

MODELO PARA LIBERAÇÃO DE PRODUTOS DE FISSÃO POR PLACA COMBUSTÍVEL FALHADA E ARMAZENADA SOB ÁGUA

L. A. A. Terremoto, C. A. Zeituni, J. E. R. da Silva, M. Castanheira, G. Lucki, A. T. e Silva,
C. A. Teodoro e M. de A. Damy

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP); Centro de Engenharia Nuclear (CEN)
Avenida Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária; CEP 05508-000; São Paulo – SP; Brasil
laaterre@ipen.br

RESUMO

Elementos combustíveis tipo placa, após terem sido irradiados em reatores nucleares de pesquisa, são geralmente armazenados sob água em piscinas de estocagem. Quando há falha no revestimento de uma ou mais placas dos elementos combustíveis irradiados armazenados, ocorre liberação de produtos de fissão radioativos para a água. Com a finalidade de descrever este fenômeno, o presente trabalho propõe um modelo que considera a difusão de átomos ou íons do produto de fissão radioativo através de uma pequena falha postulada cilíndrica, obtendo-se assim uma expressão analítica que permite calcular a atividade liberada para a água em função do tempo total de armazenamento da placa combustível falhada. A aplicação do modelo aos testes de *sipping*, realizados no passado em elementos combustíveis tipo placa falhados, consegue reproduzir a forma da função ajustada aos dados experimentais.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a grande maioria dos elementos combustíveis tipo placa, irradiados em reatores nucleares de pesquisa, está armazenada sob água desmineralizada em piscinas de estocagem. Devido à legislação e outras restrições, diversas nações não reprocessam combustíveis nucleares irradiados, de maneira que o armazenamento dos mesmos sob água deve continuar predominando por muitos anos. Em período mais recente, foram realizados estudos bastante detalhados sobre a corrosão no revestimento de alumínio dos elementos combustíveis armazenados em piscinas de estocagem [1].

Nestas circunstâncias, o fenômeno de maior relevância é constituído pela liberação de produtos de fissão radioativos para a água da piscina de estocagem, que ocorre quando há falha no revestimento de uma ou mais placas componentes dos elementos combustíveis irradiados armazenados.

Com a finalidade de descrever o processo de liberação de um determinado produto de fissão radioativo para a água da piscina de estocagem, o presente trabalho propõe um modelo que considera a difusão de átomos ou íons deste produto de fissão através de uma falha postulada.

A falha postulada consiste em um orifício cilíndrico estreito, com dimensões conhecidas, direcionado perpendicularmente à superfície do revestimento e que atinge o cerne da placa combustível, colocando o combustível nuclear irradiado em contato direto com a água.

No âmbito do modelo proposto, é obtida uma expressão analítica que permite calcular a atividade liberada para a água em função do tempo total de armazenamento da placa combustível irradiada falhada.

2. HIPÓTESES DO MODELO

O modelo proposto para descrever a liberação de um produto de fissão radioativo durante o armazenamento de uma placa combustível irradiada falhada tem como base as seguintes hipóteses fundamentais:

- a) Há um orifício estreito perfeitamente cilíndrico, cujas dimensões são conhecidas, direcionado perpendicularmente à superfície do revestimento da placa combustível e que atinge o cerne da mesma em $t = 0$, constituindo deste modo uma falha.
- b) No instante inicial $t = 0$, é bem conhecido o número total de átomos ou íons do produto de fissão radioativo que estão contidos no combustível nuclear irradiado.
- c) Água penetra na falha e entra em contato direto com a superfície exposta do cerne da placa combustível.
- d) Alguns átomos ou íons do produto de fissão radioativo são liberados do combustível nuclear irradiado para a água que penetrou na falha, sendo que a liberação ocorre por intermédio de difusão e/ou de reações químicas.
- e) Ao atingirem a água, os átomos ou íons do produto de fissão radioativo passam a se mover por difusão ao longo do orifício cilíndrico estreito que constitui a falha, sendo o mecanismo caracterizado por um coeficiente de difusão constante.
- f) Após terem se difundido através de todo o comprimento do orifício cilíndrico estreito, os átomos ou íons do produto de fissão radioativo deixam a falha e são emitidos para a água da piscina de estocagem.
- g) Os átomos ou íons do produto de fissão radioativo não são removidos da água da piscina de estocagem.
- h) Em cada instante do período de armazenamento da placa combustível falhada, o número de átomos ou íons do produto de fissão radioativo presentes na água da piscina de estocagem resulta da diferença entre o número de átomos ou íons emitidos a partir da falha e o número de átomos ou íons que decaem.

3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A difusão de um produto de fissão radioativo através de um determinado meio é descrita por intermédio da seguinte equação diferencial parcial [2]:

$$D \cdot \nabla^2 \rho - \lambda \cdot \rho + S = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

onde ρ é a concentração de átomos ou íons do produto de fissão no meio (átomos/cm³), D é o coeficiente de difusão do produto de fissão no meio (cm²/s), λ é a constante de decaimento radioativo do produto de fissão (1/s) e S é o termo fonte que descreve a taxa de geração do produto de fissão no meio (átomos/cm³.s).

O sistema a ser estudado consiste em uma placa combustível irradiada falhada, que se encontra armazenada em piscina de estocagem. Considera-se que a falha tem o formato de

um pequeno orifício cilíndrico com raio r_0 e comprimento a existente no revestimento da placa combustível, de maneira a atingir perpendicularmente o cerne da mesma.

Nestas circunstâncias, a difusão de um produto de fissão radioativo na água contida dentro do orifício é descrita por intermédio da equação diferencial parcial [3]:

$$D \cdot \nabla^2 \rho - \lambda \cdot \rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2)$$

pois o termo fonte não está presente no orifício, mas sim no cerne da placa combustível.

O raio r_0 do orifício cilíndrico é muito menor que o comprimento de difusão $L = \sqrt{D/\lambda}$ do produto de fissão radioativo liberado na água. Este fato, em conjunto com a simetria angular do problema, faz com que a equação diferencial (2) fique reduzida apenas à dimensão da coordenada x ao longo do eixo do orifício [4], portanto:

$$D \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} - \lambda \cdot \rho = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

Nesta equação, a variável tempo, designada por t , é contada a partir do instante em que a falha atinge o cerne da placa.

A condição inicial e as condições de contorno referentes à concentração de átomos do produto de fissão no meio, descrita pela função $\rho(x, t)$, assim como as hipóteses que as fundamentam, são as seguintes:

$\rho(x, 0) = 0 \Rightarrow$ não há produto de fissão dentro do orifício no início do armazenamento;

$\rho(a, t) = 0 \Rightarrow$ diluição infinita do produto de fissão na saída do orifício [4];

$\rho(0, t) = f \cdot S(t) \Rightarrow$ termo fonte situado na base do orifício, a qual está em contato direto com o cerne da placa combustível.

Inicialmente, é importante descrever em detalhe o termo fonte $f \cdot S(t)$, que aparece na segunda condição de contorno e consiste no produto de dois fatores, os quais são:

$f \rightarrow$ Fração média da concentração do produto de fissão presente no combustível nuclear irradiado que acaba sendo liberada para a água;

$S(t) \rightarrow$ Função que descreve a concentração do produto de fissão presente no combustível nuclear irradiado.

Cabe destacar que a fração média f depende das características físico-químicas do sistema formado pela água em contato direto com o combustível nuclear irradiado, devendo, portanto, variar consideravelmente com a forma química deste último.

Na condição de armazenamento, a função que descreve a concentração do produto de fissão presente no combustível nuclear irradiado é dada por [5]:

$$S(t) = S_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (4)$$

onde S_0 é a concentração inicial de átomos do produto de fissão no combustível nuclear irradiado (átomos/cm³), medida no instante em que a falha atinge o cerne da placa combustível, ou seja, quando $t = 0$.

No que se refere à resolução da equação diferencial parcial (3), dado que uma das condições de contorno para $\rho(x, t)$ é não homogênea, a solução a ser buscada deve assumir a forma [6]:

$$\rho(x, t) = v(x, t) + w(x, t) \quad (5)$$

com as condições iniciais e as condições de contorno mostradas a seguir [6]:

$$w(x, 0) = -v(x, 0)$$

$$w(0, t) = f \cdot S(t) - v(0, t)$$

$$w(a, t) = v(a, t) = 0$$

A função $v(x, t)$ deve ser escolhida de maneira que as condições de contorno se tornem homogêneas (isto é, com os membros da direita iguais a zero), porque isto abre o caminho para empregar um método usual de obtenção da função $w(x, t)$. Estas exigências são plenamente satisfeitas escolhendo-se [6]:

$$v(x, t) = f \cdot S_0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot \left[1 - \frac{x}{a} \right] \quad (6)$$

A equação para $w(x, t)$ é obtida substituindo primeiramente a expressão (5) na equação diferencial parcial (3), com o resultado

$$D \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \lambda \cdot w - \frac{\partial w}{\partial t} = - \left[D \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \lambda \cdot v - \frac{\partial v}{\partial t} \right] \quad (7)$$

para em seguida substituir a função (6) no lado direito da equação (7) e encontrar

$$D \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \lambda \cdot w - \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

A equação diferencial parcial (8) é homogênea, podendo ser escrita como:

$$D \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \lambda \cdot w = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (9)$$

Para resolver a equação (9), emprega-se o método de separação de variáveis [3, 6], no qual a função $w(x, t)$ deve ser escrita na forma:

$$w(x, t) = X(x) \cdot T(t) \quad (10)$$

e substituída na equação (9), de maneira que:

$$D \cdot T(t) \cdot \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} - \lambda \cdot X(x) \cdot T(t) = X(x) \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial t} \quad (11)$$

Dividindo-se a equação (11) por $X(x) \cdot T(t)$ e reagrupando os termos, encontra-se

$$D \cdot \frac{1}{X(x)} \cdot \frac{d^2 X(x)}{dx^2} - \lambda = \frac{1}{T(t)} \cdot \frac{dT(t)}{dt} \quad (12)$$

Os dois membros da expressão (12) constituem funções não constantes de variáveis independentes, de maneira que ambos podem ser igualados a uma constante

$$D \cdot \frac{1}{X(x)} \cdot \frac{d^2 X(x)}{dx^2} - \lambda = -k^2$$

$$\frac{1}{T(t)} \cdot \frac{dT(t)}{dt} = -k^2 \quad (13)$$

sendo obtidas duas equações diferenciais ordinárias como resultado:

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + \left(\frac{k^2 - \lambda}{D} \right) \cdot X(x) = 0$$

$$\frac{dT(t)}{dt} + k^2 \cdot T(t) = 0 \quad (14)$$

A equação que envolve a variável t tem como solução

$$T(t) = T_0 e^{-k^2 t} \quad (15)$$

enquanto a equação que envolve a variável x tem como solução

$$X(x) = A \cos \sqrt{\frac{k^2 - \lambda}{D}} x + B \sin \sqrt{\frac{k^2 - \lambda}{D}} x \quad (16)$$

e portanto a função $w(x, t)$ assume a forma geral dada por:

$$w(x, t) = [A \cos \sqrt{\frac{k^2 - \lambda}{D}} x + B \sin \sqrt{\frac{k^2 - \lambda}{D}} x] e^{-k^2 t} \quad (17)$$

onde A e B são constantes arbitrárias cujos valores devem ser determinados aplicando-se as condições de contorno para a função $w(x, t)$. Assim sendo, resulta

$$w(0, t) = f.S(t) - v(0, t) = 0 \Rightarrow A = 0$$

$$w(a, t) = 0 \Rightarrow B \sin \sqrt{\frac{k^2 - \lambda}{D}} a = 0 \Rightarrow \sqrt{\frac{k^2 - \lambda}{D}} = \frac{n\pi}{a} \Rightarrow k^2 = \frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} + \lambda$$

onde n é um número inteiro ≥ 1 . A forma geral (17) passa, portanto, a ser dada pela seguinte expressão:

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x \cdot e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t} \cdot e^{-\lambda t} \quad (18)$$

a qual constitui a solução geral da equação diferencial parcial (8).

Para determinar os coeficientes B_n , utiliza-se a condição inicial

$$w(x, 0) = -v(x, 0) \Rightarrow w(x, 0) = f \cdot S_0 \cdot \left[\frac{x}{a} - 1 \right] \quad (19)$$

o que acarreta

$$f \cdot S_0 \cdot \left[\frac{x}{a} - 1 \right] = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x \quad (20)$$

e portanto pode ser aplicada a seguinte expansão segundo o método de Fourier:

$$B_n = \frac{2}{a} \cdot \int_0^a f \cdot S_0 \cdot \left[\frac{x}{a} - 1 \right] \cdot \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x \cdot dx \quad (21)$$

resultando na integral definida dada por:

$$B_n = \frac{2 \cdot f \cdot S_0}{a} \cdot \int_0^a \left[\frac{x}{a} - 1 \right] \cdot \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x \cdot dx \quad (22)$$

que resolvida por partes fornece

$$B_n = \frac{2 \cdot f \cdot S_0}{a} \cdot \frac{(-a)}{n\pi} \Rightarrow B_n = -\frac{2 \cdot f \cdot S_0}{n\pi} \quad (23)$$

e portanto a função $w(x, t)$ fica sendo:

$$w(x, t) = -\frac{2 \cdot f \cdot S_0}{\pi} \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x \cdot e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t} \quad (24)$$

A solução para a função $\rho(x, t)$ que satisfaz a equação diferencial parcial (3), com as condições iniciais e de contorno postuladas para o sistema, é obtida, conforme indica a equação (5), pela soma das funções $v(x, t)$ e $w(x, t)$, as quais são dadas respectivamente pelas expressões (6) e (24). Agrupando os termos da soma, obtém-se o resultado:

$$\rho(x, t) = f \cdot S_0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot \left[1 - \frac{x}{a} - \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \operatorname{sen} \frac{n\pi}{a} x \cdot e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t} \right] \quad (25)$$

Uma vez conhecida a função $\rho(x, t)$ que descreve a concentração do produto de fissão radioativo dentro do orifício cilíndrico, é necessário calcular a taxa com que este produto de fissão é emitido do orifício para a água da piscina de estocagem na qual a placa combustível falhada se encontra armazenada.

A taxa de emissão $E(t)$, expressa em átomos/s, é proporcional à área da falha, ao coeficiente de difusão do produto de fissão radioativo na água e ao gradiente da concentração do produto de fissão radioativo na saída da falha. Em termos matemáticos, isto significa [4]:

$$E(t) = -\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{x=a} \quad (26)$$

com o resultado

$$E(t) = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot f \cdot S_0 \cdot e^{-\lambda t}}{a} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t} \right] \quad (27)$$

Por fim, resta determinar o número total N de átomos do produto de fissão que estarão presentes na água da piscina de estocagem, decorrido um período de armazenamento com duração igual a t e supondo que estes átomos não sejam removidos da água.

Por unidade de tempo, o número total de átomos resulta da diferença entre o número de átomos emitidos a partir do orifício cilíndrico e o número de átomos que decaem. Em termos matemáticos, este balanço é descrito pela seguinte equação diferencial ordinária [7-10]:

$$\frac{dN}{dt} = E(t) - \lambda \cdot N \quad (28)$$

que pode ser escrita na forma:

$$\frac{dN}{dt} + \lambda \cdot N = E(t) \quad (29)$$

onde a função $E(t)$ é dada pela expressão (27).

A solução geral para a equação (29) é obtida através da seguinte fórmula [11]:

$$N(t) = e^{-\lambda t} \cdot \left[\int e^{\lambda t} \cdot E(t) \cdot dt + C \right] \quad (30)$$

onde C é uma constante que depende das condições iniciais.

Substituindo a expressão para $E(t)$ na fórmula (30), encontra-se o seguinte resultado

$$N(t) = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot f \cdot S_0}{a} \cdot \left[t \cdot e^{-\lambda t} - \frac{2a^2 \cdot e^{-\lambda t}}{D \cdot \pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t} + C \cdot e^{-\lambda t} \right] \quad (31)$$

Para determinar o valor da constante C , aplica-se a condição inicial $N(0) = 0$, significando a inexistência de átomos do produto de fissão na água da piscina de estocagem quando a falha atingiu o cerne da placa combustível em $t = 0$. O resultado assim obtido

$$C = \frac{2a^2 \cdot e^{-\lambda t}}{D \cdot \pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \quad (32)$$

é em seguida substituído na expressão (31), fornecendo:

$$N(t) = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot f \cdot S_0}{a} \cdot \left[t \cdot e^{-\lambda t} + \frac{2a^2 \cdot e^{-\lambda t}}{D \cdot \pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t}\right) \right] \quad (33)$$

Utilizando o resultado [12]

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} = -\frac{\pi^2}{12} \quad (34)$$

e agrupando os termos de maneira conveniente, encontra-se

$$N(t) = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot f \cdot S_0 \cdot e^{-\lambda t}}{a} \cdot \left\{ t - \frac{a^2}{D} \cdot \left[\frac{1}{6} + \frac{2}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t} \right] \right\} \quad (35)$$

sendo a atividade correspondente dada por $A(t) = \lambda \cdot N(t)$.

Um sumário das equações diferenciais utilizadas no modelo proposto é apresentado por intermédio da Figura 1.

4. APLICAÇÃO AOS TESTES DE *SIPPING*

O teste de *sipping* é uma técnica não destrutiva usada para avaliar a integridade estrutural do revestimento de elementos combustíveis irradiados, cujo fundamento consiste na detecção do vazamento de produtos de fissão radioativos que emitem raios-gama [13-14].

Ao realizar testes de *sipping* em elementos combustíveis irradiados que se encontram armazenados há longo tempo em piscinas de estocagem, o produto de fissão gama-emissor adequado para uso como indicador de falha é o ^{137}Cs . Elevado rendimento na fissão, facilidade de solubilização em água e meia-vida longa ($T_{1/2} = 30,14$ anos) são características que tornam este radionuclídeo praticamente a única opção neste caso [13-14].

Na realização destes testes, os intervalos de tempo envolvidos [13-14] são tais que:

$$\frac{a^2}{D \cdot \pi^2} \ll t \ll T_{1/2}$$

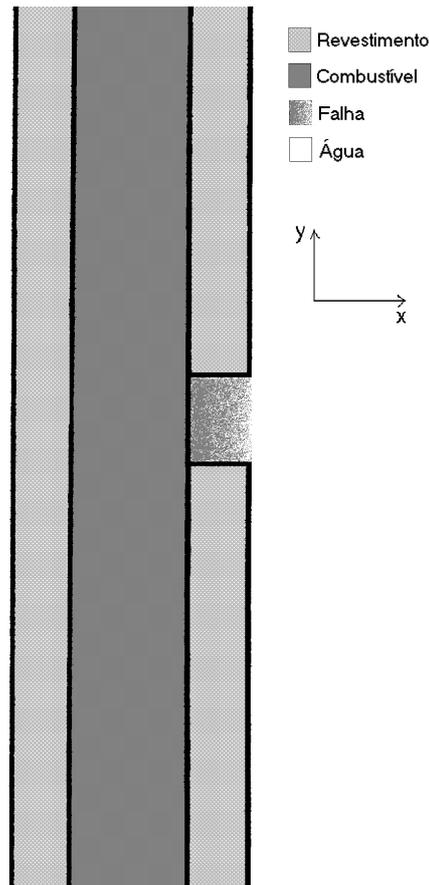


Figura 1. Seção longitudinal de uma placa combustível irradiada falhada, ampliada 21 vezes para ilustrar a região de validade de cada uma das equações diferenciais correspondentes às hipóteses do modelo:

- Combustível

$$\frac{dS}{dt} = -\lambda \cdot S$$

com a condição inicial $S(0) = S_0$.

- Falha

$$D \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} - \lambda \cdot \rho = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

com a condição inicial $\rho(x, 0) = 0$ e com as condições de contorno $\rho(a, t) = 0$; $\rho(0, t) = f \cdot S(t)$.

- Água

$$\frac{dN}{dt} + \lambda \cdot N = -\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{x=a}$$

com a condição inicial $N(0) = 0$.

e portanto

$$e^{-\lambda t} \cong 1 \quad e^{-\frac{D \cdot n^2 \cdot \pi^2}{a^2} t} \cong 0$$

de maneira que a expressão (35) assume a forma

$$N(t) = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot f \cdot S_0}{a} \cdot \left\{ t - \frac{a^2}{6 \cdot D} \right\} \quad (36)$$

com a atividade específica da amostra sendo dada por

$$A(t) = -\frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot a \cdot f \cdot \lambda \cdot S_0}{6 \cdot Vol} + \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot D \cdot f \cdot \lambda \cdot S_0}{a \cdot Vol} \cdot t \quad (37)$$

onde *Vol* é o volume total de água contido no recipiente em que foi realizado o teste.

Esta expressão para *A(t)*, obtida a partir do modelo proposto, reproduz a forma geral da função ajustada aos dados experimentais de testes realizados no passado em elementos combustíveis tipo placa falhados, nos quais, conforme mostra a Figura 2, foi constatado um crescimento linear da atividade específica de ¹³⁷Cs com o tempo de *sipping* [13].

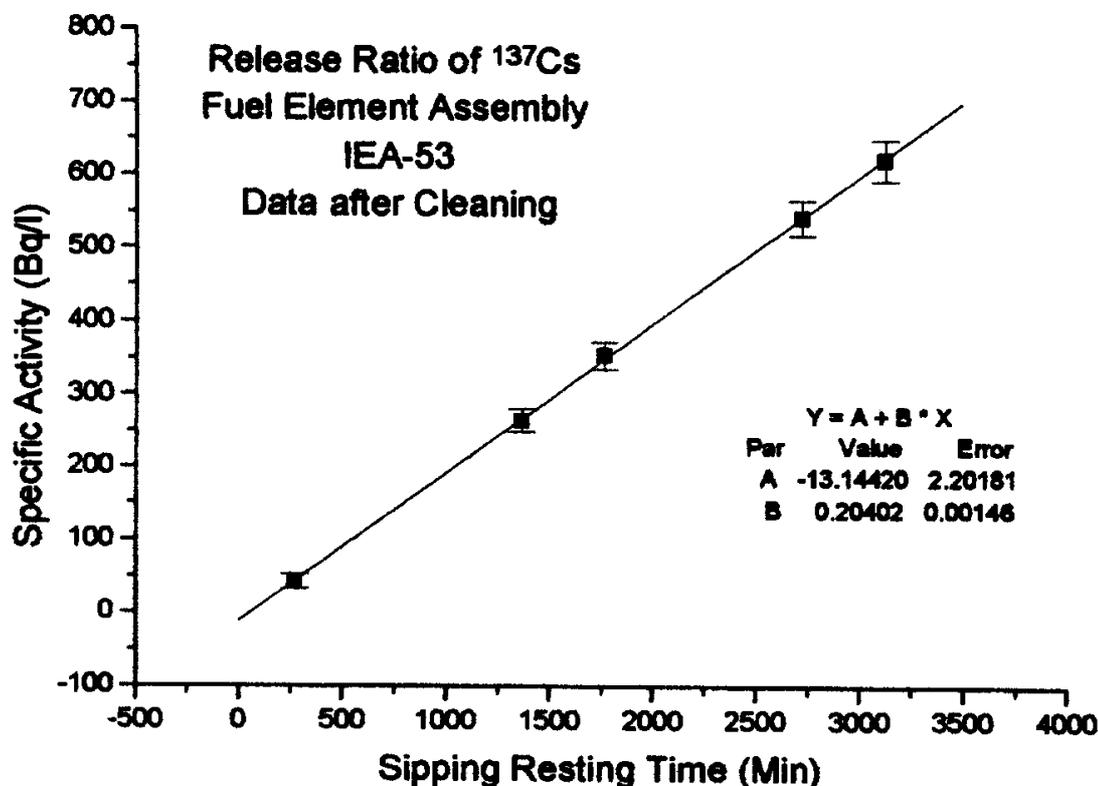


Figura 2. Aumento linear da atividade específica de ¹³⁷Cs com o tempo de *sipping* em um elemento combustível tipo placa falhado [13].

5. DISCUSSÃO

A utilização do modelo proposto permite medir diretamente o parâmetro f , fração média da atividade total do combustível nuclear liberada para a água em caso de falha no revestimento, que é uma característica do produto de fissão radioativo e do tipo de combustível nuclear.

Para tanto, torna-se necessário realizar experimentos nos quais: *a)* uma falha semelhante à postulada no modelo seja produzida em miniplacas combustíveis irradiadas que possuam inventário isotópico bem conhecido; *b)* cada miniplaca contenha no cerne um tipo diferente de combustível nuclear empregado em reatores de pesquisa; *c)* cada miniplaca falhada seja totalmente imersa em um recipiente contendo água desmineralizada, ali permanecendo em posição vertical fixa; *d)* o monitoramento de temperatura e pH da água do recipiente seja efetuado continuamente; *e)* amostras de água do recipiente sejam coletadas em intervalos de tempo regulares e enviadas logo a seguir para medidas de espectrometria gama; *f)* gráficos da atividade específica dos produtos de fissão radioativos em função do tempo de imersão da miniplaca falhada sejam levantados para medir o parâmetro f .

A determinação experimental do parâmetro f , para os principais produtos de fissão radioativos e tipos de combustível nuclear empregados em reatores de pesquisa, permitirá utilizar o modelo proposto tanto para estimar a extensão de falhas em elementos combustíveis tipo placa irradiados quanto para avaliar a atividade liberada na piscina de estocagem onde os mesmos estiverem armazenados.

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho é proposto um modelo para descrever a liberação de um produto de fissão radioativo para a água da piscina de estocagem a partir de uma placa combustível falhada, considerando difusão deste produto de fissão através de uma pequena falha cilíndrica postulada.

A aplicação do modelo aos resultados de testes de *sipping* realizados no passado em elementos combustíveis tipo placa falhados consegue reproduzir a forma geral da função ajustada aos dados experimentais.

Experimentos devem ser realizados para determinar a fração média da atividade total de um determinado produto de fissão radioativo que cada tipo de combustível nuclear empregado em reatores de pesquisa libera para a água em caso de falha no revestimento.

REFERÊNCIAS

1. *Corrosion of Research Reactor Aluminium Clad Spent Fuel in Water*, Technical Reports Series No. 418, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna (2003).
2. C. A. Friskney and M. V. Speight, "A Calculation on the In-pile Diffusional Release of Fission Products Forming a General Decay Chain", *Journal of Nuclear Materials* **62**, 89 – 94 (1976).

3. E. Butkov, *Física Matemática*, Editora Guanabara Koogan S. A., Rio de Janeiro (1988).
4. R. L. D. French, “The Emission of Long-lived Gaseous Fission Products from a Small Hole in the Cladding of a Reactor Fuel Element”, *Journal of Nuclear Energy A/B* **20**, 451 – 464 (1966).
5. W. E. Meyerhof, *Elements of Nuclear Physics*, McGraw-Hill Book Company, New York (1989).
6. G. Stephenson, *Uma Introdução às Equações Diferenciais Parciais para Estudantes de Ciências*, Editora Edgard Blücher Ltda. / Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo (1975).
7. S. D. Beck, *The Diffusion of Radioactive Fission Products from Porous Fuel Elements*, Technical Report BMI-1433, Battelle Memorial Institute (1960).
8. L. M. Litz, *Diffusion Equation for Radioactive Species in Thin-Plate Nuclear Reactors*, Technical Report LRL-97, Livermore Research Laboratory (1954).
9. R. L. Faircloth and R. B. Thomas, *An analytical solution for the diffusional release of fission products from a nuclear fuel particle when the power generated is increasing linearly with time*, Technical Report AERE-R 8237, AERE Harwell (1976).
10. B. J. Lewis, R. D. MacDonald and H. W. Bonin, “Release of Iodine and Noble Gas Fission Products from Defected Fuel Elements During Reactor Shutdown and Start-up”, *Nuclear Technology* **92**, 315 – 324 (1990).
11. K. D. Machado, *Equações Diferenciais Aplicadas à Física*, Editora UEPG, Ponta Grossa (1999).
12. L. B. W. Jolley, *Summation of Series*, Dover Publications Inc., New York (1961).
13. J. A. Perrotta, L. A. A. Terremoto and C. A. Zeituni, “Experience on Wet Storage Spent Fuel Sipping at IEA-R1 Brazilian Research Reactor”, *Annals of Nuclear Energy* **25**, 237 – 258 (1998).
14. L. A. A. Terremoto, C. A. Zeituni, J. A. Perrotta, A. T. e Silva e J. E. R. da Silva, “Teste de Sipping em um Elemento Combustível Tipo Placa Falhado”, *INAC 2002 - International Nuclear Atlantic Conference - XIII Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica (XIII ENFIR)*, Rio de Janeiro (Agosto/2002).

ABSTRACT

Plate-type fuel elements burned-up inside the core of nuclear research reactors are stored mainly under deionized water of storage pools. When cladding failure occurs in such elements, radioactive fission products are released into the storage pool water. This work proposes a model to describe the release mechanism considering the diffusion through a postulated small cylindrical failure. As a consequence, an analytical expression is obtained for the activity released into the water as a function of the total storage time of a failed fuel plate. The proposed model reproduces the linear increasing of ^{137}Cs specific activity observed in sipping tests already performed on failed plate-type fuel elements.