

## BARREIRA CONDUTIVA PARA ENCAPSULAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Ana Claudia Emerenciano Guedes<sup>1\*</sup> & Edson Wendland<sup>2</sup>

**Resumo** – Como a técnica de encapsulamento mais utilizada atualmente ainda apresenta falhas, o objetivo desse trabalho é propor uma alternativa inovadora para reduzir o fluxo lateral de água subterrânea dentro de áreas contaminadas a um nível aceitável. A barreira condutiva, que é preenchida com um material de alta condutividade hidráulica, é uma técnica simples e de custo relativamente baixo para reduzir a contaminação das águas subterrâneas em países onde ainda ocorre a disposição inadequada de resíduos sólidos. A principal vantagem da barreira condutiva é que comparando essa técnica com as *slurry walls*, seu desempenho e durabilidade em longo prazo seriam mais satisfatórios devido à sua relativa insensibilidade aos defeitos. A partir da análise matemática desenvolvida utilizando o Método de Elementos Analíticos, conclui-se que a barreira condutiva é capaz de reduzir o fluxo uniforme dentro da área contaminada. Porém, a redução depende da espessura da barreira e das condutividades hidráulicas do material de preenchimento, do aquífero e do maciço de resíduos. Com o objetivo de realizar um estudo mais aprofundado do escoamento através da barreira condutiva, serão conduzidos testes no experimento em escala reduzida para verificar a eficiência dessa técnica antes da aplicação *in situ*.

**Palavras-Chave** – barreira condutiva, Método de Elementos Analíticos.

### CONDUCTIVE BARRIER TO ENCAPSULATE CONTAMINATED AREAS

**Abstract** – Since the most common encapsulation technique used nowadays still presents shortcomings, the aim of this research is to propose an innovative technique to reduce the groundwater flow inside contaminated areas to some acceptable level. The conductive barrier, which is backfilled with a material of high hydraulic conductivity, is a simple and relatively low cost technique to reduce the contamination of groundwater in countries where inadequate disposal of solid waste is still a problem. The main advantage of the conductive barrier comparing to slurry walls is that this technique would present a more satisfactory long term performance and durability due to its insensitiveness to flaws. The mathematical analysis developed using the Analytical Elements Method has shown that the conductive barrier can reduce the uniform flow through the contaminated area. However, the amount of reduction depends on the thickness of the barrier and the hydraulic conductivities of the backfill material, aquifer and waste. In order to further study the flow through the conductive barrier, tests are going to be conducted in the small scale experiment to verify the efficiency of this technique before the application *in situ*.

**Keywords** – conductive barrier, Analytic Elements Method.

---

<sup>1</sup> USP – EESC anaclaudiaeg@usp.br

<sup>2</sup> USP – EESC ew@sc.usp.br

\* Autor Correspondente

## INTRODUÇÃO

Do volume total de água da Terra 97,5% formam os mares e oceanos, enquanto a porção de água doce é de apenas 2,5%. Deste valor, cerca de 68,9% correspondem às águas das geleiras e calotas polares, 29,9% constituem as águas subterrâneas, 0,9% representa a água proveniente dos pântanos e da umidade dos solos e apenas 0,3% da água doce forma os rios e lagos (Rebouças, 2006). Assim, como os mananciais subterrâneos detêm a maior quantidade de água doce líquida na Terra, sua disponibilidade e qualidade são questões de grande importância no gerenciamento dos recursos hídricos.

A contaminação das águas subterrâneas pode ocorrer devido às técnicas inadequadas de disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), como lixões e aterros controlados. Fetter (1994) relata que nessas regiões, a água da chuva que infiltra no maciço de resíduos pode se misturar com os líquidos já presentes no local e dissolver os constituintes dos resíduos sólidos, dando origem ao chorume. Segundo o autor, o chorume pode escoar verticalmente através da camada de solo não saturada e atingir a superfície livre do aquífero, contaminando as águas subterrâneas. Nos casos em que os resíduos são dispostos abaixo do nível da água, a lixiviação ocorre devido à passagem da água subterrânea através do corpo de resíduos.

Com o crescimento da população mundial, da economia e da industrialização, a produção de RSU tem aumentado e, como consta no Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2015), em 2015 a geração de RSU no país foi superior às registradas em anos anteriores, totalizando 79,9 milhões de toneladas. Nesse mesmo ano, 58,7% dos RSU coletados foram destinados aos aterros sanitários, enquanto 24,1% foram para aterros controlados e 17,2% para os lixões (ABRELPE, 2015). A quantidade de lixões e aterros controlados no Brasil é preocupante, pois muitos deles não são monitorados adequadamente e são simplesmente abandonados após o encerramento. Shinzato (2014) afirma que devido à falta de planos de recuperação, as unidades de disposição final desativadas se transformam em fontes potencialmente poluidoras, já que o encerramento impróprio permite a contínua produção e lançamento de lixiviado.

Com o objetivo de encapsular o maciço de resíduos e impedir o fluxo lateral de água subterrânea para dentro da área contaminada, barreiras verticais podem ser construídas com materiais de baixa condutividade hidráulica ao redor do depósito. As barreiras verticais mais empregadas são as *slurry walls*, que podem ser constituídas por misturas de solo-bentonita (SB), cimento-bentonita (CB) ou solo-cimento-bentonita (SCB). A desvantagem dessa técnica é que essas estruturas podem ter seu desempenho prejudicado devido ao aumento da condutividade hidráulica dos materiais de preenchimento, o que pode levar a uma intensificação do fluxo de água subterrânea através da área contaminada. Devido aos ambientes agressivos nos quais as *slurry walls* são inseridas, a durabilidade dessas barreiras pode ser afetada em longo prazo. Segundo Freeman e Harris (1995), uma das limitações dessa alternativa de remediação é a incompatibilidade química entre os materiais utilizados no preenchimento e os resíduos altamente ácidos ou básicos. Esses tipos de contaminantes podem alterar a estrutura ou até mesmo dissolver as partículas de solo e de bentonita. Além disso, Evans (1993) cita que heterogeneidades no material de preenchimento, dissecação e ciclos de umedecimento e secagem também podem aumentar a condutividade hidráulica da barreira.

Em seu trabalho, Strack (2014) propõe outra técnica que pode reduzir o fluxo de água subterrânea dentro de áreas contaminadas a um nível aceitável. De acordo o autor, essa alternativa consiste na construção de uma barreira preenchida com um material de condutividade hidráulica muito maior do que a condutividade hidráulica do ambiente. Diferentemente das barreiras de baixa condutividade hidráulica, na barreira condutiva as linhas de fluxo são direcionadas por dentro da

estrutura, sem percorrer o maciço de resíduos. Uma das vantagens dessa técnica é o custo, já que o preenchimento da barreira condutiva, como brita ou cascalho, tem um valor menor do que as misturas de solo e bentonita.

O objetivo desse trabalho é desenvolver um estudo teórico e experimental para verificar a eficiência da barreira condutiva como técnica de encapsulamento e investigar o escoamento através desse tipo de estrutura. O Método de Elementos Analíticos foi utilizado para simular o escoamento de água subterrânea no caso em que uma barreira cilíndrica é instalada em um campo de fluxo uniforme. O experimento em escala reduzida da barreira condutiva consiste em um recipiente rígido e estanque, preenchido com material poroso e equipado com um sistema de abastecimento de água e instrumentos de medição.

## METODOLOGIA

O Método de Elementos Analíticos (MEA) é um método computacional utilizado na modelagem do escoamento em aquíferos. Nesse método, os elementos hidrogeológicos são representados por soluções analíticas individuais da equação governante do fluxo subterrâneo, as quais contêm coeficientes desconhecidos e que devem ser calculados através das condições de contorno. As expressões analíticas, chamadas de elementos analíticos, podem ser combinadas, segundo o princípio da superposição, para compor a solução final do problema (Strack, 1989).

### Equações Governantes

O vetor descarga,  $Q_i$  ( $m^2/s$ ), é igual à integração da descarga específica ao longo da espessura saturada do aquífero,  $h$  (m):

$$Q_i = \int_0^h q_i dz \quad (1)$$

De acordo com a aproximação de Dupuit-Forchheimer, a resistência ao escoamento na direção vertical é desprezada, logo  $q_i$  não varia ao longo da espessura saturada do aquífero. Na superfície freática, a carga hidráulica ( $\phi$ ) é igual à espessura saturada. Logo, nos aquíferos não confinados, a relação do vetor descarga com o fluxo específico é expressa por:

$$Q_i = \phi q_i \quad (2)$$

Com a aplicação da lei de Darcy (Bear, 1972), as duas componentes do vetor descarga para um fluxo bidimensional são dadas pelas seguintes expressões:

$$Q_x = \phi \left[ -k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k\phi^2}{2} + C_u \right] \quad (3)$$

$$Q_y = \phi \left[ -k \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] = -\frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k\phi^2}{2} + C_u \right] \quad (4)$$

nas quais  $k$  é a condutividade hidráulica ( $m/s$ ) e  $C_u$  é uma constante. Assim, o potencial de descarga,  $\Phi$  ( $m^3/s$ ), para os aquíferos não confinados é definido como:

$$\Phi = \frac{1}{2} k\phi^2 + C_u \quad (5)$$

Logo, o vetor descarga pode ser expresso em termos do potencial de descarga:

$$Q_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (6)$$

$$Q_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (7)$$

Para satisfazer a condição de continuidade do fluxo, o divergente do vetor descarga deve ser zero. No caso de escoamento livre e sem recarga, a equação da continuidade para a descarga pode ser escrita para o plano  $xy$ :

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

A substituição de  $Q_x$  e  $Q_y$  pelas Equações 6 e 7 resulta na equação de Laplace aplicada ao potencial de descarga:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

A equação de Laplace é a equação diferencial que descreve o fluxo horizontal, confinado e não confinado sem recarga, em duas dimensões no plano  $x, y$ . Assim, todas as soluções para tais problemas de escoamento horizontal devem obedecer a essa equação.

No MEA, as variáveis complexas são utilizadas para que as variáveis independentes sejam reduzidas e, além disso, para facilitar a programação e implementação de códigos no computador. O potencial complexo,  $\Omega(z)$ , é formado pelo potencial de descarga na parte real e pela função de corrente na parte imaginária:

$$\Omega = \Phi + i\Psi \quad (10)$$

possibilitando, no mesmo cálculo, a definição simultânea das equipotenciais e linhas de fluxo.

### Barreira Conduativa

Seja uma barreira condutiva de raio externo igual a  $R$  e raio interno igual a  $R_1$  instalada em um campo de fluxo uniforme ( $Q_{x0}$ ). Os cilindros são centrados em  $z=0$ , a carga ao longo do eixo  $y$  é  $\phi_0$ , a condutividades hidráulica do domínio interno (resíduos) e externo (aquífero) são iguais a  $k$  e a condutividade hidráulica da barreira é igual a  $k_1$  (Figura 1).

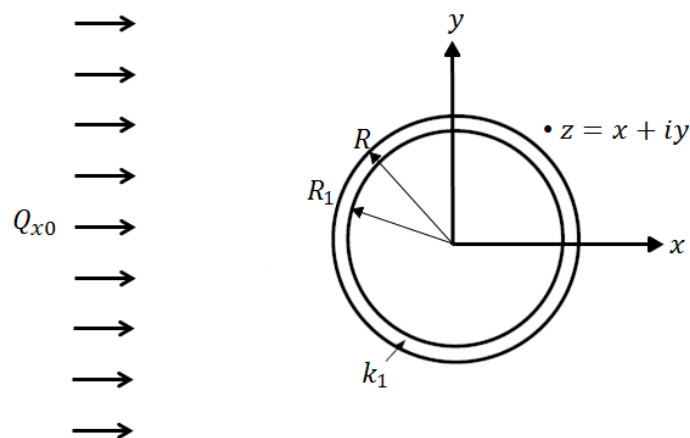


Figura 1 – Barreira cilíndrica em um campo de fluxo uniforme

As expressões desenvolvidas por Strack (2014) para calcular o potencial complexo em cada um dos domínios são as seguintes:

$$\Omega = -Q_{x0} \left( z + a \frac{R^2}{z} \right) + \Phi_0 \quad R^2 \leq z\bar{z} \quad (11)$$

$$\Omega = -Q_{x0} \left( bz + c \frac{R_1^2}{z} \right) + \frac{k_1}{k} \Phi_0 \quad R_1^2 \leq z\bar{z} \leq R^2 \quad (12)$$

$$\Omega = -Q_{x0} dz + \Phi_0 \quad z\bar{z} \leq R_1^2 \quad (13)$$

Utilizando as equações do potencial complexo e as condições de continuidade da carga hidráulica e do fluxo em ambas as fronteiras ( $z\bar{z} = R^2$  e  $z\bar{z} = R_1^2$ ), é possível calcular as constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ .

### Experimento em Escala Reduzida

O experimento consiste em uma caixa retangular (1,10 x 0,80 x 0,50 m) de ferro e face frontal de acrílico, que será preenchida com areia e uma barreira cilíndrica de cascalho (Figura 2). A barreira ficará localizada no centro da caixa, sendo que os diâmetros externo e interno são iguais a 40 cm e 25 cm respectivamente, resultando em uma espessura de 7,5 cm. A caixa possui dois reservatórios de água laterais (item 1) equipados com extravasores flexíveis (item 2) para manter os níveis de água constantes. Os extravasores são fixados em uma haste vertical móvel, que permite o ajuste da altura. O material poroso será acondicionado entre as duas grades de tela moeda recobertas com tela de nylon e tecido serigráfico (item 4), possibilitando que o solo fique retido entre os reservatórios e que a água escoe através da caixa. A caixa contém 17 piezômetros (item 5) fixados na face de acrílico para monitoramento do nível de água nos dois reservatórios laterais e nos 15 tubos de PVC perfurados (item 3) localizados no meio poroso.



Figura 2 – Experimento em escala reduzida



Com o auxílio de uma mangueira, o reservatório de entrada será preenchido com água da torneira até a completa saturação do sistema. Então, para dar início ao escoamento, será estabelecida uma diferença de carga hidráulica entre os dois reservatórios através do ajuste dos extravasores. Quando o escoamento estabilizar, sensores de condutividade elétrica serão inseridos em todos os tubos de PVC. Nessa etapa, a mangueira que alimenta o sistema será conectada a uma caixa d'água contendo água misturada com sal, que funcionará como um traçador. Com o objetivo de verificar o desempenho da barreira, a presença de sal será detectada através do monitoramento contínuo da condutividade elétrica em cada ponto. Assim, se com a passagem da água com sal a condutividade elétrica nos cinco tubos localizados dentro do domínio interno não aumentar, significa que a barreira é eficaz, ou seja, o escoamento na área interna foi reduzido.

## RESULTADOS

As expressões do potencial complexo foram implementadas no Matlab para gerar as redes de fluxo da *slurry wall* e da barreira condutiva em um campo de fluxo uniforme (Figura 3).

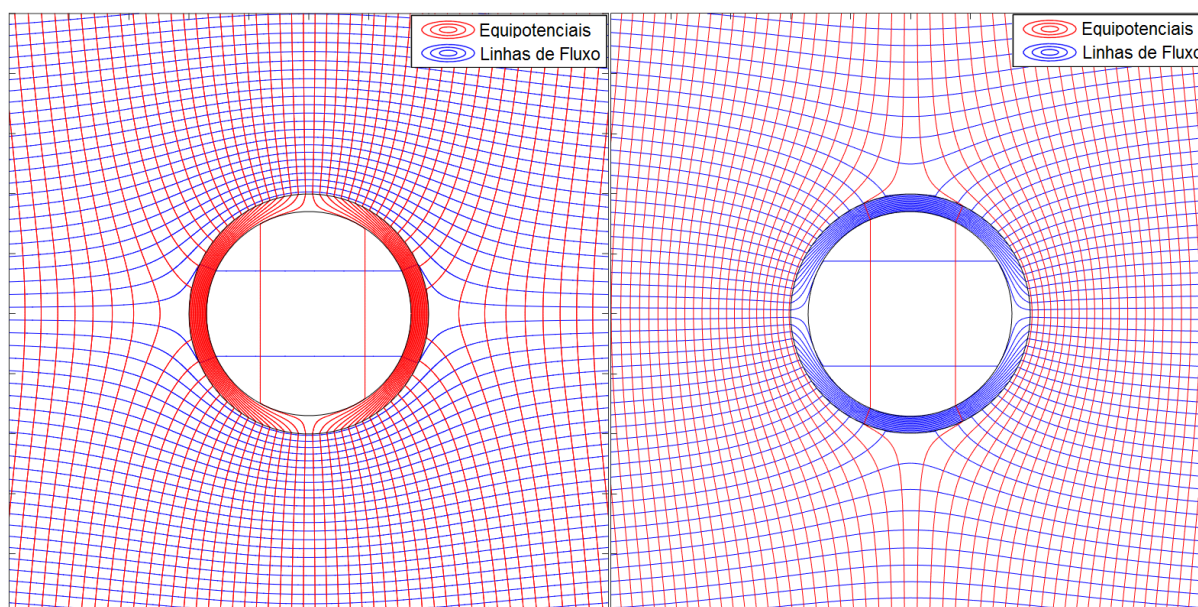


Figura 3 – Redes de fluxo da *slurry wall* e da barreira condutiva em um campo de fluxo uniforme

Na primeira rede de fluxo a razão entre as condutividades hidráulicas da barreira e do ambiente é igual a 0,01, enquanto na segunda rede de fluxo a condutividade hidráulica da barreira é igual a 100 vezes a do ambiente. Observa-se que no primeiro caso o fluxo subterrâneo é desviado ao redor da estrutura, já no segundo caso o escoamento é conduzido por dentro da barreira. A partir da análise dos resultados, é possível concluir que o fluxo através do maciço de resíduos é uniforme e que a sua magnitude é igual nas duas redes de fluxo. Nesse caso, ambas as barreiras são capazes de reduzir o escoamento em 87,18%, porém a vantagem da barreira condutiva é que o seu preenchimento é muito menos sensível a falhas do que os materiais que compõem as *slurry walls*. Como citado por Strack (2014), uma obstrução na barreira condutiva dificilmente afetará a habilidade da estrutura em transmitir a água subterrânea no seu interior; porém, aberturas na *slurry wall* são muito mais propensas a deixar a água passar para o lado de dentro da barreira, especialmente se essas falhas ocorrerem em lados opostos da estrutura.

## CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho é propor uma alternativa para reduzir o fluxo lateral de água subterrânea dentro de áreas contaminadas a um nível aceitável. A barreira condutiva, que é

preenchida com um material de alta condutividade hidráulica, é uma técnica simples e de custo relativamente baixo para reduzir a contaminação das águas subterrâneas. A principal vantagem da barreira condutiva é que comparando essa técnica com as *slurry walls*, seu desempenho e durabilidade em longo prazo seriam mais satisfatórios devido à sua relativa insensibilidade aos defeitos.

A partir da análise matemática desenvolvida utilizando o Método de Elementos Analíticos, conclui-se que a barreira condutiva é capaz de reduzir o fluxo uniforme dentro da área contaminada. Porém, a redução depende da espessura da barreira e das condutividades hidráulicas do material de preenchimento, do aquífero e do maciço de resíduos. Como o desempenho da barreira condutiva depende das características do ambiente em que ela está inserida, em uma situação real é necessário conhecer as condutividades hidráulicas do aquífero e da região do depósito, para que seja possível determinar a espessura da barreira e o material de preenchimento adequados para atingir a redução de fluxo requerida.

Com o objetivo de realizar um estudo mais aprofundado do escoamento através da barreira condutiva, serão conduzidos testes no experimento em escala reduzida para verificar a eficiência dessa técnica em diferentes situações. Este tema tem grande importância no contexto atual, visto que se comprovado o desempenho da barreira condutiva, a aplicação dessa técnica *in situ* representa uma alternativa inovadora para reduzir a contaminação das águas subterrâneas em países onde ainda ocorre a disposição inadequada de resíduos sólidos.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Associação Brasileira Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2015. Disponível em <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>. Acesso em 20 jan. 2017.
- BEAR, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. USA: American Elsevier Environmental Science, 764 p.
- EVANS, J. C. (1993). Vertical cutoff walls. In *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Org. por D. E. DANIEL, London: Chapman & Hall, pp. 430 – 454.
- FETTER, C. W. (1994). *Applied hydrogeology*. USA: Prentice-Hall, 691 p.
- FREEMAN, H. M.; HARRIS, E. F. (1995). *Hazardous waste remediation: innovative treatment technologies*. CRC Press, 361 p.
- REBOUÇAS, A. C. (2006). Água doce no mundo e no Brasil. In *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. Org. por Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J.G., Escrituras, São Paulo – SP, pp. 1 – 35.
- SHINZATO, M. P. B. Mobilização de poluentes no maciço de resíduos de lixão desativado. 2014. 196 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- STRACK, O. D. L. (2014). *Applied Groundwater Mechanics (Draft)*. Minnesota, 368 p.
- STRACK, O. D. L. (1989). *Groundwater Mechanics*. North Oaks: SC Inc, 732 p.