

BR 9431702

ISSN 0101-3084



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

GOVERNO DO BRASIL

MÉTODO DE DATAÇÃO PELOS TRAÇOS DE FISSÃO: I-ESTUDO DA
UNIFORMIDADE DO FLUXO DE NÉUTRONS EM ALGUMAS POSIÇÕES
DE IRRADIAÇÃO DO REATOR IEA-R1

Ana Maria OSORIO, Marília C. KHOURI, Jélio Ç. HADLER, Pedro J. IUNES e
Sérgio R. DE PAULO

IPEN-Pub-301

JUNHO/1983

SÃO PAULO

**MÉTODO DE DATAÇÃO PELOS TRAÇOS DE FISSÃO: I - ESTUDO DA
UNIFORMIDADE DO FLUXO DE NÊUTRONS EM ALGUMAS POSIÇÕES DE
IRRADIAÇÃO DO REATOR IEA-R1**

Ana Maria OSORIO, Marília C. KHOURI, Júlio C. HADLER, Pedro J. IUNES e Sérgio R. DE PAULO

DEPARTAMENTO DE FÍSICA E QUÍMICA NUCLEARES

**CNEN/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO - BRASIL**

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

B11.10

**FISSION TRACKS
IEAR-1 REACTOR
NEUTRON FLUX
FILTERS
CADMIUM**

IPEN-Doc-4611

Aprovado para publicação em 10/03/93.

Note: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do(s) autor(es).

**METODO DE DATAÇÃO PELOS TRAÇOS DE FISSÃO:
I.-ESTUDO DA UNIFORMIDADE DO FLUXO DE NEUTRONS EM ALGUMAS
POSIÇÕES DE IRRADIAÇÃO DO REATOR IEA-R1**

Ana Maria OSORIO¹, Marília C. Khouri, Júlio C. HADLER²

Pedro J. IUNES², Sérgio R. DE PAULO²

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05422-970 - São Paulo - BRASIL**

RESUMO

Visando o uso do método de datação pelos traços de fissão verificou-se a variação do fluxo de nêutrons ao longo do porta-amostras, em algumas das posições de irradiação do reator IEA-R1 no IPEN/CNEN, São Paulo. O método de datação pelos traços de fissão só considera os traços decorrentes de fissões devidas a nêutrons térmicos, então as outras contribuições devem ser descontadas. Este problema pode ser resolvido irradiando-se as amostras com envoltório de cádmio. Estudou-se a influência do cádmio no fluxo de nêutrons e os resultados são discutidos.

1- Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente. SP.

2- Instituto de Física. Universidade de Campinas. Campinas. SP.

FISSION TRACK DATING METHOD:
I.-STUDY OF NEUTRON FLUX UNIFORMITY IN SOME IRRADIATION
POSITIONS OF IEA-R1 REACTOR
Ana Maria OSORIO¹, Marilia C. KHOURI, Julio C HADLER²
Pedro J. IUNES², Sérgio R. DE PAULO²

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal 11049 - Pinheiros
05422-970 - São Paulo - Brasil

ABSTRACT

In order to use the fission track dating method the flux gradient was verified within the sample holder, in some irradiation positions of the IEA-R1 reactor at IPEN/CNEN, São Paulo. The fission track dating method considers only the thermal neutron fission tracks, to subtract the other contributions sample irradiations with a cadmium cover was performed. The neutron flux cadmium influence was studied.

¹-Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente. SP

²-Instituto de Física. Universidade de Campinas. Campinas. SP.

I.- INTRODUÇÃO

A primeira observação de traços fósseis, atribuídos à fissão espontânea do ^{238}U , em minerais, foi feita em 1962 por Price e Walker [1]. A partir daí foi desenvolvido o método de datação por traços de fissão (MTF) [2], que é fundamentado basicamente em dois fatos: (1) os minerais, de um modo geral, contêm urânio como impureza, e (2) fragmentos de fissão produzem, nos minerais, uma zona de danos permanente e linear, chamada de traço latente. Estes traços latentes tornam-se visíveis ao microscópio óptico, após o mineral ser atacado com ácido, nas condições adequadas [3]. Não há evidências de traços devidos à fissão espontânea de outro isótopo, que não o ^{238}U , que seja necessário considerar [3].

O número de traços de fissão espontânea, por unidade de área, ρ_U , observados ao microscópio óptico é

$$\rho_U = {}^{238}\text{N}_U {}^{238}\epsilon (e^{-\lambda T} - 1) \lambda_f / \lambda \quad (1)$$

onde

${}^{238}\text{N}_U$ é o número de átomos do isótopo ^{238}U por unidade de volume, no mineral,

λ é a constante de decaimento total do ^{238}U ,

λ_f é a constante de decaimento por fissão espontânea do ^{238}U ,

${}^{238}\epsilon$ é um fator de eficiência que representa a razão entre o número de traços de fissão espontânea observados por unidade de área e o número de fissões espontâneas ocorridas por unidade de volume,

T é a idade do mineral.

Após a contagem dos traços fósseis, irradiando-se a amostra do mineral, em um reator nuclear, fissões do isótopo ^{235}U são induzidas por nêutrons térmicos.

O número de traços de fissão induzida do ^{235}U , por unidade de área, ρ_I , é dado por:

$$\rho_I = {}^{235}\text{N}_U \sigma_o \Phi_o {}^{235}\epsilon \quad (2)$$

onde

${}^{235}\text{N}_U$ é o número de átomos do isótopo ${}^{235}\text{U}$ por unidade de volume do mineral,

σ_o é a secção de choque para fissão induzida por nêutrons térmicos no ${}^{235}\text{U}$,

Φ_o é a fluência de nêutrons térmicos que incidiu na amostra,

${}^{235}\epsilon$ é um fator de eficiência, para fissão induzida, semelhante ao que foi definido acima.

Supondo que os traços latentes permaneçam inalterados durante a história geológica do mineral pode-se considerar que ${}^{238}\epsilon = {}^{235}\epsilon$ [4] e como em amostras naturais ${}^{238}\text{N}_U / {}^{235}\text{N}_U = \eta$ é uma razão isotópica constante, fazendo-se uma razão entre (1) e (2) obtém-se a idade do mineral

$$T = (1/\lambda) \ln [1 + \lambda \Phi_o \sigma_o \rho_g / (\lambda_f \eta \rho_I)] \quad (3)$$

II.-DOSIMETRIA DE NÊUTRONS NO MTF

II.1-Considerações Gerais

A medida da fluência de nêutrons térmicos que incide na amostra durante a irradiação é de grande importância na determinação da idade. Esta medida, assim como o efeito da presença de nêutrons epitérmicos e rápidos na irradiação, tem sido muito discutida [5,6].

O método mais utilizado na dosimetria de nêutrons no MTF é o dos vidros padrões com conteúdo conhecido de urânio (vidros do NIST (ex NBS) e da Corning, CN). Estes vidros são irradiados justapostos à amostra e, portanto, recebem a mesma fluência de nêutrons. Após a irradiação o vidro é submetido a um ataque químico, então os traços são contados num microscópio e pode-se determinar Φ_o .

Tagami e Nishimura [6] realizaram um estudo desses dosímetros os quais apresentam problemas tais como: a concentração de tório nos vidros é fixa enquanto que nos minerais tem grande variação; a razão isotópica $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ é fixa para os minerais enquanto que os dosímetros do NIST são confeccionados com urânio empobrecido em ^{235}U . Estes fatos implicam que a quantidade de fissões induzidas por nêutrons epitérmicos e rápidos seja diferente no mineral e no dosímetro.

Neste trabalho fizemos um estudo da utilização do filtro de cádmio para descontar o número de fissões provocadas por nêutrons epitérmicos e rápidos, usando para medir a fluência de nêutrons filmes finos de U_3O_8 com conteúdo de urânio conhecido.

II.2- Filmes finos de urânio natural

Os filmes finos de urânio natural que utilizamos [7] são confeccionados sobre mica muscovita que é um mineral muito utilizado como detector de traços de fragmentos de fissão.

O filme é preparado secando-se sobre a mica uma quantidade apropriada de uma solução de nitrato de urânio misturada a um colóide. Após tratamento térmico obtém-se um depósito fino de U_3O_8 . A quantidade de nitrato de urânio utilizada na confecção do filme é estimada levando-se em conta a ordem de grandeza da fluência de nêutrons na qual o filme será empregado. A mica que serve de base é escolhida tal que o número de traços induzidos na própria mica seja desprezível em relação ao número de traços registrados na mica, porém provenientes do filme fino.

Para determinar o conteúdo de urânio do filme emprega-se uma emulsão nuclear (K0, Ilford, UK) justaposta ao filme. A emulsão detecta todas as partículas alfa provenientes de todos os isótopos do urânio [7,8]. Após a revelação da emulsão o número de traços é determinado por meio de contagem em microscópio óptico. A partir do número

total de traços calcula-se o número de átomos de urânio no filme fino.

II-3. O filtro de cádmio

Em um reator nuclear as irradiações de amostras são feitas em certos locais que apresentam características diferentes conforme a posição relativa ao núcleo do reator e os elementos refletoras [8].

O MTF só leva em conta a fluência de nêutrons térmicos incidentes na amostra, há entretanto necessidade de verificar a influência dos nêutrons epitérmicos e rápidos e descontar estas contribuições.

O método do filtro de cádmio consiste em irradiar-se a amostra (mineral), junto com o dosímetro de nêutrons, com e sem envoltório de cádmio. Uma amostra irradiada com uma capa de cádmio sofre apenas os efeitos da irradiação com nêutrons de energia maior do que um certo valor E_{Cd} . Um filtro ideal de cádmio absorve todos os nêutrons com energia menor do que E_{Cd} chamada energia efetiva de corte do cádmio. O valor de E_{Cd} está entre 0,5 e 0,7eV dependendo das condições de medida. A espessura do cádmio deve ser da ordem de 1mm [10].

As densidades de traços obtidas nas amostras irradiadas dentro do invólucro de cádmio devem ser subtraídas das densidades totais obtidas na amostra irradiada sem o invólucro.

III-. PARTE EXPERIMENTAL

Este estudo foi efetuado no reator de pesquisa IEA-R1, tipo piscina, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, que opera a 2Mw. Os locais de irradiação utilizados foram: Estação 3, Estação 4 e posição 14B, que podem ser visualizadas, em relação ao núcleo do reator na figura 1.

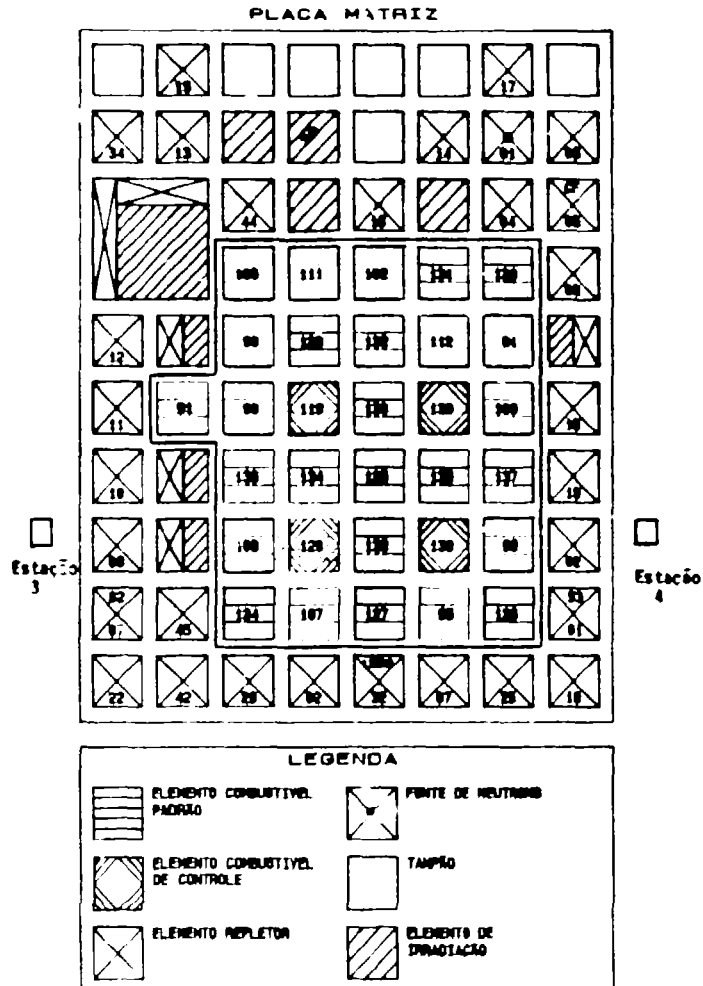


Figura 1. Mapa do núcleo do reator indicando as posições de irradiação estudadas.

As "Estações" dispõem de um sistema pneumático que leva a amostra até a posição de irradiação. Neste caso a amostra é irradiada em um recipiente cilíndrico de polietileno (coelho) com volume interno aproximado de 19mm de diâmetro por 50mm de altura. Na posição 14B a amostra é posicionada pela superfície da piscina e o porta amostra é um cilindro de alumínio de 20mm x 70mm, ermeticamente fechado. Esta "posição" consiste de um tubo vertical, de

aproximadamente 48cm, dividido em 8 prateleiras.

III.1- Estudo da uniformidade do fluxo de nêutrons.

Para verificar a existência de gradiente no fluxo de nêutrons térmicos ao longo do porta amostras, irradiamos lâminas de vidro para microscópio de 26mm x 50mm. O vidro apresenta uma certa distribuição de urânio e para evitar erro sistemático devido a não homogeneidade desta distribuição cortou-se a lâmina ao meio, no sentido longitudinal, e inverteu-se a posição de uma metade em relação à outra (fig 2).



Figura 2. Corte da lâmina de vidro e posição relativa das duas metades na irradiação.

Foram feitas duas irradiações (lâminas diferentes) para cada posição.

Após a irradiação as lâminas foram lavadas em álcool, secas com ar comprimido e submetidas ao ataque químico padrão por 90 segundos em ácido fluorídrico 24%, a temperatura de 15°C [11].

A contagem dos traços foi feita nos extremos e no meio das lâminas sendo escolhida uma área que permitisse uma estatística razoável (≈ 1000 traços).

Para a medida do gradiente dos nêutrons epitérmicos utilizamos três filmes finos de urânio natural. Justapostos a cada filme colocamos mica para servir de detector, e cada conjunto filme-mica foi coberto com cádmio e irradiado simultaneamente nas extremidades e no meio do porta-amostra.

Após a irradiação as micas foram reveladas por 90 minutos em ácido fluorídrico 48%, 15°C [11]. Os traços foram contados em microscópio de modo análogo ao já descrito

acima.

III.2- Depressão dos nêutrons térmicos

A presença de um material com alta seção de choque de absorção para nêutrons, como o cádmio, provoca uma depressão no fluxo de nêutrons nas suas proximidades [10].

De modo a verificar como era esta influência foram feitas duas irradiações de lâminas de vidro, estando o cádmio em posição diferente em cada uma das irradiações (fig.3).

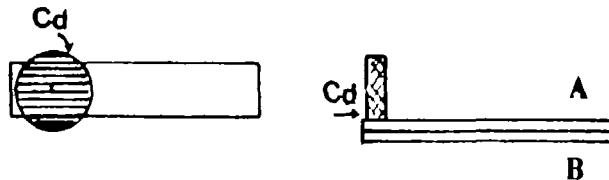


Figura 3. O recipiente de cádmio (cilindro com 13mm de diâmetro e 5mm de altura) nas duas posições relativas à lâmina.

IV-.RESULTADOS

IV.1- Gradiente do fluxo de nêutrons térmicos

Os resultados obtidos nas duas irradiações realizadas na Estação 3 estão na tabela 1. Podemos verificar que existe uma diferença de aproximadamente 22% entre as densidades de traços obtidas nos extremos da lâmina na irradiação $I_{\nu-1}$ e de aproximadamente 18% entre as densidades de traços obtidas nos extremos da lâmina na irradiação $I_{\nu-2}$. As densidades médias, ρ_1 , foram obtidas utilizando a média ponderada dos dados e os erros associados às medidas são os desvios padrões das médias [11]. Estes resultados indicam que existe um gradiente no fluxo de nêutrons térmicos, significativo, ao longo de 5cm (comprimento do porta amostra). Portanto, se for utilizada esta posição de irradiação, a densidade de traços induzidos vai depender da posição da amostra dentro do porta amostra

e o dosímetro, para a medida da fluência de nêutrons, deve ser colocado justaposto à amostra, caso contrário a idade obtida terá uma diferença até da ordem de 20%.

Os resultados obtidos com as irradiações feitas na Estação 4 estão na tabela 2. Podemos concluir que existe uma diferença de aproximadamente 13% entre as densidades superficiais de traços de fissão induzida obtidas nos extremos das lâminas.

Na procura de outras posições de irradiação, em que o gradiente de fluxo fosse o menor possível, estudamos a posição 14/B. Inicialmente foi medido o fluxo de nêutrons térmicos, nas diferentes prateleiras, pelo método de ativação de folhas metálicas (liga Au-A₁, com 13% de Au), os resultados obtidos são mostrados na tabela 3. Pode-se observar que existe uma variação tanto no fluxo como na razão de cádmio(Au). Selecionamos a prateleira 5, que apresenta o maior fluxo, para continuar nosso estudo.

Irradiamos na posição 14B/5 uma lâmina de vidro como nas outras posições estudadas, os resultados obtidos são apresentados na tabela 4. Destes dados podemos concluir que as médias $\rho_{t,j}$ (média entre os valores de ρ_j obtidos nos extremos das lâminas) são concordantes tanto para uma mesma irradiação como para lâminas irradiadas separadamente. Isto significa que nesta posição de irradiação não existe um gradiente de nêutrons térmicos significativo.

IV.2- Gradiente do fluxo de nêutrons epitérmicos

Os filmes finos de urânio natural foram confeccionados e foi determinado o número de átomos de urânio, N_U , pela contagem de partículas alfa nas emulsões, para cada filme. Os valores de ρ_x , densidade superficial de traços de fissão induzida, obtidas nas micas irradiadas justapostas aos filmes finos e com capa de cádmio, assim como valores de N_U e as razões ρ_x/N_U estão na tabela 5. Pode-se ver que, praticamente, dentro de duas vezes o valor do desvio padrão as razões ρ_x/N_U são iguais,

isto indica que o gradiente do fluxo de nêutrons epitérmicos é irrelevante nesta posição de irradiação.

IV.3-Depressão do fluxo de nêutrons térmicos pelo cádmio

Os resultados obtidos nas lâminas irradiadas com a base da capa de cádmio em contacto (fig.3a) são mostrados na tabela 6. Existe uma diferença de aproximadamente 36% entre as densidades superficiais de traços de fissão induzida obtidas em um dos extremos e no centro da lâmina, e uma diferença de 45% quando comparamos as densidades obtidas nos dois extremos da lâmina. A densidade superficial de traços obtida no extremo da lâmina, onde não havia cádmio, concorda com as densidades obtidas em outras lâminas irradiadas sem cádmio. Isto indica que existe uma depressão significativa do fluxo de nêutrons que entretanto a 5cm da capa de cádmio já pode ser considerada desprezível.

Em uma outra irradiação mudamos a posição do recipiente de cádmio ficando agora sua lateral em contacto com a lâmina (fig.3b). Os resultados estão na tabela 7, podemos verificar que a densidade de traços na metade da lâmina que estava em contacto com o cádmio (A) é menor que a densidade na outra metade (B) que embora na mesma posição não estava em contacto com o cádmio. Pelos resultados podemos ver que na lâmina A, a 3cm do cádmio, sua influência pode ser desprezada.

V.- CONCLUSÕES

Os resultados mostram a importância de verificar-se a existência de um gradiente no fluxo de nêutrons térmicos e epitérmicos, ao longo do porta amostras, quando queremos usar uma posição de irradiação de amostras, em um reator nuclear. A densidade superficial de traços de fissão pode ser bastante afetada por falta de uniformidade no fluxo introduzindo, assim, erros significativos na obtenção da

idade da amostra. Em Bigazzi [12] e Wall [13] foi comentado que o gradiente do fluxo de nêutrons térmicos era desprezível no local de irradiação das amostras, estes foram os únicos dados sobre verificação da uniformidade do fluxo de nêutrons que encontramos em trabalhos de datação por traços de fissão.

Os resultados sobre a depressão do fluxo térmico, devido a presença do cádmio, indicam a importância da geometria da irradiação, quando irradiamos simultaneamente amostras com e sem invólucro de cádmio. Para as dimensões utilizadas por nós a amostra sem capa deve ficar a pelo menos 3cm da amostra coberta com cádmio.

A posição 14/B-5 mostrou-se adequada para as irradiações visando datação e será utilizada por nós com esta finalidade.

Agradecimentos

Os autores desejam agradecer à Dra. Marina Fallone Koskinas e aos demais integrantes do Laboratório de Metrologia Nuclear, do IPEN, pelas medidas de fluxo de nêutrons.

Agradecem, também, ao Sr. Laurindo Massaki Nakano, supervisor do reator IEA-R1, IPEN, pelas irradiações na posição 14/B e pelas sugestões apresentadas.

A.M.O. agradece à FAPESP pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1]. PRICE, P.B. & WALKER, R.M. Observation of fossil particle tracks in natural micas. *Nature*, 196:732-4, 1962.
- [2]. FLEISCHER, R.L. & PRICE, P.B. Glass dating by fission-fragment tracks. *J. Geophys. Res.*, 69:331-9, 1964.
- [3]. FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M. *Nuclear tracks in solids: principles and applications*.

- University of California Press. Berkeley, Cal., USA, 1975.
- [4] BIGAZZI, G. Length of fission track and age of muscovite samples. *Earth Planet Sci. Lett.*, 3:434-8, 1967.
- [5]. CROWLEY, K.D. Neutron dosimetry in fission track analysis. *Nuclear Tracks*, 11:237-43, 1986.
- [6]. TAGAMI, T. & NISHIMURA, S. Intercalibration of thermal neutron dosimeters, glasses NBS-SRM612 and Corning 1 in some irradiation facilities: a comparison. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 16(1):11-14, 1989.
- [7]. IUNES, P.J. *Datação com o método dos traços de fissão: estudo da dosimetria de nêutrons com filmes finos de urânio natural.* Campinas, 1990. (Dissertação de mestrado, Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas).
- [8]. HADLER, J.C. *Medida da constante de desintegração do ^{238}U por fissão espontânea.* Campinas, 1982. (Tese de doutorado, Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas).
- [9]. RENNER, C., DIAS, M.S., ORTEGA, A. *Flux measure of thermal and fast neutrons at locations available for sample irradiation in the IEA-R1 facility.* São Paulo, Instituto de Energia Atômica, dez., 1976. (Publicação IEA 456.)
- [10]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Neutron fluence measurements.* Vienna, 1970. (TRS-107).
- [11]. OSORIO, A.M. *Datação de obsidiana com o método dos traços de fissão.* Campinas, 1990. (Tese de Doutorado Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas).
- [12]. BIGAZZI, G. & HADLER, J.C. Errori di contagio ed errori sistematici nella datazione con il metodo delle tracce di fissione. *Boll. Geol. It. Soc.*, 108: 325-350, 1989.
- [13]. WALL, T. Use alternative of neutron dosimetry standard

fission track dating. *Nuclear Tracks*, 12:887-890,
1986.

Irradiação (medida)	n° de traços (n° de campos)	$\rho_I (\pm \sigma\%)$ ($\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$)	$\rho_{i,j} (\pm \sigma\%)$ ($\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$)
I _v -1	(1)	1328	3,81 ($\pm 2,75$)
		(220)	3,82 ($\pm 1,94$)
	(4)	1332	3,83 ($\pm 2,74$)
		(220)	(1,4)
I _v -2	(2)	1048	3,02 ($\pm 3,10$)
		(220)	2,89 ($\pm 2,20$)
	(3)	1028	2,98 ($\pm 3,20$)
		(220)	(2,3)
I _v -2	(1)	1234	3,55 ($\pm 3,00$)
		(220)	3,57 ($\pm 2,10$)
	(3)	1245	3,58 ($\pm 2,80$)
		(220)	(1,3)
I _v -2	(2)	1018	2,92 ($\pm 3,30$)
		(220)	2,93 ($\pm 2,30$)
I _v -2	(4)	1023	2,94 ($\pm 3,10$)
			(2,4)

Tabela 1. Dados obtidos nas irradiações de lâminas de vidro para a medida do gradiente de fluxo de nêutrons térmicos. I_v-1 e I_v-2 são as irradiações realizadas na Estação 3. Os valores de $\rho_{i,j}$ correspondem às densidades médias de traços.

Irradiação (medida)	n° de traços (n° de campos)	$\rho_I (\pm \sigma \%)$ ($\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$)	$\rho_{I,j} (\pm \sigma \%)$ ($\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$)	
I_V-1 (1)	1120	8,20 ($\pm 3,20$)	7,81 ($\pm 2,20$)	
	(864)			
	(3)	1047	7,67 ($\pm 3,10$)	(1,3)
		(864)		
(2)	951	6,87 ($\pm 3,20$)	6,87 ($\pm 2,30$)	
	(864)			
(4)	927	6,79 ($\pm 2,30$)	(2,4)	
	(864)			
I_V-2 (1)	1989	9,44 ($\pm 2,30$)	9,46 ($\pm 1,60$)	
	(1320)			
	(3)	1980	9,49 ($\pm 2,30$)	(1,3)
		(1320)		
(2)	1881	8,06 ($\pm 2,40$)	8,20 ($\pm 1,70$)	
	(1320)			
(4)	1741	8,35 ($\pm 2,50$)	(2,4)	
	(1320)			

Tabela 2. Dados obtidos nas irradiações de lâminas de vidro para a medida do gradiente do fluxo de nêutrons térmicos. I_V-1 e I_V-2 são as duas irradiações realizadas na Estação 4. O valor $\rho_{I,j}$ corresponde às densidades médias de traços.

Prateleira	Fluxo ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Incerteza* (%)	Razão de Cd**
3	$2,84 \cdot 10^{12}$	3,00	4,70
4	$4,41 \cdot 10^{12}$	2,50	6,00
5	$4,87 \cdot 10^{12}$	2,50	6,10
6	$4,38 \cdot 10^{12}$	2,50	5,30
7	$3,34 \cdot 10^{12}$	2,50	4,80

Tabela 3. Resultados das medidas do fluxo de nêutrons térmicos nas prateleiras da posição 14/B.

* grau de confiança de 68%

** razão entre as atividades com e sem cádmio, não foi considerado o fator de auto-blindagem.

(dados fornecidos pelo Laboratório de Metrologia Nuclear-IPEN)

Irradiação	n° de traços (n° de campos)	$\rho_I (\pm \sigma \%)$ ($\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$)	$\rho_{i,j} (\pm \sigma \%)$ ($\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$)
I _v -5	(1)	1617	2,57 ($\pm 2,70$)
		(399)	2,47 ($\pm 1,90$)
	(4)	1498	2,37 ($\pm 2,60$)
		(399)	(1,4)
I _v -6	(2)	1608	2,55 ($\pm 2,60$)
		(399)	2,55 ($\pm 1,80$)
	(3)	1498	2,55 ($\pm 2,50$)
		(399)	(2,3)
I _v -6	(1)	1451	2,46 ($\pm 2,70$)
		(374)	2,44 ($\pm 2,00$)
	(4)	1435	2,43 ($\pm 3,00$)
		(374)	(1,4)
I _v -6	(2)	1391	2,35 ($\pm 2,70$)
		(374)	2,36 ($\pm 1,90$)
	(3)	1403	2,37 ($\pm 2,70$)
		(374)	(2,3)

Tabela 4. Resultados obtidos da medida do gradiente do fluxo de nêutrons térmicos na posição 14/B. I_v-5 e I_v-6 referem-se a duas irradiações diferentes. Os valores $\rho_{i,j}$ correspondem às densidades médias de traços.

Filme	$N_U (x10^{10})$ (átomos.cm ⁻²)	$\rho_f (\pm \sigma\%)$ (cm ⁻²)	$\rho_f/N_U (\pm \sigma\%)$ (x10 ⁻¹⁰)
XVII-3	(2,22 ± 2,0%)	369598 (±1,70)	(1,66 ± 2,6%)
XVII-4	(2,30 ± 2,0%)	364278 (±1,90)	(1,58 ± 2,6%)
XVIII-3	(2,44 ± 2,0%)	408834 (±1,60)	(1,68 ± 2,5%)

Tabela 5. Resultados obtidos nas micas irradiadas em contacto com filmes finos de urânio natural e com capa de cádmio, para a medida do gradiente do fluxo de neutrons epitérmicos na posição 14/B-5.

Irradiação	n° de traços (n° de campos)	$\rho_I (\pm 1\sigma)$ ($\times 10^4 \cdot \text{cm}^{-2}$)	$\rho_{i,j} (\pm 1\sigma)$ ($\times 10^4 \cdot \text{cm}^{-2}$)
I _v -1	(1)	811	1,30 ($\pm 3,60$)
		(398)	1,32 ($\pm 2,60$)
	(4)	838	1,34 ($\pm 3,60$)
		(398)	(1,4)
	(2)	1264	2,02 ($\pm 2,80$)
		(398)	2,07 ($\pm 2,00$)
	(5)	1324	2,12 ($\pm 2,80$)
		(398)	(2,5)
(3)	1548	2,47 ($\pm 2,70$)	
	(398)	2,39 ($\pm 1,90$)	
(6)	1453	2,32 ($\pm 2,70$)	
	(398)	(3,6)	

Tabela 8. Resultados obtidos na irradiação de uma lâmina de vidro, a qual foi justaposto um recipiente de cádmio, para a medida da depressão do fluxo de nêutrons térmicos pelo cádmio. Os valores $\rho_{i,j}$ representam as médias das medidas obtidas nos extremos (1,4 e 2,5) e no centro da lâmina (3,6).

n° da contagem	$\rho_I (\pm 1\%)$ ($\times 10^4 \text{cm}^{-2}$)	n° da contagem	$\rho_I (\pm 1\%)$ ($\times 10^4 \text{cm}^{-2}$)
A		B	
(7)	31544 \pm 2,70	(1)	33178 \pm 2,39
(8)	28657 \pm 2,67	(2)	33645 \pm 2,51
(9)	29415 \pm 2,51	(3)	32810 \pm 2,54
(10)	28140 \pm 2,66	(4)	33744 \pm 2,48
(11)	24881 \pm 2,83	(5)	31141 \pm 2,53
(12)	20648 \pm 3,20	(6)	21678 \pm 3,29

Tabela 7. Resultados obtidos na segunda irradiação realizada para quantificar a depressão dos nêutrons térmicos pelo cádmio. A lâmina de vidro foi dividida nas partes A e B e a caixinha de cádmio ficou em contacto direto com a parte A.