

Monitoramento hidrogeológico em mineração: relevância da locação e do projeto de poços na qualidade dos dados

Hydrogeological monitoring in mining: the relevance of well location and design for producing assertive data

Ricardo Vida e Silva¹, José Eloi Guimarães Campos², Júlio Henrichs de Azevedo³

¹Universidade de Brasília, Distrito Federal - Brasil, vidaricardo1@gmail.com

²Universidade de Brasília, Distrito Federal - Brasil, eloi@unb.br

³Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Distrito Federal – Brasil, julio.henrichs@gmail.com

Recebido:

03 de julho de 2025

Recebido no formato de revisão:

20 de agosto de 2025

Aceito:

21 de agosto de 2025

Disponível online:

14 de outubro de 2025

Seção:

Artigos

Palavras-chave:

Superfície potenciométrica.
Hidroquímica.
Água subterrânea.
Impacto ambiental.
Licença ambiental.

Keywords:

Potentiometric surface.
Hydrochemistry.
Groundwater.
Environmental impact.
Environmental license.

<https://doi.org/10.14295/ras.v39i2.30338>



RESUMO

A aplicação de critérios técnicos e científicos é essencial tanto na locação quanto no projeto construtivo de poços de monitoramento, pois a ausência desses critérios na fase de planejamento pode comprometer a eficácia do estudo hidrogeológico, uma vez que dados incorretos sobre parâmetros do aquífero, carga hidráulica e qualidade da água subterrânea, resultam na limitação do programa de monitoramento. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo estabelecer diretrizes para a locação e o projeto construtivo de poços de monitoramento exigidos no âmbito do licenciamento ambiental de atividades minerárias. Para isso, realiza-se uma análise crítica da literatura especializada, de guias e manuais técnicos, de normas vigentes e da legislação aplicável, visando identificar deficiências e propor melhorias para a otimização dos planos de monitoramento. Como resultados, além de critérios consolidados a partir da revisão bibliográfica, são apresentadas diretrizes específicas para a locação e projetos de poços de monitoramento, visando atender diferentes objetivos: i) caracterização hidrodinâmica dos aquíferos; ii) caracterização hidrogeoquímica e classificação química das águas; iii) monitoramento da superfície potenciométrica; iv) monitoramento ambiental; v) rebaixamento da zona saturada; e vi) produção primária de água.

ABSTRACT

The practice of technical and scientific criteria is essential for siting and designing of monitoring wells, as the absence of these criteria during the planning phase can result in usefulness of hydrogeological studies, resulting in incorrect data on aquifer parameters, hydraulic head, and groundwater quality limiting the monitoring program. In this context, this study aims to establish guidelines for the location and construction design of monitoring wells required for environmental licensing of mining activities. To this end, a critical analysis of specialized literature, technical guides and manuals, current legislation and applicable legislation is carried out, aiming to identify deficiencies and propose improvements for the optimization of monitoring plans. As main results, in addition to consolidated criteria derived from the literature review, specific guidelines are presented for the siting and designing of monitoring wells to achieve the following purposes: i) hydrodynamic characterization of aquifers; ii) hydrogeochemical characterization and water chemistry classification; iii) monitoring potentiometric surface levels; iv) environmental monitoring; v) dewatering the saturated zone; and vi) primary water production.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento hidrogeológico em áreas de mineração é essencial para garantir a gestão do recurso hídrico subterrâneo (Feitosa et al., 2008; Sánchez et al., 2013; Sánchez, 2013; ANA, 2022), a sustentabilidade ambiental da atividade (Feitosa et al., 2008; McLellan et al. 2009; ANA, 2024), o cumprimento de normas regulatórias (Brasil, 1981; Brasil, 1986; Brasil, 2008; Brasil, 1997) e a segurança operacional dos processos que fazem uso da água subterrânea (Gunson et al., 2012; Bichueti et al., 2014).

Entre os diversos componentes desse monitoramento, a locação, o projeto dos poços e as boas práticas durante as obras de instalação desempenham papel crucial na qualidade dos dados obtidos (Aller, 1991). Embora outros fatores, como frequência amostral, métodos de coleta, equipamentos e análises laboratoriais, também sejam relevantes para qualidade do dado gerado no processo de monitoramento, o poço deve ser considerado o elemento chave.

A utilização de critérios técnicos e de conhecimento científico é imprescindível, tanto para a definição da locação do poço na área de interesse, quanto para a configuração de seu projeto construtivo. Desconsiderar essas diretrizes, ainda na fase de planejamento, pode comprometer a eficácia do monitoramento hidrogeológico (Nielsen, 2005), acarretando a necessidade de descarte e substituição do poço de monitoramento, uma vez que ele apresenta caráter permanente e irreversível e não permite alterações significativas em sua estrutura depois de instalado.

Poços de monitoramento mal locados ou inadequadamente projetados apresentam valor técnico limitado ou nulo, uma vez que tendem a gerar dados imprecisos sobre carga hidráulica e qualidade da água no intervalo monitorado. Essa condição compromete a representatividade das informações obtidas e pode conduzir a interpretações equivocadas sobre o estado do aquífero e das características da água subterrânea (Nielsen, 2005).

A maioria dos problemas em poços de monitoramento decorre da aplicação indiscriminada de métodos padronizados que desconsideram as particularidades geológicas, pedológicas, hidrológicas e geoquímicas locais. Como cada área apresenta características próprias, são necessários projetos específicos, capazes de se adaptar a condições previstas em decorrência do meio físico local (Aller, 1991; Nielsen, 2005).

Apesar das diretrizes disponíveis em obras técnicas (Campbell; Lehr, 1973; Driscoll, 1986; Feitosa et al., 2008), manuais especializados (Barcelona et al., 1985; Aller, 1991; Nielsen, 2005), normas (ASTM, 2004; ABNT, 2007; ABNT, 2008) e na legislação ambiental vigente (Brasil, 2008), ainda persistem lacunas conceituais e operacionais no monitoramento hidrogeológico de áreas sob influência de atividades minerárias.

O monitoramento hidrogeológico em áreas de mineração requer a adaptação das normas gerais ao contexto relativo aos recursos hídricos subterrâneos onde se desenvolve a atividade minerária, além da elaboração e aplicação de diretrizes específicas que não são abordadas na literatura ou tratadas de forma superficial e dispersa. Os projetos e obras de instalação de poços de monitoramento não representam meramente fatores técnicos, uma vez que são a base para as análises científicas e interpretações acadêmicas dos dados. O sucesso dos estudos de classificação em tipos químicos predominantes, estudos de sinal isotópico, análise do fluxo hidrogeológico, e avaliação da qualidade das águas subterrâneas, passa necessariamente pela qualidade dos poços de amostragem. A não adequação dos poços de monitoramento pode gerar parâmetros incorretos do aquífero e inviabilizar a interpretação dos dados produzidos ou resultar em interpretações desconectadas da realidade.

As questões vinculadas aos dos poços não é suficientemente discutida na literatura hidrogeológica e, portanto, é uma lacuna que o presente trabalho pretende abordar. A vinculação entre poços de monitoramento, poços de produção ou nascentes de água, com os objetivos dos estudos hidrogeológicos ainda é insuficiente, sendo que inúmeros problemas de entendimento de processos de contaminação ou ambiguidades dos resultados são vinculados à inadequação dos pontos de amostragem.

Por exemplo, em estudo sobre contaminação de aquífero freático por hidrocarbonetos, as normas técnicas propõem o uso de seções de filtros curtos próximo à zona de flutuação do nível freático. Contudo, em regiões dos cerrados sobre solos argilosos e espessos em áreas planas, comumente são observadas flutuações

de 3 a 4 metros por ano. Nestes casos, seria necessário instalar poços multiníveis ou bateria de poços para o adequado monitoramento e avaliação da contaminação (Fabianovicz, 2008).

É relevante destacar que a atividade minerária envolve diversas intervenções com potencial de impacto sobre os recursos hídricos subterrâneos, tais como rebaixamento do nível freático para viabilizar o acesso aos depósitos minerais, alteração dos processos de infiltração e recarga em decorrência da lavra, uso e/ou manuseio de substâncias potencialmente perigosas com risco de contaminação do solo e da água subterrânea, além da captação de água subterrânea para fins consuntivos no âmbito do empreendimento.

Para essas intervenções, são apresentadas diretrizes específicas para a locação e o projeto de poços de monitoramento, visando atender a diferentes objetivos: i) poços para caracterização hidrodinâmica dos aquíferos; ii) poços para caracterização hidrogeoquímica e classificação química das águas; iii) poços para monitoramento da superfície potenciométrica; iv) poços para monitoramento ambiental; v) poços para rebaixamento da zona saturada; e vi) poços para produção primária de água potável ou uso industrial (Figura 1).

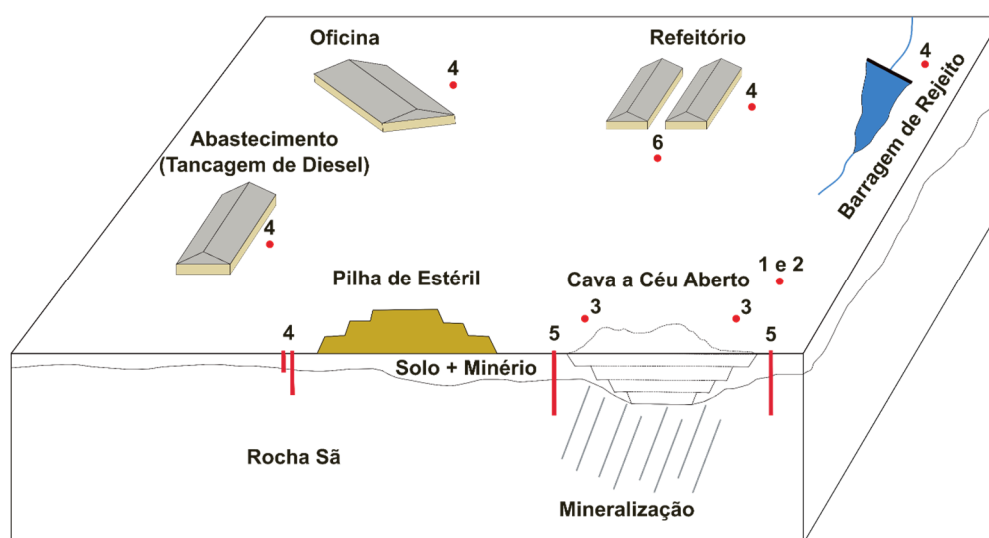


Figura 1. Aplicação de poços em área de mineração. 1) Poço para caracterização hidrodinâmica do aquífero; 2) Poço para caracterização hidrogeoquímica; 3) Poços para monitoramento da superfície potenciométrica; 4) Poço para monitoramento ambiental; 5) Poço para rebaixamento da zona saturada; e 6) Poço para produção primária de água.

Este trabalho tem como objetivo propor diretrizes para o monitoramento hidrogeológico em áreas de mineração, com base em uma análise crítica da literatura especializada, incluindo livros, normas técnicas, guias, legislação vigente e estudos acadêmicos. Busca-se identificar deficiências nos referenciais existentes e propor aprimoramentos, especialmente no que se refere aos critérios de locação e aos projetos construtivos de poços de monitoramento, no contexto das atividades de extração e processamento de minérios.

2. LOCAÇÃO DE POÇOS MULTIFINALITÁRIOS EM MINERAÇÃO

A locação de um poço de monitoramento define sua posição na superfície do terreno sobre o aquífero a ser estudado, sendo uma etapa essencial para a qualidade dos dados e a eficácia do monitoramento hidrogeológico. De acordo com Feitosa *et al.* (2008), Aller (1991), Nielsen (2005), ASTM (2004) e ABNT (2007), essa escolha é influenciada por diversos fatores, incluindo a geologia local, relevo, tipo de solo, rede de drenagem, comportamento de contaminantes potenciais, fontes pretéritas de contaminação e dados de poços existentes. Em muitos casos investigações geofísicas ou outros critérios técnicos são necessários para a locação de poços com funcionalidade para diferentes objetivos.

A caracterização geológica detalhada, por meio de revisão bibliográfica e investigação de campo, permite identificar os tipos de rocha que compõem o aquífero, os principais minerais e as estruturas geológicas presentes nas áreas.

O estudo geológico em rochas sedimentares envolve a análise da litoestratigrafia, da presença de paleocanais, do grau de litificação, da compactação, dos tipos de cimento, do grau de silicificação, da granulometria e da ocorrência de dobras, falhas, lineamentos regionais e de outras estruturas geológicas. Esses fatores determinam a homogeneidade e isotropia do aquífero e, conseqüentemente, devem ser utilizados como critérios para locação e definição da quantidade necessária de poços (Feitosa *et al.*, 2008; Aller, 1991; Nielsen, 2005; ASTM, 2004; ABNT, 2007). Aquíferos homogêneos exigem menor número de poços, desde que posicionados estrategicamente para representar de forma adequada o aquífero e a água subterrânea (Feitosa *et al.*, 2008).

A locação de poços em aquíferos cristalinos deve considerar os fatores que controlam a ocorrência, o armazenamento e o fluxo de água subterrânea, incluindo, presença de anisotropias como fraturas, falhas, zonas de cisalhamento, contatos geológicos e lineamentos regionais (Feitosa *et al.*, 2008).

Além disso, estudos como os de Campos *et al.* (2016) e Azevedo (2019) destacam que a neotectônica influencia, tanto a evolução das superfícies de aplainamento, quanto o fluxo de água em aquíferos fraturados, principalmente a forma em que a disposição dos tensores atuantes, controlam a abertura preferencial de estruturas preexistentes.

Em sistema cárstico, a capacidade de armazenar e transmitir água depende da natureza dos vazios, isto é, se intergranular (ou matricial), por fraturamento (ou planar) e por dissolução (ou conduto). Este último, é o principal meio para o fluxo subterrâneo, que frequentemente se torna turbulento devido à alta velocidade, sinuosidade e rugosidade. Para modelar esse comportamento hidrodinâmico complexo, utilizam-se duas abordagens principais: a de *continuum*, que simplifica o meio como um sistema poroso equivalente, e a de *descontinuum*, que analisa individualmente as fraturas, requerendo dados precisos sobre sua orientação, densidade, interconexão e características das aberturas (Ford e Willians, 2007).

O fluxo de água subterrânea depende de parâmetros hidráulicos e condições de contorno. As condições de contorno são determinadas especialmente por influências geológicas, topográficas, climáticas e biológicas, que controlam locais e quantidades de recarga e descarga, incluindo a cota de elevação da recarga e descarga, precipitação e taxa de infiltração (Ford e Willians, 2007).

Os métodos geofísicos permitem identificar zonas com maior potencial de acumulação e transmissão de águas subterrâneas, tanto através da detecção de camadas aquíferas, quanto da caracterização da configuração estrutural e estratigrafia de subsuperfície (Feitosa *et al.*, 2008).

Lousada e Campos (2005) propuseram metodologia para locação de poços em aquíferos fraturados, a qual envolve a integração de três conjuntos de informações: geologia de detalhe, análise de lineamentos estruturais e estudos geofísicos. Apesar dessas fontes de informações serem imprescindíveis para locação de poços em aquíferos fraturados, podem ser aplicadas em outros tipos de aquíferos (intergranular, cársticos, de dupla porosidade e fissuro-cárstico). Os métodos elétricos (eletrorresistividade e de condutividade eletromagnética) são os mais eficazes para a detecção de feições estruturais com capacidade de armazenamento de água.

A análise do relevo constitui importante critério para a locação de poços de monitoramento, permitindo identificar zonas potenciais de recarga e descarga, além de depressões alinhadas que representam a expressão na superfície, de anisotropias em profundidade.

Em ambientes cristalinos, a associação entre a rede de drenagem e as estruturas geológicas cria condições favoráveis à infiltração e acumulação hídrica nas descontinuidades planares, sendo essencial considerar este fator na locação do poço para evitar a interceptação de fraturas secas (Feitosa *et al.*, 2008).

Outro fator importante é a caracterização do solo (tipo, textura, espessura e capacidade de infiltração), pois o regolito, em geral, compõe um aquífero intergranular independente, que comumente está sobreposto a aquíferos regionais de outra natureza, sendo necessária sua distinção para que os projetos dos poços contemplem essa particularidade.

A compreensão a respeito das especiações químicas, de modo a avaliar os mecanismos de transporte e diluição também é essencial para a locação adequada dos poços de monitoramento (Feitosa *et al.*, 2008). Além disso, é

importante investigar a existência de fontes pretéritas de contaminação no local, visando diferenciar as diversas fontes de impacto relacionadas à mineração. Dentro do possível, os poços devem ser posicionados a distâncias que não permitam a interferência de outras fontes que não as relacionadas com os objetivos primários da investigação.

A locação de um poço também pode ser auxiliada pela análise de dados de poços existentes na área de estudos, seja para avaliação do nível de água, para obtenção de parâmetros hidroquímicos e caracterização hidrodinâmica (ABNT, 2007; Feitosa *et al.*, 2008).

A caracterização hidrogeológica detalhada é essencial para a correta locação de poços de monitoramento, pois permite classificar o tipo de aquífero (granular, fissural, cárstico-fissural ou de dupla porosidade), determinar suas condições de confinamento (livre, semiconfinado ou confinado), avaliar sua homogeneidade, delimitar sua dimensão, identificar estratificações, delimitar as zonas saturada e não saturada e identificar exutórios de água subterrânea na área de estudo. A integração das informações vinculadas a todos esses fatores permite elaborar um modelo conceitual hidrogeológico abrangendo: a rede de fluxo subterrâneo, condições de contorno, curvas potenciométricas, barreiras hidráulicas, zonas de recarga e descarga, além da espessura do solo e regolito. Com esse modelo é possível local o poço de monitoramento de forma mais precisa na porção do aquífero que se almeja avaliar (Nielsen, 2005; Aller, 1991; ASTM, 2004; Nielsen, 2005; ABNT, 2007; Feitosa *et al.*, 2008).

3. PROJETOS DE POÇOS EM MINERAÇÃO

Uma vez definida a locação do poço de monitoramento é preciso elaborar o projeto do poço e, apenas após essa ação, executar sua instalação.

Nessa fase, é feita a escolha e configuração dos elementos do poço (tipo e diâmetro do revestimento, filtro, pré-filtro, acoplamentos, isolamento de seções, proteção sanitária etc.) e como serão executadas as etapas construtivas (método de perfuração, diâmetro de perfuração, profundidade de perfuração, análise das amostras de calha, análise granulométrica, desenvolvimento do poço, teste de bombeamento, relatório do poço etc.). Essa etapa também se define a necessidade de perfilagem geofísica, além de futuras ações para manutenção e descomissionamento dos poços (Nielsen, 2005; Aller, 1991; ASTM, 2004; Nielsen, 2005; ABNT, 2007; Feitosa *et al.*, 2008).

De maneira geral, o projeto construtivo deve seguir diretrizes que são tratadas de forma detalhada por diferentes publicações, dentre as quais se destacam manuais técnicos e livros textos referentes à construção de poços (Driscoll, 1986; Aller, 1991; ASTM, 2004; Nielsen, 2005; ABNT, 2007; ABNT, 2008; Feitosa *et al.*, 2008; Striggow, 2018). Segundo Nielsen (2005), não existe um poço de monitoramento de águas subterrâneas "típico", pois cada projeto deve ser adaptado às condições hidrogeológicas, aos contaminantes analisados, aos objetivos do monitoramento e a outras variáveis locais. No entanto, é possível descrever os componentes individuais do projeto e suas diferentes configurações.

De forma a sumarizar os diferentes aspectos envolvidos na construção dos poços, são apresentados os principais elementos construtivos e as principais etapas envolvidas no processo de construção.

3.1. Revestimento

O objetivo do revestimento é fornecer um meio de acesso à água subterrânea na zona alvo de monitoramento (Aller, 1991; Nielsen, 2005), além de sustentar as paredes do poço ao impedir o desmoronamento da seção de regolito e rocha alterada (Nielsen, 2005; Feitosa *et al.*, 2008) e alojar os equipamentos de bombeamentos (Driscoll, 1986).

O tubo de revestimento deve ser fabricado com materiais adequados ao ambiente monitorado e compatíveis com os alvos da investigação e com a seção de filtro. Deve apresentar resistência física a tensão, compressão e colapso, durante instalação, desenvolvimento e bombeamento, além de resistência química para evitar degradação ao longo da vida útil do poço. Os materiais mais utilizados incluem termoplásticos (PVC), metais (aço carbono, galvanizado e inoxidável) e fluoropolímeros, sendo essencial avaliar as condições geoquímicas locais para determinar riscos de corrosão em materiais metálicos (Aller, 1991). Segundo Nielsen (2005), a escolha dos materiais para o

tubo de revestimento deve assegurar que o poço forneça amostras representativas e mantenha sua integridade física ao longo de todo o programa de monitoramento.

Além do material, outro fator importante para o projeto construtivo é o diâmetro do tubo de revestimento. Os fatores que influenciam na escolha do diâmetro do tubo de revestimento são: capacidade de inserção de equipamentos para amostragem e testes hidráulicos, objetivo do poço, método de instalação, profundidade, desenvolvimento, volume da amostra, volume da purga (ABNT, 2010), taxa de recuperação, custo, dentre outros requisitos. Poços com revestimento mínimo de 4 polegadas oferecem vantagens operacionais, por possibilitarem a execução de maior variedade métodos de desenvolvimento, além de acomodarem diversos equipamentos para testes de bombeamento, para investigações geofísicas e para registros contínuos de nível de água (Nielsen, 2005). Na prática poços de monitoramento de 2 polegadas, embora comuns, devem ser evitados, uma vez que não permitem testes de bombeamento ou desenvolvimento e limpeza nas etapas finais das obras de instalação.

3.2. Filtro e pré-filtro

Em formações não consolidadas (areias finas, siltes ou argilas), estratificadas com ampla variação granulométrica, rochas mal cimentadas (como arenitos friáveis) ou rochas fraturadas com elevado grau de alteração, o projeto do poço de monitoramento exige a instalação de um tubo-filtro na zona alvo (Nielsen, 2005).

As principais funções desse componente incluem: permitir o fluxo de água subterrânea para o interior do poço (Feitosa *et al.*, 2008); viabilizar a coleta de amostras e dados hidrogeológicos, fornecendo suporte estrutural ao pré-filtro e atuando como barreira à entrada de materiais finos da formação para o interior do poço.

As aberturas (ranhuras) do filtro devem ser dimensionadas de acordo com a granulometria do material da formação e do pré-filtro (ABNT, 2007) e o material utilizado na sua fabricação deve ser resistente à corrosão, quimicamente inertes e compatível com o contaminante investigado (Nielsen, 2005).

O comprimento do filtro deve refletir a espessura da zona alvo. Filtros longos são inadequados para definir variações verticais precisas de carga hidráulica ou química da água, sendo preferencial o uso de múltiplos poços com telas curtas ou sistemas multiníveis em aquíferos complexos. Sua instalação requer centralização no furo (com centralizadores posicionados acima do tubo-filtro) para distribuição uniforme do pacote de filtros (Nielsen, 2005). Em alguns aquíferos como os fraturados, cársticos ou intergranulares estratificados, a perfilagem geofísica é uma alternativa para definição do posicionamento adequado das seções de filtro nas unidades produtoras e zonas de fraturas (ABNT, 2007; Feitosa *et al.*, 2008). Entretanto, como essas técnicas são de alto custo e pouco disponíveis, a descrição minuciosa das amostras de calha e o detalhamento da evolução da perfuração (velocidade de avanço, presença de veios, contatos etc.) é fundamental para se alcançar o mesmo objetivo.

Outro elemento do poço de monitoramento indissociável ao filtro é o pré-filtro. O pré-filtro tem como objetivo reter o material da formação, ao atuar como anteparo mecânico, e permitir a entrada de água para o interior do poço, além de evitar colapso da parede do poço durante o desenvolvimento e operação (Nielsen, 2005; ABNT, 2007).

O pré-filtro é instalado no espaço anelar existente entre a seção de filtro-revestimento e a parede da perfuração, composto por material de granulometria selecionada e quimicamente inerte, preferencialmente de composição silicosa para evitar alterações químicas das amostras de água subterrânea (Aller, 1991; Nielsen, 2005; ABNT, 2007; Feitosa *et al.*, 2008). O pacote de filtros é mais eficiente quando composto por partículas de alto grau de selecionamento, uma vez que as aberturas do filtro são de tamanhos uniformes (Nielsen, 2005).

O pré-filtro deve envolver totalmente a seção de revestimento-filtro sem oferecer resistência excessiva ao fluxo durante o desenvolvimento (Aller, 1991), os testes de bombeamento, a purga (ABNT, 2010) e a coleta de amostras de água. Em uma sequência estratigráfica, o dimensionamento do pacote de pré-filtro primário deve considerar a camada com a granulometria mais fina (Nielsen, 2005).

3.3. Selo, isolamento de seções e proteção sanitária do poço

O selo tem a função de vedar o espaço entre o revestimento do poço e a parede da perfuração, impedindo a migração vertical de água e contaminantes entre diferentes zonas do aquífero. Para ser eficaz, o material de vedação, normalmente bentonita ou concreto, deve resultar em baixa condutividade hidráulica após seu posicionamento, preencher completamente o espaço anelar e ser quimicamente compatível com o ambiente, sem aditivos que interfiram na qualidade da água (Aller, 1991; Nielsen, 2005; Feitosa *et al.*, 2008).

Além de ser uma barreira hidráulica ao isolar as zonas monitoradas, o selo anelar protege estruturalmente o tubo de revestimento contra corrosão, sendo essencial que sua instalação seja uniforme ao redor de todo o revestimento, acima do pacote de pré-filtro (Nielsen, 2005).

Em poços de monitoramento, frequentemente instalados em áreas contaminadas, uma vedação inadequada pode permitir infiltração superficial, contaminação cruzada entre aquíferos e distorções nos dados hidrodinâmicos e na qualidade das amostras de água subterrâneas.

Resíduos de perfuração nunca devem ser usados como materiais de vedação anelar em poços de monitoramento, pois o despejo irregular desse material no espaço anelar forma pontes e lacunas, comprometendo a eficiência da vedação. Além disso, esses resíduos podem conter contaminantes que alteram a composição química da água amostrada (Nielsen, 2005).

Outro elemento de vedação é a proteção sanitária do poço que visa bloquear acesso não autorizado e impedir a entrada de água superficial no espaço anelar e no interior do revestimento (Aller, 1991; Nielsen, 2005; ABNT, 2007). Independentemente do tipo de proteção sanitária, uma vedação superficial de argamassa ou concreto deve envolver o revestimento e preencher o espaço anelar junto à superfície, podendo ser uma extensão da vedação anelar ou uma selagem separada.

3.4. Método de perfuração

O método de perfuração para instalação de poços de monitoramento depende dos materiais locais (geologia e solos) e dos objetivos do programa de monitoramento (Aller, 1991; Nielsen, 2005; ABNT, 2007).

Aller (1991) descreve os métodos de perfurações mais comuns para construções de poços de monitoramento e discute as aplicações e limitações de cada técnica. Também é apresentada nesse manual uma matriz para ajudar a determinar, a partir de condições hidrogeológicas e dos objetivos do programa de monitoramento, o método de perfuração e a configuração mais apropriada. Em Nielsen (2005), os métodos de perfuração são agrupados em duas categorias: os métodos que não utilizam um meio de circulação para transportar os detritos de perfuração para a superfície e os métodos que utilizam um meio de circulação.

Segundo ABNT (2007), deve ser evitada a utilização de água ou fluidos de perfuração durante a perfuração. No entanto, quando o uso for inevitável, o fluido deve ser removido durante o processo de desenvolvimento do poço de forma a impactar o mínimo possível a qualidade das amostras de água subterrânea obtidas nos programas de monitoramento. Para se evitar o uso de lamas de perfuração, pode-se utilizar tubos de manobra nas porções inconsolidadas da seção perfurada.

A escolha do método de perfuração também é influenciada pela bitola de abertura do conduto, que por sua vez deve ser definida pelo diâmetro do revestimento, pela disponibilidade de materiais de construção do poço; pelos equipamentos a serem introduzidos no interior do poço; pelo volume de água necessário de amostras; e pelo objetivo do programa de amostragem (ABNT, 2007).

A seleção do método de perfuração para investigações ambientais depende da profundidade final da obra. Para situações de poços muito profundos, com elevada produção de água, o método roto-pneumático apresenta limitação, sendo adotado o método percussivo ou rotativo.

A necessidade de reabertura do poço antes da instalação da coluna de revestimento-filtro deveria ser uma ação compulsória, contudo, é comum se observar poços em que o revestimento foi instalado sem o alargamento do diâmetro. Essa inconsistência acarreta no revestimento insuficiente, com risco de queda da seção abaixo do revestimento e produção de amostras de água com elevada turbidez.

3.5. Desenvolvimento do poço

De acordo com Aller (1991), o poço de monitoramento deve funcionar como uma “janela transparente” para o aquífero, permitindo a coleta de amostras representativas da água subterrânea, realização de ensaios hidráulicos e medição de níveis de água. Para isso, é necessário realizar o desenvolvimento adequado do poço. Apesar, dessa etapa do processo de construção não ser realizada habitualmente ou realizada de forma insuficiente (ABNT, 2008).

O desenvolvimento do poço de monitoramento tem como objetivo: remover materiais finos (silte, argila, areia fina) da formação; corrigir danos à formação geológica (entupimentos dos poros da formação, colmatção da parede do furo ou compactação do furo), causados durante a perfuração; estabilizar o material da formação e do pré-filtro; remover os materiais de granulação fina do pré-filtro; e maximizar a comunicação hidráulica entre o poço e o material da formação geológica adjacente (Nielson, 2005; ABNT, 2008).

De acordo Nielson (2005), a seleção do método apropriado, ou combinações de métodos, para o desenvolvimento de um poço de monitoramento deve considerar os seguintes fatores: 1) método de perfuração e instalação; 2) condição na parte inferior do revestimento do poço (se aberto ou vedado); 3) diâmetro do revestimento e do filtro; 4) comprimento do filtro, tamanho das fendas (ranhuras) e percentual da área aberta; 5) profundidade do nível estático da água; 6) altura da coluna de água dentro do poço; 7) presença, tipo e espessura do pré-filtro; 8) característica e condutividade hidráulica da formação natural; 9) acessibilidade ao local; 10) tipo de pessoal para realizar o desenvolvimento; 11) tipo de equipamento disponível; 12) tipo de contaminantes presentes (suspeitos ou conhecidos); 13) necessidade de disposição adequada da água descarregada; 14) tempo disponível e custo; 15) efetividade dos métodos; 16) requisitos de saúde e segurança para a equipe de campo; e 17) aprovação da agência reguladora apropriada dos métodos selecionados.

Apesar de ser uma etapa fundamental no âmbito das obras de poços, é raro que poços de monitoramento sejam submetidos ao desenvolvimento. A ausência deste serviço resulta na produção de amostras de água com elevado grau de turbidez, mesmo depois de longos períodos após a construção e estabilização do poço.

3.6. Ensaios hidráulicos

Os ensaios hidráulicos mais comumente realizados em poços de monitoramento hidrogeológico incluem: teste de aquífero, teste de produção, ensaios do tipo *slug & bail test* e ensaios de perda d'água sob pressão (com ou sem obturadores).

A execução do teste de produção consiste no bombeamento e registro da evolução dos rebaixamentos no próprio poço bombeado, realizado de forma contínua, ou em intervalos com aumento da vazão (sucessivos ou escalonados). Este tipo de teste é útil para a determinação de parâmetros aplicados à gestão, incluindo: vazão ideal de bombeamento (a partir da equação característica do poço), perdas de cargas hidráulicas, eficiência hidráulica do poço, além de parâmetros aplicados a outorga (capacidade específica, tempo de recuperação, entre outros).

No teste de aquífero, o bombeamento é feito em um poço e a evolução do rebaixamento é preferencialmente medida em um poço de observação distante do poço bombeado. A superposição das curvas experimentais de rebaixamentos (curvas de campo) com as curvas teóricas permite obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero. Os parâmetros estimados são: coeficiente de armazenamento e transmissividade. A partir da transmissividade é possível se obter a condutividade hidráulica. A vazão de estabilização é aquela registrada na etapa final de execução do teste (Feitosa *et al.*, 2008).

Segundo Feitosa *et al.* (2008) os parâmetros hidrodinâmicos são válidos para regime laminar de fluxo subterrâneo em meio intergranular. Entretanto, os métodos e conceitos dos diferentes parâmetros podem ser adaptados para

diferentes meios, sendo que atualmente já existem softwares comerciais com adaptações para aquíferos fraturados, cársticos e de dupla porosidade.

No poço bombeado, é possível monitorar a recuperação do nível da água até que atinja o nível estático inicial (teste de recuperação), sendo os dados de recuperação mais confiáveis que os de rebaixamento, pois, segundo Fetter e Kreamer (2022), os dados de rebaixamento podem ser afetados por rebaixamentos rápidos ou variações na taxa de bombeamento, enquanto a recuperação não sofre essas interferências.

Poços de monitoramento com tubo de revestimento de pequeno diâmetro, utilizados principalmente para amostragem da água subterrânea ou medição de carga hidráulica, também podem ser empregados para determinar a condutividade hidráulica da formação pelos ensaios do tipo *slug & bail test*, que consistem na adição ou remoção instantânea de um volume de água para gerar uma variação de carga, registrando a recuperação do nível ao longo do tempo. Esses ensaios permitem estimar a condutividade hidráulica na região próxima ao poço, geralmente representativa do aquífero na seção onde os filtros estão instalados (Fetter e Kreamer, 2022). Para que os valores obtidos sejam representativos é necessário que um número significativo de testes seja realizado.

Segundo Feitosa *et al.* (2008), a escolha do local para realizar um teste de bombeamento deve garantir que os dados obtidos sejam regionalmente representativos, considerando aspectos hidrogeológicos, econômicos e operacionais. Do ponto de vista hidrogeológico, recomenda-se que o aquífero seja o mais homogêneo possível, sem barreiras impermeáveis ou permeáveis próximas (ou que sejam bem definidas), que o fluxo natural tenha gradientes significativamente menores que os induzidos pelo bombeamento na área de observação, e que a geologia superficial e subsuperficial da região seja bem conhecida. O poço deve estar totalmente desenvolvido antes que os testes de bombeamento sejam iniciados (Fetter e Kreamer, 2022).

3.7. Relatório final dos poços de monitoramento

Por fim, deve ser elaborado um documento, no formato de relatório final, contendo informações sobre: caracterização geomorfológica, pedológica, geológica e hidrogeológica da área de estudo, mapas potenciométricos com a rede de fluxos, seções de investigações geofísicas, modelo conceitual do aquífero, coordenadas UTM dos poços, registro de perfuração, descrição das amostras de calhas, ensaios granulométricos, perfil construtivo dos poços, perfil litoestratigráfico, método de desenvolvimento do poço, tipos de ensaios hidráulicos realizados, parâmetros hidrodinâmicos calculados, valores de *background* dos parâmetros hidrogeoquímicos e leituras de níveis de água (nível estático e dinâmico).

Ainda quando disponíveis, o relatório deve trazer dados de: perfilagem geofísica e ótica do poço, localização e descrição de fontes pretéritas de contaminação, procedimentos de manutenção e de descomissionamento do poço, entre outras informações importantes para o programa de monitoramento hidrogeológico.

As normas técnicas e manuais especializados preconizam que ao final das obras sejam produzidos relatórios contendo as informações anteriormente enumeradas (ABNT, 2007; Nielsen, 2005). No entanto, os órgãos de licenciamento não exigem ou exigem de forma simplificada em seus termos de referência (IBAMA, 2021) este tipo de documento. Além disso, as próprias empresas responsáveis pela construção dos poços frequentemente deixam de elaborar relatórios adequados, muitas vezes omitindo informações mínimas necessárias.

4. APLICAÇÕES ESPECÍFICAS DOS POÇOS NA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO

Antes de instalar um poço ou sistema de monitoramento por poços, é importante estabelecer os objetivos do estudo que, por conseguinte, definirão os parâmetros de projeto, incluindo diâmetro de perfuração e de revestimento, tipo de revestimento e filtro, abertura, comprimento e posicionamento da seção de filtro, granulometria e material do pré-filtro, material aplicado ao isolamento de seções, além dos demais materiais necessários à conclusão da obra (Nielsen, 2005).

Um aspecto fundamental para todas as modalidades de poços é que a estrutura alcance a zona saturada do aquífero e permita a presença de água no interior do poço, pois esta será a fonte da amostragem, interface para medição do nível de água, matriz para os ensaios ou o próprio recurso hídrico a ser utilizado.

Apesar de ser uma premissa básica, não é raro que poços de monitoramento não apresentem funcionalidade por todo o ciclo hidrológico, pois não tiveram penetração suficiente na zona saturada. Nestes casos, quando o nível rebaixa nos períodos mais secos do ano, o poço não permite a medição de níveis de água e a coleta de amostras. Assim, é primordial que os poços de monitoramento, mesmo que sejam para estudos da porção mais superior da zona saturada, tenham a máxima penetração na zona saturada do aquífero, para que sejam funcionais mesmo nos anos hidrológicos mais críticos.

4.1. Poços para caracterização hidrodinâmica dos aquíferos

Os poços construídos para caracterizar a hidrodinâmica dos aquíferos e confeccionar modelos conceituais robustos devem permitir a realização de ensaios hidráulicos e, assim, fornecer dados de rebaixamento e recuperação do nível da água utilizados para os cálculos de diferentes parâmetros, incluindo a carga hidráulica, condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento.

Com os parâmetros do aquífero é possível analisar o fluxo subterrâneo, obter a capacidade de armazenamento, estimar os valores de vazões para captação de água, prever o comportamento de plumas de contaminação, corrigir e aprimorar o modelo conceitual, fornecer dados para elaboração do modelo numérico do aquífero, entre outras aplicações.

A geração de dados a partir de ensaios hidráulicos em associação com informações sobre estruturas geológicas (plano de acamamento, fraturas, falhas, lineamentos etc.), características dos solos, relevo, clima e investigações geofísicas permite propor o modelo conceitual hidrogeológico, entre outras informações sobre o fluxo subterrâneo no aquífero.

A configuração dos elementos construtivos (diâmetro do revestimento e do filtro) deve permitir a introdução de equipamentos para execução dos ensaios hidráulicos. O diâmetro mínimo de 4", é recomendado pois permite o uso de equipamentos para a realização de diferentes tipos de ensaios hidráulicos. O conjunto filtro e pré-filtro deve ser dimensionado de tal maneira que não ocasione o fluxo turbulento durante os ensaios hidráulicos.

Para situações em que há espesso manto de intemperismo sobre rochas cristalinas (o que é comum em áreas de mineração no Brasil), em cada ponto em que se pretende obter dados, é recomendado instalar pares de poços (próximo entre si), com configurações distintas (Figura 2). O poço raso é necessário para caracterizar o aquífero freático vinculado ao regolito (solo e saprolito) e o poço profundo para caracterizar o aquífero hospedado em rocha sã.

A construção desses poços deve seguir roteiros distintos: i) o poço raso deve ter perfuração até o topo rochoso e posterior conclusão da obra com instalação da seção de revestimento-filtro, pré-filtro, isolamento, concretagem e finalização da obra; ii) o poço profundo deve ser construído em dois estágios: perfuração até o topo rochoso, introdução do revestimento e concretagem de todo o espaço anelar. Posteriormente após a cura do concreto e estabilização da seção superior, o poço deve ser perfurado em rocha até a profundidade necessária.

A quantidade de pares de poços distribuídos na área de estudo depende da descrição prévia dos materiais (tipos e espessuras dos solos, grau de fraturamento das rochas, relevo e outros quesitos). Em aquífero heterogêneo, uma malha mais densa de pares de poços permite distinguir diferenças e não generalizar as informações para todo o aquífero.

Alternativa viável para se gerar parâmetros hidráulicos de aquíferos é o uso de furos de sondagens para a pesquisa mineral ou para caracterização geotécnica. Na fase de pesquisa mineral e de caracterização da estabilidade de taludes é necessário perfurar um grande número de furos com testemunhagem contínua (para definição de teores de minério, realização de testes metalúrgicos, análises mineralógicas, determinação de feições geotécnica - exemplo: *Rock Quality Designation* - RQD, dentre outros). Nos casos em que estas sondagens são verticais ou com inclinação maior que 60°, testes hidráulicos podem ser realizados para a obtenção de dados hidráulicos do aquífero.

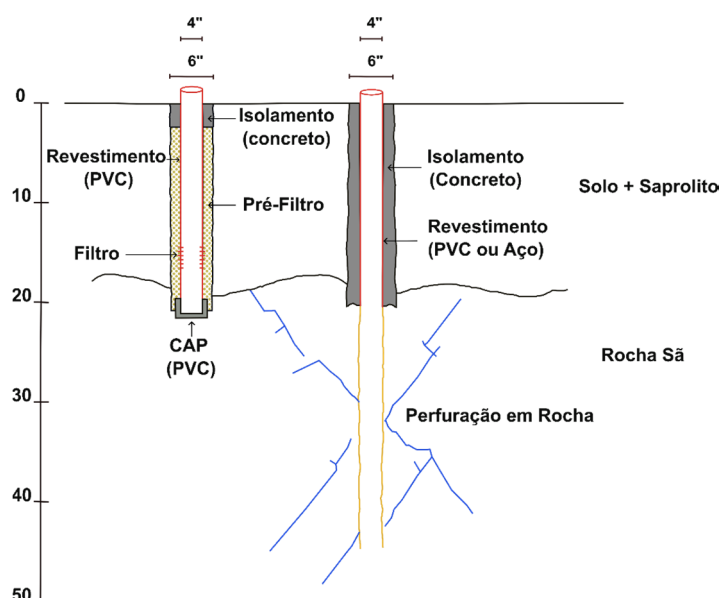


Figura 2. Projetos construtivos do par de poços para caracterização hidrocinâmica de aquíferos sobrepostos. Reservatório superior tipo intergranular não consolidado e aquífero inferior fraturados vinculado a rocha sã.

Dentre os tipos de avaliações mais realizados destacam-se o teste de bombeamento, ensaios de perda d'água (com ou sem obturadores) e os testes do grupo de "slug & bail test".

4.2. Poços para caracterização hidrogeoquímica e classificação química das águas

Esses poços têm como finalidade obter valores de concentração de elementos químicos e os parâmetros físicos da água subterrânea para estabelecer o *background* geoquímico e classificação das águas subterrâneas (Custódio e Llamas, 1983; Appelo e Postma, 2005; Feitosa et al., 2008).

Esses poços devem ser locados tanto em áreas que serão afetadas pela mineração, como em área que não serão afetadas pela mineração. Assim, os dados de monitoramentos adquiridos nas áreas não afetadas pela mineração podem ser utilizados como referências para avaliar o impacto potencial na qualidade da água subterrânea gerado pelo desenvolvimento das atividades da mineração.

Para se evitar interferências em valores de *background* e de *baseline* hidrogeoquímicos, poços de monitoramento devem ser locados em pontos distantes de fontes de contaminação existentes, geralmente a montante do fluxo, as quais devem ser identificadas na fase de investigação preliminar.

Para locais em que há sobreposição de aquíferos (intergranulares sobre sistemas fraturados), também é recomendado que os poços sejam instalados em pares e com configurações distintas (Figura 2). A não adoção desta diretriz pode resultar em diferentes proporções de misturas de águas e dificuldade de interpretação dos resultados analíticos (Rodrigues; Campos, 2024).

Especificamente para poços de monitoramento ambiental, é necessária atenção especial aos materiais selecionados para as obras, que precisam ser inertes para não disponibilizar substâncias químicas que alterem a composição hidroquímica natural da água analisada.

Para se ter maior possibilidade de interpretações, deve-se prever a instalação de no mínimo, um par de poços entre a área de recarga e de descarga, em locais representativo do aquífero e com máxima conexão hidráulica lateral. Esta prática poderá permitir avaliação da evolução hidrogeoquímica das águas subterrâneas e para classificar o fluxo hidrogeológico em termos de sistema local, intermediário ou regional.

Além da classificação hidroquímica das águas, a locação adequada dos poços de monitoramento também permitirá estudos de eventuais cargas de contaminação. A partir de poços bem distribuídos nos sítios de influência da mineração e áreas de apoio, será possível definir diferentes fontes de contaminação, estudar mecanismos de

diluição de plumas, obter parâmetros de dispersão lateral e longitudinal da pluma, e propor medidas mitigatórias e restauradoras.

Poços que tenham como objetivos estudos hidroquímicos (mesmo que não exclusivos para esta finalidade) devem ter ampla preocupação na descrição do perfil pedo-geológico, pois a composição química natural da água é resultado da sua interação com os minerais do arcabouço do reservatório. Neste sentido, é importante destacar, o grau de alteração dos minerais, estabilidade química, possíveis equilíbrios devidos às relações de concentração, pH e potencial de óxido-redução e possibilidade de precipitação de fases minerais.

4.3. Poços para monitoramento ambiental

O poço para monitoramento ambiental tem como finalidade avaliar as alterações na qualidade da água subterrânea ocasionada pelas atividades antrópicas, e no caso destes estudos, especificamente pela mineração que inclui desde a exploração e lavra do minério, seu processamento ou pré-processamento, bem como as áreas de apoio (oficinas, refeitórios, alojamentos etc.).

As estruturas/instalações e atividades com maior potencial de contaminação em área de mineração incluem: terminais de combustível, pilha de estéril, pilha de rejeito, pilha de estocagem de minério, pilha de lixiviação, planta química, oficinas, efluentes de refeitórios e alojamentos, bacia de decantação, *ponds*, entre outras.

A locação do poço de monitoramento e a configuração dos elementos construtivos dependem da estrutura/instalação e atividade desenvolvida no âmbito da mineração investigada, do tipo de fonte potencial de contaminação e do meio físico local (tipo de aquífero, relevo, clima e demais condicionantes).

O tipo e comportamento do contaminante ou da substância química avaliada deve ser considerado para locação do poço e para escolha e configuração dos elementos construtivos dos poços. Por exemplo: i) poços que pretendem monitorar contaminação por metais pesados ou outras substâncias que gerem plumas densas e relativamente solúveis podem ter seção de filtro curta instalada a maiores profundidades; ii) poços para monitoramento de áreas de armazenamento de combustíveis deve ter seção de filtro mais rasas, uma vez que pretendem avaliar potencial contaminante pouco solúvel em água e de baixa densidade.

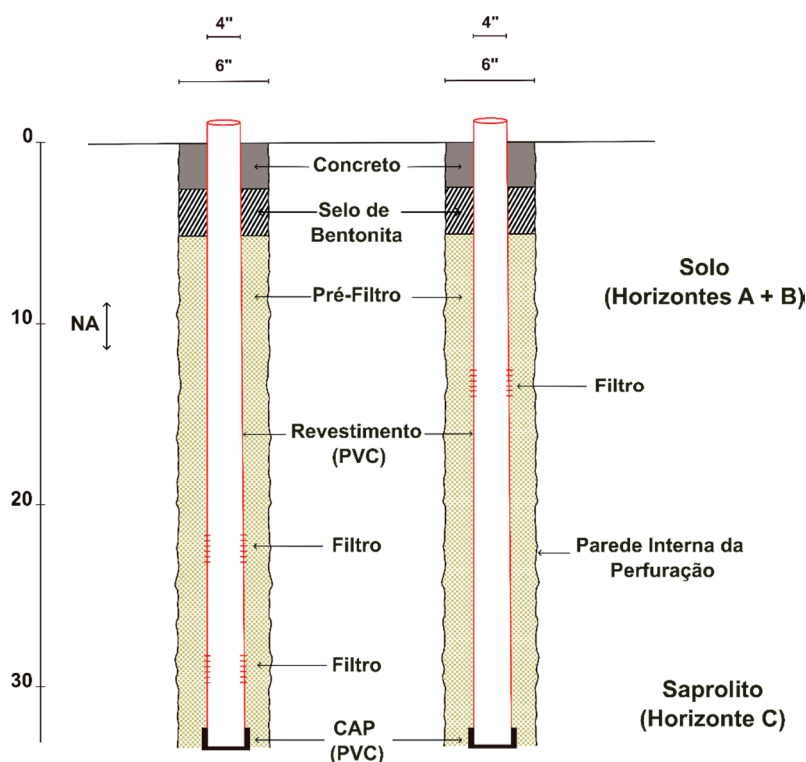


Figura 3. Modelos de projetos construtivos de par de poços para monitoramento ambiental de diferentes plumas contaminantes com distintas propriedades físico-químicas (densidade, miscibilidade em água, polaridade das moléculas e demais características).

A Figura 3 apresenta a configuração de poços de monitoramento ambiental para diferentes contaminantes potenciais. Um poço com a seção de filtro em posição mais profunda e um poço com seção de filtro em porção mais próxima ao topo da zona saturada do aquífero. Assim, é possível monitorar contaminantes de diferentes densidades e miscibilidades com relação à água.

De maneira geral, os poços devem ser locados a jusante da possível fonte de contaminação, conforme análise da rede de fluxo de água subterrânea e outras informações do modelo conceitual. Por outro lado, pelo menos, um poço deve ser locado a montante da fonte avaliada para fornecer valores de referência e aferir se há inversão de fluxo, devido a possíveis alterações de valores do gradiente hidráulico ou cones de depressão vinculados a poços de rebaixamento ou de produção de água.

Em função do objetivo do monitoramento ambiental devem ser avaliados outras configurações de poços individuais com profundidades distintas ou poços multiníveis (com diferentes profundidades das seções de filtros e isolamento) para avaliar tipos de contaminantes específicos.

4.4. Poços para monitoramento da superfície potenciométrica

O monitoramento da flutuação da superfície potenciométrica, serve a dois objetivos principais: i) avaliar a flutuação sazonal natural, o que em última análise permitirá determinar a recarga do aquífero e ii) avaliar o rebaixamento necessário para permitir o avanço da lavra, e suas relações com corpos hídricos superficiais (nascentes, córregos e áreas úmidas).

Os poços de monitoramento, com a finalidade de avaliar o rebaixamento do nível de água do aquífero (fase de operação da lavra) ou sua ascensão (desativação da mina), devem ser locados no entorno da cava ou das galerias subterrâneas para avaliar a extensão do efeito do rebaixamento da zona saturada para atender ao desaguamento da mina e se há interferência nas vazões de nascentes e cursos d'água em áreas adjacentes.

Preferencialmente, estes poços não devem ser locados no interior da área a ser lavrada, que são considerados locais inadequados pois, posteriormente, serão interceptados pelo avanço de lavra, interrompendo a funcionalidade do poço e o monitoramento.

A seção perfurada em solo e em material friável deve ter revestimento, filtro e pré-filtro em toda sua extensão. A porção perfurada em rocha sã deve ter todas as entradas de água descritas e caracterizadas em termos de contribuição do volume de água ao poço, uma vez que o objetivo dessa estrutura é monitorar a variação global do nível de água, devido ao rebaixamento.

Poços de monitoramento da flutuação sazonal natural devem considerar a eventual presença de aquíferos suspensos, sobrepostos ou existência de confinamento. Nestes casos, desenhos específicos de projetos dos poços devem ser considerados.

Para que seja possível realizar ensaios hidráulicos e coletas de amostras de água nesses poços, o diâmetro do revestimento recomendado é de 4 polegadas. A profundidade dos poços que objetivam avaliar o comportamento do rebaixamento deve considerar a penetração total até a previsão final da cava.

Os poços devem permanecer ativos durante todo tempo de atividade da lavra e na fase de descomissionamento para validação de alterações potenciais dos parâmetros hidrodinâmicos com o decorrer da atividade minerária e para avaliar se as medidas mitigadoras e de controle adotadas serão eficazes. Assim, todos os materiais que compõem o poço precisam ter resistência física e química para não se deteriorarem durante o desenvolvimento do programa de monitoramento hidrogeológico.

4.5. Poços para rebaixamento da zona saturada

Esses poços têm como finalidade rebaixar a zona satura e auxiliar o desaguamento da cava da mina, feito normalmente pelo bombeamento da água acumulada em *sumps*, com uso de poços de grande vazão, drenos laterais ou com a associação conjunta dessas estruturas.

Estes poços têm o objetivo de sobrexplotar localmente o aquífero e, por isso, devem apresentar elevadas vazões. Para tanto, requerem locação específica próximo a área da cava e elementos de projeto construtivo configurados de tal maneira que permitam a extração máxima de água.

A locação destes poços deve combinar técnicas de análises de lineamentos estruturais e estudos geofísicos, principalmente em meios fraturados de zonas hidrotermais ou com ocorrência de sedimentos químicos ou manto de intemperismo muito espesso (como é o caso de minério de ferro).

Os projetos construtivos devem considerar aspectos como: grandes diâmetros (com revestimentos de até 12" para acomodar bombas de alta vazão), amplas seções de filtros (para situações de grande espessura de material inconsolidado) e instalação de sistemas de bombeamento para grandes volumes.

Quando a opção do deságue for exclusivamente a partir de poços tubulares, sua profundidade deve ser compatível com a cota inferior do projeto final de evolução da cava (Figura 4).

O isolamento da porção próxima a superfície deve ser eficiente para evitar infiltração do escoamento superficial através do espaço anelar entre a parede de perfuração e a parte externa do revestimento do poço.

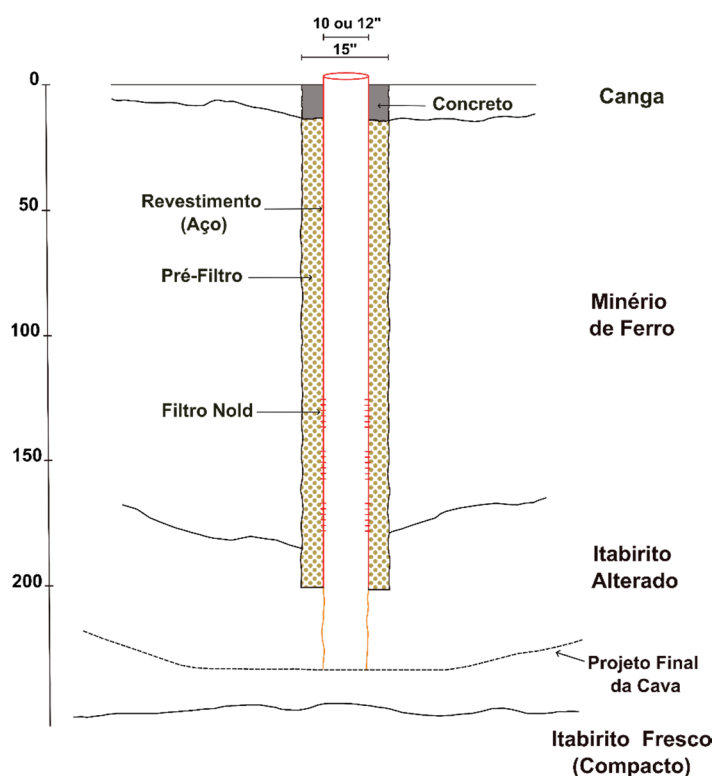


Figura 4. Exemplo de projeto construtivo do poço para rebaixamento da zona saturada e viabilização da extração do minério.

4.6. Poços para produção primária de água

Essa modalidade de poço tem como finalidade fornecer água para abastecimento humano ou para processos produtivos (hidrometalúrgico, lavagem de minério, pilhas de lixiviação, entre outros usos no complexo minero-industrial).

Estes poços têm estruturas construtivas similares aos poços de abastecimento convencionais, mas devem ter maior preocupação com a proteção sanitária, pois comumente são instalados em locais com elevado risco a contaminação do aquífero.

O diâmetro da seção de revestimento-filtro em geral deve ser de 6 ou 8 polegadas, profundidades compatíveis com a demanda de água e com sistema automático de acionamento do sistema de bombeamento.

Situações de poços de produção instalados em locais com mantos de intemperismo muito espesso ou em rochas sedimentares pouco litificados, há necessidade de revestimento integral ou de grande parte da porção perfurada. É importante ter maior seção de filtro possível na zona saturada, entre o nível dinâmico e a parte inferior do poço, de forma a se para captar o maior volume de água da formação aquífera (Figura 5). Nas seções perfuradas em materiais resistentes ou litificados, o poço deve ser mantido diretamente em rocha para ampliar sua produção.

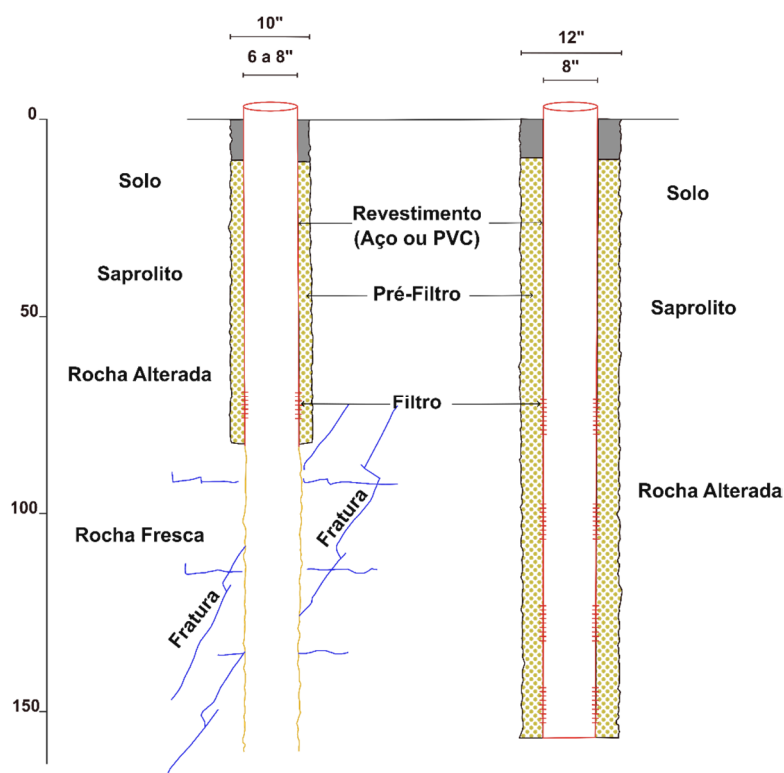


Figura 5. Projetos construtivos de poços para produção primária de água, para uso potável ou em processos. Primeiro caso para situações com regolito pouco espesso. Segundo caso para condição de espesso manto de intemperismo em bacias sedimentar.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração é uma atividade econômica com potenciais impactos ambientais desde a fase de pesquisa mineral, mesmo que com menor relevância, até etapas posteriores como a extração, o transporte e beneficiamento mineral, onde os impactos tendem a apresentar maior significância e magnitude. Nesse contexto, a sustentabilidade ambiental dessa atividade perpassa por investimentos consistentes em controle e monitoramento ambiental (IBRAM, 1992).

Embora existam normas técnicas, manuais e guias que orientam a implantação de poços de monitoramento e multifinalitários no âmbito do licenciamento ambiental, ainda persistem lacunas significativas, as quais foram identificadas e discutidas ao longo deste trabalho. A adoção de poços inadequados compromete a qualidade dos dados gerados, prejudicando desde a caracterização dos aquíferos até a interpretação dos resultados hidrogeoquímicos, os quais podem apresentar vieses ou incertezas de difícil correção.

Uma vez instalado, o poço de monitoramento torna-se uma estrutura de difícil modificação na sua configuração ou substituição de seus componentes, restringindo-se a pequenos reparos. Por isso, é fundamental que sua locação e execução do seu projeto construtivo atendam à sua finalidade planejada, garantindo a obtenção de dados assertivos e confiáveis, que representem o aquífero e a água subterrânea armazenada, bem como eventuais modificações decorrentes da atividade minerária.

Como as empresas mineradoras, em sua maioria, não dispõem de conhecimento técnico específico nem de equipamentos para a construção de poços, é comum a contratação de empresas especializadas.

Nesse sentido, torna-se essencial que todas as diretrizes técnicas estejam claramente descritas nos termos de referência para aquisição dos serviços. Ressalta-se, contudo, a escassez no mercado brasileiro de empresas especializadas em poços de monitoramento, sendo mais frequente encontrar empresas voltadas à perfuração de poços para abastecimento público.

Dada a elevada complexidade e o alto custo das ações de remediação de ambientes subterrâneos contaminados, torna-se estratégico que a locação e o projeto dos poços sejam embasados em conhecimentos técnico-científicos atualizados e na experiência de profissionais qualificados, especialmente hidrogeólogos com atuação em perfuração e instrumentação de poços de monitoramento. Isso assegura a confiabilidade e a eficácia das estruturas hidráulicas.

Poços corretamente projetados e instalados são instrumentos essenciais para a detecção precoce de contaminações, contribuindo para a economia de tempo e recursos durante eventuais processos de remediação e evitando a propagação da pluma contaminante no aquífero (Nielsen, 2005).

A adoção de diâmetro mínimo de 4 polegadas é recomendada, pois viabiliza tanto o desenvolvimento adequado do poço quanto a instalação de instrumentos como bombas, medidores automáticos de nível, fluxímetros e fluorímetros. Em contrapartida, o uso de poços com revestimento de 2 polegadas, ainda comum em programas de monitoramento no Brasil, deve ser desestimulado, por limitar as possibilidades de desenvolvimento e limpeza, comprometer a realização de ensaios hidráulicos e restringir a instrumentação.

Finalmente, destaca-se a possibilidade do uso de furos de sondagem verticalizados, originalmente destinados à pesquisa mineral ou geotécnica, como estruturas temporárias para coleta de dados hidráulicos (teste tipo *slug*) e para a medição de nível d'água. Contudo, o uso desses furos requer avaliação criteriosa quanto à sua integridade e adequação à finalidade pretendida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. *NBR 15495-1: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados. Parte 1: Projeto e construção*. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 25 p.
- ABNT. *NBR 15495-2: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados. Parte 2: Desenvolvimento*. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 25 p.
- ABNT. *NBR 15847: Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento - métodos de purga*. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 15 p.
- PILAR, C.V.; HIRATA, R.A.; ALBUQUERQUE, J.L.; CARVALHO, A.M. (Orgs). *As águas subterrâneas na política nacional de recursos hídricos*. Brasília: ANA, 2022. 220 p.
- ANASB. *Perspectivas e avanços da gestão de recursos hídricos na mineração*. Brasília: ANA; IBRAM, 2024. 306 p. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v16i1.1304>
- ALLER, L. *Handbook of suggested practices for the design and installation of groundwater monitoring wells*. Washington: US Environmental Protection Agency – US EPA, 1991.
- APPELO, C. A.; POSTMA, D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2 ed. London: CRC Press, 2005. 683 p.
- ASTM. *Standard Practice for Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells (ASTM Standard D 5092)*. PA: ASTM, 2004. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/mnl65201211106>
- AZEVEDO, J. H. *Fluxos subterrâneos e recarga do sistema aquífero Alter do Chão em lateritos amazônicos: estudo de caso em Porto Trombetas, Pará*. 2019. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019. DOI: <https://doi.org/10.28998/rm.2024.n.16.18028>
- BARCELONA, M. J.; GIBB, J. P.; HELFRICH, J. A.; GARSKE, E. E. *A practical guide for ground-water sampling*. ISWS Contract Report #374, Illinois Department of Energy and Natural Resources, Water Survey Division, Champaign, IL, 1985a. 95 p.

- BICHUETI, R.; MADRUGA, L.; GOMES, C.; ROSA, L. O uso da água na mineração: uma análise da produção científica internacional. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 3, n. 2, p. 58–73, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5585/geas.v3i2.129>
- BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 set. 1981. Seção 1, p. 123. DOI: <https://doi.org/10.5102/pic.n0.2020.8177>
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 123. DOI: <https://doi.org/10.64568/rbinf.v10i19.1047>
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama nº 01, de 23 de janeiro de 1986. *Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental*. DOI: <https://doi.org/10.29327/15304.17-155724>
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama nº 396, de 3 de abril de 2008. *Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências*. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v23i1.12780>
- CAMPBELL, M. D.; LEHR, J. H. *Water well technology*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1973. 681 p.
- CAMPOS, J. E. G.; XAVIER, T. O.; FREITAS-SILVA, F. H. F. Registros de atividade neotectônica no Distrito Federal. *Geociências*, v. 35, n. 2, p. 203–219, 2016.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, R. M. *Hidrologia subterrânea*. 2 ed. Barcelona: Omega, 1983. 2350 p.
- DRISCOLL, F. G. *Groundwater and wells*. 2 ed. St. Paul, Minnesota: [s.n.], 1986. 1089 p.
- FABIANOVICZ, R. *Avaliação do emprego de baterias de poços em diagnósticos geoambientais: estudo de caso em área contaminada por benzeno*. 2008. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. DOI: <https://doi.org/10.52547/rbmb.10.2.314>
- FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (Orgs.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.
- FETTER, C. W.; KREAMER, D. *Applied hydrogeology*. 5 ed. Illinois: Waveland Press, 2022. 625 p.
- FORD, D.; WILLIAMS, P.W. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons, 2007. 562 p.
- GUNSON, A. J.; KLEIN, B.; VEIGA, M.; DUNBAR, S. Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, v. 21, n. 1, p. 71–82, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.020>
- IBAMA. Portaria nº 924, de 22 de abril de 2021. Estabelece a utilização do Procedimento Operacional Padrão nº 1, de 22 de abril de 2021. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.53071/jou-2021-11-19-6197d0d0d4537>
- IBRAM. *Mineração e meio ambiente*. Brasília: IBRAM, 1992. 72 p.
- LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 3, p. 407–414, 2005. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2005353407414>
- MCLELLAN, B. C.; CORDER, G. D.; GIURCO, D.; GREEN, S. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations – review and analysis of current approaches. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n. 16, p. 1414–1425, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.06.003>
- NIELSEN, D. M. *Practical handbook of environmental site characterization and groundwater monitoring*. 2 ed. [S.l.]: CRC Press, 2005. 1328 p.
- RODRIGUES, D. S.; CAMPOS, J. E. G. Amostragem em estudos hidroquímicos e isotópicos em águas subterrâneas: a importância do conhecimento dos perfis dos poços para a interpretação de dados. *Derbyana*, v. 45, p. 1–15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.69469/derb.v45.819>
- SÁNCHEZ, L. E. *Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos*. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, 529 p.

SÁNCHEZ, L. E.; SILVA-SÁNCHEZ, S. S.; NERI, A. C. *Guia para o planejamento do fechamento de mina*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2013. 224 p.

STRIGGOW, B. *Design and installation of monitoring wells*. Washington: US Environmental Protection Agency – US EPA, 2018.