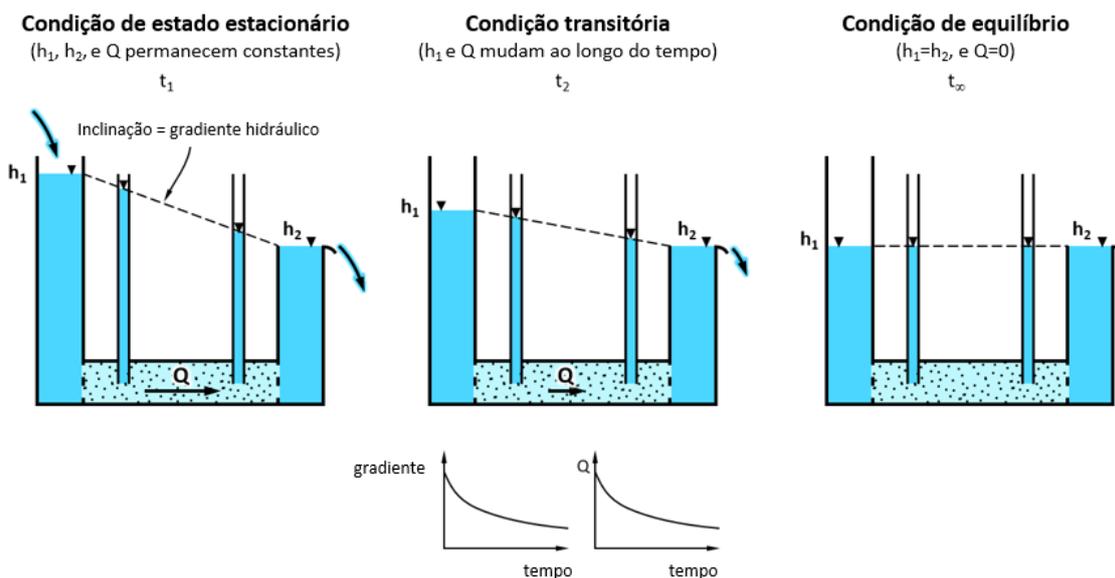


Figura 7 - Várias condições hidráulicas e de fluxo. O fluxo em estado estacionário (t_1) e as condições de equilíbrio hidráulico (t_∞) definem fluxo constante e nenhum fluxo, respectivamente, enquanto o estado intermediário (t_2) é transitório em que as condições mudam ao longo do tempo (Cohen e Cherry, 2020).

Referindo-se à condição de equilíbrio hidráulico (t_∞) na **Figura 7**, imagine inserir piezômetros no compartimento em várias profundidades (**Figura 8**). A água em todos os piezômetros aumentará até a mesma elevação que é igual à elevação do nível da água no compartimento. Isso pode ser intuitivamente óbvio, pois é análogo a inserir canudos em um copo d'água: não importa a profundidade em que um canudo é inserido, o nível de água dentro do canudo será igual à elevação da água no copo. Observe que se os canudos tiverem diâmetro suficientemente pequeno, a água pode ser puxada para cima, acima do nível da água ao redor, devido à ação capilar; entretanto, na prática, o diâmetro dos poços (piezômetros em escala de campo) não é pequeno o suficiente para criar um efeito capilar significativo. Como o ponto de medição é a extremidade aberta do piezômetro na água, este exercício mostra que a carga hidráulica é a mesma em todos os lugares e que a carga hidráulica medida na extremidade aberta do piezômetro é igual à elevação à qual a água sobe. A **Figura 8** mostra a distribuição da carga resultante; a carga hidráulica é de 5 cm em todos os lugares, independentemente da profundidade da medição. A distribuição da carga hidráulica é discutida em mais detalhes nas Seções 3 e 4 no contexto do desenvolvimento

de mapas de contorno da carga hidráulica e seções transversais potenciométricas, que são usados para inferir a direção e a magnitude do fluxo de água subterrânea.

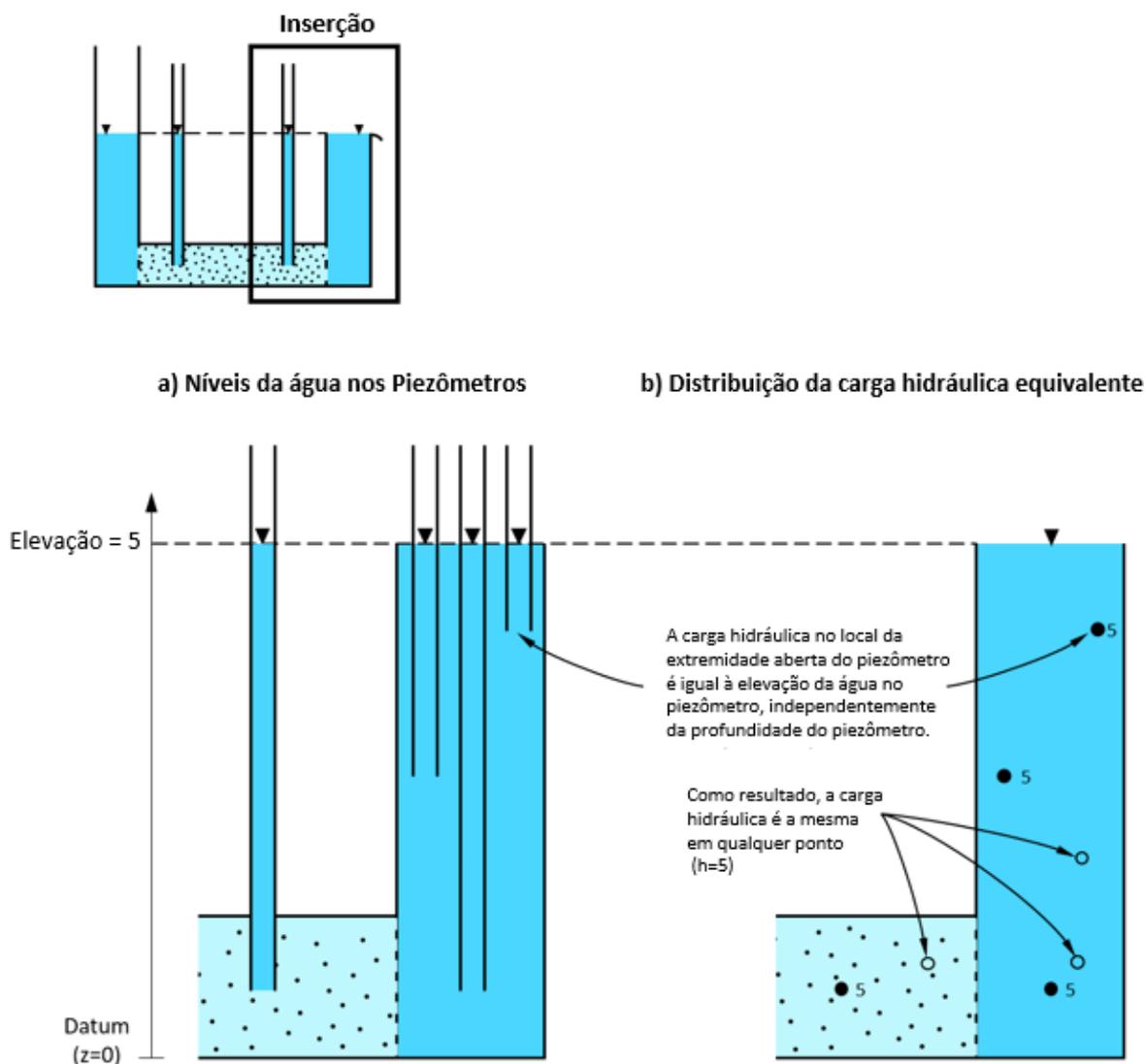


Figura 8 - Uso de piezômetros para medir a distribuição da carga hidráulica; neste caso, a carga hidráulica é a mesma em todos os lugares, conforme evidenciado pela mesma elevação do nível de água em cada piezômetro (Cohen e Cherry, 2020).

A **Figura 9** mostra os componentes da carga hidráulica em um compartimento de água estático. A carga hidráulica (h) em cada local é a soma da elevação do ponto de medição e a altura da coluna d'água acima desse ponto. Uma vez que este último é proporcional à pressão da coluna de água, é frequentemente referido como a altura de pressão (Ψ), enquanto a elevação do ponto de medição é referida como a altura de elevação (z):

$$h_i = \Psi_i + z_i \quad (8)$$

Com relação ao fluxo na zona saturada, a elevação do nível da água no piezômetro é o que interessa, e é isso que o leitor deve ter certeza de entender: *a carga hidráulica em uma formação saturada é igual à elevação da água que sobe em um poço, que é efetivamente um piezômetro.*

A carga hidráulica na **Figura 9** é a mesma em todos os lugares. Consequentemente, o gradiente hidráulico é zero em todos os lugares, de modo que a elevação da água nos piezômetros será igual. No entanto, a carga de pressão (Ψ) nos piezômetros é diferente (eles são proporcionais à altura da coluna de água em cada piezômetro). Esta configuração simples ilustra que a carga de pressão não deve ser usada para inferir o fluxo.

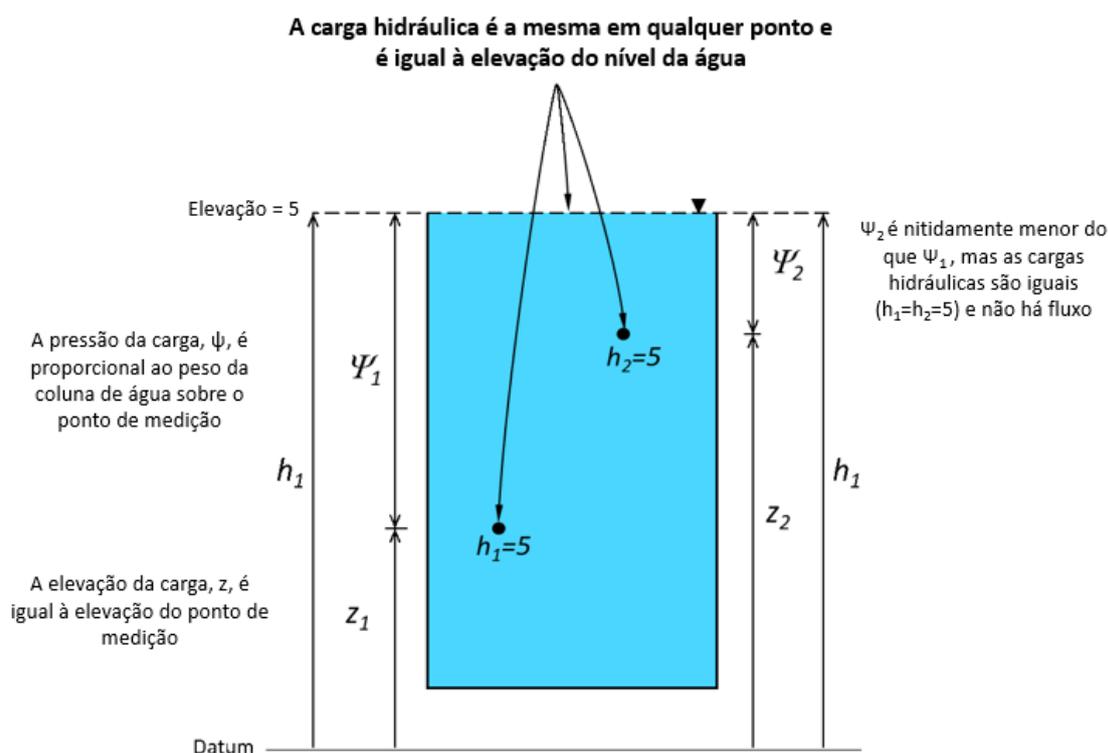


Figura 9 - A carga hidráulica em um determinado local é uma função da elevação do ponto de medição (z) e da altura da água acima do ponto de medição (Ψ); Cada ponto está em uma elevação diferente, mas eles têm a mesma carga hidráulica porque os componentes da carga de pressão e da carga de elevação somam 5 em ambos os casos ($h_1=h_2$), que também é igual à elevação da superfície da água livre (Cohen e Cherry, 2020).

O mesmo princípio se aplica às condições de fluxo. Por exemplo, a **Figura 10** mostra que a direção da queda de pressão (Ψ) em cada configuração é oposta uma da outra, mas a direção do fluxo e gradiente hidráulico é a mesma para cada cenário. Portanto, a **Figura 10** mostra claramente que a direção do fluxo não pode ser baseada apenas na carga de pressão, mas requer avaliação da carga hidráulica, que é definida pela elevação da água nos piezômetros.

Direção do fluxo depende somente do gradiente hidráulico, e não da pressão do gradiente

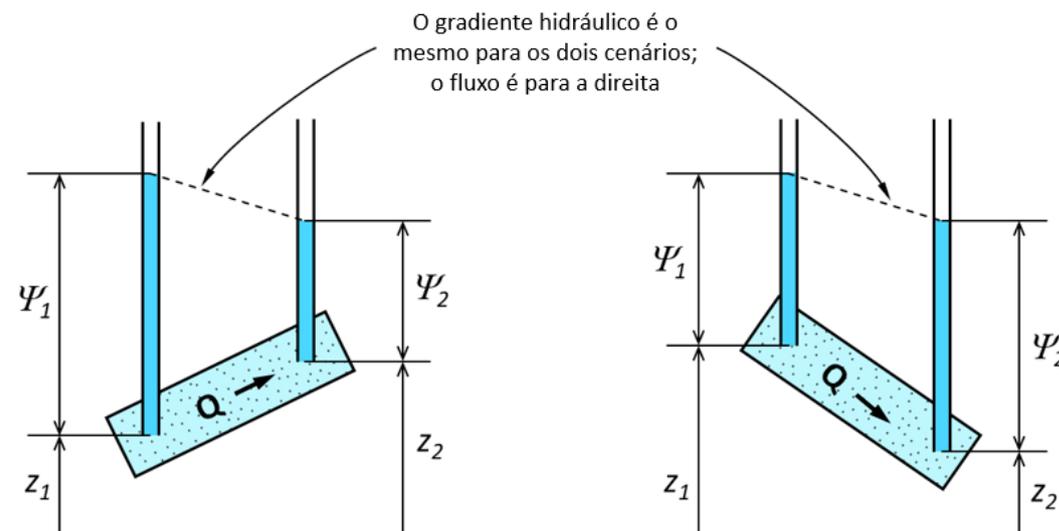
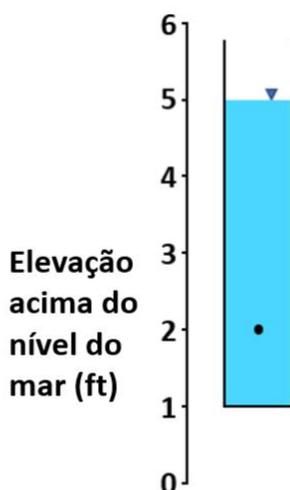


Figura 10 - Aparato demonstrando que mudar a inclinação de um cilindro cheio de areia muda os componentes das cargas de elevação e pressão, mas as cargas hidráulicas, o gradiente hidráulico e a direção e a taxa de fluxo permanecem as mesmas (Cohen e Cherry, 2020).

2.3.1 Problema - Exemplo 2

Qual é a carga hidráulica no ponto da coluna mostrada abaixo?

- a. 1 ft
- b. 2 ft
- c. 3 ft
- d. 4 ft
- e. 5 ft



Observação: ft é uma unidade de medida de comprimento e corresponde à abreviação de *foot/feet (inglês) que significa pé/pés (português)*. 1 ft equivale a 0,3038 metros.

[Clique aqui para ver a solução para o Problema – Exemplo 2](#)

3 Perfis de Cargas de Darcy

Vamos considerar novamente um cenário de estado estacionário mostrado na **Figura 11a**. Neste caso, o nível de água em ambos os compartimentos permanece fixo de modo que qualquer lado do cilindro de meio poroso seja limitado por uma carga hidráulica constante, e a diferença na carga hidráulica direciona o fluxo (ou seja, a água flui de uma região com maior energia potencial para uma região de menor energia potencial). De acordo com a lei de Darcy, existe um gradiente hidráulico no meio poroso, e a água flui da esquerda para a direita, conforme expresso pelo gradiente hidráulico, que é igual a $-0,4 \text{ m/m}$, conforme mostrado no perfil da carga hidráulica (**Figura 11b**).

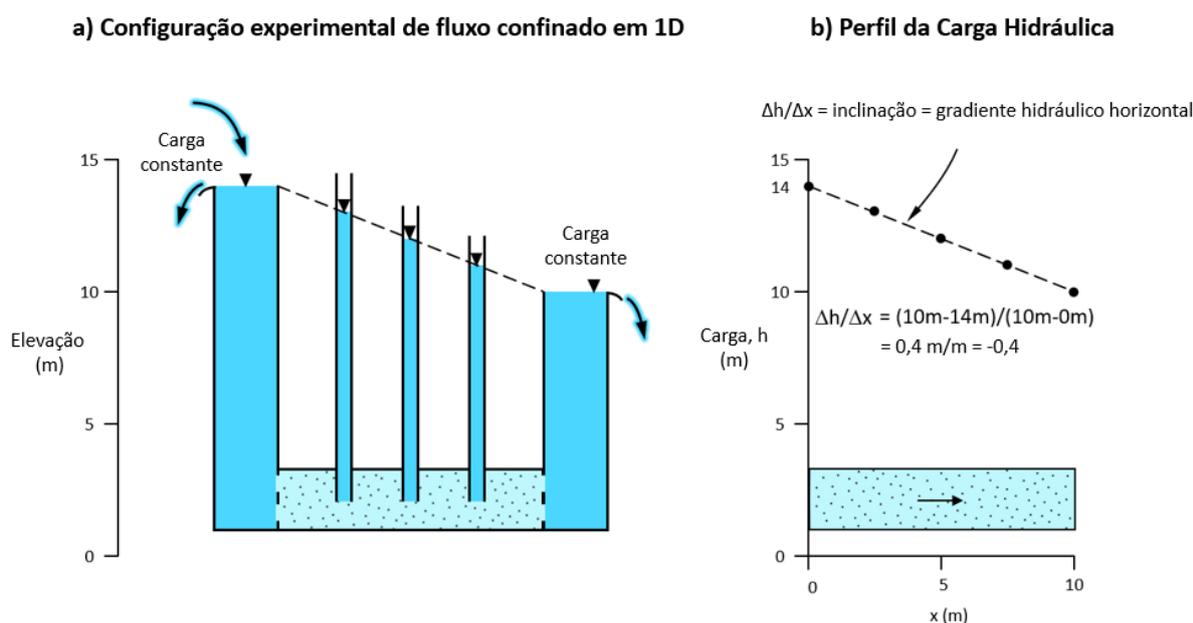


Figura 11 - Demonstração de fluxo horizontal em estado estacionário e gradiente horizontal associado; a água flui da esquerda para a direita de acordo com a direção da diminuição da energia potencial, conforme expresso pelo perfil de carga hidráulica: a) configuração experimental e b) perfil de carga hidráulica (Cohen e Cherry, 2020).

Observe que a carga hidráulica dentro de cada coluna de água é uniforme com a profundidade, conforme mostrado na **Figura 12** e conforme descrito anteriormente. A carga hidráulica em cada ponto de medição no piezômetro é igual à elevação do topo da coluna d'água no piezômetro. Em teoria, há um gradiente de carga hidráulica vertical insignificante (e talvez incomensurável) em cada compartimento, porque também há fluxo vertical, mas as diferenças de carga em todo o compartimento são insignificantes, dada a baixa taxa de fluxo e atrito mínimo transmitido pelas laterais dos compartimentos. Assim, para todos os efeitos práticos, o perfil da carga pode ser considerado uniforme em cada coluna de água.

Esta configuração experimental oferece uma oportunidade para introduzir alguns conceitos de modelagem hidráulica simples, representados como o modelo hidráulico equivalente (Figura 12c).

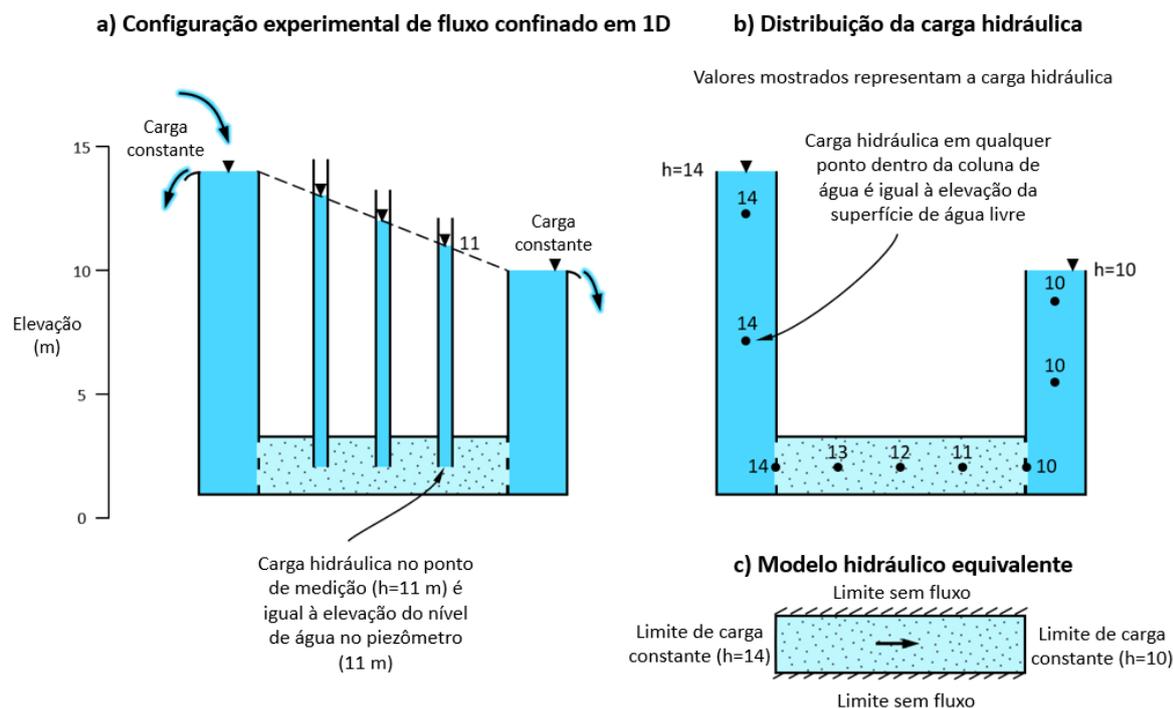


Figura 12 - Relação entre medições de piezômetro, distribuição de carga hidráulica e condições de contorno associadas da configuração experimental. Este é um cenário de estado estacionário para um sistema com limites de cargas constantes (Cohen e Cherry, 2020).

A Figura 13a mostra a mesma configuração experimental, exceto que o cilindro com areia é vertical. Como tal, é apropriado traçar a carga hidráulica em função da elevação (Figura 13b). A carga hidráulica diminui com a diminuição da elevação. Como resultado, o gradiente hidráulico é positivo (+0,4), enquanto o gradiente é negativo (-0,4) na configuração horizontal (Figura 11). Essa diferença de sinal é simplesmente um artefato de usar a elevação como coordenada espacial; a lei de Darcy ainda se aplica, e a água flui para baixo na direção de diminuição da carga hidráulica.

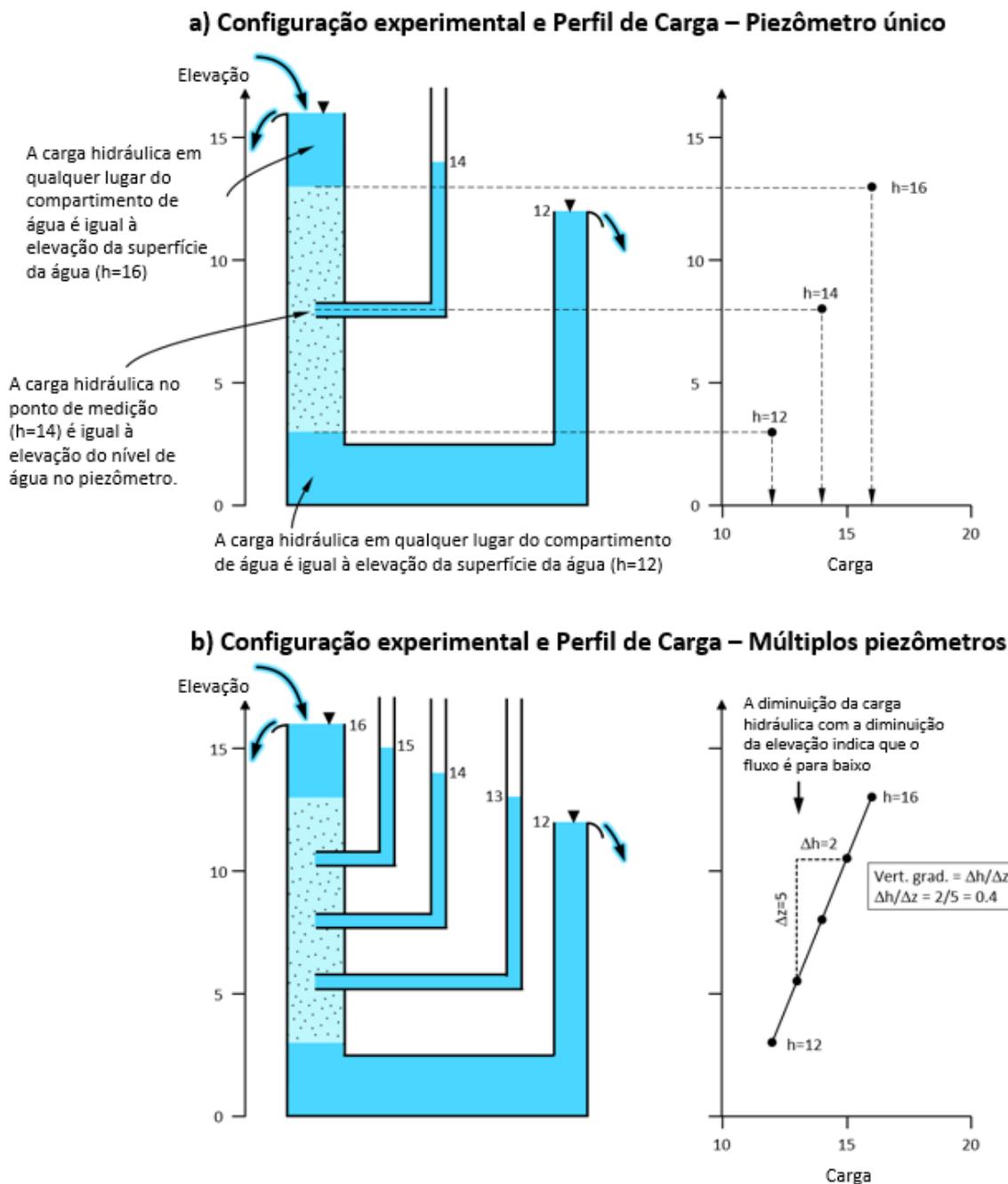


Figura 13 - Demonstração de fluxo vertical e perfil de carga associado: O perfil de carga é definido pelos níveis de água medidos em piezômetros e seus respectivos pontos de medição, que são as extremidades abertas de cada piezômetro na coluna de areia. A água flui para baixo, da maior para a menor carga (Cohen e Cherry, 2020).

A **Figura 14** é uma versão modificada da configuração experimental com multipiezômetros mostrada na **Figura 13b**. No caso da **Figura 14**, os piezômetros estão agrupados com um espaçamento entre eles e medem a carga em diferentes profundidades porque a extremidade aberta de cada piezômetro (o ponto de medição) está localizada em diferentes elevações.

Configuração experimental e Perfil de Carga – Piezômetros agrupados

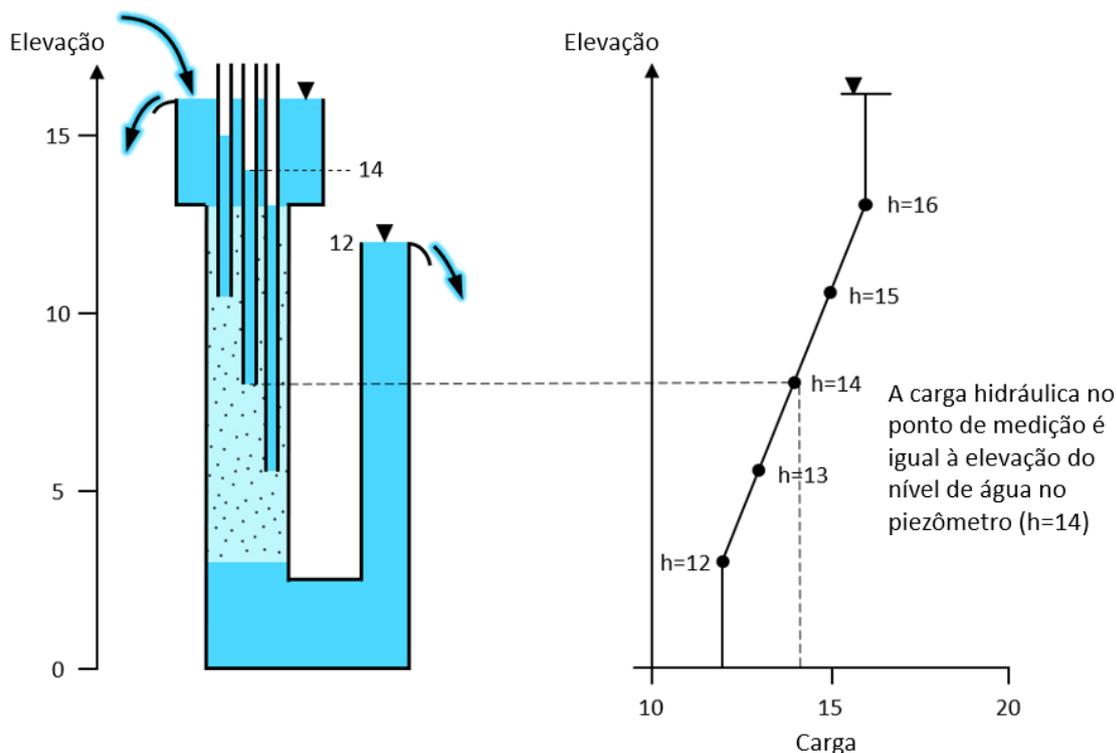


Figura 14 - Perfil da carga usando piezômetros agrupados. Mesmo que os piezômetros estejam posicionados próximos um do outro e seus respectivos níveis de água diminuem para a direita, as medições são na verdade representativas do perfil vertical da carga, pois todo fluxo é vertical devido à geometria do cilindro e à posição vertical de cada um ponto de medição (Cohen e Cherry, 2020).

A **Figura 15** compara os perfis de carga medidos com os piezômetros na **Figura 13b** com a configuração dos piezômetros agrupados (**Figura 14**). Os perfis da carga são idênticos, porque os pontos de medição e as condições de contorno são idênticos.

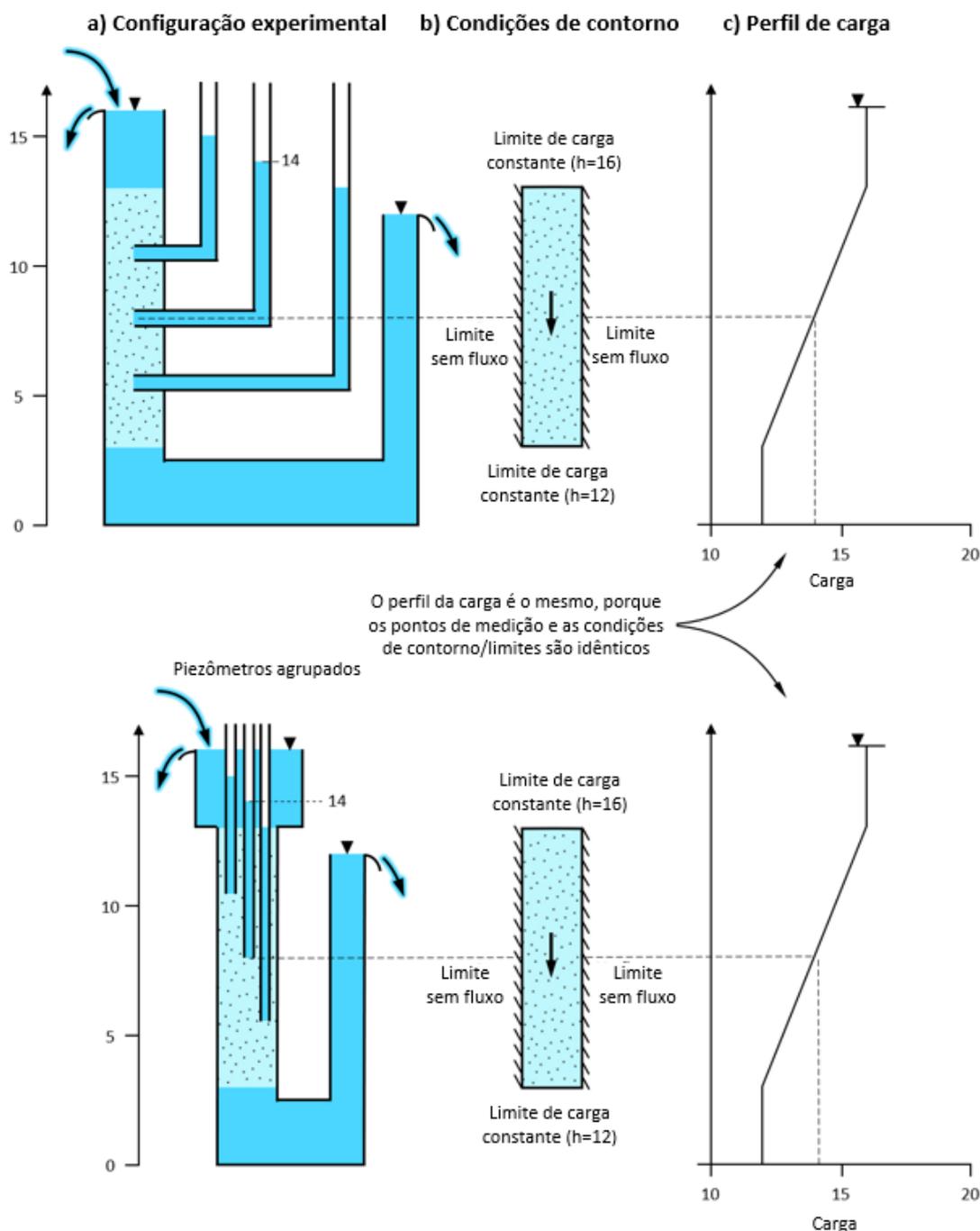
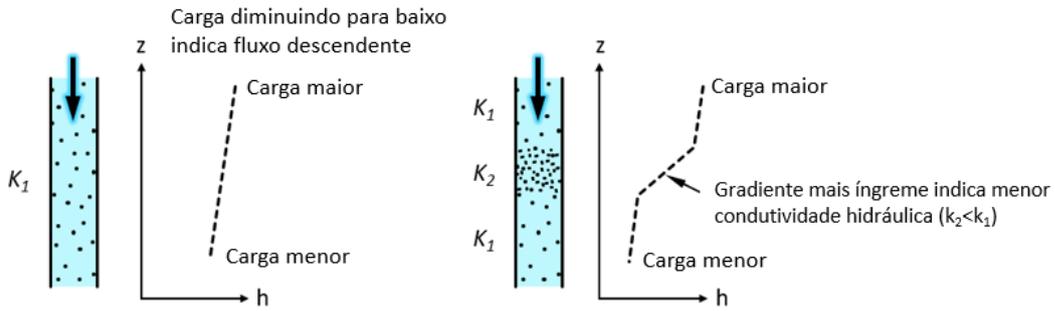


Figura 15 - Comparação do perfil da carga usando diferentes orientações do piezômetro: a) configuração experimental; b) condições de contorno; e, c) perfil da carga. Os perfis da carga são idênticos, porque os pontos de medição e as condições de contorno são idênticos (Cohen e Cherry, 2020).

A **Figura 16** ilustra gradientes hidráulicos verticais para fluxo unidimensional descendente e ascendente. A relação entre gradiente hidráulico e condutividade hidráulica, K , ($-dh/dL \propto 1/K$) ainda se mantém; apenas a orientação mudou.

Fluxo descendente/para baixo



Fluxo ascendente/para cima

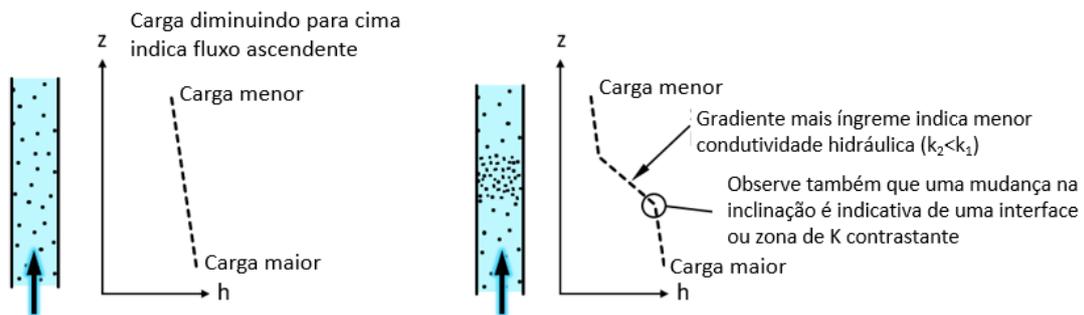


Figura 16 - Perfis verticais de carga para cenários de fluxo ascendente e descendente. O perfil da carga define a direção do fluxo e as mudanças na inclinação são indicativas de condutividade hidráulica variável (Cohen e Cherry, 2020).

4 Linhas Equipotenciais e Direção de Fluxo

Tendo estabelecido o conceito de gradiente hidráulico e o fato de que a água subterrânea flui de locais de maior para menor carga hidráulica, o objetivo desta seção é apresentar como os gradientes hidráulicos se manifestam na forma de linhas equipotenciais, que são comumente plotadas como *contornos equipotenciais* em mapas e em seção transversal. Estes, por sua vez, fornecem um meio de inferir a direção e magnitude dos gradientes hidráulicos e direções de fluxo. Compreender como criar e interpretar mapas de contorno equipotencial e seções transversais de contorno equipotencial é essencial para o gerenciamento bem-sucedido dos recursos hídricos subterrâneos.

Esta seção pode servir como uma introdução às redes de fluxo. A construção gráfica de redes de fluxo é apresentada no livro [Groundwater Project book](#) de Poeter e Hsieh (2020), no qual as características gerais das linhas equipotenciais e direções de fluxo associadas são apresentadas para várias condições hidrogeológicas idealizadas. Este livro discute os perfis da carga hidráulica conforme eles se relacionam aos contornos de equipotencial, conforme ilustrado nas seções transversais.

A discussão de linhas equipotenciais, direções de fluxo e gradientes apresentada nesta seção é válida para condições isotrópicas ($K_x=K_y=K_z$), o que significa que a condutividade hidráulica tem o mesmo valor quando medida em qualquer direção. Esta simplificação não é um compromisso, mas permite-nos compreender mais facilmente os conceitos subjacentes que constituem a base para situações mais complexas. Na verdade, ao analisar sistemas hidrogeológicos em campo, muitas vezes assumimos a isotropia na análise inicial, e nem sempre é necessário ir além desta simplificação. Essa suposição pode ser afrouxada para levar em conta as condições anisotrópicas, nas quais K não é o mesmo em todas as direções (Woessner e Poeter, 2020).

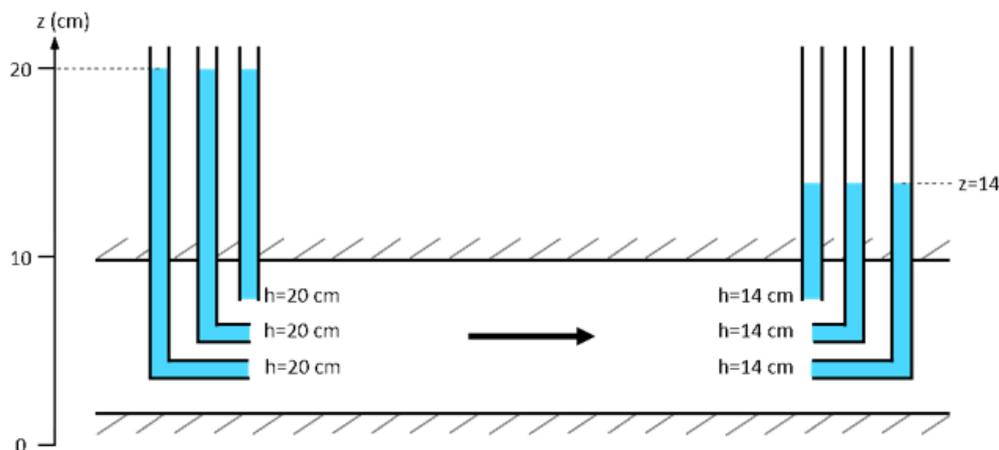
4.1 Considerações Gerais

Vamos primeiro considerar uma configuração experimental simples para ilustrar alguns dos aspectos mais fundamentais dos contornos equipotenciais e direções de fluxo associadas (para um meio isotrópico). Conforme mostrado na **Figura 17**, os piezômetros são inseridos em várias profundidades em ambos os lados de um cilindro horizontal cheio em meio poroso saturado de água através do qual a água flui em condições laminares (em outras palavras, a água flui de acordo com a lei de Darcy). Como o nível de água em um piezômetro representa a carga hidráulica *no ponto de medição* (a extremidade aberta na parte inferior de cada piezômetro), a carga hidráulica em todos os três pontos do lado esquerdo ($x_1=10$ cm) é igual a 20 cm ($h_1=20$ cm). Da mesma forma, a carga hidráulica em todos os três pontos do lado direito ($x_2=40$ cm) é de 14 cm ($h_2=14$ cm). Conforme mostrado na **Figura 17b**, *um contorno equipotencial conecta pontos de carga hidráulica igual*. Dito de outra forma, *a carga hidráulica em todos os pontos ao longo de um contorno equipotencial é igual*. Por conseguinte, não

20

há gradiente ao longo do contorno equipotencial e o *vetor de gradiente hidráulico* deve ser ortogonal (ou seja, a 90°) em relação à linha de contorno. Em outras palavras, a direção do fluxo é ortogonal aos contornos equipotenciais para condições isotrópicas.

a) Configuração experimental



b) Perfil da carga hidráulica, gradiente e contornos equipotenciais

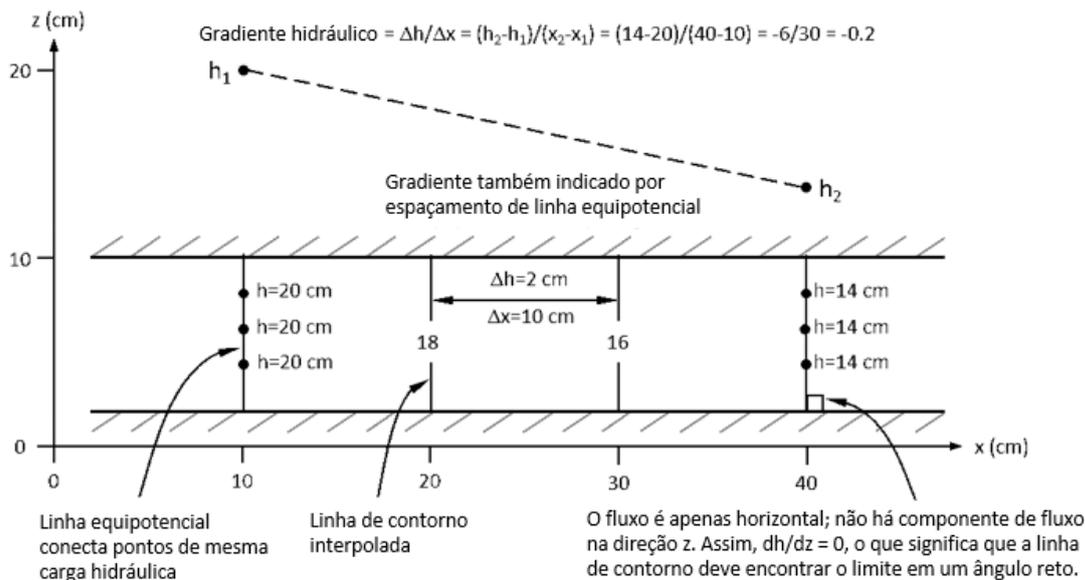


Figura 17 - Carga hidráulica e linhas de contorno equipotenciais para fluxo em 1D: a) configuração experimental e b) perfil de carga hidráulica, gradiente e linhas de contorno equipotenciais. As medições do piezômetro permitem a definição de contornos equipotenciais, que refletem a direção do fluxo (para a direita da maior para a menor carga) e o gradiente hidráulico (Cohen e Cherry, 2020).

As medições em cada ponto mostram que o gradiente hidráulico na direção z é zero. Ou seja, a carga hidráulica não muda na direção z ($\Delta h / \Delta z = 0$), o que é consistente com o fato de que a água não pode fluir na direção vertical devido à presença dos lados

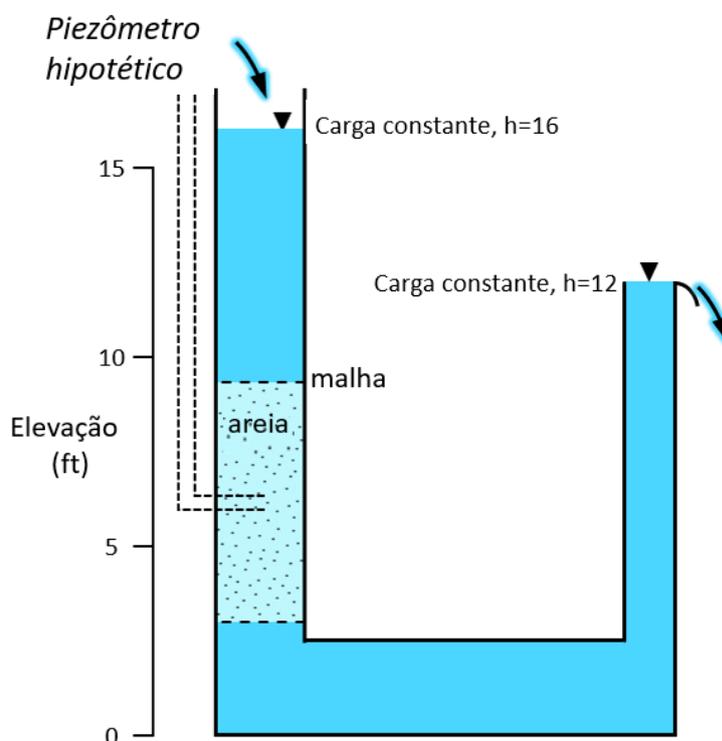
impermeáveis ("limites sem fluxo") do cilindro horizontal. A ausência de um gradiente vertical adjacente aos limites é expressa por linhas equipotenciais que são perpendiculares aos limites sem fluxo.

A **Figura 17** também mostra o perfil da carga hidráulica horizontal (gradiente hidráulico horizontal). Observe que o gradiente hidráulico pode ser medido usando o perfil da carga e usando os contornos equipotenciais.

Se a diferença de queda entre os conjuntos de piezômetros fosse menor, o gradiente hidráulico seria menor (o perfil de carga hidráulica não seria tão íngreme e o espaçamento entre as linhas de contorno equipotenciais de 2 cm seria maior).

4.1.1 Problema - Exemplo 3

- Desenhe linhas equipotenciais na porção com areia em intervalos de 1 ft (pé).
- A que nível a água subirá no piezômetro hipotético?



[Clique aqui para ver a solução do Problema – Exemplo 3](#) ↴

Tendo agora estabelecido os elementos básicos dos contornos equipotenciais para o fluxo unidimensional e a direção do fluxo da água subterrânea associada, considere a configuração experimental e a representação hidráulica correspondente do fluxo bidimensional na **Figura 18**. A geometria geral do fluxo é como seria de se esperar, com base nos limites constantes da carga, o fluxo é da esquerda para a direita e deve haver pelo menos algum componente vertical do fluxo devido à geometria do sistema fechado e à localização das condições de limite. Como antes, os contornos equipotenciais encontram os limites sem fluxo em ângulos retos. Além disso, as linhas de contorno equipotenciais nos limites constantes da carga são definidas pela elevação do corpo de água nesses limites, que foi ilustrado na **Figura 12**. Observe também que, porque o meio poroso é isotrópico, as linhas de fluxo encontram os contornos equipotenciais em ângulos retos (90°).

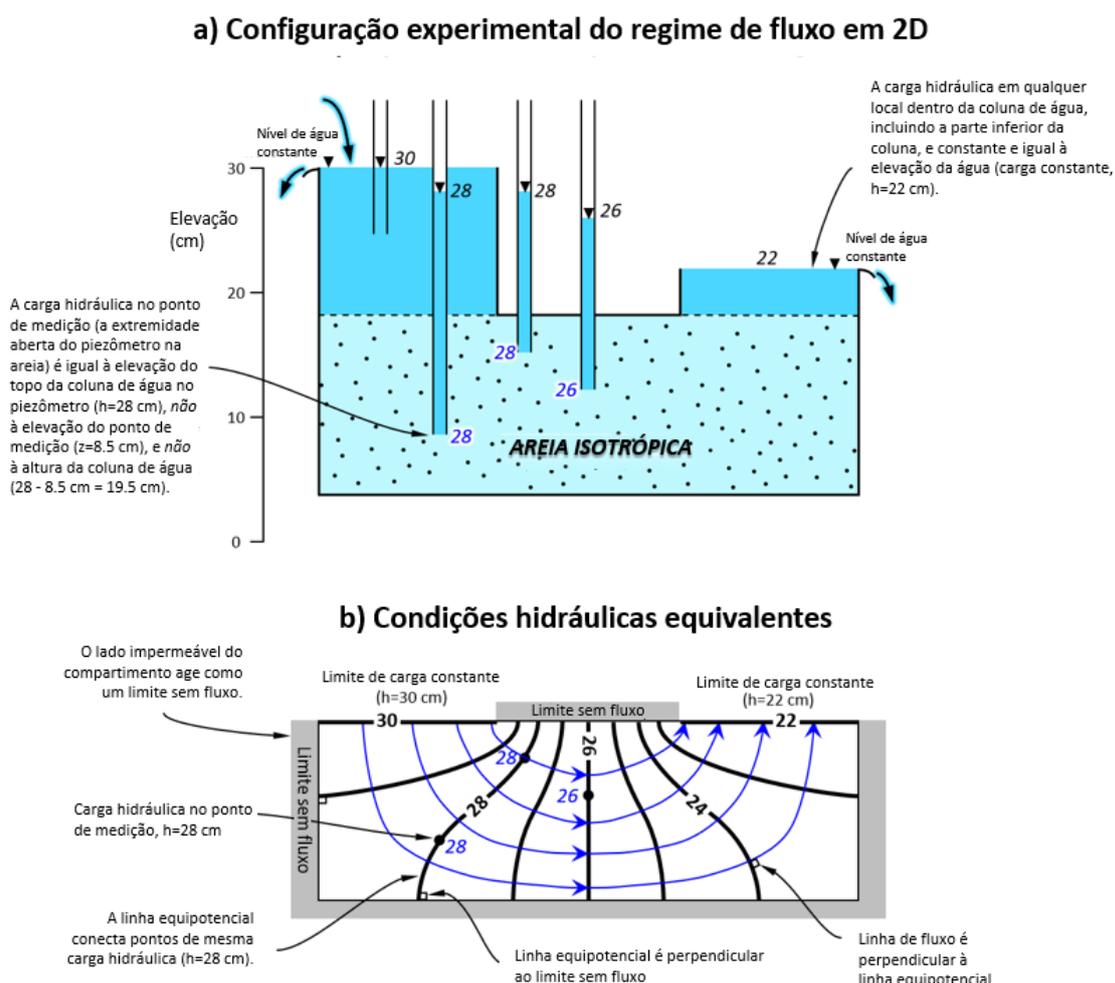


Figura 18 - Aparato experimental para ilustrar o fluxo em 2D: a) configuração experimental do regime de fluxo bidimensional e b) condições hidráulicas equivalentes. As condições de limite são indicativas da configuração experimental, e a localização relativa e o tipo de limites ditam a geometria do fluxo e os contornos equipotenciais associados (Cohen e Cherry, 2020).

5 Fluxo Constante Saturado na Escala de Campo

Em uma escala de campo, a carga hidráulica pode ser medida usando vários tipos de poços (instalados separadamente, em um arranjo espacialmente agrupado ou no mesmo local horizontal, mas em profundidades variáveis). Os poços de água subterrânea são essencialmente versões em grande escala dos piezômetros em escala de laboratório que usamos para ilustrar a lei de Darcy nas seções anteriores. As seções a seguir apresentam a relação de carga hidráulica e fluxo em três tipos básicos de formações hidrogeológicas (aquífero confinado, aquitarde, aquífero não confinado) na zona saturada, conforme descrito nesta seção e mostrado na **Figura 19**.

Um *aquífero confinado* é delimitado acima e abaixo por um *aquitarde*, que é uma formação semipermeável que restringe o fluxo entre os aquíferos sobrejacentes e/ou subjacentes.

A elevação do nível da água em um poço protegido em um aquífero confinado será mais alta do que a base do aquitarde sobrejacente. A interpolação das elevações da água entre aquelas medidas em poços em um aquífero confinado define a *superfície potenciométrica*.

Um *aquífero não confinado* é limitado apenas em sua base por um aquitarde. O topo do aquífero não confinado é o *lençol freático*, que é a elevação do nível da água em um poço que é profundo o suficiente para encontrar água parada.

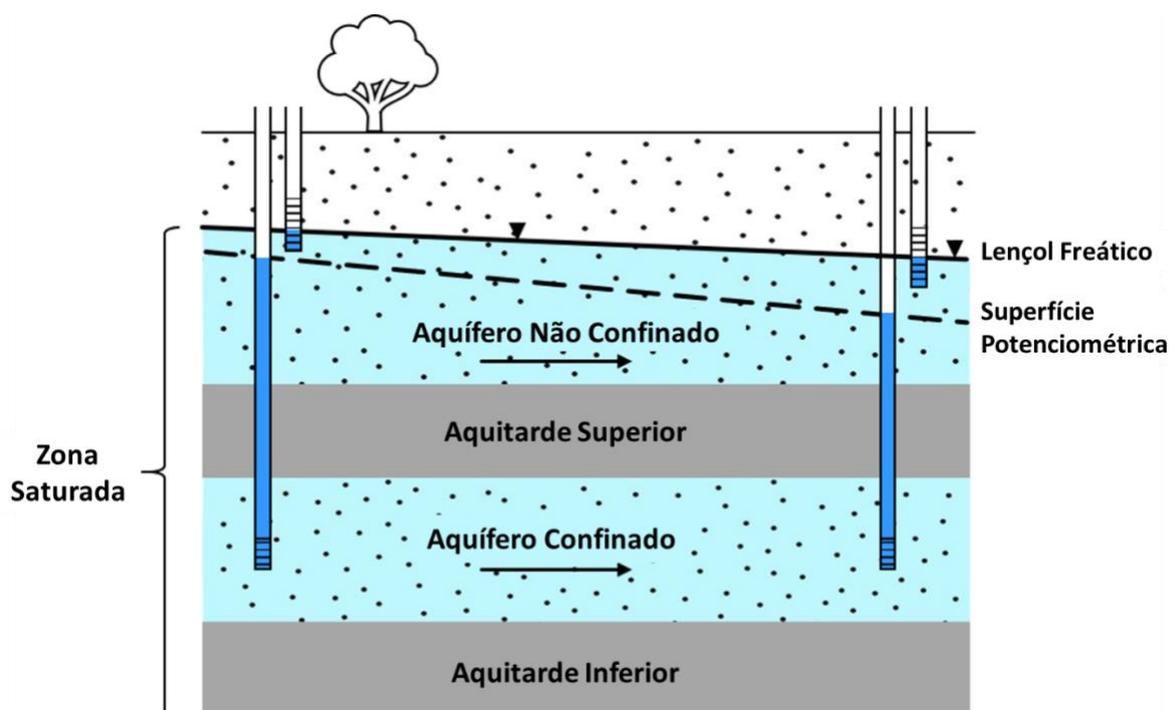


Figura 19 - Seção transversal esquemática de um aquífero não confinado e confinado separado por um aquitarde. O aquífero não confinado, o aquífero confinado e o aquitarde são todos saturados de água e, portanto, são conectados hidráulicamente (Cohen e Cherry, 2020).

5.1 Hidráulica de Fluxo em Aquíferos Confinados

Nas seções anteriores, as várias configurações experimentais usadas para ilustrar os conceitos de carga hidráulica e fluxo são semelhantes às de um aquífero confinado, porque um aquífero confinado é limitado por camadas de baixa condutividade hidráulica em relação ao aquífero. Quando as camadas confinantes têm uma condutividade hidráulica muito mais baixa do que o aquífero, as camadas confinantes agem de maneira semelhante aos limites sem fluxo, porque restringem quase todo o fluxo através do aquífero, o que era o caso para todos os cenários experimentais apresentados anteriormente. Sob a maioria das condições naturais, alguma água pode migrar através de um aquífero saturado de água de acordo com a lei de Darcy se houver um gradiente hidráulico através do aquífero.

O conceito de superfície potenciométrica é fundamental para o fluxo em aquíferos confinados. A **Figura 20** fornece uma visão sobre porque a frase anterior é aplicável a condições confinadas; a superfície potenciométrica é na verdade uma superfície imaginária (**Figura 20a**) que pode ser definida usando contornos equipotenciais vistos no plano x-y (**Figura 20b**). Já estamos familiarizados com sua representação em seção transversal (**Figura 20c**). Os efeitos dos aquíferos confinados no escoamento confinado são apresentados na Seção 5.3.

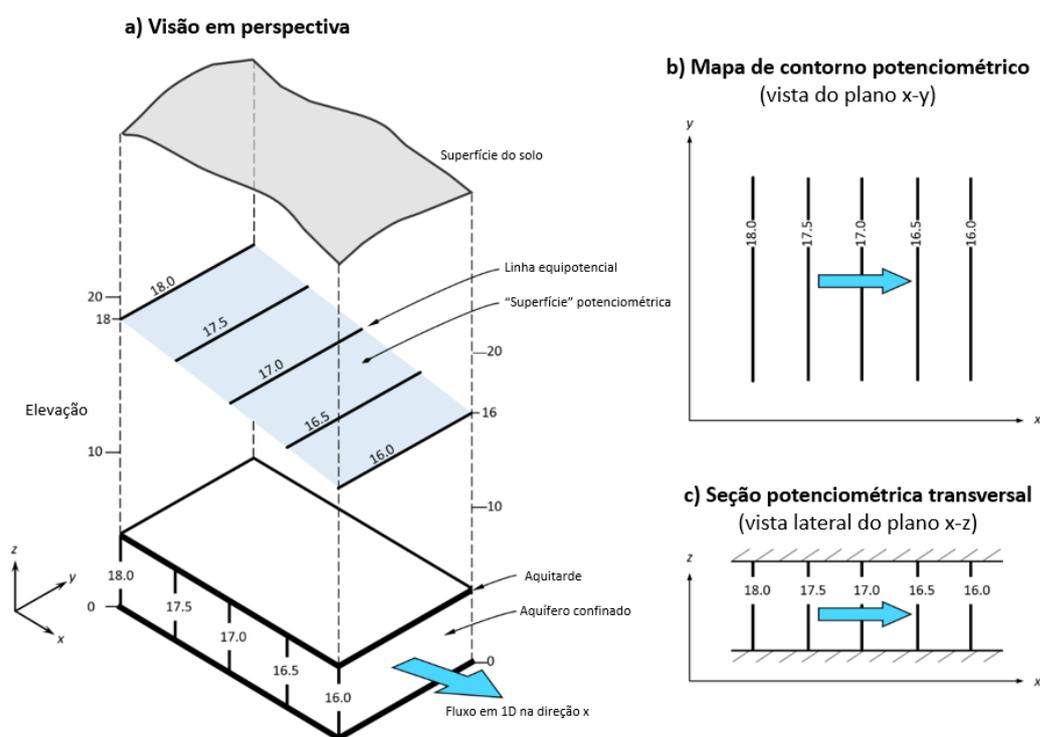
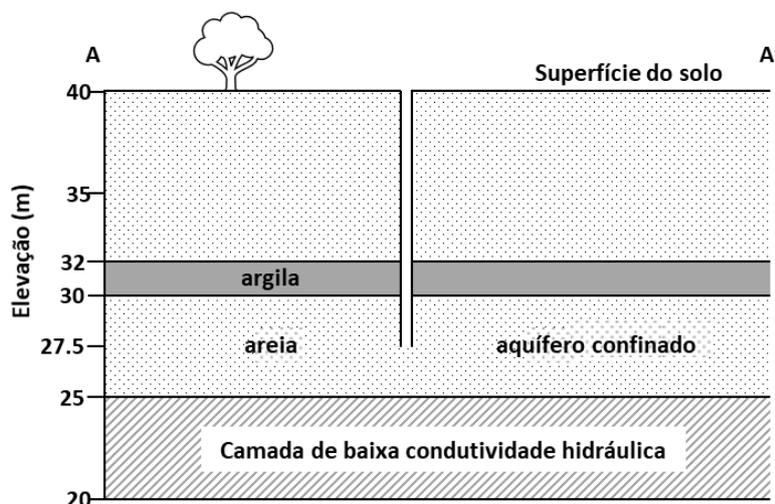
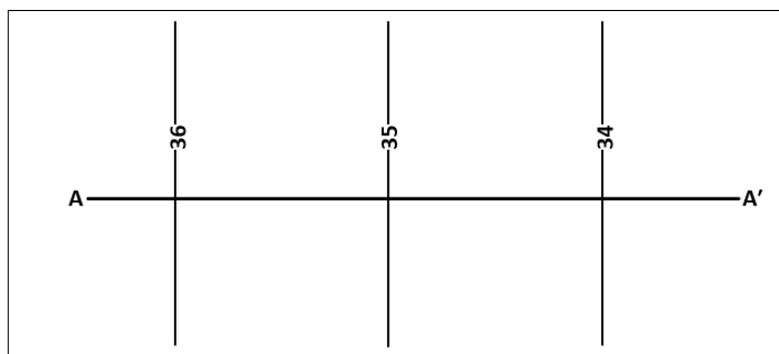


Figura 20 - Contornos potenciométricos para um aquífero confinado mostrados em vários planos de visualização: a) perspectiva; b) planta; e c) seção transversal. Na vista em planta, a superfície potenciométrica pode ser representada usando linhas equipotenciais de maneira semelhante às linhas de contorno de elevação usadas para representar a topografia da superfície do solo (Cohen e Cherry, 2020).

5.1.1 Problema - Exemplo 4

As figuras para este problema mostram um mapa de contorno potenciométrico de um aquífero confinado e uma seção transversal ao longo da seção A-A'. Qual é a profundidade do nível da água no poço (em relação à superfície do solo)? Explique.

- a) 3 m
- b) 5 m
- c) 7,5 m
- d) 10 m



[Clique aqui para ver a solução do Problema - Exemplo 4](#) ↴

5.2 Hidráulica de Fluxo em Aquíferos Não Confinados

O fluxo de água subterrânea em aquíferos não confinados obedece aos mesmos princípios que o fluxo em aquíferos confinados com um elemento adicionado; a elevação do topo da zona saturada define um “lençol freático”, que é a elevação da água que fica em um poço parado que é profundo o suficiente para encontrar água. Por exemplo, a carga hidráulica do lençol freático interceptada pelo poço raso mostrado na **Figura 21** é de 100 m. Além disso, consistente com nossas discussões anteriores, um contorno equipotencial conecta pontos de carga hidráulica igual, que é medida usando poços (piezômetros em escala de campo). O lençol freático não é uma linha equipotencial; tem uma carga variável porque varia em elevação.

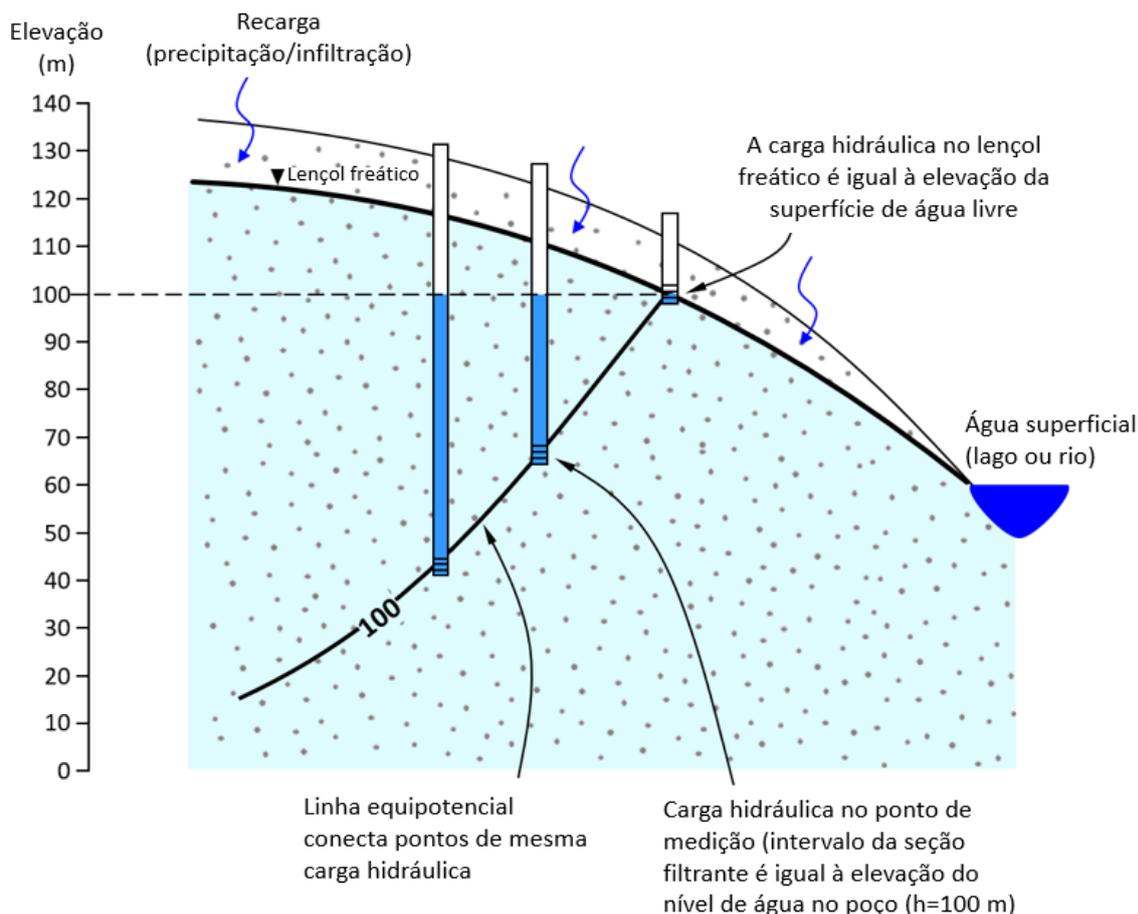


Figura 21 - Equipotential contours in an unconfined aquifer; the contour lines connect points of equal hydraulic head and extend to the water table of the same elevation (Cohen and Cherry, 2020).

A **Figura 22** mostra que o lençol freático também pode ser representado na visualização do mapa. Cada linha de contorno representa uma linha de elevação igual à do lençol freático. Observe também que o gradiente do lençol freático aumenta (lençol freático mais íngreme e linhas de contorno mais próximas) na direção do fluxo devido ao fluxo convergente, o que diminui a área da seção transversal do fluxo, conforme mostrado anteriormente na **Figura 5**.

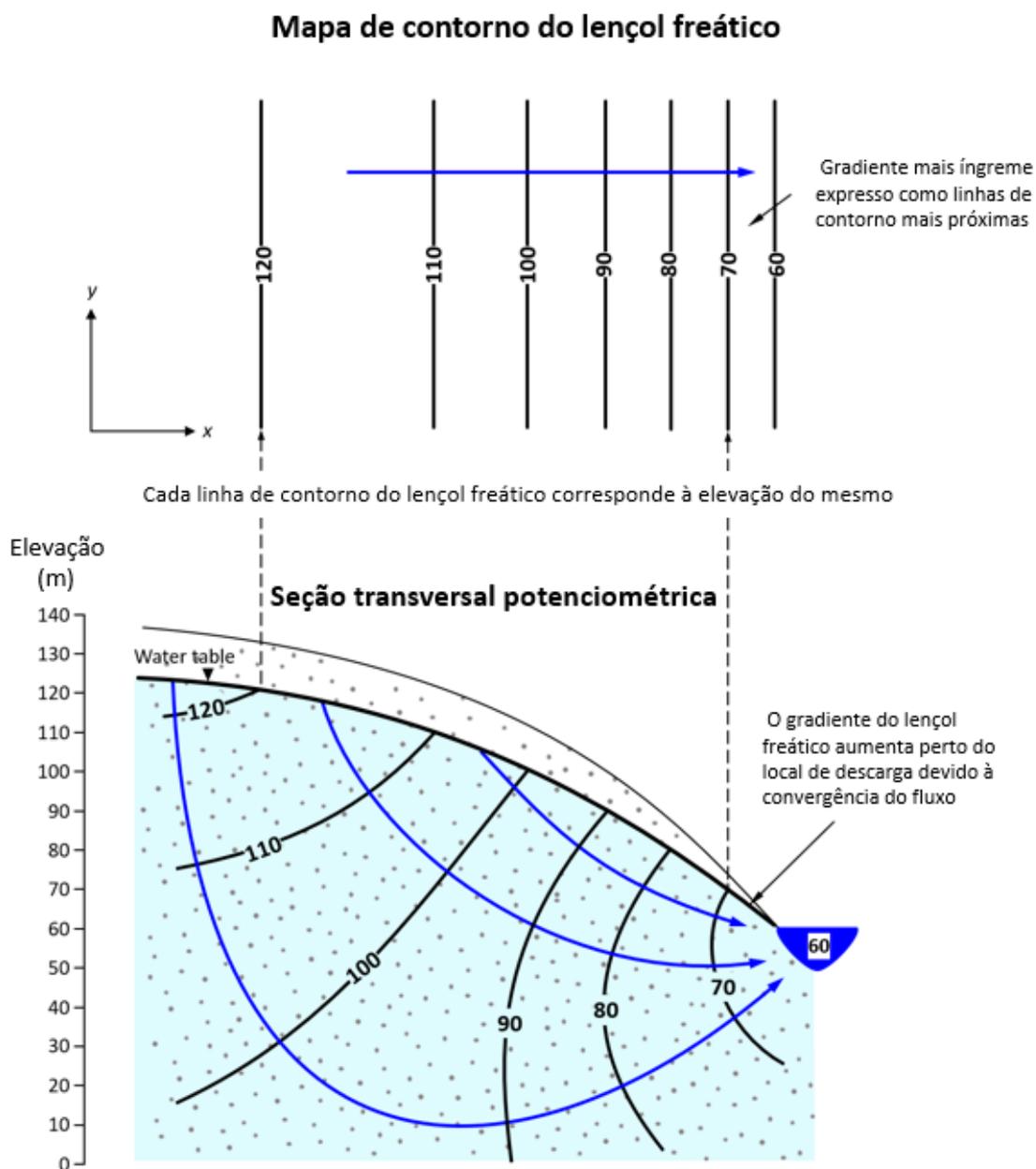
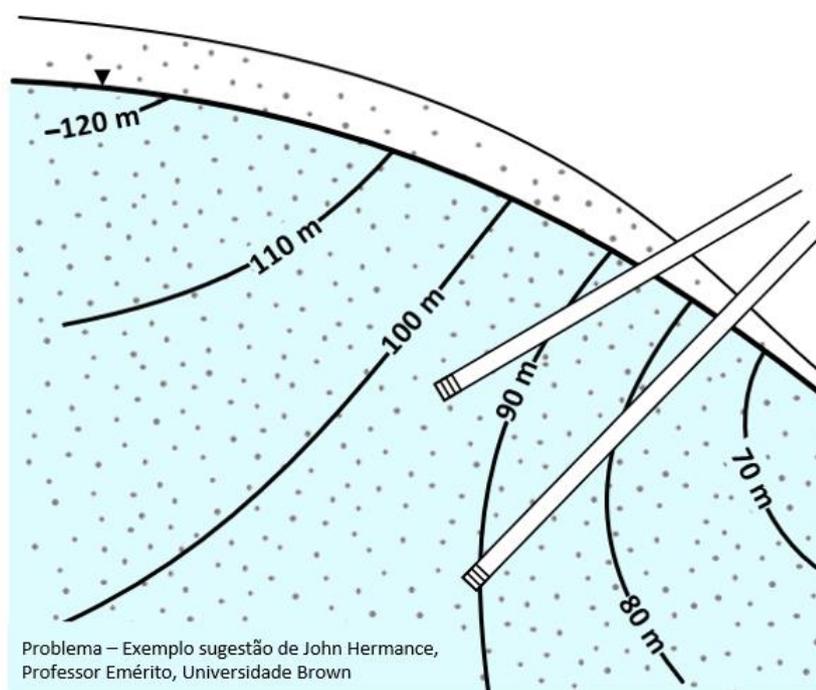


Figura 22 - Seção transversal potenciométrica, direção do fluxo de água subterrânea (setas azuis) e mapa de contorno do lençol freático em um aquífero não confinado idealizado. O mapa de contorno representa a topografia do lençol freático e pode ser usado para inferir a direção geral do fluxo. A geometria do fluxo abaixo do lençol freático é definida por contornos equipotenciais em seção transversal (Cohen e Cherry, 2020).

5.2.1 Problema - Exemplo 5

- A que nível (elevação) a água subirá nos poços inclinados?



[Clique aqui para ver a solução do Problema - Exemplo 5](#) ↴

A **Figura 23** mostra o perfil vertical da carga medido em poços agrupados. Esses dados também podem ser medidos em poços multinível (multiportas), por exemplo. É importante ressaltar que a figura mostra que, embora gradientes verticais estejam presentes, o fluxo também tem um componente horizontal. Ou seja, a presença de um gradiente vertical não indica necessariamente que o fluxo é totalmente vertical, apenas que um componente do fluxo é vertical.

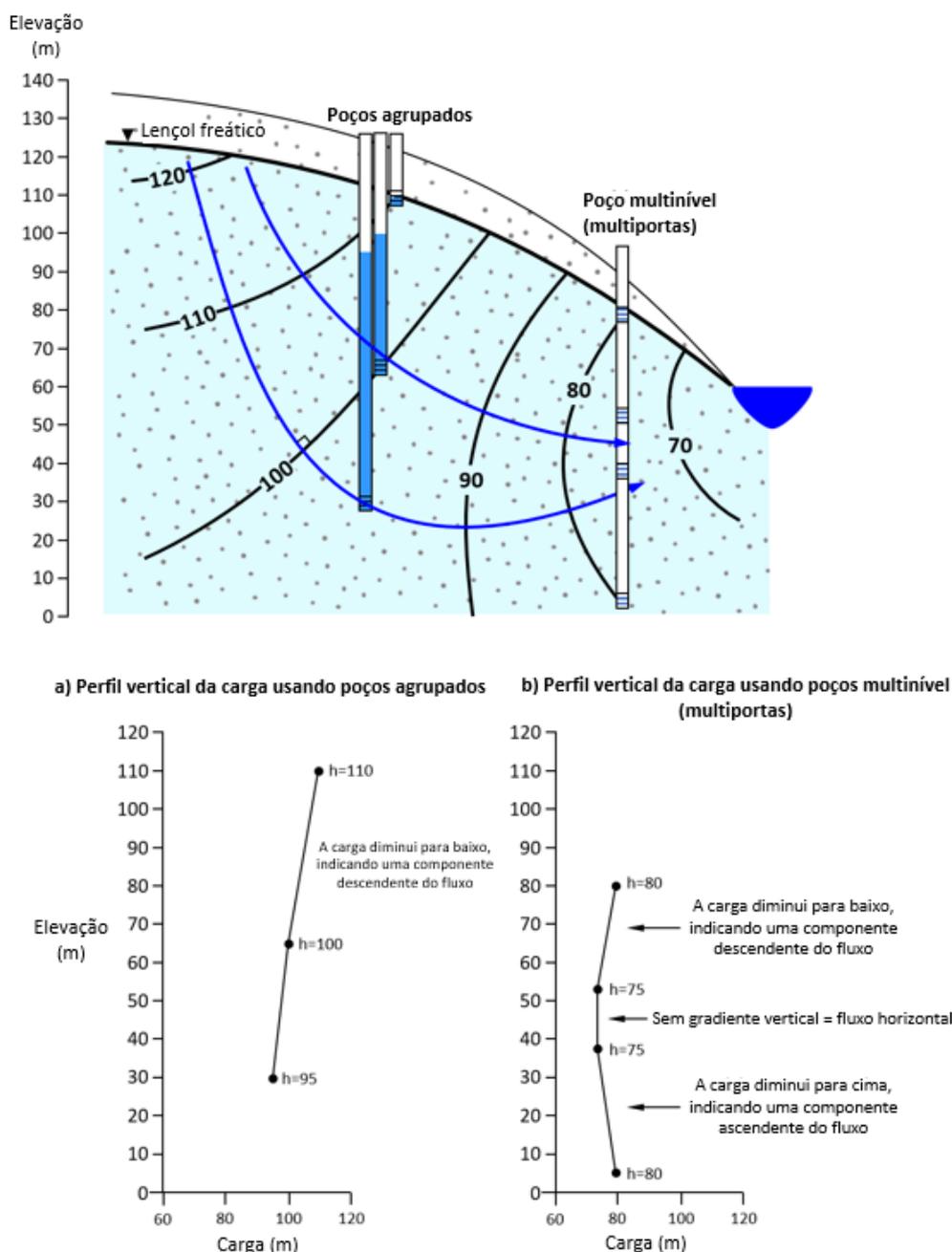


Figura 23 - Exemplo de perfis verticais de carga em um aquífero não confinado idealizado (Cohen e Cherry, 2020).

Os contornos potenciométricos e a geometria do fluxo no cenário de aquífero não confinado mostrado na **Figura 23** são representativos de um caso em que um limite vertical sem fluxo está presente perto da extremidade superior do sistema (lado esquerdo). Esse limite tem o efeito de causar um fluxo vertical significativo naquela região (ver **Figura 18** para um aparato experimental e contornos análogos). Em muitos casos, um limite sem fluxo pode não estar próximo e o fluxo na área de interesse é principalmente horizontal, como mostrado na **Figura 24**

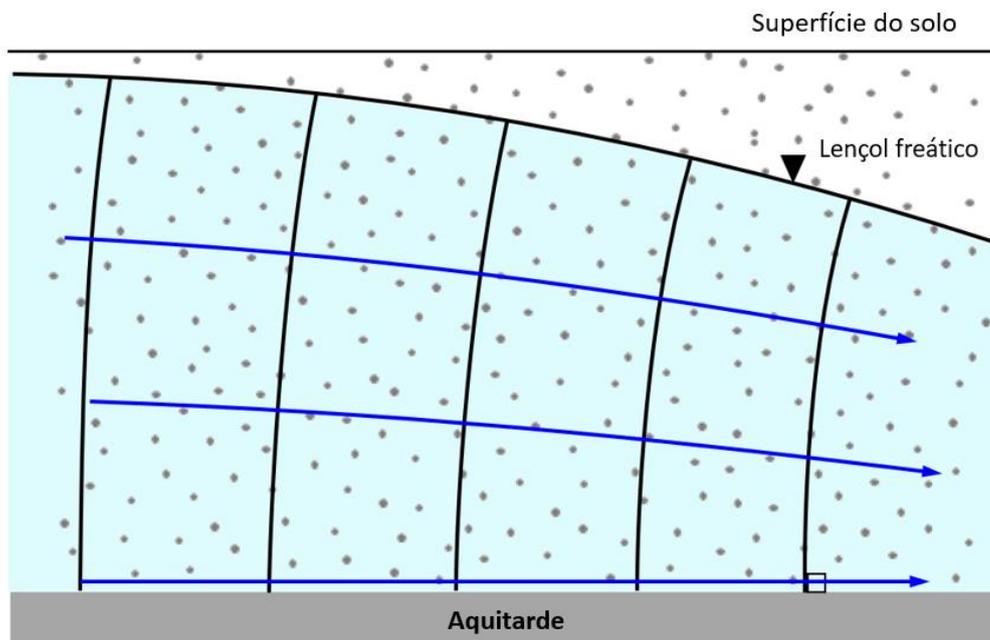


Figura 24 - Fluxo principalmente horizontal em um aquífero não confinado. Os contornos potenciométricos são ortogonais ao aquitarde, que possui uma condutividade hidráulica muito baixa (K), de modo que se comporta como um limite sem fluxo (Cohen e Cherry, 2020).

Na prática, o fluxo horizontal em aquíferos não confinados é frequentemente aproximado como puramente horizontal, especialmente quando avaliado em uma escala sub-regional e longe das condições de contorno, como mostrado na **Figura 25**.

Lençol freático aproximado como uma superfície plana com fluxo horizontal idealizado para estimar a direção do fluxo horizontal em aquíferos não confinados na elevação do lago

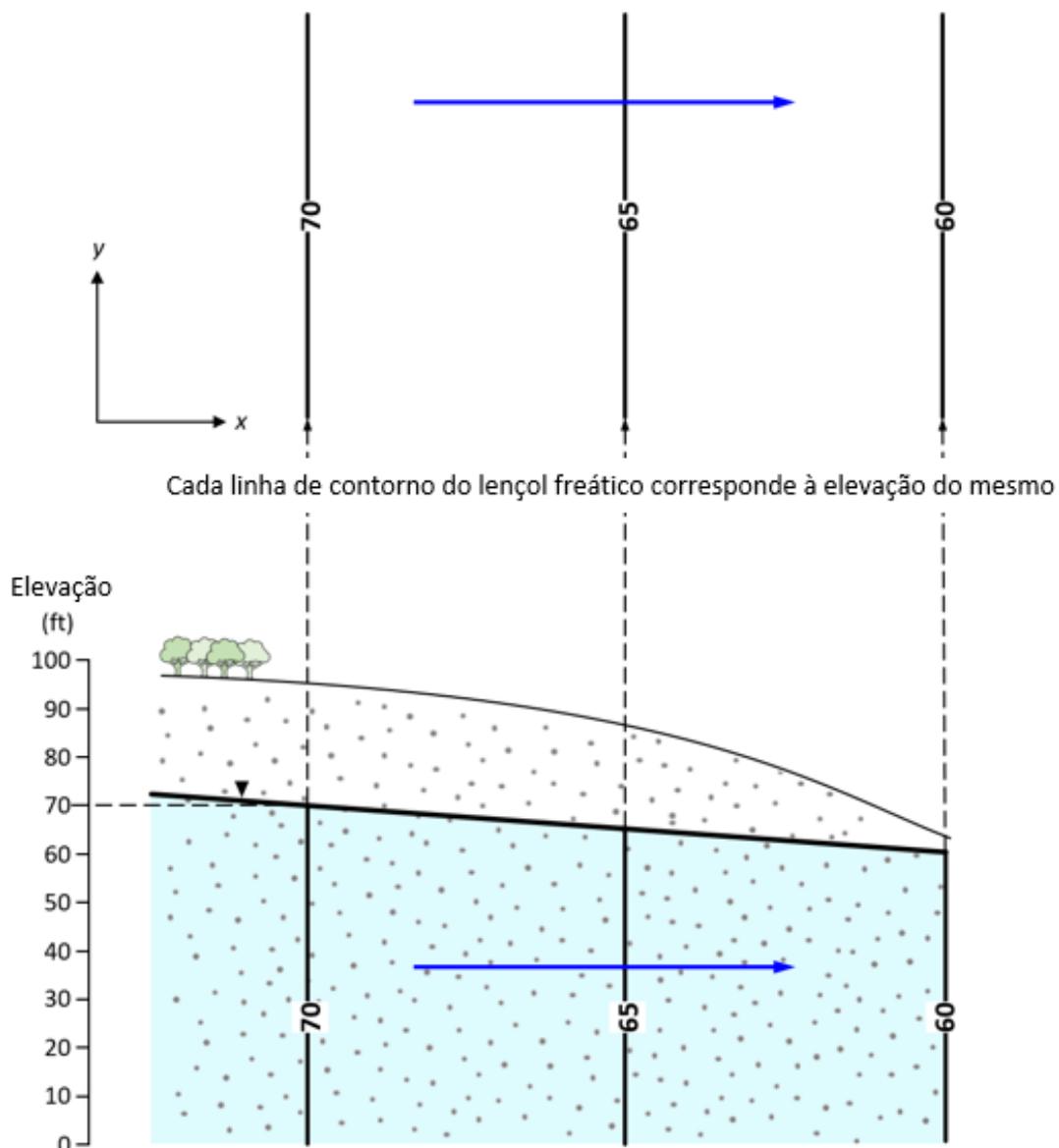
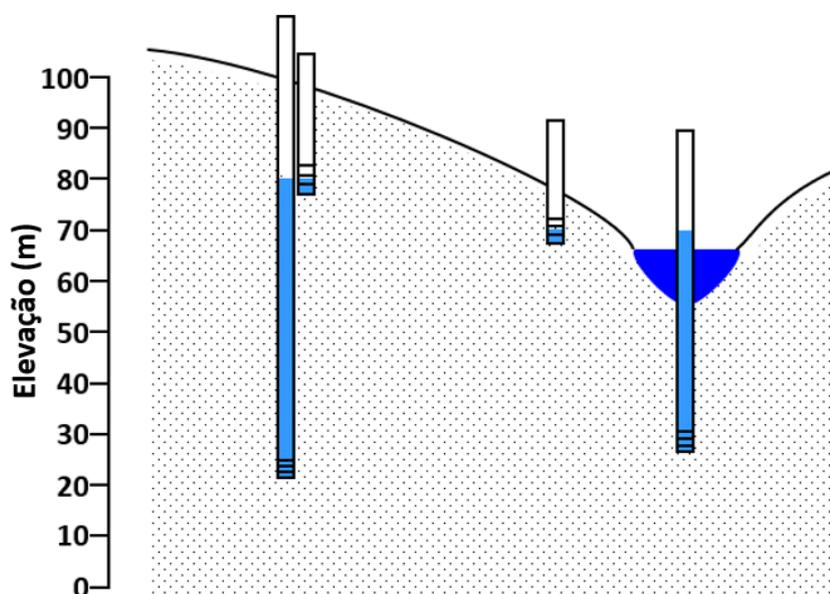


Figura 25 - O lençol freático representado como uma superfície plana com fluxo predominantemente horizontal em toda a seção transversal (Cohen e Cherry, 2020).

5.2.2 Problema - Exemplo 6

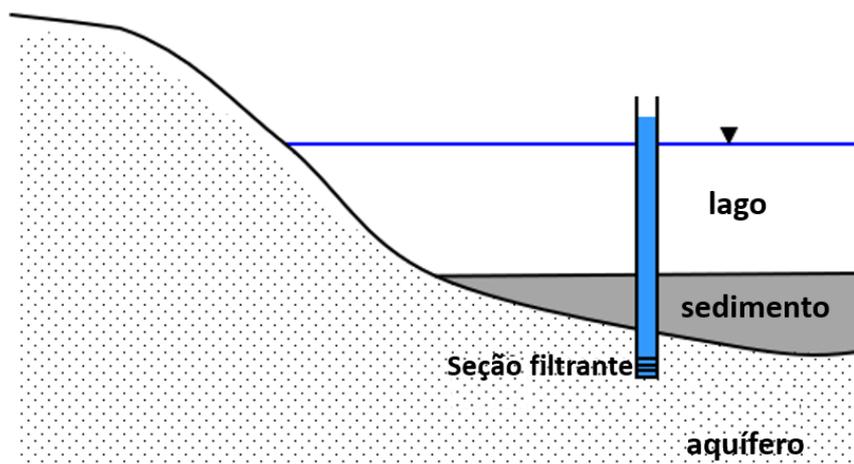
- Desenhe o lençol freático.
- Desenhe os contornos equipotenciais de 70 m, 75 m e 80 m e esboce várias linhas de fluxo.



[Clique aqui para ver a solução do Problema – Exemplo 6](#) ↴

5.2.3 Problema - Exemplo 7

- Um piezômetro é inserido em um aquífero abaixo do sedimento (baixo K) de um lago, e a água sobe a um nível estável, conforme mostrado abaixo. Um lençol freático está presente, mas não é mostrado. A água está fluindo para cima ou para baixo através do sedimento? Explique.
- Desenhe uma representação esquemática do perfil vertical da carga, estendendo-se desde o nível da água do lago até a seção filtrante do poço.



[Clique aqui para ver a solução do Problema – Exemplo 7](#)

5.2.4 Problema - Exemplo 8

A figura abaixo é uma vista de um mapa de um lago e linha costeira. A elevação do lençol freático no Poço A é de 12 m. Supondo que o lençol freático seja plano (um plano inclinado), qual é a elevação do nível da água esperada no Poço B?

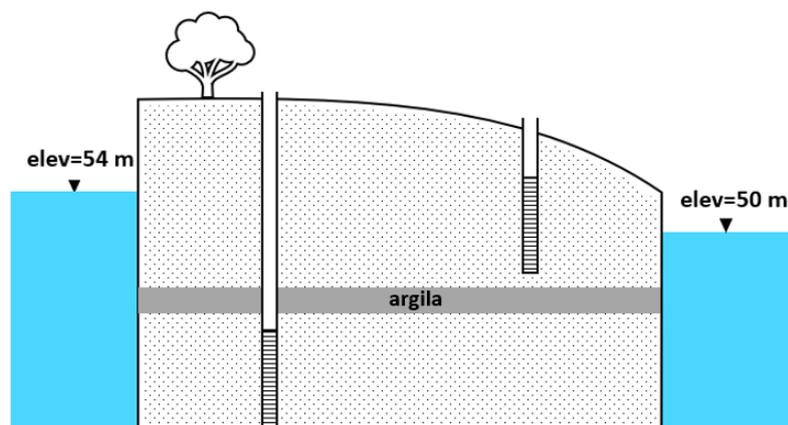
- a) 12 m
- b) 13 m
- c) 14 m
- d) Um valor entre 12 m e 13 m



[Clique aqui para ver a solução do Problema – Exemplo 8](#)

5.2.5 Problema - Exemplo 9

Estime o nível de água em cada poço e determine se há fluxo vertical através do aquítarde composto por argila.



[Clique aqui para ver a solução do Problema – Exemplo 9](#)

5.3 Aquíferos e Aquítarde

Os cenários de fluxo e gradiente hidráulico associados mostrados nas figuras anteriores também estão presentes em aquíferos separados por um aquítarde. Conforme mostrado na **Figura 26**, o gradiente horizontal no aquífero não confinado e no aquífero confinado são definidos pelo lençol freático e pela superfície potenciométrica, respectivamente. Na **Figura 26**, a carga diminui para a direita em ambos os aquíferos. Consequentemente, a água subterrânea flui para a direita. No entanto, há uma diferença na carga hidráulica acima e abaixo do aquítarde, conforme mostrado pelos valores de carga rotulados na seção transversal. Esses valores são baseados no lençol freático e na superfície potenciométrica. A **Figura 26a** ilustra o lençol freático e a superfície potenciométrica e mostra as cargas hidráulicas em duas portas no gráfico à direita. A **Figura 26b** mostra o mesmo cenário usando um poço multiporta com muitos pontos de amostragem.

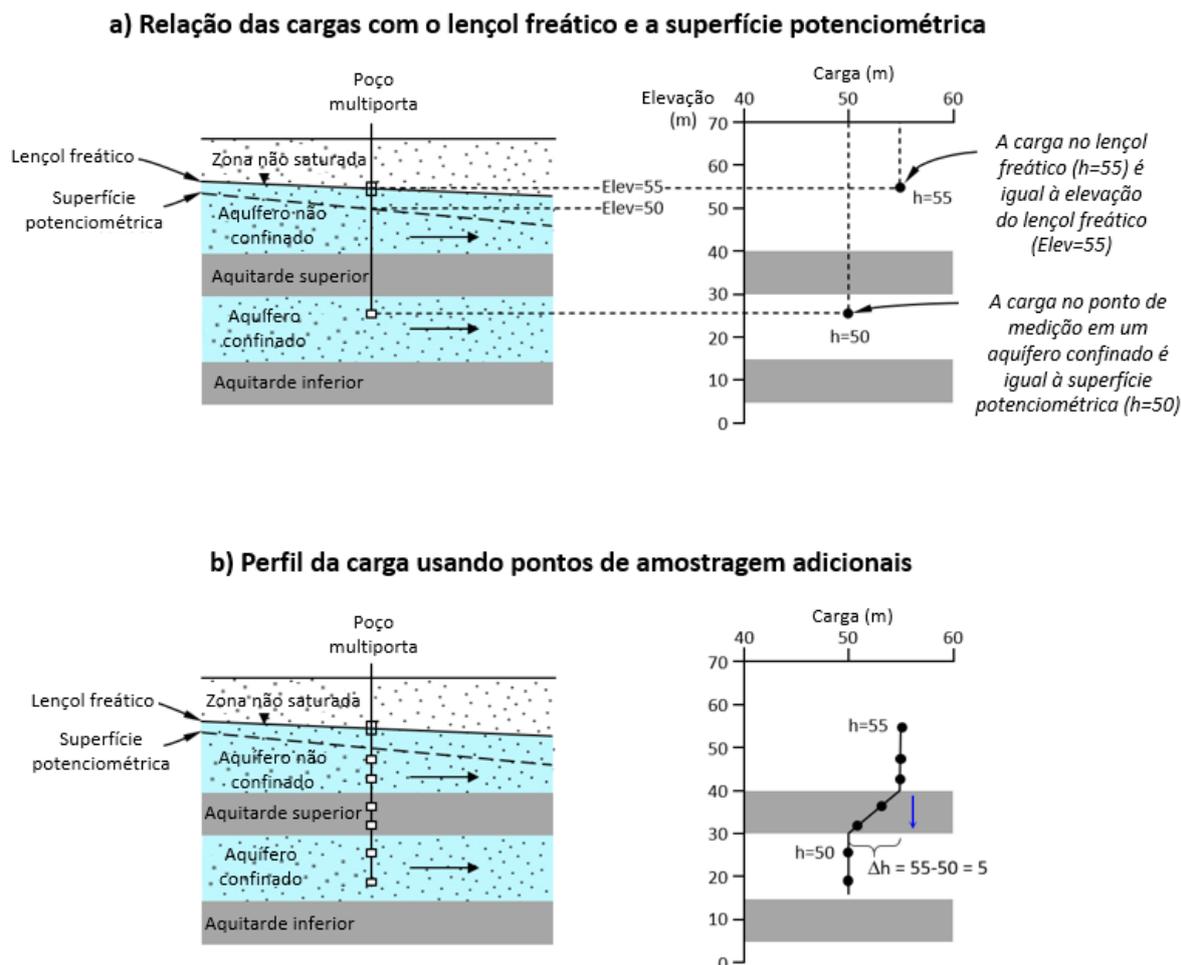


Figura 26 - Exemplo de fluxo horizontal e perfil vertical de carga associado em: a) um aquífero não confinado e b) um aquífero confinado e o gradiente vertical associado em um aquitarde (Cohen e Cherry, 2020).

O gráfico no lado direito da **Figura 26b** mostra uma parte do perfil de gradiente hidráulico vertical correspondente. Há uma mudança distinta na carga hidráulica ao longo do aquitarde, o que é indicativo de uma zona de baixa condutividade hidráulica. O gradiente de carga hidráulica vertical indica que, embora a maior parte do fluxo nos aquíferos não confinados e confinados seja horizontal, há uma fração (embora relativamente pequena) que flui para baixo através do aquitarde (da maior para a menor carga). Como mencionado anteriormente, é importante notar que o gradiente vertical não significa necessariamente que o fluxo através do aquitarde seja vertical. Em vez disso, indica que há um componente vertical de fluxo.

Se a presença de um intervalo de baixo K (por exemplo, o aquitarde superior) não fosse conhecida, as cargas hidráulicas mostradas na **Figura 26a** poderiam ser interpretadas como uma indicação de fluxo descendente em toda a zona saturada, porque a pressão é mais alta ($h = 55$ m) na zona mais rasa do que na zona mais profunda ($h = 50$ m). Isso exemplifica a necessidade de levar em conta as características e propriedades geológicas conhecidas ou potenciais da subsuperfície ao interpretar os dados de carga hidráulica.

A **Figura 27** mostra que a direção do fluxo no aquítarde é dependente das elevações relativas do lençol freático e da superfície potenciométrica.

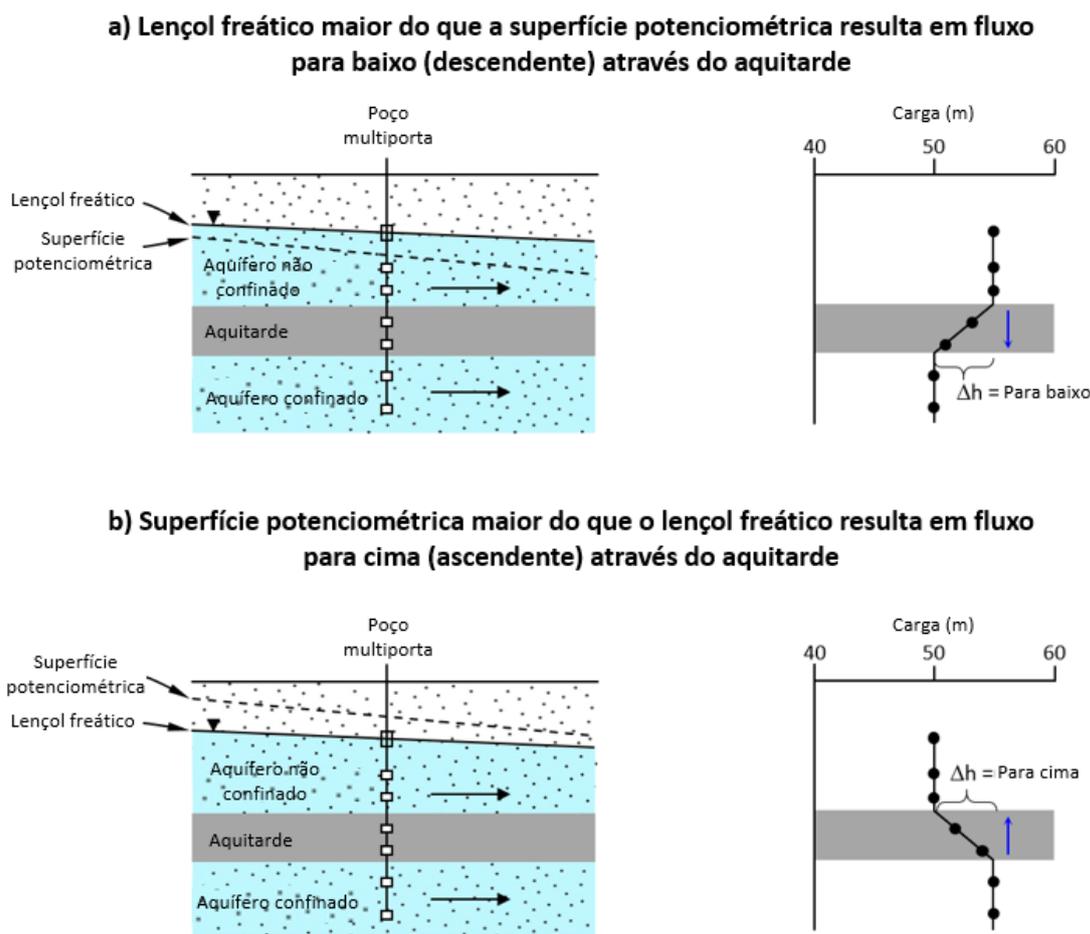


Figura 27 - Perfil da carga através de aquítarde resultando em: a) fluxo para baixo e b) fluxo para cima (Cohen e Cherry, 2020).

Conforme observado anteriormente, um aquítarde é uma formação semipermeável que restringe o fluxo entre os aquíferos sobrejacentes e/ou subjacentes. Pode ser composto de solo ou rocha de condutividade hidráulica muito baixa que restringe quase todo o fluxo de água subterrânea entre os aquíferos. Nas proximidades de uma área de recarga ou descarga, as águas subterrâneas em aquíferos não confinados e confinados podem ter um componente de fluxo vertical significativo, mesmo na presença de um aquítarde.

Em alguns casos, a condutividade hidráulica do aquítarde é menos restritiva e algumas águas subterrâneas podem fluir entre os aquíferos sobrejacentes e subjacentes. Tal formação pode ser referida como *aquítarde com vazamento*. Em ambos os casos, a água subterrânea está presente e satura totalmente o aquítarde e, portanto, existe alguma conexão hidráulica entre os aquíferos. Consequentemente, há um gradiente hidráulico no aquítarde, conforme mostrado na **Figura 28**.

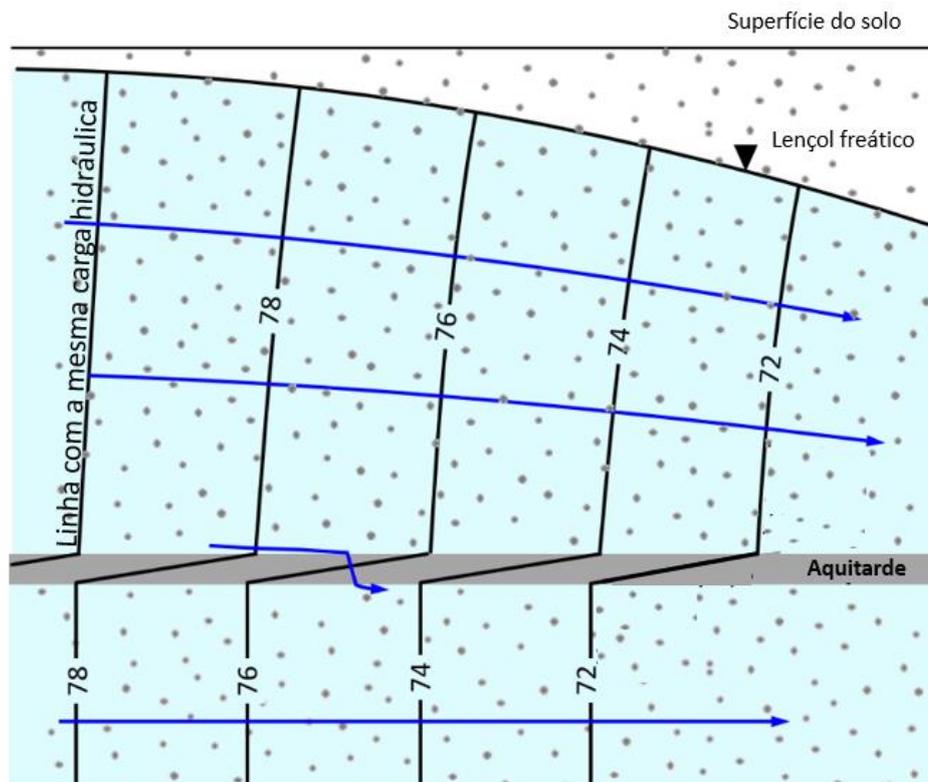
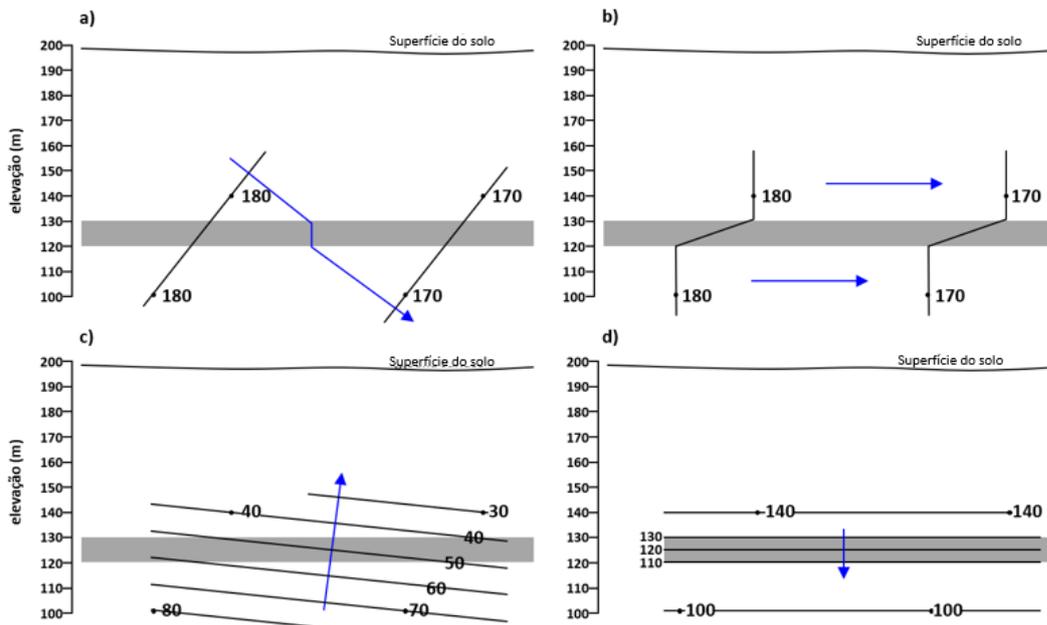
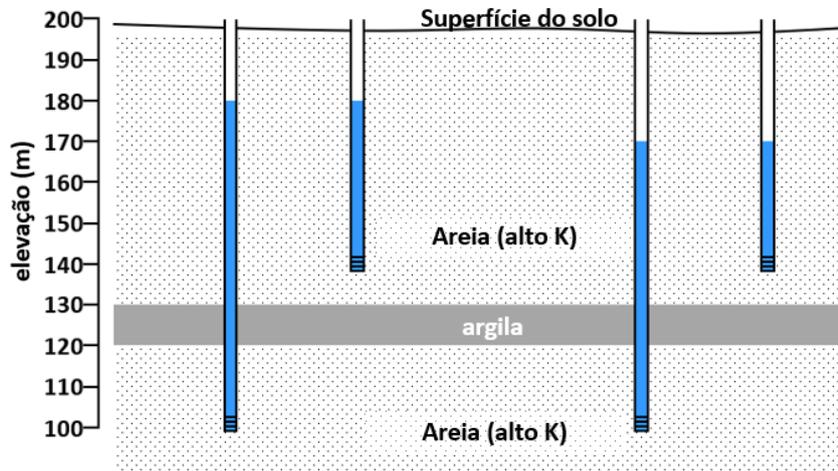


Figura 28 - Linhas de contorno potenciométrico em um aquífero confinado e não confinado separado por um aquitarde (Cohen e Cherry, 2020).

5.3.1 Problema - Exemplo 10

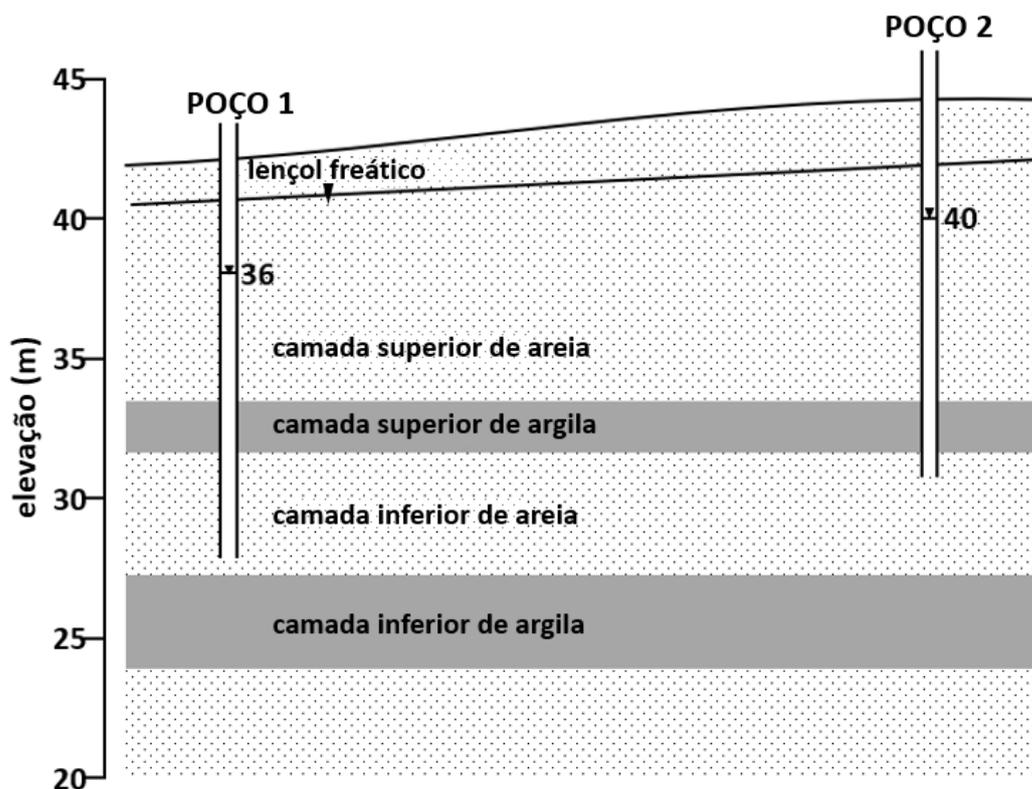
Com base nos dados de nível de água mostrados, qual esquema abaixo melhor representa as linhas equipotenciais e a direção do fluxo?



[Clique aqui para ver a solução do Problema - Exemplo 10](#)

5.3.2 Problema - Exemplo 11

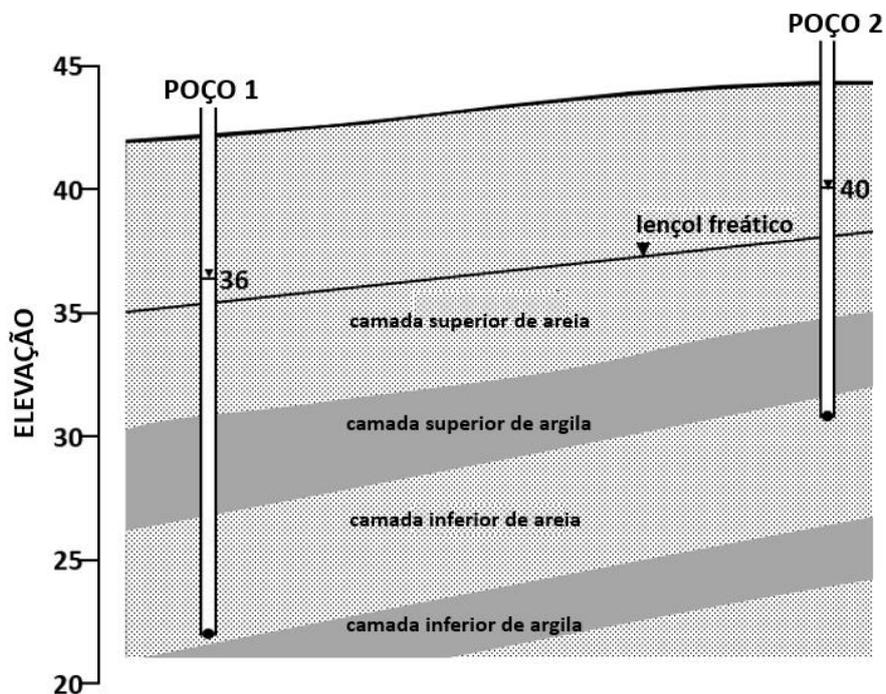
- Desenhe contornos potenciométricos com intervalos de 1 m na camada inferior de areia.
- Desenhe a superfície potenciométrica.
- Qual é a direção do fluxo de água subterrânea através da camada superior de argila?
- Esboce o perfil vertical da carga hidráulica esperada nas proximidades do Poço 2.



[Clique aqui para ver a solução do Problema – Exemplo 11](#) ↴

5.3.3 Problema - Exemplo 12

- 1) Desenhe contornos potenciométricos com intervalos de 1 m na camada inferior de areia.
- 2) Desenhe a superfície potenciométrica.
- 3) Qual é a Direção do fluxo de água subterrânea através da camada superior de argila?
- 4) Esboce o perfil vertical da carga hidráulica esperada nas proximidades do Poço 2.



[Clique aqui para ver a solução do Problema – Exemplo 12](#) ↴

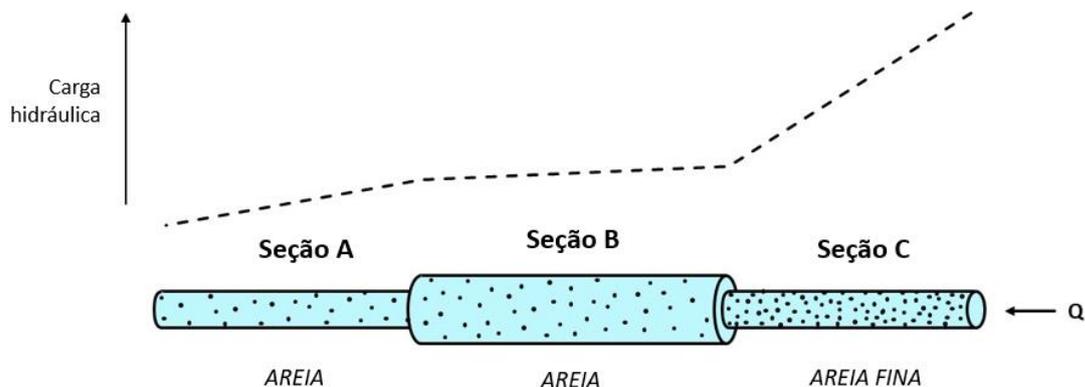
7 Solução dos Problemas Exemplos

7.1.1 Solução do Problema – Exemplo 1

Questão: Esboce o gradiente hidráulico ao longo do comprimento do aparato mostrado abaixo.

Solução:

- O fluxo é da direita para a esquerda. Portanto, a carga diminui para a esquerda.
- O gradiente deve ser mais íngreme na Seção A do que na Seção B, porque a área da seção transversal da Seção A é menor do que na Seção B, enquanto ambas as seções têm o mesmo K.
- O gradiente na Seção C é mais acentuado do que na Seção A porque K na Seção C é menor do que na Seção A, embora ambas as seções tenham a mesma área.
- O gradiente na Seção C é o mais acentuado, porque tem o valor de K mais baixo, embora também tenha uma pequena área de seção transversal.



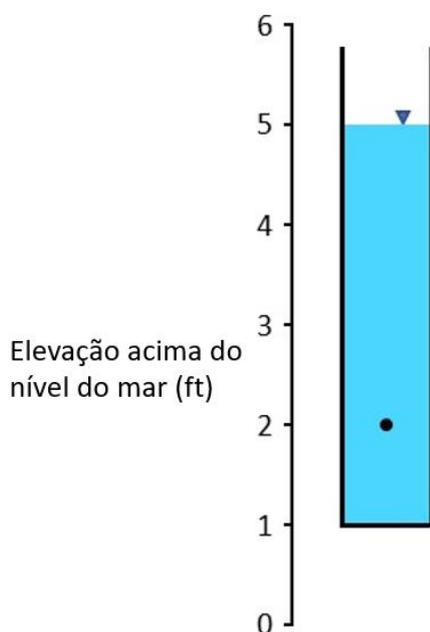
[Retorne ao Problema – Exemplo 1](#) ↗

7.1.2 Solução do Problema - Exemplo 2

Questão: Qual é a carga hidráulica no ponto da coluna mostrada abaixo?

- a) 1 ft
- b) 2 ft
- c) 3 ft
- d) 4 ft
- e) 5 ft

Solução: A resposta correta é 5 ft, porque a carga hidráulica em toda a coluna de água estática é igual à elevação da superfície da água. A altura manométrica não é de 1 ft, porque a carga hidráulica não é igual à altura acima da base da coluna d'água. A altura manométrica não é de 2 ft, porque a carga hidráulica na coluna d'água não é igual à elevação do ponto de medição. A carga hidráulica não é de 3 ft, porque a carga hidráulica não é igual à altura da coluna d'água acima do ponto de medição. A carga hidráulica não é de 4 ft, porque a carga hidráulica não representa a altura total da coluna d'água acima do ponto de medição.



[Retorne ao Problema – Exemplo 2](#) ↑

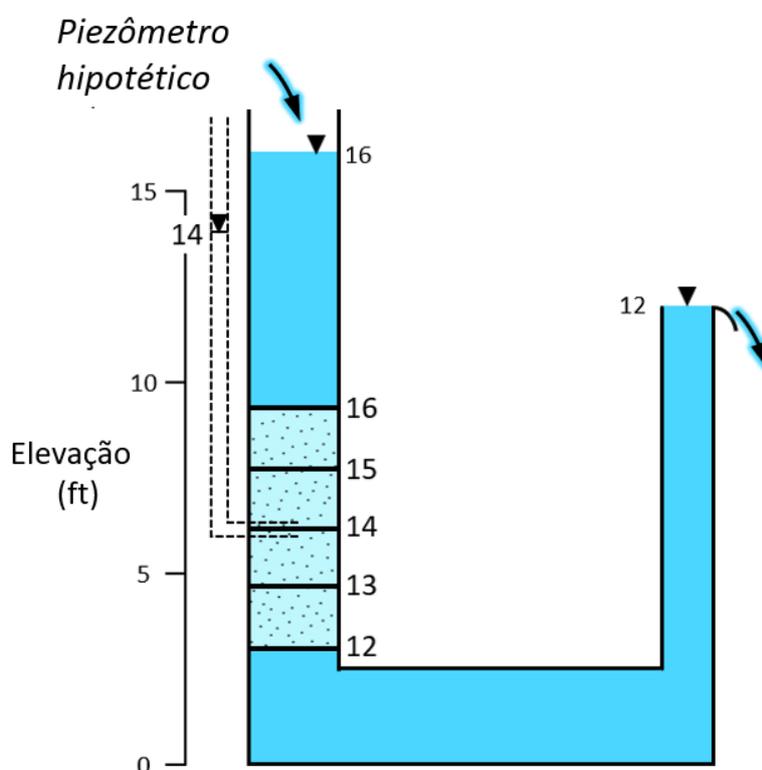
7.1.3 Solução do Problema - Exemplo 3

Questões:

- Desenhe linhas equipotenciais com intervalo de 1 ft na porção com areia.
- A que nível a água aumentará no piezômetros hipotético?

Soluções:

- Os valores de carga constante no topo e na base da coluna de areia são iguais à elevação do nível de água da coluna de água que limita cada extremidade do meio poroso. O fluxo deve ser vertical na coluna de areia dada a geometria do cilindro, e as linhas potenciométricas devem ser horizontais (os contornos potenciométricos são perpendiculares à direção do fluxo e perpendiculares aos limites sem fluxo). O gradiente da carga é especificado pelo espaçamento entre as linhas de contorno; neste caso, eles devem estar igualmente espaçados porque o meio é homogêneo.
- O nível da água em um piezômetro é igual à carga hidráulica no ponto de medição, que neste caso é a extremidade aberta do piezômetro na areia. Portanto, o nível de água no piezômetro hipotético é de 14 ft.



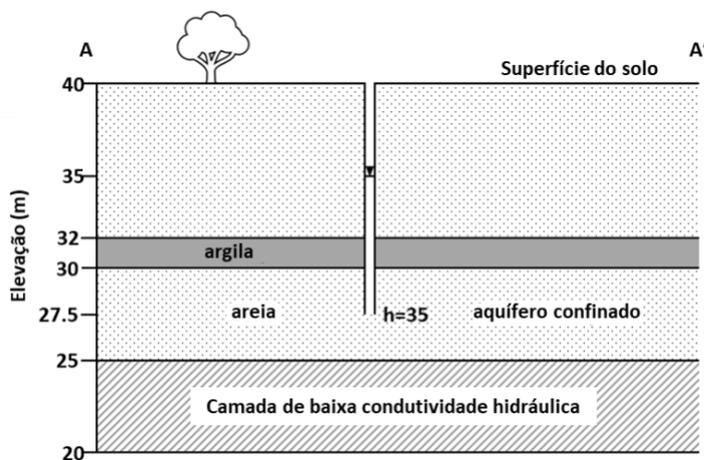
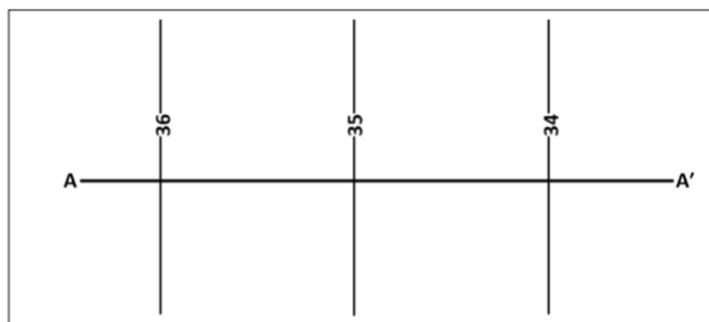
[Retorne ao Problema – Exemplo 3 ↑](#)

7.1.4 Solução do Problema - Exemplo 4

Questão: As figuras abaixo mostram um mapa de contorno potenciométrico de um aquífero confinado e uma seção transversal ao longo da seção A-A'. Qual é a profundidade do nível da água no poço (em relação à superfície do solo)? Explique.

- a) 3 m
- b) 5 m
- c) 7,5 m
- d) 10 m

Solução: A resposta correta é 5 m de Profundidade, pois a carga hidráulica na posição do poço é de 35 m (conforme indicado pelo mapa de contorno potenciométrico). Como o nível de água em um poço é igual à carga hidráulica, a elevação do nível de água no poço deve ser de 35 m. Como a elevação da superfície da água subterrânea é de 40 m, a profundidade da água deve ser de 5 m ($40 - 35$).

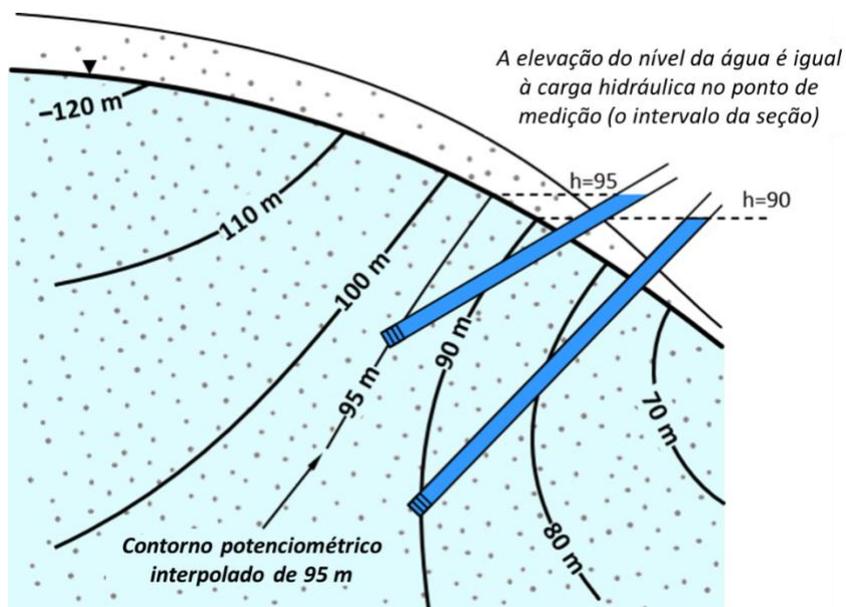


[Retorne ao Problema - Exemplo 4](#) ↗

7.1.5 Solução do Problema - Exemplo 5

Questão: Qual é a elevação da superfície do nível da água nos poços inclinados?

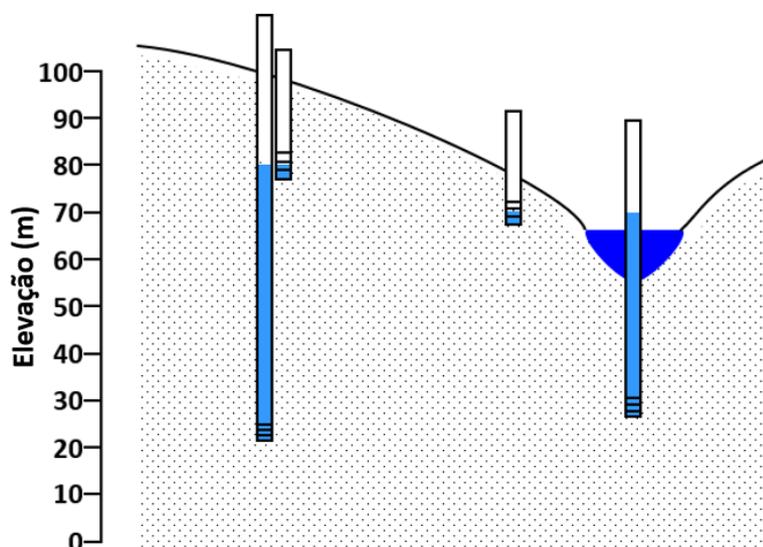
Solução: O nível da água é igual à carga hidráulica no ponto de medição (o intervalo da seção filtrante), que é indicado pela linha de contorno potenciométrica. A orientação do piezômetros é irrelevante.



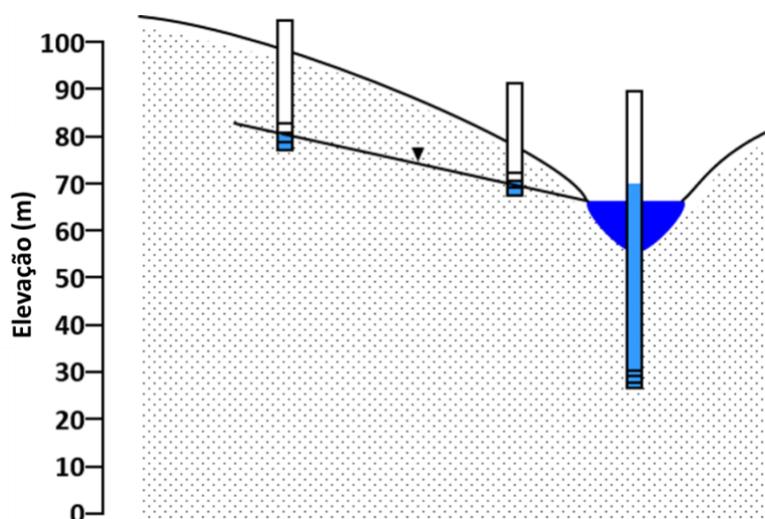
[Retorne ao Problema - Exemplo 5](#) ↗

7.1.6 Solução do Problema - Exemplo 6

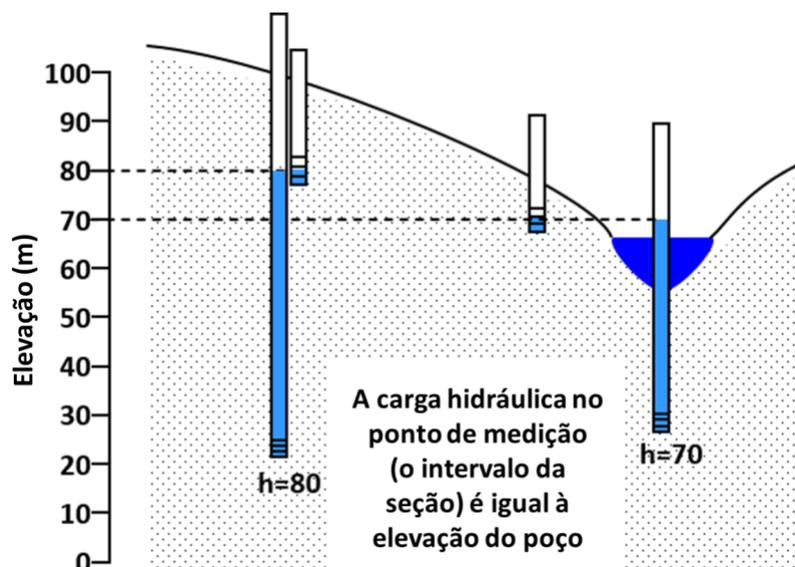
Instruções: Desenhe o lençol freático e os contornos equipotenciais de 80 m e 70 m. Estime a direção do fluxo.



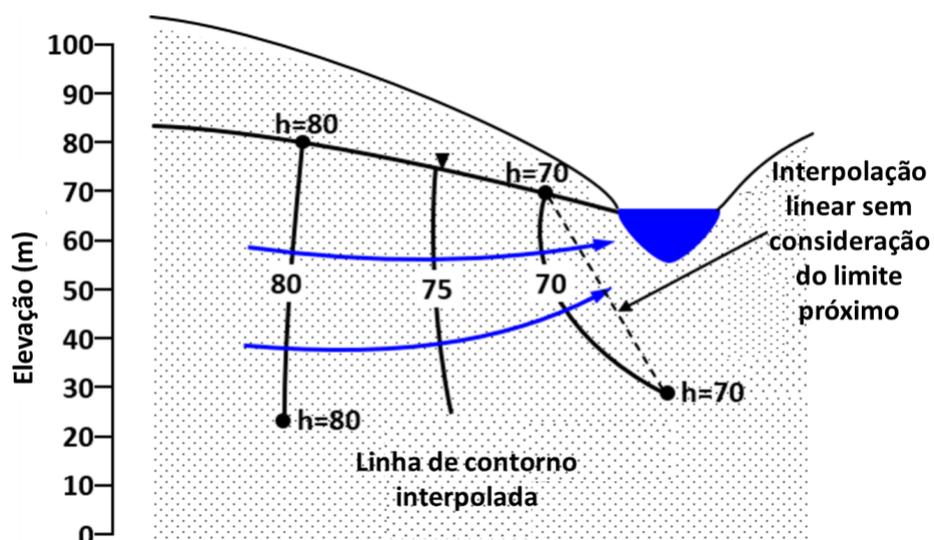
Solução Passo 1: Reconheça que o nível de água nos poços rasos está no intervalo rastreado. Portanto, esses níveis de água definem o lençol freático de um aquífero não confinado. Consequentemente, o lençol freático pode ser interpolado com base nesses dados e também considerando a elevação do corpo d'água próximo.



Solução Passo 2: Definir a carga hidráulica em cada ponto de medição, que inclui as elevações do lençol freático e a elevação da água nos poços selecionados em profundidade; a carga é baseada nos pontos de medição (o intervalo da seção) e nas elevações do nível de água correspondentes.



Solução Passo 3: Usando a distribuição de carga hidráulica resultante, conecte pontos de mesma carga hidráulica e/ou aproxime a localização dos contornos equipotenciais interpolando entre os valores. Além disso, considere a geometria de fluxo esperada, dadas as feições do local. Nesse caso, esperamos alguma convergência de fluxo em direção ao corpo de água superficial, de forma que as linhas equipotenciais sejam curvas ao invés de conectadas com uma linha reta. Desenhe linhas de fluxo perpendiculares às linhas equipotenciais.



[Retorne ao Problema - Exemplo 6](#)

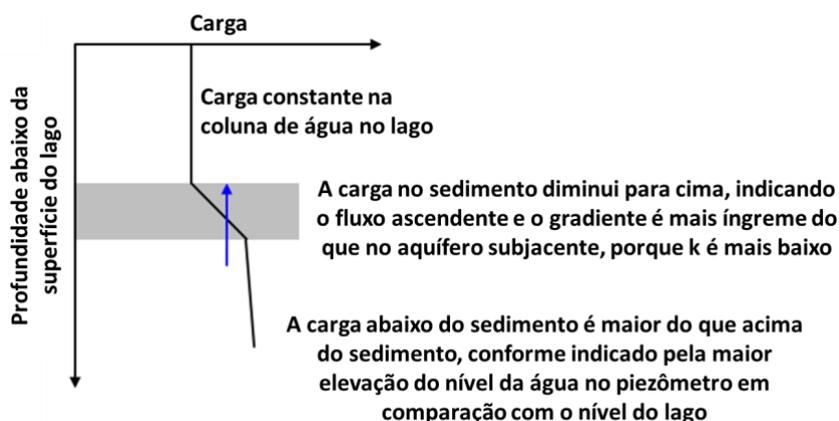
7.1.7 Solução do Problema - Exemplo 7

Questões:

- Um piezômetro é inserido em um aquífero abaixo do sedimento (baixo K) de um lago, e a água sobe a um nível estável, conforme mostrado abaixo. Um lençol freático está presente, mas não é mostrado. A água está fluindo para cima ou para baixo através do sedimento? Explique.
- Desenhe uma representação esquemática do perfil vertical da carga, estendendo-se desde o nível da água do lago até a seção filtrante do poço.

Solução a) A carga hidráulica no ponto de medição (intervalo da seção) no piezômetro é igual à elevação do nível da água no piezômetro. A carga hidráulica em todas as profundidades na água do lago é igual à elevação da superfície do lago. Portanto, a carga abaixo do sedimento é mais alta do que acima do sedimento, então o fluxo se move para cima através do sedimento, porque a água se move da carga mais alta para a carga mais baixa.

Solução b) O perfil vertical da carga mostra a carga constante no lago e o gradiente ascendente no sedimento. O gradiente de carga também tem um componente ascendente no aquífero, mas a condutividade hidráulica é maior, então o gradiente não é tão grande (é menos acentuado).



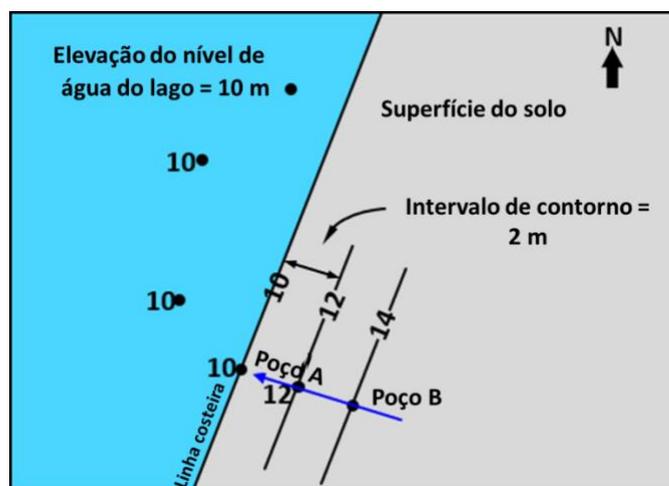
[Retorne ao Problema – Exemplo 7](#) ↑

7.1.8 Solução do Problema - Exemplo 8

Questão: A figura mostra uma visualização do mapa de um lago e linha costeira. A elevação do lençol freático no Poço A é de 12 m. Supondo que o lençol freático seja plano (um plano inclinado), qual é a elevação do nível da água esperada no Poço B?

- a) 12
- b) 13
- c) 14
- d) Um valor entre 12 e 13

Solução: O nível da água no lago é horizontal. Portanto, a carga é a mesma em todo o lago, incluindo ao longo do comprimento da interface lago-costa. Uma vez que o fluxo é ortogonal às linhas equipotenciais e o lençol freático é considerado plano, o intervalo de contorno de 2 m é extrapolado para cima, resultando assim em um nível de água de 14 m no Poço B.



[Retorne ao Problema - Exemplo 8](#) ↑

7.1.9 Solução do Problema - Exemplo 9

Questão: Estime o nível de água em cada poço e determine se há fluxo vertical através do aquífero de argiloso.

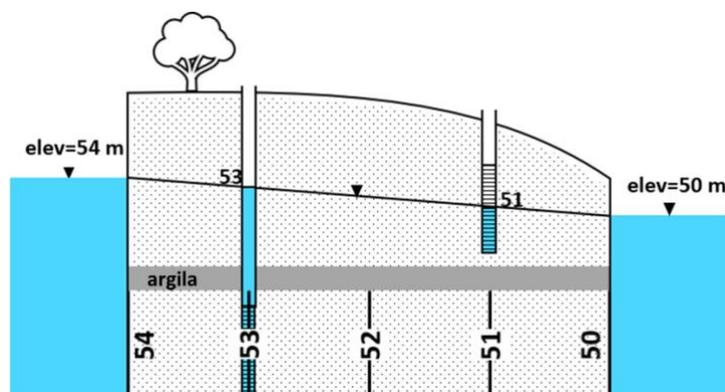
Solução:

Passo 1: Como uma aproximação, suponha que o lençol freático seja linear. Por interpolação linear, o nível de água no centro é de 52 m. O poço da direita está a metade da distância do lado direito para o meio, então o nível da água é de 51 m. Da mesma forma, a elevação do lençol freático no local do poço do lado esquerdo é de 53 m.

Passo 2: O aquífero confinado horizontal abaixo da argila é delimitado em ambos os lados por limites de carga constantes, cujos valores correspondem à elevação do nível de água em cada corpo de água (ver **Figura 12** e **Figura 17** para cenários análogos). O fluxo é horizontal com base na geometria do aquífero confinado e na posição dos limites (em cada extremidade).

Passo 3: O meio é homogêneo, então o gradiente é constante, o que significa que o espaçamento entre as linhas equipotenciais é constante. O espaçamento entre as linhas e seus valores são determinados por interpolação linear.

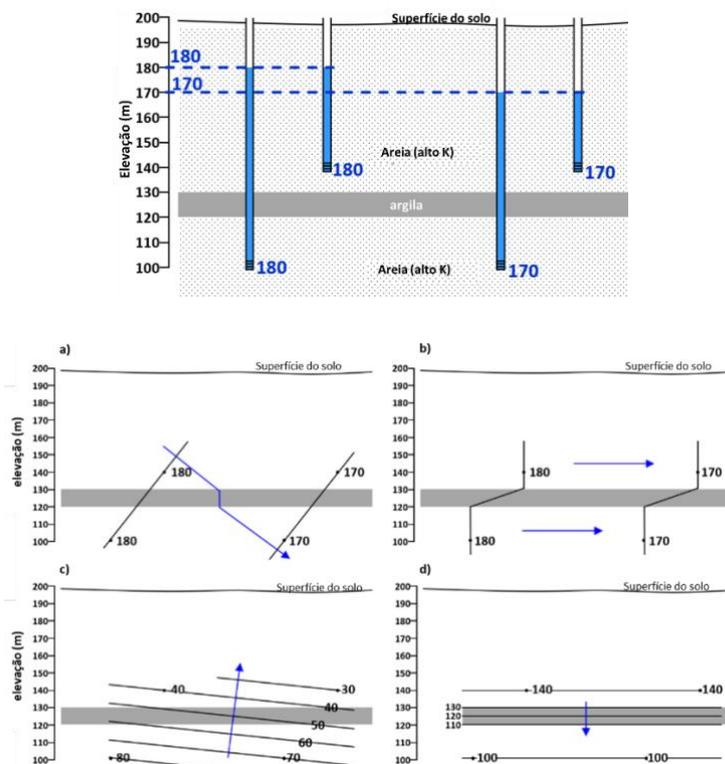
Passo 4: O poço do lado esquerdo é blindado no aquífero confinado onde a carga é de 53 m (conforme indicado pela linha equipotencial). Neste mesmo local, a elevação do lençol freático também é de 53 m. Simplificamos assumindo um declínio linear do lençol freático, embora saibamos que haverá um gradiente mais acentuado no lado direito devido à diminuição da área de fluxo perpendicular ao fluxo (conforme ilustrado na **Figura 22**). Como estamos assumindo um gradiente linear tanto no aquífero confinado quanto no não-confinado, a carga em cada local será a mesma acima e abaixo da camada de argila. Como resultado, não há gradiente vertical e, portanto, nenhum fluxo vertical na camada de argila.



[Retorne ao Problema – Exemplo 9](#) ↑

7.1.10 Solução do Problema - Exemplo 10

Questão: Com base nos dados de nível de água mostrados, qual esquema abaixo melhor representa as linhas equipotenciais e a direção do fluxo?



Solução: A resposta correta é a escolha “b”: A carga em cada intervalo de seção filtrante é igual à elevação do nível de água em cada poço. Com base nos dados de carga nas zonas de areia, a carga hidráulica diminui para a direita e o fluxo vertical será restrito devido ao aquitarde. Consequentemente, o fluxo nas zonas de areia é principalmente horizontal e os contornos potenciométricos são quase verticais porque o fluxo é ortogonal aos contornos potenciométricos em meios isotrópicos.

A escolha “a” NÃO é a resposta correta. O valor da carga plotado em cada ponto está correto porque é a elevação da água no poço. No entanto, essa não pode ser a resposta correta, porque a linha equipotencial não tem uma inflexão na parte superior e inferior do intervalo com K baixo (ver **Figura 28**).

A opção “c” NÃO PODE ser a resposta correta, pois os valores de carga plotados nos pontos de medição não representam carga hidráulica. Em vez disso, eles representam a altura da coluna de água em cada poço.

A opção “d” NÃO PODE ser a resposta correta, pois os valores plotados nos pontos de medição não representam carga hidráulica; em vez disso, são as elevações dos pontos de medição.

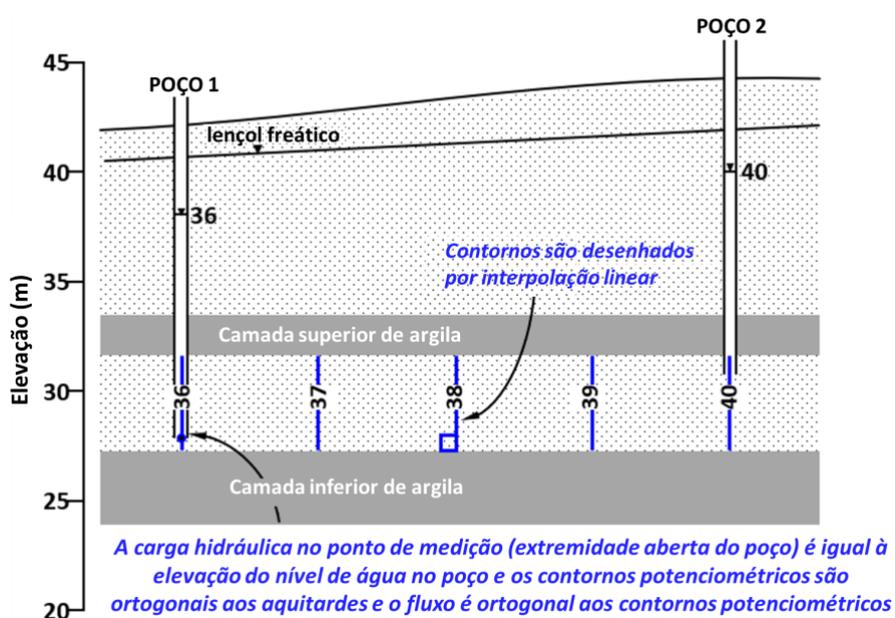
[Retorne ao Problema – Exemplo 10](#) ↑

7.1.11 Solução do Problema - Exemplo 11

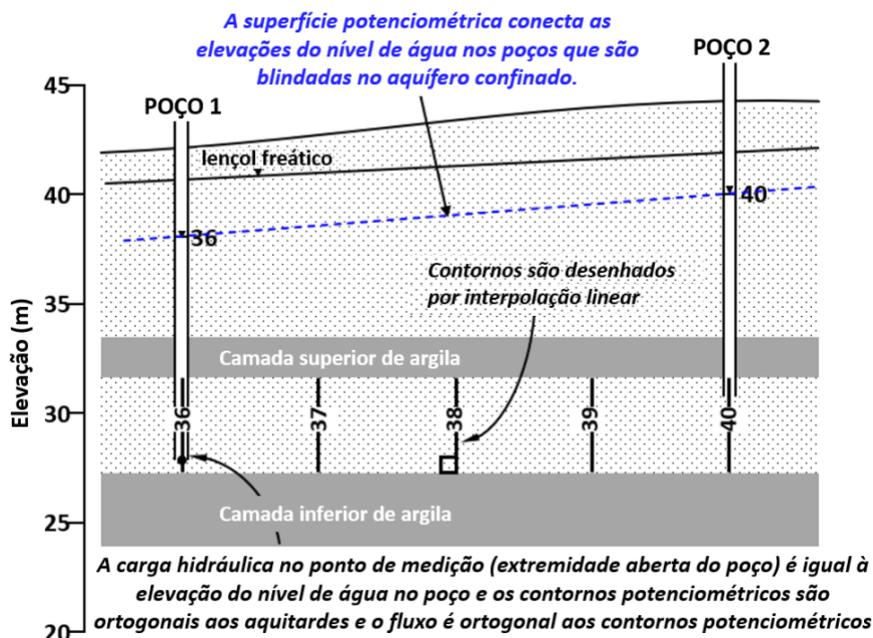
Instruções/questões:

- Desenhe contornos potenciométricos com intervalos de 1 m na camada inferior de areia.
- Desenhe a superfície potenciométrica da camada inferior de areia.
- Qual é a direção do fluxo de água subterrânea através da camada superior de argila? e
- Esboce o perfil vertical esperado da carga nas proximidades do Poço 2.

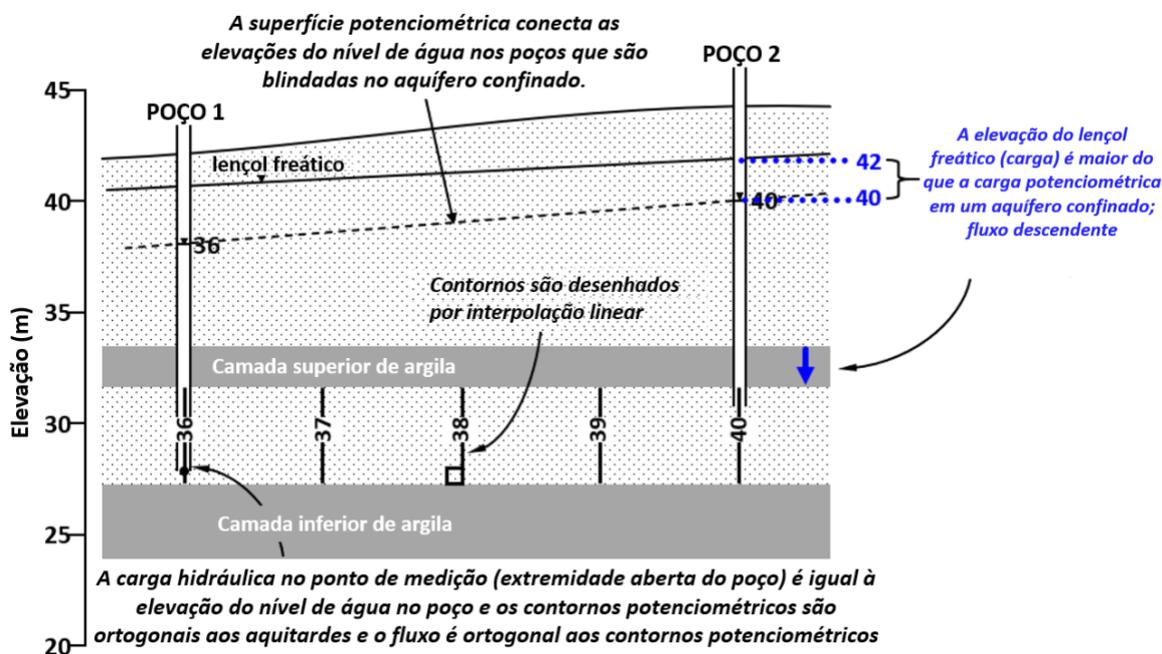
Solução 11a)



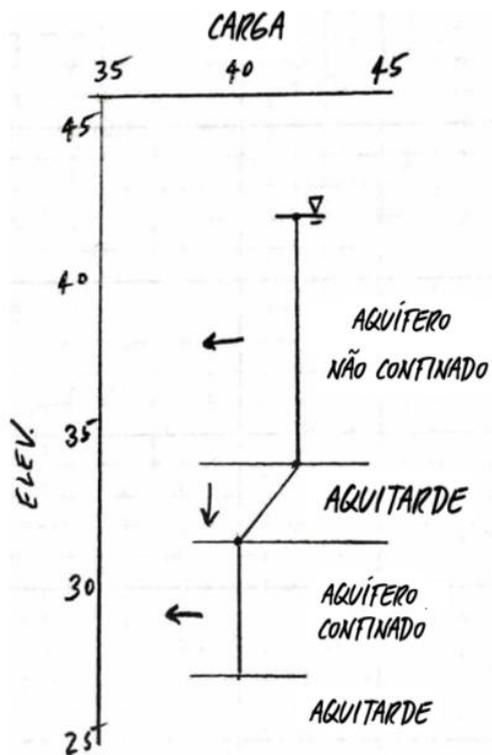
Solução 11b)



Solução 11c)



Solução 11d)



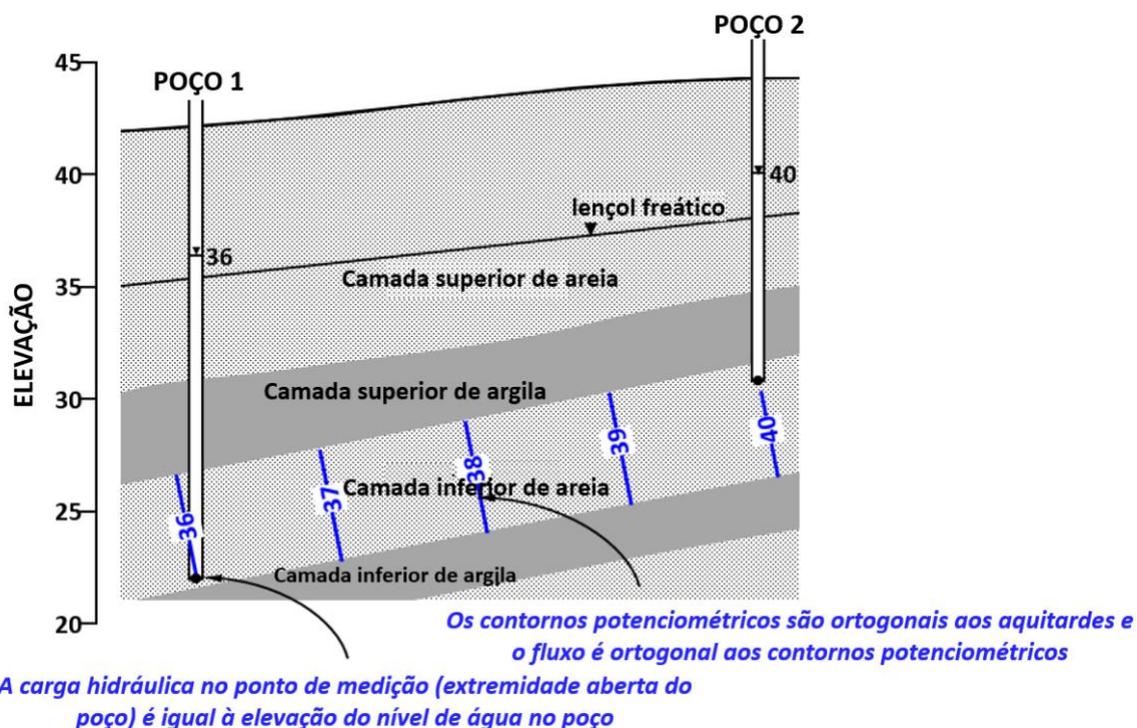
[Retorne ao Problema – Exemplo 11](#) ↴

7.1.12 Solução do Problema - Exemplo 12

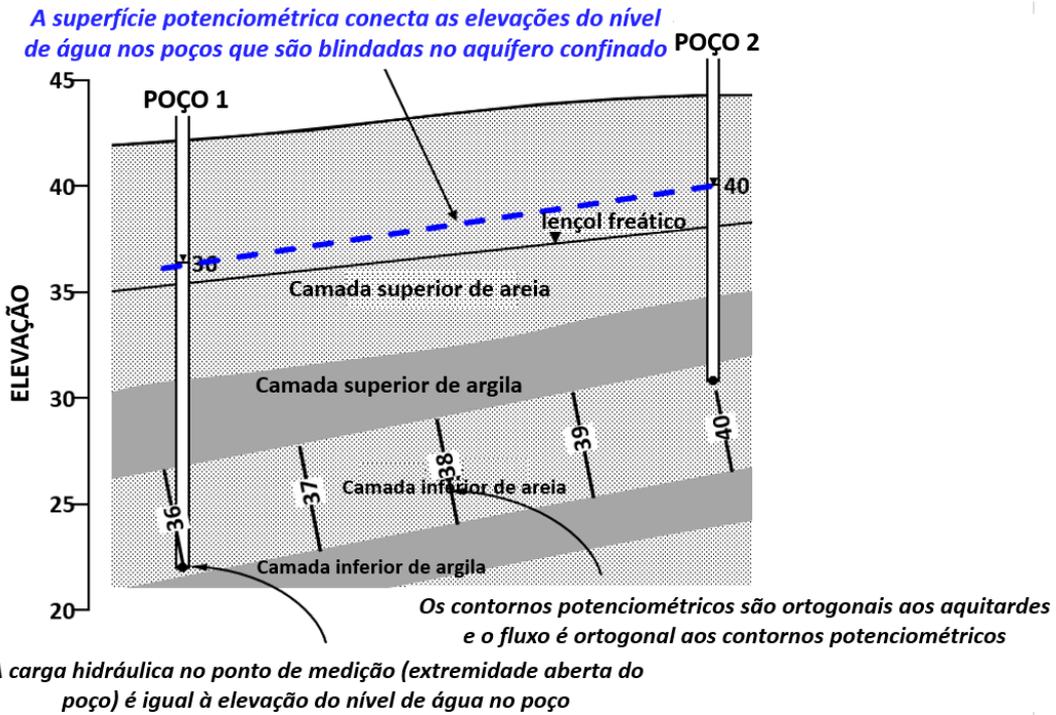
Instruções/questões:

- Desenhe contornos potenciométricos com intervalos de 1 m na camada inferior de areia.
- Desenhe a superfície potenciométrica da camada inferior de areia.
- Qual é a Direção do fluxo de água subterrânea através da camada superior de argila? E
- Esboce o perfil vertical esperado da carga nas proximidades do Poço 2.

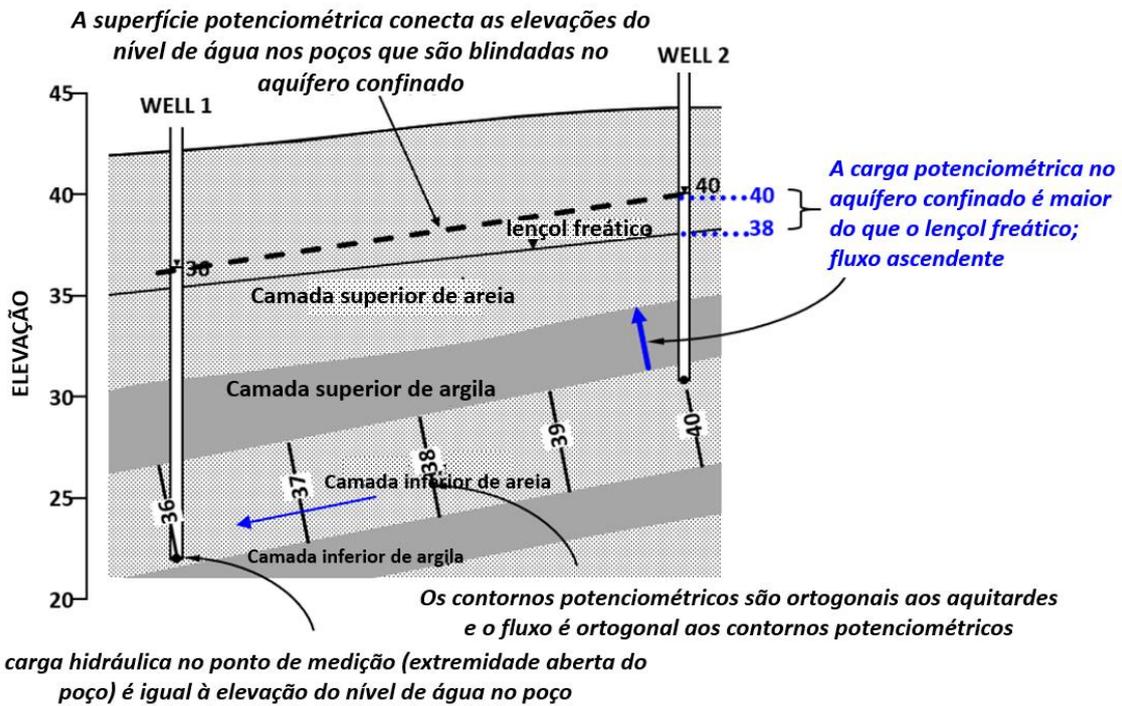
Solução 12a)



Solução 12b)



Solução 12c)



Solução 12d)



[Retorne ao Problema – Exemplo 12 ↗](#)

8 Referências

Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon [The Public Fountains of the City of Dijon]. Dalmont, Paris.

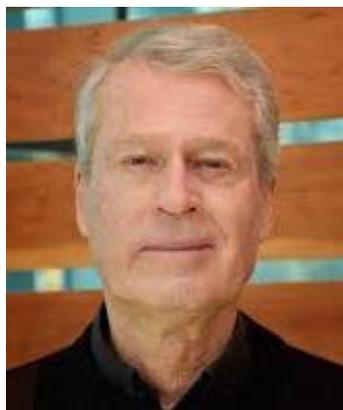
Woessner, William W., e Eileen P. Poeter, 2020, Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow. The Groundwater Project. <https://gw-project.org/books/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/>

Poeter, E., e P. Hsieh, 2020, Groundwater Flow Nets. The Groundwater Project. <https://gw-project.org/books/graphical-construction-of-groundwater-flow-nets/>

9 Sobre os Autores



Dr. Andrew Cohen tem Ph.D. em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade da Califórnia em Berkeley e um B.S. em Recursos Hídricos pelo Departamento de Ciências da Terra, Universidade Estadual de Nova York em Oneonta. Seu foco é a caracterização hidrogeológica de locais contaminados e modelagem relacionada de transporte e destino de contaminantes no solo, águas subterrâneas, águas superficiais e sedimentos. Antes de sua função atual como hidrogeólogo com foco em contaminante na indústria de consultoria ambiental, ele foi Pesquisador Associado no Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, onde se concentrou na caracterização e modelagem de águas subterrâneas em rochas fraturadas e com falhas. Ele é Professor Adjunto no Instituto de Tecnologia de Nova Jersey, onde leciona Hidrogeologia Contaminante.



Dr. John Cherry, depois de estudar nos EUA e fazer um pós-doutorado na França, ingressou na Universidade de Waterloo em 1971 para pesquisa de campo sobre a migração e o destino de contaminantes em águas subterrâneas e sua remediação. Ele foi coautor de "Groundwater" com R.A. Freeze (1979) e coeditor/coautor de vários capítulos do livro "*Dense Chlorinated Solvents... in Groundwater*" (1996). Ele é o diretor fundador do University Consortium for Field-Focused Groundwater Contamination Research. No G360 Instituto de Pesquisa de Águas Subterrâneas, Universidade de Guelph, ele participa da pesquisa sobre tecnologias de monitoramento de água subterrânea e criação de poços seguros para populações rurais em terrenos remotos. Ele foi Presidente do Painel Canadense de Especialistas em Impactos Ambientais do Desenvolvimento de Gás de Xisto (2012-2014). Ele é um membro estrangeiro da Academia de Engenharia dos EUA. Ele recebeu o prêmio Lee Kwan Yew Water em 2016 e o Stockholm Water Prize em 2020.

10 Sobre a Tradutora



MSc. Thaís de Paula Marteleto é geóloga formada pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Durante a graduação realizou projetos de iniciação científica com ênfase na área de Ensino de Geociências e de Geoquímica Ambiental com a determinação de nutrientes inorgânicos no sistema estuarino de Santos-Cubatão (São Paulo). Possui Mestrado em Geociências na mesma universidade com projeto envolvendo Gd antrópico como traçador de esgotos em águas superficiais. Atualmente é aluna de doutorado com ênfase em Geoquímica Ambiental e Analítica no Instituto de Geociências da UNICAMP onde desenvolve projeto de pesquisa com foco na análise dos controles hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos em águas subterrâneas provenientes de aquíferos distintos no leste do estado de São Paulo, Brasil.

Inscreva-se na lista de e-mail do Groundwater Project e mantenha-se informado sobre o lançamento de novos livros, eventos e formas de como participar do Groundwater Project. Quando você se inscreve em nossa lista de e-mail, isso nos ajuda a construir uma comunidade global de águas subterrâneas. [Inscreva-se](#).

