

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN

**APLICAÇÃO DA DOSIMETRIA DE NEUTRONS ATRAVÉS DE FILMES
FINOS DE URÂNIO NATURAL E TÓRIO NA DATAÇÃO PELO
MÉTODO DOS TRAÇOS DE FISSÃO**

*Este exemplar corresponde à redação final da tese de
título defendida pelo aluno Pedro José Iunes e aprovada
comissão Julgadora.*

ALUNO : Pedro José Iunes

ORIENTADOR : Prof. Dr. Julio Cesar Hadler Neto

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Giulio Bigazzi

**TESE APRESENTADA NO INSTITUTO DE FÍSICA "GLEB WATAGHIN" DA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM FÍSICA**

Outubro de 1999



UNIDADE	IFGW
N.º CHAMADA:	710
	Iu5a
V.	Ex.
TOMBO BC	42105
PROC	16.28100
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREC	R\$ 0,00
DATA	14/09/00
N.º CPD	

IF/1243 m

CM-00144293-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IFGW - UNICAMP

Iu5a

Iunes, Pedro José

~~Utilização da dosimetria~~
Utilização da dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio e de tório naturais na datação de minerais com o método dos traços de fissão. - Campinas, SP : [s. n.], 2000.

Orientador: Julio Cesar Hadler Neto.

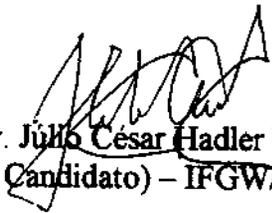
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Física "Gleb Wataghin".

1. Radiação - Dosimetria. 2. Filmes finos .
3. Urânio. 4. Tório. 5. Datação do traço de fissão.
I. Hadler Neto, Julio Cesar. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física "Gleb Wataghin".
III. Título.

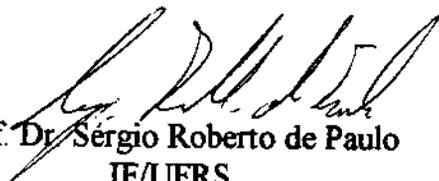
Instituto de Física "Gleb Wataghin"
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

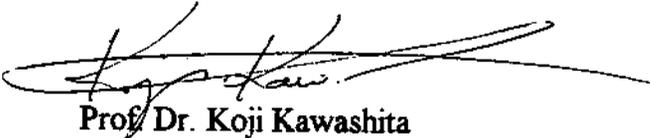
MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DO SR.
PEDRO JOSÉ IUNES, RA 875605, APRESENTADA E APROVADA AO INSTITUTO
DE FÍSICA "GLEB WATAGHIN", DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS,
EM 20 DE OUTUBRO DE 1999.

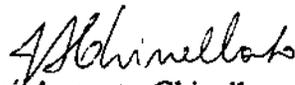
COMISSÃO JULGADORA:


Prof. Dr. Julio César Hadler Neto
(Orientador do Candidato) – IFGW/UNICAMP


Prof. Dr. Giulio Bigazzi
IGGI, Pisa, Itália


Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo
IF/UFRS


Prof. Dr. Koji Kawashita
IF/USP


Prof. Dr. José Augusto Chinellato
IFGW/UNICAMP

RESUMO

Nesta tese foi proposta uma dosimetria de neutrons que se mostrou bastante apropriada para a datação de minerais com o Método dos Traços de Fissão (MTF). Esta dosimetria, baseada em filmes finos de urânio e de tório naturais, permite que o MTF possa ser utilizado como uma calibração absoluta. Além disto, ela torna possível a obtenção da razão Th/U do mineral a ser datado.

A dosimetria de neutrons proposta foi aplicada na datação de uma amostra padrão e rendeu idades compatíveis com outros métodos de datação.

Abstract

A neutron dosimetry, which was found to be very suitable for mineral dating through the Fission Track Method (FTM), was proposed in this doctoral thesis. This dosimetry, that is based on natural uranium and thorium thin films, allows the use of the FTM as an absolute calibration. Besides, it makes possible to obtain the Th/U ratio of the mineral to be dated.

The proposed neutron dosimetry was applied to date a standard sample, yielding ages that are compatible with other dating methods.

Dedico esta tese

À minha mãe, Elizabete Santana Iunes,

Ao meu pai, Iunes Tajher Iunes

Ao Fernando Pessoa, Caetano Veloso, Zeca Pagodinho, João Guimarães Rosa, Frederico Fellini, Stanley Kubrick, Edgar Allan Poe, Paul Dirac, Karl Popper, Friedrich Nietzsche, Gustave Klimt

E à minha filha, Camila Silva Iunes.

Agradecimentos

Ao Júlio, meu pai científico, pelo papel fundamental que teve e tem, tanto na minha formação científica como pessoal e por ter formado e estabelecido nosso grupo de pesquisa.

Ao Bigazzi, meu padrinho científico, pela sua simpatia e amizade e por ter tido influência marcante na minha formação científica.

Ao Sérgio, meu irmão, por tudo que é como cientista e como pessoa, e por tudo o que fez para o nosso grupo.

Ao Carlos, também meu irmão, pelo bonito trabalho que vem realizando dentro de todas as áreas de pesquisa de nosso grupo e pela grande ajuda nas medidas e na digitação desta tese.

Ao Sandro, pelo bonito trabalho que vem realizando em todas as áreas de pesquisa de nosso grupo e por ter ajudado na digitação desta tese.

Ao Walter, por ter tido papel importante dentro da aproximação do nosso grupo com a engenharia civil e por ter ajudado na digitação e na parte operacional desta tese.

Ao Rodrigo, pelo bonito trabalho frente à survey radônio em Campinas.

À Iara pelo bonito trabalho que vem realizando em monitoração do radônio-222.

À Aline, pelo futuro promissor que tem como pesquisadora e pela ajuda na digitação desta tese.

Ao Agustín, pelo bonito trabalho que fez na caracterização do CR-39 como espectrômetro alfa e por ter sido responsável por parte das irradiações desta tese.

À Lígia, pela nossa amizade, que jamais será esquecida e por tudo o que fez junto ao nosso grupo.

À Ana Maria, pela nossa amizade e por ter trabalhado comigo no tema desta tese.

À Marina e ao Máximo que foram responsáveis por parte das irradiações desta tese.

À Tereza e à Sandra que sempre foram muito prestativas comigo e com todo o nosso grupo.

À Maria Ignêz por tudo o que fez durante toda minha estadia na pós graduação do IFGW e em especial por tudo o que fez no que se refere a esta tese de doutorado.

Ao Prof. Cabrera, pelo bonito trabalho que está realizando frente à coordenadoria de pós graduação e também por tudo o que fez no que se refere a esta tese de doutorado.

Ao Armando e à Carmem por terem sido sempre bastante prestativos comigo.

ÍNDICE

Capítulo 1: Introdução.....	03
Capítulo 2: Dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio e de tório naturais.....	09
Capítulo 3: Calibração dos filmes finos de urânio e de tório	13
3-1: Calibração dos filmes finos de urânio	14
3-2: Calibração dos filmes finos de tório	21
Capítulo 4: Considerações a respeito da utilização da dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio natural na datação com o MTF	33
Capítulo 5: Aplicação da dosimetria de neutrons com filmes finos de urânio e de tório naturais na datação de apatitas de Durango, México	41
Capítulo 6: Comparação entre a dosimetria de neutrons baseada em filmes finos de urânio natural e uma dosimetria de neutrons baseada em ativação metálica	57
Capítulo 7: Conclusões	62

*Depressa, pega a arma Madalena
Tem uma luz por traz daquela serra
Mira, mas não erra, minha pequena
A noite é longa e é tanta terra
Podemos estar mortos noutra cena*

Trecho da música “Romance no Deserto”, versão de Fausto Nilo, cantada por Fagner, de
“Romance en Durango” de Bob Dylan e Jacques Levy.

CAPÍTULO 1

*Cama de gato
Olha a garra dele
Cama de gato, melhor se cuidar
No campo do adversário é bom jogar com muita calma
Procurando pela brecha prá poder ganhar*

Trecho da música “Geraldinos e Arquibaldos” de Gonzaguinha, cantada por ele mesmo.

1 - Introdução

A datação de minerais através do Método dos Traços de Fissão (MTF) foi concebida no início dos anos 60 (Price e Walker, 1963) e desde então tem sido adotada por um número considerável de laboratórios.

O MTF se baseia na possibilidade de se revelar quimicamente, em minerais, traços produzidos por fragmentos de fissão ao longo de seu percurso.

Os minerais, em geral, contém urânio como impureza e o ^{238}U , isótopo mais abundante do urânio natural, tem uma certa probabilidade de se fissionar espontaneamente. Quando isto ocorre, é produzido no interior do mineral, uma zona completamente desarranjada (a qual chamamos de traço latente) devido a grande energia, massa e carga dos fragmentos de fissão. Se o mineral é submetido a um ataque químico conveniente, os traços latentes que se estenderam até a sua superfície, por serem mais reativos ao ataque químico que o corpo do mineral, ficam amplificados e podem ser observados ao microscópio óptico.

Os traços latentes são produzidos, a uma taxa constante, cumulativamente no mineral durante sua história geológica. Depois do ataque químico, o número de traços de fissão espontânea, visíveis ao microscópio óptico por unidade de superfície, ρ_s , permite que se determine a idade do mineral, T , através da relação:

$$\rho_s = \varepsilon^{238} N_U C_{238} \frac{\lambda_F}{\lambda} [\exp(\lambda T) - 1] \quad (1)$$

onde ε^{238} é um fator de eficiência de detecção, que representa a razão entre o número de traços de fissão do ^{238}U , observados por unidade de superfície e o número de fissões espontâneas ocorridas no mineral, por unidade de volume; N_U é o número de átomos de urânio por unidade de volume,

presente no mineral; C_{238} é a concentração isotópica do ^{238}U no urânio natural; λ_F é a constante de desintegração por fissão espontânea do ^{238}U ; e λ é a constante de decaimento alfa do ^{238}U .

Para se evitar as difíceis determinações de ε^{238} e N_U , o mineral a ser datado é submetido a uma irradiação com neutrons em um reator nuclear e a densidade de traços de fissão induzida por neutrons, observável no mineral por unidade de superfície, ρ_I , pode ser escrita como (Crowley, 1986):

$$\rho_I = \varepsilon N_U R_M \quad (2)$$

onde,

$$R_M = R_U + \left(\frac{N_{Th}}{N_U}\right) R_{Th} \quad (3)$$

onde,

$$R_U = C_{235} A_{235} + C_{238} A_{238} \quad (4)$$

e

$$R_{Th} = A_{Th} \quad (5)$$

onde ε é o fator de eficiência de observação referente aos traços de fissão induzida, C_{235} é a concentração isotópica do ^{235}U no urânio natural; A_{235} , A_{238} e A_{Th} são os números de fissões por núcleo alvo de ^{235}U , ^{238}U e ^{232}Th , respectivamente, ocorridas devido a irradiação com neutrons; e (N_{Th} / N_U) é a razão tório-urânio do mineral.

A equação 3 leva em conta o tório, também presente como impureza nos minerais.

Através das equações 1 e 2 pode-se obter a idade do mineral efetuando-se as medidas de ρ_s , ρ_I e R_M .

Deve ser notado que, no caso desta determinação, foi assumido que os traços fósseis

(fissão espontânea do ^{238}U) presentes no mineral, não sofreram annealing (encurtamento dos traços, principalmente por efeitos de temperatura) e as eficiências de detecção de fragmentos de fissão do ^{238}U (tanto para fissão espontânea como para induzida), ^{235}U e ^{232}Th foram tomadas como sendo iguais. Isto, devido a grande massa, carga e energia envolvidas em todos os casos. Em Bigazzi *et al.* (1991a) se observou que em condições isentas de annealing, a eficiência de fragmentos de fissão induzida do ^{235}U em vidro artificial é igual a eficiência de detecção de fragmentos de fissão espontânea do ^{238}U , o que fortalece a hipótese de um único ϵ para os três isótopos citados acima, no caso de minerais que não sofreram annealing.

A idade de um mineral que tenha tido seus traços fósseis encurtados, devido a sua história térmica, pode em princípio, ser corrigida com o auxílio de métodos desenvolvidos com esta finalidade (por exemplo, Bigazzi, 1967; Storzer e Wagner, 1969; Storzer e Poupeau, 1973).

O objetivo da dosimetria de neutrons dentro do MTF é a determinação de R_M .

Em posições de irradiação bem termalizadas (onde se tem preponderantemente neutrons térmicos) não ocorrem fissões do ^{238}U e do ^{232}Th e por tanto o último termo da equação 3 desaparece e o primeiro termo desta equação pode ser simplificado de forma que R_M pode ser escrito como:

$$R_M = C_{235} \phi_0 \sigma_0 g_{235} \quad (6)$$

onde ϕ_0 é a fluência convencional de neutrons térmicos; σ_0 é a seção de choque convencional do ^{235}U para a fissão por neutrons térmicos; e g_{235} é o parâmetro de Westcott para o ^{235}U .

Neste caso, g_{235} está tabelado em função da temperatura dos neutrons na posição de irradiação (Wescott, 1960), C_{235} e σ_0 são conhecidos e ϕ_0 pode ser determinado utilizando-se monitores de ativação (Van den haute *et al.*, 1988).

Um dos problemas mais importantes do MTF reside na dificuldade em se determinar R_M em posições com baixa termalização dos neutrons utilizando-se dosimetrias tradicionais (ver por exemplo, Green e Hurford, 1984; Crowley, 1986; Tagami e Nishimura, 1989). Isto é devido ao fato de que tais dosimetrias (ativação metálica) não respondem às contribuições das fissões induzidas do ^{238}U e do ^{232}Th por neutrons rápidos e, principalmente, respondem de maneira diferente às fissões do ^{235}U induzidas por neutrons epitérmicos.

A recomendação de que a datação com o MTF somente seja efetuada utilizando-se posições de irradiação com alto grau de termalização dos neutrons é oportuna no sentido que contorna as dificuldades relacionadas com as fissões induzidas por neutrons epitérmicos e rápidos no mineral. Esta recomendação foi feita por uma comissão especial da "International Union of Geological Sciences" (Hurford, 1990 a e b) e ela facilita também o emprego das dosimetrias baseadas na ativação metálica. Porém, a utilização de posições de irradiação que possuam as características recomendadas nem sempre é viável, principalmente em países onde há poucos reatores nucleares de pesquisa em funcionamento, o que ocorre com a grande maioria dos países do terceiro mundo.

Outro problema do MTF, bastante discutido na década de 80, está relacionado com o valor verdadeiro de λ_F .

Há na literatura mais de 50 medidas independentes desta constante. Os resultados nem sempre são concordantes. Eles estão espalhados ao redor de três picos entre os quais os dois mais proeminentes ($7,0$ e $8,5 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$) estão distantes $\sim 20\%$ um do outro. Esta discrepância foi bem documentada e discutida (ver por exemplo, Thiel e Herr, 1976; Bigazzi, 1981; Hadler, 1982).

No final da década de 90, foi recomendado por uma comissão da "Internacional Union of Pure and Applied Chemistry" o valor de $(8,45 \pm 0,10) \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$ para λ_F (Holden, 1989). Deve ser

notado, contudo, que a grande maioria das medidas efetuadas empregando-se técnicas de traços de fissão, não são compatíveis com este valor e sim com $7,0 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$.

Diante dos problemas relacionados com a dosimetria de neutrons e com o valor de λ_F , Hurford (1990a e b) recomendou a utilização de procedimentos que vinculam o MTF a outros métodos de datação. Um destes procedimentos, chamado de Calibração Zeta (Hurford e Green, 1983), evita o uso explícito de λ_F . O outro, determina que se utilize um valor de λ_F e uma dosimetria que levem a valores de idades concordantes com aquelas obtidas por outros métodos de datação. Porém, em uma recente reavaliação a este respeito, foi cogitada novamente a utilização do MTF como uma calibração absoluta (Hurford, 1998).

Nesta tese pretendemos mostrar que é possível se utilizar o MTF como uma calibração absoluta, mesmo em posições de irradiação com baixa termalização dos neutrons. Para isto, utilizamos a dosimetria de neutrons com filmes finos (com auto absorção de energia negligenciável, tanto para partículas alfa como para fragmentos de fissão) de urânio natural e de tório, que é compatível com o valor de λ_F recomendado por Holden (1989). Nos capítulos seguintes esta dosimetria será apresentada, aplicada a um padrão de idade e comparada a uma dosimetria tradicional.

CAPÍTULO 2

*Mas este jogo está um osso
É um angu que tem caroço
e é preciso desimbolar*

ibid.

2 - Dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio e tório naturais

A utilização de filmes finos de urânio natural permite a determinação direta de R_U . Isto porque, quando este monitor é irradiado com neutrons em um reator nuclear, a densidade de traços de fissão induzida, ρ_U , observada em um detector de traços (no caso um detector de fragmentos de fissão, como por exemplo a mica muscovita), que esteve justaposto a ele durante a irradiação, pode ser escrita como (Bigazzi *et al.* 1993):

$$\rho_U = N_U^F \varepsilon^F R_U \quad (7)$$

onde N_U^F é o número de átomos de urânio por unidade de área do filme e ε^F é a razão entre a densidade superficial de traços observada no detector depois do ataque químico e o número de fissões ocorridas no filme por unidade de área.

Assim, conhecendo-se N_U^F e ε^F pode-se determinar R_U medindo-se ρ_U . Procedimentos referentes às determinações de N_U^F e ε^F estão descritos em Bigazzi *et al.* (1993) e Bigazzi *et al.* (1991b) respectivamente, e aqueles utilizados no âmbito desta tese serão detalhados no capítulo seguinte.

A razão tório-urânio do mineral, (N_{Th}/N_U) , pode ser obtida utilizando-se várias metodologias (ver, por exemplo, Bajo, 1979). Desta forma, se (N_{Th}/N_U) for conhecido, com o auxílio das equações 3 e 7, vemos que R_M pode ser determinado utilizando-se, junto com a dosimetria com filmes finos de urânio natural, uma outra dosimetria que quantifique o número de fissões por núcleo alvo de ^{232}Th ocorridas no mineral durante a irradiação com neutrons.

Quando um filme fino de tório natural, justaposto a um detector de traços, é irradiado com neutrons em um reator nuclear, a densidade de traços de fissão induzida, observada no detector

depois do ataque químico, ρ_{Th} , pode ser escrita como (Bigazzi *et al.*, 1995a):

$$\rho_{Th} = N_{Th}^F \varepsilon^F R_{Th} \quad (8)$$

onde N_{Th}^F é o número de átomos de ^{232}Th por unidade de superfície.

Nesta equação, a eficiência de detecção para fragmentos de fissão provenientes de um filme fino de tório foi tomada como sendo igual à eficiência para fragmentos de fissão provenientes de um filme fino de urânio. Isto, como dissemos anteriormente, pode ser justificado baseando-se nas características similares (grande carga, energia e massa dos fragmentos) de ambos os processos de fissão.

Com a equação 8 vemos que é possível se determinar R_{Th} , conhecendo-se N_{Th}^F e ε^F , a partir da medida de ρ_{Th} . A determinação de N_{Th}^F , descrita em Bigazzi *et al.* (1995a) também será tema do capítulo 3 desta tese.

Quando a razão tório-urânio do mineral não é conhecida, sua determinação pode ser efetuada empregando-se dois conjuntos de filmes finos de urânio e de tório naturais. Contudo neste caso é necessário que também se efetue uma irradiação dentro de uma caixa de cádmio.

O cádmio possui uma seção de choque grande para absorção de neutrons térmicos e é praticamente transparente para neutrons com energias maiores que 0,55 eV. Assim, se forem irradiados dentro de uma caixa de cádmio, o mineral a ser datado e os filmes finos de urânio e de tório, as densidades superficiais de traços de fissão induzida no mineral e nos detectores justapostos aos filmes podem ser escritas, respectivamente, como (Bigazzi *et al.*, 1995a):

$$\rho_I^{Cd} = N_U \varepsilon \left(R_U^{Cd} + \left(\frac{N_{Th}}{N_U} \right) R_{Th}^{Cd} \right) \quad (9)$$

$$\rho_U^{Cd} = N_U^F \varepsilon^F R_U^{Cd} \quad (10)$$

$$\rho_{Th}^{Cd} = N_{Th}^F \varepsilon^F R_{Th}^{Cd} \quad (11)$$

onde os super-índices Cd indicam que a irradiação foi efetuada dentro da caixa de cádmio.

Combinando as equações 9, 10 e 11 com aquelas equivalentes, obtidas com o outro conjunto mineral mais filmes, irradiados sem a caixa de cádmio (equações 2, 7 e 8), se obtém que:

$$\left(\frac{N_{Th}}{N_U} \right) = \frac{\left(\frac{\rho_U}{N_U^F} \right) - \left(\frac{\rho_I}{\rho_I^{Cd}} \right) \left(\frac{\rho_U^{Cd}}{N_U^F} \right)}{\left(\frac{\rho_I}{\rho_I^{Cd}} \right) \left(\frac{\rho_{Th}^{Cd}}{N_{Th}^F} \right) - \left(\frac{\rho_{Th}}{N_{Th}^F} \right)} \quad (12)$$

Com as equações 2, 7, 8 e 12 pode ser visto que, a utilização conjunta de filmes finos de urânio e tório naturais, possibilita a obtenção de R_M independentemente da termalização dos neutrons na posição de irradiação utilizada na datação com o MTF.

CAPÍTULO 3

*Acalma a bola, rola a bola,
trata a bola, limpa a bola,
que é preciso faturar*

ibid.

3 - Calibração dos Filmes Finos de Urânio e de Tório

Os filmes finos utilizados neste trabalho foram preparados com o auxílio do método da ignição do parlódio. Este método está descrito em Bigazzi *et al.* (1995 c). Ele consiste em se depositar uma mistura de colódio (pyroxilim) e nitrato de uranila ou de tório (dissolvidos em álcool e éter) em uma superfície plana de mica muscovita e em seguida (depois de alguns minutos para a secagem do colódio) submeter este filme a uma temperatura de 400 °C durante 1 hora. Os filmes utilizados neste trabalho tem espessuras menores que 0,1µm, o que garante que a auto-absorção de energia de fragmentos de fissão e partículas alfa é negligenciável (Bigazzi *et al.*, 1993).

3-1) Calibração dos Filmes Finos de Urânio

Quando um detector de traços de partículas alfa é justaposto à um filme fino de urânio natural por um tempo t , a densidade superficial de traços observáveis no detector (depois de um ataque químico conveniente) pode ser escrita como:

$$\rho_{\alpha}^{det} = \frac{1}{2} \varepsilon_{\alpha}^{det} t N_U^F (2C_{238} \lambda + C_{235} \lambda_{235}) \quad (13)$$

onde $\varepsilon_{\alpha}^{det}$ é a razão entre a densidade superficial de traços observada no detector depois do ataque químico e o número de decaimentos alfa ocorridos no filme por unidade de área e λ_{235} é a constante de decaimento alfa do ^{235}U .

Da equação 13 vemos que N_U^F pode ser obtido (conhecendo-se $\varepsilon_{\alpha}^{det}$, t , C_{238} , λ , C_{235} , e λ_{235}) a partir da determinação de ρ_{α}^{det} . Nesta equação, o primeiro termo entre parênteses leva em

conta que no urânio natural, o ^{234}U está em equilíbrio secular com o ^{238}U e o fator 1/2 leva em conta que neste caso, metade das partículas alfa provenientes do filme atingem o detector.

Nesta tese as calibrações de filmes finos via alfa foram feitas utilizando-se CR-39 e emulsões nucleares como detectores de traços de partículas alfa.

No caso da emulsão nuclear o “ataque químico” (revelação fotográfica) para partículas alfa é feito em uma câmara escura e em três etapas. O detector é inicialmente colocado em um banho revelador por 50 minutos, depois no freiador por 5 minutos e em seguida no fixador por ~ 25 minutos (o dobro do tempo de clareamento). A temperatura dos banhos é de 20 °C. Em 1 litro de revelador tem-se 12g de ácido bórico, 7g de sulfito de sódio, 0,2g de bromato de potássio e 2,5g de amidol dissolvidos em água. No freiador, em 1 litro tem-se 5g de sulfito de sódio e ~10 ml de ácido acético (ácido acético em quantidade suficiente para que o pH seja 4). No fixador em 1 litro tem-se 400g de hipossulfito de sódio e 5g de sulfito de sódio dissolvidos em água.

Após a fixação, a emulsão é imersa em água desmineralizada por 20 minutos à 15 °C e em seguida em uma solução com composição volumétrica de 20% de água, 75% de álcool etílico e 5% de glicerina, durante 10 minutos à 17 °C.

A eficiência de detecção da emulsão nuclear para partículas alfa provenientes de fontes sem autoabsorção de energia sempre foi tomada como sendo 1. Ou seja, neste caso os pesquisadores que já trabalharam ou trabalham com este detector o consideram um detector absoluto (em condições isentas de fading, que é o nosso caso) devido às características dos traços revelados. Uma prova experimental que confirma esta hipótese foi obtida utilizando-se emulsões nucleares carregadas com samário e com urânio (Hadler *et al.*, 1996). Pedacos destas emulsões foram revelados em tempos que variam de 1 a 54 dias depois do carregamento, e a eficiência de detecção foi obtida medindo-se a densidade de traços de partículas alfa e conhecendo-se as constantes de decaimento alfa e as concentrações isotópicas envolvidas. O valor da eficiência de

detecção obtida neste caso foi de $(1,000 \pm 0,015)$.

Apesar deste erro não ser significativo quando propagado nas equações utilizadas nesta tese, a emulsão nuclear foi considerada como um detector absoluto.

Nos casos em que utilizamos o CR-39 como detector de partículas alfa, o ataque químico utilizado foi de 400 minutos em 50g de NaOH dissolvido em 200 ml de água. A temperatura do banho neste caso é mantida à 70 °C .

A eficiência de detecção do CR-39 para partículas alfa provenientes dos filmes de urânio utilizados neste trabalho foi obtida comparando-se as densidades de traços (por tempo de exposição) registradas no CR-39 com aquelas registradas em uma emulsão nuclear:

$$\varepsilon_{\alpha}^{CR39} = \frac{(\rho_{\alpha}/t)^{CR39}}{(\rho_{\alpha}/t)^{EM}} \quad (14)$$

Outro procedimento utilizado neste trabalho para calibrar filmes finos foi submeter a uma mesma irradiação, filmes calibrados via alfa e filmes com conteúdo de urânio (ou tório) desconhecidos. Neste caso:

$$N_{U(Th)}^{F(desc)} = \frac{\rho_{U(Th)}^{F(desc)}}{\rho_{U(Th)}^{F(conh)}} N_{U(Th)}^{F(conh)} \quad (15)$$

Os filmes de urânio utilizados como dosímetros de neutrons nesta tese foram: XXII - 4 (calibrado via α em emulsão); XXVIII- 2 e XXVIII - 4 (calibrados via α em CR-39); e o XVIII - 3 (calibrado via uma irradiação com neutrons junto com o XXII - 4).

Na tabela 3-1 estão mostrados os valores de $(\rho_\alpha / t)^{EM}$ e N_U^F obtidos com emulsões nucleares a partir da equação 13 para os filmes XXII-1, XXII - 2, XXII- 4, XXIII - 3. Nesta e nas outras tabelas desta tese $\sum x_i$ é o número total de traços contados. Os super índices EM se referem a emulsões nucleares.

Os valores das constantes utilizadas para se obter N_U^F foram (Lederer e Shirley, 1978): $C_{235} = 0,99275$; $\lambda = 1,551246 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$; $C_{235} = 0,00720$; $\lambda_{235} = 9,8479 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$. Para se obter N_U^F foram utilizados os $(\overline{\rho_\alpha / t})^{EM}$ médios ou seja $(\rho_\alpha / t)^{EM}$.

Todas as medidas em emulsões feitas nesta tese, foram efetuadas utilizando-se um microscópio óptico DIALUX 20EB da Leitz/Wetzlar no aumento nominal de $12,5 \times 100$ a óleo.

Na tabela 3-2 estão mostrados os ϵ_α^{CR-39} obtidos a partir da equação 14 com os filmes XXII - 1, XXII - 2 e XXIII - 3 e os valores de N_U^F obtidos via α em CR-39 a partir da equação 13 (neste caso se utilizou o valor médio de ϵ_α^{CR-39} que é $0,728 \pm 0,015$) para os filmes XXVII - 2 e XXVIII - 4.

Nesta e nas outras tabelas desta tese $\sigma_p \%$ é o desvio padrão percentual da média poissoniana ($\sigma_p \% = 1/\sqrt{\sum x_i}$) e $\sigma_{exp} \%$ é o desvio padrão percentual experimental da média ($\sigma_{exp} \% = S/\sqrt{n}$, onde n é o número de medidas e $S = \sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$).

Tabela 3-1: Calibração de filmes de urânio via partículas alfa em emulsões nucleares.

Filme	t (h)	Σx_i	ρ_α^{EM} (10^4cm^{-2})	$(\rho_\alpha/t)^{EM}$ ($\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	$(\overline{\rho_\alpha/t})^{EM}$ ($\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	N_U^F (10^{16}cm^{-2})
XXII-1	66,6	1297	2,062 ($\pm 2,8\%$)	309,7 \pm 8,7	308,0 \pm 7,8	1719 ($\pm 2,5\%$)
	101,43	302	3,06 ($\pm 5,8\%$)	301 \pm 18		
XXII-2	66,6	1231	1,957 ($\pm 2,9\%$)	293,8 \pm 8,5	288,1 \pm 7,5	1,608 ($\pm 2,5\%$)
	101,43	278	2,71 ($\pm 6,0\%$)	268 \pm 16		
XXII-4	66,6	1221	1,941 ($\pm 2,9\%$)	291,5 \pm 8,5	290,1 \pm 7,5	1619 ($\pm 2,6\%$)
	101,43	311	2,89 ($\pm 5,7\%$)	285 \pm 16		
XXIII-3	66,6	2329	8,80 ($\pm 2,1\%$)	1321 \pm 28	1304 \pm 20	7,28 ($\pm 1,5\%$)
	21,4	444	2,98 ($\pm 4,8\%$)	1393 \pm 67		
	25,4	267	3,18 ($\pm 6,1\%$)	1251 \pm 76		
	66,6	1323	8,41 ($\pm 2,8\%$)	1263 \pm 35		

Tabela 3-2: Obtenção de $\epsilon_{\alpha}^{CR-39}$ e calibração de filmes finos de urânio via partículas alfa em CR-39.

Filme	t (h)	Σx_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ_{α}^{CR-39} (10^4 cm^{-2})	$(\rho_{\alpha}/\Delta t)^{CR-39}$ ($\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	$\epsilon_{\alpha}^{CR-39}$	N_U^F (10^{15} cm^{-2})
XXII-1	54,0833	1262	2,8% 2,9%	1,183 ($\pm 2,9\%$)	218,7	0,710 ($\pm 3,8\%$)	
XXII-2	49,8667	1371	2,7% 2,9%	1,041 ($\pm 2,9\%$)	208,7	0,725 ($\pm 3,9\%$)	
XXIII-3	4	1154	2,9% 3,1%	0,389 ($\pm 3,1\%$)	973	0,746 ($\pm 3,4\%$)	
XXVIII-2	671,5	1593	2,5% 2,5%	2,123 ($\pm 2,5\%$)	31,61		2,423 ($\pm 3,3\%$)
XXVIII-4	671,5	1679	2,4% 2,4%	2,261 ($\pm 2,4\%$)	33,55		2,572 ($\pm 3,2\%$)

Na tabela 3-3 está mostrado o valor de N_U^F para o filme XVIII- 3 obtido a partir da equação 15 com o auxílio do filme XXII - 4 que já havia sido calibrado via alfa em emulsão (ver tabela 3-1).

Estes filmes foram irradiados juntos no reator do IPEN - Lima (irradiação L -17).

O ataque químico a que foram submetidas as micas que estavam justapostas aos filmes durante a irradiação (que é o ataque padrão para todas as micas utilizadas neste trabalho) foi em HF48% à 15 °C durante 90 minutos.

Nesta tese todas as medidas em micas muscovitas e CR-39 foram efetuadas em um microscópio Leitz no aumento nominal 10 x 25 (o aumento real é de ~ 350, devido a um sistema de lentes interno) com o auxílio de um retículo calibrado acoplado à ocular do microscópio.

Tabela 3-3: Calibração de um filme de urânio a partir de uma irradiação com neutrons junto com um filme pré-calibrado via alfa.

<i>Filme</i>	Σx_i	$\sigma_p\%$ $\sigma_{exp}\%$	ρ_U^F ($10^5 cm^{-2}$)	N_U^F ($10^{15} cm^{-2}$)
XXII-4	1405	2,7% 2,3%	6,58 ($\pm 2,7\%$)	
XVIII-3	1923	2,3% 2,3%	0,901 ($\pm 2,3\%$)	2,217 ($\pm 4,4\%$)

3-2) Calibração dos filmes finos de tório

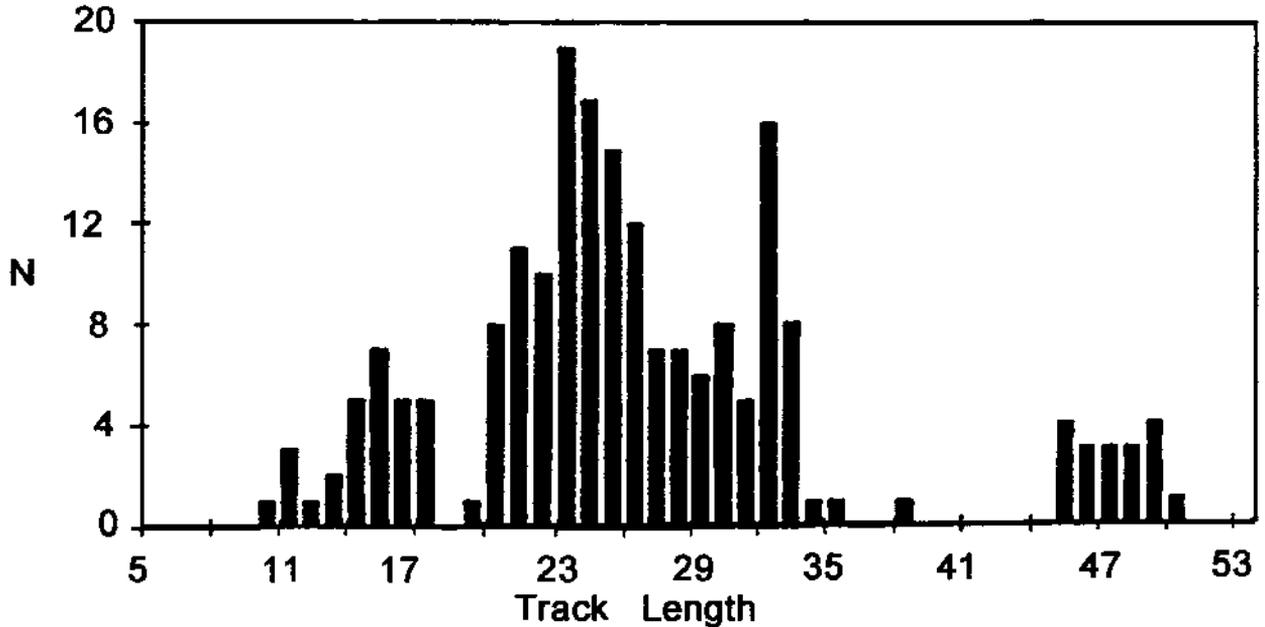
Em uma emulsão nuclear, o comprimento de um traço de partícula alfa depende de sua energia, assim este detector pode ser utilizado como um seletor de alfa emissores.

Na figura 3-1 está mostrado o histograma de comprimento de traços em uma emulsão nuclear que foi acoplada a um filme fino de tório. Neste histograma pode ser notada uma separação entre os traços de partículas alfa emitidas pelo ^{232}Th (4,01 MeV), que são traços com comprimentos menores que $19\ \mu\text{m}$, e os traços dos outros emissores alfa da cadeia do tório (que emitem partículas alfa com energias maiores que 5,42 MeV). Este fato permite que N_{Th}^F seja determinado efetuando-se a medida da densidade de traços com comprimentos menores que $19\ \mu\text{m}$, ρ_{Th} (Bigazzi *et al.*, 1995 a).

$$\rho_{\alpha}^{\text{Th}} = \frac{1}{2} t \lambda_{232} N_{\text{Th}}^F \quad (16)$$

onde λ_{232} é a constante de decaimento alfa do ^{232}Th .

Figura 3-1: Histograma de comprimento de traços de partículas alfa provenientes de um filme fino de tório, obtido em uma emulsão nuclear.



A medida de N_{Th}^F via a própria atividade do ^{232}Th é trabalhosa, já que envolve medidas de comprimento de traços na determinação de ρ_{Th} . No entanto, o sexto nuclide da cadeia do tório, o ^{220}Rn , é um gás nobre que pode emanar do filme atrapalhando uma determinação de N_{Th}^F via sua atividade total. Assim, como não havia na literatura resultados a respeito da emissão de ^{220}Rn de um filme fino de tório antes de 1995, nós estudamos este efeito dentro de uma determinação de N_{Th}^F via atividade alfa total (Bigazzi *et al.*, 1995a).

Levando-se em conta as meias vidas dos nuclídeos presentes na cadeia do tório, pode-se demonstrar, utilizando-se as leis da transformação radioativa, que a atividade do ^{232}Th só entra em equilíbrio com a do ^{228}Th depois de ~ 50 anos após se separar quimicamente o tório e que (considerando-se um sistema fechado) o ^{228}Th entra em equilíbrio com seus filhos em ~ 25 dias. Assim, se o escape de ^{220}Rn for negligenciável, quando uma emulsão nuclear for justaposta a um filme fino de tório (onde o tório utilizado foi separado há pelo menos 25 dias) por um tempo t , a

densidade total de partículas alfa, ρ_α , na emulsão pode ser escrita como (Bigazzi *et al.*, 1995a):

$$\rho_\alpha = \frac{1}{2} t \lambda_{232} N_{Th}^F (1 + 5K) \quad (17)$$

onde :

$$K = \frac{N_{228}^F \lambda_{228}}{N_{Th}^F \lambda_{232}} \quad (18)$$

onde N_{228}^F é o número de átomos de ^{228}Th por unidade de superfície no filme e λ_{228} é a constante de decaimento alfa do ^{228}Th .

Nesta equação foi considerado que a cadeia do tório possui sete alfa emissores sendo que a soma das atividades alfa do ^{212}Bi e do ^{212}Po é igual a atividade do ^{228}Th .

A razão entre as atividades do ^{228}Th e do ^{232}Th pode ser escrita, em função do tempo t_s após a separação química do tório como:

$$K = 1 - \frac{\lambda_{228}}{(\lambda_{228} - \lambda_{Ra})} (e^{-t_s \lambda_{Ra}} - e^{-t_s \lambda_{228}}) \quad (19)$$

onde λ_{Ra} é a constante de decaimento beta do ^{228}Ra .

Desta equação vê-se que K pode ser obtido conhecendo-se a idade de separação do óxido de tório, t_s . Desta forma N_{Th}^F pode ser determinado, utilizando-se as equações 17 e 19, a partir da medida de ρ_α .

No caso do óxido de tório utilizado neste trabalho, t_s não era conhecido. Porém, uma emulsão nuclear, carregada e revelada em 1983 com o mesmo óxido de tório, possibilitou a obtenção do valor de K na época do carregamento. Com este valor se obteve t_s em 1983 e somando a ele o tempo decorrido desde esta data até a exposição com os filmes de finos de tório,

se obteve o valor de K, utilizando-se a equação 19, na época desta última exposição.

Em uma emulsão carregada com tório e depois de um tempo apropriado têm-se além de traços simples, conjuntos de traços que partem de um mesmo ponto (estrelas). Estas estrelas aparecem devido ao decaimento de um alfa emissor e seus filhos alfa emissores. Pode ser mostrado (utilizando-se Senftle *et al.* (1954)) que se a emulsão for revelada em $800 \text{ h} \leq t_R \leq 1300 \text{ h}$ têm-se que: i) todos os traços simples são de partículas alfa do ^{232}Th e do ^{228}Th ; ii) todas as estrelas quintuplas são geradas pelo decaimento do ^{228}Th e seus filhos alfa emissores; iii) partículas alfa do ^{232}Th estão presentes apenas nos traços simples e iv) partículas alfa do ^{228}Th estão presentes apenas em traços simples e em estrelas quintuplas. Assim, tem-se que:

$$\rho_{SI} + \rho_{QU} = tN_{Th} \lambda_{232}(1+K) \quad (20)$$

onde ρ_s e ρ_Q são as densidades superficiais de traços simples e estrelas quintuplas, respectivamente.

N_{th} é o número de átomos de ^{232}Th por unidade de superfície.

A emulsão carregada em 1983 foi revelada em tempos de exposição de 888, 1080 e 1248 horas. Como resultado médio para as três revelações, se obteve:

$$((\rho_{SI} + \rho_{QU}) / t) = (1,194 \pm 0,024) \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

N_{th} foi determinado por gravimetria e o valor obtido foi $(4,514 \pm 0,024) \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2}$.

O valor de λ_{232} utilizado foi (Lederer e Shirley, 1978): $1,588 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

Assim, substituindo-se os valores acima na equação 20 obtêm-se que o valor de K em 1983 era $(0,698 \pm 0,048)$.

Os valores de λ_{228} e λ_{Ra} são respectivamente (Lederer e Shirley, (1978)) $1,141 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ e

$3,813 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$. Substituindo-se estes valores e o valor de K obtido acima na equação 19 obtêm-se numericamente que em 1983 que a idade de separação do tório era de $(13,0 \pm 1,0)$ anos.

A atividade do filme fino de tório foi medida em uma emulsão acoplada ao filme em 1993. Assim, o valor de K neste caso é dado pela equação 19 para $t_s = (23,0 \pm 1)$ anos, ou seja, $K = 0,906 \pm 0,015$.

Dos resultados acima tem-se que, se o efeito da emissão do ^{220}Rn for negligenciável, $N^{\text{F}_{\text{Th}}}$ pode ser obtido com o auxílio da equação 17, medindo-se ρ_α / t .

O filme de Tório Th-3 (que nesta tese foi utilizado como calibrador primário) foi justaposto a uma emulsão nuclear KO da Ilford em março de 1993 durante 21, 433 horas de exposição. Nesta emulsão, a medida de ρ_{Th} resultou em $(8,82 \pm 0,51) \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$. Substituindo os valores de t e ρ_{Th} acima na equação 16, se obtém que $N^{\text{F}_{\text{Th}}} = (1,467 \pm 0,090) \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. A medida de ρ_α resultou em $(4,09 \pm 0,11) \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$, o que de acordo com a equação 17 implica em $N^{\text{F}_{\text{Th}}} = (1,231 \pm 0,045) \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Assim, tem-se que a determinação de $N^{\text{F}_{\text{Th}}}$ efetuada com o auxílio da equação 16 não concorda com aquela efetuada com o auxílio da equação 17. Ou seja, os efeitos da emissão do ^{220}Rn não devem ser desprezados

Na figura 1 pode ser notada também uma separação entre os traços de partículas alfa do ^{212}Po (8,78 MeV) que são os traços com comprimentos maiores que 41 μm , e os traços dos outros emissores alfa (energias menores que 6,77 MeV). Isto torna possível a determinação da densidade de traços do ^{212}Po , ρ_{Po} , em separado também.

A relação entre ρ_α , ρ_{Th} , ρ_{Po} e a densidade de traços de partículas alfa do ^{220}Rn , ρ_{Rn} , pode ser escrita como:

$$\rho_\alpha = \rho_{\text{Th}}(1 + 2k) + 2\rho_{\text{Rn}} + \frac{\rho_{\text{Po}}}{0,663} \quad (21)$$

Nesta equação, devido ao fato da meia vida do ^{216}Po ser muito pequena (0,16s), se considerou que ele está em equilíbrio com o ^{220}Rn . Além disto, se considerou que 66,3% do ^{212}Bi decai via beta no ^{212}Po e 33,7% decai via alfa no ^{208}Tl (Lederer e Shirley, 1978).

A medida de ρ_{Po} resultou em $(3,22 \pm 0,31) \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ o que de acordo com a equação 21 implica em $\rho_{\text{Rn}} = (5,62 \pm 0,96) \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ que é significativamente menor que a densidade $K\rho_{\text{Th}} = (7,99 \pm 0,48) \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$, esperada caso não houvesse escape de ^{220}Rn . O que confirma que o escape do ^{220}Rn impossibilita a determinação de N_{Th}^{F} via ρ_{α} , utilizando-se a equação 21.

Deve ser notado que as determinações de ρ_{α} e ρ_{Po} poderiam ser utilizadas conjuntamente para se determinar N_{Th}^{F} , caso se impusesse que a atividade do ^{220}Rn no filme é igual a soma das atividades alfa do ^{212}Bi e do ^{212}Po . Porém, quando a emulsão é justaposta ao filme fino de tório, não se pode garantir que as condições de escape sejam iguais as de antes da justaposição. Ou seja o ^{220}Rn que fica retido durante a justaposição estará em equilíbrio com o ^{216}Po , porém não estará desde o início com os outros filhos formados. Porém é esperado que as condições sejam as mesmas para filmes que possuam a mesma espessura, em exposições efetuadas ao mesmo tempo e tendo a mesma duração.

Na tabela 3-4 estão mostrados os resultados citados acima, referentes ao filme Th 3. Nesta tabela, também estão mostrados resultados referentes ao filme de tório Th 1 (que nesta tese foi utilizado como calibrador secundário). Este filme tem espessura parecida com a do Th 3, foi exposto e revelado junto com o Th 3 em 1993 e o tempo de exposição também foi o mesmo (21,433h). Assim, tanto para o filme Th 3 como para o filme Th 1, ρ_{Rn} pode ser escrito como:

$$\rho_{\text{Rn}} = LK \rho_{\text{Th}} \quad (22)$$

onde L é um fator de proporcionalidade relacionado com a emissão do ^{220}Rn .

Com o auxílio dos dados do filme Th 3 e a partir das equações 21 e 22 se obtém que $L = (0,70 \pm 0,13)$. Com este valor de L e com os dados referentes ao Th 4 mostrados na tabela 3-4 se obtém (a partir das equações 21 e 22) o valor de N_{Th}^{F} para este filme.

Tabela 3-4: Determinação de N_{Th}^{F} utilizando-se a emulsão nuclear como um espectrômetro alfa.

Filme	Σx_i (ρ_α)	ρ_α (10^4cm^{-2})	Σx_i (ρ_{Po})	ρ_{Po} (10^3cm^{-2})	Σx_i (ρ_{Th})	ρ_{Th} (10^3cm^{-2})	N_{Th}^{F} (10^{17}cm^{-2})
Th 3	1358	$4,09 \pm 0,11$	107	$3,22 \pm 0,31$	293	$8,82 \pm 0,51$	1,468 (6,1%)
Th 1	1518	$4,57 \pm 0,12$	118	$3,55 \pm 0,32$	—	$9,89 \pm 0,59$	1,645 (6,0%)

Na tabela 3-5 estão mostrados resultados de N_{Th}^F também obtidos com partículas alfa em emulsões nucleares para os filmes Th 1 e Th 4 que têm aproximadamente a mesma espessura que o Th 3. As exposições foram feitas ao mesmo tempo e com a mesma duração (45,3 h de exposição). Neste caso N_{Th}^F para os filmes Th 1 e Th 4 pode ser escrito como:

$$N_{Th}^F = \frac{\rho_\alpha}{\rho_\alpha(Th3)} N_{Th}^F(Th3) \quad (23)$$

Tabela 3-5: Calibração dos filmes Th 1 e Th 4 a partir do filme Th 3, através da atividade alfa total registrada em emulsões nucleares.

Filme	Σx_i	ρ_α (10^4cm^{-2})	$\rho_\alpha/\rho_\alpha(Th3)$	N_{Th}^F (10^{17}cm^{-2})
Th 3	2702	$8,14 \pm 0,16$	1	—
Th 1	2818	$8,49 \pm 0,16$	1,043 ($\pm 2,7\%$)	1,531 ($\pm 6,7\%$)
Th 4	2166	$8,52 \pm 0,18$	1,047 ($\pm 2,9\%$)	1,537 ($\pm 6,8\%$)

Na tabela 3-6 estão mostrados os resultados obtidos com partículas alfa em CR-39. Neste caso as exposições foram de 24 h e os N_{Th}^F também foram obtidos com a equação 23.

Tabela 3-6: Calibração dos filmes Th 1 e Th 4 a partir do filme Th 3, através da atividade alfa total registrada em CR-39.

Filme	Σx_i	ρ_α (10^4 cm^{-2})	$\rho_\alpha/\rho_\alpha(\text{Th3})$	N_{Th}^F (10^{17} cm^{-2})
Th 3	2522	$2,141 \pm 0,043$	1	-
Th 1	2604	$2,211 \pm 0,043$	1,033 ($\pm 2,8\%$)	1,516 ($\pm 6,7\%$)
Th 4	2726	$2,315 \pm 0,044$	1,081 ($\pm 2,8\%$)	1,587 ($\pm 6,7\%$)

O valor médio das 3 calibrações mostradas acima para o filme Th-1 resultou em $N_{Th}^F = 1,570 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ($\pm 3,7\%$) e no caso do filme Th 4 em $N_{Th}^F = 1,560 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ ($\pm 4,8\%$). Porém, como o calibrador primário possui um erro de 6,1% na determinação de seu N_U^F , o erro de cada um dos calibradores foi tomado como sendo 6,1%. Os valores N_U^F e seus respectivos erros, utilizados nesta tese para os três calibradores citados acima estão mostrados na tabela 3-7.

Tabela 3-7: N_{th}^F dos filmes de tório calibradores.

Filme	N_{Th}^F (10^{17}cm^{-2})
Th 3	1,468 ($\pm 6,1\%$)
Th 1	1,570 ($\pm 6,1\%$)
Th 4	1,560 ($\pm 6,1\%$)

Os filmes finos usados como dosímetros de neutrons no âmbito desta tese foram o T1, T2, T7, T8, Th A, Th E, Th J, Th N e Th R.

As calibrações dos filmes T1, T2, T7, Th A, Th J e Th R foram feitas irradiando-se com neutrons estes filmes (acoplados a micas muscovitas) junto com os filmes Th 1, Th 3 e Th 4. Esta irradiação foi feita no reator do IPEN-CNEN- São Paulo (Irradiação I-18).

Os resultados referentes à irradiação I-18 estão mostrados na tabela 3-8. Os N_{Th}^F dos filmes a serem calibrados foram obtidos utilizando-se o valor médio de $(N_{Th}^F/\rho^F) = 2,703 \times 10^{11}$ ($\pm 4,0\%$) para os três calibradores (Th 1, Th 3 e Th 4) na equação 12.

Para se calibrar os filmes Th E e Th N foi utilizada uma irradiação no IPEN-São Paulo (irradiação I-1) onde estavam presentes os filmes Th A, Th j e Th R que já haviam sido calibrados na irradiação 18. Os resultados referentes à irradiação I-1 estão mostrados na tabela 3-9.

Deve ser notado que para se construir estas tabelas os erros do N_{Th}^F dos três calibradores principais (Th 1, Th 3 e Th 4) foram tomados como independentes, daí os erros dos calibrados serem menores que o erro de cada um dos calibradores. Ou seja, os erros dos calibrados refletem o erro da média dos resultados obtidos com os três calibradores.

Tabela 3-8: Calibração dos filmes de tório utilizando-se a irradiação I-18.

Filme	Σx_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ_{Th} (10^5cm^{-2})	N_{Th}^F/ρ_I (10^{11})	N_{Th}^F (10^{15}cm^{-2})
Th 1	753	3,6% 3,7%	5,72	2,74 ($\pm 7,0\%$)	-
Th A	848	3,4% 3,3%	1,609	-	43,5 ($\pm 5,2\%$)
T1	1735	2,4% 2,7%	0,2178	-	5,89 ($\pm 4,8\%$)
T2	1124	3,0% 3,4%	0,2107	-	(5,70 ($\pm 5,2\%$))
Th J	1190	2,9% 2,8%	2,259	-	61,1 ($\pm 4,9\%$)
Th 3	1216	2,9% 2,9%	5,46	2,69 ($\pm 6,7\%$)	-
T7	814	3,5% 5,3%	0,1526	-	4,12 ($\pm 6,6\%$)
T8	989	3,2% 3,5%	0,1669	-	4,51 ($\pm 5,3\%$)
Th R	710	3,8% 3,9%	1,348	-	36,4 ($\pm 5,6\%$)
Th 4	766	3,6% 3,5%	5,82	2,68 ($\pm 7,0\%$)	-

Tabela 3-9: Calibração dos filmes de tório utilizando-se a irradiação I-1.

Filme	Σx_i	σ_P % σ_{exp} %	ρ_{Th} (10^5 cm^{-2})	N_{Th}^F/ρ_I (10^{10})	N_{Th}^F (10^{16} cm^{-2})
Th A	947	3,2% 3,5%	4,99	8,72 ($\pm 6,3\%$)	-
Th E	1121	3,0% 3,1%	5,91	-	5,29 ($\pm 4,7\%$)
Th J	1257	2,8% 2,5%	6,63	9,22 ($\pm 5,6\%$)	-
Th N	935	3,3% 3,3%	4,93	-	4,41 ($\pm 4,8\%$)
Th R	783	3,6% 3,4%	4,13	8,81 ($\pm 6,7\%$)	-

CAPÍTULO 4

*Se por baixo não está dando
É melhor tentar por cima
Com a cabeça dá*

ibid.

4 - Considerações a respeito da utilização da dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio natural na datação com o MTF.

A principal limitação prática da dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio natural está relacionada com a preparação e calibração de filmes “muito finos” (Bigazzi *et al.*, 1999). Ou seja, filmes com conteúdo de urânio baixo o suficiente ($N_U^F \leq 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) para que as irradiações de minerais a serem datados com o MTF (com fluência de neutrons térmicos $\geq 10^{14}$ neutrons/cm²) possam ser efetuadas sem que a quantidade de traços registrados na mica acoplada ao filme prejudique a contagem dos traços. Isto porque a partir de determinada densidade de traços, a superposição dos traços torna a contagem impossível de ser efetuada. Estes filmes, praticamente não tem espessura e são constituídos de moléculas de óxido de urânio espalhadas sobre a base do filme. Ao confeccionarmos tais filmes obtemos uma aderência muito pobre de tais moléculas à base. Na tabela 4-1 mostramos os resultados de medidas referentes a 3 irradiações efetuadas consecutivamente no intervalo de 1 mês entre cada uma. Estas medidas são referentes a ρ_U e ρ_I obtidos com um filme de urânio “muito fino” (filme T) e um vidro vulcânico (amostra Monte Arci 6 da Itália) respectivamente.

Tabela 4-1: Comparação entre densidades de traços de fissão induzida em um filme de urânio “muito fino” e um vidro vulcânico em três irradiações.

Irradiação	$\rho_U(10^5 \text{ cm}^{-2})$	$\rho_I(10^5 \text{ cm}^{-2})$	ρ_U/ρ_I
1	1,303 (±2,5%)	1,328 (±2,5%)	0,981 (±3,5%)
2	1,360 (±2,0%)	1,673 (±2,7%)	0,810 (±3,4%)
3	1,821 (±3,7%)	3,508 (±2,8%)	0,519 (±4,6%)

Nesta tabela vemos que a cada irradiação a razão ρ_U/ρ_I fica menor. Ou seja, este

resultado indica que o conteúdo de urânio presente no filme diminui de uma irradiação para outra devido ao manuseio (Hadler *et al.*, 1993).

Outro resultado intrigante se refere a calibração destes filmes “muito finos” (Bigazzi *et al.*, 1995c). Efetuamos uma irradiação com neutrons em um filme de urânio “muito fino” junto com uma amostra padrão (novamente o vidro vulcânico Monte Arci 6). O filme de urânio foi calibrado antes e depois da irradiação sendo que os resultados dos conteúdos de urânio foram $(5,5 \pm 0,4)$ e $(5,7 \pm 0,5) \times 10^{13}$ átomos de urânio/cm², respectivamente. O resultado da medida da idade da amostra foi $(62,5 \pm 7,3)\%$ inferior à idade conhecida por outros métodos.

Os problemas dos filmes muito finos podem estar relacionados com o urânio presente na mica base, contaminação durante a confecção, entrada de urânio na base etc. Porém um estudo mais aprofundado a este respeito não está nos objetivos deste trabalho.

Quanto ao tório, não é necessário a confecção de filmes “muito finos” já que ele se fissiona apenas por neutrons rápidos e mesmo assim possui uma secção de choque bastante baixa quando comparado com a do ²³⁵U para neutrons térmicos.

Os problemas relacionados com filmes de urânio “muito finos” não se apresentam no caso de filmes finos de urânio com espessuras maiores que 0,0015 µm . Por exemplo, na tabela 4-2 mostramos os resultados de calibrações efetuadas em filmes de 0,05 , 0,01 e 0,0015 µm, antes e depois de um período de ~ 5 anos. Neste período estes filmes foram submetidos a pelo menos 6 irradiações cada um.

Tabela 4-2: Resultados de calibrações efetuadas em filmes de urânio com espessuras maiores que 0,0015 μm .

Filme	Espessura ($\times 10^{-2} \mu\text{m}$)	N_U^F 1ª calibração ($\times 10^{15} \text{cm}^{-2}$)	N_U^F 2ª calibração ($\times 10^{15} \text{cm}^{-2}$)
XXIII-3	5	$70,5 \pm 1,9$	$74,7 \pm 2,8$
XXII-4	1	$16,27 \pm 0,47$	$15,91 \pm 0,91$
XVII-1	0,15	$2,270 \pm 0,048$	$2,224 \pm 0,067$

Nesta tabela vemos que não há queda de urânio para filmes com espessuras entre 0,0015 e 0,05 μm . Estes filmes podem ser utilizados em fluências de neutrons térmicos entre 10^{11} e 10^{14} neutrons/ cm^2 . Isto torna possível a calibração de vidros padrões dopados com urânio natural como o CN 1, CN 2 e CN 5 da Corning e o IRMM-540 belga (De Corte *et al.*, 1998). Ou seja, em uma irradiação com $\phi = 1 \times 10^{13}$ neutrons/ cm^2 a densidade de traços devido ao filme XXII-4 será $\sim 8 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ enquanto aquelas devido aos padrões CN 1 e CN 2 serão da ordem de $5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$. Essas densidades de traços são fáceis de serem medidas. No caso do CN 5 e do IRMM-540, eles podem ser calibrados por filmes com a espessura do XVII-1 em irradiações com $\phi = 5 \times 10^{13}$ neutrons/ cm^2 . Neste caso, os filmes darão densidades da ordem de $6 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ enquanto que os vidros dopados darão densidades da ordem de $1 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$.

Nesta tese, os quatro vidros citados acima foram calibrados a partir de filmes finos de urânio utilizando-se três irradiações diferentes (I-31 e I-26 efetuadas no IPEN-São Paulo e L-18 efetuada no IPEN-Lima, Peru). Neste caso a densidade de traços nas micas que estavam acopladas aos vidros durante a irradiação é dada por:

$$\rho_U^v = N_U^v \varepsilon^v R_U \quad (24)$$

onde os super-índices v se referem ao vidro em questão.

Da equação 24 vemos que a partir das determinações de ρ_U^F do vidro e R_U com o auxílio de filmes finos de urânio (equação 7) presentes na mesma irradiação podemos obter o ($N_U^F \epsilon^F$) do vidro e então utiliza-lo como dosímetro de neutrons em outras irradiações.

Na tabela 4-3 estão mostrados os resultados referentes as determinações de R_U a partir de filmes finos de urânio natural para as três irradiações de calibração de vidros dopados com urânio natural que efetuamos nesta tese.

Tabela 4-3: Resultados das medidas de R_U obtidas com filmes finos de urânio natural nas irradiações de calibração dos vidros padrões

irradiação	Filme	N_U^F (10^{15}cm^{-2})	Σx_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ_U^F (10^5cm^{-2})	R_U (10^{-10})
I-31	XXVIII-2	2,423 ($\pm 3,3\%$)	2081	2,2% 2,2%	6,34	2,62 ($\pm 4,4\%$)
	XXVIII-4	2,572 ($\pm 3,2\%$)	1234	2,8% 2,9%	6,51	2,53 ($\pm 4,8\%$)
I-26	XVIII-3	2,217 ($\pm 4,4\%$)	989	3,2% 3,7%	4,64	2,09 ($\pm 6,1\%$)
L-18	XXII-4	16,19 ($\pm 2,6\%$)	1246	2,8% 2,5%	2,920	0,1804 ($\pm 4,3\%$)

O valor de ϵ^F utilizado nesta tese foi de $1,000 \pm 0,020$ (Bigazzi *et al.*, 1991b). Ele foi obtido irradiando-se com neutrons, filmes finos de urânio natural justapostos a emulsões nucleares no Beam Hole do reator do IPEN/CNEN- São Paulo. Depois de se submeter a emulsão nuclear a um processo de revelação para fragmentos de fissão, neste detector são revelados todos os traços de fragmentos de fissão e nenhum traço de partículas alfa (Hadler *et al.*, 1996). Depois da irradiação, o UO_3 dos filmes foi dissolvido e as micas suporte foram empregadas como detectores de fragmentos de fissão (Iunes, 1990). Assim, ϵ^F foi determinado a partir da razão entre as

densidades de traços de fissão na mica suporte e na emulsão.

Na tabela 4-4 estão mostrados os resultados referentes aos $N_U \epsilon^V$ dos vidros padrões obtidos com as irradiações de calibração. No caso da Irradiação I-31, para se obter os $N_U \epsilon^V$ se utilizou o valor médio dos R_U obtidos com os filmes XXVIII-2 e XXVIII-4 (tabela 4-3).

Na tabela 4-4 e em todas as tabelas desta tese, as medidas dos ρ_U^V para os vidros CN 1, CN 2 e CN 5 são duplas, pois se referem às micas acopladas aos dois lados do vidro. No caso do IRMM 540 as medidas são referentes à frente do vidro, que é lisa.

Na tabela 4-5 estão mostrados os valores médios de $N_U \epsilon^V$, obtidos a partir da tabela 4-4. Nesta tabela os $(N_U \epsilon^V)$ são referentes à média ponderada e os $(N_U \epsilon^V)^*$ foram obtidos sem levar em conta os erros individuais das medidas.

Os valores de $N_U \epsilon^V$ utilizados nesta tese são aqueles presentes na quarta coluna da tabela 4-5. Deve ser notado que no caso do CN 2 o valor é do $(N_U \epsilon^V)$ porém o erro é o de $(N_U \epsilon^V)^*$.

Tabela 4-4: Resultado das determinações de $N_U^V \epsilon^V$ para os quatro vidros padrões utilizados nesta tese.

Irradiação R_U	Vidro	Σx_i	$\sigma_P \%$ $\sigma_{exp} \%$	ρ_U^V (10^4cm^{-2})	$N_U^V \epsilon^V$ (10^{14}cm^{-2})
I-31 $2,578 \times 10^{-10}$ ($\pm 3,2\%$)	CN1 3-3	633	4,0%	$3,75 \pm 0,15$	1,455 ($\pm 5,1\%$)
			3,6%		
	IRMM540 2I	2332	2,1%	$1,383 \pm 0,029$	0,536 ($\pm 3,8\%$)
			2,0%		
	CN5 2-4	579	4,2%	$1,085 \pm 0,046$	0,421 ($\pm 5,3\%$)
			3,8%		
	CN2 2-4	1304	4,1%	$1,130 \pm 0,046$	0,438 ($\pm 5,2\%$)
			4,1%		
CN2 2-4	1450	2,8%	$3,417 \pm 0,096$	1,325 ($\pm 4,3\%$)	
		2,8%			
CN2 2-4	1450	2,6%	$3,793 \pm 0,099$	1,471 ($\pm 7,9\%$)	
		2,6%			
I-26 $2,09 \times 10^{-10}$ ($\pm 6,1\%$)	CN1 1-2	687	3,8%	$2,90 \pm 0,14$	1,39 ($\pm 7,9\%$)
			5,0%		
	CN5 6	714	3,8%	$2,91 \pm 0,11$	1,39 ($\pm 7,2\%$)
			3,6%		
CN5 6	714	3,7%	$0,847 \pm 0,031$	0,405 ($\pm 7,1\%$)	
		3,4%			
CN5 6	671	3,9%	$0,796 \pm 0,031$	0,381 ($\pm 7,2\%$)	
		3,9%			
L-18 $1,804 \times 10^{-11}$ ($\pm 4,3\%$)	CN2 2-4	550	4,3%	$0,0237 \pm 0,010$	1,314 ($\pm 6,1\%$)
			4,2%		
CN2 2-4	513	4,4%	$0,2212 \pm 0,0097$	1,226 ($\pm 6,2\%$)	
		4,2%			

Tabela 4-5: Valores médios de N_U^V obtidos a partir da tabela 4-4.

<i>vidro</i>	$(N_U^V \epsilon^V)$ (10^{14} cm^{-2})	$(N_U^V \epsilon^V)^*$ (10^{14} cm^{-2})	$N_U^V \epsilon^V$ (10^{14} cm^{-2})
CN 1	1,466 ($\pm 3,0\%$)	1,447 ($\pm 2,6\%$)	1,466 ($\pm 3,0\%$)
CN 2	1,360 ($\pm 2,5\%$)	1,334 ($\pm 3,8\%$)	1,360 ($\pm 3,8\%$)
CN 5	0,4169 ($\pm 3,0\%$)	0,411 ($\pm 2,9\%$)	0,4169 ($\pm 3,0\%$)
IRMM540	—	—	0,536 ($\pm 3,8\%$)

Deve ser notado que quando se utiliza vidros padrões dopados com urânio natural ao invés de filmes finos de urânio para se determinar (N_{Th}/N_U) , a equação 9 pode ser reescrita como:

$$\left(\frac{N_{Th}}{N_U}\right) = \frac{R_U - \left(\frac{\rho_I}{\rho_I^{Cd}}\right) R_U^{Cd}}{\left(\frac{\rho_I}{\rho_I^{Cd}}\right) R_{Th}^{Cd} - R_{Th}} \quad (25)$$

CAPÍTULO 5

*Você me diz que este goleiro é titular da seleção
Isto eu vou saber
Mas é quando eu chutar*

ibid.

5 - Aplicação da dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio e de tório naturais na datação de apatitas de Durango, México.

Nesta tese foram efetuadas 6 determinações de idade e 5 da razão Th/U de apatitas padrão provenientes de Durango, México (Green, 1985). Para isto, foram efetuadas 6 irradiações (L-1 e L-19 no IPEN-Lima, Peru; I-27, I-29 e I-32 no IPEN-São Paulo e P-4 no LENA-Pavia, Itália) fora de caixas de cádmio e 2 irradiações (L-2, no IPEN, Lima e I-33 no IPEN-São Paulo) dentro de caixas de cádmio (na L-2 um porta amostra cilíndrico com 1,7 cm de diâmetro, 0,6 cm de altura e com espessura das paredes de 0,5 mm e na I-33 um porta amostras cilíndrico com 1,9 cm de diâmetro, 0,9 cm de altura e com espessura das paredes de 1,0 mm). Nestas irradiações estavam presentes filmes finos de tório, vidros dopados com urânio natural e amostras de apatitas de Durango (utilizamos 4 monocristais diferentes: C1, C2, B3 e B4). Antes da cada irradiação os monocristais foram quebrados em grãos com diâmetros entre 50 e 300 μm . Uma parcela destes grãos foi separado para se efetuar as medidas referentes aos traços fósseis e a outra parte aquecida à 450 °C durante 10 horas. As irradiações foram efetuadas nos grãos pré-aquecidos onde, devido ao tratamento térmico utilizado não estão presentes traços fósseis (Van den Haute *et al.*, 1988).

Na tabela 5-1 estão mostrados os resultados de R_{th} obtidos com o auxílio de filmes finos de tório (à partir da equação 8 onde $\epsilon^F = 1,000 \pm 0,020$ e com o auxílio das tabelas 3-8 e 3-9) para as irradiações citadas acima.

Deve ser notado que na irradiação L-1, o filme T 7 concorda com o filme T 8 e na irradiação L-2 o filme T 1 concorda com o filme T 2. Nesta tese foram utilizados os valores médios dos R_{Th} para as irradiações L-1 e L 2. Ou seja, $R_{\text{Th}} = 2,10 \times 10^{-11}$ ($\pm 4,8\%$) para a L-1 e $R_{\text{th}} = 1,702 \times 10^{-11}$ ($\pm 4,4\%$).

Tabela 5-1: Resultados referentes às medidas de R_{th} nas irradiações utilizadas para as datações das apatitas de Durango.

Irradiação	Filme	Σx_i	$\rho_P\%$ $\rho_{exp}\%$	ρ_{Th} ($10^5 cm^{-2}$)	R_{th} (10^{-12})
L-1	T7	1472	2,6%	0,873	21,2 ($\pm 7,6\%$)
	T8		3,7%		
L-2 (c/Cd)	T1	1308	2,7%	0,939	20,8 ($\pm 6,2\%$)
	T2		2,5%		
L-2 (c/Cd)	T1	1308	2,8%	1,013	17,2 ($\pm 6,0\%$)
	T2		3,0%		
I-33 (c/Cd)	Th N	1336	2,8%	6,26	14,2 ($\pm 5,9\%$)
			2,85		
I-29	T8	1348	2,7%	1,218	27,0 ($\pm 6,3\%$)
			2,6%		
I-27	Th J	925	3,3%	4,33	7,09 ($\pm 6,2\%$)
			2,7%		
P-4	Th A	1250	2,8%	2,929	6,73 ($\pm 6,2\%$)
			2,6%		
L-19	Th R	1163	2,9%	2,453	7,74 ($\pm 6,6\%$)
			2,9%		
I-32	Th E	1259	2,8%	5,90	11,2 ($\pm 5,8\%$)
			2,7%		

Na tabela 5-2 estão mostrados os resultados de R_U obtidos com o auxílio de vidros padrões dopados com urânio (à partir da equação 24 e com o auxílio da tabela 4-5) para as irradiações citadas acima.

Deve ser notado que os R_U obtidos por diferentes vidros padrões para uma mesma irradiação são concordantes entre si. Nesta tese foram utilizados os R_U médios das irradiações, mostrados na tabela 5-2 como $\overline{R_U}$.

Tabela 5-2: Resultados das medidas de R_U nas irradiações utilizadas para as datações das apatitas de Durango.

Irrad	Vidro	Σx_i	σ_P % σ_{exp} %	ρ^{V_U} (10^4cm^{-2})	ρ^{V_U} (10^5cm^{-2})	$\overline{R_U}$ 10^{-9}	R_U 10^{-9}
L-1	CN1 1-4	738	3,7% 2,6%	$3,89 \pm 0,14$	3,98 ($\pm 3,6\%$)	2,71 ($\pm 4,0\%$)	2,781 ($\pm 2,9\%$)
		770	3,6% 3,0%	$4,06 \pm 0,15$			
	CN1 1-5	532	4,3% 4,9%	$4,04 \pm 0,20$	4,19 ($\pm 3,0\%$)	2,86 ($\pm 4,2\%$)	
		570	4,2% 3,7%	$4,33 \pm 0,18$			
L-2 (c/Cd)	CN1 1-2	621	4,0% 3,6%	$0,262 \pm 0,010$	0,2530 ($\pm 2,9\%$)	0,1726 ($\pm 4,2\%$)	0,1694 ($\pm 3,0\%$)
		579	4,2% 4,4%	$0,244 \pm 0,011$			
	CN1 1-3CN1	571	4,2% 4,4%	$2,41 \pm 0,11$	0,2435 ($\pm 2,9\%$)	0,1661 ($\pm 4,2\%$)	
		583	4,1% 4,4%	$2,46 \pm 0,11$			
I-33 (c/Cd)	CN1 3-6	657	3,9% 3,4%	$0,1386 \pm 0,0054$	0,1416 ($\pm 2,7\%$)	0,0966 ($\pm 4,0\%$)	0,0966 ($\pm 4,0\%$)
		685	3,8% 2,9%	$0,1445 \pm 0,0055$			
I-29	IRMM540 II	1138	3,0% 2,8%	$3,37 \pm 0,10$	3,37 ($\pm 3,0\%$)	6,29 ($\pm 4,8\%$)	6,29 ($\pm 4,8\%$)
I-27	CN1 1-3	801	3,5% 3,4%	$2,375 \pm 0,083$	2,383 ($\pm 2,5\%$)	1,626 ($\pm 3,9\%$)	1,626 ($\pm 3,9\%$)
		806	3,5% 3,8%	$2,390 \pm 0,084$			

Continuação da tabela 5-2

Irrad.	Vidro	Σx_i	σ_P % σ_{exp} %	$\rho_{V_U}^V$ (10^4cm^{-2})	$\rho_{V_U}^V$ (10^5cm^{-2})	R_U^- 10^{-9}	R_U 10^{-9}
P- 4	CN5 2-1	727	3,7% 4,2%	$0,767 \pm 0,32$	0,767 ($\pm 2,6\%$)	1,840 ($\pm 4,0\%$)	1,840 ($\pm 4,0\%$)
		728	3,7% 3,7%	$0,767 \pm 0,28$			
L-19	CN2 2-3	747	3,7% 4,1%	$1,134 \pm 0,047$	1,124 ($\pm 2,6\%$)	0,826 ($\pm 4,6$)	0,854 ($\pm 3,1\%$)
		733	3,7% 3,7%	$1,113 \pm 0,041$			
	CN5 2-3	588	4,1% 3,2%	$0,357 \pm 0,015$	0,366 ($\pm 2,9\%$)	0,878 ($\pm 4,2\%$)	
		616	4,0% 3,7%	$0,374 \pm 0,015$			
I-32	CN2 2-1	617	4,0% 3,7%	$3,25 \pm 0,13$	3,225 ($\pm 2,8\%$)	2,37 ($\pm 4,7\%$)	2,450 ($\pm 2,6\%$)
		644	3,9% 3,6%	$3,40 \pm 0,13$			
	IRMM540 1B	1216	2,9% 2,9%	$1,282 \pm 0,037$	1,282 ($\pm 2,9\%$)	2,39 ($\pm 4,8\%$)	
	CN1 3-1	726	3,7% 3,5%	$3,83 \pm 0,14$	3,74 ($\pm 2,7\%$)	2,55 ($\pm 4,0\%$)	
		692	3,8% 3,7%	$3,65 \pm 0,14$			

Na tabela 5-3 estão mostrados os resultados referentes às medidas de densidades e comprimentos de traços induzidos, L_0 , nas amostras de apatitas de Durango que estavam presentes nas irradiações fora das caixas de cádmio. Nesta tabela estão mostradas também, o número de grãos de apatita onde foram efetuadas as medidas de densidade, N_p , o número de grãos onde foram efetuadas as medidas de comprimento, N_L , e o desvio padrão da distribuição de comprimento de traços, S . Todas as medidas de comprimento de traços presentes nesta tabela se referem a traços confinados paralelos à superfície de observação. Estes traços se encontram totalmente dentro de mineral, frequentemente localizados embaixo de algum traço que chega até a superfície de observação ou atravessando fraturas naturais da rede cristalina, o que faz possível que o ataque químico chegue até eles.

Tabela 5-3: Resultados das medidas efetuadas nas amostras irradiadas fora de caixas de cádmio.

Irrad	Cristal	N_p	Σx_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ_I (10^{-3} cm^{-2})	N_{L_0}	S (μm)	L_0 (μm)
L-1	C1	43	566	4,2% 3,8%	1,624	25	0,94	16,18 ($\pm 1,3\%$)
I-29	B4	50	1656	2,5% 2,7%	4,53	25	0,87	16,26 ($\pm 1,0\%$)
I-27	C2	40	720	3,7% 3,8%	1,595	26	0,79	15,92 ($\pm 1,0\%$)
P-4	C2	40	740	3,7% 4,0%	1,639	26	0,97	16,45 ($\pm 1,2\%$)
L-19	C2	47	500	4,5% 6,2%	0,886	26	0,80	16,25 ($\pm 1,0\%$)
I-32	B3	30	774	3,6% 3,7%	2,286	25	0,97	16,17 ($\pm 1,2\%$)

As medidas de comprimento e densidade de traços nas apatitas foram feitas em um

microscópio DIALUX 20 EB da Leitz/Wetzlar no aumento nominal 12,5 x 100 a óleo, com o auxílio de uma régua e um retículo (calibrados), respectivamente, que estavam acoplados à ocular do microscópio.

No caso das medidas de comprimento foi medido apenas um traço por grão e no caso das densidades se mediu até 3 campos por grão.

Na tabela 5-4 estão mostrados os resultados referentes às medidas de densidades e comprimentos de traços fósseis que serão utilizadas (junto com seus respectivos pares mostrados na tabela 5-3) para se obter as idades das amostras estudadas nesta tese. No caso desta tabela valem todos os comentários referentes à tabela 5-3.

Tabela 5-4: Resultados das medidas referentes aos traços fósseis das apatitas de Durango.

Cristal (p/ irrad)	N_{p_s}	Σ x_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ_s (10⁵ cm⁻²)	N_{L_s}	S (μm)	L_s (μm)
C1 (p/ L-1)	44	678	3,8% 3,9%	1,168	24	0,75	14,81 (±1,2%)
B4 (p/ I-29)	90	1342	2,7% 2,8%	1,580	25	0,90	14,47 (±1,2%)
C2 (p/ I-27)	35	728	3,7% 4,6%	1,843	26	0,85	14,33 (±1,2%)
C2 (p/ P-4)	40	710	3,8% 5,0%	1,573	25	0,96	14,38 (±1,3%)
C2 (p/ L-19)	40	725	3,7% 4,0%	1,606	25	1,48	13,90 (±2,2%)
B3 (p/ I-32)	40	845	3,4% 3,8%	1,872	25	0,96	14,44 (±1,3%)

Na tabela 5-5 estão mostrados os resultados referentes às medidas de densidade de traços nas amostras que foram irradiadas dentro das caixas de cádmio. No caso destas medidas, foram considerados até 7 campos por grão.

Deve ser notado que nesta tabela não consta o cristal C2 a ser utilizado conjuntamente com aquele irradiado na I-29 para se obter a razão Th/U e a idade. No caso desta irradiação a razão Th/U será tomada como a média das duas determinações para este cristal (via irradiações I-27 e P-4).

Tabela 5-5: Resultados das medidas efetuadas nas amostras irradiadas dentro de caixas de cádmio.

Irradiação	Cristal	N_{P1}^{Cd}	Σx_i	$\rho_P\%$ $\rho_{exp}\%$	ρ_1^{Cd} ($10^4 cm^{-2}$)
L-2	C1			4,7%	
	(P/L-1)	78	448	4,9%	2.92
I-33	B4			3,9%	
	(P/I-29)	237	654	4,7%	3.21
	C2-1			4,0%	
	(P/I-27)	130	627	4,4%	4.27
	C2-3			4,0%	
	(P/P-4)	130	631	3,9%	4.3
	B3			3,8%	
	(P/I-32)	130	712	4,2%	4.86

Na tabela 5-6 estão mostrados os resultados das medidas referentes às razões Th/U, às idades das amostras estudadas neste trabalho e à influência das fissões do tório em R_M (quantificada a partir do valor de $(N_{Th}/N_U) R_{th}/R_M$) para a apatita de Durango nas posições de irradiação utilizadas. Também estão mostradas as razões cádmio para Au para estas posições, $R_{Cd}(Au)$, que foram fornecidas pelo Dr. Agustín Zúñiga no caso das irradiações feitas no Peru, pela Dra. Marina Koskinas nas irradiações feitas no Brasil e pelo Dr. Maximo Oddone na irradiação feita na Itália.

Tabela 5-6: Resultados das medidas referentes à razão tório - urânio (N_{Th}/N_U), influência das fissões do tório em R_M (quantificada a partir dos valores de K/R_M mostrados na tabela, neste caso $K = (N_{Th}/N_U)R_{Th}$) e das medidas da idade aparente, T_{ap} , e corrigida, T_{COR} para as amostras das apatitas de Durango estudadas neste trabalho.

Irrad ($R_{cd}(AU)$)	Irrad Cd ($R_{cd}(AU)$)	crystal	R_u (10^{-9})	R_u^{Ca} (10^{-9})	R_{Th}	R_{Th}^{Ca}	ρ_f/ρ_i^{Ca}	N_{th}/N_U	R_M (10^{-9})	K/R_M	ρ_s/ρ_i	L_S/L_I	T_{AP} (Ma)	T_{COR} (Ma)
I-1 (3)	I-2 (2)	C1	2,781 (±2,9%)	0,1694 (±3,0%)	2,10 (±4,8%)	1,702 (±4,4%)	5,56 (±6,5%)	25,0 (±14,5%)	3,31 (±4,8%)	0,159 (±15,6%)	0,719 (±5,7%)	0,915 (±1,8%)	28,7 (±8,0%)	31,4 (±9,0%)
I-29 4,5	I-33 (4,5)	B4	6,29 (±4,8%)	0,0966 (±4,0%)	2,70 (±6,3%)	1,42 (±5,9%)	14,11 (±5,4%)	28,4 (±12,9%)	7,06 (±5,8%)	0,109 (±15,3%)	0,349 (±3,9%)	0,890 (±1,6%)	29,7 (±7,6%)	33,4 (±8,6%) ¹
I-27 4,5	I-33 (4,5)	C2	1,626 (±3,9%)	0,0966 (±4,0%)	0,709 (±6,2%)	1,42 (±5,9%)	3,74 (±5,8%)	27,5 (±12,6%)	1,821 (±5,0%)	0,107 (±14,9%)	1,155 (±6,0%)	0,900 (±1,6%)	25,4 (±8,3%)	28,2 (±9,2%)
P-4 (6,5)	I-33 (4,5)	C2	1,840 (±4,0%)	0,0966 (±4,0%)	0,673 (±6,2%)	1,42 (±5,9%)	3,81 (±5,7%)	31,1 (±12,3%)	2,05 (±5,0%)	0,102 (±14,5%)	0,960 (±6,4%)	0,874 (±1,8%)	23,7 (±8,7%)	27,1 (±9,5%)
L-19 (3)		C2	0,854 (±3,1%)		0,674 (±6,6%)			29,3 (±8,5%)	1,051 (±4,5%)	0,188 (±11,7%)	1,81 (±7,4%)	0,855 (±2,4%)	22,9 (±9,1%)	26,8 ±10,1%
I-32 (4,5)	I-33 (4,5)	B3	2,450 (±2,6%)	0,0966 (±4,0%)	1,12 (±5,8%)	1,42 (±5,9%)	4,70 (±5,6%)	35,9 (±12,0%)	2,85 (±4,1%)	0,141 (±13,9%)	0,819 (±5,3%)	0,893 (±1,8%)	28,2 (±7,3%)	31,6 (±8,4%)

As posições de irradiação utilizadas foram: D34Y (irradiações L-1 e L-19) e H64Y (irradiação L-2) no IPEN-Lima; Estação 4 (irradiações I-27, I-29, I-32 e I-33) no IPEN-São Paulo; e Lazy Susan (Irradiação P-4) no LENA-Pavia.

Os procedimentos relacionados com a montagem e o ataque químico (HNO_3 6,5% à 20 °C por 50s) o polimento das amostras de apatitas estudadas nesta tese estão descritos em Tello (1998).

Todos os erros das medidas mostrados nas tabelas desta tese foram obtidos utilizando-se teoria de propagação de erro (Bevington, 1969).

O valor médio da razão Th/U (cada valor foi obtido a partir da equação 25) para os monocristais estudados neste trabalho foi $(N_{\text{Th}}/N_{\text{U}}) = (29,9 \pm 1,7)$ que está relativamente próximo ao valor de ~ 25 encontrado por Hurley e Fairbairn (1957) e é bem superior ao valor 18 encontrado por Young *et al.* (1969) para amostras de apatitas de Durango.

No caso de nossas medidas de $N_{\text{Th}}/N_{\text{U}}$, $\chi^2 = 4,64$ para quatro graus de liberdade, o que implica em $P \chi \sim 0.35$. (Neste caso, o valor mostrado para a irradiação L-19 não foi levado em conta já que, como dissemos anteriormente, ele é a média dos valores referentes às irradiações I-27 e P-4). Ou seja, nossos resultados não indicam que os monocristais estudados possuem diferentes razões Th/U.

Os valores de $(N_{\text{Th}}/N_{\text{U}})R_{\text{Th}}/R_{\text{M}}$ que se encontram na tabela 5-6 nos mostram que a influência das fissões do tório em R_{M} é bastante significativa para a apatita de Durango nas posições de irradiação utilizadas neste trabalho. Por exemplo, no caso da irradiação L-19, efetuada em uma posição de irradiação com $R_{\text{cd}}(\text{Au}) = 3$, o valor de $(N_{\text{Th}}/N_{\text{U}})R_{\text{Th}}/R_{\text{a}}$ é $(18,8 \pm 2,2)\%$ e mesmo no caso em que a posição de irradiação é relativamente bem termalizada (irradiação P-4 na posição Lazy Susan com $R_{\text{cd}}(\text{Au}) = 6,5$) este valor é de $(10,2 \pm 1,5)\%$.

As idades aparentes T_{ap} e corrigidas T_{corr} mostradas na tabela 5-6 foram obtidas utilizando-se as equações 1 e 2 com: $\lambda = 1,55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ (Lederer e Shirley, 1978), $C_{238} = 0,99275$ (Lederer e Shirley, 1978) e $\lambda_F = (8,35 \pm 0,24) \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$ (Guedes *et al.*, 1999).

Este valor de λ_F foi obtido pelo nosso grupo (dentro da tese de doutorado de Sandro Guedes de Oliveira, que está em andamento) a partir de 5 determinações efetuadas utilizando-se filmes finos de urânio natural como dosímetros de neutrons.

No caso da idade aparente, T_{ap} , ϵ^{238}/ϵ (este termo aparece quando se divide a equação 1 pela equação 2 para se obter a idade do mineral) foi tomado como sendo 1. A média pesada dos resultados de T_{ap} apresentada na tabela 5-6 é $T_{ap} = (26,71 \pm 0,88) \text{ Ma}$. No caso destas medidas, $\chi^2 = 9,0$ para 5 graus de liberdade, o que implica em $P\chi \sim 0,10$. Ou seja, também neste caso nossos resultados não indicam que os monocristais estudados possuem diferentes T_{ap} , que refletiriam diferentes histórias térmicas geológicas.

No caso da idade corrida T_{cor} , utilizamos o seguinte valor de ϵ^{238}/ϵ :

$$(\epsilon^{238}/\epsilon) = (1,000 \pm 0,037). (L_s/L_A)$$

Este valor foi obtido a partir de dois aquecimentos efetuados no monocristal B4 da irradiação I-29. Estes aquecimentos, mostrados na tabela 5-7, foram efetuados para provocar o encurtamento dos traços de fissão (os tempos e as temperaturas foram estimados a partir de resultados apresentados em Tello (1998)).

Com os resultados contidos na tabela 5-7 vemos que (ρ/ρ_0) é diretamente proporcional à (L/L_0) , com constante de proporcionalidade igual à 1 dentro de 3,7% de erro (que é o erro da média entre 1,010 ($\pm 4,7\%$) no aquecimento à 240 °C e 0,986 ($\pm 5,9\%$) no aquecimento à 270°C), na faixa onde se encontram os (L_s/L_A) da apatita de Durango (ver tabela 5-6).

Tabela 5-7: Resultados referentes a obtenção de ϵ^{238}/ϵ , necessário para efetuarmos a correção das idades.

Temperatura 1h de aquecimento	N_p	Σx_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ (10^5 cm^{-2})	N_L	S (μm)	L (μm)	L/L0	ρ/ρ_0
—	50	1656	2,5% 2,7%	4,53	25	0,87	16,26 ($\pm 1,0\%$)	1,000	1,000
240°C	19	863	3,4% 3,2%	4,02	24	1,12	14,28 ($\pm 1,6\%$)	0,878 ($\pm 1,9\%$)	0,887 ($\pm 4,3\%$)
270°C	18	759	3,6% 5,0%	3,74	24	0,89	13,61 ($\pm 1,3\%$)	0,837 ($\pm 1,6\%$)	0,825 ($\pm 5,7\%$)

O valor médio das idades corrigidas obtidas neste trabalho foi de $(30,0 \pm 1,1)\text{Ma}$, que é compatível com o valor de $(31,4 \pm 0,5)\text{Ma}$ indicado por Green (1985) como a idade média dos depósitos da apatita de Durango (a idade indicada por Green foi obtida a partir de outros métodos de datação que não o MTF). No caso de nossas medidas de T_{cor} , $\chi^2 = 5,1$ para 5 graus de liberdade, o que implica em $P \chi \sim 0,40$. Ou seja, as idades corrigidas são compatíveis entre si.

Além das determinações de idades corrigidas mostradas na tabela 5-6 (que foram efetuadas baseando-se na correção por comprimento de traços proposta por Bigazzi (1967) e apresentada por Green (1988) para apatitas) nesta tese nós efetuamos uma tentativa de determinação de T_{cor} utilizando-se o método do Plateau (Storzer e Poupeau, 1973). Este método se baseia no fato de que os traços que já sofreram annealing são mais resistentes à tratamentos térmicos que traços que não sofreram annealing. Ou seja, se submetemos amostras fósseis e induzidas a tratamentos térmicos cada vez mais fortes, chegaremos em uma região de plateau onde $(\epsilon^{238}/\epsilon) = 1$ e teremos então corrigido a idade da amostra em questão.

Na tabela 5-8 estão mostrados os resultados de 2 aquecimentos de 1 hora (à 290 °C e 340 °C) em que estavam presentes amostras da apatita de Durango (B4) fósseis e induzidas (irradiação I-29).

Tabela 5-8: Resultados das idades obtidas utilizando-se o Método do Plateau.

Temper. lh aquec.	N_{p_s}	Σx_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ_s (10^5cm^{-2})	N_{p_i}	Σx_i	σ_p % σ_{exp} %	ρ_i (10^5cm^{-2})	ρ_s/ρ_i	T (Ma)
	90	1342	2,7% 2,8%	1,580	50	1656	2,5% 2,7%	4,53	0,349 $\pm 3,9\%$	29,7 $\pm 7,6\%$
290°C	40	620	4,0% 4,0%	1,373	19	634	4,6% 4,2%	2,96	0,464 $\pm 5,8\%$	39,5 $\pm 8,7\%$
340°C	78	717	3,7% 4,5%	0,814	100	343	5,4% 10,0 %	0,304	2,68 $\pm 11 \%$	228 $\pm 12,8\%$

Nesta tabela vemos que já no aquecimento à 290 °C a idade da apatita de Durango, ($39,5 \pm 3,4$)Ma, é estatisticamente superior à indicada por Green (1985), ($31,4 \pm 0,5$)Ma, e que no aquecimento à 340 °C esta idade “estoura” (vai para (228 ± 29)Ma).

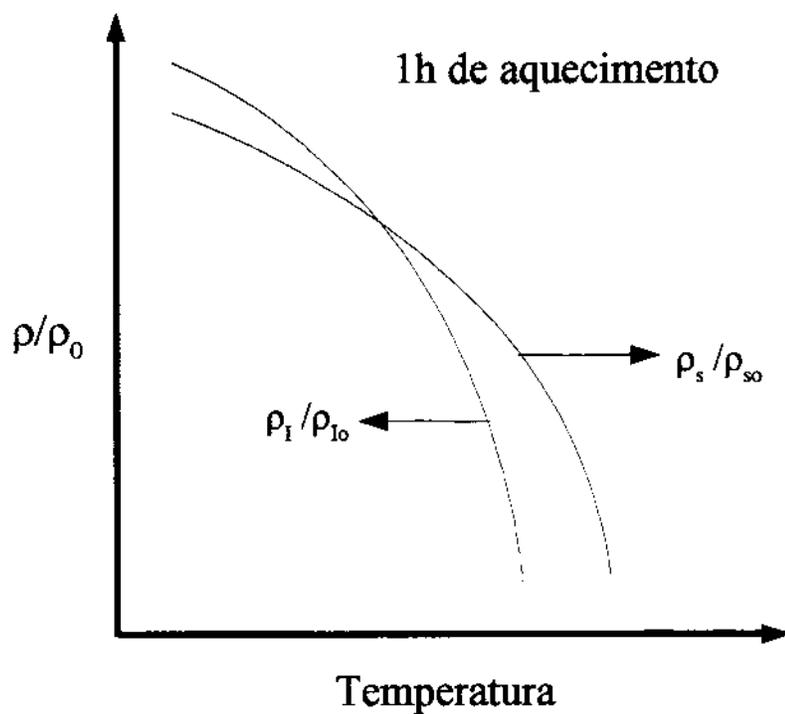
Este resultado mostra que o Método do Plateau não é adequado para se corrigir a idade desta amostra. Uma possível explicação para este fato é que a curva de redução da densidade dos traços fósseis com o tratamento térmico, tem uma inclinação menor que a curva de redução da densidade dos traços induzidos, como por exemplo a ilustrada na figura 5-1 (onde os ρ se referem a amostras aquecidas e os ρ_0 a amostras não aquecidas).

Ou seja a idade corrigida só seria obtida em um determinado ponto, que em princípio não conhecemos.

O efeito ilustrado na figura 5-1 pode estar relacionado com o fato de que as amostras irradiadas foram submetidas a um tratamento térmico prévio para apagar os traços fósseis. Este

tratamento térmico estaria modificando a rede cristalina e os traços de fissão induzida neste caso ficariam menos estáveis do que traços de fissão induzida em amostras que não foram submetidas a tratamentos térmicos.

Figura 5-1



CAPÍTULO 6

*Mesmo que eu mande em garrafas mensagens por todo o mar
Meu coração tropical partirá este gelo e irá
Como as garrafas de naufragos e as rosas partindo o ar
Nova Granada de Espanha e as rosas partindo o ar*

Trecho da música “Corsário” de João Bosco e Aldir Blanc,
cantada por João Bosco.

6 - Comparação entre a dosimetria de neutrons baseada em filmes finos de urânio natural e uma dosimetria de neutrons baseada em ativação metálica.

Neste trabalho nós efetuamos uma comparação entre a dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio natural e a dosimetria proposta pelo grupo belga (De Corte *et al.*, 1998) que é baseada na ativação neutrônica do ^{197}Au e do ^{59}Co .

O kit de dosímetros belgas (IRMM-540) consta de dois vidros padrões (dopados com urânio natural) que não foram irradiados, um vidro que foi irradiado em uma irradiação de calibração e uma mica muscovita que estava justaposta ao vidro padrão durante a irradiação de calibração. Esta irradiação de calibração foi efetuada em uma posição (canal 8 do reator THETIS da universidade de Gent, Belgica) onde as fissões do ^{235}U por neutrons epitérmicos são menores que 1% e a razão entre o fluxo de neutrons térmicos e rápidos é 120 (De Corte *et al.*, 1998). Assim, R_U pode ser escrito como no caso da equação 6:

$$R_U = C_{235} \phi_0 \sigma_0 g_{235} \quad (26)$$

onde $\sigma_0 = (586 \pm 3)$ barn (Holden and Holden, 1985); $C_{235} = 0,00720$ (Lederer and Shirley, 1978) e $g_{235} = 0,976$ (Westcott, 1960).

O grupo belga (De Corte *et al.*, 1998) fornece o ϕ_0 da irradiação de calibração obtida com ativação neutrônica do ^{197}Au e do ^{59}Co :

$$\phi_0 = (1,070 \pm 0,011) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}.$$

Assim, a partir das equações 26 e 24, $N_U^V \epsilon^V$ pode ser obtido medindo-se ρ_U^V nas micas que acompanha os kits (depois delas terem sido submetidas ao ataque químico padrão). No nosso caso, utilizamos micas de dois kits e os resultados referentes às medidas de $N_U^V \epsilon^V$ do IRMM-540 obtidos com o auxílio de ativação neutrônica estão mostrados na tabela 6-1. Nesta tabela

assumimos um erro de 0,5% em C_{235} e não consideramos erro em g_{235} .

Tabela 6-1: Calibração do IRMM-540 a partir de Au e Co.

<i>Kit</i>	Σx_i	$\sigma_P \%$ $\sigma_{exp} \%$	ρ^{U_V} (10^5 cm^{-2})	$(N^V_U \epsilon^V)_{Au+Co}$ (10^{13} cm^{-2})
1	2083	2,2% 2,1%	2,184	4,96 ($\pm 2,5\%$)
2	1333	2,7% 2,3%	2,065	4,69 ($\pm 3,0\%$)

O valor médio de $(N^V_U \epsilon^V)_{Au+Co}$ que usaremos nesta tese é de $4,849 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ($\pm 1,9 \%$).

A comparação entre a nossa dosimetria e a do grupo belga foi efetuada em duas irradiações (I-31 e I-32) e os resultados estão mostrados na tabela 6-2. No caso da irradiação I-31, o R_U obtido baseando-se na dosimetria com filmes finos de urânio, R_U (ffu), foi medido diretamente com filmes finos (ver tabela 4-5) e no caso da I-32, R_U foi medido com vidros padrões calibrados via filmes finos de urânio natural (ver tabela 5-2). Os R_U obtidos baseando-se na ativação neutrônica do ^{197}Au e do ^{59}Co , R_U (Au + Co), foram determinados a partir da equação 24 utilizando-se o $(N^V_U \epsilon^V)_{Au+Co}$ médio, citado acima e os valores de ρ^{U_V} dos IRMM-540 presentes na irradiações I-31 e I-32 (ver tabela 4-4 e 5-2, respectivamente).

Tabela 6-2: Comparação entre a dosimetria de neutrons baseada em filmes finos de urânio natural e a dosimetria proposta pelo grupo belga.

Irrad	R_U (ffu) (10^{-10})	R_U (Au + Co) (10^{-10})	$\frac{R_U(Au + Co)}{R_U(ffu)}$
I-31	2,578 (3,2%)	2,852 (2,9%)	1,106 (±4,3%)
I-32	2,450 (2,6%)	2,643 (3,5%)	1,079 (±4,3%)

O valor médio da razão $R_U(Au + Co)/R_U(ffu)$ é de $(1,093 \pm 0,033)$. O que indica que os R_U obtidos via a calibração belga são significativamente maiores que aqueles obtidos via a nossa calibração. Porém, deve ser notado que utilizamos apenas duas irradiações para esta comparação.

Como dissemos anteriormente nosso grupo efetuou determinações de λ_F utilizando-se filmes finos de urânio natural (Guedes *et al.*, 1999) que resultaram em $(8,35 \pm 0,24) \times 10^{-17} a^{-1}$, valor compatível com o indicado por Holden (1989) para esta constante $(8,45 \pm 0,10) \times 10^{-17} a^{-1}$.

Nesta tese, nós submetemos a uma mesma irradiação com neutrons (irradiação L-22) um dos filmes utilizados na determinação de λ_F citada acima (filme S-2) e um filme utilizado como calibrador de vidros padrões dopados com urânio. Os resultados referentes às determinações de R_U para esta irradiação estão mostrados na tabela 6-3. Nesta tabela vemos que as determinações de R_U pelos dois filmes são concordantes.

Tabela 6-3: Comparação entre um filme utilizado nesta tese e outro utilizado na determinação de λ_F .

Filme	Σx_i	$\sigma_p\%$ $\sigma_{exp}\%$	ρ^F (10^4cm^{-2})	R_U^F (10^{-12})
XXVIII-2	1866	2,3%	1,565	6,46
		2,5%	($\pm 2,5\%$)	($\pm 4,6\%$)
S2-2	1821	2,3%	38,15	6,40
		2,4%	($\pm 2,4\%$)	($\pm 3,9\%$)

Há que ser mencionado que o grupo belga efetuou datações da apatita de Durango no final da década de 80 (Van den haute *et al.*, 1988), utilizando ^{197}Au e ^{59}Co como dosímetros de neutrons (na mesma posição de irradiação utilizada para a calibração do IRMM-540) e o valor de $\lambda_F = 8,46 \times 10^{-17} \text{a}^{-1}$ (Galliker *et al.*, 1970). A idade obtida por eles foi de $(31,3 \pm 0,8) \text{Ma}$. Deve ser notado, que esta foi uma determinação de idade aparente, T_{AP} , e que as fissões do tório na posição utilizada por eles pode, provavelmente, ser negligenciada.

Outro fato que também deve ser mencionado é que já havíamos anteriormente comparado diretamente filmes finos de urânio natural com monitores baseados em ativação metálica e os resultados foram concordantes entre si (Bigazzi *et al.*, 1990a; Bigazzi *et al.*, 1990b; Bigazzi *et al.*, 1995d).

CAPÍTULO 7

*Seu tempero me deixa bolado
É um mel misturado com dendê
No seu colo eu me embalo
Eu me embolo, até numa casinha de sapê
Como é lindo o bailado debaixo dessa sua saia godê
Quando roda no bamba-querer
Fazendo fuzuê*

*Minha deusa, esse seu encanto
Parece que vem do Ilê
Ou será de um jogo de jongo
Que fica no Colubandê
Eu só sei que o som do batuque
É um truque do seu balancê
Preta, cola comigo porque
Tô amando você*

Trecho da música “Seu Balancê” de Toninho Geraes e Paulinho Resende, cantada por Zeca Pagodinho.

7- Conclusões

A dosimetria de neutrons proposta nesta tese se mostrou bastante apropriada para a datação de minerais com o MTF. Ela permite a utilização do MTF como uma calibração absoluta, mesmo quando se utiliza para a datação, posições de irradiação com baixa termalização dos neutrons. Além disto, ela permite também, a determinação da razão Th/U do mineral a ser datado.

As amostras analisadas, apatitas de Durango, México, que são frequentemente utilizadas para se efetuar a Calibração Zeta proposta por Hurford e Green (1983), possuem uma razão Th/U relativamente alta, o que faz com que a influência das fissões do tório em R_M seja bastante significativa mesmo em posições de irradiação com termalização relativamente boa.

O valor médio da razão Th/U para a apatita de Durango obtido neste trabalho ($29,9 \pm 1,7$) está relativamente próximo de um dos dois únicos valores que conhecemos da literatura (~ 25 de Hurley e Fairbairn (1957) e 18 de Young *et al.* (1969)).

No caso das nossas amostras da apatita de Durango a influência das fissões do tório em R_M ($(N_{Th}/N_U)R_{Th}/R_M$) foi da ordem de 18% na posição D34Y do reator do IPEN-Lima, Peru com $R_{cd}(Au) = 3$, da ordem de 12% na Estação 4 do reator do IPEN/CNEN-São Paulo com $R_{cd}(Au) = 4,5$ e da ordem de 10% na posição Lazy Susan do reator do LENA-Pavia, Itália com $R_{cd}(Au) = 6,5$.

A idade aparente média que obtivemos para nossas amostras foi de $(26,71 \pm 0,88)Ma$ que é significativamente inferior à $(31,4 \pm 0,5)Ma$, que é o valor indicado por Green (1985). Além disto, as medidas de L_s/L_t mostram que a idade destas amostras devem ser corrigidas, como foi sugerido por Green, 1988.

O valor médio das idades corrigidas (obtidas baseando-se na correção por comprimento de traços proposta por Bigazzi (1967)) que obtivemos, $(30,0 \pm 1,1)Ma$, é compatível com a média

dos valores obtidos a partir de outros métodos de datação e sugerida por Green (1985) como a idade dos depósitos da Durango.

Nós mostramos também nesta tese, que o Método do Plateau (Storzer e Poupeau, 1973) não é adequado para corrigir a idade da apatita de Durango. Este resultado talvez possa ser estendido para as apatitas de um modo geral.

Ao comparar a dosimetria através de filmes finos de urânio com aquela proposta pelo grupo belga (De Corte *et al.*, 1998) nós obtivemos que esta última fornece resultado ($1,093 \pm 0,033$) superior ao nosso.

*Nas mandingas que a gente não vê
Mil coisas que a gente não crê
Valei-me, meu pai, atotô, Obaluaê
Obaluaê*

Trecho da música “Minha Fé” de Murilão, cantada por Zeca Pagodinho.

Referências

- 1) Bajo, C. (1979). Thorium and uranium determinations in rock solutions by the induced fission track method. *Nuclear Tracks*, **3**, 101-108.
- 2) Bevington, P. R. (1969). *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. Mc Graw - Hill, Inc., New York
- 3) Bigazzi, G. (1967). Length of fission tracks and age of muscovite samples. *Earth and Planetary Science Letters*, **3**, 434 - 438.
- 4) Bigazzi, G. (1981). The problem of the decay constant of U^{238} . *Nuclear Tracks*, **51**, 35-44.
- 5) Bigazzi, G., J.C.Hadler Neto, P.J.Iunes e M.Oddone (1990a). *Intercalibrazione di dosimetri per la misura del flusso neutronico termico applicata alle tracce di fissione*. Rapporto interno IGGI \ CNR ,No.3/1990, Pisa, Itália, 84 pp.
- 6) Bigazzi, G., J.C.Hadler, P.J.Iunes, M.Oddone, S.R.Paulo e G.Poupeau (1990b). On neutron dosimetry: comparison between different dosimetries; preliminary results. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **17**, 217-221.
- 7) Bigazzi, G., J.C.Hadler, P.J.Iunes e A.M.Osorio A. (1991a). Fission track D_S / D_I measurement in artificial glass at conditions free from fading and radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **53** , 67-70.
- 8) Bigazzi, G., J.C.Hadler N., P.J.Iunes e A.M.Osorio A. (1991b). Muscovite SSNTD: Detection efficiency for fission fragments. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **19** , 451-452.
- 9) Bigazzi, G., J.C.Hadler N., P.J.Iunes e S.R. Paulo (1993). Mineral dating by Fission Track Method: Neutron dosimetry by thin film of natural uranium. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, **8** , 13-23.
- 10) Bigazzi, G., J.C.Hadler N., P.J.Iunes, T.C.W.P.Mello, L.M.S.Navia, S.R. Paulo e A.R.Zuniga G. (1995a). Employment of thin thorium films in fission track neutron dosimetry. *Brazilian Journal of Physics*, **25** ,246-251.
- 11) Bigazzi, G., J.C.Hadler N., P.J.Iunes, M.Oddone, S.R.Paulo e A.Zúñiga G. (1995b). Absolute thermal neutron fluence determination by thin film of natural uranium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* , **352** ,588-591.
- 12) Bigazzi, G., J.C.Hadler N., P.J.Iunes, M.C.Khourri, L.M.S.Navia, A.M.Osorio A., S.R.Paulo e A.Zúñiga G. (1995c). Problems related to the employment of thin uranium films as neutron dosimeters. *Radiation Measurements*, **25** , 459-460.
- 13) Bigazzi, G., J.C.Hadler Neto, P.J.Iunes, S.Meloni e M.Oddone (1995d). Characterization of two irradiation positions for fission track dating at the LENA Triga Mark II reactor. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters* , **201** , 481-493.

- 14) G. Bigazzi, O.S. Guedes, J.C. Hadler N., P.J. Iunes, M. Oddone, A.M. Osorio A., S.R. Paulo e A. Zúñiga G. (1999). Potentialities and practical limitations of an absolute neutron dosimetry using thin films of uranium and thorium applied to the fission track method. *Radiation Measurements*, **31**, 651-656.
- 15) Crowley, K.D. (1986). Neutron dosimetry in fission track analysis. *Nuclear Tracks*, **111**, 237-243.
- 16) De Corte, F., F. Bellemans, P. Van den haute, C. Ingelbrecht e C. Nicholl (1998). *A new U doped glass certified by the european commission for the calibration of fission-track dating*. *Advances in Fission-Track Geochronology*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp 67-78.
- 17) Galliker, D., E. Hugentobler e B. Hahn (1970). Spontane Kernspaltung von ^{238}U und ^{241}Am . *Helv. Phys. Acta*, **43**, 593-606.
- 18) Green, P. F. (1985). Comparison of zeta calibration baselines for fission track dating of apatite, zircon and sphene. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, **58**, 1-22.
- 19) Green, P. F. (1988). The relationship between track shortening and fission track age reduction in apatite: Combined influence of inherent instability, annealing anisotropy, length bias and system calibration. *Earth and Planetary Science Letters*, **89**, 335-352.
- 20) Green, P. F. e A. J. Hurford (1984). Thermal neutron dosimetry for fission track dating. *Nuclear Tracks*, **9**, 331-341.
- 21) Guedes O., S., J.C. Hadler N., P.J. Iunes, S.R. Paulo e A. Zúñiga G. (1999). Measurement of the spontaneous fission decay constant of ^{238}U using thin film of natural uranium as neutron dosimeter. Trabalho apresentado na *19th International Conference on Nuclear Tracks in Solids*, Besançon, França, 31/08 à 04/09/1998 e submetido para publicação no *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters*.
- 22) Hadler, J.C. (1982). *Medida da constante de desintegração do U-238 por fissão espontânea*. Tese de doutorado defendida na Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, Brasil, 74 pp.
- 23) Hadler N., J.C., P.J. Iunes, M.T.F.C. Khouri, A.M. Osorio A., S.R. Paulo and C.A. Tello S. (1993). On the use of natural uranium thin film dosimetry in mineral dating by the fission track method. *3rd. International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro (Brazil), 7-11 Nov. 1993. Expanded abstracts, Vol. 2, 839-844.
- 24) Hadler N., J.C., P.J. Iunes, T.C.W.P. Mello, L.M.S. Navia and S.R. Paulo (1996). On the nuclear emulsion detection efficiency for alpha particles and fission fragments. *Radiation Measurements*, **26**, 169-171.
- 25) Holden, N. E. (1989). Total and spontaneous fission half-lives for uranium, plutonium, americium and curium nuclides. *Pure and Applied Chemistry*, **61**, 1483-1504.

- 26) Holden, N. E. e K. A. Holden (1985). *Reexamination of 2200 meter/second cross section experiments for neutron capture and fission standards*. Rep. BNL-NCS-36865 presented at 33rd IUPAC (Int. Union Pure Appl. Chem.) Gen. Assem., Lyon, Sept. 1985, 5pp.
- 27) Hurford, A. J. (1990a). International Union of Geological Sciences Subcommittee on Geochronology recommendation for the standardization of fission track dating calibration and data reporting. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **17**, 233-236.
- 28) Hurford, A. J. (1990b). Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. Subcommittee on Geochronology. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, **80**, 171-178.
- 29) Hurford, A. J. (1998). *Zeta: The ultimate solution or just an interim measure?* Advances in Fission-Track Geochronology, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp 19-32.
- 30) Hurford, A. J. e P. F. Green (1983). The zeta age calibration of fission track dating. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, **1**, 285-317.
- 31) Hurley, P. M. e H. W. Fairbairn (1957). Abundance and distribution of uranium and thorium in zircon, sphene, apatite, epidote, and monazite in granitic rocks. *Trans. Am. Geophys. Union*, **38**, 939-944.
- 32) Iunes, P. J. (1990). *Datação com o método de traços de fissão: Estudo da dosimetria de neutrons com filmes finos de urânio natural*. Tese de mestrado defendida na Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, Brazil, 71 pp.
- 33) Lederer, C.M. e V. S. Shirley.(1978). *Table of Isotopes, Seventh edition*. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA. 1523 pp.
- 34) Price, P.B e R. M. Walker (1963). Fossil tracks of charged particles in mica and the age of the minerals. *Journal of Geophysics Research*, **68**, 4847-4862.
- 35) Senftle, F. E., T. A. Farley e L. R. Stieff (1954). A theoretical study of alpha star populations in loaded nuclear emulsions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **6**, 197- 207
- 36) Storzer, D., e G. A. Wagner (1969). Correction of thermally lowered fission tracks ages of tektites. *Earth and Planetary Science Letters*, **5**, 463-468.
- 37) Storzer, D., e G. Poupeau (1973). Ages-plateaux de minéraux et verres par la méthode des traços de fissão, *Comp. Rend, Acad. Sci. Paris*, **276 D**, 137-139.
- 38) Tagami, T. e S.Nishimura (1989). Intercalibration of thermal neutron dosimeters glasses NBS-SRM612 and Corning 1 in some irradiation facilities: a comparison. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **161**, 11-14.
- 39) Tello S., C.A. (1998) *Estudo do annealing de traços de fissão em apatitas, tanto em seções basais como em seções sem orientação preferencial, a partir do comprimento e da densidade de traços de fissão*. Tese de doutorado defendida na Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, Brasil., 93 pp.

- 40) Thiel, K. e W. Herr (1976). The ^{238}U spontaneous fission decay constant redetermined by fission tracks. *Earth and Planetary Science Letters*, **30**, 50-56.
- 41) Van den haute, P., R. Jonckheere e F. De Corte (1988). Thermal neutron dosimetry for fission track dating with metal activation monitors: A reinvestigation. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, **731**, 233-244.
- 42) Westcott, C.H. (1960). *Effective cross-section values for well-moderated thermal reactor spectra*. Atomic Energy of Canada Limited, (3rd edition corrected). AECL report 1101.
- 43) Young E. J., A. T. Myers, E. L. Munson e N. M. Conklin (1969). *Mineralogy and gechemistry of fluorapatite from Cerro de Mercado, Durango, Mexico*. U. S. G. S. Prof. Papers 650, D84.