

# ESTUDO DO TRANSPORTE DE RADIONUCLÍDEOS EM UM REPOSITÓRIO PROFUNDO PARA FONTES SELADAS RADIOATIVAS

Maurício Guimarães Sabbag<sup>1</sup>; Júlio Takehiro Marumo<sup>1</sup>; Alexandre Ruiz Picchi<sup>2</sup>; Crislene Mateus<sup>1</sup>; Roberto Vicente<sup>1</sup>.

## RESUMO

Visando contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia adequada de deposição de fontes seladas fora de uso para o Brasil, o presente estudo avaliou cenários de migração de radionuclídeos para fora de um repositório profundo tipo poço tubular. Considerou-se uma fratura anelar como caminho preferencial de fluxo da água subterrânea. No futuro, fenômenos naturais e ação antrópica poderão levar à degradação dos materiais que constituem as barreiras artificiais do repositório e formar uma via preferencial de transporte e migração dos radioisótopos depositados. Haverá intrusão de água subterrânea e contato com as fontes seladas, corrosão e transporte dos radioisótopos para o ambiente acessível ao homem. Foram simulados cenários de migração com diferentes gradientes hidráulicos e larguras de fratura, entre outros parâmetros, para cálculo dos tempos de trânsito dos radionuclídeos até a biosfera.

**Palavras-chave:** rejeitos radioativos, repositório, poço tubular, fratura, migração.

## ABSTRACT

The present study models radionuclide migration scenarios out of a deep borehole for disposal of disused sealed radioactive sources. It is assumed that, in the future, anthropogenic and natural phenomena could impair the capacity of the engineered barriers to prevent the radionuclides from reaching the accessible environment. The model considers percolation of groundwater through an annular fracture caused by a detachment between the borehole steel casing and the cement backfill. Groundwater intrudes into the repository, corrodes the sealed sources, leaches and transports the radionuclides to the biosphere. A range of values of hydraulic gradients and fracture apertures were used in calculating flow and radionuclide transport through the postulated fracture. The present Brazilian inventory of sealed sources, which includes thousands of sources with long-lived radionuclides, is used as the source term in the calculations.

**Keywords:** borehole, disposal, sealed radioactive sources, fracture, migration.

---

<sup>1</sup> IPEN – INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, Telefone: 55 (11) 3133-9751, E-mail: [mguisab@gmail.com](mailto:mguisab@gmail.com)  
Av. Lineu Prestes 2242 - Cidade Universitária - CEP: 05508-000 - São Paulo - SP - BRASIL.  
<sup>2</sup> ConAm Consultoria Ambiental Ltda, Telefone: 55 (11) 3085-6087, E-mail: [alexandre@conam.eng.br](mailto:alexandre@conam.eng.br)  
Rua Mourato Coelho 90, conjunto 24 – Pinheiros – CEP 005417-000 - São Paulo – SP - BRASIL.  
III Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo

## 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVO

O conceito de repositório desenvolvido no Brasil recomenda a deposição de todas as fontes radioativas seladas fora de uso, do inventário do país, em um poço tubular profundo, perfurado em rocha cristalina (VICENTE, 2002). O descolamento entre a pasta de cimento selante e o tubo de aço de revestimento do poço – uma fratura anelar (SALAZAR *et al*, 2012) – pode resultar em uma via preferencial para o transporte de radionuclídeos até a biosfera.

Foram investigados os fenômenos associados à migração de radionuclídeos, considerando-se a percolação das águas subterrâneas por meio da fratura em fluxo vertical ascendente e o objetivo deste trabalho foi avaliar a migração de radioisótopos presentes em fontes seladas, a partir do repositório, em longo prazo. Na Fig. 1, apresenta-se um esquema do conceito de repositório para as fontes seladas.

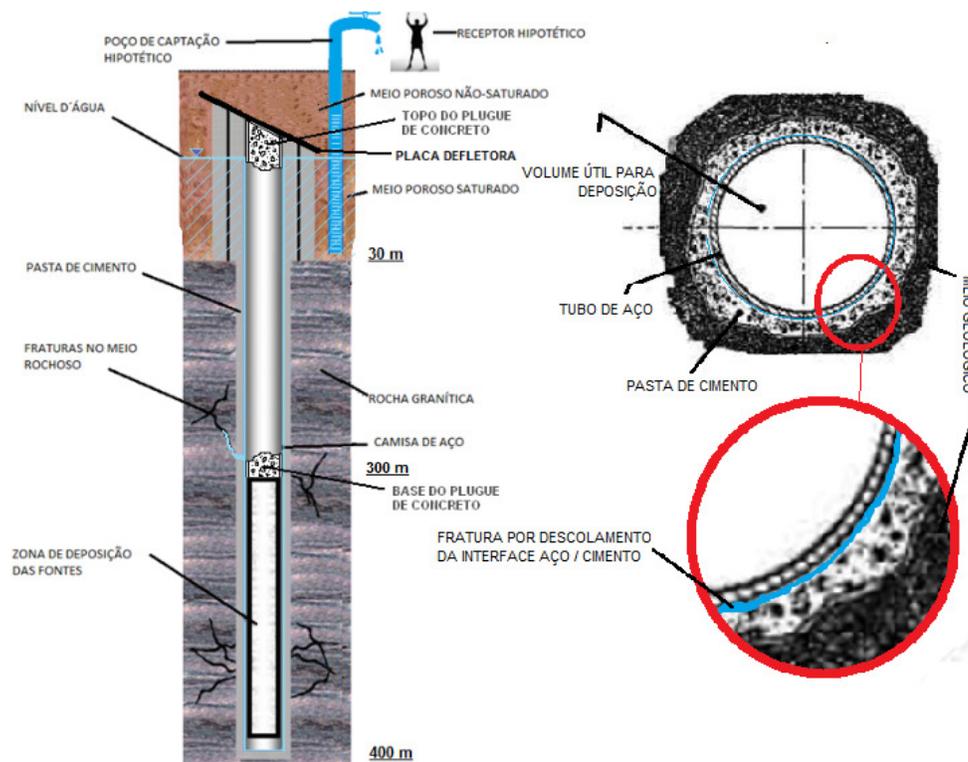


Figura 1. Seção transversal do poço tubular profundo. Em cor azul, as interfaces através das quais a água subterrânea poderia penetrar na fratura.

Os radionuclídeos relevantes para o presente trabalho foram os de meia-vida mais longa e com considerável atividade total:  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , dentre os mais de 30 radionuclídeos presentes no inventário brasileiro.

Para o cálculo da vazão por meio da fratura, foram utilizadas as equações de Navier-Stokes (WHITE, 2002) para fluxo laminar permanente e axial, no espaço anelar

entre dois cilindros concêntricos e sem escorregamento nas paredes nos raios interno e externo. Foram considerados cenários extremos e conservadores, associados a altas e baixas taxas de fluxo, com espessuras da fratura variando de 1 a 100  $\mu\text{m}$  e gradientes hidráulicos variando de  $3,5 \times 10^{-3}$  até  $5,0 \times 10^4$  kPa/m. Foram calculados os tempos de trânsito dos radionuclídeos dissolvidos na água subterrânea até o receptor hipotético, considerando ausência de adsorção das substâncias radioativas na pasta de cimento. Esses tempos foram comparados com o período de 46 mil anos, necessário para que os níveis de radiotoxicidade atinjam valores inócuos (LEITE; 2012). Esse período de tempo pode ser utilizado como referência para o tempo de migração dentro de compartimentos específicos do sistema de contenção de barreiras múltiplas do repositório.

Foi avaliada também a possibilidade de adsorção irreversível de radionuclídeos em toda a espessura da pasta de cimento selante (cenário A) e somente na superfície da fratura (cenário B), para fins de avaliação da capacidade de imobilização do repositório.

## 2 – RESULTADOS

Na Fig. 2, apresenta-se a relação dos diferentes tempos de trânsito calculados para cada gradiente hidráulico e cada espessura de fratura e a comparação com o período de referência, nas duas condições de adsorção (cenários A e B). Com adsorção no volume total da pasta ou somente na superfície, os tempos de trânsito podem ser bastante inferiores, sem degradar a segurança do sistema. Considerou-se uma espessura da pasta de cimento de 5 cm.

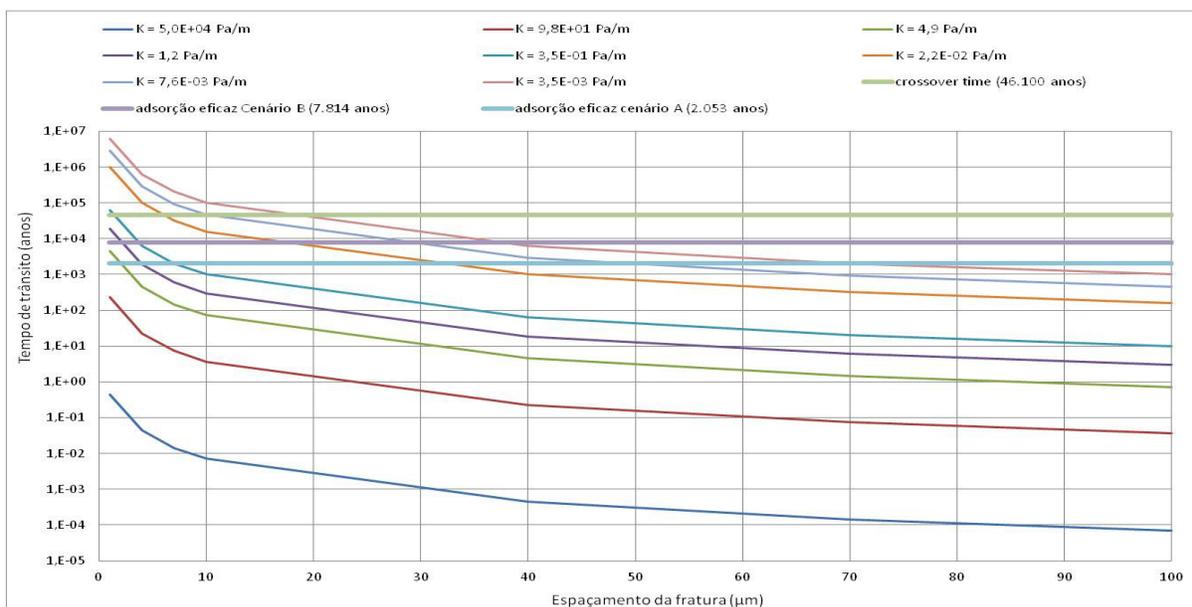


Figura 2. Gráfico dos tempos de trânsito de radionuclídeos para diferentes espessuras de fratura, e diferentes gradientes hidráulicos, comparados com o valor de referência.

### 3 – CONCLUSÕES

Em cenários de fluxo vertical ascendente com gradiente hidráulico inferior a 3,5 mPa/m e fraturas mais estreitas que 20  $\mu\text{m}$ , o repositório é eficaz em qualquer condição. Nesses cenários, os radionuclídeos só atingiriam a superfície depois de 46 mil anos, com ou sem adsorção na pasta de cimento. A escolha de um sítio para deposição de fontes seladas em poços tubulares profundos, no Brasil, deverá avaliar condições hidrogeológicas e sísmicas, favorecendo locais onde seja improvável a ocorrência de eventos que gerem gradientes superiores, mesmo que de curta duração. Da mesma forma, os materiais utilizados nas barreiras do repositório deverão dar garantia razoável de que fraturas mais largas que essa sejam evitadas.

Os resultados do presente estudo podem ser utilizados como ferramenta na avaliação de tecnologias eficientes de selagem, que evitem a formação de *microannulus* no sistema, e na escolha de sítios candidatos a receber um repositório do tipo poço tubular profundo. A literatura considera como aceitável, para fins de escolha de um sítio de deposição, gradientes hidráulicos horizontais de até 1%, 98 Pa/m, (SKB, 2000). Gradientes verticais dessa magnitude, aplicados até às fraturas mais estreitas geradas pelo descolamento da pasta de cimento com a camisa de aço do poço, seriam suficientes para degradar a segurança do sistema. Nesse caso, outras barreiras do sistema, como as embalagens e o encapsulamento das fontes, devem impedir ou retardar o escape dos radionuclídeos para fora do repositório.

### 4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VICENTE, R., ***Management of spent sealed sources***, Thesis, São Paulo: University of Sao Paulo, 2002.
- [2] SALAZAR, A.; BATES, E.A.; DRISCOLL, M.J., ***Plugging of Deep Boreholes Used for HLW Disposal***, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 107, San Diego, California, 11 a 15 nov. 2012.
- [3] WHITE, F. M., ***Mecânica dos fluidos***, 4ª Edição, McGraw-Hill Interamericana do Brasil, 2002.
- [4] LEITE, E., ***Indicadores de segurança para um depósito final de fontes radioativas seladas***, 2012, Dissertação (mestrado), IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 2012.
- [5] SKB – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., ***What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation***, Suécia, abr. 2000 (SKB TR-00-12).