

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

MATHEUS TOMIM TARTARI

Poços de monitoramento (instalação e construção) e implicações no diagnóstico
ambiental - Uma revisão.

São Paulo

2022

MATHEUS TOMIM TARTARI

Poços de monitoramento (instalação e construção) e implicações no diagnóstico ambiental - Uma revisão.

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do Certificado de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de *Brownfields*.

Orientador: MSc. Lélia Cristina da Rocha Soares

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Tartari, Matheus

Poços de monitoramento (instalação e construção) e implicações no diagnóstico ambiental – Uma revisão. / M. Tartari, L. Soares -- São Paulo, 2022.
34 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Poços (Monitoramento) 2.Construção 3.Caracterização Ambiental
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t. III.Soares, Lélia

RESUMO

Tartari, M. T.; Soares, L. C. R. Poços de monitoramento (instalação e construção) e implicações no diagnóstico ambiental – Uma Revisão. 2022. 33 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

O poço de monitoramento tem como principais objetivos a obtenção de amostras de água subterrânea para diagnóstico ambiental, bem como dados hidrogeológicos. Para tanto, é necessária uma adequada construção, que deve ser “dinâmica”, se adequando às diversas variáveis existentes no site, como a geologia, o orçamento, as Substâncias Químicas de Interesse (SQIs), etc. Sendo assim, para garantir resultados fidedignos no diagnóstico ambiental este trabalho visa, através de uma revisão bibliográfica, a compilação e a análise das melhores práticas na instalação/construção dos poços de monitoramento, com foco nas implicações ao diagnóstico ambiental. Para este trabalho, foram pesquisados artigos, livros, trabalhos acadêmicos e normas técnicas nacionais e internacionais referentes à construção de poços de monitoramento. Com relação ao método de perfuração, recomenda-se a utilização do método rotativo para sites com suspeita de contaminação de hidrocarbonetos e o método pneumático para sites com suspeita de contaminação inorgânica. Na maioria dos casos, as seções filtrantes dos poços de monitoramento devem ser posicionadas de forma a contemplar apenas uma única zona saturada de interesse por seção, devendo ser curtas, com no máximo 2 m, no entanto, empresas de sondagem no Brasil instalam seções filtrantes longas e/ou posicionadas em locais incorretos, gerando contaminações cruzadas. O pré-filtro necessariamente deve ser constituído de material inerte e homogêneo, com granulometria específica para a geologia do site, o que não é seguido no mercado, já que padroniza-se o material, assim propiciando perda de produtividade no poço e possibilidade de geração de turbidez nas amostras. O selo anular de bentonita necessita de especial atenção para evitar a formação de pontes e prejudicar o isolamento hidráulico do selo. Sua cura necessita de 1 a 2h e a calda de preenchimento do furo, de 8 a 48h, sendo algo desrespeitado no mercado, com a justificativa de “perda de tempo”, gerando contaminação cruzada a partir de outras zonas saturadas. Por último, o desenvolvimento do poço otimiza a condutividade hidráulica e remove os fluidos de perfuração utilizados, devendo ser iniciado após a instalação do pré-filtro, para em seguida ser instalado o selo anular e aguardado seu tempo de cura, e só então ser dado continuidade ao

desenvolvimento, o que não é seguido, gerando problemas estruturais no poço, como mencionado anteriormente.

Palavras-chave: Poços (Monitoramento); Construção; Caracterização Ambiental.

ABSTRACT

Tartari, M. T.; Soares, L. C. R. Monitoring wells (installation and construction) and implications for environmental diagnosis – Review. 2022. 33 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

The main objectives of the monitoring well are to obtain groundwater samples for environmental diagnosis, as well as hydrogeological data. Therefore, an adequate construction is necessary, which must be “dynamic”, adapting to the various variables existing on the site, such as geology, budget, Chemical Substances of Interest (SQIs), the purposes of the monitoring well, etc. Therefore, to ensure reliable results in the environmental diagnosis, this work aims, through a literature review, the compilation and analysis of best practices in the installation/construction of monitoring wells, focusing on the implications for the environmental diagnosis. For this work, articles, books, academic works and national and international technical standards regarding the construction of monitoring wells were researched. Regarding the drilling method, it is recommended to use the rotary method for sites with suspected hydrocarbon contamination and the pneumatic method for sites with suspected inorganic contamination. In most cases, the filter sections should be positioned in a way that only contemplates a single saturated zone of interest per section. They must be short, with a maximum of 2m, however, drilling companies in Brazil install long and/or incorrectly positioned filter sections, generating cross contamination. The pre-filter must necessarily consist of inert and homogeneous material, with specific granulometry for the geology of the site, which is not followed in the market, since the material is standardized, thus providing loss of productivity in the well and the possibility of generating turbidity in the samples. The bentonite annular seal needs special attention to avoid the formation of bridges and impair the seal's hydraulic isolation. Its curing requires 1 to 2 hours and the hole filling solution, from 8 to 48 hours, being something disrespected in the market, with the justification of “wasting time”, generating cross-contamination from other saturated zones. Finally, the development of the well optimizes the hydraulic conductivity and removes used drilling fluids. Development must start after installing the pre-filter, then install the annular seal and wait for its curing time, and only then proceed with the development, which is not followed, generating structural problems in the well, such as mentioned before.

Keywords: Wells (Monitoring); Construction; Environmental Characterization.

Sumário

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS	10
3. POÇOS DE MONITORAMENTO	11
3.1. Instalação e Construção de Poços de Monitoramento em Aquíferos Granulares.....	11
3.1.1. Estrutura de poços de monitoramento.....	11
3.1.2. Métodos de perfuração.....	13
3.1.3. Revestimento	15
3.1.4. Pré-filtro	19
3.1.5. Selo anular.....	22
3.1.6. Proteção de superfície	24
3.1.7. Registros.....	24
3.2. Desenvolvimento de Poços de Monitoramento em Aquíferos Granulares	25
4. CONCLUSÕES.....	29
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O diagnóstico ambiental da água subterrânea envolve a coleta, a análise laboratorial das amostras e a interpretação dos resultados obtidos em laudo técnico. Uma amostra de água subterrânea fidedigna deve, obrigatoriamente, representar grande parte, senão a totalidade, das condições físico-químicas e microbiológicas encontradas na zona aquífera. A coleta desta água sem modificar tais condições é uma tarefa complexa, realizada através de poços tubulares, como poços de monitoramento. Por sua vez, poços de monitoramento são estruturas de engenharia capazes de promover o acesso direto da superfície à zona aquífera, permitindo a obtenção de amostras de água subterrânea, bem como dados hidrogeológicos, como o nível freático e a condutividade hidráulica do aquífero (NIELSEN, 2005).

No entanto, para um poço de monitoramento ser capaz de desempenhar tais funções ele precisa ser adequadamente construído, o que pode ser uma tarefa complexa, haja vista que seu projeto construtivo depende de muitas variáveis, como o objetivo principal do poço e as condições geológicas, hidrogeológicas, geoquímicas e microbiológicas do site (ALLER et. al., 1991).

Um poço de monitoramento adequadamente projetado deve contemplar e relacionar as variáveis: i) a geologia do site com o revestimento a ser utilizado, com a locação do poço e com os métodos de perfuração apropriados; ii) a hidrogeologia com a definição das zonas de monitoramento a serem amostradas, as dimensões das seções filtrantes e as características principais dos materiais a serem aplicados na seção filtrante, como o pré-filtro e o tubo-filtro; iii) a geoquímica do site com os tipos de materiais a serem aplicados nos componentes principais do poço, como os tubos de revestimento e o selo anular, bem como a definição das zonas de monitoramento, caso haja suspeita de contaminação por NAPLs (*Non-Aqueous Phase Liquid* – Líquidos de fase não aquosa); iv) as condições microbiológicas com os tipos de materiais a serem utilizados no tubo de revestimento, para se evitar a corrosão através de ferrobactérias (BARCELONA et. al., 1983; FREEZE e CHERRY, 1989; NSF, 2004; NIELSEN, 2005; ABNT, 2009; *Department of Environment of Yukon*, 2019).

O poço de monitoramento também pode ter seu projeto construtivo alterado a depender de qual é o objetivo principal. Se o propósito do poço é a coleta de amostras representativas de água subterrânea, os materiais utilizados na construção do poço não podem interagir quimicamente com a água subterrânea nem com os possíveis contaminantes do subsolo (NIELSEN, 2005). Caso o objetivo do poço seja a definição e o monitoramento da pluma de

contaminação, as dimensões das seções filtrantes devem ser curtas o suficiente para a entrada de água em intervalos discretos (de 0,5 m a 1,5 m de comprimento) (NIELSEN, 2005). Já se o objetivo é a aferição da condutividade hidráulica das zonas aquíferas, o poço deve ser construído em um diâmetro maior (de 4 a 6 polegadas) de modo a caber equipamentos de bombeamento capazes de estressar o aquífero (NIELSEN, 2005). Além disso, as seções filtrantes devem ter uma grande área aberta nas ranhuras do tubo-filtro (de 8 a 10% da área total), de modo a evitar interferências na condutividade hidráulica (NIELSEN, 2005).

Infelizmente, o mercado para a área de construção de poços de monitoramento conta com empresas e técnicos que “simplificam” os projetos construtivos, de modo a se tornarem mais rentáveis. É comum a prática de “padronizar” poços de monitoramento, ou seja, instalar poços com mesmos projetos construtivos em sites completamente diferentes, resultando em amostras de água subterrânea pouco representativas. Alguns exemplos de práticas comuns que afetam negativamente o diagnóstico ambiental são: i) o uso de tubos de revestimento e de tubo-filtro compostos por materiais não compatíveis com o contexto hidrogeológico e geoquímico em questão, resultando em alterações químicas nas amostras de água; ii) o uso de uma única combinação de aberturas do tubo-filtro e granulometria do pré-filtro para todo e qualquer site, sem a preocupação com as condições geológicas e hidrogeológicas do site, ocasionando em turbidez no poço, prejudicando a qualidade das amostras de água e danificando os equipamentos de bombeamento; iii) a instalação inadequada do selo anular, comprometendo o isolamento hidráulico das diferentes zonas de monitoramento, inviabilizando amostras e dados de condutividade hidráulica; iv) a inadequada ou inexistente proteção de superfície do poço, resultando em infiltração de água superficial, inviabilizando amostras de água subterrânea e podendo danificar estruturas do poço (NIELSEN, 2005).

Desta forma, de modo a garantir resultados fidedignos para o diagnóstico ambiental, o poço de monitoramento deve seguir as melhores práticas, sendo projetado de maneira dinâmica, se adequando tanto aos objetivos principais dele como ao modelo conceitual do site no qual será construído. Com base nesta justificativa, este trabalho tem como objetivo, através de uma revisão bibliográfica, compilar e analisar as melhores práticas na instalação/construção dos poços de monitoramento, com foco nas implicações ao diagnóstico ambiental, de maneira que esta pesquisa seja relevante tanto acadêmica/cientificamente quanto para o mercado de trabalho. Assim, poderá auxiliar os profissionais a projetarem e construírem poços de monitoramento com as melhores práticas disponíveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho consiste de uma revisão bibliográfica, na qual foram buscados normas técnicas, artigos, livros, documentos, entre outros materiais de cunho científico, através de meios de pesquisa científica virtuais como o “*Google Scholar*”, “*Scielo*”, periódicos CAPES, entre outros, buscando-se por palavras-chave relacionadas ao tema, como “construção de poços de monitoramento”, “poços de monitoramento”, “desenvolvimento de poços de monitoramento”, “diagnóstico ambiental em poços de monitoramento”. Ressalta-se que grande parte das pesquisas foram realizadas utilizando-se a linguagem inglesa, para se obter mais resultados, buscando-se palavras-chave como “*well construction*”, “*monitoring well*”, “*well development*”, “*well logging methods*”, etc.

Dentre os trabalhos pesquisados na etapa as principais referências que balizam este trabalho são: as normativas ABNT NBR 15495 Parte 1 (ABNT, 2009) e Parte 2 (ABNT, 2008), e o livro “*Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Groundwater Monitoring*” de NIELSEN (2005).

A normativa NBR 15495 Parte 1 (2009) trata da instalação e construção dos poços de monitoramento e normatiza os padrões técnicos adequados para a construção destes poços, de forma objetiva.

A norma NBR 15495 Parte 2 (2008) dispõe de padrões técnicos que devem ser seguidos na etapa de desenvolvimento do poço, após sua construção.

Por último, o livro de NIELSEN (2005) aborda, de forma didática e com detalhes, as aplicações e procedimentos técnicos em todas as fases do poço, seja ele em fase construtiva, seja na fase de desenvolvimento, explicando como são feitos os procedimentos adequados, suas justificativas principais para se adotar tais procedimentos e suas consequências.

3. POÇOS DE MONITORAMENTO

3.1. Instalação e Construção de Poços de Monitoramento em Aquíferos Granulares

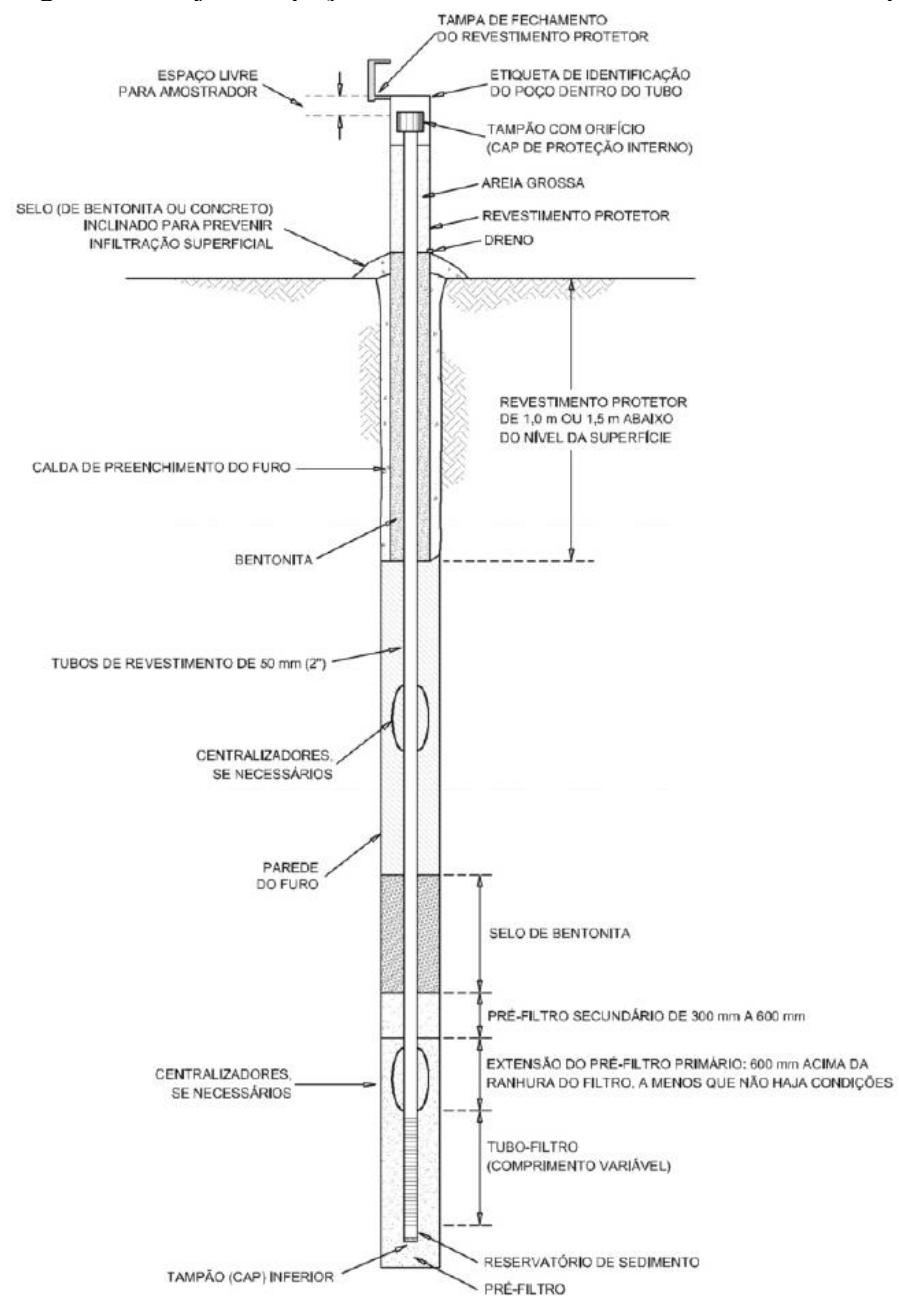
Um poço de monitoramento de água subterrânea, como o próprio nome diz, é um poço cujo propósito principal é fornecer um meio de obtenção de água subterrânea na qual seja possível obter dados representativos da qualidade desta água, sem interferências externas, e com certa periodicidade, na qual caracteriza-se um monitoramento.

A norma técnica NBR 15495 Parte 1 (ABNT, 2009) trata dos fundamentos do projeto e construção de poços de monitoramento em aquíferos granulares. Segundo a ABNT (2009), poços de monitoramento adequadamente projetados e construídos devem fornecer informações a respeito: i) das propriedades geológicas e hidráulicas do aquífero e aquitarde; ii) da superfície potenciométrica da unidade hidrológica monitorada; iii) da qualidade da água subterrânea; iv) das características de migração de substâncias naturais e/ou antropogênicas na água subterrânea.

3.1.1. Estrutura de poços de monitoramento

Um poço de monitoramento, seguindo a norma NBR 15495 Parte 1 (2009), pode ter uma estrutura semelhante à da Figura 1, e deve ter como componentes principais o revestimento (tubos de revestimento, tubos filtros e tampão), o pré-filtro, o selo anular (constituído por bentonita e/ou por caldas de preenchimento do furo) e a proteção de superfície, no entanto, componentes adicionais podem ser aplicados caso haja interesse.

Figura 1 – Projeto de poço de monitoramento com revestimento simples.

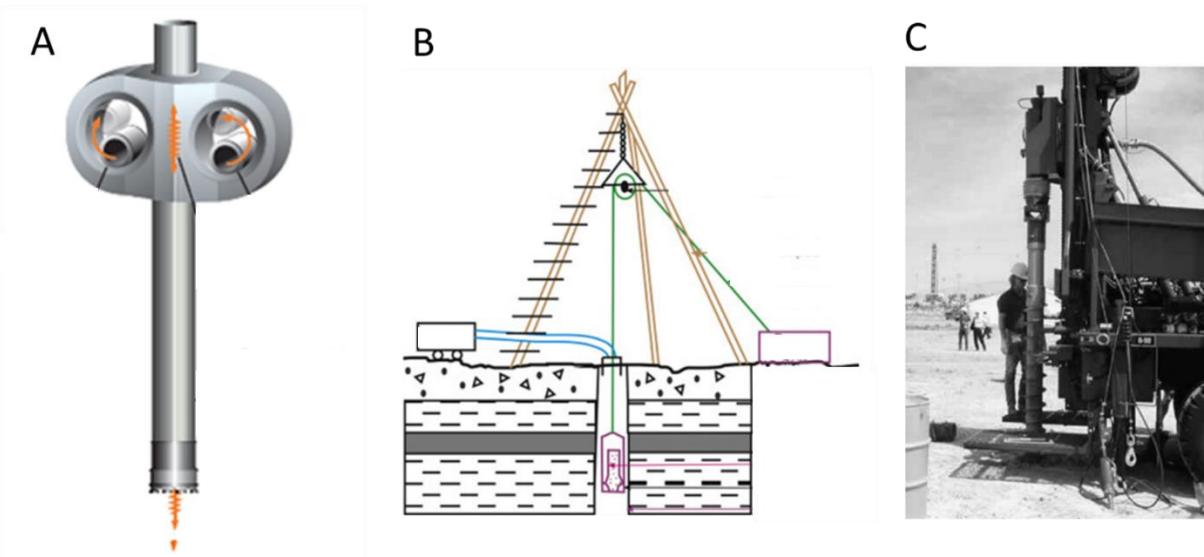


Fonte: ABNT (2009).

3.1.2. Métodos de perfuração

O poço é iniciado a partir da perfuração, a qual varia de método a depender da geologia e hidrogeologia do local, bem como do tipo de amostra a ser obtida. Segundo Nielsen (2005), existem 3 tipos (métodos) de perfuração (Figura 2): rotativo, percussivo e sônico.

Figura 2 – (A) Ilustração do método de perfuração sônico. (B) Ilustração do método de perfuração percussivo. (C) Ilustração do método de perfuração rotativo.



Fontes: (A) – Sonic Drilling System Site (<https://www.sas-sds.com/index-eng.html>). (B) – ISLAM e HOSSAIN (2020). (C) – NIELSEN (2005).

A perfuração pelo método rotativo faz uso de uma broca composta por material abrasivo, que é rotacionada continuamente. Por meio deste método, em poços rasos podem ser utilizadas brocas do tipo trado oco helicoidal, que não necessitam da utilização de fluidos, mas que, no entanto, causam impactos nas paredes do poço, criando uma camada espelhada de argila na parede do furo, afetando a condutividade hidráulica do aquífero nas proximidades do poço. Já tanto em poços rasos quanto profundos, o método de perfuração rotativa pode aplicar fluidos de circulação reversa, de modo que estes fluidos são injetados no fundo do poço através dos equipamentos de perfuração, com uma pressão suficiente para permitir a ascensão deste fluido, que carrega consigo para a superfície o material recortado (ASTM, 2004a). Embora os fluidos de perfuração sejam interessantes para a perfuração, eles não são recomendados já que geram impactos no aquífero.

Um dos fluidos mais utilizados na perfuração é a bentonita, a qual promove a formação de uma película de menor condutividade hidráulica na parede do poço, impedindo a conexão

hidráulica entre o poço e a formação aquífera e alterando a geoquímica da formação geológica (CTC) nas proximidades do poço (Colangelo; Upadhyay, 1990).

Segundo a ABNT (2009), deve ser evitada a utilização de água ou de fluidos de perfuração, no entanto, muitas vezes é inviável realizar perfurações sem a utilização de algum fluido. Para tanto, no caso de se utilizar água, deve-se utilizar aquela com procedência conhecida e isenta de substância de interesse para o site. Já no caso da necessidade de fluidos de perfuração específicos, o fluido selecionado deve ter o menor impacto possível na qualidade das amostras a serem obtidas, bem como na condutividade hidráulica do aquífero, nas proximidades do poço (ABNT, 2009). Além disso, após seu uso, deve-se remover este fluido injetado durante o processo de desenvolvimento do poço.

A perfuração pelo método percussivo funciona através de sequências de batidas na formação geológica, utilizando um sistema de cabos de aço ou martelos pneumáticos (NIELSEN, 2005). A perfuração percussiva com cabos de aço funciona basicamente levantando uma broca conectada aos cabos, para então soltá-la de uma certa altura a qual permita a perfuração através do impacto. Já a perfuração com martelos pneumáticos, como o próprio nome diz, utiliza-se de ar comprimido para pressionar o martelo contra a formação geológica, golpeando-a de modo a quebrar e/ou pulverizar o material recortado. Trata-se de uma perfuração mais rápida, no entanto, ela necessita da utilização de óleos compostos por hidrocarbonetos, que podem contaminar a água do poço a ser analisada. Desta forma, só deve ser utilizado este tipo de perfuração quando o diagnóstico ambiental não contemplar as substâncias presentes no óleo utilizado (ASTM, 2004b).

Por último, a perfuração pelo método sônico utiliza-se de rotação e, principalmente, de vibrações de alta frequência para vibrar uma broca de formato anelar, na qual acopla-se à broca uma haste oca, em que em seu espaço interno encontra-se um invólucro, denominado “liner”, o qual coleta e armazena as amostras da perfuração (ASTM, 2004c). A perfuração pelo método sônico possui muitas vantagens para o diagnóstico ambiental, tais como: i) possuir uma taxa de penetração muito alta em sedimentos inconsolidados, ii) utilizar apenas água como fluido de perfuração, a qual deve ser isenta de substâncias de interesse para o diagnóstico ambiental, iii) gerar menos material recortado, possivelmente contaminado, no canteiro de obras, o que aumenta a segurança para os funcionários diretamente relacionados à perfuração e reduz os custos de limpeza e de armazenamento do material recortado contaminado (ASTM, 2004C; NIELSEN, 2005).

3.1.3. Revestimento

O poço de monitoramento é revestido utilizando-se tubos instalados no interior do furo, o qual separa as paredes externas do poço, friáveis e com risco de desmoronamento, da parte interna do poço, onde se armazena a água do aquífero captada. O revestimento é um componente essencial para o poço de monitoramento, pois ele previne a entrada indesejada de sedimentos da formação geológica na água captada, evitando a turbidez desta (CAMPBELL; LEHR, 1973). Além disso, ele permite o acesso da superfície à zona de interesse no aquífero, através de tubos filtro acoplados às extremidades dos tubos de revestimento (USEPA, 1975). Por último, o revestimento, associado a um adequado selo anular, isola hidráulicamente diferentes zonas de interesse aquíferas no poço.

Para tanto, o tubo de revestimento deve ser constituído de materiais inertes em relação às substâncias químicas de interesse (SQI), bem como aguentar as forças impostas durante a fase de construção e de desenvolvimento do poço (*Department of Environment of Yukon*, 2019). Além disso, ele não deve ter as seguintes características: ser degradável, possuir fácil limpeza e manuseio e ser relativamente acessível financeiramente.

Geralmente são utilizados plásticos, como o Polivinil Clorado (PVC), Polietileno e Polipropileno para o revestimento do poço. No entanto, caso se deseje um material de maior resistência a esforços, pode ser também utilizado aço galvanizado ou inox. Cada material tem suas vantagens e desvantagens, o que os tornam específicos para cada tipo de situação.

O revestimento de PVC, por exemplo, tem como vantagem o custo ser bastante acessível e de fácil manuseio, por causa de sua pequena relação peso/comprimento. Por outro lado, tem como desvantagens: a possibilidade de degradação quando em contato com concentrações elevadas de solventes organoclorados; a baixa resistência a temperaturas elevadas, que pode deformá-lo na etapa de cura da cimentação; e sua baixa resistência a esforços mecânicos (BARCELONA et.al., 1983).

Já o revestimento de aço possui como principal vantagem a alta resistência aos esforços mecânicos e às diferenças de temperatura, não sofrendo deformação, por exemplo, na etapa de cura da cimentação. Contudo, possui um preço menos acessível que o do PVC, além de deter uma relação peso/comprimento muito alta, sendo, portanto, um material de difícil manuseio.

Assim como o plástico, o aço também pode sofrer deteriorações a depender da geoquímica do meio, como no caso de condições muito ácidas e/ou com concentrações elevadas de O₂, Cl⁻, H₂S e CO₂, além de modificar as concentrações de metais (Fe, Zn, Cr, Ni, Mn e Mo) nas amostras de água subterrânea (BARCELONA et.al., 1985). Em contrapartida, segundo Barcelona e Helfrich (1986), em seu estudo sobre os efeitos dos revestimentos de poços de monitoramento na geoquímica da água subterrânea, os poços revestidos com PVC apresentaram em suas amostras de água um teor de compostos orgânicos voláteis (VOC) 2 a 5 vezes maior do que as amostras de água coletadas de poços revestidos com aço inox.

O diâmetro dos tubos de revestimento dos poços é geralmente de 2 e 4 polegadas. A definição desses diâmetros depende dos equipamentos e métodos de perfuração, do volume de água a ser amostrado, dos objetivos do programa de amostragem e, além disso, dos equipamentos a serem introduzidos no interior do poço, conforme o objetivo do projeto. (ABNT, 2009).

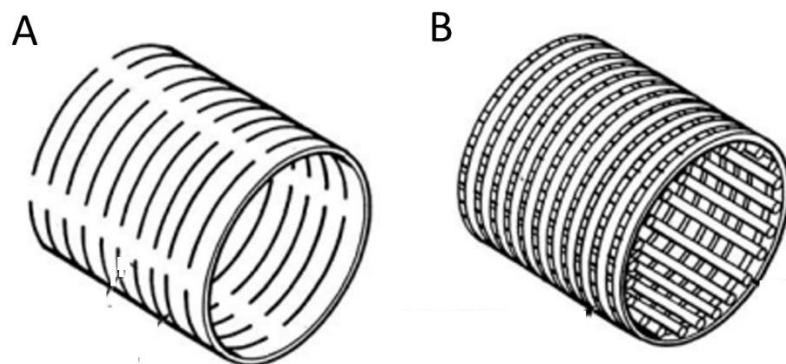
Cada tubo é acoplado um ao outro, proporcionando vedação, evitando-se assim infiltração pelas emendas, de líquidos provenientes de zonas não monitoradas. Recomenda-se o acoplamento por meio de juntas rosqueadas, acompanhados de um anel de vedação denominado de “O-ring” (ABNT, 2009).

Para possibilitar a entrada de água das zonas de interesse, são utilizados tubos filtros, isto é, tubos com aberturas lineares, que permitem a comunicação hidráulica entre a zona aquífera e o espaço interno do tubo, onde a água a ser amostrada é armazenada. Estas aberturas devem possuir dimensões que possibilitem reter de 90 a 95% do material utilizado como pré-filtro, bem como manter uma velocidade de fluxo da água subterrânea do tubo filtro à formação de 0,03 m/s, a fim de se evitar a formação de fluxo turbulento (ABNT, 2009). As aberturas mais comuns disponíveis no mercado são de 10 slot (0,01 polegada = 0,25 mm) e de 20 slot (0,02 polegada = 0,5 mm). O tamanho das aberturas deve ser utilizado com base no pré-filtro utilizado, que é dimensionado com base na granulometria da formação geológica do aquífero (ASTM, 2004c). No entanto, isto geralmente não é seguido pelas empresas de sondagem, que padronizam os tubos filtros e os instalam com a mesma abertura, independente da geologia encontrada.

Existem 2 tipos de tubos filtro disponíveis no mercado, o filtro ranhurado e o filtro continuamente enrolado (Figura 2). Embora o filtro ranhurado seja o mais utilizado nos poços

de monitoramento, ele é o menos recomendado, principalmente devido à sua pequena área aberta (através de ranhuras), e devido à sua facilidade em sofrer entupimento das aberturas, o que causa prejuízos na performance hidráulica do poço, no que diz respeito ao seu rendimento e taxa de recuperação (AHMAD et. al., 1983). O filtro continuamente enrolado, por sua vez, possui maior porcentagem de área aberta, o que melhora a performance hidráulica do poço, além de ser menos suscetível ao entupimento com relação ao filtro ranhurado (NIELSEN, 2005). No Brasil, o tubo filtro continuamente enrolado possui maior preço, sendo usado na maioria das vezes, os filtros ranhurados comuns, reduzindo então a produtividade do poço.

Figura 3 – Tipos de filtro comumente disponíveis no mercado. A) Filtro ranhurado; B) Filtro enrolado continuamente.



Fonte: NIELSEN (2005)

Com relação ao comprimento da seção filtrante, ele é dependente dos objetivos da investigação ambiental. Se o propósito da instalação do poço de monitoramento é a definição da distribuição dos contaminantes no aquífero e das cargas hidráulicas, o recomendado é a instalação de vários poços de monitoramento com seções filtrantes curtas, geralmente entre 0,5 m e 1,5 m, não ultrapassando 3 m de comprimento (NIELSEN, 2005). Robbins (1989), demonstra em seu trabalho evidências concretas de que a purga em seções filtrantes compridas (maiores que 2 m, de forma contínua, sendo uma única seção filtrante), resultam em erros nos dados de concentração das SQIs (substâncias químicas de interesse). Por outro lado, caso o objetivo seja identificar a simples presença de um contaminante no aquífero, uma seção filtrante envolvendo toda a zona saturada é mais recomendada. Para situações específicas, como o monitoramento de LNAPLs (*Light non-aqueous phase liquid* – Líquido de fase não aquosa leve), o comprimento da seção filtrante deve levar em consideração a diferença de gradiente

hidráulico, bem como as flutuações do nível freático nos períodos de chuva e de estiagem, compreendendo os picos máximos e mínimos históricos do nível estático (NIELSEN, 2005).

Varljen et. al. (2006) simulou numericamente o fluxo da água subterrânea em diferentes seções filtrantes, os resultados mostraram que quando as seções filtrantes são parcialmente penetrantes no aquífero, ocorrem linhas de fluxo acima e abaixo da seção filtrante. Isto ocasiona o direcionamento da água subterrânea de porções verticais que não abrangem apenas a região que compreende a seção filtrante do poço. Assim, atenção deve ser dada na interpretação dos resultados das análises de amostras coletadas em poços com este tipo de configuração da seção filtrante, porque conforme Nielsen (2005), a concentração dos contaminantes será uma média ponderada das informações de todas as camadas atravessadas, não sendo portanto, representativas.

Lacombe et. al. (1995) e Elçi et. al. (2001) demonstraram em suas simulações que seções filtrantes muito longas que envolvem mais de uma zona saturada ou que envolve uma zona saturada e um aquitarde geram contaminações cruzadas, transmitindo os contaminantes da porção inferior para a superior do aquífero.

Com relação ao nível estático da água no poço, o comprimento das seções filtrantes possui grande relevância. Elçi et. al. (2003), em seu estudo sobre cargas hidráulicas em poços de monitoramento, demonstra que em seções filtrantes com comprimento total típico de poços de monitoramento (seções filtrantes descontínuas que somadas resultam em 3 a 7 m de comprimento) necessitam de um gradiente hidráulico alto para gerar uma discrepância significativa no nível estático dos poços, em comparação com o nível estático com uma seção filtrante longa, que necessita de menores gradientes hidráulicos para gerar a mesma diferença no nível estático.

Empresas de consultoria que contratam a instalação de poços devem apresentar um projeto construtivo baseado em sondagens do solo já realizadas no site. No entanto, isso raramente ocorre, sendo o poço de monitoramento instalado na primeira sondagem realizada. Nestes casos, as empresas de perfuração muitas vezes, por falta de um projeto construtivo detalhado e que tem como base a geologia local, instalam seções filtrantes longas e/ou posicionadas em locais incorretos, podendo contemplar mais de uma unidade geológica, o que gera contaminações cruzadas e amostras não representativas.

Por último, sendo mais um componente essencial para o revestimento de um poço de monitoramento, o reservatório de sedimentos, que nada mais é do que um tubo liso posicionado abaixo do tubo filtro, tem como propósito coletar os sedimentos que entram no poço durante e após a fase de desenvolvimento, com o intuito de se evitar o entupimento das aberturas dos tubos filtros (ABNT, 2009). Além de ser geralmente utilizado como local de encaixe para posicionar os centralizadores ao descer os tubos de revestimento, o reservatório de sedimentos consegue aprisionar o material particulado da formação, que pode se encontrar contaminado por DNAPLs (*Dense non-aqueous phase liquid* – Líquido de fase não aquosa densa), caso este esteja posicionado no topo da primeira camada confinante (NIELSEN, 2005). No entanto, caso a amostragem de DNAPLs não seja o foco do diagnóstico ambiental, Yu (1989) e ABNT (2009) recomendam que o reservatório de sedimentos deve ser limpo periodicamente, sendo esta limpeza realizada, principalmente, antes da amostragem de água subterrânea para se evitar possíveis alterações geoquímicas da amostra.

3.1.4. Pré-filtro

O pré-filtro é um componente essencial para o poço de monitoramento, sendo utilizado para reter o material da formação, enquanto permite a passagem de água subterrânea para o interior do poço, sem presença de turbidez (ABNT, 2009). Para tanto, são utilizados sedimentos previamente selecionados com granulometria definida a depender da granulometria do material da formação geológica, a qual é analisada através de uma curva de distribuição granulométrica. Nesta curva são definidos os chamados D-30 (tamanho de abertura da peneira na qual 70% dos sedimentos da formação ficam retidos), D-60 (tamanho de abertura da peneira na qual 40% dos sedimentos da formação ficam retidos) e o D-10 (tamanho de abertura da peneira na qual 90% dos sedimentos da formação ficam retidos).

Para se definir a granulometria recomendada para o pré-filtro, o D-30 da formação é multiplicado por um fator entre 4 e 10, sendo de 4 a 6 caso a camada estratigráfica for fina e uniforme e de 6 a 10 se a camada estratigráfica for homogênea e conter partículas menores que silte (ABNT, 2009). O mais usual é se utilizar o fator 6. Estes fatores são utilizados para que a granulometria do pré-filtro seja predominantemente mais grossa do que a da formação, de modo a permitir a condutividade hidráulica do poço com o aquífero de forma efetiva.

A heterogeneidade da granulometria do pré-filtro pode comprometer uma adequada filtração da água subterrânea, pois no momento em que é despejado no espaço anelar do poço, este material sofre uma decantação seletiva, onde os grãos mais grossos irão se encontrar no fundo do poço e os grãos mais finos nas porções mais superficiais. Isto faz com que prejudique a eficiência da filtração, podendo trazer mais turbidez para a água amostrada, bem como reduzir as entradas de água nas porções superficiais, restringindo a seção efetivamente filtrante (NIELSEN, 2005). Para se estabelecer limites de heterogeneidade dos materiais granulométricos do pré-filtro, é utilizada a relação D-60/D-10, de modo a se estabelecer um coeficiente de uniformidade para o material do pré-filtro, sendo o valor máximo para o coeficiente de uniformidade definido como sendo 2,5 (ABNT, 2009).

Para materiais da formação muito finos, como por exemplo, solos siltosos, argilosos ou argilo-siltosos, não é possível a obtenção de amostras de água livres de turbidez a partir das normas técnicas da ABNT (ABNT, 2009), sendo necessária a aplicação de diferentes técnicas para a redução e eliminação da turbidez artificial.

Com relação ao tipo de material do pré-filtro, este deve ser um material limpo (lavado e seco) anteriormente à instalação dele no poço, com granulometria uniforme e ausente de materiais finos, inerte (geralmente composto por quartzo/sílica), de composição química conhecida e embalado em embalagens plásticas.

O despejo do pré-filtro depende da profundidade do poço e de suas dimensões. Em poços pouco profundos (de até 6m), é possível despejar o pré-filtro diretamente no espaço anelar, sem necessidade de instrumentos, já que a pequena profundidade vai diminuir a chance de ocorrer a segregação de partículas por decantação, já mencionada (ABNT, 2009). Já em poços mais profundos há necessidade de utilização de um tubo de descida (*Tremie pipe*), que vai auxiliar no processo de instalação, impedindo a formação de pontes no pré-filtro. No entanto, em poços com menor diâmetro, não será possível utilizar o tubo de descida por não haver espaço suficiente no poço.

Em formações geológicas de granulometria fina, é necessária a utilização de pré-filtros também de menor granulometria. Nestes casos, a granulometria fina do pré-filtro possui dificuldade em decantar até o fundo do poço, pelo fato de se tratar de uma granulometria fina e por conta de que o poço está preenchido por lama (fluido relativamente denso). Alguns sondadores, para reverter este problema, utilizam pré-filtros mais grossos, o que não é

recomendado pois deste modo altera-se o D-30 do pré-filtro, prejudicando sua capacidade de filtragem. O melhor a se fazer nestes casos é a utilização da técnica de circulação reversa, em que é feito um bombeamento de água no espaço interno ao revestimento, na altura da última seção filtrante. Este bombeamento proporciona uma movimentação da lama dentro do poço no espaço anelar (entre o tubo de revestimento e as paredes do poço), de sentido descendente, o qual propicia a movimentação verticalmente para baixo, do pré-filtro despejado (NIELSEN, 2005).

Em termos de extensão do pré-filtro, o ideal é que ele esteja instalado até 30 cm acima do topo do filtro, sendo válida também a instalação em até 60 cm acima do topo do filtro (NIELSEN, 2005).

Com relação à espessura, ensaios de laboratório demonstraram que um pré-filtro com no mínimo 0,5 polegadas já é o suficiente para realizar a filtração mecânica (ABNT, 2009).

Segundo Riyis (2012), no Brasil, há de forma frequente um péssimo hábito na construção de poços de monitoramento. As empresas responsáveis pelo projeto do poço de monitoramento e as empresas responsáveis pela execução da construção do poço, ao perfurarem além da camada de interesse, seja por negligência, seja por erros de projeto, depositam pré-filtro no fundo do poço até alcançar a profundidade desejada (da camada de interesse) e continuam a construção do poço normalmente após tal ação, omitindo tal execução ao fim do serviço. Desta forma, toda a água a ser amostrada no poço será resultante de uma mistura das camadas abaixo da camada de interesse, que foram preenchidas com pré-filtro, e das camadas propriamente de interesse, resultando em amostras nada representativas.

Além disso, por falta de projetos construtivos “dinâmicos”, isto é, que se adequam às variáveis do site, as empresas de sondagem frequentemente padronizam o material do pré-filtro, aplicando sempre a mesma granulometria independente do material geológico do site. Tal ação prejudica a eficiência do poço em captar a água da formação, reduzindo sua produtividade, assim como gera turbidez nas amostras de água por redução da filtração realizada pelo pré-filtro.

3.1.5. Selo anular

Qualquer espaço anular entre as paredes do poço e o tubo de revestimento podem servir como um potencial canal de circulação vertical da água subterrânea/contaminantes em diferentes zonas de interesse dentro de um poço de monitoramento, causando contaminação cruzada entre zonas de interesse ou até interferindo nas cargas hidráulicas entre diferentes zonas aquíferas, distorcendo mapas potenciométricos e inviabilizando a análise de fluxo subterrâneo (WILLIAMS e EVANS, 1987). Para evitar tais problemas, é utilizado um selo anular entre as diferentes zonas de interesse ou entre a zona de interesse e o restante do poço, caso este tenha apenas uma seção filtrante. Este selo anular é, geralmente, uma camada de bentonita despejada no espaço anelar entre as paredes do poço e o tubo de revestimento. Entre as várias funções do selo anular, as principais remetem à: i) proteção contra infiltração de água /contaminantes da superfície para dentro das porções de interesse no poço; ii) providenciar um selo hidráulico e geoquímico entre diferentes zonas de interesse; iii) garantir que não ocorrerá movimentação vertical de água de um aquífero para outro, impedindo alterações de carga hidráulica; iv) proteção do revestimento contra potencial corrosão e degradação química (WILLIAMS, 1981).

A norma ABNT (2009) recomenda a utilização de bentonita seca, seja ela sob a forma de pó, de pellets, de grânulos ou de lascas, a qual pode ser despejada no poço diretamente da superfície ou então lançada utilizando-se um tubo de descida, caso se deseje instalar a bentonita em uma posição correta. A espessura do selo anular deve ter aproximadamente 1 a 1,5 m e, em sua instalação, é recomendada a utilização de grãos de bentonita com diâmetro menor do que 1/5 do tamanho do espaço anular onde este material será despejado, de forma a reduzir a probabilidade de formação de pontes (ABNT, 2009).

A utilização de bentonita sob a forma de pellets é, geralmente, a mais usual na construção de poços de monitoramento. Sua utilização nesta forma é indicada quando se instala o tubo filtro na zona saturada (maior parte dos casos). Para situações em que a bentonita deve atravessar uma coluna d'água de mais de 10 m de extensão, não é recomendada a utilização de pellets comuns pois estes se tornam pegajosos no percurso de descida pela coluna d'água, formando pontes. Para contornar tal problema, são utilizados pellets revestidos, que retardam seu umedecimento e consequente pegajosidade (NIELSEN, 2005). Sua instalação deve ser realizada através do lançamento direto pela superfície, sem a utilização de tubo de descida pelo fato de que os pellets se hidratarão dentro do tubo, aumentando sua pegajosidade e impedindo que a bentonita desça facilmente através do tubo.

A utilização de bentonita sob a forma de grânulos já é menos usual, onde a sua utilização é recomendada somente no caso da necessidade de instalação de tubo filtro que contemple tanto a zona saturada quanto a zona não saturada. Isto é, nos casos em que o objetivo do diagnóstico ambiental é monitorar a variação sazonal do nível d'água ou monitorar a presença de substâncias menos densas que a água, como LNAPLs (NIELSEN, 2005). Isto se deve ao fato de que a bentonita sob a forma de grânulos possui maior área superficial que os pellets, se hidratando mais facilmente.

Já a bentonita sob a forma de lascas é exclusivamente utilizada nos casos em que se necessita instalar um selo anular muitos metros abaixo da coluna d'água, haja vista que as lascas possuem menor área de contato do que os pellets e os grânulos (PIASECKI, 2002)

Por último, a bentonita sob a forma de pó, por possuir uma área superficial muito grande, é utilizada apenas para a formação da calda de preenchimento, isto é, o preenchimento do furo acima do selo anular de bentonita (PIASECKI, 2002)

Com relação à velocidade de despejo da bentonita para a instalação do selo anular, é recomendado o despejo de 20kg de bentonita em, no máximo, 3 minutos, para se evitar a formação de pontes (NIELSEN, 2005).

A calda de preenchimento do furo é mais um componente essencial para o poço de monitoramento. Trata-se de uma calda de bentonita misturada com cimento, a qual é utilizada para preencher todo o espaço acima do selo anular, até próximo à superfície. A norma ABNT 15495-1 (ABNT, 2009) recomenda a proporção de 1kg de bentonita em pó livre de impurezas para 7 litros de água, de composição química conhecida. Além da bentonita, utiliza-se também a proporção de 1,5 kg de cimento para 7 litros de água, a ser misturado à calda de bentonita já pronta.

A norma indica a injeção desta calda, utilizando-se uma bomba que empurra a calda através de um tubo de descida, cuja base do tubo se encontra no topo do selo anular, este já com seu processo de cura finalizado, o qual deve durar um intervalo de 1 a 2 horas (ABNT, 2009), que, não é seguido pela maior parte das empresas de instalação e construção de poços de monitoramento, por fatores econômicos (NIELSEN, 2005). Outro tempo de cura não seguido pelas empresas é o tempo de cura da calda de preenchimento, que possui um tempo de 8 a 48h (NIELSEN, 2005). A negligência das empresas em não respeitar o tempo de cura resulta em

selos anulares ineficientes, que possibilitam a comunicação hidráulica entre as diversas zonas saturadas e o poço, gerando contaminação cruzada, que inviabilizam as amostras.

3.1.6. Proteção de superfície

Segundo a norma ABNT (2009), a proteção do poço refere-se às instalações físicas realizadas para impedir a entrada de água superficial no espaço anular e no interior do poço, bem como impedir o acesso não autorizado de pessoas.

Instala-se na porção superior do poço de monitoramento um tubo de diâmetro maior que o do tubo de revestimento, para proteger e isolar o revestimento. Este tubo de proteção deve possuir um diâmetro de 100 mm a 150 mm, com 30 cm de comprimento total, de modo que 10 cm penetrem na camada de preenchimento do furo, abaixo do chão, e os 20 cm restantes fiquem acima da superfície, protegidos, na altura do chão, com uma pequena laje de concreto ao seu redor (ABNT, 2009). Nos casos em que não há possibilidade de o tubo ficar acima da superfície, como em locais com passagem de veículos, ele deve ser aterrado com uma câmara de calçada.

3.1.7. Registros

Raramente a equipe de perfuração e construção do poço de monitoramento é a mesma equipe que irá realizar serviços posteriores referentes ao poço, como serviços de fiscalização, de monitoramento, de remediação, etc. Sendo assim, o registro da sondagem, da perfuração e da construção do poço de monitoramento devem ser realizados e guardados pelo responsável pelo poço.

Com relação aos registros de sondagem, são importantes: as descrições da metodologia e equipamentos utilizados, data de realização, equipe responsável, condições climáticas, descrições da litologia, profundidades total e de interesse, textura, estrutura, cor, odor, indícios de contaminação, profundidade do nível d'água, taxa de recuperação da amostra, medições realizadas em campo e dificuldades encontradas (ABNT, 2009).

Na perfuração do poço, devem ser registrados: data, equipe responsável, metodologia e equipamentos utilizados, unidades geológicas perfuradas, progresso da perfuração,

profundidade, nível d'água, recuperação das amostras, volumes e tipos de fluidos utilizados, entre outros (ABNT, 2009).

Por último, referente à construção do poço, devem ser registrados: data de instalação, equipe responsável, condições climáticas, identificação do poço, cota topográfica, material utilizado nos tubos de revestimento, tubo-filtro e tubo de proteção do superfície, descrição dos tampões e juntas, diâmetro do furo, dos tubos, características do tubo filtro, posição e extensão do tubo filtro, características do pré-filtro, bem como suas posições e extensões, volume de pré-filtro utilizado, metodologia de posicionamento do pré-filtro, metodologia de instalação do selo anular e calda de preenchimento, volume deste, profundidade do nível d'água, posicionamento dos centralizadores, método e data do desenvolvimento do poço (ABNT, 2009).

3.2. Desenvolvimento de Poços de Monitoramento em Aquíferos Granulares

Como já mencionado anteriormente, os métodos de perfuração adotados na construção do poço de monitoramento geram impactos na condutividade hidráulica entre o poço e a formação, através da alteração estrutural das paredes do poço, seja por adição de fluidos de perfuração, seja pelo impacto mecânico dos equipamentos de perfuração. Para resolver tal situação realiza-se uma etapa da instalação dos poços de monitoramento denominada de desenvolvimento do poço. Esta etapa tem como principais objetivos a otimização da condutividade hidráulica entre o poço e a formação geológica, a estabilização do material do pré-filtro nas seções filtrantes e a recuperação dos fluidos de perfuração utilizados durante a perfuração (ABNT, 2008).

A fase de desenvolvimento é dividida em 3 etapas: o pré-desenvolvimento, o desenvolvimento preliminar e o desenvolvimento final. O pré-desenvolvimento é uma etapa que preza pelo controle das propriedades dos fluidos utilizados na fase de perfuração. Isto é, trata-se do controle da qualidade e da quantidade dos fluidos utilizados, bem como dos métodos utilizados para adição destes fluidos, objetivando-se o mínimo de impactos à formação geológica e à água subterrânea, de modo a facilitar as etapas posteriores do desenvolvimento (ABNT, 2008).

A fase de desenvolvimento preliminar trata do desenvolvimento do poço através do bombeamento em 2 direções repetidamente: do tubo filtro para a formação geológica e da formação para o tubo filtro. Isto deve ser realizado de forma gradual, começando por um bombeamento mais fraco e aumentando a intensidade de acordo com o aumento da vazão do poço e da remoção de sedimentos. Esta etapa é responsável por corrigir os impactos negativos

gerados durante a perfuração, de modo a: i) estabilizar e consolidar o pré-filtro; ii) corrigir as alterações estruturais geradas na formação pelos impactos mecânicos do ferramental de perfuração, bem como devido à adição de fluidos; iii) remover material de granulação fina do filtro, pré-filtro e da formação; iv) remover os fluidos de perfuração utilizados; v) estabilizar a interface entre o pré-filtro e a formação (ABNT, 2008; ASTM, 2004e). O desenvolvimento preliminar deve ser realizado assim que o pré-filtro for instalado, de modo a estabilizá-lo no poço o mais rápido possível. Caso este requisito não seja cumprido e, por conta disso, seja dada continuidade à instalação dos outros componentes do poço como o selo anular de bentonita e a calda de preenchimento, o desenvolvimento preliminar, ao ser realizado com os outros componentes já instalados, pode provocar uma reacomodação da bentonita em meio ao pré-filtro e assim, ocasionar a entrada de bentonita para dentro do poço (ABNT, 2008). O ideal é que, após o desenvolvimento do pré-filtro, seja dada um intervalo mínimo de 24 horas para a cura do selo anular de bentonita e da calda de preenchimento, para só então dar prosseguimento ao desenvolvimento final. No entanto, esta prática é pouco utilizada no mercado, haja vista que se perde a produtividade ao ter de se esperar este intervalo de tempo, ocasionando falhas estruturais no poço, que reduzem sua produtividade e que geram turbidez nas amostras.

Por último, o desenvolvimento final também tem como objetivo a limpeza da água do poço através do bombeamento constante. Ao final do desenvolvimento, espera-se que a água subterrânea amostrada tenha uma turbidez de até 5 NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez) (ABNT, 2008), no entanto, principalmente em solos argilosos, esta condição é difícil de ser obtida. Caso tenha sido utilizado fluido de perfuração, deve-se bombear um volume de água igual a 10 vezes o volume de fluido de perfuração utilizado (ABNT, 2008).

O desenvolvimento do poço pode ser realizado através de diversos métodos, tais como: pistoneamento, super-bombeamento com retrolavagem e, por último, o jateamento com bombeamento.

O pistoneamento é realizado com o uso de um pistão, que é movimentado repetidamente para cima e para baixo por dentro do poço. Ao ser movimentado para baixo, ele aumenta a pressão hidrostática da coluna d'água abaixo dele, empurrando, assim, a água para fora do poço. Ao ser movimentado para cima, ele cria uma pressão negativa na coluna d'água, forçando a movimentação da água para dentro do poço. O pistoneamento é o método mais utilizado atualmente no mercado, devido às suas vantagens, como o baixo custo, a facilidade operacional, a capacidade de estabilização do pré-filtro, bem como a possibilidade de movimentar a água

em 2 direções de maneira fácil e eficaz (ABNT, 2008). Como desvantagens, o pistão, ao se movimentar rente ao tubo-filtro, pode provocar danos ao revestimento (NIELSEN, 2005). Além disso, este método, por si só, não consegue realizar uma remoção dos sedimentos e dos fluidos de perfuração, necessitando de uma combinação com métodos que possam realizar esta remoção (NIELSEN, 2005).

Pelo método de super-bombeamento com retrolavagem, realiza-se um bombeamento a uma taxa maior do que aquela utilizada no processo de purga antes das amostragens, rebaixando, assim, o nível d'água o máximo possível, gerando um fluxo de água subterrânea do aquífero para o poço. Associado ao super-bombeamento deve ser realizada a retrolavagem, na qual injeta-se água, com uma bomba, para dentro do poço, provocando um fluxo na direção oposta à criada pelo super-bombeamento. Para se evitar alterações geoquímicas por conta da injeção de água, recomenda-se a utilização da mesma água obtida pelo super-bombeamento, após a decantação dos sedimentos. Como vantagens, esta combinação de métodos permite uma maior rapidez para o desenvolvimento e uma alta eficiência na remoção de sedimentos e de fluido de perfuração (ABNT, 2008). Já as principais desvantagens são listadas a seguir: i) pode causar o travamento do equipamento, bem como seu desgaste por abrasão; ii) gera grandes volumes de água que requerem um armazenamento e possível tratamento; iii) pode requerer a injeção de água no poço, o que possibilita alterações geoquímicas na amostragem; iv) o método é limitado à base do pré-filtro, não desenvolvendo de forma uniforme toda a seção filtrante (ABNT, 2008).

O jateamento em conjunto com bombeamento consiste na aplicação de jatos horizontais de água em alta pressão no aquífero, fazendo com que a água injetada movimente o material do pré-filtro e o material da formação geológica, desmobilizando-o para dentro do filtro, sendo então removido através de bombeamento com *air-lift* utilizando um tubo edutor (REICHART, 1996; ABNT, 2008; ASTM, 2004e). Este método é eficiente para assentar, rearranjar o pré-filtro e remover resíduos de perfuração, embora seja uma operação trabalhosa e que introduza água no poço (ABNT, 2008). Algumas desvantagens deste método são: a introdução de óleo na água subterrânea caso os filtros do compressor de ar não estejam adequados, a aeração da água subterrânea e do pré-filtro e formação geológica, gerando alterações geoquímicas na água subterrânea, que antes era anaeróbica, e podendo reduzir a condutividade hidráulica da formação e do pré-filtro devido aos aprisionamentos de ar entre os espaços porosos do material (HOWARD et. al., 1988; NUCKOLS, 1990; NIELSEN, 2005).

A amostragem a ser realizada em solos muito argilosos (baixa condutividade hidráulica) após o término da construção e instalação do poço de monitoramento deve ser realizada apenas de 2 a 3 semanas após o fim do desenvolvimento do poço, para que a água subterrânea entre em equilíbrio novamente, a fim de se evitar quaisquer condições geoquímicas na amostragem que não condizem com a realidade.

Barcelona et. al. (1994), em seu trabalho sobre parâmetros indicadores de purga para a estabilização de Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) na água subterrânea, discute as consequências de uma construção e desenvolvimento adequados de um poço de monitoramento nos resultados geoquímicos. Como resultado, ele afirma que o bombeamento contínuo do poço, já construído, minimiza os impactos geoquímicos na formação e na água subterrânea gerados pela construção e desenvolvimento dele. Em específico, este bombeamento contínuo permite a estabilização do oxigênio dissolvido presente na água subterrânea, que havia sofrido alteração devido à fase de desenvolvimento do poço.

4. CONCLUSÕES

No que tange os métodos de perfuração, recomenda-se, para poços rasos, a utilização do trado oco helicoidal já que este não utiliza fluido de perfuração. Se o caso for de poço profundo, recomenda-se: i) o método pneumático caso as SQIs não contemplem os hidrocarbonetos presentes no óleo lubrificante do martelo pneumático, e ii) o método rotativo por brocas tricônicas caso as SQIs sofram interferência com o óleo do método pneumático. No cenário brasileiro, utiliza-se com frequência a perfuração pelo método rotativo com brocas tricônicas, muitas vezes utilizando bentonita como fluido de perfuração, mesmo em casos em que isso não é recomendado, desta forma podendo contaminar a água subterrânea e inviabilizar a amostragem.

Com relação aos tubos de revestimento e tubo-filtro, recomenda-se a utilização do aço galvanizado como material principal. No entanto, ele é muito caro e portanto as empresas utilizam com frequência o PVC, mesmo em casos em que este não é recomendado.

Seu comprimento (seção filtrante) deve ser baseado no propósito final do poço. Caso este seja a simples identificação da contaminação, como por exemplo na fase de investigação confirmatória do site, o ideal é que a seção filtrante ocupe toda a zona saturada, com exceção no caso de suspeita de LNAPL, que deverá contemplar a parte superior da zona saturada e uma porção da zona insaturada acima do nível d'água. Já se o site está na fase de investigação detalhada e o objetivo principal da construção do poço é a delimitação das plumas de contaminação, seções filtrantes curtas, de no máximo 2 m de comprimento são recomendadas (ROBBINS, 1989; NIELSEN, 2005). As empresas de sondagem no Brasil, seja por falta de projetos construtivos adequados, seja por negligência/incompetência, instalam seções filtrantes longas e/ou posicionadas em locais incorretos, podendo contemplar mais de uma zona saturada, o que gera contaminações cruzadas e amostras não representativas.

Para o pré-filtro, é necessário que o material seja homogêneo e inerte, com granulometria calculada ($D_{30} \times 6$). No Brasil, há um péssimo hábito de se padronizar o material do pré-filtro, aplicando sempre a mesma granulometria independente do material geológico do site. Tal ação prejudica a eficiência do poço em captar a água da formação, reduzindo sua produtividade, assim como pode gerar turbidez na amostragem, pela ausência de uma filtração adequada.

Com relação ao selo anular, deve ser dada especial atenção para se evitar a formação de pontes. Para tanto, é ideal que o pellet de bentonita tenha um diâmetro menor que 1/5 do

diâmetro do espaço anelar no qual será despejado, e que sua velocidade de despejo no poço seja de, no máximo, 20kg em 3 minutos. Caso contrário, pontes são formadas, ocasionando em uma inadequada formação do selo anular, possibilitando entrada de água de diferentes zonas aquíferas no poço e gerando contaminação cruzada. A cura do selo anular leva de 1 a 2h e a cura da calda de preenchimento do furo leva de 8 a 48h, devendo ser seguidas para evitar prejuízos ao bom funcionamento do poço, o que infelizmente não ocorre no mercado, gerando selos anulares mal formados, que possibilitam a conexão hidráulica entre várias zonas saturadas e entre o poço, gerando contaminação cruzada.

Com relação ao desenvolvimento do poço, este deve ser feito logo em seguida à instalação do pré-filtro, para estabilizá-lo o mais rápido possível. Após este breve desenvolvimento, deve ser realizada a instalação do selo anular e da calda de preenchimento do furo, impreterivelmente aguardando a cura de 24h do selo anular e da calda para o retorno do desenvolvimento, sob o risco de provocar reacomodação da bentonita em meio ao pré-filtro caso não se realize a cura no tempo correto. Este tempo de cura geralmente não é seguido pelas empresas, o que prejudica a qualidade dos poços de monitoramento, reduzindo sua produtividade e gerando turbidez e contaminação cruzada nas amostras de água. O principal método de desenvolvimento utilizado no Brasil é o pistoneamento pois é o mais prático e barato. No entanto, o pistoneamento não consegue remover com facilidade os sedimentos e os fluidos de perfuração, sendo então necessária uma associação do pistoneamento com um bombeamento em sequência.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, M.U., E.B. Williams, and L. Hamdan, Commentaries on experiments to assess the hydraulic efficiency of well screens, *Ground Water*, 21(3), 282–286, 1983.

Aller, L., T.W. Bennett, G. Hackett, R. Petty, J. Lehr, H. Sedoris, D.M. Nielsen, and J.E. Denne, *Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells*, EPA/600/4-89/034, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Las Vegas, NV, 1991, 221 pp.

American Society for Testing and Materials - ASTM. Standard Guide for Use of Direct Rotary Drilling With Water-Based Drilling Fluid for Geoenvironmental Exploration and Installation of Subsurface Water-Quality Monitoring Devices; ASTM Standard D 5783, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2004a

American Society for Testing and Materials - ASTM, Standard Guide for Use of Direct Air Rotary Drilling for Geoenvironmental Exploration and Installation of Subsurface Water-Quality Monitoring Devices; ASTM Standard D 5782, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2004b.

American Society for Testing and Materials - ASTM, Standard Practice for Sonic Drilling for Site Characterization and the Installation of Subsurface Monitoring Devices; ASTM Standard D6914 – 04 (Reapproved 2010), ASTM International, West Conshohocken, PA. 2004c.

American Society for Testing and Materials - ASTM, Standard Practice for Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells, ASTM Standard D 5092, ASTM, West Conshohocken, PA, 2004d, 20 pp.

American Society for Testing and Materials - ASTM, Standard Guide for Development of Ground-Water Monitoring Wells in Granular Aquifers, ASTM Standard D 5521, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004e

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15.495-1:2007 versão corrigida 2:2009: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados - Parte 1: Projeto e construção. Rio de Janeiro. 2009

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15.495-2:2008: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - Parte 2: Desenvolvimento. Rio de Janeiro, 2008.

Barcelona, M.J., J.P. Gibb, and R.A. Miller, A Guide to the Selection of Materials for Monitoring Well Construction and Ground-Water Sampling, ISWS Contract Report #327, Illinois Department of Energy and Natural Resources, Water Survey Division, Champaign, IL, 1983, 78 pp.

Barcelona, Michael J.; HELFRICH, John A. Well construction and purging effects on ground-water samples. *Environmental science & technology*, v. 20, n. 11, p. 1179-1184, 1986.

Barcelona, M.J., J.A. Helfrich, and E.E. Garske, Sample tubing effects on ground water samples, *Analytical Chemistry*, 5, 460–464, 1985.

Barcelona, M. J., Wehraann, H. A., & Varljen, M. D. (1994). Reproducible Well-Purging Procedures and VOC Stabilization Criteria for Ground-Water Sampling. *Ground Water*, 32(1), 12–22. doi:10.1111/j.1745-6584.1994.tb00605.x

Campbell, M.D. and J.H. Lehr, *Water Well Technology*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, 1973, 681 pp.

Colangelo, R.V. and Upadhyay, H.D., The Origin and Physical Properties of Bentonite and Its Usage in the Ground-Water Monitoring Industry, Proceedings, Superfund 90, the 11th National Conference, Hazardous Materials Control Research Institute, Washington, DC, 1990.

Department of Environment of Yukon. Protocol For The Contaminated Sites Regulation Under The Environment Act Protocol No. 7. Yukon, Canada. 2019.

Elçi, A., Molz, F.J., Waldrop, W.R., 2001. Implications of observed and simulated ambient flow in monitoring wells. *Ground Water* 39 (6), 853–862.

Elçi, A.; Flach, Gregory P.; Molz, Fred J. Detrimental effects of natural vertical head gradients on chemical and water level measurements in observation wells: identification and control. *Journal of Hydrology*, v. 281, n. 1-2, p. 70-81, 2003.

Freeze, R.A. and J.A. Cherry, *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1979, 604 pp. Gates, W.C.B., Protection of ground-water monitoring wells against frost heave, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26(2), 241–251, 1989.

Howard, W.O., T.V. Danahy, and M. Ianniello, An Air-Lift Development System for Deep Wells; Proceedings of the Focus Conference on Eastern Regional Ground Issues, National Water Well Association. Dublin, OH, 1988, pp. 559–564.

Islam, M. Rafiqul; Hossain, M. Enamul. Drilling Engineering: Towards Achieving Total Sustainability. Gulf Professional Publishing, 2020.

Lacombe, S., Sudicky, E.A., Frape, S.K., Unger, A.J.A., 1995. Influence of leaky boreholes on cross-formational groundwater flow and contaminant transport. *Water Resources Research* 31 (8), 1871–1882.

National Sanitation Foundation (NSF), Plastic Piping Components and Related Materials, Standard Number 14, National Sanitation Foundation, Ann Arbor, MI, 2004.

Nielsen, D. M. Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Groundwater Monitoring. CRC Press 2nd. edition: 1383 p. 2005.

Nuckols, T.E. Development of Small Diameter Wells, Proceedings of the Fourth National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring and Geophysical Methods, National Water Well Association, Dublin, OH, 1990, pp. 193–207.

Piasecki, J., Pressure grouting the annular space: mixing and pumping equipment, National Driller, 2002.

Riyis, Marcos Tanaka. *Investigaçāo geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resoluçāo*: Marcos Tanaka Riyis. 2012.

Reichart, R.W., A Different Approach to the Development of Monitoring Wells; *Water Well Journal*, 1996, pp. 52–56.

Robbins, G. A. Influence of using purged and partially penetrating monitoring wells on contaminant detection, mapping, and modeling. *Groundwater*, v. 27, n. 2, p. 155-162, 1989.

United State Environmental Protection Agency - USEPA, Manual of Water Well Construction Practices, EPA-570/9-750-001, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1975, 156 pp.

Varljen, M. D., Barcelona, M. J., Obereiner, J., & Kaminski, D. (2006). Numerical Simulations to Assess the Monitoring Zone Achieved during Low-Flow Purging and Sampling. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 26(1), 44–52. doi:10.1111/j.1745-6592.2006.00029.x

Williams, C. and L.G. Evans, Guide to the Selection of Cement, Bentonite and Other Additives for Use in Monitor Well Construction, Proceedings of the First National Outdoor Action Conference, National Water Well Association, Dublin, OH, 1987, pp. 325–343.

Williams, E.B., Fundamental concepts of well design, *Ground Water*, 19(5), 527–542, 1981.

Yu, J.K., Should we use a well foot (sediment trap) in monitoring wells? *Ground-Water Monitoring Review*, 9, 59–60, 1989.