

UTILIZAÇÃO DE BARREIRAS VERTICAIS NA REMEDIAÇÃO AMBIENTAL

Luciana R. C. de Gusmão

Mestranda do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia,
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
lugusmao@gmail.com

José Fernando Thomé Jucá, Dr.

Professor/Pesquisador do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia,
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
jftjucah@icloud.com

Karla Salvagni Heineck, Dra.

Professora/Pesquisadora do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
karla@ppgec.ufrgs.br

Resumo. *O presente trabalho traz explanação teórica compilada sobre os principais métodos de contenção de contaminantes utilizados na atualidade, as barreiras verticais, a fim de divulgar e disseminar as práticas. A contenção da área-fonte de contaminação é um método de custo relativamente baixo que consegue evitar o alastramento da pluma de contaminantes; seu princípio básico é controlar o movimento horizontal de água e contaminantes, dificultando o fluxo. As barreiras de solo-bentonita, cimento-bentonita e solo-cimento-bentonita estão entre as mais frequentemente utilizadas. Em comparação, a primeira apresenta a vantagem de ser mais competitiva e proporcionar menores coeficientes de condutividade hidráulica, enquanto garante menor capacidade de suporte, está mais sujeita a misturas heterogêneas e necessita de maiores áreas de trabalho. Por outro lado, o cimento das cortinas de cimento-bentonita pode provocar gradativas trocas catiônicas que comprometam a estabilidade e permeabilidade da barreira. As de solo-cimento-bentonita buscam equilibrar baixa condutividade hidráulica e alta resistência.*

Palavras-chave: *Barreiras verticais. Cortinas verticais. Remediação ambiental.*

1. INTRODUÇÃO

A total remediação de áreas contaminadas de forma a possibilitar uso irrestrito do solo e da água tem se mostrado ser um objetivo ilusório, já que os processos são bastante desafiadores e dispendiosos. As limitações das tecnologias de remediação, a frequente realização de uma investigação incompleta e definição imprecisa da problemática contaminante, além de natureza complexa e heterogênea da subsuperfície são as principais causas de insucesso na remediação (SMYTH *et al.*, 2000).

A criação de plumas de contaminantes dissolvidos na água subterrânea pode resultar em três principais modelos de impacto, a depender da natureza do contaminante. Contaminantes com fase líquida aquosa (*non-NAPL*) tendem a se dispersar integralmente no lençol freático, os LNAPL (*light non-aqueous phase liquids* – fase líquida não-aquosa leve), devido à baixa densidade, tendem a se

acumular na interface superior solo-água (próximo ao ponto de contaminação), e os DNAPL (*dense non-aqueous phase liquids* – fase líquida não-aquosa densa) acumulam-se na interface mais abaixo, com a superfície impermeável abaixo do nível freático, já que possuem densidade mais elevada (BARBOSA *et al.*, 2015).

A complexidade desses modelos e a dificuldade associada da remediação crescem à medida que há mistura de fontes de contaminação, heterogeneidade da subsuperfície, configurações hidrogeológicas complicadas associadas com rochas fraturadas, ou mesmo interações entre diferentes contaminantes (SMYTH *et al.*, 2000). É interessante notar que embora a massa de contaminantes na fonte geralmente exceda bastante a presente nas plumas (MACKAY; CHERRY, 1989), os contaminantes móveis são comumente os que geram mais riscos imediatos ao meio ambiente. Assim, as características das zonas de fonte e dispersão (plumas) são distintas, quase sempre requerendo tecnologias diferentes para remediação.

É importante que várias possibilidades sejam levadas em consideração para a escolha do método mais interessante para cada caso de remediação ambiental, inclusive quanto à possibilidade de combinar soluções, sempre tendo em mente o potencial de degradação e o custo, o qual envolve as condições de execução.

O presente trabalho apresenta explanação teórica compilada comparativa sobre os principais métodos de isolamento da zona-fonte, as cortinas verticais, com a finalidade de divulgar e disseminar essa prática cada vez mais.

2. REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

A escolha e desenvolvimento de um programa de remediação para determinada área depende dos objetivos buscados em cada

caso, podendo envolver a adoção de várias ações. Em alguns casos é possível fazer uso apenas de mecanismos físicos, químicos e biológicos naturais (atenuação natural) para reduzir a contaminação a níveis aceitáveis. No entanto, frequentemente é necessário fazer uso também de abordagens mais complexas, nas quais se deve almejar: a remoção/destruição da massa contaminação na zona-fonte para evitar posterior propagação de pluma; o isolamento da zona-fonte através de barreiras hidráulicas ou físicas; ou controle e remediação da pluma através de sistema de bombeamento direto ou uso de barreiras reativas *in situ* (SMYTH *et al.*, 2000).

Uma medida quase essencial quando não há capacidade tecnológica e financeira para restauração total da zona-fonte é o seu isolamento e contenção. A contenção da contaminação é obtida a partir da construção de cortinas/barreiras/trincheiras verticais de baixa permeabilidade, contenções hidráulicas de longo prazo com sistemas de bombeamento e tratamento dos contaminantes, ou interceptação e tratamento *in situ* da água subsuperficial contaminada através de barreiras reativas passivas (CHERRY; FEENSTRA; MACKAY, 1996).

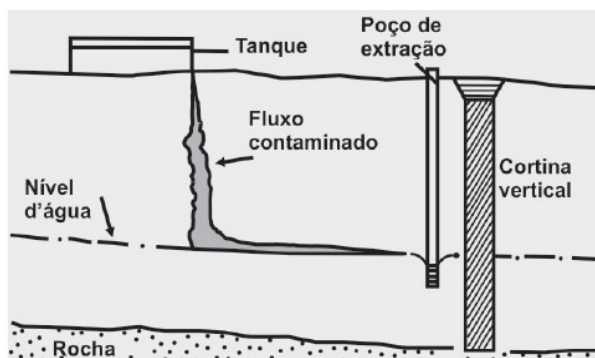
Neste trabalho, serão abordados os principais tipos de contenções através de barreiras verticais de baixa condutividade hidráulica.

2.1. Remediação por barreiras verticais

A instalação de cortinas verticais geralmente se restringe a profundidades menores que 50 m e pode ter limitações em configurações geológicas difíceis, como terrenos rochosos com superfícies fraturadas (SMYTH *et al.*, 2000). Utilizadas na Engenharia Civil para controle hidráulico em escavações desde a década de 50, apenas a partir da década de 70 as barreiras foram adaptadas para uso ambiental, difundindo-se nos anos 80 como componente de sistema de remediação de contaminantes (LEMOS,

2006). A Figura 1 mostra corte esquemático do funcionamento da contenção, que deve ser estrategicamente posicionada de forma a conter, divergir ou encapsular o fluxo.

Figura 1. Corte esquemático de cortina vertical com poço de extração (BATISTA; LEITE, 2010, p. 256)



Seu princípio básico é controlar o movimento horizontal de água e contaminantes, dificultando o fluxo de água e/ou o transporte advectivo de contaminantes através da cortina (SMYTH *et al.*, 2000). Na definição dos objetivos da barreira, é essencial definir se ela vai atuar com baixa condutividade hidráulica, reduzindo o fluxo de água, ou impedindo o transporte de contaminantes, o qual se dá de forma mais complexa. Assim, a condutividade hidráulica é a principal preocupação desse tipo de projeto, assim como os parâmetros de resistência, custos e métodos executivos (LEMOS, 2006).

O solo é um meio poroso frequentemente não saturado em que ocorrem basicamente quatro tipos de fluxo direto: hidráulico (líquidos e gases), químico, elétrico e térmico. A movimentação se dá a partir de gradientes potenciais, ou seja, zonas menos concentradas tendem a atrair o fluxo em sua direção, buscando o equilíbrio do sistema. Há, ainda, a possibilidade de um determinado fluxo ocorrer por conta de outro tipo de gradiente potencial, criando o chamado fluxo acoplado (*coupled flow*) (MITCHELL, 1993). Assim, é possível que haja fluxo de solutos químico

(contaminantes) a partir de um gradiente potencial hidráulico (fenômeno físico) no solo, situação, inclusive, muito comum, que recebe o nome de advecção.

O projeto a ser elaborado depende dos objetivos da barreira. A maioria das intervenções de remediação com cortinas verticais, no entanto, utilizam técnicas combinadas para atingir seus objetivos de forma mais eficiente.

Na geotecnia ambiental geralmente as barreiras verticais são dispostas em posicionamento circunferencial, ao redor da fonte de contaminação, frequentemente associadas a sistemas de drenagem subsuperficial e coberturas sobre a área contaminada para proteger a água subsuperficial *off-site*. No entanto, esse formato não é essencial, pois as barreiras podem ser dispostas de forma a isolar apenas parte do local. As barreiras também podem ser utilizadas para reduzir a migração de água limpa não contaminada para pontos de alto gradiente de concentração – pelo princípio da osmose (EVANS, 1993).

Segundo, Mitchell e Van Court (1997) e Devlin e Parker (1996), o potencial contaminante acumulado e a movimentação através da cortina a partir da difusão podem ser considerações importantes do projeto de isolamento. O estudo de Devlin e Parker (1996), que envolvia bombeamento, apontou que o fluxo difusivo para fora pode ser balanceado com o fluxo advectivo de água em barreiras do tipo parede-diafragma ou estaca-prancha, mas acredita-se que isso só seria possível em casos de gradientes significativos. Para barreiras com condutividade hidráulica excepcionalmente baixa, como no caso de geomembranas plásticas, é impraticável obter níveis de gradiente suficientes para induzir o fluxo advectivo de água para dentro para combater o fluxo difusivo de contaminantes orgânicos através do polímero (SMYTH *et al.*, 2000).

A eficiência de um isolamento pode ser otimizada quando sua base é engastada em um

aquitardo ou camada de baixa permeabilidade (SMYTH *et al.*, 2000). O engaste se torna desnecessário quando há retirada da água contaminada ou os contaminantes estão concentrados próximo à superfície ou flutuando no nível freático (EVANS, 1993).

Onde essas condições geológicas não permitem ou o aquitardo é muito profundo, as cortinas podem ser limitadas dentro do aquífero, situação denominada por Cherry, Feenstra e Mackay (1996) de “cortina suspensa” (tradução nossa). Essa configuração é possível quando o gradiente for ascendente ou o contaminante for menos denso que a água (BAXTER, 2000), situações em que os contaminantes só são retidos se a barreira se estender em profundidade abaixo da base da área-fonte, e podem ser necessárias maiores taxas de bombeamento de água para manter a contenção hidráulica (MACKAY, 1996).

Recomenda-se maximizar o isolamento com o uso de sistema de cobertura acoplado às cortinas verticais. A cobertura tem função de reduzir a infiltração, controlar a eliminação de gases e vapores e garantir isolamento da subsuperfície contaminada com a biosfera. (SMYTH *et al.*, 2000).

A maioria dos sistemas de contenção vertical necessita da proteção proporcionada pela cobertura, já que os materiais estão sujeitos a ressecamento e ciclos de gelo-degelo. O projeto final deve considerar o carregamento do tráfego (paralelo e transversal, se for o caso) e alternativas de integração com a paisagem (EVANS, 1993). É muito comum a utilização de geossintéticos (geogrelhas, geotêxteis ou geomembranas) ou argila compactada para essa finalidade, e atualmente tem se estudado a adequabilidade de novos materiais.

Pode-se ainda acrescentar base às cortinas verticais para aumentar o isolamento dos contaminantes. Embora tenha havido evolução das tecnologias de execução de base nas barreiras, seus custos são elevados e a verificação de sua disposição e desempenho são difíceis, razão pela qual sua utilização não

é muito comum no controle de remediação, sendo mais frequente em aterros sanitários (PETERSON; LANDIS, 1995).

Após a identificação dos objetivos pretendidos com a barreira, é necessário avaliar quais tipos de barreira atendem ao pretendido, geralmente a partir de modelos de fluxo de água e contaminantes. É necessário avaliar a hidrogeologia e aspectos geotécnicos do local, além de desempenho a curto e longo prazo de cada caso, especialmente do ponto de vista de condutividade hidráulica, resistência e compressibilidade (EVANS, 1993).

Interações físico-químicas entre materiais da cortina e contaminantes podem influenciar o desempenho hidráulico da contenção. Interações entre argila e componentes miscíveis na água como co-solventes ou surfactantes podem provocar retração de minerais argilosos, o que pode ocasionar aumento da condutividade hidráulica, efeito minimizado em profundidades com tensões confinantes maiores (SMYTH *et al.*, 2000). Middleton e Cherry (1996) não encontraram aumento significativo de condutividade hidráulica em barreiras de argila natural ou compactadas em consequência de exposição a solventes de cloro ou hidrocarbonetos de petróleo.

Middleton e Cherry (1996) e Mitchell e Van Court (1997) acreditam que a mistura solo-bentonita em cortinas, tipicamente com alto grau de saturação e porosidade, deve ser mais suscetível à retração e fissuração do que argilas naturais na presença de fluidos miscíveis à água de baixa solubilidade orgânica. Mitchell e Van Court (1997) perceberam que interações com lençóis freáticos de baixo pH ou alto teor de eletrólitos pode aumentar a condutividade hidráulica em cortinas argilosas e mesmo acelerar a degradação de barreiras de estaca-prancha metálicas.

Materiais poliméricos também estão sujeitos a reações degradantes com fluidos orgânicos como hidrocarbonetos aromáticos e solventes de petróleo ou solventes de cloro e

petróleo, tendo sua eficiência na aplicação de cortinas de contaminantes questionável, a depender do caso (MITCHELL; VAN COURT, 1997).

A eficiência de uma barreira hidráulica vertical está diretamente ligada às propriedades do material de preenchimento utilizado, o qual depende especialmente da graduação do solo e percentual de bentonita utilizados para cortinas de solo-bentonita e solo-cimento-bentonita (LEMOS, 2006; PAGANI, 2007).

Os principais tipos de barreiras utilizadas são: trincheiras de solo-bentonita (com ou sem geomembrana), cimento-bentonita ou solo-cimento-bentonita, cortinas de concreto vibrado, colunas *jet ground* (solo-cimento executada com perfuração, jateamento e desagregação do solo com calda de cimento a altas velocidades e grande impactos), estacas-prancha de aço convencional e paredes-diafragma. Cada tipo tem suas peculiaridades, vantagens e desvantagens, e seu desempenho depende das características do local específico e condições de projeto (SMYTH *et al.*, 2000).

De forma geral, as barreiras de solo-bentonita estão entre as técnicas mais utilizadas devido à maior rapidez de execução e menor custo, seguidas das barreiras de cimento-bentonita ou solo-cimento-bentonita, de maior resistência (LEMOS, 2006). Tendo em vista que o custo é um critério decisivo na escolha do método empregado, serão aprofundados esses três tipos de contenções, mais comuns.

2.2. Barreiras de solo-bentonita

Neste método, trincheiras são escavadas e utiliza-se lama bentonítica (segundo Evans (1993), normalmente na proporção de 5% de bentonita para 95% de água, em peso) para manter a estabilidade geotécnica durante a escavação, a partir da pressão do fluido que excede o empuxo ativo do solo, e diminuir a condutividade hidráulica (BATISTA; LEITE, 2010). Para escavações até 20 m é possível

utilizar retroescavadeira no processo, mas para profundidades maiores recomenda-se a utilização de *dragline* ou *clamshell*. O método de escavação utilizado não interfere diretamente na eficiência da barreira, mas é essencial que a camada impenetrável seja atingida continuamente (AZAMBUJA, 2004).

Segundo Azambuja (2004) e Lemos (2006), a escavação deve ser iniciada pela área de maior declividade do terreno. A largura da trincheira varia entre 0,6 e 1,5 m, sendo comum 0,9 m. Trincheiras muito estreitas são de difícil execução, enquanto que muito largas aumentam custos sem necessidade. Atingida a profundidade desejada, é feito reaterro na vala, quando parte da lama bentonítica é retirada e parte permanece recobrando as paredes escavadas formando uma película fina (*filter cake*), a qual é a principal responsável pela redução da condutividade hidráulica da barreira (BATISTA; LEITE, 2010).

A lama consegue penetrar nos vazios do solo a partir de diferença de pressão existente, onde grupos de partículas sólidas, denominadas colóides, vão se acumulando até formação da do *filter cake*. Vale salientar que para evitar escorregamentos, as paredes devem estar na vertical durante a escavação, com um desvio máximo de 2% (XANTHAKOS, 1979).

Para garantia da estabilidade, a lama bentonítica deve permanecer próximo ao topo da trincheira (máximo de 90 cm abaixo) e pelo menos 60 cm acima do nível d'água (FILZ; HENRY; DAVIDSON, 1997). Caso contrário, a poropressão do solo adjacente exercerá uma força no *filter cake* que irá provocar sua desintegração, comprometendo, assim, o isolamento hidráulico e estabilidade do trecho, podendo ocorrer o colapso. Caso venha a ocorrer colapso, o trecho deve ser limpo antes da aplicação do material de preenchimento/reaterro (*backfill*) (XANTHAKOS, 1979).

O reaterro é feito a uma consistência de alto *slump* de concreto (100 – 150 mm), de preferência com mistura de areia, silte, argila e lama bentonítica. Para atingir essa

consistência, o material deve ser “fluidificado” a partir da adição da lama ao solo, e assim permanece no local ao longo do tempo (EVANS, 1993). No *backfill* é possível utilizar lama recém-preparada ou aquela presente na vala escavada. Segundo D’Appolonia (1980), a lama do segundo caso tem a vantagem de ser mais grossa/densa e possuir mais materiais finos em suspensão, o que promove redução da condutividade hidráulica. É importante manter o peso específico da lama presente na vala sempre menor que o peso específico da mistura de reaterro solo-bentonita a fim de garantir a gradativa expulsão da bentonita a partir da inserção do *backfill* no trecho.

Adicionalmente, deve ser feita a retirada de eventuais sedimentos granulares existentes nas trincheiras antes da execução do reaterro para evitar a existência de pontos com maior condutividade hidráulica do que a mistura aplicada (D’APPOLONIA, 1980). O reaterro deve ser executado no extremo oposto do trecho em escavação, depositando-se continuamente a mistura solo-bentonita do fundo até a superfície, formando uma rampa com inclinação de 6:1 para que posteriormente escoe progressivamente sem ocorrência de segregação e expulsando a lama existente no trecho (LEMOS, 2006).

O *slump* adequado para cada caso deve ser determinado em estudos de laboratório para avaliar a condutividade hidráulica e compatibilidade com a execução. Ressalta-se que é importante que as amostras de ensaio sejam sempre preparadas com o mesmo *slump* do campo ou os dados não serão representativos da situação real. A compatibilidade química com os contaminantes envolvidos tem extrema importância, pois tanto compostos orgânicos quanto inorgânicos podem provocar aumento de permeabilidade da mistura (SMYTH *et al.*, 2000).

É interessante notar que embora no estudo de Batista e Leite (2010) a adição de bentonita ao solo ensaiado não tenha gerado redução da condutividade hidráulica (na

verdade, houve leve aumento), trouxe significativo crescimento da capacidade de retenção de contaminantes, aspecto muito positivo para os projetos de geotecnia ambiental.

Deve haver área livre disponível nas proximidades da vala para possibilitar o manuseio e tráfego dos equipamentos, além de superfície de trabalho estável com boa capacidade de suporte (EVANS, 1993).

O solo presente no *backfill* pode ser proveniente do próprio trecho escavado ou de empréstimo. Embora a utilização de solo local represente grande economia, ressalta-se que é importante controlar a distribuição granulométrica do solo utilizado para resultar em uma mistura mais uniforme, e diante da variabilidade natural que pode haver ao longo da escavação, o controle deve ser mais fácil a partir de empréstimo (EVANS, 1993). Devido às altas profundidades que podem ser necessárias a depender do caso, é importante avaliar também para a capacidade de suporte das misturas de reaterro (BATISTA; LEITE, 2010).

Vale ressaltar que a eficiência desse tipo de intervenção depende de condições da subsuperfície independentes de previsão e material de preenchimento utilizado (LEMOS, 2006), então as especificações técnicas de projeto só podem estabelecer garantias e responsabilização sobre aquilo que é possível controlar, como graduação do solo utilizado e quantidade de bentonita na mistura.

Na execução construtiva, pode-se optar por fazer a mistura de reaterro ao longo da trincheira ou em área remota de mistura. O primeiro método tem a vantagem de ser mais barato, já que não necessita de equipamentos mais especializados, e desvantagem de requerer maior área disponível para fazer a mistura e dificuldade de adicionar finos à mistura retirada na escavação. Assim, com a utilização de área remota de mistura é possível garantir maior homogeneidade, uniformidade e controle à mistura (EVANS, 1993).

É necessário que haja controle de qualidade durante a execução, especialmente para verificar se as condições encontradas na subsuperfície real correspondem àquelas de projeto e garantir as profundidades atingidas, além da condutividade hidráulica da barreira. Os principais mecanismos potenciais de falha podem envolver defeitos construtivos ou mudanças de propriedades posteriores (EVANS, 1993).

A principal preocupação se relaciona com a possibilidade de aumento da condutividade hidráulica, como no caso de mistura solo-bentonita mal executada, que pode gerar bolsões de solo ou mesmo de lama bentonítica, resultando em zonas de condutividade hidráulica maiores que o desejado. Ciclos de congelamento-descongelamento ou molhagem-secagem, ou mesmo o ressecamento da mistura solo-bentonita também podem ser fatores de risco da contenção (EVANS, 1993). Um projeto adequado de sistema de cobertura das cortinas pode prevenir o congelamento da estrutura.

Quanto ao comportamento de longo prazo, a incompatibilidade química entra como principal consideração, sendo necessário controlar os aumentos de condutividade hidráulica. Pode-se minimizar o efeito do ataque químico com a utilização de solo bem-graduado com grande quantidade de finos, já que corresponde a um conjunto de grãos progressivamente menores relativamente inertes (EVANS, 1993). Vale salientar que os minerais argilosos possuem excesso de cargas elétricas em sua superfície e grande superfície específica, o que favorece fenômenos de interação elétrica e química (MITCHELL, 1993).

2.3. Barreiras de cimento-bentonita

Também executada através de escavação, a principal diferença construtiva das trincheiras de solo-bentonita é que a lama utilizada na estabilização da escavação é comumente deixada para endurecer no local.

Nesse caso, a lama contém bentonita, cimento e água, atingindo condutividade hidráulica na ordem de 1×10^{-5} e 1×10^{-6} cm/s, enquanto que as trincheiras de solo-bentonita resultam em valores entre 1×10^{-7} e 1×10^{-8} cm/s (EVANS, 1993).

No caso de escavação por painéis alternados ou para pequenas profundidades costuma-se utilizar a própria lama de cimento-bentonita para manter a estabilidade do talude, deixando-a endurecer no local. Já para profundidades maiores que 30 m, talvez não seja possível manter a mistura com cimento trabalhável durante todo o tempo necessário, situação em que será necessário utilizar lama bentonítica durante a escavação para posterior substituição por outra com cimento ao término, a qual deve ser mais densa para possibilitar a expulsão (JEFFERIS, 1981).

Como o solo escavado não é utilizado na mistura de reaterro, a destinação final desse material deve ser levada em consideração na análise das alternativas, já que envolve custos elevados de movimentação de terras e/ou botafora (EVANS, 1993). Em geral, esse método tem maior custo também devido à utilização de cimento (BATISTA; LEITE, 2010), entretanto, torna-se uma opção interessante quando não há na área solo adequado disponível para a mistura do *backfill* de solo-bentonita (PEARLMAN, 1999).

Esse tipo de barreira tem a vantagem de necessitar de menos área de trabalho que a cortina de solo-bentonita, já que não realiza mistura com solo e o equipamento de mistura cimento-bentonita é bem compacto. Outra vantagem é que o potencial para defeitos construtivos é bem menor, inclusive devido à mistura heterogênea. A principal preocupação é a dosagem adequada de cimento, bentonita e água (EVANS, 1993).

É recomendável quando a resistência é um requisito adicional importante, já que o cimento proporciona aumento da resistência ao cisalhamento com o tempo. Assim, preenchimento com cimento-bentonita apresenta maior capacidade de suporte que

com solo-bentonita, enquanto que, por outro lado, é mais permeável.

Millet e Perez (1981) apontam que o aumento de resistência possibilita execução de barreiras mais estreitas, geralmente variando entre 0,6 e 0,9 m para profundidades de até 30 m. Profundidades maiores devem ser avaliadas acerca da possibilidade de fraturas hidráulicas.

O cimento interfere nas propriedades químicas da bentonita reduzindo sua capacidade de inchamento e retenção de água. Embora a condutividade hidráulica tenha pouca relação com a quantidade de cimento empregada, a mesma é função do tempo decorrido, já que o processo de hidratação do cimento proporciona redução da permeabilidade (LEMOS, 2006).

O contato entre o cimento e a lama bentonítica ocasiona floculação mútua, responsável pelo rápido enrijecimento da mistura. A agregação das partículas de argila provoca a progressiva quebra da estrutura em estado de gel da bentonita, retornando ao estado fluido após alguns minutos (JEFFERIS, 1981).

A floculação que ocorre promove um *filter cake* mais poroso e permeável do que o da lama bentonítica apenas, permitindo maior escoamento por entre os poros do solo. Assim, além de criar barreiras mais permeáveis, há perda considerável de lama para o solo. A perda pode chegar a se equivaler ao volume do trecho, sendo necessário utilizar o dobro da quantidade teórica (XANTHAKOS, 1979).

Para que as juntas frias de execução durante o preenchimento interrompido não se tornem pontos fracos do sistema (com maior condutividade hidráulica), é necessário que seja feita a cuidadosa limpeza de toda a superfície, garantindo a aderência entre as camadas bombeadas (EVANS, 1993).

A mistura é preparada em misturador coloidal de alta velocidade, inicialmente com a mistura bentonita-água e posteriormente com adição do cimento para ser bombeada na vala (EVANS, 1993). Jefferis (1981) chama a atenção que para evitar a ocorrência do

fenômeno chamado de “*bleeding*”, em que há segregação bastante considerável dos materiais, a lama bentonítica deve ser completamente hidratada antes da adição do cimento (por pelo menos quatro horas). Quanto maior a proporção de bentonita em relação ao cimento, menor será a segregação, já que a bentonita é a responsável por suportar as partículas do cimento. Adicionalmente, Li *et al.* (1989) afirmam que a segregação ocorre mais rapidamente a depender de quanto menor for o fator água-cimento da mistura.

Alterações de propriedades ao longo do tempo são mais difíceis de ocorrer devido à hidratação do cimento e progressivo ganho de resistência com o tempo. No entanto, a possibilidade de incompatibilidade química, tanto global quanto local, deve ser considerada. Usualmente utiliza-se bentonita sódica na mistura, pois a cálcica produz lama mais instável e forma película mais permeável, por ser menos expansiva quando hidratada. No entanto, é possível que haja gradativa troca catiônica do sódio (Na^+) da bentonita com as grandes quantidades de íons de cálcio (Ca^{2+}) liberados pelo cimento, transformando a bentonita sódica em cálcica ao longo do tempo, o que implica maior permeabilidade e instabilidade (BATISTA; LEITE, 2010).

Defeitos construtivos característicos desse método envolvem dosagem imprecisa dos componentes da mistura, juntas frias mal executadas e efeitos do “primeiro lote” do dia, no qual ao se utiliza o equipamento limpo para a mistura, são obtidas amostras não representativas da realidade (EVANS, 1993).

2.4. Barreiras de solo-cimento-bentonita

O aumento do custo proveniente do acréscimo de cimento e maiores volumes de movimentação de terra, atrelado à maior permeabilidade e instabilidade química das cortinas de cimento-bentonita têm sido os principais aspectos motivacionais da utilização das barreiras de solo-cimento-bentonita, de

desenvolvimento mais recente. A incorporação de solo na mistura provoca redução dos custos e maior estabilidade química, atrelada à maior resistência propiciada pelo cimento. É uma opção interessante em casos onde é possível utilizar o solo escavado na composição da mistura de preenchimento, reduzindo o volume de bota-fora (PEARLMAN, 1999).

Assim, as barreiras de solo-cimento-bentonita tentam combinar a baixa condutividade hidráulica das barreiras de solo-bentonita com a maior resistência das barreiras de cimento-bentonita. Seu método construtivo é semelhante às barreiras tradicionais de solo-bentonita, porém geralmente com menores profundidades (até 15 m) (RYAN; DAY, 2002).

Assim como nas barreiras de solo-bentonita, a adição de finos pode melhorar a eficiência da contenção hidráulica, enquanto o excesso pode exigir maiores quantidades de água para atingir a trabalhabilidade necessária, reduzindo a densidade da mistura e, conseqüentemente, aumentando sua permeabilidade (PAGANI, 2007).

A condutividade hidráulica do material de preenchimento utilizado neste tipo de cortina é resultado de complexas interações entre os componentes da mistura. O cimento, além de alterar as propriedades bentoníticas mencionadas anteriormente, demanda mais água à mistura para que seja possível executar seu lançamento na vala, reduzindo, assim, a densidade do material de preenchimento – e aumentando a permeabilidade. É possível ainda fazer uso de aditivos, especialmente os retardadores de pega, na tentativa de reduzir a condutividade hidráulica, porém além de dificultar o processo executivo, aumenta os custos (LEMOS, 2006).

A avaliação de cada método deve levar em consideração também outros aspectos essenciais como resistência e durabilidade do *backfill*. Stavridakis (2005) mostrou que para misturas de solo granular, cimento (4%) e bentonita, houve tendência à redução da resistência à compressão não confinada com o

aumento percentual de bentonita, sendo a maior resistência obtida com 5% de bentonita, muito superior àquelas referentes às demais porcentagens estudadas (10, 15, 20, 25 e 30%).

A resistência das barreiras é função do fator água-cimento e do tempo (de cura) (PAGANI, 2007). Segundo Azambuja (2004), quanto menor for o fator água-cimento da mistura solo-cimento-bentonita, maior a resistência à compressão não confinada e resistência de pico (ao cisalhamento), e menor a condutividade hidráulica.

É importante ressaltar, no entanto, que o acréscimo do cimento provoca aumento do custo da contenção quase em proporção direta com a resistência; e que seu excesso pode aumentar as chances de fissuração da barreira devido ao aumento de rigidez frente aos carregamentos sofridos (PAGANI, 2007).

Batista e Leite (2010), estudando misturas de solo-bentonita e solo-cimento-bentonita, constataram que a adição de cimento, embora tenha aumentado significativamente a resistência, também trouxe grandes aumentos de condutividade hidráulica, mesmo para pequenas porcentagens de cimento. Diante do objetivo principal das cortinas de conter a contaminação, o aumento de permeabilidade ocasionado pela reação com o cimento deve ser bem estudado em cada caso, já que pode vir a comprometer a funcionalidade da obra.

Adicionalmente, Pagani (2007) verificou a viabilidade de adicionar fibras de polipropileno em barreiras de solo-cimento-bentonita. A adição proporcionou aumento significativo na resistência não-confinada, pequena redução de deformação na aplicação de cargas isotrópicas e redução a fragilidade da mistura, sem, entretanto, causar alterações na condutividade hidráulica. A adição em misturas de solo-bentonita também se mostrou viável, sem alterar significativamente o comportamento hidráulico da mistura.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A remediação de regiões contaminadas é tema de grande relevância geotécnica e global, mas apenas nas últimas décadas tem sido tratada com mais seriedade. O progresso da área é lento, especialmente devido aos altos custos envolvidos e ausência de fiscalização e responsabilização das contaminações. Arelada à ausência de consciência ambiental, há comum desinteresse empresarial em investir na remediação espontaneamente.

No entanto, a sociedade clama (e cobra) cada vez mais pela preservação ambiental e desenvolvimento sustentável. Espera-se que com o avanço tecnológico seja possível desenvolver e aperfeiçoar métodos de forma a reduzir custos e incentivar a disseminação das práticas de remediação. Para tal, é essencial que haja responsabilização efetiva da contaminação provocada em cada caso e aplicação de sanções proporcionais ao dano.

A utilização de cortinas de contenção são opções relativamente de baixo custo que conseguem impedir que a contaminação continue se alastrando. O ideal é que sejam utilizadas em conjunto com meios de tratamento dos contaminantes a fim de obter uma remediação mais rápida da área.

A cortina de solo-bentonita apresenta a vantagem de ser mais competitiva e proporcionar menores coeficientes de condutividade hidráulica, enquanto garante menor capacidade de suporte, está mais sujeita a misturas heterogêneas e necessita de maiores áreas de trabalho. Por outro lado, embora a utilização de contenções de cimento-bentonita promovam estruturas mais resistentes, o isolamento da área pode ficar comprometido a partir do aumento da condutividade hidráulica ao longo do tempo (devido à instabilidade química do sistema).

Mais recentemente, tem crescido a utilização das barreiras de solo-cimento-bentonita, na tentativa de equilibrar a baixa condutividade hidráulica promovida pelas

barreiras de solo-bentonita, com a maior resistência das de cimento-bentonita.

Vale salientar que é de extrema importância considerar a compatibilidade química da contenção com o meio e os contaminantes existentes, de forma que não comprometa a funcionalidade da obra, já que interações físico-químicas podem influenciar o desempenho hidráulico da contenção. Cada caso de remediação deve ser analisado detalhadamente para escolha do(s) método(s) que melhor atende(m) às necessidades.

Autorizações

Os autores autorizam a publicação de todo o conteúdo de seu trabalho.

REFERÊNCIAS

AZAMBUJA, R. M. B. **Comportamento mecânico e hidráulico de misturas de solo-cimento-bentonita para aplicação em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 99p.

BARBOSA, M. C.; JUCÁ, J. F. T.; BATALHA, M. S.; COELHO, C. R. B.; SOUZA, M. M.; MACIEL, F. J. Transporte de contaminantes e fluxo de gases em solos não saturados. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JÚNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Orgs.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 367-414.

BATISTA, P.; LEITE, A. do L. Misturas de um solo laterítico com cimento e bentonita para uso em cortinas verticais. **R. Esc. Minas**. Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 255-263, abr./jun. 2010.

- BAXTER, D. Y. **Mechanical behavior of soil-bentonite cutoff walls**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia): Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000. 369p.
- CHERRY, J. A.; FEENSTRA, S.; MACKAY, D. M. Concepts for remediation of sites contaminated with DNAPLS. In: PONKOW, J. F; CHERRY, J. A. (Eds.). **Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater**. Ontario, Canada: Waterloo Press, 1996. p. 475-506.
- D'APPOLONIA, D. J. Soil-bentonite slurry trench cutoff. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. New York, v. 107, n. 4, p. 393-409, 1980.
- DEVLIN, J. F.; PARKER, B. L. Optimum hydraulic conductivity to limit contaminant flux through cutoff walls. **Ground Water**. v. 34, n. 4, p. 719-726, 1996.
- EVANS, J. C. Vertical cutoff walls. In: DANIEL, D. E. (Ed.). **Geotechnical practice for waste disposal**. London, England: Chapman & Hall, 1993. p. 430-454.
- JEFFERIS, S.A. Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs. **International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Stockholm, v. 1, p. 435-440, Jun/1981.
- FILZ, G. M.; HENRY, L. B.; DAVIDSON, R. R. Formation and properties of bentonite filter cakes. In: REDDI, L. N.; BONALA, M. S. **Filtration and drainage in geotechnical/geoenvironmental engineering** (Geotech. Spec. Publ. n. 78). New York: ASCE, 1998. p. 69-88.
- LEMONS, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 310p.
- LI, J. C.; HWANG, C. L.; YAO, H. L.; LEE, H. J.; LEE, R. J. A study of slag cement-bentonite slurry, In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 12ª edição (Rio de Janeiro). Rotterdam: A. A. Balkema, v. 3, p. 1499-1502, 1989.
- MACKAY, D. M.; CHERRY, J. A. Groundwater contamination: limits of pump-and-treat remediation. **Environmental Science & Technology**, v. 23, n. 6, p. 630-636, 1989.
- MIDDLETON, T.; CHERRY, J. A. The effects of chlorinated solvents on the permeability of clays. In: PONKOW, J. F; CHERRY, J. A. (Eds.). **Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater**. Ontario, Canada: Waterloo Press, 1996. p. 313-336.
- MILLET, R. A.; PEREZ, J. Current USA practice: slurry wall specification. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. ASCE, v. 107, n. 8, p. 1041-1052, 1981.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. 2ª ed. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1993.
- MITCHELL, J. K.; VAN COURT, W. A. N. Barrier design and installation: walls and covers. In: WARD, C. H.; CHERRY, J. A.; SCALF, M. R. (Eds.). **Subsurface restoration**. Michigan, EUA: Ann Arbor Press, 1997. p. 175-197.
- PAGANI, B. R. **Estudo de misturas solo-cimento-bentonita-fibra para uso em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. 116p.

PEARLMAN, L. **Subsurface containment and monitoring systems: barriers and beyond** (overview report). Washington: National Network of Environmental Management Studies Fellow, 1999. 61p.

PETERSON, M. E.; LANDIS, R. C. Artificially emplaced floors and bottom barriers. In: RUMER, R. R.; MITCHELL, J. K. (Eds.). **Assessment of barrier containment technologies: a comprehensive treatment for environmental remediation applications**. US Department of Energy/US Environmental Protection Agency: Dupont Company, 1995. p. 185-209.

RYAN, C. R.; DAY, S. R. Soil-cement-bentonite slurry walls. In: O'NEILL, M. W.; TOWNSEND, F. C. **Deep Foundations 2002: An international perspective on theory, design, construction and performance** (Geotechnical special publication n. 16). New York: ASCE, 2002. p. 713-727.

SMYTH, D. J. A.; GILHAM, R. W.; BLOWES, D. W.; CHERRY, J. A. In situ containment and treatment of contaminated soil and groundwater. In: ROWE, R. K. (Ed.). **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook**. Ontario, Canada: Kluwer Academic Publishers, 2001. p. 921-945.

STAVRIDAKIS, E. Presentation and assessment of clay influence on engineering parameters of cement-treated clayed mixtures. **EJGE**, v. 10, bundle A, 2005.

XANTHAKOS, P. P. **Slurry walls**. New York: McGraw Hill, 1979. 622p.