

ESTUDOS SOBRE O DESEMPENHO DE BARREIRAS REATIVAS: DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Studies on the performance of reactive barriers: hydraulic design

ALEXANDRE DUARTE GUSMÃO*, TÁCIO MAURO PEREIRA DE CAMPOS**, EURÍPEDES DO AMARAL VARGAS JR. ** e MANOEL DE MELO MAIA NOBRE***

RESUMO - A contaminação do subsolo com resíduos perigosos tem sido um dos maiores problemas ambientais em vários países, com muitos locais apresentando contaminação da água subterrânea. Existem várias técnicas para controlar e remediar a água subterrânea. Uma das mais utilizadas é a de *pump-and-treat*, que consiste no bombeamento da água contaminada e posterior tratamento na superfície. Esta técnica, no entanto, possui diversas limitações quanto à remediação a longo prazo, especialmente no caso de aquíferos contaminados com NAPLs (*Non Aqueous Phase Liquids* - Fase Líquida Não Aquosa). Dentre as técnicas emergentes alternativas ao *pump-and-treat*, uma das mais promissoras é o tratamento *in situ* dos contaminantes nas barreiras reativas. Este trabalho apresenta resultados de um estudo paramétrico para avaliar alguns dos factores que afectam o desempenho das barreiras reativas, especialmente a influência da configuração da barreira no padrão de fluxo do aquífero (número, comprimento e permeabilidade dos reactores, direcção do gradiente hidráulico, configuração e comprimento da parede impermeável).

SYNOPSIS - Underground contamination with hazardous wastes has been one of the largest environmental problems in many countries, with most sites presenting groundwater contamination. There are several technologies to control and remediate groundwater. One of the technologies most used is the so called pump and treat, which consists on pumping the contaminated groundwater with subsequent treatment at the surface. However it has several limitations on long duration remediation works, especially when the aquifer is contaminated with NAPL's (Non Aqueous Phase Liquids). Among the emerging technologies that are alternatives to pump and treat, one of the most promising is the *in situ* treatment of the contaminant in reactive barriers. This paper presents results of a parametric study aiming to evaluate some of the factors that affect the behaviour of reactive barriers, specially the influence of the barrier configuration on the flow pattern of the aquifer (number, length and permeability of the reactors, direction of the hydraulic gradient, configuration and length of the impervious wall).

1 - INTRODUÇÃO

A água é um componente essencial do meio ambiente e fundamental à vida. Excluídas as águas congeladas nas calotas polares, tem-se que a quase totalidade da água doce disponível se encontra no subsolo (98%), e apenas uma pequena parcela na superfície.

* Doutorando, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

** Professor Associado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil

*** Professor Adjunto, Universidade Federal de Alagoas, Brasil

A contaminação do solo com resíduos perigosos tem se tornado um dos maiores problemas ambientais em vários países, incluindo o Brasil. Apenas nos Estados Unidos, foram identificados mais de 30.000 locais com potencial de Introdução de contaminantes no ambiente subterrâneo. Foi, inclusive, criado um fundo financeiro para descontaminar os locais considerados prioritários (*Superfund/USA*).

Na maioria das vezes, as condições do local incluem a contaminação da água subterrânea. As fontes de contaminação podem ser de vários tipos e actuar juntas ou isoladamente (fossas sépticas, aterros sanitários, barragens de rejeitos, práticas agrícolas, vazamentos industriais, etc.). Dentre as técnicas recentes de remediação de aquíferos que têm sido pesquisadas em diferentes países, o tratamento *in situ* dos contaminantes através de barreiras reativas tem se mostrado como uma das mais promissoras.

O presente trabalho tem como objectivo apresentar resultados de uma avaliação teórica de alguns fatores influentes no desempenho de barreiras reativas. O mesmo está relacionado a um projeto de pesquisa, em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Civil da PUC Rio, sobre a remediação de um aquífero recentemente contaminado pelo vazamento de um solvente clorado (Nobre e Nobre, 1996). Esta pesquisa envolverá ainda uma série de ensaios de laboratório (equilíbrio em lote e coluna), cujos resultados serão utilizados em uma simulação numérica da remediação do local. Para melhor clareza, o trabalho foi dividido em duas partes. A primeira, apresentada neste artigo, trata de aspectos relativos ao dimensionamento hidráulico das barreiras reativas. A segunda parte, que trata de aspectos relacionados ao transporte de massa através do reator, é apresentada em um artigo subsequente (Gusmão et al., 1997b).

2 - REMEDIAÇÃO DE AQUÍFEROS

A remediação de um local contaminado deve contemplar duas partes: a fonte de contaminação, e a pluma de contaminante dissolvido. Estas partes, dadas as suas peculiaridades, devem ser tratadas de maneiras diferentes.

A partir de um levantamento detalhado das condições hidrogeológicas da área, e da caracterização do contaminante, várias opções de técnicas de controle e remediação podem ser selecionadas e combinadas para se ter a remediação do local. É importante, ainda, que se tenha um conhecimento das propriedades de biodegradação do contaminante e da reatividade de ordem físico-química com o solo.

Existem atualmente diversas técnicas de controle de contaminação da água subterrânea, cuja aplicabilidade depende de vários fatores, como condições hidrogeológicas do local, caracterização do contaminante, etc.. Dentre estas técnicas, a mais comumente utilizada é a de *pump-and-treat*, que consiste no bombeamento da água contaminada e posterior tratamento em superfície (e.g. Rivett et al., 1992; Kueper et al., 1992).

Os sistemas de bombeamento e tratamento são eficazes na prevenção da migração de plumas de contaminação, feita através de poços de bombeamento (barreiras hidráulicas), mas possuem diversas limitações quanto à remediação a longo prazo, especialmente no caso de aquíferos contaminados com líquidos não miscíveis com a água, em que há a formação de fontes de contaminação residual no solo (e.g. Starr e Cherry, 1994; Borden e Kao, 1992).

Segundo Ward (1995), do total de 13 ou 14 bilhões de dólares de recursos do *Superfund/USA*, cerca de 6 bilhões foram gastos em soluções do tipo *pump-and-treat*, mostrando um alto custo, mas pouca eficiência na descontaminação dos aquíferos.

3 - BARREIRAS REATIVAS

Diante das limitações do *pump-and-treat*, diversas técnicas alternativas têm sido pesquisadas para a remediação da água subterrânea (Burriss e Cherry, 1992; Schnarr e Farquhar, 1992; Kochany et al., 1994). Dentre as técnicas emergentes, uma das mais promissoras é o tratamento passivo *in situ* dos contaminantes. O projeto envolve a execução de uma barreira permeável *in situ* (reator) ao longo do caminho da pluma de contaminação. À medida que a água percola passivamente através do reator, os contaminantes vão sendo degradados, prevenindo-se a contaminação do aquífero a jusante da barreira. Esta degradação pode envolver processos físicos, químicos ou biológicos (Fig. 1).

Em teoria, a utilização dos reatores *in situ* apresenta uma série de vantagens em relação à do *pump-and-treat*, especialmente o baixo custo de operação e manutenção, além de não ser necessário o fornecimento contínuo de energia (tratamento passivo).

As pesquisas sobre o tratamento *in situ* têm tido um avanço significativo desde o início da década de 80, sendo que muitas das mesmas compreendem adaptações de técnicas de recuperação de águas superficiais. Dentre estas técnicas, uma das que têm se mostrado mais promissoras é a utilização de metais de valência nula para a decloração reductiva de solventes clorados. Já existem diversas aplicações em larga escala na América do Norte, com resultados promissores, empregando tal técnica (Fairweather, 1996).

Os componentes da barreira reativa devem ser escolhidos de tal maneira que se garanta a sua reatividade por prolongados períodos de tempo. Estes sistemas de tratamento devem ser projetados para permanecerem efetivos enquanto houver dissolução de contaminantes nas fontes residuais. Desta maneira, a vida útil do sistema de tratamento deve ser compatível com a duração da dissolução dos contaminantes nas fontes.

A barreira reativa deve ser instalada à jusante da fonte de contaminação, a uma distância que depende das condições do local e da composição do material reativo. Há três requerimentos básicos que devem ser satisfeitos em um projeto de uma barreira reativa (Blowes et al., 1995):

- i) O material deve ser suficientemente reativo para promover as reações químicas necessárias durante o tempo de residência do contaminante na barreira. Do contrário, apenas uma remoção parcial do contaminante será conseguida, podendo inclusive haver a formação de sub-produtos mais nocivos que o próprio contaminante.
- ii) O material reativo na zona de tratamento deve ser suficientemente abundante e ter uma reatividade garantida ao longo de todo o período de dissolução do contaminante através das fontes secundárias. No caso da vida útil do material ser menor que este tempo, a barreira deve ser projetada de tal maneira que seja possível a troca do material reativo.
- iii) O próprio material reativo não pode lançar contaminantes adicionais no aquífero que possam ser inaceitáveis à qualidade da água.

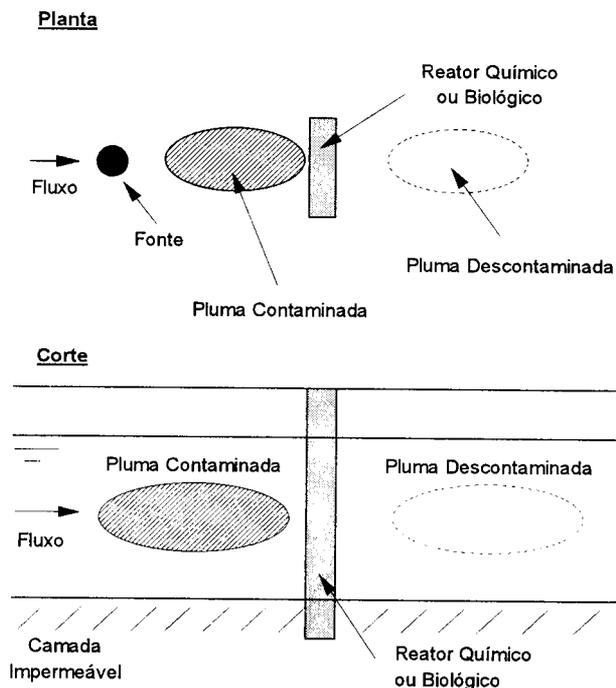


Fig. 1 - Tratamento passivo *in situ* da água subterrânea

Para a completa remediação da pluma, a barreira reativa deve ser grande o suficiente para que toda a água contaminada passe através dela. Se a pluma for muito larga ou se estender a grandes profundidades, as dimensões da barreira podem ser tão grandes que a sua execução e custos podem se tornar inviáveis.

Para se tentar contornar este problema, podem ser utilizadas paredes de baixa permeabilidade para direcionar o fluxo d'água subterrânea, em uma espécie de funil, permitindo que o reator tenha menores dimensões (Fig.2). A combinação das paredes impermeáveis com os reatores *in situ* é denominada de *funnel-and-gate* (O'Hannesin e Gillham, 1992; Starr e Cherry, 1992 e 1994; Smyth et al., 1994), aqui batizada de funil-e-comporta.

O *funnel-and-gate* pode ser constituído por diferentes configurações das paredes impermeáveis e por múltiplos reatores (Fig.3). A vazão de água que percola através do reator e, conseqüentemente, o tempo de residência do contaminante no reator, dependem desta configuração. Tudo isto leva à necessidade de um estudo detalhado das condições de fluxo do aquífero.

Planta

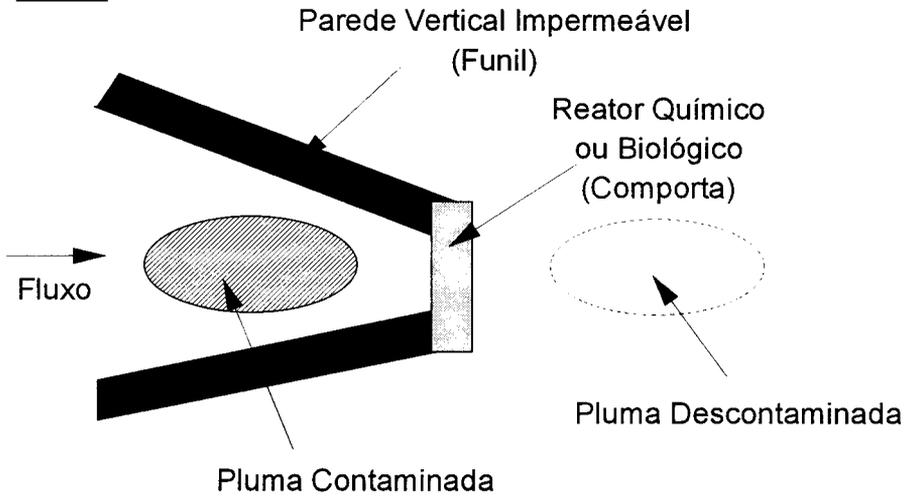


Fig. 2 - Técnica do *funnel-and-gate*

Planta

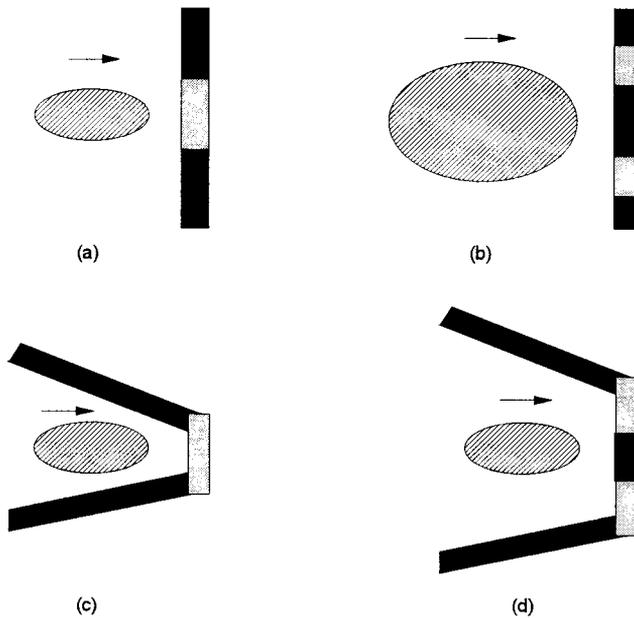


Fig. 3 - Exemplos de configuração do *funnel-and-gate*

4 - ESTUDO PARAMÉTRICO

Com o objetivo de avaliar os fatores influentes no desempenho das barreiras reativas, foi desenvolvido um estudo paramétrico, cuja primeira parte é apresentada neste artigo. Analisa-se aqui o padrão de fluxo do aquífero (velocidade de fluxo e vazão) em função da configuração da barreira reativa (número, comprimento e permeabilidade dos reatores, direção do gradiente hidráulico, configuração e comprimento da parede impermeável). Conforme já mencionado, aspectos relativos ao transporte de massa de solutos são apresentados em artigo subsequente.

Para a avaliação do padrão de fluxo, foi utilizado o programa computacional *VISUAL MODFLOW*, desenvolvido pelo *Waterloo Hydrogeologic Software*. O programa utiliza o *MODFLOW*, que é um modelo numérico tridimensional de fluxo desenvolvido no *U.S. Geological Survey*, baseado no método das diferenças finitas, empregado para determinação tanto de cargas piezométricas como de velocidades de fluxo em meios porosos.

Os parâmetros adotados nas análises são representativos do sítio contaminado com o solvente clorado apresentado por Nobre e Nobre (1996). Foi considerado um aquífero não confinado e isotrópico, com permeabilidade igual a 10^{-5} m/s e velocidade de fluxo igual a 25 m/ano. A configuração básica da barreira reativa está mostrada na Figura 4.

A parede impermeável tem uma espessura de 1 m e permeabilidade igual a 10^{-8} m/s. Os valores de L_{pa_1} e L_{pa_2} são iguais a 20 e 10 m, respectivamente, e o valor de beta é nulo, exceto quando indicado. O número de reatores é variável, como é mostrado na Figura 5, com espessura de 1m e permeabilidade igual a 10^{-4} m/s, exceto quando indicado.

A vazão relativa é definida como sendo a relação entre a vazão absoluta total percolada através dos reatores e a vazão absoluta percolada no aquífero natural, sem a barreira reativa, através de uma seção equivalente ao comprimento L_{pa_1} da parede impermeável. O conceito de velocidade relativa é análogo, ou seja, é a relação entre a velocidade de fluxo no reator e a do aquífero natural.

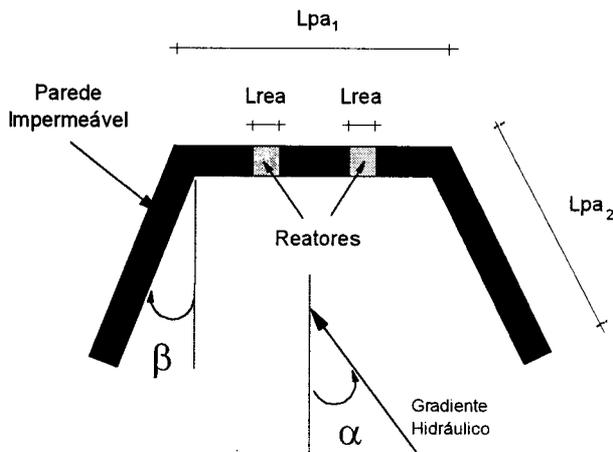


Fig. 4 - Configuração básica da barreira reativa

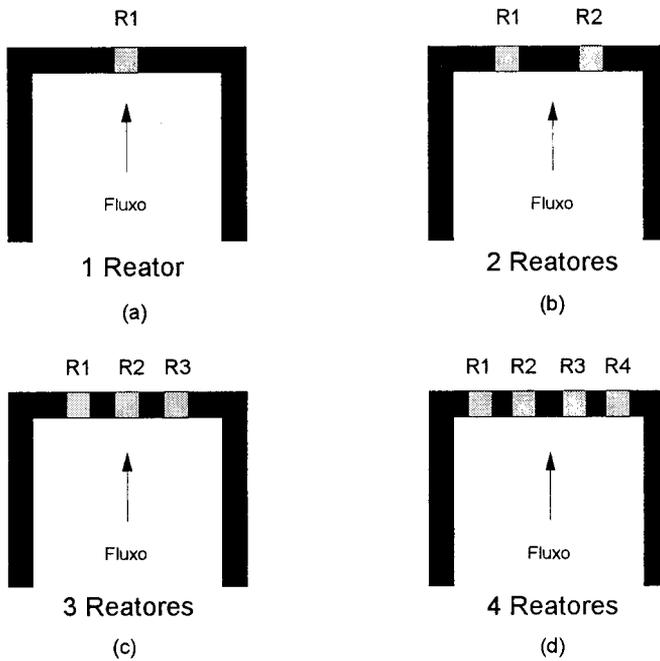


Fig. 5 - Configuração dos reatores

Efeito do número de reatores

As Figuras 6 e 7 mostram a variação da vazão e velocidade máxima relativa em função do número de reatores. Observa-se que o aumento do número de reatores provoca um aumento da área de maior permeabilidade na seção, ocasionando uma maior vazão total percolada através dos reatores. Apesar do aumento da vazão total dos reatores, há um maior aumento da área disponível para percolação, provocando a diminuição da velocidade máxima de fluxo. Observa-se na Figura 6, que a vazão relativa é sempre menor que a unidade, ou seja, a vazão total percolada através dos reatores é menor que a vazão natural do aquífero através de uma seção equivalente ao comprimento da parede L_{pa_1} . Isto se deve ao fato de algumas linhas de fluxo do aquífero natural serem desviadas quando da presença da parede impermeável. Com isto, o valor de L_{pa_1} deve ser sempre maior que a largura da pluma de contaminação, sob pena de haver fuga de contaminante para fora da zona de tratamento (Fig.8). Para que não haja fuga de contaminante, a vazão relativa através dos reatores deve ser maior ou igual a unidade, ou seja, a relação (L_{pa_1}/L_{plu}) deve ser maior ou igual ao inverso da vazão relativa. As análises realizadas mostram que para não haver fuga de contaminante, o valor mínimo da relação (L_{pa_1}/L_{plu}) deve variar de 1,09 a 2,54, dependendo do número e largura dos reatores.

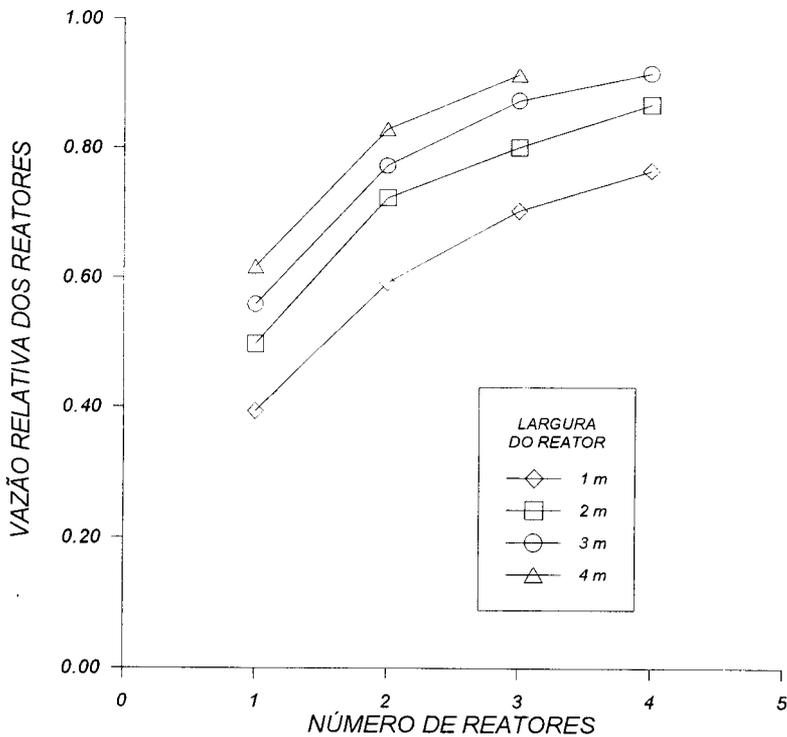


Fig. 6 - Vazão relativa em função do número de reatores

Na Figura 7 observa-se, ainda, que a velocidade máxima relativa varia de 2 a 8, dependendo do número de reatores, ou seja, a velocidade de fluxo nos reatores é sempre superior à do aquífero natural. O afunilamento do fluxo, provocado pela parede impermeável, faz com que o tempo de retenção do contaminante no reator seja menor do que se não houvesse a parede impermeável, o que implica em um menor potencial de degradação do contaminante.

Efeito da largura dos reatores

As Figuras 9 e 10 mostram a variação da vazão e velocidade máxima relativa em função da largura de cada reator. Observa-se um efeito semelhante ao provocado pelo aumento do número de reatores, ou seja, há um aumento da vazão através dos reatores, mas uma diminuição da velocidade máxima de fluxo.

Efeito da permeabilidade do reator

As Figuras 11 e 12 mostram a variação da vazão e velocidade máxima relativa do reator em função da razão de permeabilidade reator-aquífero. Tanto a vazão quanto a velocidade aumentam à medida em que a permeabilidade do reator aumenta, independentemente do número de reatores.

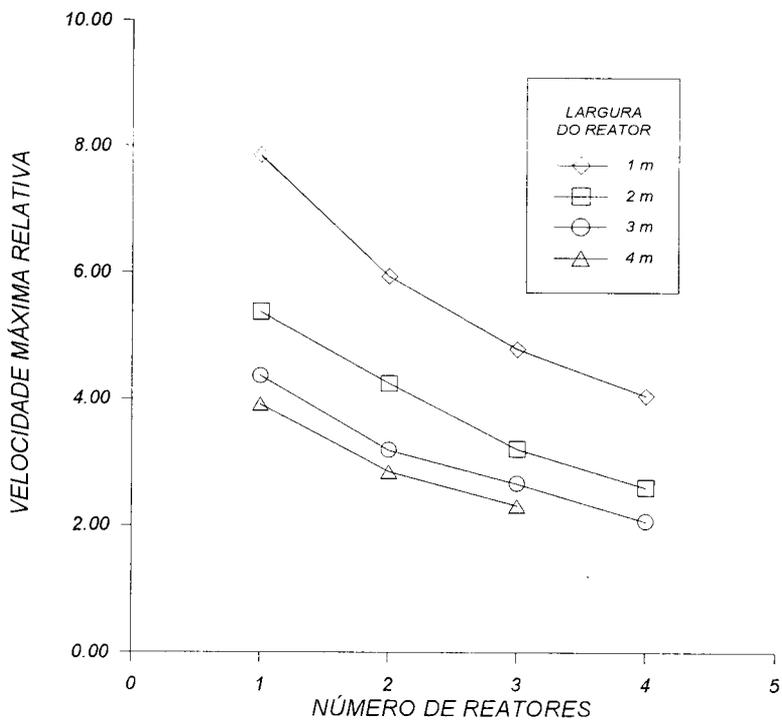


Fig. 7 - Velocidade máxima relativa em função do número de reatores

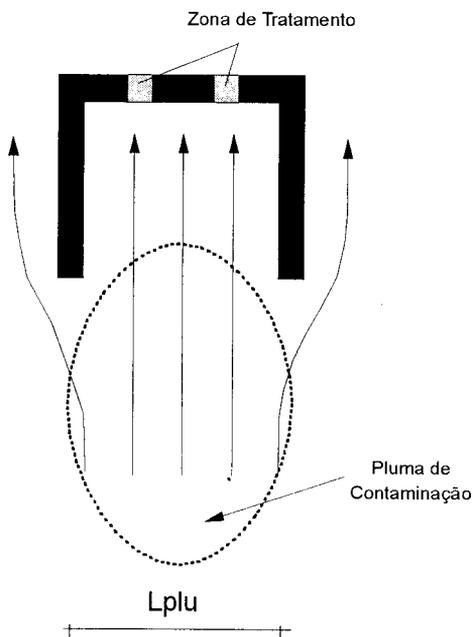


Fig. 8 - Desvio das linhas de fluxo próximo à parede impermeável

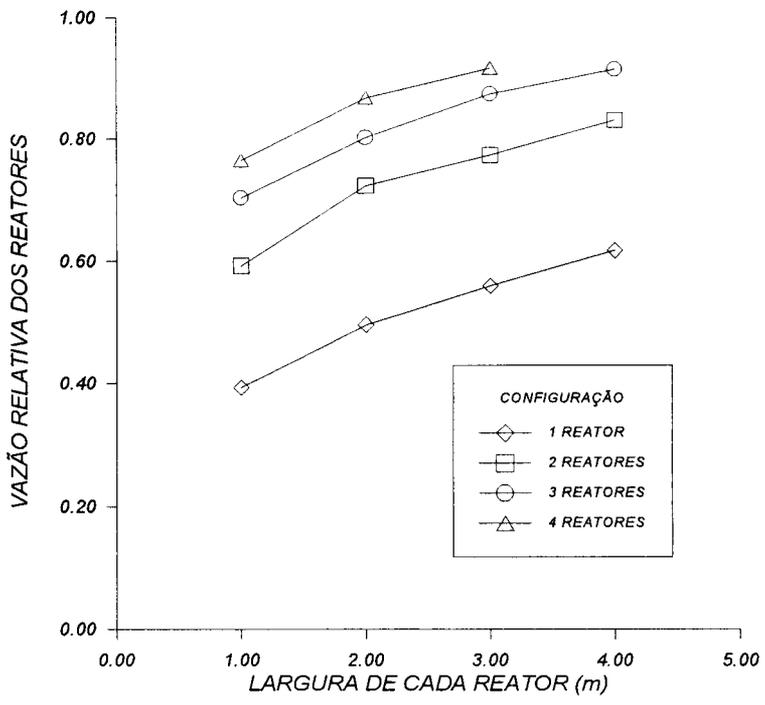


Fig. 9 - Vazão relativa em função da largura do reator

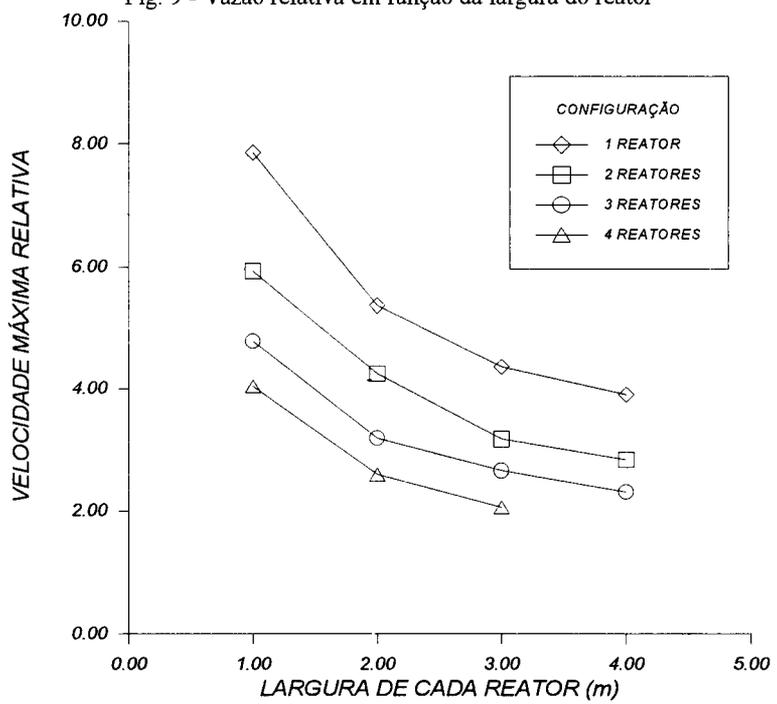


Fig. 10 - Velocidade máxima relativa em função da largura do reator

Observa-se, no entanto, que para uma razão de permeabilidade maior que 10, este aumento é insignificante. Este efeito é importante, pois pode-se projetar o reator com um material reativo mais fino que, em princípio, tende a apresentar permeabilidade mais baixa que a de um material mais grosso, obtendo-se uma maior relação entre a área de superfície e a massa do material. Diversas pesquisas têm mostrado que na maioria dos reatores *in situ*, a taxa de degradação do contaminante é diretamente proporcional a esta relação (e.g. Starr e Cherry, 1994).

Efeito da direção do gradiente hidráulico

A direção e a magnitude do fluxo de água subterrânea podem variar ao longo do tempo, devido a variações naturais nas zonas de recarga e descarga e atividades antrópicas. As Figuras 13 a 15 mostram resultados de simulações visando uma avaliação geral de tais efeitos. Nestas figuras, a direção 0° corresponde ao fluxo perpendicular aos reatores, enquanto a direção positiva corresponde ao sentido anti-horário (Fig.4).

A Figura 13 mostra a variação da vazão relativa dos reatores em função da direção do gradiente hidráulico. Observa-se que, independentemente do número total de reatores, a maior vazão ocorre quando o fluxo é perpendicular aos mesmos.

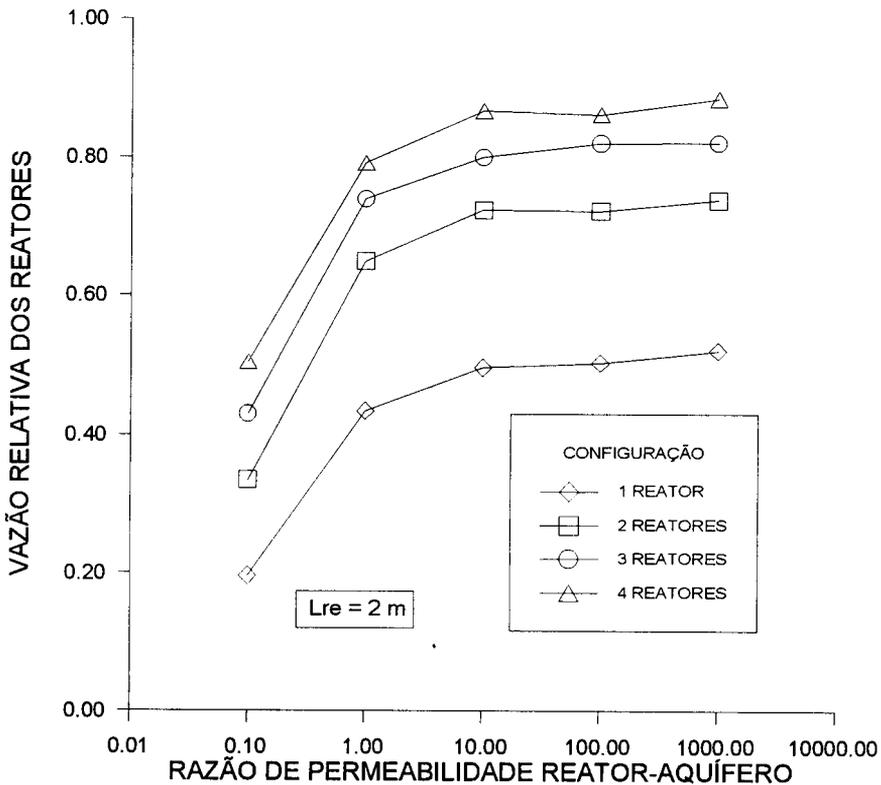


Fig. 11 - Vazão relativa em função da razão de permeabilidade

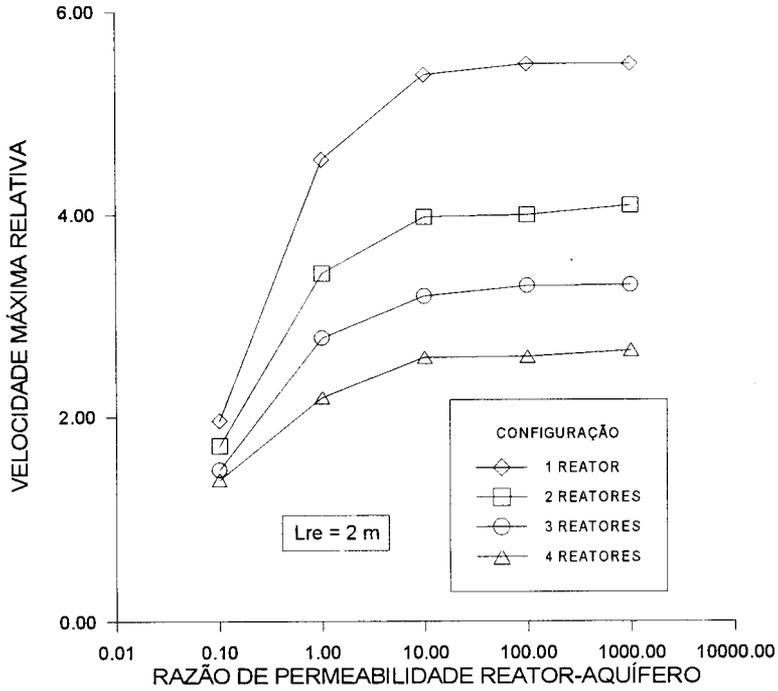


Fig. 12 - Velocidade máxima relativa em função da razão de permeabilidade

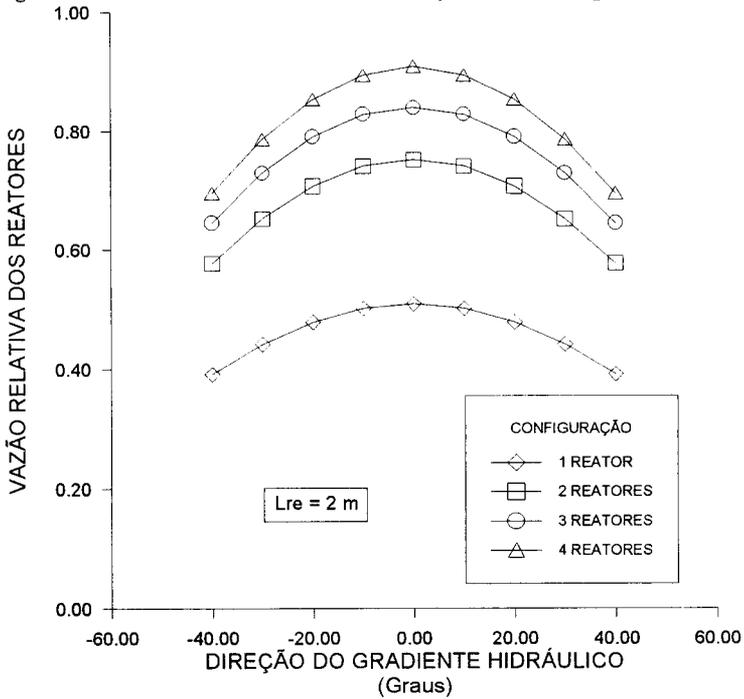


Fig. 13 - Vazão relativa em função da direção do gradiente hidráulico

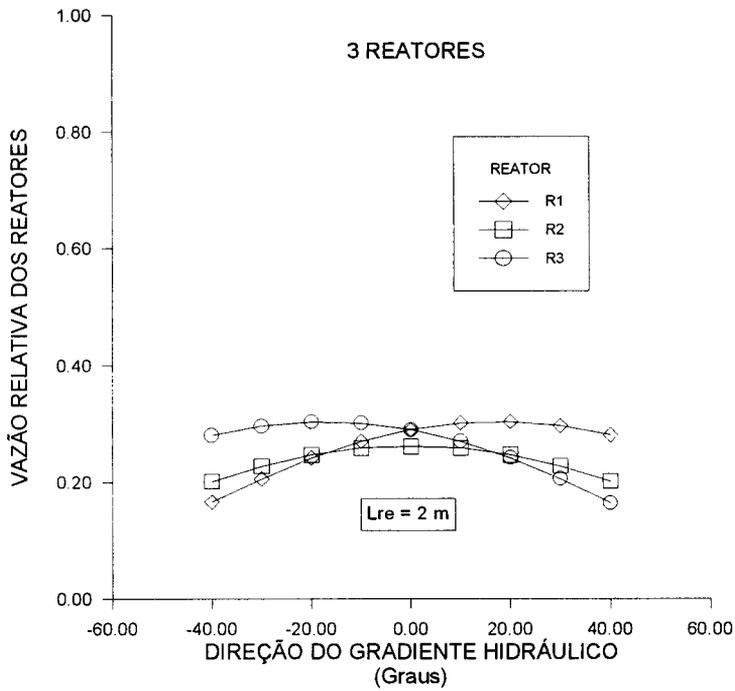


Fig. 14 - Vazão relativa em função da direção do gradiente hidráulico (3 reatores)

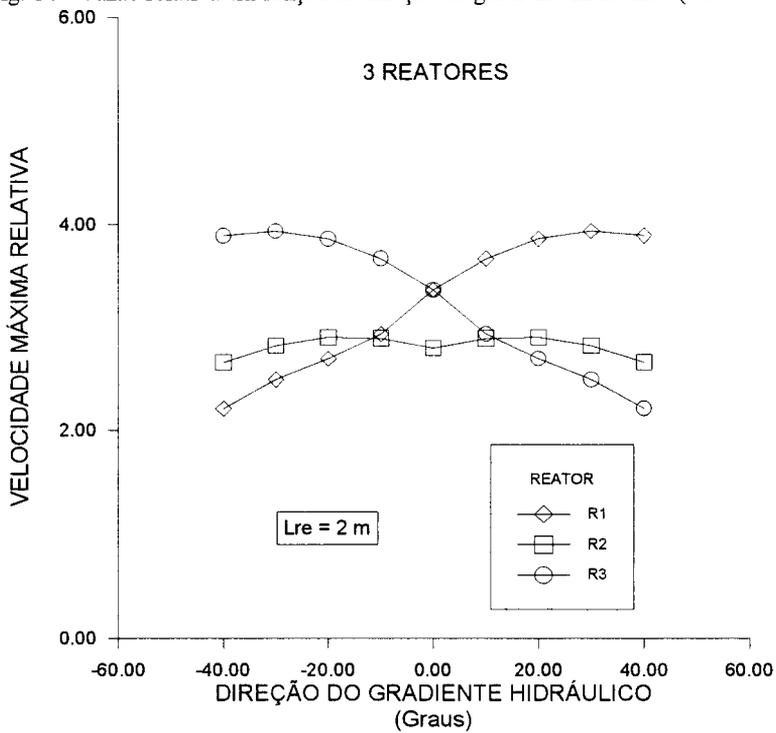


Fig. 15 - Velocidade máxima relativa em função da direção do gradiente hidráulico (3 reatores)

Considerando os reatores de forma individual, as Figuras 14 e 15 mostram a variação da vazão e velocidade máxima relativa em cada um dos mesmos em função da direção do gradiente hidráulico, para uma barreira com 3 reatores. Observa-se que há uma maior influência da direção do gradiente hidráulico nos reatores R1 e R3 (extremidades) do que no reator R2 (central). Observa-se, ainda, que a velocidade máxima em R1 praticamente duplica ao se variar a direção do gradiente de -40 para +40 graus, com efeito oposto sendo observado no reator R3 considerando-se a mesma variação de direção.

Efeito do comprimento da parede impermeável

As Figuras 16 e 17 mostram a variação da vazão e da velocidade máxima relativa do reator em função do comprimento da parede normal ao fluxo (L_{pa1}). Nota-se que, apesar da vazão absoluta aumentar com o crescimento de L_{pa1} , a vazão relativa diminui. A velocidade máxima relativa, no entanto, também apresenta um crescimento. Assim sendo, ao se aumentar o valor de L_{pa1} , deve-se projetar um maior número de reatores ou aumentar a sua largura, afim de se ter uma maior vazão e menor velocidade.

As Figuras 18 e 19 mostram a variação da vazão e velocidade máxima relativa do reator em função do comprimento da parede paralela ao fluxo (L_{pa2}). Neste caso, tanto a vazão total relativa quanto a velocidade máxima relativa crescem com o aumento de L_{pa2} .

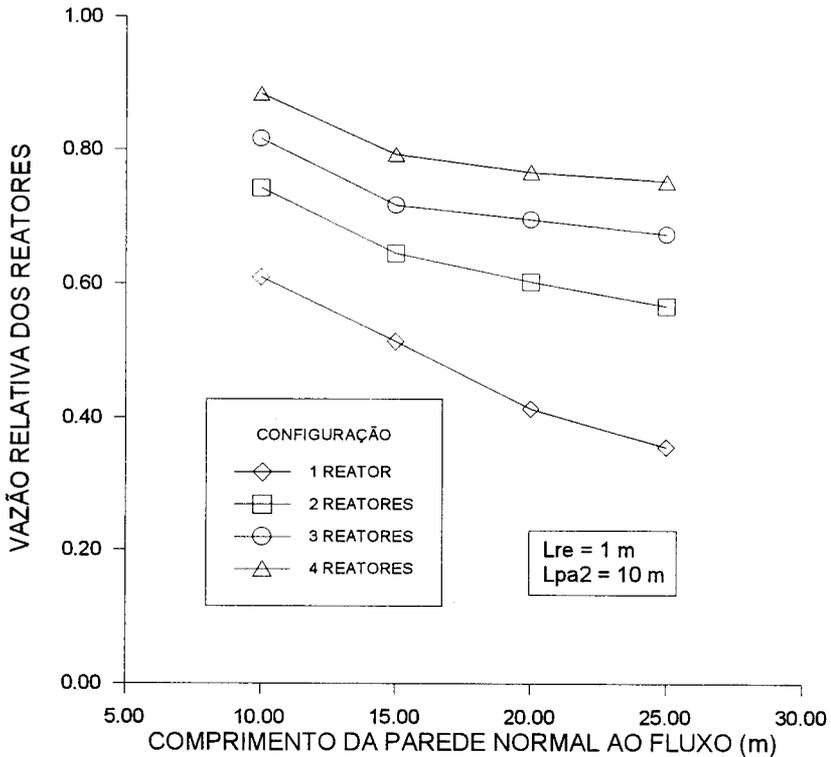


Fig. 16 - Vazão relativa em função do comprimento da parede normal ao fluxo

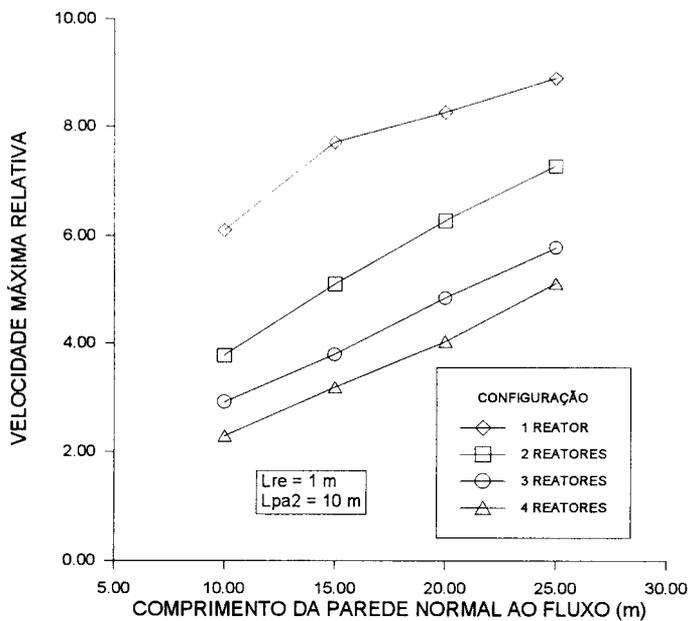


Fig. 17 - Velocidade máxima relativa em função do comprimento da parede normal ao fluxo

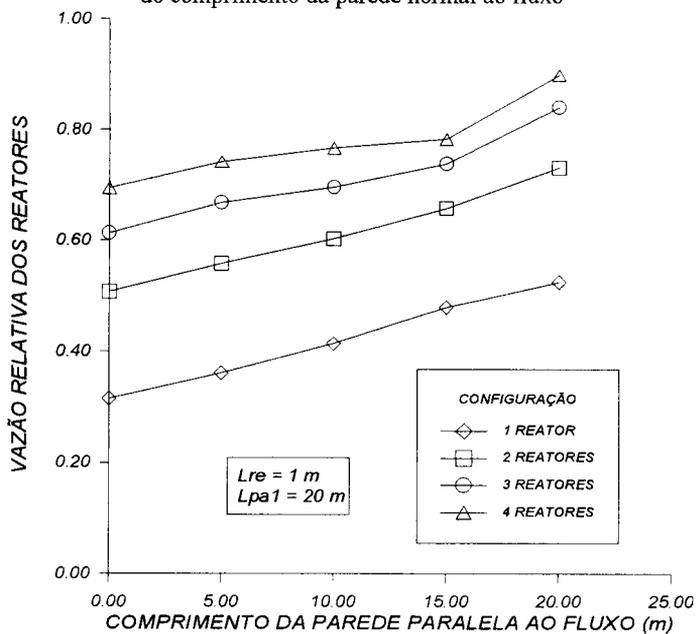


Fig. 18 - Vazão relativa em função do comprimento da parede paralela ao fluxo

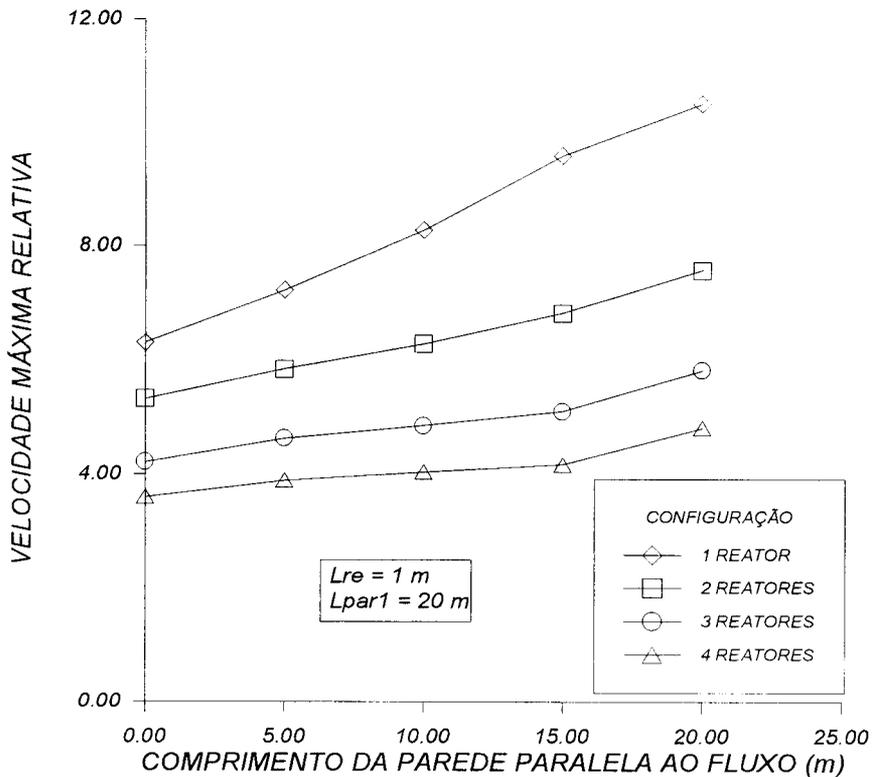


Fig. 19 - Velocidade máxima relativa em função do comprimento da parede paralela ao fluxo

Efeito da configuração da parede impermeável

As Figuras 20 e 21 mostram a variação da vazão e da velocidade máxima relativa do reator em função do ângulo beta, para valores constantes de L_{pa1} e L_{pa2} . Observa-se que tanto a vazão quanto a velocidade máxima relativa aumentam até um valor de beta próximo a 60 graus, quando ocorre uma pequena tendência de diminuição destes valores.

Admitindo-se uma pluma de contaminação com largura (L_{plu}) igual a L_{pa1} , observa-se, através da Figura 20, que é necessário que o ângulo beta varie entre 25 e 50 graus (dependendo do número de reatores) para que não haja fuga de contaminante da zona de tratamento (vazão relativa unitária). É importante ressaltar que no caso de um ou dois reatores, sempre haverá fuga de contaminante.

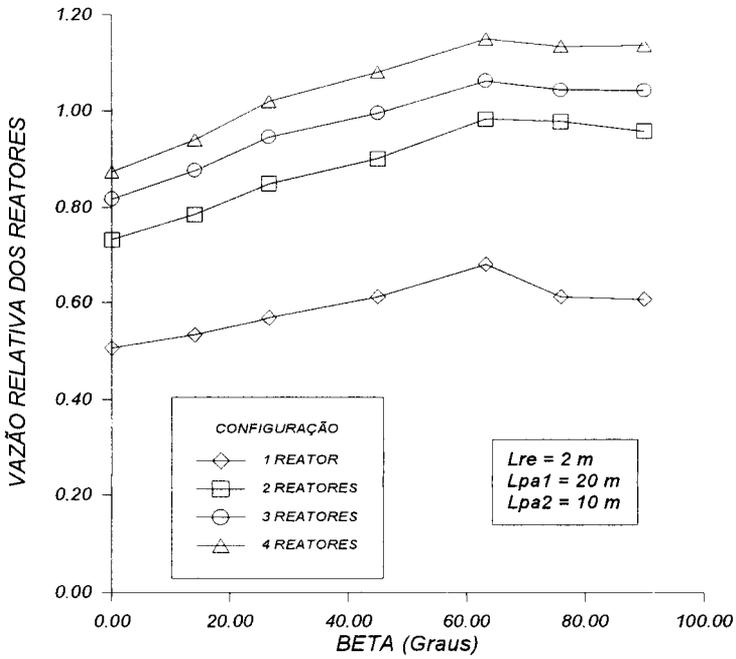


Fig. 20 - Vazão relativa em função da configuração da parede impermeável

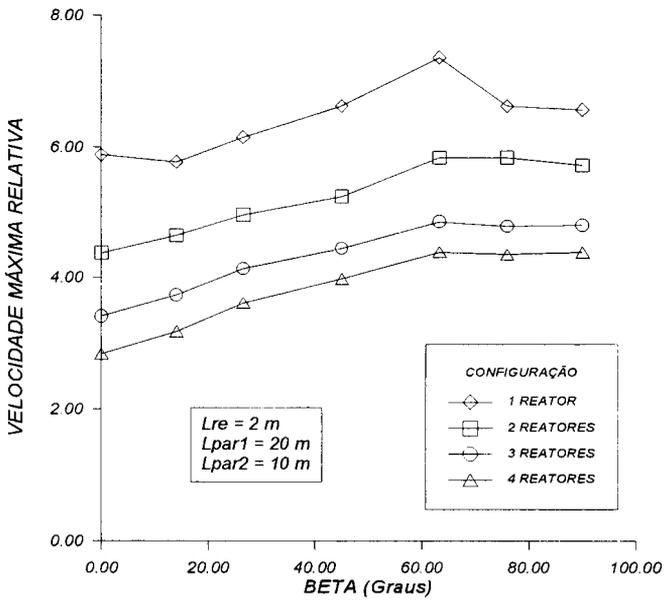


Fig. 21 - Velocidade máxima relativa em função da configuração da parede impermeável

5 - CONCLUSÕES

Dentre as técnicas emergentes de remediação de aquíferos contaminados, uma das mais promissoras é o tratamento passivo *in situ* através das barreiras reativas. O artigo apresenta um estudo paramétrico que mostra a grande influência da configuração da barreira no padrão de fluxo do aquífero. Dependendo da configuração da barreira, pode haver fuga de contaminante da zona de tratamento, e a velocidade de fluxo nos reatores pode ser até oito vezes maior que a do aquífero natural. Os resultados do estudo permitiram um melhor planejamento dos ensaios de laboratório, cujo objetivo é estabelecer os parâmetros necessários a uma simulação numérica da remediação do caso real de contaminação apresentado por Nobre e Nobre (1996).

AGRADECIMENTOS

Os resultados apresentados no presente trabalho fazem parte da pesquisa de doutoramento em engenharia civil desenvolvida pelo primeiro autor, no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, sob a orientação dos demais autores.

O primeiro autor agradece o apoio financeiro recebido da Universidade de Pernambuco, Escola Técnica Federal de Pernambuco e PICDT/CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLOWES, D.W.; PTACEK, C.J.; CHERRY, J.A.; GILHAM, R.W. e ROBERTSON, W.D. – *Passive remediation of groundwater using in situ treatment curtains*. ASCE, Geoenvironment 2000, New Orleans, Vol.2, pp.1588-1607, 1995.
- BORDEN, R.C. e KAO, C.M. - *Evaluation of groundwater extraction for remediation of petroleum-contaminated aquifers*. Water Environment Research, Vol.64, N°1, pp.28-36, 1992.
- BURRIS, D.R. e CHERRY, J.A. - *Emerging plume management technologies: In situ treatment zones*. Air & Waste Management Association, 85th Annual Meeting and Exhibition, Kansas City, 15pp., 1992.
- FAIRWEATHER, V. - *When toxics meet metal*. Civil Engineering, ASCE, May, pp.44-48, 1996.
- GUSMÃO, A.D.; de CAMPOS, T.M.P.; VARGAS Jr., E.A. e NOBRE, M.M.M. - *Estudos sobre o desempenho de barreiras reativas: transporte de massa*. Revista Geotecnia, n° 80, Lisboa, 1997.
- KOCHANY, E.L.; HARMS, S.; MILBURN, R.; SPRAH, G. e NADARAJAH, N. – *Degradation of carbon tetrachloride in the presence of iron and sulphur containing compounds*. Chemosphere, Vol.29, N°7, pp.1477-1489, 1994.
- KUEPER, B.H.; FEENSTRA, S.; RIVETT, M.O. e CHERRY, J.A. - *A series of controlled field experiments to study DNAPL behaviour: implications for site remediation*. HazMat Central Conference, Atlantic City, 17pp., 1992.
- NOBRE, M.M.M. e NOBRE, R.C.M. - *Utilização de uma parede diafragma plástico no controle de uma contaminação por organoclorados*, 3° Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo, Vol.1, pp.69-81, 1996.

- O'HANNESIN, S.F. e GILHAM, R.W. - *A permeable reaction wall for in situ degradation of halogenated organic compounds*. 45th Canadian Geotechnical Society Conference, Toronto, 5pp., 1992.
- RIVETT, M.O.; FEENSTRA, S. e CHERRY, J.A. - *Pump-and-treat remediation of a chlorinated solvent plume: a field study*. 3rd International Conference on Groundwater Quality Research, Dallas, 3pp., 1992.
- SCHNARR, M.J. e FARQUHAR, G.J. - *An in situ oxidation technique to destroy residual DNAPL from soil*. IAH Conference Modern Trends in Hydrogeology, Hamilton, 16pp., 1992.
- SMYTH, D.J.A.; CHERRY, J.A. e JOWETT, R.J. - *Funnel-and-gate for in situ groundwater plume containment*. Superfund XV, Washington, 10pp., 1994.
- STARR, R.C. e CHERRY, J.A. - *Applications of low permeability cutoff walls for groundwater pollution control*. 45th Canadian Geotechnical Society Conference, Toronto, 9pp., 1992.
- STARR, R.C. e CHERRY, J.A. - *In situ remediation of contaminated groundwater: the funnel-and-gate system*. *Groundwater*, Vol.32, No.3, pp.465-476, 1994.
- WARD, H. - *Report about geoenvironment 2000*. *Civil Engineering*, ASCE, May, 30pp., 1995.