

Introdução

Os profissionais das águas subterrâneas são um grupo peculiar, embora em número reduzido diante da nobreza e grandeza do tema. Eles constituem um setor que se distingue em muito do grande grupo dos profissionais, amadores e apaixonados pelo tema das águas.

Em primeiro lugar, por serem dedicados e apaixonados pela água que se encontra invisível na natureza, e portanto com um apelo muito menor do que sua porção superficial. Em segundo lugar, por comporem um universo distinto no universo de trabalho gerado pela produção e pelo controle dessa parte invisível do manancial.

Distintos claramente na ação de pequenas e médias empresas que atuam na área, invariavelmente pela iniciativa privada, com exceções tão raras que não mais fazem do que confirmarem a regra.

Como a água compõe nossas vidas de forma definitiva – afinal, mais de 70% de nosso corpo é composto por ela –, não é surpresa existirem regras infinitas ao seu redor. De legislações gerais a específicas, passando por lendas, mitos, funções religiosas e recreativas e muito mais. Assim, não é estranho que seu uso seja regrado e muito bem acompanhado pelo Estado ou pelas comunidades em geral, em qualquer parte do planeta.

Entretanto, o segmento de produção de águas subterrâneas permanece, em sua grande maioria, como uma iniciativa privada. Uma iniciativa nobre, técnica e merecedora de aplauso.

A evolução das técnicas nas águas subterrâneas deve-se ao empenho de profissionais apaixonados por esse bem tão importante, que, ao se unirem e trabalharem em conjunto com órgãos de controle de governos, universidades e pesquisadores, permitiram e permitem o acesso a ele de forma correta, limpa e ambientalmente saudável.

Este livro é o retrato desse panorama das águas subterrâneas. Pelas mãos dos amigos Valter Galdiano Gonçalves e Carlos Eduardo Quaglia Giampá, *Águas subterrâneas e poços tubulares profundos* espelha essa peculiaridade do grupo formado pelos profissionais das águas subterrâneas.

Importante e essencial para aqueles que se dedicam ao assunto, este livro foi capitaneado por editores oriundos da iniciativa privada, que dedicaram seu tempo para o aprimoramento de todos os demais profissionais da área. Num esforço tão louvável quanto árduo, pelo qual não podem ser menos louvados, conseguiram reunir 18 autores para produzir este volume, entre os quais eles mesmos se encontram.

Neste livro nos deparamos com textos introdutórios sobre as águas subterrâneas no Brasil e com conceitos básicos de hidrologia superficial e subterrânea, além de textos sobre a qualidade de águas e a prospecção e locação de poços. Ele se esmera na parte que as escolas em geral não conseguem cobrir com profundidade, o poço propriamente dito.

Pela longa experiência profissional dos editores na perfuração de poços de diversas profundidades nas mais variadas geologias do País, a seleção dos autores e a apresentação do texto mostram ao estudante e ao profissional a arte na ciência e na engenharia da boa instalação de um poço tubular.

Este livro, cujo valor o leitor poderá comprovar e usufruir, ainda não consegue mostrar na totalidade a contribuição que os editores Valter Gonçalves e Carlos Giampá ofereceram e oferecem aos profissionais da área. Seu desprendimento e dedicação ao setor das águas subterrâneas é sincero e definitivo, sua descrição não caberia neste espaço. Conseguem ser peculiares dentro de um grupo peculiar.

É um prazer tê-los dentro de um grupo de amigos e uma tarefa muito fácil recomendar a todos a leitura deste livro. Aproveitem.

Everton Oliveira
Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (Abas)

Águas subterrâneas



Aldo da Cunha Rebouças

Água é vida, dádiva dos deuses. Assim foi desde tempos primordiais, porque ela parecia muito abundante em relação às demandas da humanidade. Entretanto, o seu desperdício e a degradação da sua qualidade agora atingem níveis nunca imaginados! Depois da realização da 2ª Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – Rio-92 –, constatou-se que usar com eficiência cada vez maior a gota de água disponível é mais importante do que ostentar sua abundância ou escassez.

Quanto mais estudamos os principais problemas de nossa época, melhor compreendemos que eles não podem ser entendidos de forma isolada. Por exemplo, a escassez de água e a degradação da sua qualidade nos rios e aquíferos são resultados da urbanização, industrialização e desenvolvimento agrícola desordenados e em rápida expansão. Em última análise, problemas que precisam ser vistos como diferentes facetas de uma única crise.

Tal abordagem é cada vez mais clara do ponto de vista sistêmico, consolidada pelas Nações Unidas em 1987 por meio do relatório *Nosso futuro comum*, e tornou-se consenso no mundo, ou seja, o único desenvolvimento possível é o sustentável.

Esse é o grande desafio do nosso tempo: criar comunidades sustentáveis em ambientes sociais e culturais que satisfaçam nossas necessidades e aspirações sem eliminar as oportunidades de as gerações futuras também as realizarem.

De acordo com a visão sistêmica, as características essenciais da água subterrânea surgem das interações e das relações entre as partes componentes do sistema hídrico global, tais como a litosfera, a biosfera e a atmosfera. As propriedades das partes podem ser entendidas apenas com a organização do todo. O que importa considerar é a quantidade de água da Terra que é renovada, pelo menos em escala anual. O Brasil ostenta a maior descarga de água doce do mundo nos seus rios: 183.000 m³/s.

Elementos de hidrologia de superfície

2

Kokei Uehara

2.1 Descrição do ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é o comportamento da água entre a superfície do planeta Terra e a atmosfera que a envolve. O Sol fornece a energia para que haja esse movimento.

Essa definição do ciclo é muito simplista. Na verdade o ciclo é um fenômeno bem mais complexo. O ciclo envolve duas fases distintas:

- ▷ Atmosfera;
- ▷ Terrestre (oceanos e continentes).

Essas duas fases apresentam:

- ▷ Armazenamento temporário de água;
- ▷ Transporte;
- ▷ Mudança de estado.

Há um ciclo completo de evaporação, condensação, precipitação e escoamento. Do ponto de vista didático, é interessante iniciar a descrição do ciclo hidrológico pela evaporação que ocorre na superfície das águas (oceanos, lagos naturais ou artificiais), no solo e na transpiração de vegetais e animais. O vapor produzido é precipitado em forma de chuva, neve, granizo ou orvalho. No Brasil, a precipitação mais importante é a chuva.

Uma parte da chuva, em sua queda para a superfície do planeta, evapora e fica na atmosfera. A outra parte atinge oceanos e lagos ou a parte continental. Há casos em que toda a chuva evapora antes de atingir a superfície da Terra.

Na parte continental, a chuva poderá cair sobre as folhagens de coberturas vegetais (por exemplo, na Floresta Amazônica, chuvas finas podem ficar totalmente retidas nas folhagens). Essa fase é chamada de *intercepção*.

A água que atinge o solo poderá se infiltrar na camada superficial da Terra, alimentando o escoamento subterrâneo ou subsuperficial. Quando a camada de solo se satura, uma parte da água começa a escoar pela superfície da Terra: fase do escoamento superficial. A água escoada atinge a rede de

Elementos de hidrologia subterrânea

3

*Aldo da Cunha Rebouças
Fernando Antônio Carneiro Feitosa
José Geilson Alves Demétrio*

Os principais parâmetros que regulam a estocagem e o fluxo ou transporte de água ou de solutos no meio poroso ou fraturado, em condição saturada ou insaturada, podem ser determinados no laboratório, sobre amostras não deformadas, e no campo, por meio de métodos geofísicos e testes hidrodinâmicos.

Como resultado da limitação operacional ou econômica de obtenção de amostras não deformadas associada à pequena representatividade que poderão ter as medidas feitas no laboratório sobre amostras relativamente pequenas, tem-se dado preferência aos métodos de campo. Eles podem ser considerados formando dois grupos principais: métodos geofísicos e métodos hidráulicos.

Conforme será descrito nos Caps. 5 e 8, as propriedades petrofísicas, tais como porosidade, permeabilidade, conteúdo e salinidade das águas intersticiais, conteúdo de argila, salinidade das águas das zonas não saturada e saturada, podem ser inferidas com medições de propriedades elétricas, elásticas ou radioativas do perfil hidrogeológico. Essas propriedades podem ser registradas de forma contínua ao longo de toda a extensão ou profundidade dos furos que são realizados para determinação do perfil hidrogeológico da área considerada.

No Brasil, a aplicação dos métodos geofísicos ainda é muito restrita, em função, sobretudo, do fato de as águas, em geral, e as águas subterrâneas, em particular, serem consideradas como um bem livre. Como resultado, falta um compromisso com a qualidade e eficiência dos projetos de captação que justifique um melhor conhecimento dos aquíferos e das suas condições de uso e proteção.

Os métodos hidráulicos de campo compreendem testes de bombeamento, de injeção ou de infiltração. No Cap. 9 serão descritos os métodos mais usuais para determinar os parâmetros hidráulicos com a interpretação de testes de bombeamento de poços.

rochas compactas muito fraturadas ou intemperizadas e sistemas cársticos bem desenvolvidos.

- ▷ **Aquitardes:** camadas ou corpos de rochas da área em questão que apresentam porosidade específica e permeabilidade relativamente baixa, tais como sedimentos argilosos, misturas de areias, siltes e argilas em proporções variadas, rochas compactas pouco fraturadas ou intemperizadas e sistemas cársticos pouco desenvolvidos.
- ▷ **Aquicludes:** camadas ou corpos de rochas da área em questão que apresentam porosidade específica e permeabilidade praticamente nula, tais como camadas de sedimentos essencialmente argilosos e rochas compactas muito pouco fraturadas ou carstificadas.
- ▷ **Aquífuges:** camadas ou corpos de rochas muito compactas que apresentam porosidade e permeabilidade praticamente nulas, tais como rochas cristalinas – magmáticas e metamórficas – do embasamento geológico, blocos de quartzitos, basaltos, diabásios e assim por diante, não fraturados ou intemperizados.

3.4 Tipos de aquíferos

O termo *aquífero* designa uma camada ou corpo rochoso que apresenta, relativamente, os maiores valores de porosidade específica e permeabilidade na área em questão. Os espaços vazios – poros, fraturas e fissuras – são suficientemente grandes para armazenar volumes importantes de água e se apresentam interconectados de tal forma que a água infiltrada – natural ou artificialmente – pode fluir sob a ação de uma diferença de potencial gravitacional ou potenciométrico.

Os aquíferos podem ser de três tipos principais – livre, confinado e suspenso – e dois intermediários – semilivre ou semiconfinado.

Tab. 3.2 CLASSIFICAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS SEDIMENTOS E ROCHAS

Classes hidrogeológicas	Condutividade hidráulica (cm/s)	Porosidade específica (%)	Litologias características
Aquíferas	(1 - 10 ⁻⁴)	(5 - 27)	Areias, arenitos, rochas muito fraturadas/alteradas
Aquitardes	(10 ⁻³ - 10 ⁻⁵)	(3 - 5)	Siltes, areias argilosas, argilas arenosas, rochas pouco fraturadas/alteradas
Aquicludes	(10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁹)	(2 - 3)	Argilas, folhelhos, rochas muito pouco fraturadas/alteradas
Aquífuges	(< 10 ⁻⁹)	(< 1)	Rochas compactas não fraturadas/alteradas

- ▷ **Aquífero livre:** conforme Fig. 3.2A, o termo designa a primeira camada porosa e permeável do perfil geológico da área considerada, na qual as águas da sua zona saturada estão sob condições de pressão atmosférica normal, isto é, livres. Quando o nível da água **NA** do aquífero livre encontra-se a uma pequena profundidade – da ordem de 5 m a 6 m –, o aquífero livre geralmente é chamado de *freático*.
- ▷ **Aquífero confinado:** o termo designa a camada aquífera que está encerrada entre duas outras relativamente impermeáveis. Como o peso das camadas subjacentes é suportado pelo esqueleto sólido do aquífero confinado e pela água nele armazenada, a pressão reinante no aquífero confinado é superior à atmosférica. Em consequência, quando se atravessa a camada confinante, o nível da água sobe no furo realizado até o ponto em que se estabelece o equilíbrio com a pressão atmosférica da área considerada. Quando esse nível de equilíbrio fica acima da superfície topográfica, configura-se a situação de poço jorrante ou artesianos, conforme mostra a Fig. 3.2B.
- ▷ **Aquífero suspenso:** configura-se toda vez que ocorre uma acumulação de água acima do nível regional do freático.
- ▷ **Aquífero semilivre e semiconfinado:** eles ocorrem porque as camadas confinantes e/ou substratos são pouco espessos, descontínuos e/ou relativamente permeáveis (aquitardes), resultando num nível de afloramento ou de confinamento pouco pronunciado (Figs. 3.2C e 3.2D).

3.5 Energias do fluxo subterrâneo

As águas subterrâneas possuem três tipos principais de energia: mecânica, térmica e química ou bioquímica. Como a quantidade dessas formas de energia varia no espaço, a água subterrânea é forçada a mover-se de uma região para outra, numa tentativa de alcançar um estado de equilíbrio. As variações da energia mecânica são, relativamente, as mais importantes.

3.5.1 Fluxo no meio não saturado

No meio não saturado, o fluxo é predominantemente vertical e resulta do comportamento do potencial total da água no solo, o qual representa a diferença da energia livre de Gibbs entre o estado da água no solo e um estado padrão. O potencial da água do solo Ψ tem um grande número de componentes, destacando-se o potencial gravitacional Ψ_g , que

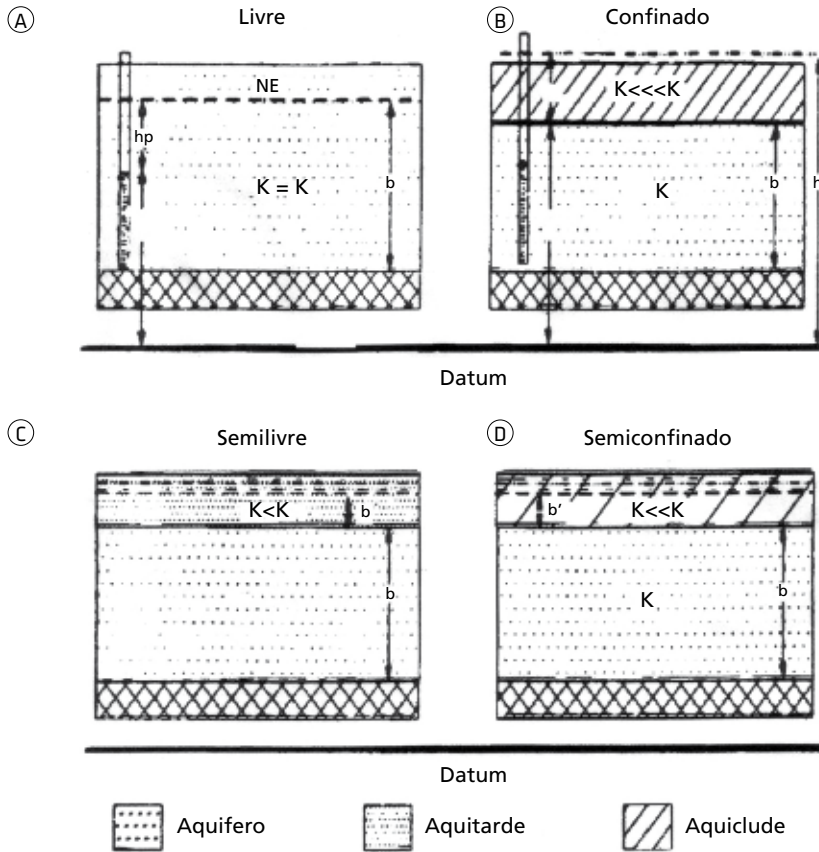


FIG. 3.2 Tipos de aquíferos

é uma função da altura Z medida em relação a um referencial arbitrário; o potencial osmótico \mathfrak{S}_o , que é função da concentração salina da água; o potencial matricial \mathfrak{S}_m , resultado de forças capilares e de adsorção, elétricas, e assim por diante, que surgem pela interação entre a água e as partículas sólidas, isto é, matriz solo, sendo, em consequência, função do teor de umidade q no sistema; e o potencial de pressão \mathfrak{S}_p . Dessa forma, o potencial de água no solo pode ser expresso pela Eq. 3.22:

$$\mathfrak{S} = \mathfrak{S}_g + \mathfrak{S}_o + \mathfrak{S}_m + \mathfrak{S}_p \quad (3.22)$$

Esse potencial representa uma pressão negativa, porque se opõe à ação da gravidade, que tende a levar a água infiltrada para acumular na zona saturada. Em condições normais, a água do solo tem pressão positiva ou negativa.

Qualidade e classificação das águas subterrâneas

4

Suely Schuartz Pacheco Mestrinho

As águas naturais contêm gases e sólidos como impurezas dissolvidas. A expressão *qualidade da água* se refere à química da água e aos micro-organismos que nela vivem. O desenvolvimento da água para um fim específico é determinado pela sua qualidade, definida pela avaliação das características químicas, físicas e microbiológicas que possibilitam a sua classificação na visão hidroquímica e para o enquadramento. Quando a alteração da qualidade impede o uso, a água é dita poluída ou contaminada.

A prevenção e o controle da poluição dos corpos hídricos estão relacionados aos usos e às classes de qualidade exigidas, como dispõe a Lei nº 9.433 (Lei das Águas; Brasil, 1997). O estabelecimento da classe a ser alcançada ou mantida num segmento de corpo d'água ao longo do tempo é o enquadramento, instrumento de planejamento para controle da poluição por licenciamento e fiscalização.

As mais recentes resoluções nacionais que tratam das águas subterrâneas reforçam as exigências de programas de prevenção proativa e controle da contaminação, embasadas por diretrizes definidas para esse fim. A Resolução Conama nº 396 (Conama, 2008) dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais gerais para o enquadramento das águas subterrâneas.

Será apresentada uma revisão de conceitos e uma atualização dos procedimentos relacionados à qualidade e classificação das águas subterrâneas. O tema será abordado considerando três focos principais:

- ▷ as reações e processos hidrogeoquímicos no ambiente subterrâneo;
- ▷ os critérios para a avaliação da qualidade e a classificação hidroquímica;
- ▷ a classificação para enquadramento da água no manancial, em conformidade com a legislação nacional vigente e pertinente.

4.1 Noções de hidrogeoquímica

A hidrogeoquímica é uma ciência multidisciplinar que estuda a composição química da água com os processos e reações no ambiente de

Prospecção geofísica

5

Nelson Ellert

Apesar de tratados em outros capítulos, as formas de ocorrência de água subterrânea e os aspectos geográficos que impõem condições peculiares na sua ocorrência serão abordados de forma simples, notadamente nas condições geológicas brasileiras.

A água subterrânea, fazendo parte do ciclo hidrológico, encontra-se instalada em poros, ou seja, vazios das rochas. As rochas, dependendo de sua origem, podem apresentar vazios ligados ao seu processo genético (poros das rochas sedimentares) ou a processos tectônicos (fraturas de rochas cristalinas e metamórficas). Além desses tipos de vazios, há aqueles ligados a processos de dissolução de rochas originalmente compactas, como calcários e dolomitos.

Em condições tropicais, como no Brasil, é comum a existência de rochas porosas originadas de processos de intemperismo, que muitas vezes geram, *in situ*, espessas camadas de rocha alterada que se comportam como camadas de rochas sedimentares.

Considerando a extensão do litoral brasileiro e a existência de numerosos centros urbanos lá instalados que fazem uso de água subterrânea como fonte para o abastecimento, o contexto litorâneo carece de destaque nesta obra, no tocante à prospecção e à exploração de água subterrânea.

Em termos de prospecção geofísica, contextos geológicos formados por rochas sedimentares são normalmente representados por camadas dispostas horizontal ou sub-horizontalmente. O contexto das fraturas em rochas cristalinas e/ou metamórficas é normalmente representado por estruturas dispostas vertical ou subverticalmente.

Vazios em rochas calcárias, representados por cavernas (esferas), dolinas (calotas) e rios subterrâneos (cilindros), podem conter ar e água nas mais diferentes proporções. As dolinas normalmente são preenchidas por material formador do solo local (nas dolinas preenchidas) ou por vazio (nas dolinas de abatimento).

Locação de poços

6

Waldir Duarte Costa

A locação de um poço consiste em determinar o melhor local para a sua perfuração, para se obter água em quantidade e qualidade satisfatórias com o menor custo possível.

Essa ação implica a viabilização técnica e econômica da perfuração do poço, pois deverá prever a melhor situação para a exploração do manancial hídrico subterrâneo, levando em conta aspectos técnicos – aquíferos de maior potencialidade, com água de melhor qualidade – e econômicos, tais como: profundidade ideal para atendimento da demanda; posicionamento de níveis d'água que impliquem menor consumo energético; maior aproximação da fonte de uso, entre outros.

A complexidade que envolve a locação de um poço dificilmente poderá ser traduzida num simples capítulo; é tarefa que somente a prática intensiva pode elucidar, para capacitar o técnico a um bom desempenho.

Esse tema é bastante vasto, pois apresenta uma série de variáveis, em função, sobretudo, do tipo de rocha em que a água se acha armazenada, ou seja, do domínio hidrogeológico. Três são os domínios hidrogeológicos existentes na natureza, para os quais se emprega, em geral, metodologia e sistemática distinta na locação de um poço: *sedimentar*, *crystalino* e *cárstico*.

Nesses domínios as rochas que possuem capacidade de armazenar e liberar água são denominadas aquíferos, que podem ser do tipo poroso ou intersticial, fissural e cárstico-fissural, correspondendo respectivamente aos domínios supracitados.

Os fatores naturais que atuam na superfície e subsuperfície da Terra e influem na locação de um poço vão agir diferentemente em cada um desses domínios, não apenas em amplitude, mas em intensidade.

Em geral, a locação de um poço em aquífero poroso é bem mais simples do que nos outros domínios. Costuma-se dizer que, em áreas sedimentares, “joga-se o chapéu para o alto e, onde ele cair, perfura-se o poço”; apesar do exagero dessa assertiva, ocorrem em aquíferos porosos (ou intersticiais) de

Domínio cristalino

No domínio cristalino todos os fatores exógenos desempenham papel importante, sobretudo o clima e a hidrografia, mas o clima, todavia, não é utilizado como critério de locação de poço.

A hidrografia deve ser utilizada, associada ao critério estrutural (fator endógeno), principalmente em regiões desprovidas de manto de alteração. A adoção de riacho-fenda, consagrado na nomenclatura do aquífero fissural por Siqueira (1963), diz muito bem dessa relação entre os dois fatores, como é mostrado na Fig. 6.1. Os poços mais favoráveis para obtenção de uma boa vazão são o 2 e o 5, por estarem captando, provavelmente, as águas infiltradas no sistema de falha F_1 e no sistema de fratura F_2 ; em seguida, em ordem decrescente de aptidão, viriam os poços 1 e 6, os dois com capacidade de captar águas infiltradas nas falhas F_1 ; o poço 3, se viesse a captar água, seria a grande profundidade, mas assim mesmo dependendo do mergulho das falhas e da fratura; finalmente, o poço de número 4, apesar da vizinhança da drenagem superficial e da situação entre a falha e a fratura, não teria chance de captar água, porque os mergulhos das referidas estruturas rupturais se verificam no sentido oposto.

O relevo apresenta nesse domínio uma atuação regular, pois, de acordo com estudos de Costa (1986) efetuados em 254 poços na Região Nordeste, o resultado das vazões específicas médias nas distintas situações mostradas na Fig. 6.2 foi o seguinte:

- + poços em talvegues – $Q/s = 460 \text{ L/h.m}$
- + poços em vertentes – $Q/s = 350 \text{ L/h.m}$
- + poços em elevações – $Q/s = 160 \text{ L/h.m}$

Quanto à qualidade, o resultado foi muito variado, inclusive ocorrendo inversões frequentes e compreensíveis. Nos talvegues, a salinização apresentava-se mais acentuada do que nas vertentes e nas elevações. Isso se deve à presença de águas salinizadas

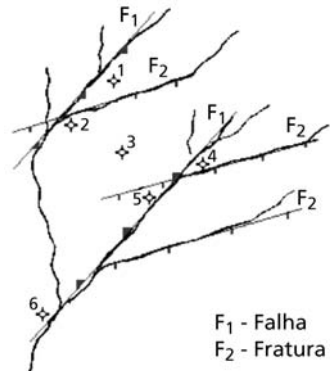


FIG. 6.1 Esquema de um riacho-fenda



FIG. 6.2 Relação relevo/poço

em rios de maior extensão, carreando sais de pontos distintos no seu trajeto; à medida que se afastava da zona de influência dessas águas superficiais salinizadas, diminuía o teor de sais nas águas subterrâneas.

Ainda no que se refere ao condicionamento estrutural, devem ser consideradas as situações de maior relevância, nas rochas cristalinas, que condicionam o melhor aproveitamento do aquífero fissural. Na Fig. 6.3 é mostrado um bloco que sofreu dobramento com grande raio de curvatura e fraturamento em função de esforços atuantes segundo as direções e sentidos assinalados por setas.

A fratura mais central – que coincide com o plano axial e contém a crista da dobra –, *bc* de Sander (Larsson, 1977), é uma fratura de tração; as demais desse tipo (paralelas a *bc*) apresentam ligeiro mergulho para o centro da dobra; a fratura *ac* é de tração e transversal à estrutura dobrada, e se desenvolve paralelamente ao esforço principal atuante σ_1 ; as fraturas *hk0* são de cisalha-

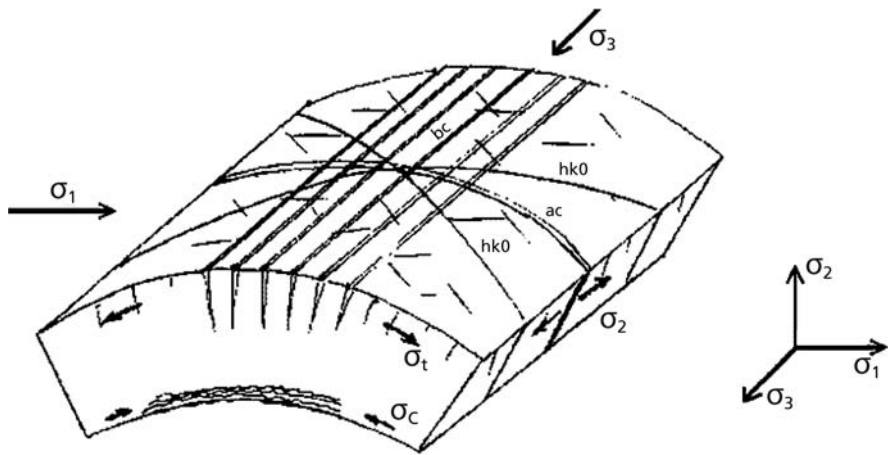


FIG. 6.3 Modelo de fraturas tracionais e de cisalhamento

mento, angulares com relação ao esforço principal e às estruturas.

Muita atenção deve ser dispensada pelo geólogo na locação de um poço, para distinguir as fraturas tracionais, geralmente com boa abertura, das fraturas de cisalhamento, que, na maioria dos casos (quando não ocorre superposição de eventos tectônicos), se apresentam fechadas.

Além da abertura, também deve ser verificado o mergulho do plano da fratura, pois quanto menor o ângulo de inclinação, maior o número de fraturas que um poço poderá interceptar (Fig. 6.4). Os blocos A, B e C dessa

Projetos de poços



Ivanir Borella Mariano

Não se pretende estabelecer um projeto padrão, mas sim diretrizes e critérios básicos que podem minimizar riscos de investimentos e fazer com que se obtenha o máximo das potencialidades dos aquíferos.

Define-se como poço tubular profundo aquele que é construído para captar água subterrânea com o auxílio de equipamentos mecânicos. As profundidades vão de algumas dezenas de metros a centenas de metros, ao passo que os diâmetros variam normalmente de 4" a 30" (10 cm a 75 cm, aproximadamente).

Ao elaborar o projeto do poço tubular profundo, é preciso ter em mente que ele deverá obter o maior volume de água com a maior eficiência e o menor custo possível. Caso o aquífero tenha produtividade superior ao volume desejado, deverá restringir-se às necessidades do usuário, mantendo as premissas sobre eficiência e custo.

A eficiência é um dos fatores mais importantes, pois influenciará diretamente nos custos de produção durante toda a vida útil do poço. Definir os materiais de aplicação será função das características hidroquímicas da água e da profundidade do poço.

Para não ter surpresas desagradáveis e dispendiosas, os projetos de poços tubulares profundos devem ser baseados em informações fornecidas por estudo hidrogeológico preliminar, que indicará, no mínimo, os dados relativos a estratigrafia, nível estático, vazão específica e qualidade de água.

Em projetos mais específicos, principalmente de poços localizados próximo a outros, ou quando se inserem em um sistema de bombeamento, deve-se dispor também de valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento, para permitir o cálculo dos rebaixamentos por possíveis interferências.

Entre os aspectos a serem observados e adotados na prática do projeto e da construção do poço, encontram-se:

- ▷ **Relação entre diâmetro de perfuração e da coluna de tubos:** o diâmetro de perfuração para a instalação do tubo de proteção sanitária, da

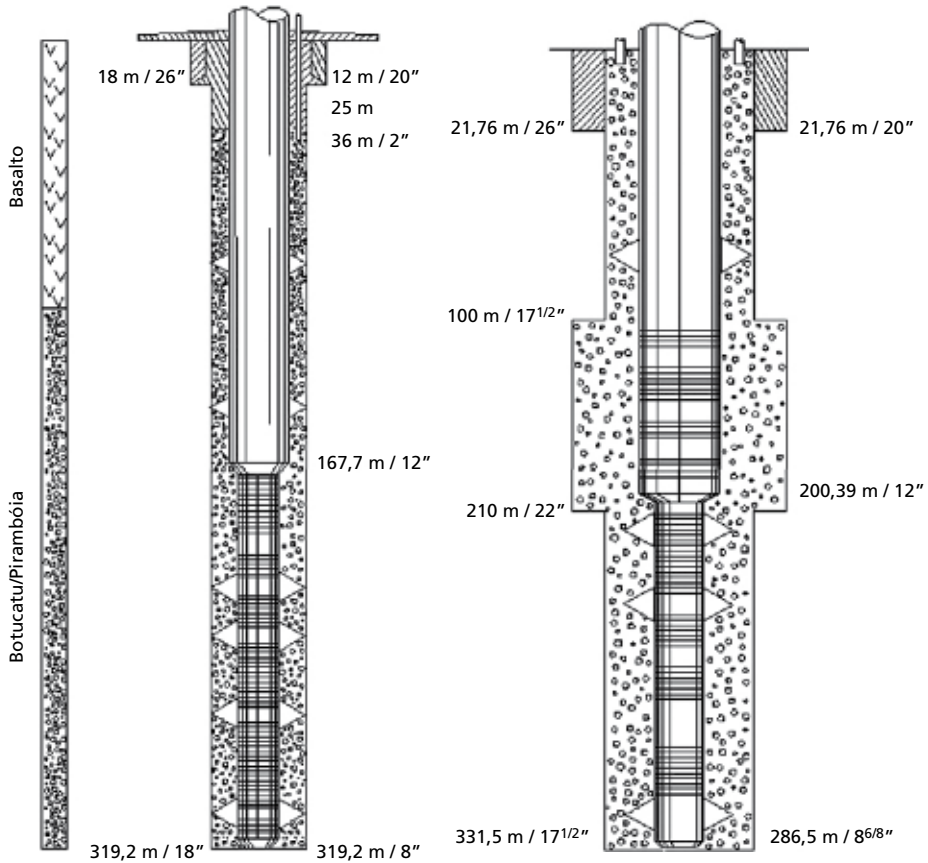


FIG. 7.1 Poços perfurados no mesmo local com desenhos e produções diferentes

produzidos de dentro para fora. A aparência externa das ranhuras dos filtros é semelhante à da veneziana, fazendo com que o fluxo de dentro para fora do tubo seja tangencial. Além da baixa área aberta, o fluxo tangencial representa um grande inconveniente, pois dificulta os trabalhos de limpeza e desenvolvi-

Tab. 7.3 PROFUNDIDADES TOTAIS DE INSTALAÇÃO

Modelo	Prof. total de aplicação (m)
Linha leve	50
Linha <i>standard</i>	150
Linha reforçada	300

Tab. 7.4 RESISTÊNCIA AO COLAPSO

Diâmetro nominal	Resistência ao colapso (kfc/cm ²)
100-S	6
154-L	2
154-S	7
150-R	15
206-S	6
200-R	15
250-S	6
300-S	6

Métodos de perfuração, completção e desenvolvimento de poços tubulares



*Carlos Eduardo Quaglia Giampá
Valter Galdiano Gonçalves*

8.1 Seleção do sistema/método de perfuração

Diferentemente dos poços rasos (cacimbas, cisternas), a perfuração de poços tubulares profundos requer técnicas e tecnologias apropriadas, pessoal habilitado e equipamentos adequados. Por isso, os investimentos e riscos operacionais e financeiros são maiores. Na perfuração desses poços, o êxito do trabalho depende de uma série de fatores de ordem técnica e geológica, começando pela escolha e seleção do método de perfuração a ser adotado.

Admitindo-se o princípio de que “um poço é uma obra de engenharia e de hidrogeologia, e não um buraco pelo qual se captam águas subterrâneas” e que o custo de bombeamento é alto, todas as precauções devem ser tomadas para que o poço seja técnica e ambientalmente bem construído, tornando-se uma obra economicamente viável e rentável.

Entre outros requisitos, destacam-se: a locação, o projeto e a seleção do método de perfuração. O projetista deve estar atento e utilizar todos os dados disponíveis para definir o roteiro com toda a segurança possível. Definidos o local e o projeto do poço, ele deverá indicar o método de perfuração a ser adotado. A escolha do método envolve fatores de ordem técnica e econômica e também depende do tipo de poço que se vai perfurar.

8.1.1 Métodos de perfuração

São conhecidos e empregados vários sistemas de perfuração de solo e rochas (Fig. 8.1), conforme os objetivos a que se destinam:

▷ **Sistemas mecânicos:**

- Percussão a cabo;
- Testemunhagem contínua;
- Balde de testemunhagem.

▷ **Sistemas com circulação direta do fluido:**

- Rotativo com circulação direta;

Perfilagem geofísica

9

*Geraldo Girão Nery
Jean-Pierre Di Schino*

O tempo de perfuração e as amostras de calha colhidas desde o primeiro metro perfurado ainda são, em muitos casos, as únicas informações usadas pela indústria da água subterrânea para a reconstituição da coluna litológica e dos locais de assentamento dos filtros. Os resultados desses métodos empíricos, sujeitos a inúmeros erros de avaliação, não são sempre satisfatórios e devem ser apoiados, com maior frequência, pelo método de *perfilagem geofísica*, mais confiável.

O termo *perfilagem geofísica* refere-se a um processo de aquisição e representação analógica ou digital das diversas propriedades petrogeofísicas – de natureza elétrica, acústica, radioativa, mecânica, térmica etc. – das rochas atravessadas por um furo tubular. O produto final desse processo de propriedades variadas é um registro delas em relação às profundidades atravessadas pelos furos, denominado de *perfil geofísico*, em substituição à antiga terminologia, que o denominava simplesmente de *perfil elétrico*.

Uma operação de *perfilagem* é realizada imediatamente após uma interrupção programada da perfuração de um furo por meio da descida de um cabo com propriedades eletromecânicas precisas, em cuja extremidade se acopla um mandril protetor contendo circuitos de telemetria e um ou mais sensores específicos para cada tipo de característica a registrar. Ao conjunto telemetria-sensor(es) dá-se o nome genérico de ferramenta ou sonda de *perfilagem* (Fig. 9.1).

Os sensores dentro da sonda de *perfilagem* captam as informações oriundas das rochas e as entregam à telemetria para enviá-las, por meio de cabo, à superfície, quando são recolhidas, separadas, processadas e registradas no caminhão ou unidade de *perfilagem*.

Existem atualmente cinquenta ou mais tipos diferentes de perfis, cada um deles fornecendo informações específicas e úteis para distintos tipos de usuários:

- ▷ O geólogo exploracionista usa-os para confeccionar mapas e seções;
- ▷ O petrofísico, para avaliar potenciais produtivos;

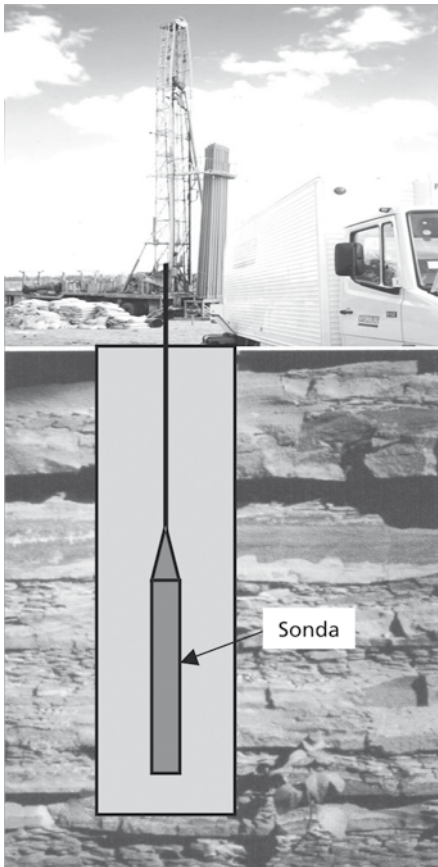


FIG. 9.1 A operação de perfilagem é constituída por uma unidade na superfície, com equipamentos de registro e processamento, e uma na subsuperfície. Os sensores responsáveis pela aquisição das propriedades das rochas ficam ligados por um cabo elétrico

- ▷ O geofísico, como fonte complementar e de calibração de seus levantamentos de superfície;
- ▷ O geólogo projetista, para obter parâmetros para seus modelamentos;
- ▷ O ambientalista, para detectar plumas contaminantes;
- ▷ O geotécnico, para obter as constantes elásticas das rochas;
- ▷ O geólogo de petróleo, para quantificar o teor de hidrocarbonetos presentes nas camadas permoporosas;
- ▷ O hidrogeólogo, para melhor posicionar filtros, avaliar o potencial produtivo do furo e determinar a qualidade das águas dos aquíferos em termos de sais totais dissolvidos (STD).

Existem basicamente duas famílias de ferramentas de perfilagem para a indústria da água: as que foram desenhadas para mineração e as para petróleo. As mais adequadas aos furos de água são do tipo de tecnologia mais avançada, com maior diâmetro e sensores mais sensíveis e menos afetados pelo furo em si (diâmetro, tipo do fluido de perfuração etc.). Além disso, os perfis tipo petróleo obedecem a padrões internacionais do American

Petroleum Institute (API) e são calibrados para fornecerem resultados qualitativos e quantitativos para uma real interpretação computadorizada dos aquíferos presentes no furo.

9.1 Tipos de perfis geofísicos

Os perfis geofísicos de uso frequente na hidrogeologia são os de princípios físicos de natureza: elétrica ou indutiva (ou de resistividade); acústica

Hidráulica de aquíferos e eficiência de poços

10

*Fernando Antônio Carneiro Feitosa
José Geilson Alves Demétrio*

Serão apresentadas técnicas de análise de ensaios de bombeamentos para determinar parâmetros hidrogeológicos, o posicionamento de fronteiras hidráulicas e a equação característica de um poço. Obras de referência e a bibliografia citada no texto ajudarão o leitor interessado a aprofundar-se no tema.

10.1 Interpretação de testes de aquífero

Todos os métodos de análise de ensaios de bombeamento descritos são para aquíferos ideais. As características admitidas para um aquífero ideal são necessárias para que se possa obter soluções analíticas da equação diferencial do fluxo subterrâneo. Além das características específicas para cada tipo de aquífero, existem as comuns a todos os tipos de aquífero:

- ▷ O aquífero é homogêneo e isotrópico e sua água possui viscosidade e densidade constantes;
- ▷ A espessura do aquífero é constante e sua base é horizontal;
- ▷ Não existe fluxo natural, ou seja, a superfície potenciométrica é horizontal antes do bombeamento;
- ▷ No bombeamento, o fluxo para o poço é radial e horizontal;
- ▷ O coeficiente de armazenamento é constante. Para aquíferos confinados, supõe-se que o nível dinâmico não ultrapasse o teto do aquífero;
- ▷ A água retirada do armazenamento do aquífero é liberada instantaneamente. O volume cedido é proporcional à diminuição do nível potenciométrico;
- ▷ O aquífero tem extensão lateral infinita e não existem outras captações;
- ▷ O poço é totalmente penetrante;
- ▷ O raio do poço é suficientemente pequeno, para que a variação do volume de água nele armazenada não influa na vazão de bombeamento;

Conjuntos de bombeamento

11

Almiro Cassiano Filho

Walter Antonio Orsati

Após concluir o poço tubular profundo, é fundamental definir o sistema de bombeamento para a extração da água. Os sistemas apresentados a seguir referem-se aos tipos de conjuntos mais comuns utilizados para a extração de água usada no abastecimento público, irrigação ou indústria.

11.1 Tipos de equipamento

11.1.1 Conjunto motobomba submersa

A bomba centrífuga submersa é do tipo vertical, e seu motor acionador encontra-se acoplado por luvas, próximo ao bombeador; a sucção da bomba encontra-se junto ao acoplamento motor/bomba, no qual se localiza um crivo (Fig. 11.1).

O conjunto é instalado dentro do poço e abaixo do nível dinâmico, por isso é identificado como submerso. Sua faixa de aplicação varia de cerca de 1 m³/h até 35 m³/h, sendo esta a sua faixa de aplicação mais usual (rotores radiais), podendo atingir vazões superiores a 1.000 m³/h (rotores semiaxiais).

A aplicação desse equipamento é mais comum em empresas que exploram sistemas subterrâneos de água por poços profundos.

11.1.2 Conjunto motobomba turbina

A bomba turbina tipo centrífuga vertical também é conhecida como de eixo prolongado, por sua forma construtiva, e seu motor acionador é encontrado do lado externo do poço, acoplado pela coluna de recalque e sistemas de eixo (Fig. 11.2). Na sua base encontra-se o sistema de crivo.

A bomba é instalada abaixo do nível dinâmico.

A faixa de aplicação mais usual varia em torno de 50 m³/h, podendo atingir vazões acima de 800 m³/h, além de servir para bombeamento de água com temperaturas elevadas.

Esse tipo de aplicação muitas vezes é encontrado em recalques em represas e lagos, e não necessariamente em poços profundos, em razão da

Operação, manutenção e telemetria em poços tubulares

12

Carlos Eduardo Quaglia Giampá

Valdir Gonçalves

Valter Galdiano Gonçalves

12.1 Operação

Operação é o conjunto de atividades pelas quais se pode monitorar e intervir num sistema de produção e abastecimento de água com o objetivo de manter uma condição de trabalho que melhore vários fatores que interagem no processo. Esse monitoramento pode ser feito de modo manual ou a distância (telemétrica). Assim, para entender esse processo, apresentam-se as condições nas quais ocorrem esses dois processos de coleta de informações:

12.1.1 Monitoramento manual

É efetuado por operadores fixos ou rotativos, responsáveis pelo acompanhamento da qualidade e quantidade de água produzida. Eles são coletores de informações e processadores das instruções emitidas pelo centro de controle operacional (CCO). O CCO, ou gerenciador, recebe as informações diretamente dos operadores ou *on-line*, com o objetivo de reorientá-los quando surgirem dúvidas e, principalmente, poder adotar medidas de correção rápida e direcionada caso se observem alterações na produção e/ou abastecimento. Os dados, após serem analisados pelo CCO, geram indicadores que possibilitam conhecer o desempenho do sistema e a forma de melhorá-lo, se necessário.

12.1.2 Monitoramento a distância (automático e telemetria)

Procura-se melhorar a produtividade, a qualidade e a redução dos custos operacionais com processos de automação, telemetria e a interface homem-máquina utilizando-se equipamentos digitais de supervisão e controle em tempo real (Fig. 12.1). Basicamente, esse sistema é composto de:

- ▷ **Instrumentação:** é responsável por medir diretamente as variáveis hidráulicas, elétricas e sua indicação local com o processo;

Preservação das águas subterrâneas

13

*André Marcelino Rebouças
Janaina Barrios Palma*

Nos últimos cem anos, a sociedade moderna viveu um grande período de desenvolvimento tecnológico. Após a II Guerra Mundial, com o crescimento da atividade industrial, esse ritmo de desenvolvimento foi acelerado. Dos anos 1950 em diante, a ênfase foi para a maior produção, enquanto os efeitos ambientais dessas atividades eram colocados em segundo plano, sobretudo aqueles que impactavam direta ou indiretamente o solo e as águas subterrâneas. Nos anos 1970, a sociedade começou a dar-se conta da possibilidade de comprometer a qualidade e a oferta de recursos naturais, sobretudo a água. Esse temor criou uma preocupação mundial pela preservação e recuperação dos recursos naturais comprometidos.

A água subterrânea corresponde a 60% do consumo de água potável no Brasil (Pacheco; Rebouças, 1984) e, na região metropolitana de São Paulo, contribui com 13% da água de abastecimento (Tinoco et al., 1990). Segundo o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE), existem cerca de 7 mil poços tubulares profundos ativos na Região Metropolitana de São Paulo, além de milhares de poços rasos e cisternas distribuídos pela periferia e áreas não servidas pela rede de distribuição. Existe uma dificuldade de captação de água superficial de boa qualidade em quantidade suficiente para o abastecimento. Esse cenário torna a água subterrânea um dos mananciais disponíveis. Ela é fator estratégico para o desenvolvimento socioeconômico, tornando a sua proteção uma questão primordial.

Apesar da importância da água subterrânea, o Registro de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo, realizado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb) em dezembro de 2011, era formado por 4.131 locais, sendo 1.329 (33%) localizados na cidade de São Paulo.

Segundo esse documento, a distribuição das áreas por tipo de atividade é (Tab. 13.1):

Gerenciamento de recursos hídricos

14

Cid Tomanik Pompeu
(in memoriam) *Flávio Terra Barth*

A condição básica para que o gerenciamento de recursos hídricos se torne uma imposição é a escassez relativa, com demandas hídricas se aproximando das disponibilidades. Isso ocorre em duas circunstâncias: nas bacias hidrográficas de grande concentração demográfica e industrial, a escassez decorre da poluição hídrica e as disponibilidades são afetadas pelo padrão insatisfatório de qualidade da água para uso mais nobre; nas regiões semiáridas, o clima é a razão determinante da insuficiência das disponibilidades diante das demandas.

Nos dois casos a água deve ser reconhecida como um bem econômico, com custos crescentes para ser obtida em quantidade e com padrões apropriados de qualidade para todos os usos.

Nas bacias hidrográficas, ou regiões em que há abundância hídrica, a água é importante fator de desenvolvimento econômico, social e ambiental. Sua abundância, porém, não implica que sua utilização seja descuidada, pouco racional e que a conservação e proteção dos recursos hídricos deixe de ser um dos pontos importantes do plano de desenvolvimento regional, que considera o aproveitamento múltiplo dos recursos hídricos.

Nessas circunstâncias, os conceitos de gerenciamento dos recursos hídricos devem ser aplicados. Desde a década de 1970, a atuação de ambientalistas antecipou ações de gerenciamento dos recursos hídricos, em razão da sua valorização política. Uma característica fundamental da água é que se trata de um bem de usos múltiplos e competitivos, e os custos relacionados com a sua utilização e conservação, em uma mesma bacia hidrográfica, afetam todos os usuários, mas, de forma diferenciada, na dependência da situação relativa à captação de água e ao lançamento de cargas poluentes. A distribuição dos custos entre os usuários e os setores beneficiados por obras de aproveitamento e proteção dos recursos hídricos é questão de grande complexidade e importância.

Como decorrência desses conceitos básicos, o gerenciamento de recursos hídricos pode ser definido como:

Anexos

Carlos Eduardo Quaglia Giampá

Valter Galdiano Gonçalves

Anexo I

Associações, institutos e órgãos relacionados às águas subterrâneas

1. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (Abas)

A Abas é uma entidade tecnocientífica, sem fins lucrativos, que objetiva, dentro do escopo das águas subterrâneas: utilização racional e sustentada; divulgação; elevação do nível técnico dos associados; elevação da qualidade dos serviços prestados pelas empresas associadas; fomentar a utilização de aquíferos de forma racional, por meio de: gestão integrada, observação das normas técnicas e licenças ambientais; desenvolvimento de técnicas e tecnologias. Ela congrega empresas fabricantes de equipamentos e materiais, perfuradores de poços, prestadores de serviços, universidades, institutos e órgãos de pesquisa e gestão de recursos hídricos, grandes consumidores de água e profissionais multidisciplinares, pesquisadores, professores, consultores, geólogos, engenheiros, sondadores, administradores e técnicos de nível médio, além de estudantes. A Abas dispõe de um conselho e vários comitês técnicos que podem apoiar a sociedade civil nessas atividades. De questões cotidianas, para dirimir dúvidas, receber denúncias e sugestões, até colaborar com estudos de planejamento, termos de referências e formulações de editais que objetivem a contratação de poços tubulares profundos e serviços correlatos. Publica um boletim informativo mensal, AbasInforma (<abasinforma@abas.org>). R. Capitão Messias, 51, Perdizes. CEP 05004-020. São Paulo/SP. Tel.: (11) 3868-0723. Fax: (11) 3868-0727. www.abas.org.br. E-mail: <info@abas.org>.

2. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária Ambiental (Abes)

Organização não governamental sem fins lucrativos, fundada em 1966, cuja missão é contribuir para a melhoria da qualidade de vida dos brasi-