

ALGUMA EXPERIÊNCIA NA CONSTRUÇÃO DE BARREIRAS EM CIMENTO-BENTONITE PARA ISOLAMENTO DE LOCAIS CONTAMINADOS

SOME EXPERIENCE ON CEMENT-BENTONITE CUT-OFF WALLS CONSTRUCTION IN POLLUTED SITES

Lucas, Francisco José Freire - *Professor-adjunto, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Castelo Branco*

RESUMO

Uma das técnicas mais utilizadas no confinamento de terrenos contaminados consiste na construção de barreiras verticais em cimento-bentonite.

Em virtude de se tratar de uma nova aplicação para aquele tipo de materiais e devido às limitações que os ensaios laboratoriais apresentam, é fundamental proceder-se à observação *in situ* do comportamento deste tipo de infraestruturas.

Atendendo ao facto de ainda não existirem em Portugal barreiras com esta finalidade, para além de se divulgarem algumas das suas principais especificidades, descrevem-se um conjunto de obras britânicas, designadamente as suas características geométricas, propriedades geotécnicas e pormenores construtivos, assim como algumas conclusões baseadas em campanhas de monitorização efectuadas.

ABSTRACT

The use of cement-bentonite cut-off walls is perhaps the most common containment technique in polluted sites.

As there isn't much experience in this new application and there are some concerns about laboratorial tests, observation *in situ* is needed.

Portugal has not got any case study about this environmental solution yet, so, some details about its raw-materials and design, as well as British examples are referred. Specially the main dimensions, the geotechnical properties, the construction methods, and some monitoring conclusions are presented.

1 - INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são, a nível mundial e nacional, um dos mais importantes recursos naturais. A utilização de práticas ambientais desajustadas provocou, nas últimas décadas, uma contaminação progressiva de muitos dos aquíferos existentes, originando graves problemas ecológicos e sociais que urge solucionar.

Tem-se assistido igualmente a um interesse acrescido, especialmente nos países mais industrializados, na procura de soluções técnicas com vista à reabilitação de terrenos poluídos para seu aproveitamento futuro, como potenciais zonas de construção.

Desta forma têm vindo a ser objecto de estudo cada vez mais intenso os dispositivos que possibilitem isolar locais contaminados ou susceptíveis de o serem.

De entre os vários sistemas de barreiras existentes (Lucas, 1995b), destacam-se, pelo seu uso cada vez mais generalizado, as paredes verticais subterrâneas abertas em vala e preenchidas com misturas

constituídas por argila, cimento e água, também designadas por paredes em cimento-bentonite. Apresentam-se na Figura 1 os principais pormenores construtivos deste tipo de solução.

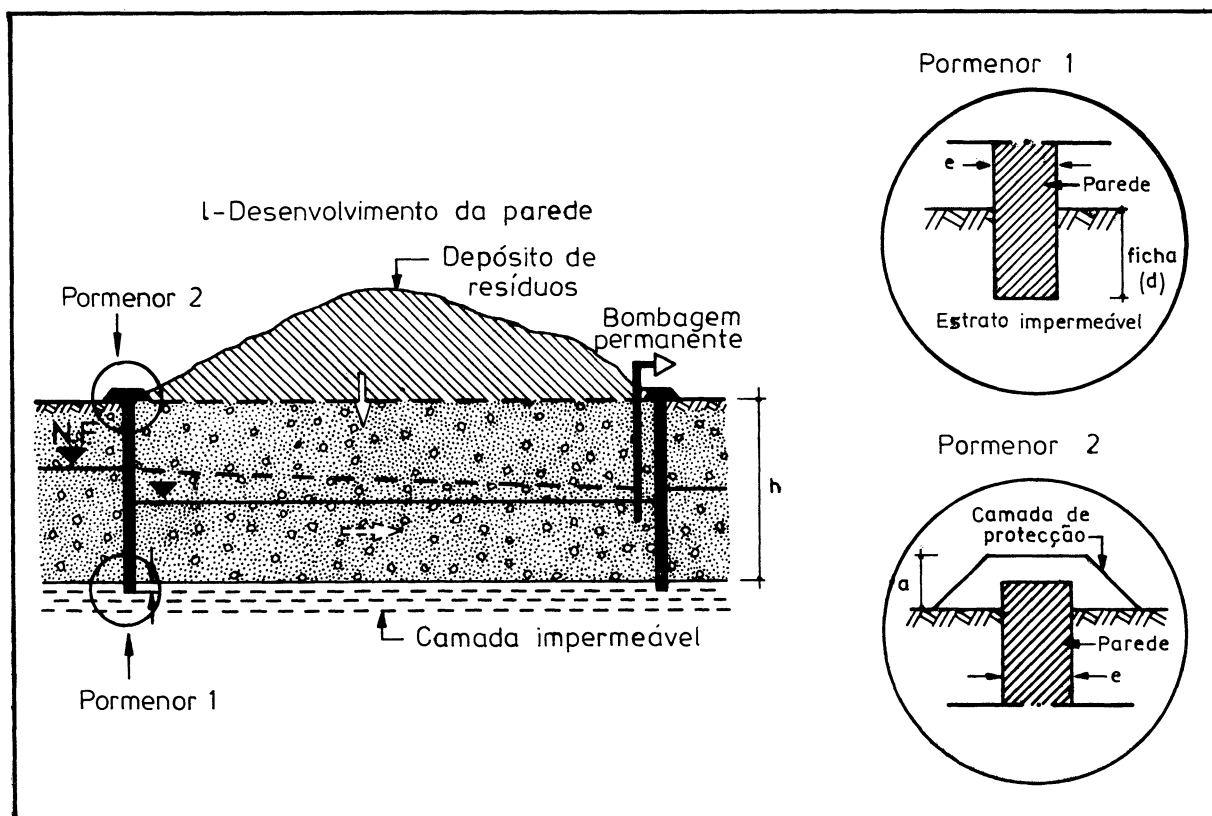


Fig. 1 - Esquema típico de uma zona contaminada confinada por barreiras cimento-bentoníticas

Para se poder definir uma zona completamente estanque, é exigível a existência de um estrato impermeável, localizado a uma profundidade economicamente viável, onde a parede possa penetrar numa dada extensão (ficha).

Devido à elevada susceptibilidade à fendilhação que o material da parede apresenta quando em contacto com o ar, é necessário encabeçá-la com um maciço de protecção, executado geralmente com solos argilosos ou em betão.

Convém referir que, à semelhança do que já acontecia para paredes diafragma ou para paredes moldadas resistentes, estas barreiras são do tipo auto-endurecido, isto é, o material de enchimento da vala vai suportando as paredes da escavação à medida que esta progride.

2 - MATERIAIS E EXIGÊNCIAS FUNCIONAIS

Os materiais geralmente utilizados na realização de barreiras destinadas ao confinamento de terrenos contaminados são, como já foi referido (Lucas, 1995a):

i) Argila: quase sempre do tipo montmorilonítico, devido às suas propriedades expansíveis, sendo a mais usual a bentonite (por vezes é empregue a atapulgite). Apresenta alguma variabilidade nas suas propriedades geotécnicas, devido ao facto de ser um material natural, apesar de sofrer tratamentos industriais.

ii) Produtos cimentíticos: o cimento a ser utilizado na mistura deve apresentar conveniente resistência química aos ambientes agressivos, designadamente aos que contêm sulfatos. No mercado existem

disponíveis os cimentos de alta resistência, doseados e fabricados nas unidades industriais, ou então, pode utilizar-se o cimento Portland normal ao qual se adiciona, em obra, subprodutos industriais (p.ex., escória granulada de alto forno ou cinzas volantes) na proporção adequada. Convém referir que a substituição do cimento Portland normal por aqueles produtos pode atingir valores próximos dos 95% mas que, assim, tendem a formar-se materiais de mistura mais resistentes mecanicamente mas simultaneamente mais frágeis e quebradiços.

iii) Água: toda a água considerada potável pode usar-se na preparação da mistura. No entanto, sempre que existam dúvidas acerca da sua composição química deverão ser realizados os necessários ensaios laboratoriais. Jefferis (1990) alerta para a possibilidade de surgirem problemas de comportamento em paredes cuja água de mistura possua valores superiores às seguintes concentrações: 50 mg/l de magnésio, 250 mg/l de cálcio ou 500 mg/l de sódio ou potássio.

A proporção entre os diversos materiais deve ser definida considerando que: 1) quando a mistura está fluida deve apresentar suficiente trabalhabilidade e capacidade de suporte das paredes da escavação, 2) depois de endurecida deve constituir uma barreira impermeável que mantenha a sua integridade física durante a respectiva vida útil. Apresenta-se na Figura 2 uma matriz triangular onde figuram qualitativamente as proporções mais usuais para estas misturas. Em termos quantitativos, apresentam-se na Tabela 1 as propostas sugeridas por alguns autores.

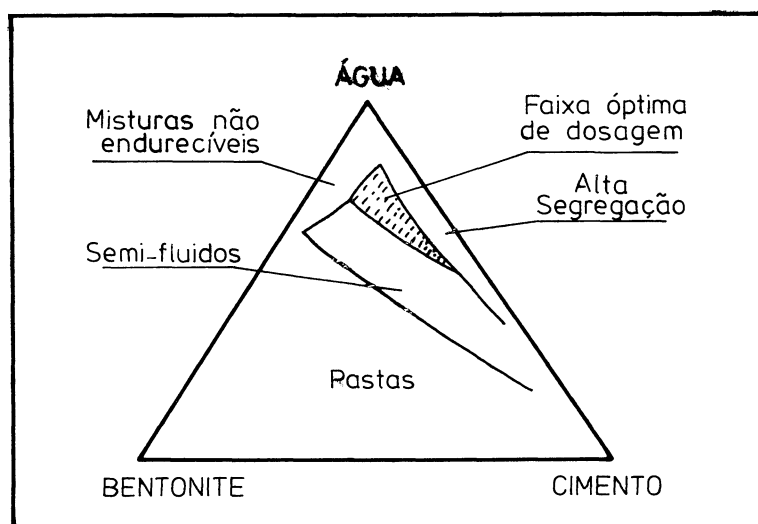


Fig. 2 - Diagrama triangular para dosagem de misturas cimento-bentonite (segundo Jefferis, 1981)

Tab. 1 - Exemplos de propostas de dosagens de misturas em cimento-bentonite

Autor	País	Dosagem		
		Bentonite (kg)	Cimento + Produtos (kg)	Água (kg)
Schweitzer (1989)	Alemanha	30-50	160-220	850-940
Jefferis (1990)	Reino Unido	20-60	100-350	1000

As exigências habitualmente requeridas para este tipo de material subdividem-se em dois grandes grupos, conforme a mistura está ou não endurecida.

Relativamente ao material fluido, aquando da sua colocação em obra, os parâmetros que são geralmente objecto de controlo são: a densidade e as propriedades reológicas, designadamente a viscosidade. No entanto, poderão igualmente ser objecto de especificação outras características, tais como: o pH e o grau de segregação.

Por sua vez, as exigências que interessa especificar para o material já endurecido são as suas resistência-deformabilidade, permeabilidade e durabilidade.

Ao contrário do que é corrente acontecer para as paredes com funções resistentes, este tipo de infraestruturas não está, na maioria dos casos, sujeito a solicitações de grande intensidade. As principais acções actuates são: variações do nível freático ou da superfície do terreno devido a escavações, movimentos induzidos no sub-solo e eventuais sobrecargas colocadas à superfície. Por esse motivo, é usual especificar-se um valor mínimo de apenas 100 kPa para a rotura destes materiais por compressão uniaxial, em condições não confinadas.

No entanto, é extremamente importante que a parede possua uma deformabilidade semelhante à do terreno envolvente, por forma a que não se desenvolvam fendilhações que possam fazer perigar a sua estanquidade. Assim, o material deve apresentar plasticidade suficiente, sendo vulgar imporem-se valores superiores a 5% para a deformação na rotura.

A parte mais superficial da parede é geralmente a condicionante em termos de dosagem, pois as tensões de confinamento aí existentes são muito baixas. Se se pretender obter um material muito plástico, para suportar eventuais movimentos do sub-solo, isso terá que ser conseguido à custa de misturas com muito baixas resistências mecânicas (Jefferis, 1990).

É habitual imporem-se valores da ordem de 10^{-8} m/s para o coeficiente de permeabilidade mínimo de valas corta-águas, construídas sob barragens. Com o estabelecimento de especificações técnicas referentes à construção de aterros sanitários passaram a figurar valores de 10^{-9} m/s para o coeficiente de permeabilidade dos sistemas horizontais de impermeabilização - constituídos por camadas de materiais argilosos - daquelas infraestruturas.

Por semelhança, passaram também a exigir-se valores semelhantes àquele para as barreiras em cimento-bentonite destinadas ao confinamento de terrenos contaminados. Devido ao facto de se tratarem de materiais cuja homogeneidade é muito superior às camadas de solo natural, considera-se que aquele valor é demasiado gravoso para as situações correntes.

Poder-se-ia, no entanto, pensar que aquela medida poderia favorecer as condições de durabilidade da parede mas, como se passa a descrever, esta afirmação nem sempre é verdadeira! A permeabilidade do material está intimamente relacionado com a dosagem de cimento utilizada: quanto menor for a relação água:cimento mais impermeável é o material. Todavia elevadas percentagens de cimento conduzem à obtenção de materiais com comportamento menos dúctil e, consequentemente, mais susceptíveis a fendilharem.

É, também, condição essencial para se obter um material com boas características geotécnicas que os produtos cimentíticos e de substituição sejam adicionados à bentonite já completamente hidratada, sendo aconselhável em todos os processos de mistura a utilização de misturadores de alta velocidade.

3 - PORMENORES CONSTRUTIVOS

Existem fundamentalmente duas técnicas distintas para a sua construção, cujos campos de aplicação se distinguem com base na profundidade a atingir com a vala, ou seja, com a posição do aquitardo.

Para profundidades até cerca de 10 m o método economicamente aconselhável é o da realização da vala em contínuo, cujos trabalhos são levados a efeito com o auxílio de uma retroescavadora com braço longo.

A escavação é iniciada numa das extremidades do alinhamento processando-se, de uma forma contínua, até ao outro limite. No caso de se detectar alguma obstrução ao longo do trajecto definido (p.ex. tubagens de infraestruturas) interrompe-se o trabalho, prosseguindo do outro lado do obstáculo. Completa-se a zona interrompida quando se tiver removido a obstrução ou recorrendo a técnicas complementares, como a injeção de caldas.

Para grandes profundidades recorre-se geralmente aos métodos convencionais utilizados na construção de paredes diafragma. Nesta situação torna-se necessário executar não só as infraestruturas de suporte do material de escavação como também os muros-guia da parede.

São inicialmente executados uma série de painéis primários alternados. Após a sua cura, procede-se ao enchimento do espaço existente entre eles (painéis secundários).

Em qualquer das técnicas citadas há que ter cuidados especiais com duas situações. A primeira é a da contaminação do material de mistura com o solo (geralmente areia e cascalho) que vai caindo durante a escavação, para o interior da vala, alterando a composição prevista.

Atendendo a que esses detritos têm tendência para assentar no fundo da vala, Harrison (1989) aconselha a que no início de cada dia de trabalho se proceda a alguns cortes no fundo da vala, executada no dia anterior, para permitir a remoção daqueles materiais.

A segunda situação é a que contempla as juntas, sejam elas, diárias, de trabalho, entre painéis ou quaisquer outras necessárias. Devem adoptar-se pormenores construtivos, como os que se indicam na Figura 3, nas zonas já executadas a fim de se conseguir uma boa ligação entre materiais de idades diferentes.

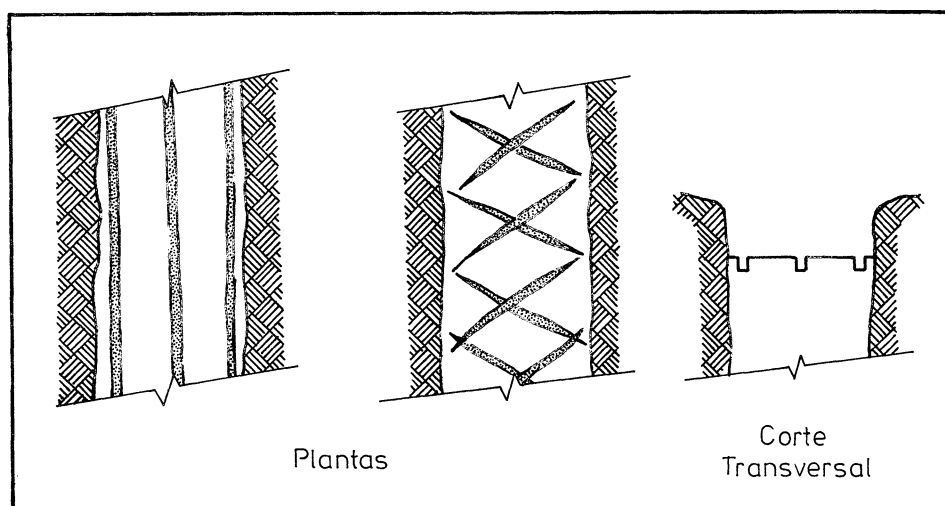


Fig. 3 - Pormenores na ligação entre materiais com idades diferentes (segundo Harrison, 1989)

Relativamente ao processo de colocação do material de enchimento em obra, convém referir que a mistura mantém a sua trabalhabilidade durante cerca de 6 horas, desde que se mantenha em constante circulação. Iniciado o processo de cura, este é irreversível.

Na zona central da vala, devido a um maior assentamento do material e à existência de uma camada superficial (com cerca de 200 mm de espessura) mais rica em cimento e bentonite, surgem

habitualmente fendas. Estas variam bastante em profundidade e largura, podendo atingir, respectivamente, valores da ordem dos 180 mm e 25 mm (Harrison, 1989).

Esta zona superior deve ser removida no final de cada turno, pois não é possível garantir que o material colocado posteriormente consiga preencher totalmente as fendas atrás descritas e elimine a criação de zonas de descontinuidade.

4 - CASOS DE OBRA

Alguns dos países mais industrializados da Europa têm recorrido à utilização de barreiras em cimento-bentonite em trabalhos de remediação ambiental. De entre aqueles destaca-se o Reino Unido, que tem desenvolvido uma experiência considerável na sua aplicação.

Em virtude de não existirem em Portugal qualquer exemplo deste tipo de aplicação, procurou-se compilar informações relativas a diversos casos de obra britânicos que possibilitassem, ao meio técnico nacional, alguma familiarização com as principais características geotécnicas deste tipo de obras, à semelhança do que já se fez no capítulo anterior com os pormenores construtivos.

No primeiro conjunto de exemplos - Tabela 2, extraído de Chipp (1990), apresentam-se os valores, previstos em projecto e os obtidos durante a construção (num máximo de 90 dias após a colocação do material em obra), relativos aos principais requisitos da mistura endurecida.

Tab. 2 - Resultados comparativos entre valores previstos em projecto e obtidos em obra (segundo Chipp, 1990)

Localização	Data de const.	Projecto			Obra (90 dias após construção)		
		k (m/s)	σ_{un} (kPa)	ϵ_f (%)	k(m/s)	σ_{un} (kPa)	ϵ_f (%)
NW Engl	1985	$<5 \times 10^{-8}$	100-200	>4	$1-3 \times 10^{-8}$	140(médio)	11-19
N Engl	1986	$<10^{-8}$	<200	>5	$10^{-9}-3 \times 10^{-10}$	144(médio)	16-21
Midlands	1987	$<10^{-8}$	>100	>5	$5 \times 10^{-9}-3 \times 10^{-10}$	95-280	9-15
NW Engl	1988	$<10^{-8}$	>150	-	$10^{-8}-6 \times 10^{-10}$	165-740	-
SE Engl	1989	$<10^{-8}$	>200	>5	$10^{-8}-10^{-9}$	195-230	7-17
SE Engl	1989	$<10^{-8}$	>100	>5	$9 \times 10^{-9}-8 \times 10^{-11}$	200-605	6-12

Em seguida, apresentam-se na Tabela 3 as características de duas paredes de contenção, localizadas na zona noroeste de Inglaterra, com finalidades completamente distintas: a primeira, referida por Chipp (1990), destinou-se a confinar resíduos sólidos urbanos, enquanto que a outra, descrita em Trivedi *et al* (1992), foi construída para isolar terrenos contaminados com resíduos radioactivos de baixa concentração e alguns provenientes de indústrias radioquímicas. A nomenclatura utilizada naquele quadro é idêntica à apresentada na Figura 1.

Tab. 3 - Exemplo de duas cortinas em cimento-bentonite com diferentes finalidades e valores das respectivas propriedades geotécnicas

Localização	Lixiviados de	Dimensões	Projecto			Obra		
			k(m/s)	σ_{un} (kPa)	ϵ_f (%)	k(m/s)	σ_{un} (kPa)	ϵ_f (%)
Lunt (Chipp 1990)	Resíduos sólidos urbanos	l=800m h=7m e=0,6m d=0,5m a=1m(argilas)	$<10^{-8}$ (28 dias)	>100 (28 dias)	>5 (90 dias)	$5-10^{-9}-6 \times 10^{-11}$	130-205	7-23
Drigg (Trivedi <i>et al</i> , 1992)	Resíduos radioactivos	l=470m h=7,3-9,4m e=1,1m a=1m(betão)	$<10^{-8}$ (28 dias)	>100 (28 dias)	>5 (1 ano)	$10^{-9}-2 \times 10^{-10}$	150-400	11-20

Atendendo aos diversos condicionalismos existentes em relação aos ensaios laboratoriais usualmente empregues na fase de projecto para este tipo de materiais (Lucas, 1996), tem-se dedicado especial atenção à observação *in situ* do comportamento a longo prazo daquelas obras. De referir que, neste âmbito, as opções técnicas mais correntes consistem em:

- Extracção periódica de amostras do material da parede para sua inspecção visual e seu estudo laboratorial. Os locais afectados são posteriormente preenchidos com caldas especiais.
- Monitorização do material da parede com auxílio de equipamentos colocados no seu interior, aquando da construção.
- Ensaaios laboratoriais periódicos realizados sobre material da parede, colhido fresco aquando da sua colocação em obra e preservado até ao momento do ensaio.
- Monitorização realizada em trechos experimentais, construídos junto à parede real e sujeitas às mesmas condições.

Podem apontar-se para as diversas opções as seguintes limitações: nas duas primeiras originam-se pontos de descontinuidade na parede que podem influenciar significativamente o seu comportamento. Na terceira técnica o material a ensaiar não foi sujeito aos mesmos processos de degradação físico-químicos que o material real. Por sua vez, a última opção (que é a mais aconselhável) apresenta custos e tempos de ensaios bastante superiores aos das anteriores. A título exemplificativo, apresenta-se na Figura 4 o dispositivo construído para acompanhamento da parede citada em Trivedi *et al* (1992).

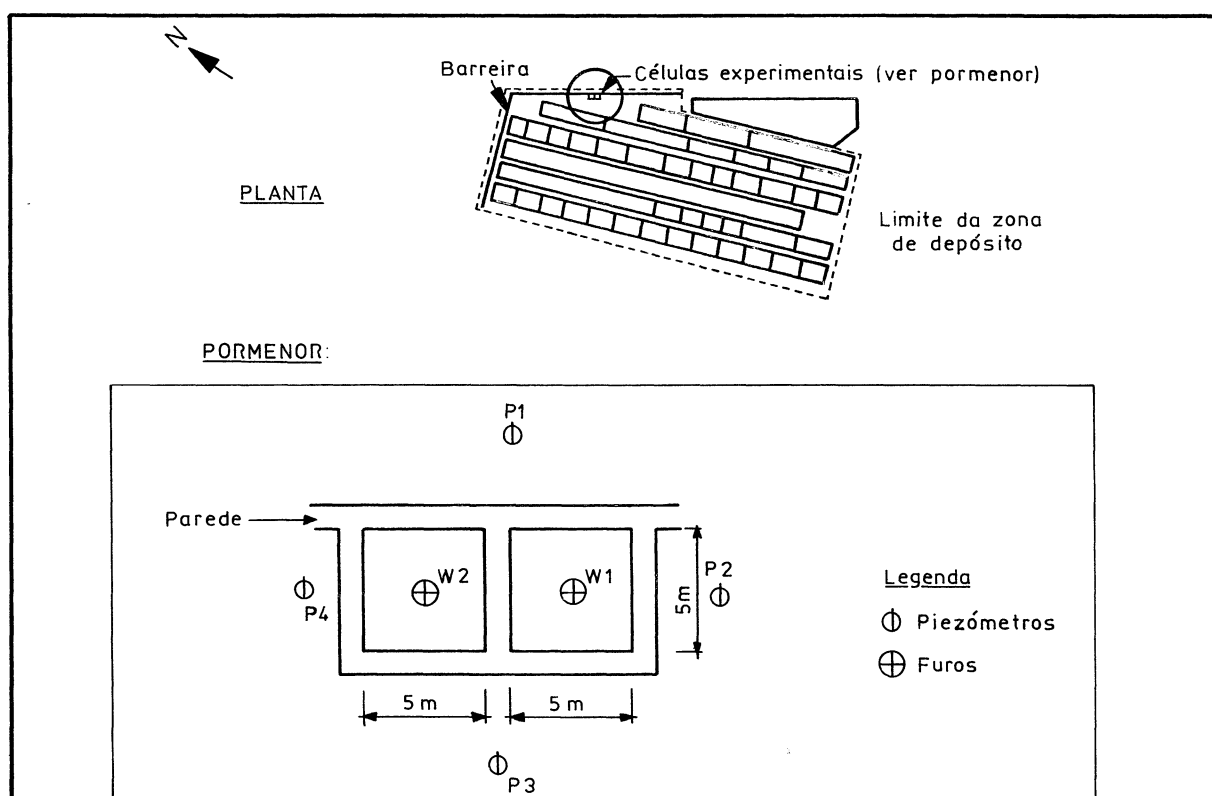


Fig. 4 - Zona experimental construída para acompanhamento do comportamento a longo prazo de uma parede em cimento-bentonite (segundo Trivedi *et al*, 1992)

Apesar de todos os parâmetros de projecto citados anteriormente serem importantes, tem havido uma especial atenção em relação ao estudo do coeficiente de permeabilidade.

Bathia e El-Din (1989), assim como Schweitzer (1989), analisaram, recorrendo a programas de elementos finitos, a viabilidade de se medir a permeabilidade do material da parede através da execução de ensaios de permeabilidade com carga variável, realizados num único furo aberto no interior da parede, tendo concluído da dificuldade em obter resultados fiáveis.

Manassero (1994), face aos resultados obtidos durante a construção de uma barreira na região Norte de Itália ($l = 2.500$ m; $3 < h < 15$ m; $e = 1,2$ m; $d = 1,5$ m), considerou o ensaio de piezocone como a técnica aconselhável para controlo de qualidade, assim como para detecção e localização de defeitos de construção, daquele tipo de barreiras.

Está actualmente em curso no Reino Unido uma campanha, levada a efeito pelo Building Research Establishment (BRE), para acompanhamento pormenorizado de algumas obras com vista ao estudo do seu comportamento a longo prazo.

Tedd *et al* (1993) publicaram já alguns dos resultados provisórios relativos a uma daquelas obras. A parede destinava-se a confinar resíduos sólidos urbanos, tinha uma espessura de 0,60 m e uma profundidade média de 7 m e o material apresentava a seguinte composição: 50 kg de bentonite, 63 kg de cimento Portland normal, 77 kg de escória granulada de alto-forno e 940 kg de água. Os lixiviados apresentavam baixas concentrações de sulfatos, cloretos e magnésio, mas possuíam moderada concentração de amónia. O gradiente hidráulico máximo observado tinha um valor de 2.

Aqueles autores confirmaram a contaminação do material, a diversas profundidades da parede, com significativas porções de solo e que provocaram a criação de zonas heterogéneas mais permeáveis e menos resistentes, quer às acções mecânicas quer às agressões químicas a que o material ficou sujeito durante oito anos.

Foi também possível observar, através da realização de ensaios laboratoriais em amostras de material extraído da parede, a facilidade com que o material se alterava quando exposto ao ar: ao fim de algumas horas oxidava-se; surgiam largas fendas ao fim de 12 dias e desagregava-se completamente após 2 meses.

Foram detectadas algumas fendas no terço superior da parede e que a atravessavam transversalmente. Face ao carácter pouco agressivo dos lixiviados, julga-se que aquelas foram provocadas por movimentos induzidos nas camadas de solo, associados à baixa tensão de confinamento nessa zona.

Foi interessante verificar a acção do material da parede sobre as águas subterrâneas. Assim, apesar do pH dos lixiviados ser aproximadamente neutro, obtiveram-se junto à parede valores de $pH = 12$, o que demonstra a dissolução dos materiais cimentíticos da parede.

Por último, os autores do estudo alertam para o facto dos valores laboratoriais obtidos para a deformação na rotura em provetes extraídos das paredes serem bastante inferiores ($\epsilon_f < 1,5\%$) aos previstos no projecto ($\epsilon_f > 5\%$), indicando, aparentemente, um material mais rígido e quebradiço.

5 - CONCLUSÕES

A utilização de barreiras em cimento-bentonite em trabalhos de remediação ambiental iniciou-se há cerca de 20 anos, não havendo ainda em Portugal qualquer experiência na sua aplicação.

A sua concepção e dimensionamento têm sido feitos, habitualmente, à luz dos ensinamentos adquiridos ao longo dos anos na utilização daqueles materiais em barreiras corta-águas ou em paredes

resistentes. Só muito recentemente se começaram a estudar as especificidades inerentes a este novo tipo de aplicação, designadamente a estanquidade e a susceptibilidade dos materiais à fendilhação, quer devido as acções mecânicas quer ao contacto com produtos quimicamente agressivos.

Existem já algumas recomendações técnicas baseadas, essencialmente, em resultados de ensaios laboratoriais cujos protocolos se afastam bastante das condições reais de obra.

Os resultados obtidos em várias obras, em ensaios realizados nos meses imediatamente após a respectiva construção, revelam a obtenção de valores compatíveis com as exigências requeridas em projecto.

No entanto, enquanto não se adoptarem ensaios laboratoriais suficientemente fiáveis, é fundamental o acompanhamento de casos de obra com vista ao estudo do comportamento a longo prazo deste tipo de barreiras.

Os resultados das primeiras campanhas de monitorização efectuadas, apesar de comprovarem alguns dos cuidados construtivos recomendados habitualmente, levantam algumas dúvidas acerca da evolução das propriedades geotécnicas do material de mistura aplicado.

Assim, para além da intensificação da monitorização deste tipo de infraestruturas, considera-se importantíssimo estabelecerem-se ensaios laboratoriais que possibilitem a previsão do comportamento a longo prazo e a adopção de novas soluções.

AGRADECIMENTOS

A presente comunicação insere-se num trabalho de investigação financiado pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT), entidade a quem expressamos os nossos agradecimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bathia, S.K.; El-Din, K. (1989). In situ measurement of the permeability of slurry walls. XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro (Brasil), vol. 3, pp. 1475-1478.
- Chipp, P.N. (1990). Geotechnical containment measures for pollution control. International Conference on Construction on Polluted and Marginal Land, Brunel, pp. 103-116.
- Harrison, N.R. (1989). Bentonite slurry-grout cut-off walls. Highways and Transportation, December, pp. 21-26.
- Jefferis, S.A. (1981). Bentonite-cement slurries for hydraulic cutoffs. X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 435-440.
- Jefferis, S.A. (1990). Vertical barriers to gas and liquid migration. Seminar on Landfills, London (UK).
- Lucas, F.J.F. (1995a). Recent research on cement-bentonite cut-off walls as barriers to pollutant migration (poster). NATO/ASI: Recent Advances in Groundwater Pollution Control and Remediation, Antalya (Turkey).
- Lucas, F.J.F. (1995b). Sistemas de barreiras verticais utilizadas no sub-solo para controlo da migração de poluentes. ATIC Magazine, 17, Novembro, pp. 27-30.
- Lucas, F.J.F. (1996). Barreiras em cimento-bentonite para controlo dos lixiviados produzidos em lixeiras. 3º Congresso da Água/VII SILUBESA, Lisboa, vol. III, pp. 459-466.
- Manassero, M. (1994). Hydraulic conductivity assessment of slurry wall using piezocone test. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 120, nº 10, pp. 1725-1746.

- Schweitzer, F. (1989). Strength and permeability of single phase diaphragm walls. XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro (Brasil), vol. 3, pp. 1515-1518.
- Tedd, P.; Paul, V.; Lomax, C. (1993). Investigation of an eight years old slurry trench cut-off wall. Building Research Establishment, London (UK).
- Trivedi, D.P.; Holmes, R.G.G.; Brown, D. (1992). Monitoring the in-situ performance of a cement-bentonite cut-off wall at a low level waste disposal site. Cement and Concrete Research, vol. 22, pp. 339-349.