

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL**

ALEX FERREIRA BATISTA

REBAIXAMENTO TEMPORÁRIO DE AQUÍFEROS E A RECARGA ARTIFICIAL

João Pessoa – PB

2016

ALEX FERREIRA BATISTA

REBAIXAMENTO TEMPORÁRIO DE AQUÍFEROS E A RECARGA ARTIFICIAL

Monografia de Conclusão de Curso submetida à banca examinadora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito obrigatório à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes Soares

João Pessoa – PB

2016

ALEX FERREIRA BATISTA

REBAIXAMENTO TEMPORÁRIO DE AQUÍFEROS E A RECARGA ARTIFICIAL

Esta monografia foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Engenheiro Civil na Universidade Federal da Paraíba.

João Pessoa (PB), 15 de junho de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fábio Lopes Soares, Dr.
Orientador
(UFPB)

Prof. Dr. Ricardo Moreira da Silva
Avaliador
(UFPB)

Prof.^a Dr.^a Aline Flávia Nunes Remigio Antunes
Avaliadora
(UFPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que tem me proporcionado até hoje, me capacitando e me dando o presente de me tornar um engenheiro. Que toda honra e toda glória seja dada a Ele.

À minha família, em especial ao meu irmão Amyr Ferreira Batista, minha cunhada Jorlany Ferreira e meus tios, por me apoiarem e incentivarem em todos os momentos da minha vida. Vocês são parte da minha formação.

Também a duas pessoas especiais que são Ricardo Moreira e Josilene Moreira, por todo o carinho e apoio que me deram durante este processo, me ajudando e aconselhando nos momentos mais difíceis. Sou grato a Deus pela vida de vocês.

À minha namorada, Daniela Aires Moreira, pelas orações, apoio e cumplicidade durante todos esses anos, compartilhando dos momentos bons e ruins durante esta jornada. Agradeço a Deus por tê-la em minha vida.

Um agradecimento também ao professor Fábio Lopes Soares e a professora Aline Flávia pelo apoio e atenção dada a mim na produção desse trabalho.

Agradeço em especial a quem Deus me deu o privilégio de tê-la como mãe, Kimênia Ferreira da Silva, por ser uma guerreira e batalhadora desde que nasci, tendo um papel imensurável na minha formação, me apoiando e dando amor em todos os momentos. Hoje ela também é parte engenheira comigo. E a meu pai, João Batista da Silva Filho (In memoriam), exemplo de homem guerreiro e a quem agradeço os conselhos e lições dadas. Infelizmente não está mais entre nós, mas sempre será lembrado e sempre me servirá de inspiração. A eles a quem dedico esta vitória.

RESUMO

Em toda obra de engenharia é fundamental que se realize um estudo para conhecer as características do solo, dentre as quais está o do nível do lençol freático, que pode interferir diretamente na execução da obra. Quando o nível do lençol se encontra alto a ponto de interferir na execução da obra, faz-se necessário o rebaixamento do mesmo, retirando a água do subsolo de forma induzida, de maneira temporária ou permanente, a fim de proporcionar condições para serviços como obras de escavação, estabilização ou contenção do solo. No entanto, a técnica pode resultar na diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos, sendo a recarga artificial um aliado na diminuição desse efeito. O presente trabalho de conclusão de curso faz um estudo da recarga artificial e dos métodos tradicionais de rebaixamento de aquíferos com apresentação de uma aplicação de dimensionamento. É uma revisão sistemática realizada através do estudo da literatura e de bancos de dados de artigos científicos tanto nacionais quanto internacionais. Após uma explanação sobre cada sistema de rebaixamento e recarga, procedeu-se uma análise dos aspectos técnicos do rebaixamento temporário, de maneira a exemplificar o dimensionamento do sistema a ser executado em um canteiro de obras. Chega-se à conclusão que é necessário a inclusão da recarga artificial de aquíferos junto a técnica de rebaixamento temporário de lençol freático.

Palavras-chave: rebaixamento de lençol; recarga artificial, aquíferos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rebaixamento por bombeamento superficial direto	14
Figura 2 - Esquema de instalação da ponteira filtrante (“well point”)	15
Figura 3 - Esquema em planta das ponteiras filtrantes	15
Figura 4 - Aplicação de ponteiras filtrantes	16
Figura 5 - Rebaixamento por ponteiras em estágios	16
Figura 6 - Esquema de rebaixamento por poço profundo	17
Figura 7 - Sistema de rebaixamento por eletroseco	19
Figura 8 – Sistemas de bacia de recarga (Arizona, EUA)	22
Figura 9 - Esquema simplificado da bacia de infiltração	23
Figura 10 – Modelos de recarga artificial na zona não saturada	26
Figura 11 – Recarga artificial em profundidade	28
Figura 12 - Execução dos serviços com o rebaixamento implantado	30
Figura 13 - Desligamento da bomba e retorno do lençol ao nível original	31
Figura 14 - Ilustração do rebaixamento no terreno	32
Figura 15 - Esquema para dimensionamento da instalação	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Inventário de casos de recarga artificial no mundo por continente	11
Quadro 2 - Resumo das principais técnicas de recarga segundo autoreselo de Terra	22
Quadro 3 - Principais características da recarga artificial de aquíferos.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do rebaixamento com ponteiros filtrantes para sapata com escavação de 5,5 m.....	32
Tabela 2 - Resultados do rebaixamento com ponteiros filtrantes.....	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Definição do tema e do problema.....	9
1.2 Justificativa do tema.....	10
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo Geral.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos.....	12
1.4 Estrutura do trabalho.....	12
2 METODOLOGIA.....	Erro! Indicador não definido.
2.1 Técnica Metodológica.....	Erro! Indicador não definido.
3 REBAIXAMENTO DE LENÇOL FREÁTICO.....	13
3.1 Métodos de rebaixamento de lençol freático.....	13
3.1.1 Bombeamento direto superficial.....	14
3.1.2 Ponteiros drenantes (“well points”).....	14
3.1.3 Bombeamento por poços profundos.....	17
3.1.4 Sistema à vácuo.....	18
3.1.5 Bombeamento por eletrosmose.....	18
4 RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS.....	20
4.1 Considerações sobre recarga artificial de aquíferos.....	20
4.2 Métodos de recarga de aquíferos.....	21
4.3 Custos associados à Recarga Artificial de Aquíferos.....	29
5 APLICAÇÃO.....	30
5.1 Localização da obra.....	30
5.2 A obra.....	30
5.3 Dimensionamento de uma instalação de rebaixamento por ponteiros.....	31
5.4 Memorial de cálculo para o dimensionamento de uma instalação de rebaixamento por ponteiros filtrantes.....	33
5.5 Considerações da aplicação da recarga artificial de aquíferos no canteiro de obras.....	34
6 CONCLUSÃO.....	35
7 REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da definição do tema e do problema de pesquisa, bem como da justificativa do trabalho proposto. São também mostrados o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura do trabalho.

1.1 Definição do tema e do problema

O controle de águas subterrâneas é um dos problemas mais recorrentes encontrados dentro de um canteiro de obras. Rebaixar o lençol freático do terreno pode se tornar um sério inconveniente se esta etapa não for bem planejada durante o projeto, chegando a inviabilizar a execução caso não haja a drenagem correta do subsolo. Sendo assim, Alonso (1999) afirma que os sistemas de rebaixamento ajudam na melhoria das condições de trabalho ao executar a obra, evitando ruptura de taludes, infiltração de água nas escavações e auxiliando na compactação do solo, do qual é retirada a água, destinando-a para outro lugar, geralmente bocas de lobo ou valas.

Segundo Gaioto (1997), para o controle das águas do lençol freático requerido pelas obras subterrâneas, podem ser utilizados dois critérios básicos, isoladamente ou em combinação: (a) isolar as águas por meio de paredes ou cortinas, (b) promover a sua drenagem através de sistemas de rebaixamento.

Na maioria dos contratos, o rebaixamento é de responsabilidade do contratante, que após análise técnica prévia das condições do solo, determina o método a ser utilizado. Sendo responsável pela sua concepção, instalação e operação. São fatores que influenciam diretamente na construção da estrutura: permeabilidade do solo, profundidade da escavação, posição natural do lençol freático, importância da obra a ser executada, duração do rebaixamento e condições das obras e das fundações situadas próximas ao rebaixamento.

Iniciado o rebaixamento através das bombas, a água retirada é destinada geralmente para as bocas de lobo, onde o sistema de drenagem local, quando houver, dará a destinação final da mesma.

Esta água geralmente não é reinserida no lençol somado a um crescente número de obras e, conseqüentemente, processos de rebaixamento numa mesma área, acabam por gerar um impacto ambiental considerável diretamente no aquífero ao qual está sendo rebaixado, afetando a disponibilidade dos recursos hídricos e sua qualidade.

Diante desta problemática, o presente trabalho visa levantar o estado da arte sobre o rebaixamento temporário de aquíferos com o uso de recarga artificial com apresentação de uma aplicação de dimensionamento.

1.2 Justificativa do tema

Apesar das técnicas de rebaixamento mais tradicionais como bombeamento direto, ponteiros filtrantes e por poços profundos serem bastante utilizadas no Brasil, a recarga artificial de lençol, responsável por reinserir a água novamente no subsolo não é comumente encontrada nos rebaixamentos em execução. Indicando que não é difundida em igual proporção ao rebaixamento de lençol, tratando-se de uma técnica nova a ser inserida no processo.

Embora sendo uma técnica nova na região, Diamantino (2005) indica que esta técnica de gestão de aquíferos já é frequentemente aplicada a nível internacional, tendo como objetivo aumentar a disponibilidade das águas subterrâneas e melhorar a sua qualidade de forma a contribuir com um sistema aquífero mais racional possível de um modo economicamente viável.

Para Barbosa & Mattos (2005) embora haja o consenso da importância dos recursos hídricos subterrâneos, principalmente, no que tange o abastecimento urbano, industrial e agrícola, ainda existem atividades humanas que causam impactos negativos sobre eles, como é o caso da construção civil. A falta de políticas de zoneamento, planejamento e urbanização territorial causam a impermeabilização das áreas naturais de recarga e concentram o fluxo superficial da água, gerando problemas como enchentes e inundações. Associado a falta de recarga, causada pela impermeabilização, encontramos a extração demasiada da água subterrânea que pode causar o esgotamento do recurso inviabilizando-o para posterior utilização.

Não indiferente a estes problemas, os órgãos públicos têm-se utilizado de taxas compensatórias como forma de mitigar os impactos ambientais decorrentes da construção civil. Taxas estas que chegam a 0,5% do valor da obra¹, a exemplo da taxa aplicada pela Secretaria de Meio Ambiente da cidade de Fortaleza-CE em 2012.

É necessário utilizar técnicas que preservem o sistema aquífero, reinsiram com o passar do tempo os volumes que foram captados durante os anos e resgatem seus níveis

¹ Disponível em: <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/cobranca-da-taxa-compensatoria-aquece-polemica-1.579809> Acesso em: 18 fev. 2016.

de pressão. Uma alternativa que vem sendo adotada em áreas com a falta de água, como o Oeste dos EUA e Israel é o aproveitamento das águas servidas, dos rios ou de chuvas para a recarga artificial (PYNE, 1994).

Não apenas tecnicamente esse trabalho se justifica, mas também na sua ótica acadêmica, pois foram pesquisados nos portais Science Direct, Web Of Science e Scopus, onde foram encontrados muito poucos artigos (apenas dois, mas nenhum com aplicação) referentes ao rebaixamento com o uso de recarga artificial.

De fato, esse tema ainda é pouco estudado, tanto que a pesquisa feita por Diamantino (2007), com base no banco de dados do Global Groundwater Information System, mostra que há pouquíssimos casos no Brasil, conforme pode se ver no quadro abaixo:

Quadro 1 – Inventário de casos de recarga artificial no mundo por continente

Nº de casos/ continente	América	Ásia	Africa	Europa	Oceânia
>30	Estados Unidos (Arizona, Texas, Florida, Colorado, Califórnia, Utah, Nevada, etc)	Índia		Holanda	Austrália
10-30		China		Espanha	
5-10		Nepal República Islâmica do Irão Emirados Árabes Unidos Omã Jordânia	Etiópia África do Sul Burkina Faso	Alemanha Hungria	
<5	Canadá México Peru Brasil Paraguai Argentina	Rússia Arábia Saudita Israel Territórios Ocupados da Palestina República Árabe Síria Japão	Marrocos Tunísia Egipto Sudão Chade Nigéria Mali Serra Leoa Camarões Somália Quênia República Unida da Tanzânia Malawi Namíbia	Reino Unido França Suíça Áustria Polónia Finlândia Eslovénia Sérvia e Montenegro Roménia Eslováquia República Checa Letónia	

Fonte: Global Groundwater Information System adaptado por Diamantino, (2007)

Logo, pretende-se tecnicamente e academicamente preencher essa lacuna, e se espera que este estudo contribua para a ampliação das discussões em torno da recarga artificial de aquíferos, evidenciando sua importância e relação direta com a diminuição dos impactos ambientais no setor da construção civil. Buscando ainda contribuir com a

conscientização de métodos que tornem mais sustentáveis e economicamente viáveis o rebaixamento de aquíferos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Fazer uma revisão bibliográfica do rebaixamento temporário de aquíferos e a recarga artificial, com apresentação de um estudo de caso.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Conhecer os principais métodos utilizados no rebaixamento de lençol e recarga artificial de aquíferos;
- Demonstrar uma aplicação de dimensionamento de recarga no canteiro de obras;
- Identificar os elementos que devem ser analisados para se definir um projeto de recarga no canteiro de obras;
- Analisar algumas aplicações da recarga artificial, e
- Apresentar uma aplicação de dimensionamento.

1.4 Estrutura do trabalho

Este estudo está estruturado em 6 capítulos. O primeiro capítulo apresenta os fatores que conduziram ao problema de pesquisa, bem como os aspectos que justificam a relevância do tema proposto e os objetivos que norteiam a execução do trabalho.

No segundo capítulo são relatados os procedimentos metodológicos utilizados, caracterizando a pesquisa e apresentando o método utilizado para a seleção do material de pesquisa. O terceiro capítulo apresenta o perfil das execuções de rebaixamento, ilustrando cada uma das técnicas de maneira objetiva.

No quarto capítulo são apresentados os principais métodos de recarga artificial de aquíferos. O quinto capítulo apresenta uma aplicação de rebaixamento dentro do canteiro de obras. Por fim, no sexto capítulo são apontadas as considerações finais, apresentando as conclusões, limitações da pesquisa e sugestões para futuras pesquisas.

3 REBAIXAMENTO DE LENÇOL FREÁTICO

O rebaixamento de lençol é uma técnica bem comum em obras que necessitam de escavações nas quais a área a ser escavada encontram-se abaixo do nível de água do subsolo. A técnica se dá, geralmente, por bombeamento superficial ou por canaletas que coletam a água e a destinam para poços que então bombeiam a água para fora da escavação. (Gaioto, 1997):

Dentre os principais objetivos do rebaixamento, podemos destacar:

- Interceptar a percolação e rebaixar o lençol freático;
- Melhorar as condições de estabilidade de taludes, evitando escorregamento e reduzindo as dimensões da área requerida para a obra;
- Evitar levantamento do fundo da escavação ou liquefação do solo sob influência da percolação da água;
- Garantir que o solo no fundo da escavação mantenha sua densidade e características de compactação;
- Reduzir a umidade de solos em áreas de empréstimo, para garantir as suas condições de compactação no aterro;
- Reduzir os empuxos de terra sobre paredes de escoramento;
- Reduzir as pressões de ar comprimido quando esse processo é utilizado na escavação de túneis, fundações e etc.

3.1 Métodos de rebaixamento de lençol freático

Os principais tipos de rebaixamento de lençol freático são: bombeamento direto superficial, ponteiros drenantes (well-points), poços profundos, sistema à vácuo e drenagem por eletrosmose. A seguir, veremos como se procede cada um destes métodos.

3.1.1 Bombeamento direto superficial

Esta técnica é realizada próxima ao pé do talude e consiste em conduzir a água por gravidade até os poços, de onde a mesma vai ser bombeada até um local adequado para sua descarga (cursos de água, coletores de esgoto, etc.), por bombeamento ou por gravidade, conforme ilustrado na Figura 1.

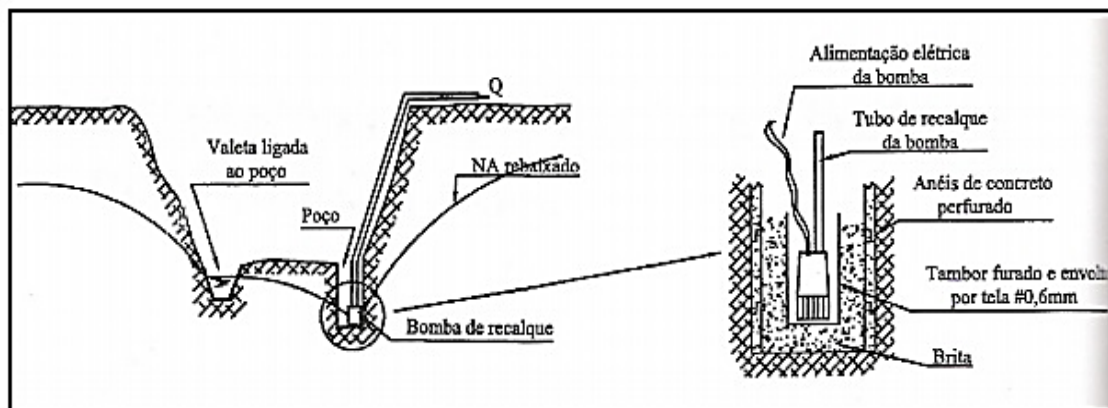


Figura 1 - Rebaixamento por bombeamento superficial direto

Fonte: Alonso (1999)

Deve-se tomar cuidado para evitar que os finos do terreno sejam arrastados e bombeados, para não criar riscos de instabilidade nas paredes e no fundo do poço e talude, para não gerar desgaste no sistema de bombeamento.

Segundo Gaioto (1997) esse método não deve ser utilizado quando existir nas proximidades obras que possam ser afetadas por problemas de instabilidade das paredes da escavação, e quando o rebaixamento deve ser mantido por um período prolongado.

3.1.2 Ponteiras drenantes (“well points”)

Segundo Gaioto (1997) as ponteiras são constituídas de tubos pequenos que geralmente possuem diâmetro de 2”, com cerca de 1 metro de comprimento, perfurados e envolvidos por uma malha de pequena abertura ou por geotêxtil.

Marangon (2004) afirma que a instalação das ponteiras geralmente é feita com jatos de água através da própria ponteira e que na impossibilidade de se dispor de água em abundância para esse tipo instalação ou em solos de pouca permeabilidade, executa-se a abertura de um furo com 150mm de diâmetro, colocando-se no seu interior a ponteira, envolvida por material filtrante adequado conforme a Figura 2.

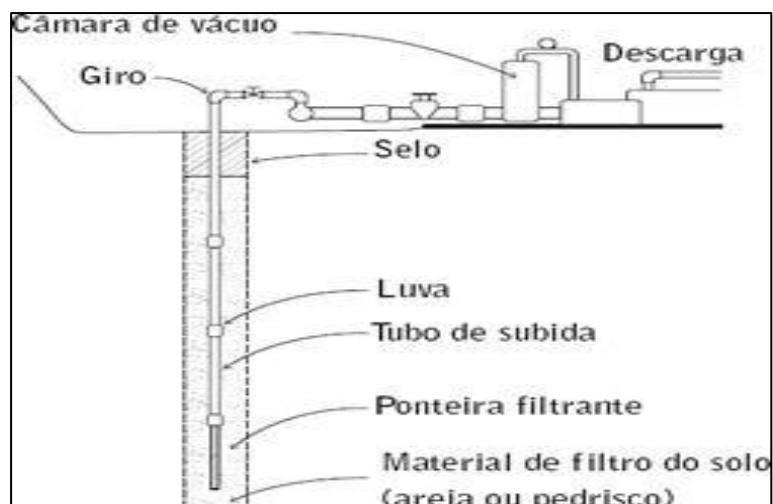


Figura 2 - Esquema de instalação da ponteira filtrante ("well point")

Fonte: Pini (2011)

As ponteiras são cravadas na periferia da escavação, espaçadas de 1 a 3 metros, ligadas através de um sistema de bombas distribuídas conforme a Figura 3 para que se mantenha a alternância entre as bombas quando houverem possíveis manutenções.

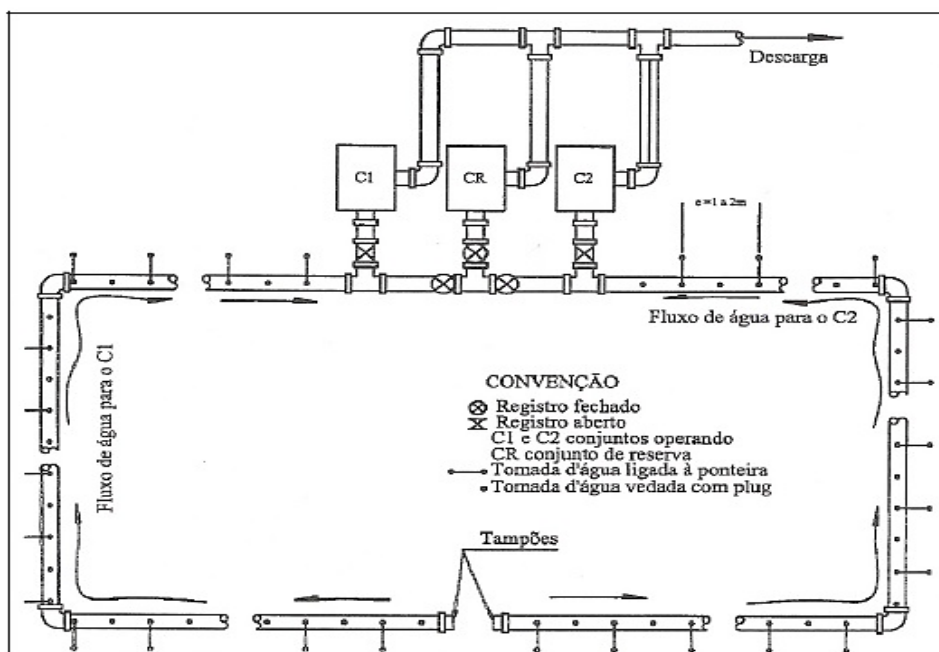


Figura 3 - Esquema em planta das ponteiras filtrantes

Fonte: Alonso (1999)

Em solos menos permeáveis as ponteiras podem ser instaladas dentro de poços de maior diâmetro, ficando envolvidas por material de filtro adequado.



Figura 4 - Aplicação de ponteiras filtrantes

Fonte: Marroni (2014)

Para Alonso (1999), apesar do nível máximo de sucção desse sistema ser em torno de 10,33m, o rebaixamento máximo na prática é de 6 a 7 metros. Logo, quando a profundidade da área a ser rebaixada é maior que 7 metros é necessário fazer o rebaixamento em estágios, conforme a figura 5.

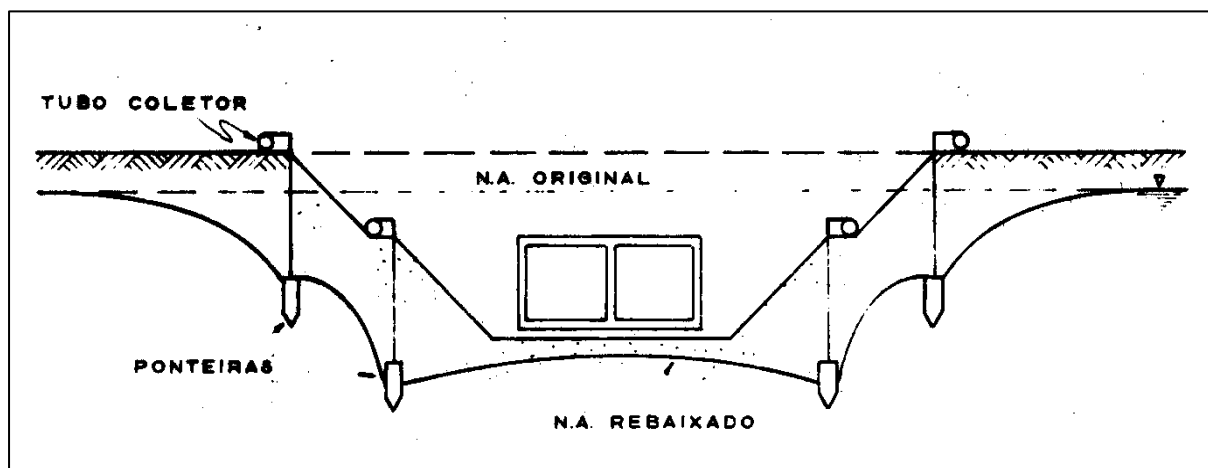


Figura 5 - Rebaixamento por ponteiras em estágios

Fonte: Gaioto (1997)

Segundo Dobereiner e Vaz (1998), as “well points” evitam o carreamento de partículas de solo, comum no bombeamento direto, e conseqüentemente o efeito do piping. Acrescenta-se a isso a possibilidade de restringir o rebaixamento do lençol

freático ao perímetro de influência das ponteiros, evitando-se assim rebaixamentos indesejáveis.

3.1.3 Bombeamento por poços profundos

O bombeamento por poços profundos é utilizado quando se precisa de um rebaixamento a grandes profundidades, sendo suas vazões de recalque, segundo Gaioto (1997) superiores a $50\text{m}^3/\text{h}$ e alturas de recalque da ordem de 100m.

Neste sistema, segundo indicação de Alonso (1999) os poços são executados com diâmetro entre 40 e 60 cm, nos quais é inserido um tubo de aço de 20 a 30 cm de diâmetro, fechado na base e perfurado ao longo de uma certa altura, que constitui o trecho drenante do poço. Na parte inferior desse tudo é instalada uma bomba centrífuga, de eixo vertical, acoplada a um motor elétrico (bomba submersa), no qual é instalado um sistema de relés, que é acionado quando o nível da bomba da bomba atinge um determinado nível máximo e desliga quando atinge um nível mínimo que garante o funcionamento contínuo e submerso da bomba. Observa-se na Figura 6 que a variação entre o nível máximo e mínimo do nível d'água dentro do poço é de 1m.

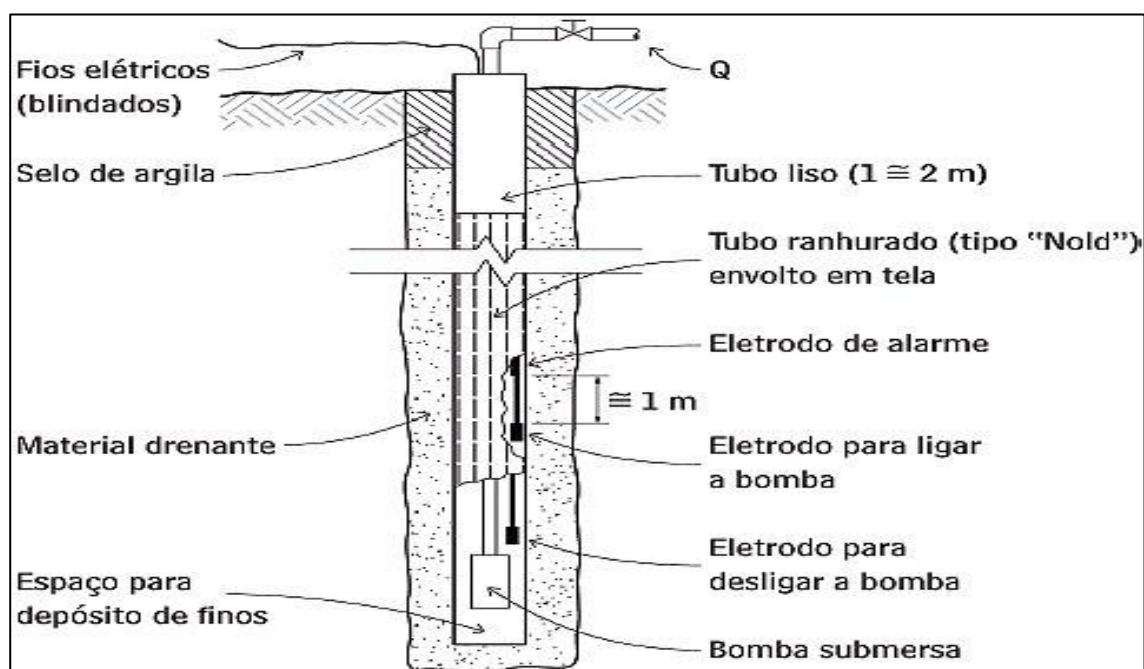


Figura 6 - Esquema de rebaixamento por poço profundo

Fonte: Pini (2011)

Nos sistemas de poços profundos, ao invés de bombas submersas, também pode ser utilizado injetores para esgotamento dos poços, ficando as bombas instaladas na superfície.

É de grande importância desenvolver uma etapa de escavação detalhada junto com a empresa responsável pela execução do serviço, determinando a exata posição do nível d'água, incluindo levantamento topográfico e cadastral, com informações relacionadas à posição e às condições da vizinhança. Isso porque, no caso de rebaixamento de lençol freático, há o risco de que construções com fundações diretas simples, como alicerces ou sapatas corridas, sofram danos estruturais graves, com recalques e fissuras nas estruturas.

3.1.4 Sistema à vácuo

Segundo Gaioto (1997), este tipo de sistema é utilizado quando o solo tem baixa permeabilidade ($k=10^{-5}$ cm/s) e pode ser utilizado tanto pelo sistema de ponteiros, quanto por poços profundos.

Alonso (1999) descreve o processo a vácuo, na qual a bomba retira o ar, reduzindo a pressão atmosférica no interior da tubulação ou da câmara, fazendo a sucção da água do solo por intermédio das ponteiros filtrantes.

A aplicação de vácuo nos sistemas de rebaixamento provoca uma diferença de pressão entre o interior do poço e a água que está envolto ao subsolo sob pressão atmosférica, fazendo com que a mesma percole para dentro do poço e conseqüentemente seja retirada por bombeamento.

3.1.5 Bombeamento por eletrosmose

Segundo Caputo (1987) o rebaixamento por eletrosmose foi amplamente desenvolvido por Leo Casagrande na década de 40. Para Gaioto (1997) o bombeamento por eletrosmose é utilizado quando se tem um solo muito fino, tais como siltes, siltes argilosos e areias finas silto-argilosas, com coeficiente de permeabilidade muito baixo, onde os métodos de rebaixamento anteriormente descritos são inoperantes. Para aumentar a eficiência do sistema, utiliza-se o método da eletrosmose, combinando poços ou ponteiros com um fluxo de eletricidade no solo.

Grandis (1998) descreve que o processo se dá através de dois eletrodos cravados no solo saturado, com uma passagem de corrente contínua entre ambos, onde a água

contida nos vazios migra do eletrodo positivo (ânodo) para o negativo (cátodo). Fazendo com que o cátodo atraia as partículas positivas da água até serem removidas por bombeamento. Na figura 7 vemos o princípio do funcionamento da drenagem por eletrosmose, onde segundo Gaioto (1997) pode ser utilizado em maciços saturados, já que como visto na figura, a água se descola em relação às ponteiros instaladas fora da escavação.

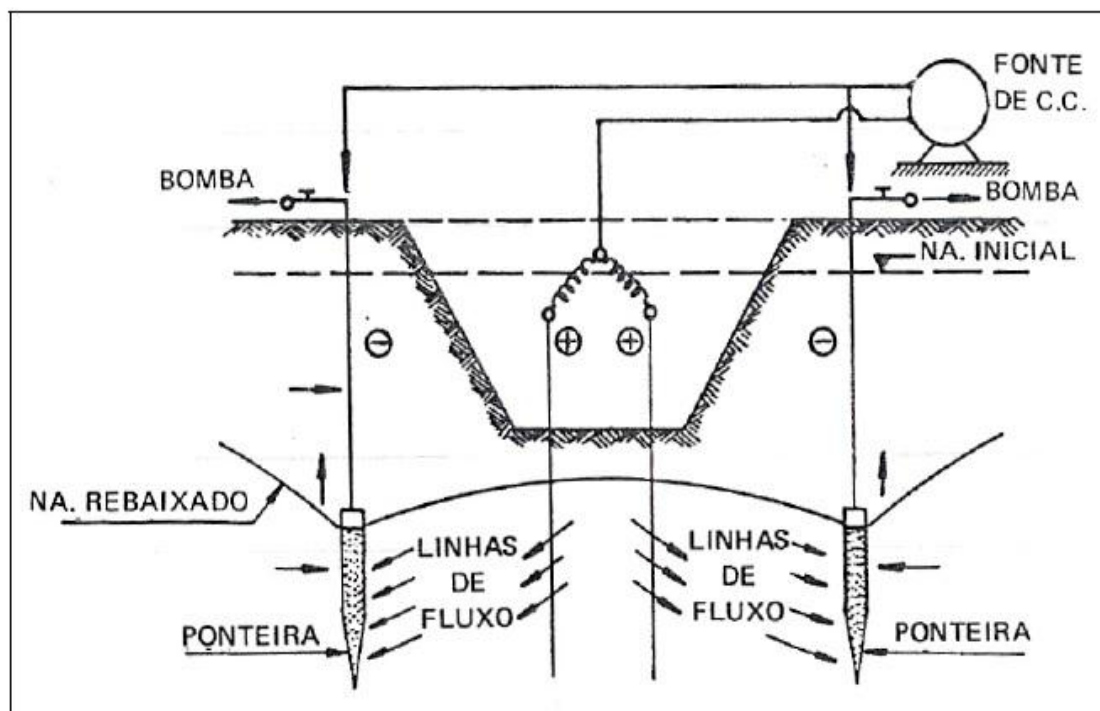


Figura 7 - Sistema de rebaixamento por eletrosmose

Fonte: Caputo (1987)

Há de se destacar que segundo Grandis (1998) é um processo de rebaixamento com considerável demanda energética, não sendo interessante seu uso em longo prazo, devido ao custo elevado, sendo uma técnica de pouco uso no Brasil.

4 RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS

4.1 Considerações sobre recarga artificial de aquíferos

Define-se como recarga artificial um conjunto de técnicas que permitem, mediante intervenção programada e introdução direta ou induzida de água em um aquífero, afim de obter com um certo grau de garantia, a disponibilidade dos recursos hídricos, assim como sua qualidade (Díaz, et al., 2000). Já Todd (1959) define recarga artificial como o modo utilizado para aumentar a quantidade de água que se infiltra num reservatório subterrâneo.

Afirmado isto, podemos entender que a recarga artificial de aquíferos se dá de maneira controlada e que ela se diferencia dos métodos de armazenamento superficial da água, pois o objetivo da recarga é fazer a reinserção diretamente no lençol, recarregando ou armazenando a água, melhorando inclusive a sua qualidade. Podemos acrescentar ainda que as vantagens da recarga artificial em relação ao armazenamento superficial são evitar a evaporação, visto que o aquífero é subterrâneo e também evitar a proliferação de algumas doenças.

A recarga artificial de aquíferos pode ter diversas aplicações, entre as quais se destacam as seguintes (Díaz et al. 2000):

- O volume de água armazenado no aquífero durante a estação chuvosa pode ser utilizado durante a estação seca, quando a demanda cresce.
- Armazenamento subterrâneo das águas de escorrência superficial não reguladas;
- Redução ou eliminação do rebaixamento da piezometria no aquífero;
- Redução nos custos de transporte, armazenamento e bombeamento de água subterrânea;
- Ação sobre problemas de subsidência;
- Diminuição ou controle de problemas de intrusão salina que afetam alguns aquíferos costeiros;
- Aproveitamento das propriedades depuradoras do solo e da zona não saturada do solo como forma de tratamento de águas potáveis ou residuais;
- Melhoria da qualidade da água através da remoção de sólidos suspensos pela filtração pelo solo;

Dentre os principais problemas que podem ocorrer devido a recarga artificial de aquíferos estão:

- A colmatção do solo devidos aos sólidos suspensos na água;
- Contaminação química ocasionada pelo processo de bombeamento;
- Contaminação biológica do aquífero por microorganismos;
- Diminuição da resistência em solos colapsíveis;

Todos estes fatores devem ser observados com o devido cuidado e importância, sendo fatores fundamentais a considerar no desenvolvimento do projeto.

4.2 Métodos de recarga de aquíferos

Existem diversos métodos para a recarga artificial de aquíferos os quais podem ser combinados entre si. Dentre eles, podemos destacar: recarga direta, onde a água é inserida direto no lençol, e indireta, onde a água penetra por infiltração através do aumento do gradiente hidráulico (Silva, 2004). Como vemos no Quadro 2, as definições entre as principais técnicas variam de autor para autor.

Quadro 2 - Resumo das principais técnicas de recarga segundo autores

Sistemas de Recarga Artificial de Aquíferos	
Autor	Métodos de recarga
Díaz et al. (2000)	Recarga superficial
	Recarga profunda
Gale et al. (2002)	Recarga superficial
	Recarga na zona não saturada
	Recarga profunda
Bouwer (2002)	Infiltração superficial
	Infiltração na zona não saturada
	Infiltração profunda (por furos)
	Sistemas de recarga combinados
UNEP (1998)/ Asano (1985)/ O'Hare et al. (1986)	Recarga direta superficial
	Recarga direta em profundidade
	Recarga combinada (direta e profunda)
	Recarga Indireta

Fonte: Do autor, adaptado de Diamantino (2007)

Para efeito didático, consideramos nesse trabalho a classificação de Gale et al. (2002), a qual mostramos a seguir:

I - TÉCNICAS DE RECARGA DIRETA SUPERFICIAL

a) **Bacias de infiltração ou de recarga**

É uma das técnicas de maior eficácia para aquíferos superficiais, pois permite um uso eficiente do espaço com baixo custo de manutenção. Este método necessita da disposição de água em bacias escavadas no solo para que ocorra a infiltração e consequentemente a recarga. Bower (1996, apud Silva 2004) indica que para uma maior eficácia do processo de recarga, os seguintes aspectos devem ser verificados: a disponibilidade de uma área de solo permeável, a presença de uma zona não saturada sem camadas impermeáveis, a presença de um aquífero freático, a ausência de zonas contaminadas na zona não saturada e no aquífero e a manutenção de um nível de água sob estes solos. Na Figura 8 podemos observar um sistema de bacias de infiltração implantado no Arizona, Estados Unidos e na Figura 9 um esquema simplificado de como essa recarga se dá.



Figura 8 – Sistemas de bacia de recarga (Arizona, EUA)
Fonte: site do Water Resources Research Center, 05/2016.

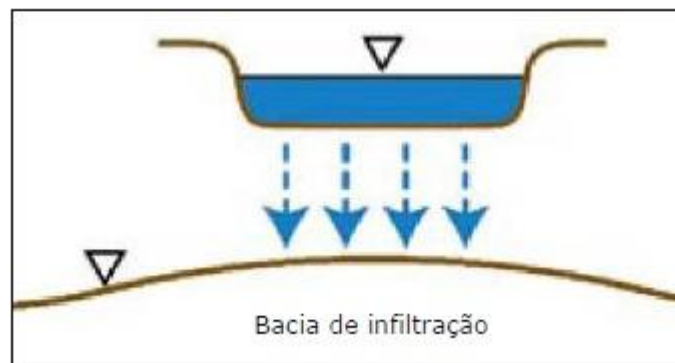


Figura 9 - Esquema simplificado da bacia de infiltração

Fonte: Diamantino, 2007, extraído de Galle e Dillon, 2005.

b) Represas perenes

As represas perenes coletam consideráveis quantidades de água e têm grandes profundidades, podendo ser utilizadas quer como fonte de água para irrigação direta quer como sistemas para aumentar a recarga de aquíferos. Segundo Diamantino (2007) a deposição de silte durante sucessivos períodos de descarga de água conduz a uma redução da eficiência da estrutura de recarga. Gale et al. (2002, apud Diamantino, 2007) complementa afirmando que a taxa de evaporação é elevada, uma vez que se trata de uma estrutura aberta e que todos esses fatores devem ser analisados de modo a assegurar que funcionem adequadamente como estruturas de recarga ou de armazenamento de água.

c) Valas e canais

Uma vala pode ser descrita como uma trincheira longa e estreita, sendo a sua largura inferior à sua profundidade (O'Hare et al. apud Silva, 2004). Um sistema de valas pode ser dimensionado para se adaptar à topografia e às condições geológicas existentes em determinado local. Segundo Díaz et al. (2000), valas são extensos sistemas com uma determinada largura e pouca profundidade, no quais a face laterais são mais importantes do que o fundo, realizando-se a infiltração preferencialmente pelos flancos da estrutura. O mesmo autor também dá o nome de balsas a sistemas semelhantes às valas, só que nestes a infiltração faz-se essencialmente pelo fundo da estrutura. Refere-se ainda aos canais que normalmente são pouco profundos e que acompanham a topografia do terreno, nos quais a infiltração pode ocorrer tanto nos flancos da estrutura como no fundo.

d) Sistemas de recarga por irrigação

Os sistemas de irrigação são frequentemente uma forma de recarga não intencional de aquíferos, geralmente utilizadas em zonas áridas e semiáridas onde a percolação para o lençol se dá essencialmente na lixiviação de sais a partir da zona das raízes das plantas. Díaz et al. (2000, apud Diamantino, 2007, p. 19) define por “terrenos extensos” um tipo de sistema de recarga similar que consiste na descarga de água numa grande superfície do terreno, geralmente através da aplicação de rega. Neste tipo de recarga não existem custos adicionais para a preparação do terreno uma vez que já está instalado no local um sistema de distribuição da água. (Gale et al., 2002). Na Figura 10 podemos observar de forma geral os sistemas de recarga direta superficial.

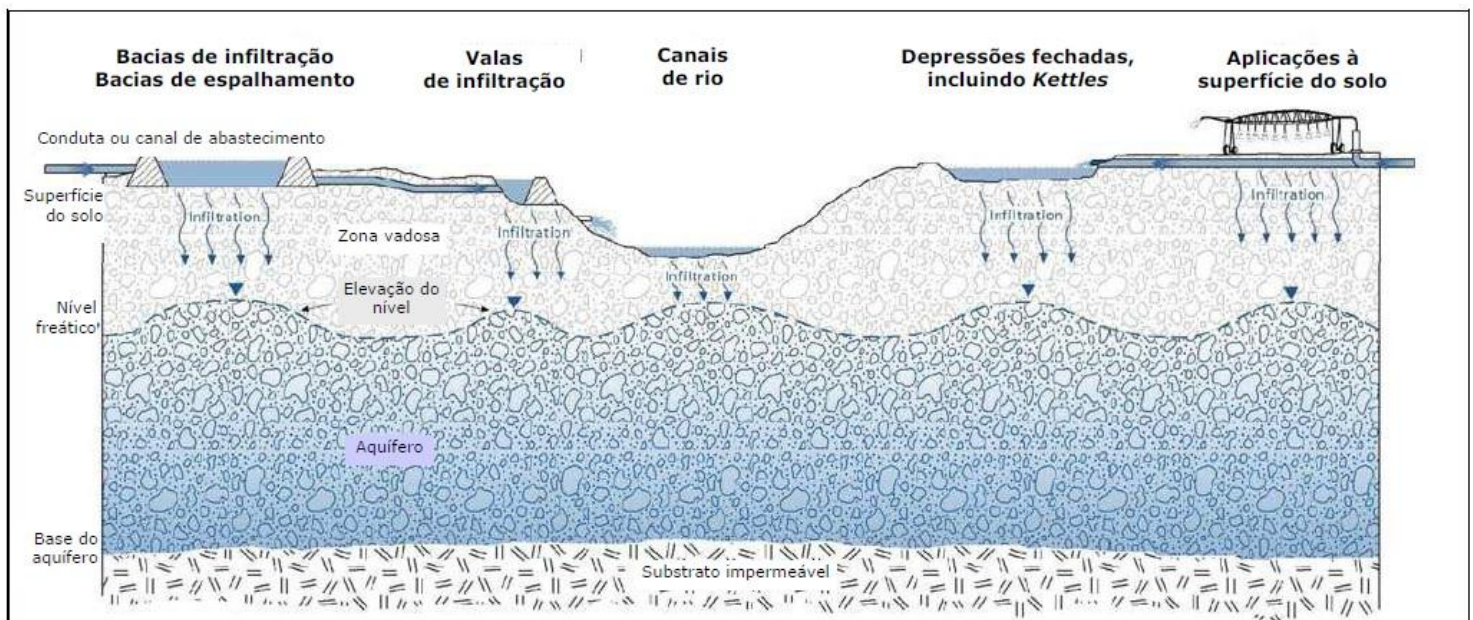


Figura 10 – Modelos de recarga artificial na zona não saturada

Fonte: Topper et al., 2004, Diamantino, 2007.

II - TÉCNICA DE RECARGA NA ZONA NÃO SATURADA

a) Poços na zona não saturada

São perfurações com cerca de 10 a 50 metros de profundidade e com 1 a 2 metros de diâmetro (Díaz et al., 2000). Quando o aquífero freático se encontra a uma profundidade elevada a utilização deste tipo de furos é mais econômica do que a utilização de furos de recarga. São normalmente perfurados em zonas permeáveis da

zona não saturada. Para que a recarga se proceda de forma apropriada estes furos deverão penetrar na zona de formações permeáveis uma distância adequada.

b) Trincheiras de infiltração

Quando os solos à superfície do terreno não estão disponíveis, mas existem níveis permeáveis em profundidade, sendo esta profundidade compreendida entre 5 a 15 m, não se deve recorrer à utilização de furos na zona não saturada, mas sim uma solução mais econômica nomeadamente através da construção de trincheiras de infiltração. As trincheiras são escavações alargadas com 1 metro de largura e cerca de 10 metros de profundidade (Díaz et al., 2000). As trincheiras são preenchidas com areia grosseira ou cascalho fino, que facilita a infiltração da água de recarga. A trincheira deve ser tapada para proteger do sol, animais e pessoas. A água de recarga deverá conter baixo teor de sólidos suspensos. Os principais problemas são essencialmente relativos à colmatação do sistema e as soluções apresentadas para os poços secos são igualmente válidos no caso das trincheiras.

c) Aquíferos artificiais

Os aquíferos artificiais são essencialmente filtros de areia que se destinam à recarga do aquífero ou ao tratamento de águas de má qualidade. Estes sistemas de recarga ou de tratamento são construídos pela escavação de um poço, com cerca de 2 metros de profundidade, que se enche com areia ou outro material permeável; o revestimento lateralmente é feito com material plástico e o fundo coberto com um nível de cascalho ou de tubos drenantes.

A recarga ou o tratamento realiza-se através da descarga do efluente no aquífero por curtos períodos de tempo. Depois o sistema deixa-se a secar o tempo suficiente para que se forme uma capa colmatada, com aberturas e de fácil remoção (Díaz et al., 2000). O fluxo de saída do dreno ou é descarregado nos cursos de água superficiais ou é utilizado para rega ou para outro fim destinado a águas não potáveis.

Podemos ver na Figura 11 exemplos de recarga na zona não saturada.

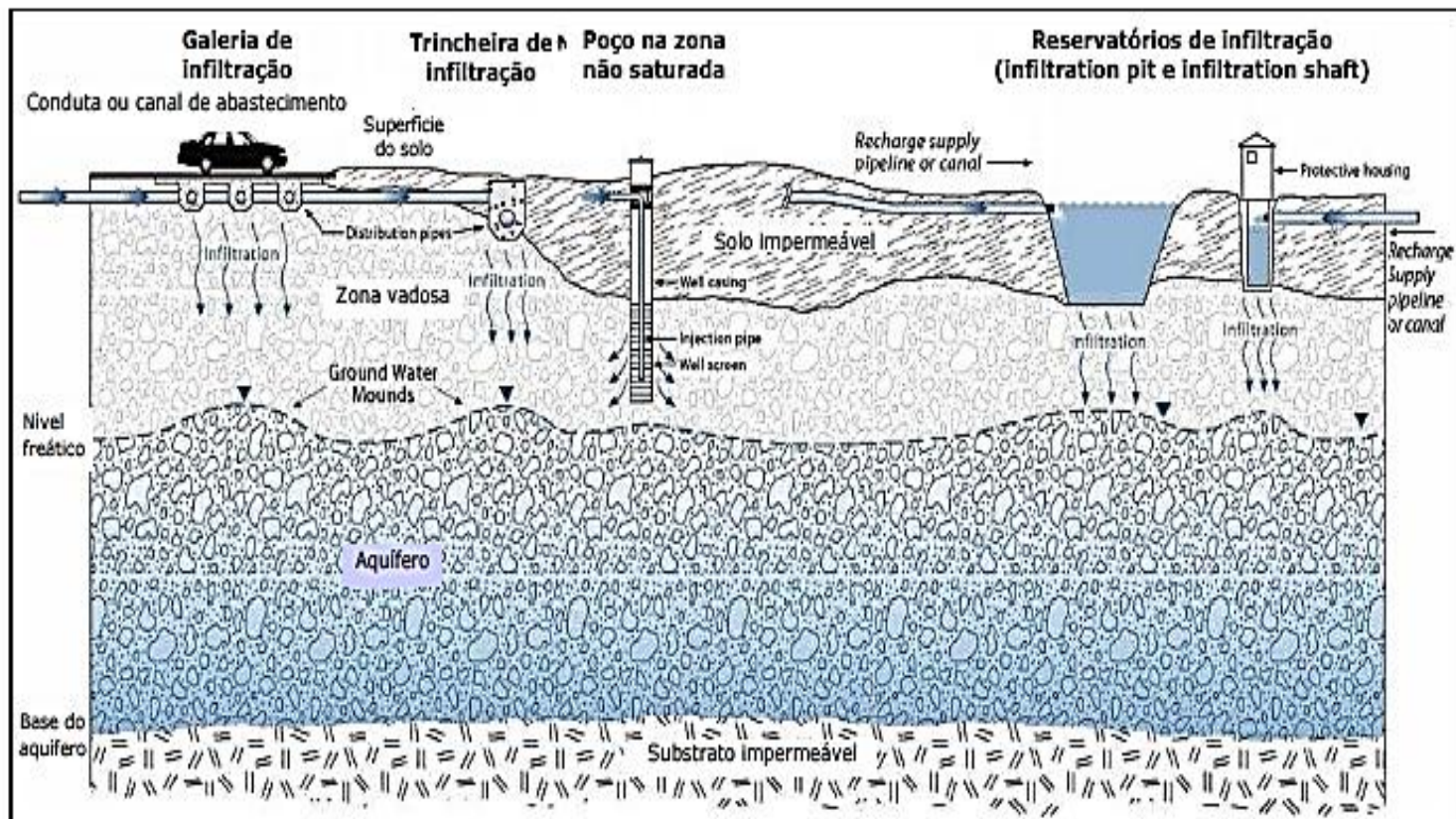


Figura 11 – Modelos de recarga artificial na zona não saturada

Fonte: Topper et al., 2004, Diamantino, 2007.

Segundo Topper (2004, apud Diamantino, 2007), essa técnica é utilizada quando não se consegue infiltrar no solo de cobertura ou quando o espaço disponível para outro tipo de recarga é insuficiente.

III - MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL EM PROFUNDIDADE

a) Poços de armazenamento subterrâneo e de recuperação

Uma variante dos poços de injeção são os poços de armazenamento subterrâneo e de extração de água. Constitui uma técnica de recarga artificial recente que requer a utilização de poços combinados de recarga e de extração de água. Estes poços destinam-se à recarga do aquífero em períodos de maiores disponibilidades hídricas. Os requisitos de qualidade da água de recarga são significativamente mais elevados no caso de poços de injeção do que nos sistemas de recarga à superfície do solo e a tecnologia necessária para a construção deste tipo de estruturas requer alguma complexidade.

No entanto, no caso de furos utilizados quer para injeção quer para extração de água os custos são minimizados e a recuperação dos poços, no caso de colmatção, é resolvida após a extração de água do poço (Gale et al., 2002). Na Figura 12 podemos observar, de forma geral, como se dá o sistema por recarga em profundidade.

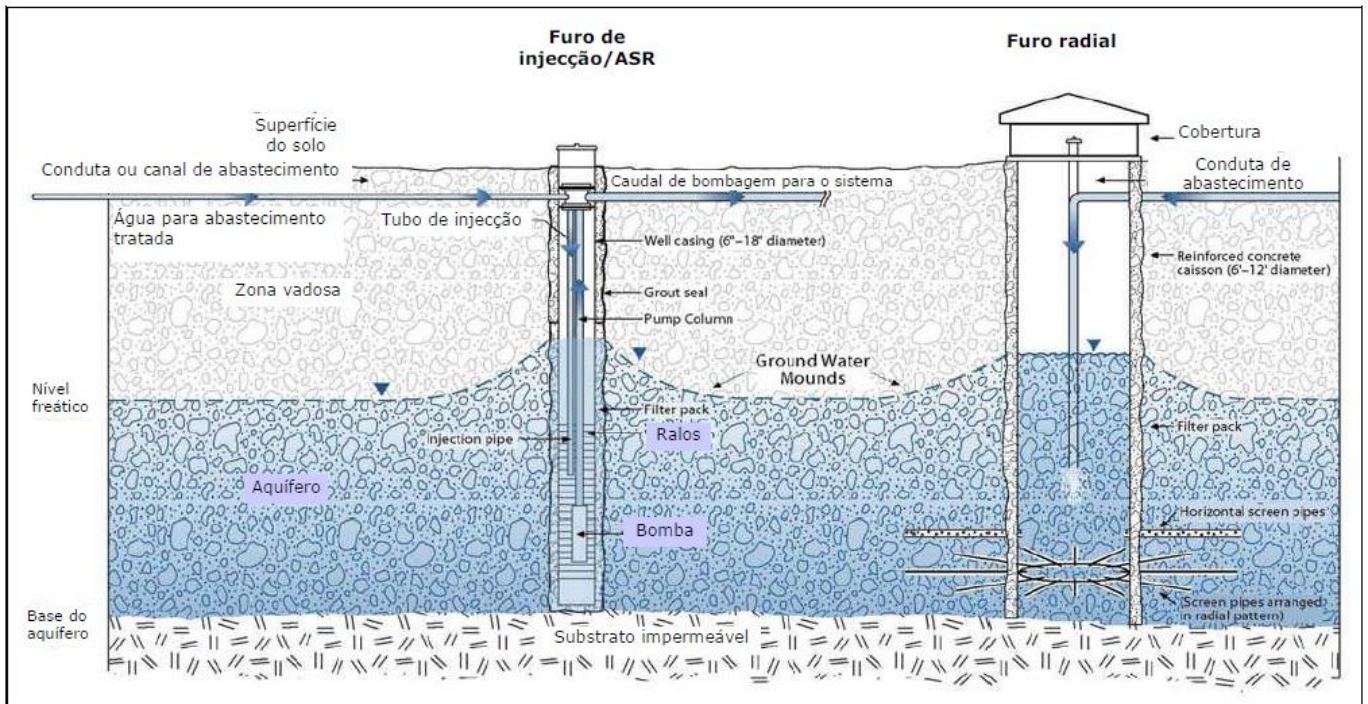


Figura 12 – Modelos de recarga artificial na zona não saturada

Fonte: Topper et al., 2004, Diamantino, 2007.

b) Poços conjuntivos

Um poço conjuntivo significa que tem ralos abertos quer no aquífero superficial confinado quer no aquífero profundo artesiano. A água é extraída do aquífero profundo rebaixando-se a sua superfície potenciométrica para valores abaixo do nível da água no aquífero superior; deste modo induz-se a sucção direta da água proveniente do aquífero mais superficial para o aquífero profundo.

A recarga realizada por este tipo de sistema tem a vantagem de utilizar como água de recarga a água subterrânea que não contém sólidos suspensos, reduzindo deste modo significativamente o risco de colmatção dos ralos dos furos

d) Barreira infiltração

A barreira de infiltração no leito do rio trata-se de um método de recarga induzida que consiste geralmente numa galeria ou linha de furos pouco distanciados e paralelos ao leito do rio. A extração neste conjunto de furos rebaixa o nível piezométrico e conseqüentemente o nível da água no rio ou no lago, induzindo a água

do rio a infiltrar-se no aquífero subjacente. De modo a assegurar uma purificação satisfatória da água do rio pelo solo, o tempo de infiltração deverá exceder entre 30 a 60 dias (Gale et al., 2002)

d) Poços de injeção

Os poços de injeção ou de recarga são normalmente os sistemas de recarga artificial em profundidade mais utilizados quando o aquífero se encontra a uma determinada profundidade. São utilizados nos casos em que os terrenos possuem um custo elevado ou a sua utilização se encontra restringida (Díaz et al., 2000), quando não estão disponíveis zonas permeáveis na zona não saturada, quando a zona não saturada apresenta camadas impermeáveis e/ou quando os aquíferos são confinados. Estes furos permitem uma elevada taxa de recarga do aquífero. Os poços de injeção constituem uma técnica de recarga artificial onde a água é bombeada diretamente nos A tecnologia para implantação e os requisitos de qualidade da água de recarga são mais exigentes do que nos sistemas de recarga à superfície.

Conforme a Figura 11, são utilizados quando não estão disponíveis zonas permeáveis na zona não saturada e quando os aquíferos são profundos ou confinados.

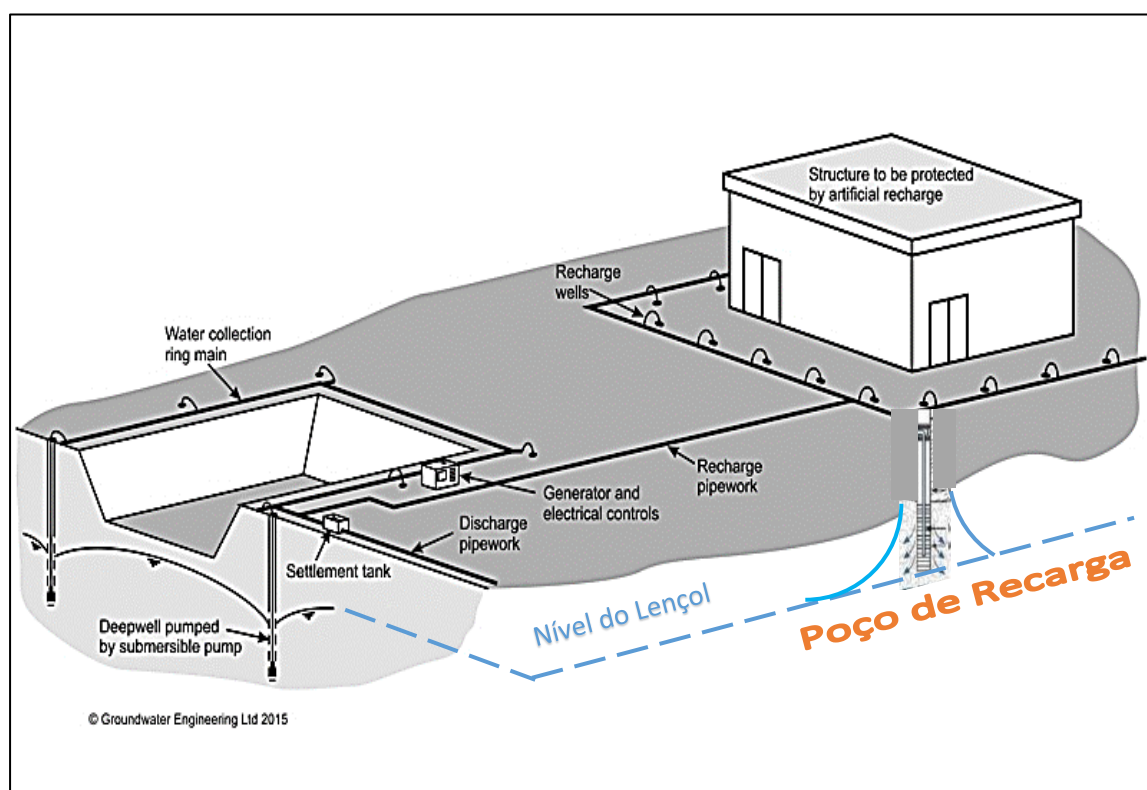


Figura 11 – Recarga artificial em profundidade
Fonte: Adaptada de Dewatering Engineering Ltd (2015).

4.3 Custos associados à Recarga Artificial de Aquíferos

Os principais custos, indicações de uso, tipos de tratamento e características de cada método de recarga artificial, segundo Fox (1999, apud Moura, 2002), podem ser simplificados na Tabela 1.

Quadro 3 – Principais Características da recarga artificial de aquíferos

Tipos de RRA	Poços de injeção na		Poços de injeção direta
	Bacias de recarga	zona vadosa	
Tipo do aquífero	Livre	Livre	Livre ou confinado
Pré-tratamento requerido	Tecnologia simples	Remoção de sólidos	Tecnologia avançada
Custo de capital estimado (US\$)	Solo e sistema de distribuição	25.000-75.000 / poço	500.000-1.500.000 / poço
Capacidade	1.000-20.000 m ³ /ha.d	1.000-3000 m ³ /poço.d	2.000-6.000 m ³ / poço.d
Manutenção necessária	Secagem e raspagem	Secagem e desinfecção	Desinfecção e reversão de fluxo
Vida útil estimada	>100 anos	5-20 anos	25-50 anos
Tratamento solo aquífero	Zonas vadosa e saturada	Zonas vadosa e saturada	Zona saturada

Fonte: Moura (2002) adaptado de Fox (1999)

Apesar dos valores indicados na tabela fazerem referência a dados coletados nos Estados Unidos, podemos ter uma dimensão dos custos relativos a um projeto de recarga artificial. Segundo FOX (1999, apud Moura) há de se considerar que o valores do projeto podem variar de acordo com o valor da terra e das taxas de infiltração.

5 ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso de rebaixamento com ponteiras, foram utilizadas as informações coletadas junto a empresa prestadora de serviços de rebaixamento bem como da própria construtora, através de imagens e informações complementares.

5.1 Localização da obra

A obra onde foi realizado o serviço de rebaixamento temporário do lençol freático localiza-se em um dos bairros mais nobres da cidade de Cabedelo, no qual o nível do lençol encontra-se relativamente próximo ao nível do terreno

5.2 A obra

A obra da construtora Akrópolis em estudo é a Aquamares, que está localizada na área nobre do bairro de Intermares, constituindo-se de: 7 pavimentos tipo, mezanino e semi pilotis. O tipo de rebaixamento utilizado foi o de ponteiras filtrantes.

Segue abaixo a Figura 12, que mostra o início da instalação das ponteiras.



Figura 12 - Execução dos serviços com o rebaixamento implantado

Fonte: Napi (2016)

A água coletada através das ponteiras foi destinada para fora da obra através de bombeamento. Após a conclusão do serviço, desliga-se a bomba e então o nível do lençol começa a retornar ao seu nível original, onde as sapatas estarão a 0,50 metros do piso e 1,5 metros do subsolo, conforme a figura 13.



Figura 13 - Desligamento da bomba e retorno do lençol ao nível original

Fonte: Adaptada de Napi (2016)

5.3 Dimensionamento de uma instalação de rebaixamento por ponteiras

Para o dimensionamento de uma instalação de rebaixamento por ponteiras filtrantes, uma série de fatores devem ser analisados.

Primeiramente, deve-se determinar o raio de influência da ponteira ao redor do local onde está sendo executado o rebaixamento, pois este processo poderá gerar recalques diferenciais em estruturas vizinhas, seja pela alteração do seu nível do lençol ou pelo carreamento de finos. Para este cálculo é necessário analisar cada cota do nível de água do terreno até a cota da ponta da ponteira que será instalada (H), o tamanho do

filtro utilizados (h) e a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo (K), que já foi explicitado mais acima.

Após a definição do raio de influência, calcula-se o raio fictício de um único poço filtrante, usando-se para isso a relação entre a área do terreno a ser rebaixado e a constante π .

A descarga de água representa a vazão de água que todo o sistema de ponteiros em conjunto é capaz de absorver. Para o cálculo da descarga serão utilizados dados já definidos nos dois últimos procedimentos.

Após definido a vazão máxima gerada pelo sistema como um todo, calcula-se a descarga máxima que um único poço (ponteira) é capaz de fornecer para posteriormente relacionar a vazão gerada por todo o sistema com aquela fornecida por apenas um poço, descobrindo-se assim o número de ponteiros necessárias bem como o espaçamento entre elas, dividindo-se o perímetro da área a ser rebaixada pelo espaçamento entre as ponteiros.

Na Figura 14 podemos observar o corte esquemático do rebaixamento no terreno para a concretagem de uma sapata.

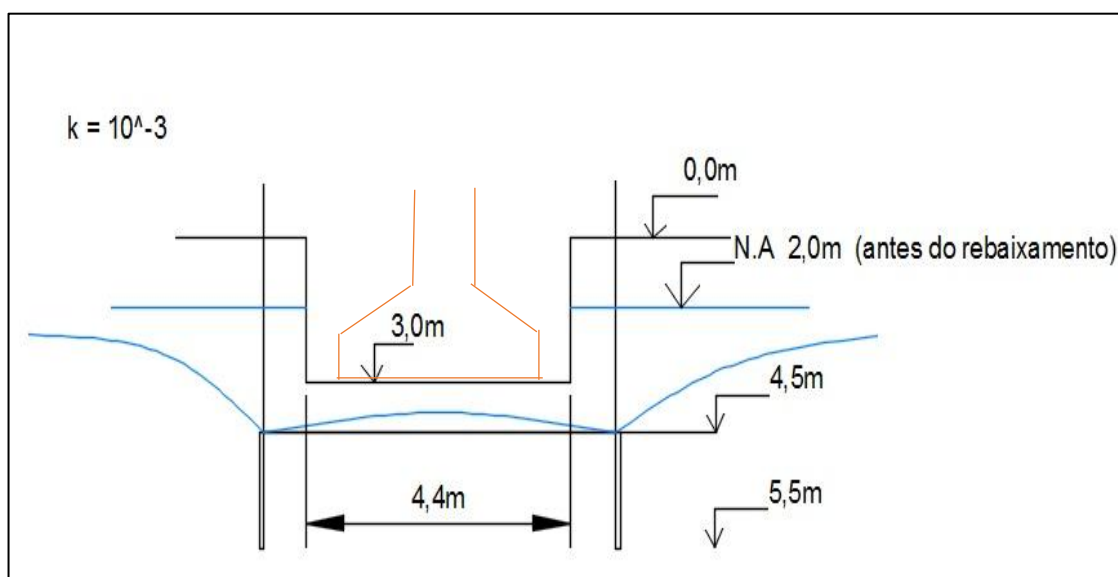


Figura 14 - Ilustração do rebaixamento no terreno

Para efeitos de cálculo e exemplificação do sistema, utilizamos o exemplo acima, calculando o número de ponteiros necessárias para o rebaixamento do lençol.

5.4 Memorial de cálculo para o dimensionamento de uma instalação de rebaixamento por ponteiros filtrantes.

Neste memorial de cálculo é descrito as fórmulas utilizadas para o dimensionamento do exemplo descrito anteriormente (Figura 15).

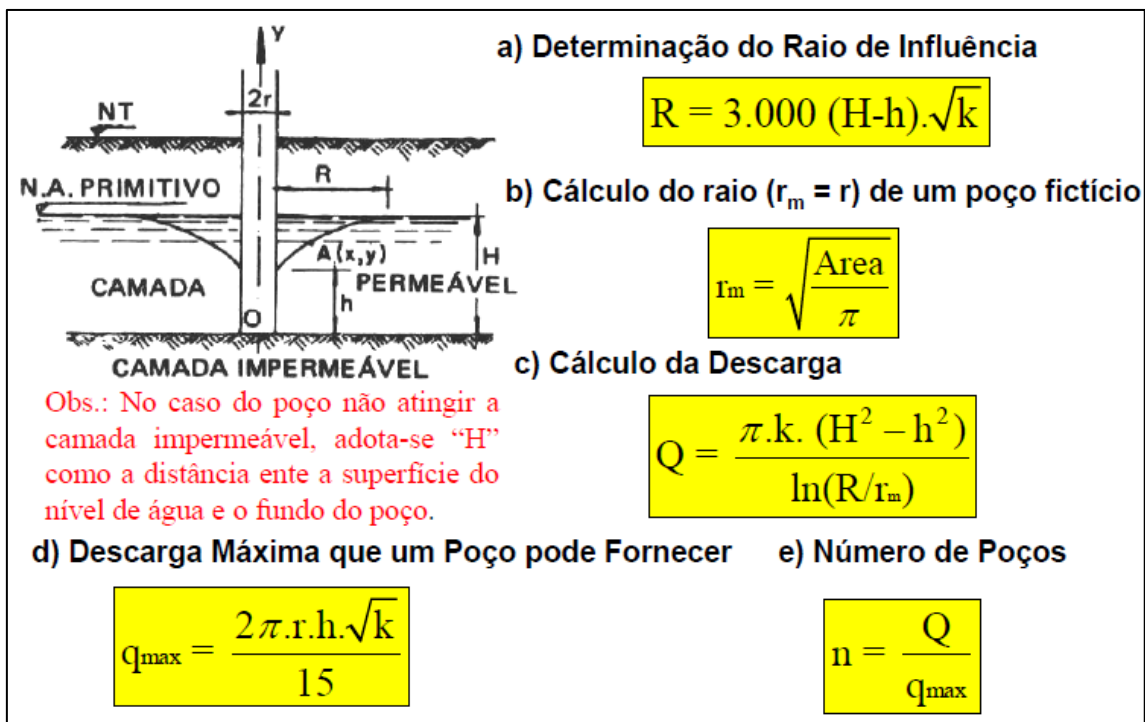


Figura 15 - Esquema para dimensionamento da instalação

Tabela 1: Dados do rebaixamento com ponteiros filtrantes para a sapata com escavação de 5,5 m

DADOS	VALOR	UNIDADES
Tamanho da ponteira	5,5	metro
h	1	metro
Diâmetro da ponteira	0,1	metro
Nível 0	-	metro
H	3,5	metro
Escavação	5,5	metro
K do solo	0,001	cm/s
K do solo	0,00001	m/s
raio da ponteira	0,02	m

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2: Resultados do rebaixamento com ponteiros filtrantes

PARA O TERRENO DA SAPATA E ESCAVAÇÃO DE 5,5 m	
RAIO DE INFLUENCIA	14,23
RAIO r DE UM POÇO FICTÍCIO	3,66
CALCULO DA DESCARGA	0,000654531
DESCARGA MÁXIMA QUE UM POÇO PODE FORNECER	0,000066231
NUMERO DE POÇOS	12
ESPAÇAMENTO	2,15 m

Fonte: Elaborado pelo autor

5.5 Considerações da aplicação da recarga artificial de aquíferos no canteiro de obras

Nesta aplicação, não foi inserida a recarga artificial de aquíferos, visto a dificuldade de acesso aos materiais referentes ao assunto como também pela falta de empresas que trabalhem com a utilização do método no mercado local, ficando o dimensionamento de projeto de recarga artificial em canteiro obras, proposto para um posterior estudo na área.

6 CONCLUSÃO

Observa-se que as técnicas de rebaixamento temporário de aquíferos têm evoluído de forma constante ao longo das décadas e têm sido fundamentais para que sejam executadas obras, abaixo do lençol freático, de forma segura e eficiente, nos mais diversos tipos de solos. Essa evolução tem contribuído para que novas técnicas sejam inseridas dentro do processo de rebaixamento, como é o caso da recarga artificial de aquíferos.

Em relação aos métodos de rebaixamento pesquisados, conclui-se que os métodos mais comumente utilizados no canteiro de obras são: rebaixamento por ponteiros, devido a fácil instalação, mas com rebaixamento limitado; e o método por poços profundos, não tendo limite de profundidade, mas com um custo elevado. Foi visto também que o método menos utilizado no Brasil é a eletrosmose, visto que demanda uma grande quantidade de energia.

Foi visto também que, caso o solo tenha baixa permeabilidade, o sistema a vácuo poderá ser utilizado em conjunto com as difundidas técnicas de ponteiros filtrantes ou poços profundos, aumentando assim a eficiência do sistema de rebaixamento.

Foi interessante perceber a eficiência das ponteiros filtrantes no rebaixamento do lençol na área do edifício Aquamares e como é importante o correto dimensionamento e monitoramento do sistema drenagem. Através desse monitoramento, podemos identificar possíveis problemas como recalques diferenciais devido ao rebaixamento excessivo, principalmente em áreas muito urbanizadas e com solos colapsíveis.

Quanto a recarga artificial podemos inferir que é uma técnica relativamente nova, que pode contribuir de maneira significativa na preservação e recuperação dos aquíferos, diminuindo o seu desperdício, melhorando a qualidade da água e contribuindo para que os efeitos do rebaixamento temporário sejam diminuídos.

Observa-se ainda que há uma escassez de conteúdos bibliográficos que relacionem o rebaixamento temporário de aquíferos com a recarga artificial dentro do canteiro de obras, ficando a sugestão de que em trabalhos posteriores sejam aprofundados os estudos sobre esta relação.

7 REFERÊNCIAS

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. 1. Ed. São Paulo: Tecnogeo e Geofix, 1999.

CAPUTO, H. P., **Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1987. Disponível em: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/05/mecanica-solos-fundamentos-vol1-6ed-caputo.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2016.

DIAMANTINO, Catarina. **Recarga Artificial de Aquíferos: Aplicação ao sistema aquífero de Campina de Faro**. 2009. 273f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

DÍAZ, J.M.M, GOMEZ, J.A.O, ARMAYOR, J.L., CASTANO, S.C. **Recarga Artificial de Aquíferos. Síntesis metodológicas. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante**. 2000. Disponível em: http://www.igm.es/internet/web_aguas/igme/publica/libro36/lib36.html. Acesso em: 23 mar. 2016.

DOBEREINER, L., e VAZ, L. F., **Tratamento de maciços naturais In Geologia de Engenharia**. 2. Ed. São Paulo: ABGE, 1998

GAIOTO, N. **Rebaixamento do Lençol Freático**. São Carlos, 1997. (Apostila).

GALE, I. e DILON, P. Strategies for managed aquifer recharge in semi-arid areas. Disponível em: http://www.iah.org/recharge/pdf/MAR_strategies.pdf. Acesso em: 12 abr. 2016.

GRANDIS, I., **Rebaixamento e Drenagem em Fundações – Teoria e Prática**. 2. Ed. São Paulo: Pini, 1998.

MARRONI, Samuel. Rebaixamento do Lençol Freático. In: SIMPÓSIO SOBRE FUNDAÇÕES E CONTENÇÕES, 1., 2014, Itajaí. Disponível em:

www.areas.com.br/wa_files/6_Rebaixamento_Lencol_Freatico_Morronei.pdf. Acesso em: 12 abr. 2016.

MOURA, A. Recarga artificial de aquíferos: Os desafios e riscos para garantir o suprimento futuro de água subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., 2004, São Paulo, Brasil.

NAPI, Matheus. **Relatório** de Estudo de Rebaixamento em Canteiro de Obras. João Pessoa, 2016.

SILVA, G. E. S. **Avaliação do potencial da recarga artificial como alternativa para recuperação da potenciometria de aquífero: estudo de caso na planície do Recife – PE**. 2004. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Pernambuco.

SOARES, Fábio Lopes. **Rebaixamento do lençol freático**. João Pessoa, 2016. (Notas de aula).