



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

DETECÇÃO DE NÊUTRONS UTILIZANDO CR-39

MEIRE DE CÁSSIA PADILHA

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Tecnologia Nuclear.

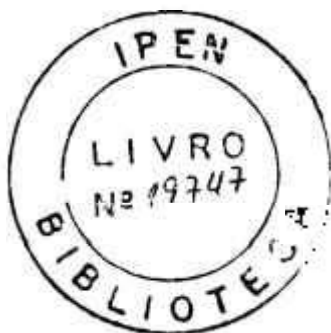
Orientador:
Dra. Marília T. F. Cesar Khouri

São Paulo
1992

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGETICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DETECÇÃO DE NÉUTRONS UTILIZANDO CR-39

MEIRE DE CÁSSIA PADILHA



Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de "Mestre em Tecnologia Nuclear".

Orientadora: Dra. Marília T. F. Cesar Khouri

SÃO PAULO

1992

A Herminio Padilha
A Maria Padilha.

Ao Doni.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meus agradecimentos a Dra Marília T.F.Cesar Khouri pela orientação deste trabalho.

Especialmente agradeço ao amigo Shintaro Jonen pelo desenvolvimento dos "softwares" que permitiram as leituras por meio do S.A.I. e pela dedicação dispensada à leitura dos detectores.

Aos amigos Hercules, Plank e André pelo desenvolvimento dos programas auxiliares para o tratamento dos dados obtidos no S.A.I e pela assistência com o micro, sem a qual seriam maiores as dificuldades encontradas.

Aos amigos Ademir e Jacó pelos desenhos e Marcos pelo auxílio nas irradiações.

Dra Marina F.Koskinas pelas medidas de fluxo nos canais do arranjo NT sempre que estas se fizeram necessárias.

Dr Reynaldo Pugliesi pela atenção e discussão relativa a dúvidas que surgiram no desenvolvimento destes estudos

Dr Silvio Herdade (IFUSP) pela autorização para a impressão.

Dra Marília Cruz pela utilização das instalações (IFUSP).

MSc Tufic Madi Filho pela amizade e colaboração.

MSc Luciano Fratini pelo arranjo NT. MSc Vagner Aguiar de Oliveira do CTA pelo corte dos detectores.

Profs. Jonas (IQUSP); Rajendra (IPEN); Ana (IPEN), pela revisão de conceitos químicos.

FAPESP pelo apoio financeiro.

IPEN pela utilização das instalações.

Aos amigos Kátia, Jacó e Verônica cuja amizade e companheirismo foi muito importante.

A Marlete pelas importantíssimas discussões.

MSc Artur Wilson Carbonari pela colaboração.

Aos amigos: Berreta, Agostinho, Angélica, Edson, Eduardo (Babalu), Felicia, Roberta, Guilherme, Cássia, Eudice, Renato, Roni, Sonia, Willi e Ineide, que indiretamente também contribuíram para a realização deste trabalho.

DETECCAO DE NEUTRONS UTILIZANDO CR-39

MEIRE DE CASSIA PADILHA

RESUMO

O desempenho do detector de traços CR-39 produzido pela *Pershore Moundings* (500 μ m, de espessura, 0,2%Dop, 2,6%IPP) foi verificado para detecção de nêutrons rápidos e térmicos. A aplicação deste detector para dosimetria pessoal de nêutrons é discutida.

Os detectores foram revelados por ataque eletroquímico. A influência dos parâmetros: campo elétrico, tempo de revelação e temperatura na resposta do detector é mostrada. A leitura dos detectores foi feita usando-se um projetor de "slides" e um sistema analisador de imagem.

Nas ótimas condições de revelação: solução PEW (15%KOH, 40% (CH₃CH₂OH), e 45% de água) por 4h, com um campo de 26kV.cm⁻¹, 2kHz, a 50°C, as sensibilidades são (8,8 \pm 0,5) \times 10⁻⁵ traços.nêutron⁻¹ (ou 229 traços.cm⁻².mSv⁻¹) e (7,8 \pm 0,5) \times 10⁻⁵ traços.nêutron⁻¹ (ou 189 traços.cm⁻².mSv⁻¹) para nêutrons provenientes das fontes de Cf-252 (E_n=2,1MeV) e AmBe (E_n=4,3MeV) respectivamente. O intervalo de dose equivalente vai de 0,2 a 9,2mSv, estes resultados foram obtidos com o projetor de "slides".

Usando as mesmas condições de revelação e o sistema analisador de imagem para as contagens, as sensibilidades obtidas são: (5,2 \pm 0,5) \times 10⁻⁵ traços.nêutron⁻¹ (ou 135 traços.cm⁻².mSv⁻¹) e (4,7 \pm 0,5) \times 10⁻⁵ traços.nêutron⁻¹ (ou 114 traços.cm⁻² .mSv⁻¹) respectivamente, e o intervalo de dose equivalente vai de 0,9mSv a 15mSv.

Detectores de nêutrons térmicos (CR-39 com conversor (n, α) de boro) revelados nas condições: solução PEW, 20kV.cm⁻¹, 2,0kHz, 2h, 30°C, apresentaram a sensibilidade de (2,2 \pm 0,1) \times 10⁻³ traços.nêutron⁻¹ (ou 2,6 \times 10⁵ traços.cm⁻².mSv⁻¹).

Os resultados obtidos com o projetor de "slides" e com o sistema analisador de imagem foram comparados. A reprodutibilidade dos métodos é 6,7% (P.S.).

NEUTRON DETECTION USING CR-39

MEIRE DE CÁSSIA PADILHA

ABSTRACT

The performance of the solid state nuclear track detector CR-39 manufactured by *Pershore Moundings*, (500 μ m thick, 0,2% DOP, 2,6% IPP), was verified for fast and thermal neutron detection. The application of this detector for the purpose of personal neutron dosimetry was considered.

The detectors were etched by eletrochemical etching. The influence of etching time, field strength and temperature on detector response is shown.

The reading of the detectors was performed by using a slide projector (S.P.) and an image analyser system (I.A.S.).

At the optimum etching conditions: PEW solution (15%KOH, 40% ethyl alcohol, 45% water) for 4h, with an applied field strength of 26kcm⁻¹, 2,0kHz, at 50°C, the sensitivities are (8,8 \pm 0,5) $\times 10^{-5}$ tracks.neutron⁻¹ (or 229 tracks.cm⁻².mSv⁻¹) and (7,8 \pm 0,5) $\times 10^{-5}$ tracks.neutron⁻¹ (or 189 tracks.cm⁻².mSv⁻¹) for Cf-252 (E_n = 2,1MeV) and AmBe (E_n = 4,3MeV) neutrons respectively. The neutron equivalent dose range is from 0,2 to 9,2mSv, such results obtained with the slide projector.

Reading the same detectors in the image analyser system, the sensitivities are (5,2 \pm 0,5) $\times 10^{-5}$ tracks.neutron⁻¹ (or 135 tracks.cm⁻².mSv⁻¹) and (4,7 \pm 0,5) $\times 10^{-5}$ tracks.neutron⁻¹ (or 114 tracks.cm⁻².mSv⁻¹), respectively, and the equivalent dose range is from 0,9mSv a 15mSv.

Thermal neutrons detectors (CR-39 with a boron (n, α) converter) etched in the conditions: PEW solution, 20kV.cm⁻¹, 2,0kHz, 2h, 30°C, presented sensitivity of (2,2 \pm 0,1) $\times 10^{-3}$ tracks.neutron⁻¹ (or 2,6 $\times 10^5$ tracks.cm⁻².mSv⁻¹).

The results obtained with the slide projector and the image analyser system were compared. The reproductibility of the methods is 6,7%.

INDICE

CAPITULO I	- INTRODUÇÃO.....	01
CAPITULO II	- DETECÇÃO DE NÊUTRONS COM SSNTDs.....	03
II.1	- FORMAÇÃO DO TRAÇO.....	03
II.2	- O MATERIAL CR-39.....	05
II.2.1-	O dopante.....	06
II.2.2-	"Background" (Traços de fundo).....	09
II.3	- FONTES DE NÊUTRONS.....	09
II.4	- INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA.....	10
II.4.1	- Resposta a prótons de recuo.....	12
II.4.2	- Contribuição de outras partículas carregadas....	14
II.4.3	- Resposta a nêutrons térmicos (o conversor BN)...	15
CAPITULO III	- TÉCNICAS DE REVELAÇÃO E SISTEMAS DE LEITURA.....	17
III.1	- ATAQUE QUÍMICO (CE).....	17
III.2	- ATAQUE ELETROQUÍMICO (ECE).....	19
III.3	- SATURAÇÃO DO DETECTOR REVELADO ELETROQUIMICAMENTE.....	24
III.4	- PRÉ-ATAQUE.....	25
III.5	- SISTEMAS DE LEITURA.....	26
III.5.1-	Projektor de "slides" (PS).....	26
III.5.2-	Sistema analisador de imagens (SAI).....	28
CAPITULO IV	- DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
IV.1	- CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	32
IV.2	- A SOLUÇÃO REAGENTE.....	32
IV.3	- OS DETECTORES.....	33
IV.4	- O SISTEMA DE IRRADIAÇÃO.....	34
IV.4.1	- A fonte de Am-Be.....	34
IV.4.2	- A fonte de Cf-252.....	36
IV.4.3	- Irradiações com nêutrons rápidos.....	37
IV.4.4	- Irradiações com nêutrons térmicos.....	39
IV.5	- REVELANDO OS DETECTORES.....	41
IV.6	- AS LEITURAS.....	46

CAPITULO V - DESEMPENHO DO SISTEMA DE DETECÇÃO.....	48
V.1 - NÉUTRONS RÁPIDOS.....	48
V.1.1 - Efeito de parâmetros elétricos.....	48
V.1.2 - Efeito de parâmetros de revelação comuns às técnicas química e eletroquímica.....	52
V.1.3 - "Background" & dose mínima detectada.....	63
V.1.4 - Sensibilidade.....	66
V.1.5 - Efeito da fluência de nêutrons & dose máxima detectada.....	70
V.2 - NÉUTRONS TÉRMICOS.....	75
V.2.1 - Efeito de parâmetros de revelação.....	75
V.2.2 - "Background" & fluência mínima detectada.....	79
V.2.3 - Sensibilidade.....	80
V.2.4 - Efeito da fluência de nêutrons & fluência máxima detectada.....	80
V.3 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE LEITURA.....	82
CAPITULO VI - CONCLUSÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	91
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
APÊNDICE A - RELAÇÃO FLUÊNCIA & DOSE.....	95
APÊNDICE B - RELAÇÃO AUMENTO DO MICROSCÓPIO x ÁREA.....	97
REFERENCIAS.....	98

I - INTRODUCAO

Detectores sólidos de traços nucleares "solid state nuclear track detectors" (SSNTDs) são materiais isolantes ou semi-condutores nos quais uma radiação ionizante pode provocar um conjunto de danos localizados (traço latente), registrando desta forma sua trajetória no material detector.

A natureza da radiação ionizante que pode provocar este tipo de dano depende de cada material. Existe um limiar energético da partícula incidente para que haja a formação do traço, este limiar característico do material detector é o que define a sensibilidade do mesmo.

Os rastros deixados pelos ions em raros casos podem ser visualizados diretamente por meio de um microscópio óptico, Young, 1958 [45]; ou por meio de um microscópio eletrônico, Silk e Barnes, 1959 [31].

O procedimento normalmente empregado é submeter o detector a um tratamento com reagentes químicos, estes tratamentos propiciam a ampliação dos traços tornando-os visíveis ou mais facilmente visíveis por meio dos sistemas de ampliação: microscópio óptico, projetor de "slides", leitora de microfichas entre outros.

O surgimento desta técnica de detecção é relativamente recente, ainda são muitas as incógnitas que cercam o completo entendimento dos fenômenos que ocorrem na estrutura destes materiais, assim como aqueles envolvidos nos tratamentos possíveis para obter a ampliação dos traços, mesmo assim, são inúmeras as aplicações destes materiais como detectores, entre as quais estão: radiografia por partículas alfa e nêutrons, estudos sobre raios cósmicos, confecção de micro-filtros, medidas na prospecção de urânio, emanação de radônio e a dosimetria.

A principal meta no desenvolvimento da dosimetria neutrônica é a obtenção de um sistema com uma resposta independente da energia [10]. Esta foi a principal dificuldade na utilização destes detectores. Em 1983, Tommasino introduziu a técnica de

revelação eletroquímica a temperaturas superiores a ambiente, conseguindo reduzir esta dependência. A partir de então, um grande número de trabalhos neste sentido, foram desenvolvidos em laboratórios espalhados por todo o mundo.

A razão pela qual o material CR-39 (um material SSNTD) apresentou-se promissor para a dosimetria neutrônica é que mediante tratamento conveniente com reagentes químicos, este material apresenta alta sensibilidade a nêutrons, sendo insensível a radiação eletromagnética, podendo detectar nêutrons com energias da ordem de keV, enquanto que nas detecções feitas com as emulsões, os detectores mais utilizados, a energia mínima detectada é da ordem de MeV [11].

Para realizar a ampliação dos traços em materiais orgânicos a princípio pode-se utilizar qualquer solução alcalina. As soluções mais utilizadas para tornar visíveis traços no CR-39 são NaOH e KOH [25].

Alguns autores sugerem que a adição de álcool em KOH na forma de PEW (15%KOH, 40% etanol e 45% água) possibilita uma menor dependência energética da resposta [5,43], isto motivou o estudo de PEW na revelação do material CR-39.

Para um estudo rigoroso da resposta energética do detector devem ser utilizados feixes monoenergéticos o que são poucos laboratórios que dispõem, neste trabalho é feita uma aproximação utilizando a energia média dos nêutrons das fontes disponíveis para análise do desempenho do material na detecção de nêutrons.

II - DETECCAO DE NEUTRONS COM SSNTDs

II.1 - FORMAÇÃO DO TRAÇO

Partículas carregadas pesadas transferem suas energias para átomos de um sólido por meio de colisões elásticas e inelásticas com núcleos ou elétrons atômicos. Sendo as colisões inelásticas o tipo de interação que efetivamente contribui para a formação do traço.

Nas colisões inelásticas, a partícula carregada pode excitar e/ou ionizar os átomos do meio. Quando a partícula expulsa elétrons dos átomos em sua trajetória, por meio de interações coulombianas, estes elétrons também podem produzir mais excitações e ionizações no material detector.

Assim, temos ionizações de natureza diferente, ionizações primárias produzidas junto a trajetória da partícula, e as possíveis ionizações produzidas pelos Raios Delta (elétrons acelerados no processo de ionização), ionizações secundárias.

Nos materiais inorgânicos a formação de traços pode ser explicada facilmente em termos das ionizações primárias formando centros de carga no material e portanto, formando traços, assim o efeito das ionizações secundárias pode ser considerado desprezível, o que não acontece com os polímeros, uma vez que em processos de revelação química consegue-se ampliar o traço a diâmetros que correspondem a regiões muito afastadas das excitações e ionizações primárias ocorridas na trajetória da partícula incidente. O mecanismo de excitação dos átomos da estrutura do material contribuem para a formação de traços no sentido em que quando ocorre o processo da desexcitação, no caso de polímeros, este retorno a níveis menos energéticos pode provocar quebras de cadeias formando radicais livres. Partículas carregadas ainda podem causar cisões radiolíticas ao longo das cadeias formando fragmentos

menores. Este processo traz como consequência a formação de produtos radiolíticos com baixo peso molecular, os quais são mais facilmente dissolvidos num processo de revelação. As características atômicas de um traço podem ser visualizadas na figura 1.

Vários modelos de formação de traços (Fleischer e colaboradores, 1975) [13], tem sido propostos e aplicados, sendo que a maior parte deles são muito parecidos entre si. O mais conhecido é o chamado *modelo da perda de energia restrita* (REL), modelo proposto por Benton, 1968.

Neste modelo, somente a energia transferida para o material detector por elétrons secundários de baixa energia é levada em consideração, isto é, somente uma porção restrita da energia total perdida é usada na formação do traço.

FORMAÇÃO DO TRACO.

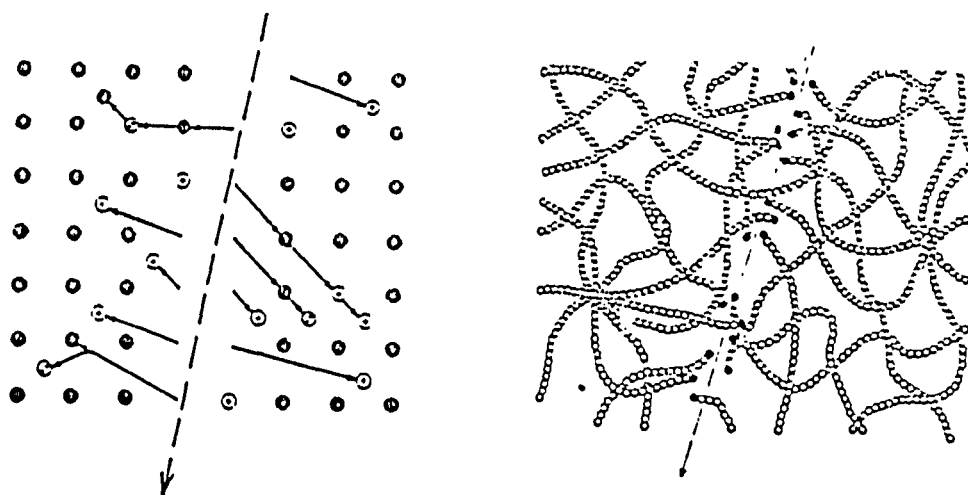


FIGURA 1 - Característica atômica de um traço. Em um cristal o dano consiste numa contínua desordem de vacâncias e íons intersticiais. Em polímeros, cadeias interrompidas e sítios quimicamente reativos. (Fleischer e colaboradores, 1975 [13]).

O monômero é polimerizado a temperaturas entre 50 e 70°C, usando pequena porcentagem de di-isopropil peroxidicarbonato (IPP) como agente catalisador.

A polimerização do CR-39 representa a transformação do monômero tetrafuncional não saturado para o polímero saturado, contudo neste processo de formação da cadeia tridimensional, várias zonas fechadas são formadas e estas podem conter moléculas livres do monômero as quais caracterizam uma insaturação residual deixada na amostra do polímero.

Armadilhas isoladas e ao acaso representadas pelos monômeros livres levam a não homogeneidades estruturais as quais são responsáveis por perdas de uniformidade que são as principais causas nos casos da não reprodutibilidade da resposta do material em função das amostras do CR-39 [34].

II.2.1 - O DOPANTE

Na busca para se obter um material com uma maior homogeneidade e estabilidade de resposta foram estudados os efeitos de vários aditivos plastificantes na resposta do detector, Price e Sullivan, 1981 [28], Portwood e Stejny, 1984 [27]; Somogyi e colaboradores, 1986 [36].

Estudos mostraram que com a adição de pequena concentração de ftalato de dioctila (dopante), a amostra toda do material CR-39 torna-se mais resistente ao reagente químico, apresentando traços de excelente qualidade óptica mesmo após prolongados períodos de revelação [28].

O CR-39 é constituído por moléculas simétricas. São formadas ligações polares fortes entre as moléculas do dopante e as cadeias do polímero, estas ligações são as responsáveis pela maior resistência ao processo de reação com o reagente químico.

Segundo Portwood e Stejny, 1984 [27], devido á

presença de anéis de benzeno no ftalato de dioctila e a subsequente captura dos elétrons secundários a perda de energia restrita deve ser menor que no caso do CR-39 sem aditivos, efeito que contribui para uma redução na sensibilidade do material.

Simultaneamente, durante o processo de revelação química, o reagente (solução alcalina) quebra as ligações do carbono e cadeias são libertas na forma de álcool poli alila (PAA) entre outros produtos. O esquema apresenta os principais produtos da reação, figura 3.

Todos os produtos da reação são solúveis na solução reagente exceto o PAA, que é um produto plástico parcialmente solúvel, Gruhn e colaboradores, 1979 [15], que pode atrasar o ataque do reagente na superfície do detector dependendo de sua concentração e taxa de formação, entretanto pelo fato da solução ser difusa e pela natureza poliéster deste produto, este efeito não é rápido quando a taxa de formação é baixa.

O PAA tende a reduzir a velocidade de ataque, portanto a sua formação pode contribuir para um aumento na sensibilidade do material.

Um material detector é obtido com maior ou menor sensibilidade a partir da introdução de dopantes em sua composição dependendo de quais dos fatores acima mencionados estejam dominando.

A sensibilidade do material não só depende do tipo do dopante mas também da sua concentração.

ESTEQUIOMETRIA DA REACAO

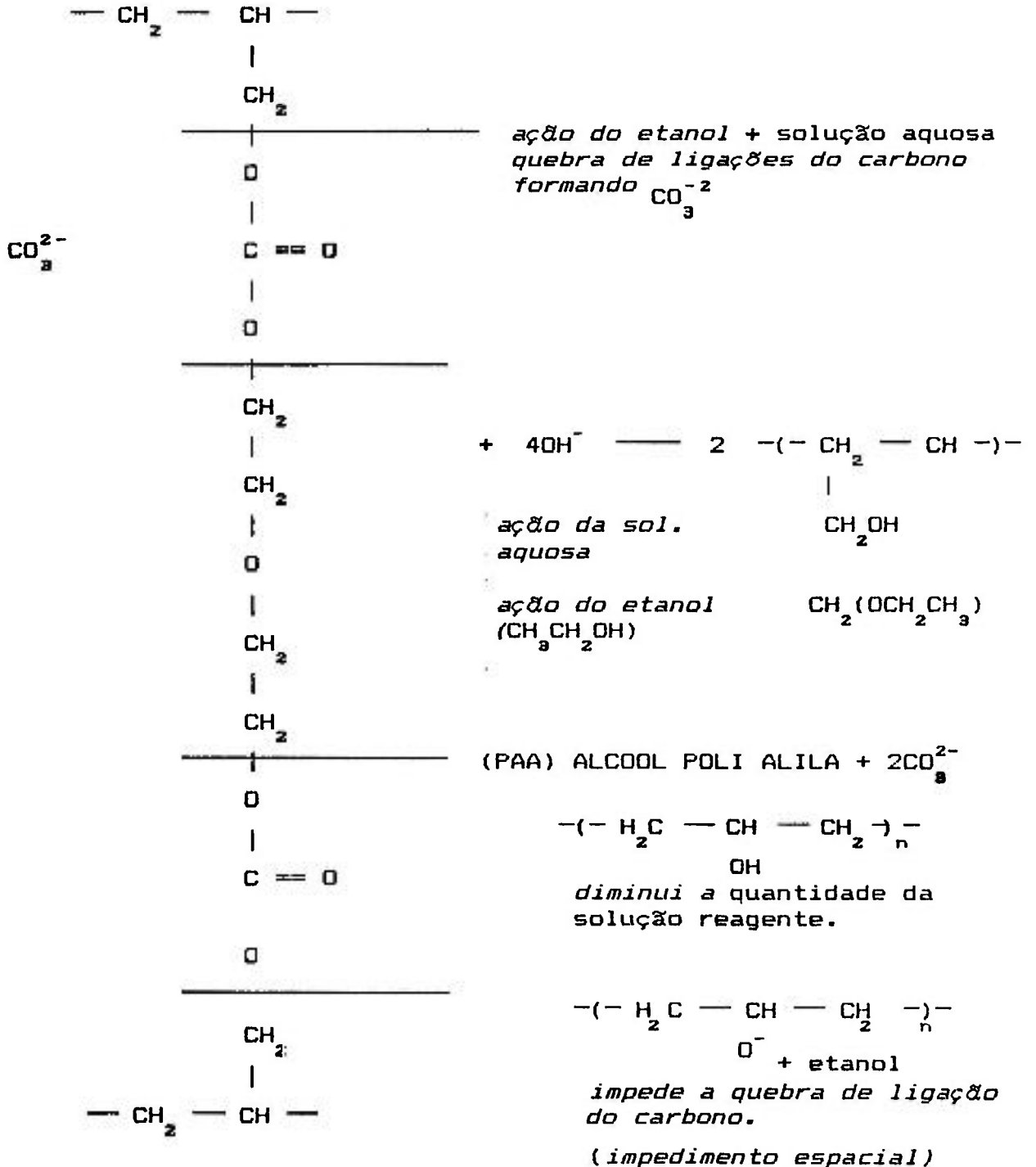
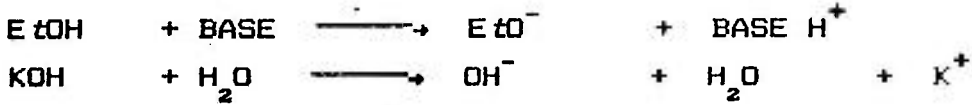


FIGURA 3 - Principais produtos da reação de PEW com CR-39.

II.2.2 - "BACKGROUND" (TRAÇOS DE FUNDO)

Materiais sólidos detectores de traços nucleares mesmo sem serem irradiados, quando são submetidos a um processo de revelação apresentam uma certa densidade de traços registrada.

Este efeito é explicado pela existência de uma radiação de fundo capaz de impressionar o detector, que tem origem principalmente em emissores alfa presentes no ar, como o radônio-222, e nos raios cósmicos, especialmente quando há transporte aéreo do material.

Traços de "background" também tem outras origens, como defeitos causados durante a manipulação dos detectores, ou impurezas no material devidas às condições intrínsecas do processo de fabricação.

II.3 - FONTES DE NÊUTRONS

Nêutrons são produzidos em três diferentes situações:

- reações nucleares em misturas com radionuclídeos,
- reações em aceleradores de partículas,
- reações de fissão nuclear.

No primeiro caso as reações mais comuns são: (α, n) e (γ, n) . Entre as fontes desta natureza pode-se destacar: $^{210}\text{PoBe}$, ^{241}AmB , $^{124}\text{SbBe}$ e $^{241}\text{AmBe}$.

O espectro de energia da maioria das fontes (α, n) estende-se até cerca de 10MeV, enquanto que nêutrons de fontes (γ, n) geralmente apresentam energias menores que 1MeV [37].

No segundo caso, são utilizados aceleradores de

partículas positivas de altas energias, como Van de Graaff, ciclotrons ou sincrociclotrons, que podem produzir feixes direcionais de nêutrons monoenergéticos

Quanto as reações de fissão nuclear, a principal fonte são os reatores nucleares, cuja produção de nêutrons resultante apresenta um espectro contínuo de energia até 18MeV. Entretanto a obtenção de nêutrons com energias maiores que 10MeV é relativamente baixa [39].

Ainda nesta categoria pode-se destacar a fonte de nêutrons de Cf-252, que apresenta uma fissão espontanea apreciável emitindo por fissão $(3,733 \pm 0,008)$ nêutrons [37], e um espectro de energia similar ao do U-235 (maxwelliano), com energia média de 2,1MeV.

Fontes obtidas a partir de misturas de radionuclídeos e os reatores produzem nêutrons de espectro contínuo, enquanto que os aceleradores, os nêutrons poli e monoenergéticos.

II.4 - INTERAÇÃO DE NEUTRONS COM A MATERIA

Nêutrons são partículas nucleares pesadas eletricamente neutras, cuja detecção depende dos efeitos secundários que resultam de interações como: espalhamento e absorção. Podendo o nêutron colidir elástica e inelásticamente com núcleos atômicos.

Nas colisões elásticas a energia cinética do sistema é conservada, esta forma de interação pode ser dos tipos ressonante ou potencial. Na colisão elástica ressonante o nêutron ao penetrar no interior de um núcleo possui energia cinética compatível com os níveis energéticos deste núcleo, de forma tal, que este reemitindo uma de suas partículas, emite um nêutron de mesma energia do incidente. Na colisão elástica potencial, entretanto, esta situação

particular não ocorre, e o núcleo atingido reemite uma partícula de mesma natureza e energia menor que a incidente, sendo a diferença energética transformada em energia de recuo do próprio núcleo.

Nas colisões inelásticas, contudo, não há conservação da energia cinética do sistema, e parte desta energia é convertida

em excitação na formação de um núcleo composto. Colidindo inelásticamente pode haver espalhamento (espalhamento inelástico) ou absorção total do nêutron, o núcleo recém formado (um núcleo em estado excitado) pode decair pelos vários canais possíveis: (n,α) , (n,β) , (n,p) , (n,γ) , (n,f) etc.

O nêutron espalhado, elástico ou inelásticamente, pode ser emitido, a princípio, em qualquer direção (espalhamento incoerente), alguns materiais entretanto apresentam a propriedade de espalhar preferencialmente em determinadas direções, (espalhadores coerentes).

As probabilidades dos vários tipos de interação mudam drasticamente com a energia dos nêutrons.

Para nêutrons lentos as interações significativas incluem espalhamento elástico e reações de absorção. Devido a baixa energia cinética dos nêutrons nesta faixa, uma energia insignificante pode ser transferida para os núcleos no espalhamento elástico e conseqüentemente esta interação não contribui para a formação de traços, entretanto colisões elásticas são frequentes e levam nêutrons lentos ao equilíbrio térmico com o absorvedor. A maior parte dos nêutrons lentos estão entre os térmicos, que a temperatura ambiente têm em média 0,0025eV.

Neste trabalho consideram-se nêutrons térmicos aqueles com energia abaixo de 0,4eV, ou seja, a energia de queda abrupta da secção de choque de absorção do cádmio.

As interações de nêutrons térmicos de importância para a formação de traços são as reações que criam partículas secundárias com energia suficiente para serem detectadas (interações inelásticas - reações de absorção).

A importância do espalhamento entretanto se torna maior com o aumento da energia do nêutron, porque então, uma

quantidade apreciável de energia pode ser transferida em uma colisão. O efeito secundário que induz a formação de traços, neste caso é o recuo de núcleos.

Materiais detectores de traços são espalhadores incoerentes. Nas interações de nêutrons rápidos predominam interações elásticas com núcleos do detector. Traços são formados em todo o volume do material, e uma única energia de nêutron incidente pode gerar traços induzidos por prótons em toda uma faixa de energia, já na detecção de nêutrons térmicos o mesmo não acontece, o material detector é constituído por elementos como hidrogênio, oxigênio, carbono, não ocorrendo reações de absorção exceto para energias muito maiores que as estudadas. Neste caso, as partículas que geram traços são produzidas num material conversor, e não no próprio detector sendo todos os traços formados na camada mais externa do detector (traços superficiais).

II.4.1 - A RESPOSTA DO CR-39 A PRÓTONS DE RECUO

A maior parte dos traços reveláveis produzidos por nêutrons rápidos em CR-39 são provenientes de prótons de recuo gerados nas camadas superficiais do material ou em um radiador hidrogenado colocado em frente ao detector. Radiadores são utilizados para melhorar a eficiência de resposta a medida que a energia do nêutron incidente aumenta, de forma a forçar a interação nêutron detector.

Quando são realizadas revelações da superfície oposta à face de irradiação, o próprio material CR-39 se comporta como radiador.

Para nêutrons de energia menor do que 1,0 MeV, os prótons de recuo produzidos na espessura revelada do detector predominam devido ao fato dos seus alcances serem tão pequenos que a espessura da camada de radiador da qual prótons podem alcançar o

CR-39 é bem menor que a espessura revelada propriamente.

Em alguns casos, considerando que os radiadores são relativamente finos e altamente hidrogenados, prótons gerados em uma grande parte do volume de radiador podem alcançar o CR-39 e dominar a resposta.

O hidrogênio é um material essencialmente espalhador, quando um nêutron interage com átomos de hidrogênio, estes átomos recuando, tornam-se ions H^+ , e por meio de excitações e ionizações dos átomos do material induz a formação do traço, figura 5.

Cálculos do número de prótons de recuo que atingem a camada revelada ou são gerados nela, e sua distribuição angular e em energia, são precisos. Eles dependem da secção de choque (n,p), da distribuição angular e de energia dos prótons de recuo e das relações alcance-energia para prótons no material radiador.

Todas estas informações podem ser bem conhecidas, o que não é bem conhecido é a fração de prótons que geram traços detectáveis no CR-39, em função dos limites exigidos quanto sua direção e energia.

Embora a secção de choque dos constituintes do detector para esta forma de interação (espalhamento), decresça com o aumento da energia do nêutron incidente, numa única colisão o nêutron pode transferir toda sua energia ao núcleo recuado (hidrogênio), desta forma uma forte contribuição de átomos de hidrogênio recuados são capazes de gerar traços reveláveis.

De qualquer forma, interagindo no radiador ou camada revelada o que é determinante é que a interação do nêutron com os átomos de hidrogênio é a base para a estimativa do número de traços induzidos por nêutron incidente, ou seja, a determinação da sensibilidade.

Um esquema simplificado do recuo do próton e consequências na estrutura do detector é indicado na figura 5.

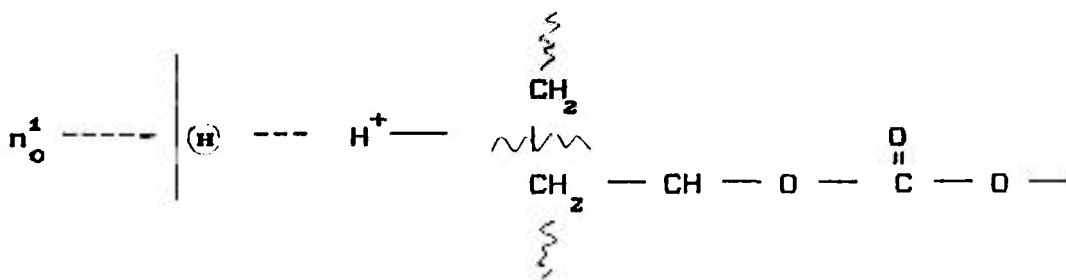


FIGURA 5 - Interação do nêutron com um átomo de hidrogênio.

II.4.2 - CONTRIBUIÇÃO DE OUTRAS PARTÍCULAS CARREGADAS

Normalmente é considerado que todos os traços observados são produzidos pelo recuo de prótons, entretanto esta consideração trata-se de uma aproximação, se for levado em conta que o material CR-39 ($C_{12}H_{18}O_7$), apresenta em sua constituição outros elementos além do hidrogênio e que teoricamente também estão contribuindo.

Os átomos de carbono e oxigênio podem induzir traços de recuo assim como os átomos de hidrogênio da amostra, tabela 1.

No caso de nêutrons de energia até 10MeV, estes recuos pesados, os quais carregam somente uma fração da energia do nêutron, apresentam trajetórias curtas o bastante para que não sejam capazes de produzir um traço detectável, a medida que a energia do nêutron aumenta, uma fração de traços devida a recuos pesados será formada na superfície do detector, entretanto acima de 1 ou 2MeV, em geral utiliza-se radiadores e a maior parte dos prótons são provenientes do radiador, considerando que os alcances de recuos dos átomos de carbono e oxigênio são muito menores que o de recuos dos prótons, considerando a massa destes elementos e a energia máxima cedida por colisão, o número relativo de recuos pesados que alcançam o CR-39 provenientes do radiador será proporcionalmente menor [11].

No material CR-39, exceto para energias maiores que 10MeV, os traços formados podem ser considerados decorrentes unicamente de prótons de recuo.

TABELA 1 - Secção de choque de espalhamento para os elementos constituintes do material CR-39 para as energias disponíveis neste trabalho [16].

ELEMENTO	σ_e [barn]	
ENERGIA (MeV)	2,1	4,3
Carbono	4,2	2,0
Oxigênio	1,5	3,0
Hidrogênio	2,8	1,8

II.4.3 - RESPOSTA A NEUTRONS TÉRMICOS (o conversor BN)

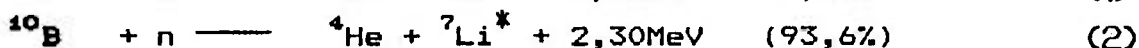
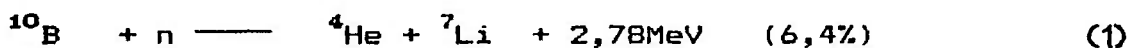
A detecção de nêutrons térmicos se faz de forma indireta por meio da utilização de materiais com alta secção de choque de absorção com a reemissão de partículas carregadas pesadas, estes materiais são utilizados como conversores.

Um exemplo destes materiais é o boro. O boro pode ser utilizado nas formas de carbeto de boro, tetraborato de lítio, nitrato de boro ou boro natural.

A composição isotópica do boro natural é 19,8% boro-10 e 80,2% boro-11; apresentando uma secção de choque efetiva para nêutrons de energia menor que 0,4eV (reação (n, α)), de 759b. O conversor utilizado neste trabalho é o BN produzido pela *Kodak Pathé* (França). Neste conversor o boro natural se encontra na forma de uma fina camada (65 μ m) depositada num substrato de poliéster de 106 μ m de espessura, a densidade de boro é de 0,912g/cm³ a

eficiência de conversão é de 22% [29].

A reação significativa para a indução de traços ocorre com o boro 10, podendo o núcleo produto ${}^7\text{Li}$ ser formado em estado estável ou excitado, neste último caso, decaindo por emissão de uma radiação eletromagnética gama.



As energias do ${}^4\text{He}$ e ${}^7\text{Li}$ são 1,47 e 0,83MeV respectivamente.

O fato de todos os traços terem início na camada mais externa do detector faz com que a sensibilidade do material seja maior, uma vez que a limitação do número de traços que são ampliados, depende somente do ângulo de incidência e energia da partícula alfa incidente.

III - TECNICAS DE REVELACAO E SISTEMAS DE LEITURA

III.1 - ATAQUE QUÍMICO (CE)

O ataque químico é a técnica mais comumente empregada para tornar visíveis os traços nos materiais detectores, baseia-se na remoção de camadas do material detector sob ação da solução reveladora, sendo que esta, ataca preferencialmente a região onde a radiação ionizante danificou a estrutura do material.

Num detector plástico revelado por este processo, temos na realidade duas velocidades de revelação, uma velocidade de ataque ao longo da superfície do material detector, V_s , e uma velocidade de ataque ao longo do traço latente, V_t .

A ampliação dos traços ocorre somente se a componente perpendicular da velocidade de ataque ao longo do traço, V_t , for maior que a velocidade de ataque ao longo da superfície do material, V_s .

O fenômeno da ampliação do traço pode ser entendido pelo principio de Huygens. Assumindo que as velocidades de ataque sejam constantes, a solução ataca cada ponto como se fosse único, desta forma, a cada ponto corresponderá uma esfera de material removido. A camada removida será o conjunto de todas as esferas unitárias de raio $V_s \cdot t$, pois como a velocidade de ataque é considerada constante, após um tempo t , a camada da superfície removida será $V_s \cdot t$, figura 6, o que evidencia que o processo de revelação química é gradativo.

Quanto a capacidade de revelar traços pelo ataque químico, encontramos uma limitação devido ao ângulo crítico de incidência da partícula projétil.

Existe um certo ângulo limite de incidência, abaixo do qual nenhum traço será revelado, figura 7. Partículas que

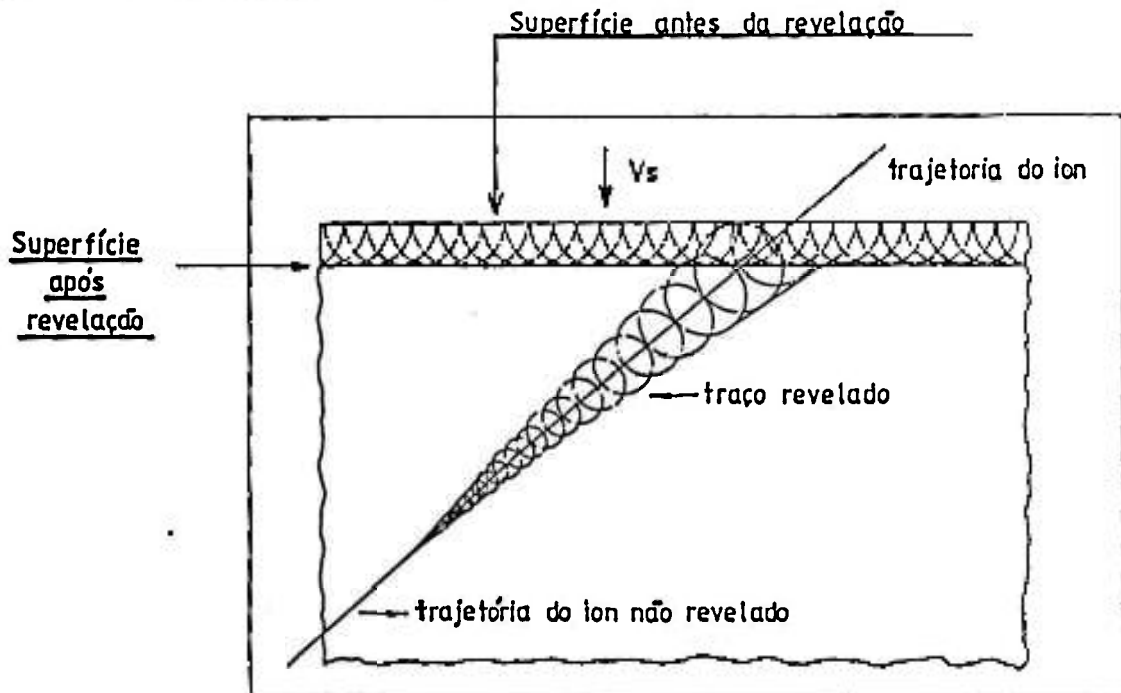


FIGURA 6 - Revelação do traço ilustrada pelo princípio de Huygens. A revelação química é um processo gradativo, a solução ataca cada ponto como se fosse único.

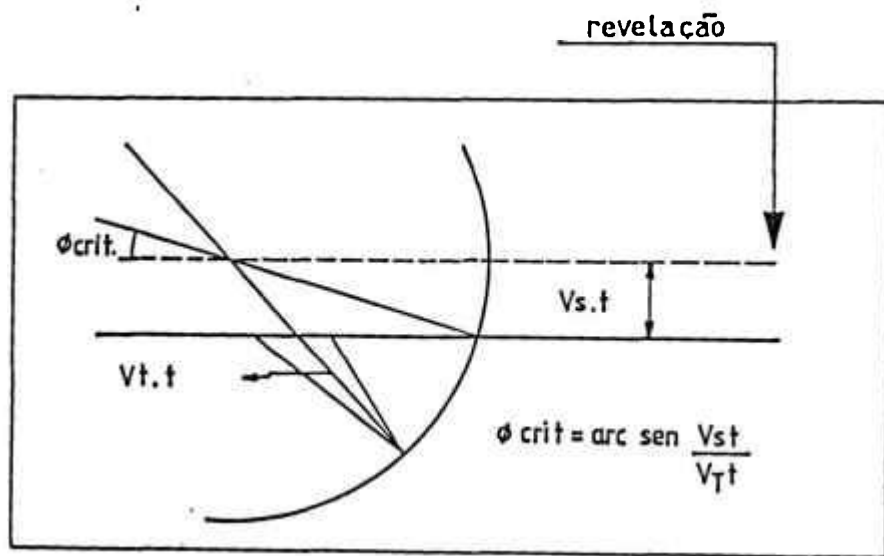


FIGURA 7 - Ilustração do ângulo crítico, qualquer traço formado num ângulo menor que o ângulo crítico é perdido no processo de revelação.

incidem no material detector num ângulo inferior ao ângulo crítico, formam traços tão superficiais que são perdidos no processo de revelação.

III.2 - ATAQUE ELETROQUÍMICO (ECE)

A revelação eletroquímica ocorre quando o material detector é submetido a um campo elétrico oscilante (AC) durante um processo normal de revelação química.

Tommasino e colaboradores, 1980 [41], propuseram um modelo para explicar o fenômeno da revelação eletroquímica.

Segundo Tommasino, este processo de ampliação ocorre em dois estágios: formação do cone e arborescência, figuras 8 e 9.

Num processo de revelação eletroquímica, pela ação da solução reveladora o traço latente adquire a forma cônica propiciando a penetração da solução reagente.

Tobazeon e Gartner, 1974 [38], demonstraram que a absorção de líquidos é um fenômeno comum em materiais orgânicos, isto explicaria a revelação de traços induzidos nas camadas mais internas do material.

Quando um campo (AC) é aplicado, traços ainda na forma cônica se comportam como eletrodos modificando o campo em suas imediações. Ocorre uma amplificação do campo na região do traço que depende da profundidade do mesmo, quanto mais profundo maior o efeito.

O campo amplificado localizado em ação combinada com a solução reagente e frequência provoca rachaduras no material plástico numa geometria conhecida por arborescência, "treeing formations". Estas formações são pelo menos duas ordens de grandeza maiores que o traço cônico inicialmente formado.

Tais "treeing formations" ou também conhecidas como "water tree", podem ser atribuídas em parte a formação de micro

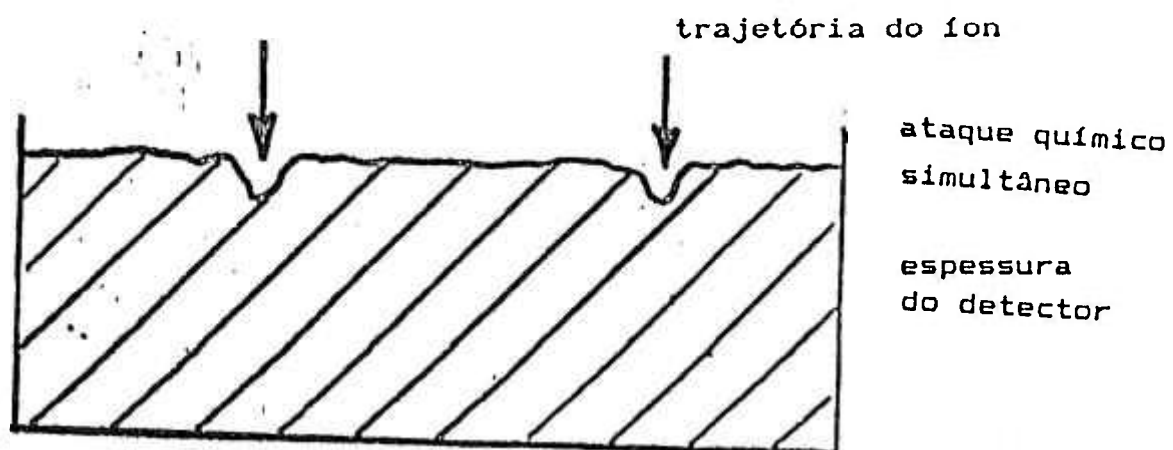


FIGURA 8 - Formação do cone em decorrência da ação da solução reagente.

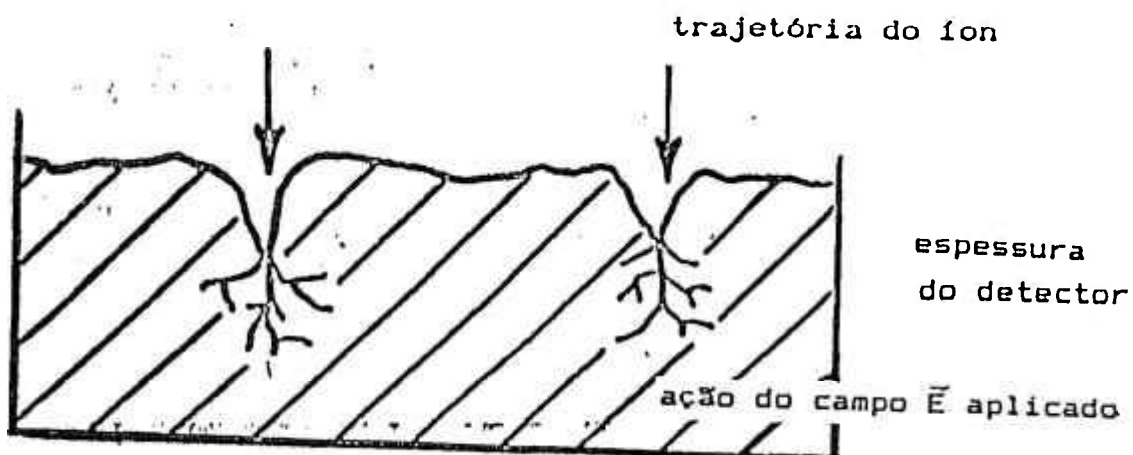


FIGURA 9 - Formação da arborescência em decorrência da ação conjunta da solução reagente e campo elétrico aplicado.

rachaduras produzidas por moléculas de água. Estas moléculas sob ação de forças eletrolíticas penetram no isolante envolvendo as regiões dos traços.

A ação compressiva da água é produzida pelas forças de maxwell, as quais agem sobre moléculas polares de líquidos, especialmente na região do cone onde a pressão exercida pela tensão é muito alta.

Em frequências da ordem daquelas utilizadas na revelação eletroquímica de detectores, a vaporização da água preferencialmente no cone, devida à perda de energia do dielétrico ou aquecimento joule, também pode gerar mais micro rachaduras, as quais também danificam toda a estrutura do material ao longo do traço.

Modelos desenvolvidos para a estimativa do campo na extremidade de eletrodos puntiformes tentaram estimar a amplificação do campo nos traços num material isolante.

Este estudo foi realizado por Mason, que propôs que o traço formado no interior de um dielétrico podia ser considerado como uma agulha metálica. Entretanto a equação de Mason para este modelo (eletrodos puntiformes) adaptada a traços num meio dielétrico não pôde ser diretamente aplicada, pois levaria a uma fraca dependência entre a intensidade do campo no interior do traço e o campo macroscópico E_0 [23].

$$E_0 = U / D \quad (3)$$

onde: E_0 campo macroscópico [kV/cm].
U tensão [kV].
D espessura do material [cm].

Então Smythe propôs um novo modelo [32], este modelo melhor adaptado ao propósito descreve o potencial nas vizinhanças de um condutor de extremidade esferoidal de comprimento L e raio da base R. Sob esta analogia, o campo no interior do traço é dado pela expressão:

$$E = E_0 \frac{2L/R}{\ln(4L/R)-2} \quad (4)$$

onde: E ... campo no interior do traço
E₀ ... campo macroscópico
L ... comprimento do traço
R ... raio local

O polímero utilizado com a revelação eletroquímica em adição às características para o registro e revelação química dos traços, deve ter necessariamente as propriedades exigidas para o início e propagação da formação da arborescência, a qual deve ocorrer preferencialmente nos danos deixados pela radiação incidente.

Na utilização desta técnica quando um polímero é cristalizável, ele deve ter um alto grau de cristalização, ou se é amorfo (no caso do CR-39), deve apresentar um alto peso molecular.

Para maior eficiência na revelação por meio desta técnica, o polímero requer uma morfologia uniforme, a presença de defeitos no material pode inibir a formação e propagação da arborescência, além disso, imperfeições, micro espaços vazios (bolhas), misturas, estabilizantes, pigmentos etc., podem iniciar a formação de arborescências em regiões que não correspondem aos danos produzidos pela radiação incidente, reduzindo a eficiência total do sistema de detecção.

Estas características limitam o número de polímeros,

cujas propriedades quando combinadas com sua sensibilidade à radiação formam detectores plásticos altamente sensíveis.

Para a escolha das melhores condições nas quais o material detector deve ser revelado e não incorrer ao risco de interpretação errada dos resultados obtidos, é importante saber de antemão, como parâmetros tais como: intensidade do campo, frequência, temperatura etc., influenciam a resposta do material detector.

Como resultado de muitos trabalhos realizados neste campo [3,22,33], chegou-se a conclusão de que o ataque eletroquímico a temperaturas superiores a ambiente (sem pré-ataque), torna a resposta do detector praticamente independente da energia. O pré-ataque químico diminui o "background". Altos campos elétricos são capazes de revelar partículas cada vez mais energéticas, dependendo da intensidade de campo, embora altos campos aumentem o "background". Altas frequências alargam os traços mais rapidamente (normalmente são usadas ao final de revelações realizadas a baixas frequências).

Controlando estes parâmetros, dependendo do material que é utilizado e a natureza da radiação estudada, pode-se otimizar os resultados.

A técnica de revelação com ataque eletroquímico apresenta entre as vantagens de sua utilização, a pequena diminuição da espessura residual do material detector, o que permite que mesmo em grandes períodos de revelação, não sejam perdidos traços superficiais; outro fator é a ampliação do traço obtendo-se diâmetros muitas vezes maiores do que os obtidos com o ataque químico, o que facilita a contagem. Entretanto como limitação da técnica, temos a impossibilidade de trabalhar com altas densidades de traços, tendo em vista as proporções da ampliação.

III.3 - SATURAÇÃO DO DETECTOR SOB REVELAÇÃO ELETROQUÍMICA

Um detector está saturado quando não mais é capaz de quantizar a radiação que incidiu sobre ele.

Normalmente este limite de saturação ocorre quando a taxa da radiação que incide sobre o detector é tal que qualquer traço formado ocuparia o espaço de um outro já registrado no material (efeito de sobreposição).

Na revelação química traços sobrepostos podem ser revelados como um único. Na revelação eletroquímica entretanto, este efeito não ocorre, cada traço é revelado como se fosse único.

As considerações sobre o campo elétrico feitas no item III.2, analisam os traços individualmente, na prática, no material detector não existe um único traço mas uma densidade de traços, cada um modificando o campo em suas vizinhanças.

No início do processo de ampliação, todos os traços, em estado de latência, com uma energia mínima depositada acima de certo limiar, sentem a presença do campo macroscópico aplicado, propagando-se ao longo do detector, com a mesma velocidade de revelação.

Quando em um traço é atingido o campo crítico, tem início a formação da arborescência cujo crescimento rapidamente ultrapassa a velocidade de ataque ao longo do traço.

A medida que traços se tornam suficientemente próximos, as componentes de campo perpendiculares aos traços se cancelam limitando a menor separação entre traços e as dimensões dos mesmos.

Na realidade, o potencial atingido nas proximidades do traço é modificado pela distribuição do campo na área próxima aos mesmos. Desta forma quando um traço começa a se formar nas vizinhanças de outro, o campo local é reduzido e o crescimento, ou em alguns casos até mesmo a formação da arborescência é inibida.

É possível estimar a redução do campo elétrico no interior do traço por meio de um modelo que leve em conta a

variação da densidade e do diâmetro de traço revelado. Isto foi feito por Pitt e Werner, 1988, com a utilização de programas computacionais [26].

III.4 - PRÉ-ATAQUE

Foi observado por Hassib, 1979 [18], que ao submeter um detector plástico a um ataque químico seguido de um ataque eletroquímico era reduzido fortemente o efeito de contaminantes e imperfeições superficiais do detector.

Este fato pode ser explicado aplicando-se a equação de Mason modificada por Smythe (4).

Onde existem traços superficiais no material detector, uma solução reagente (pré-ataque) agindo por um certo tempo faria com que estes traços superficiais adquirissem a forma arredondada (aumentando o valor de R).

Este efeito faria a razão $E_{\text{traco}} / E_{\text{macroscopico}}$ diminuir, e o campo na extremidade do traço não seria suficiente para iniciar a formação da arborescência.

Por outro lado, traços mais profundos seriam levados com este pré-ataque à forma cônica, atingindo dimensões que propiciariam a presença da solução reveladora no interior do traço, o que facilita a formação da arborescência.

Este fato sugere que com um pré-ataque o tempo necessário para revelação diminui.

Portanto ao submeter o material detector a um pré-ataque, não só é diminuído o número de traços de "background", mas é diminuído também o tempo de revelação, permitindo a separação de traços superficiais dos traços mais profundos.

Embora a redução dos traços de "background" e do período de revelação sejam efeitos desejáveis na maioria dos trabalhos, quando a intensão é detectar nêutrons numa larga faixa

de energia este procedimento é evitado, especialmente quando busca-se uma calibração do detector para fins dosimétricos, pois neste caso o detector deve ser capaz de registrar principalmente baixas energias.

III.5 - SISTEMAS DE LEITURA

III.5.1 - PROJETOR DE SLIDES

Após o tratamento eletroquímico, as informações contidas no detector podem ser obtidas por meio de um projetor de "slides" com a contagem direta dos traços registrados.

A leitura do detector CR-39 pode ser feita por meio deste sistema devido à transparência do material.

O detector é colocado no aparelho projetor, e sua imagem numa tela permite a contagem dos traços, figura 10.

São visualizados por este sistema, traços com diâmetros a partir de $15\mu\text{m}$. Este limite foi verificado no desenvolvimento dos estudos apresentados neste trabalho.

A vantagem do sistema é que a área total do detector, $\pi \times (1,25 \text{ cm})^2$ é observada ao mesmo tempo permitindo a identificação de regiões não homogêneas que podem ocorrer por razões diversas, além da facilidade de contagem.

A limitação, é o baixo aumento do aparelho utilizado.

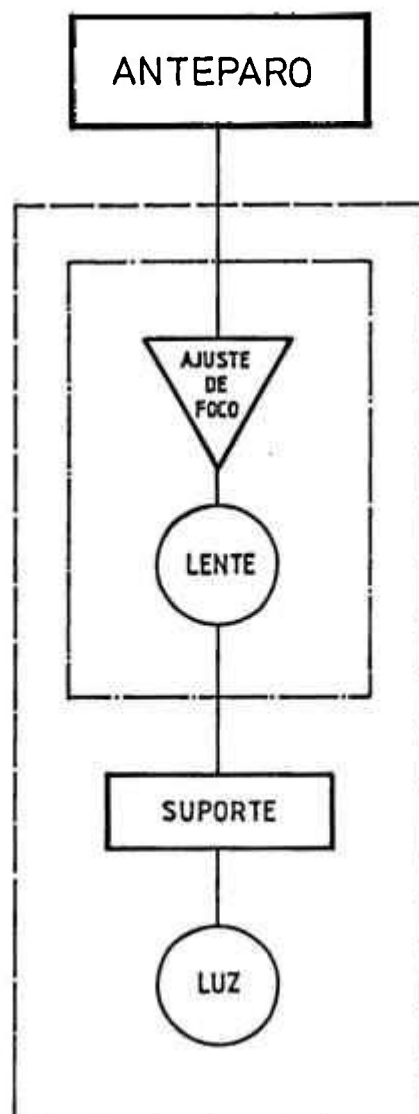


FIGURA 10 - Representação esquemática do projetor de slides utilizado nas leituras dos detectores.

III.5.2 - SISTEMA ANALISADOR DE IMAGEM

O sistema é formado por um microscópio óptico, uma câmera de vídeo e um micro computador com uma placa digitalizadora.

O detector é colocado no microscópio óptico (modelo Diplan da Wild Leitz) e por meio de um adaptador, uma câmera (Kentek -tipo vidicon) capta a imagem e a transmite para uma placa gráfica (Targa MB) onde é digitalizada e armazenada na memória da própria placa.

Por meio de um pacote de rotinas gráficas (Halo), pode-se acessar e transferir a imagem armazenada para a memória de um micro computador (IBM-XT) onde é processada.

A imagem digitalizada tem uma resolução de 256x200 "pixels" com 256 tons de cinza (na memória do computador cada "pixel" representa 8 bits, sendo que cada imagem representa um volume de dados de 64kbytes).

As rotinas de análise de imagem foram desenvolvidas em linguagem C, assim como a biblioteca Halo adquirida.

Os "softwares" desenvolvidos no Laboratório do Acelerador Linear do IFUSP, Jonen & Cohenca, 1991 permitem controlar a placa Targa e efetuar o processamento da imagem de interesse.

Parte-se do princípio que os traços a serem identificados possuem forte contraste, entretanto deve ser observado que nem todas as regiões de forte contraste representam traços, ruídos ou sujeiras podem também afetar as leituras.

Traços são identificados na imagem por meio de uma regra de seleção. Esta regra de seleção é conhecida como método para reconhecimento de padrões. Para esta identificação são considerados três procedimentos básicos:

- 1- identificação de regiões da imagem com forte contraste em relação ao fundo ("background" da imagem);
- 2- levantamento das características individuais do traço como: borda, área, perímetro, e limites;

3- estabelecimento de critérios comparativos, como tamanho mínimo de traço e razão perímetro/área.

Pela teoria de processamento de imagens, uma imagem é matematicamente definida como uma função bidimensional $I(x,y)$ definida numa certa região. Ao valor de $I(x,y)$ num dado ponto (x,y) dá-se o nome de tom de cinza que representa a intensidade de luz incidente na câmara neste mesmo ponto.

Uma imagem digitalizada é aquela onde a função só é definida numa grade retangular, onde os seus valores x , y e $I(x,y)$ são quantizados, podendo ser vista como sendo uma matriz de pontos com N linhas e M colunas.

Uma rotina específica analisa a descontinuidade de imagem gerada em função da presença de traços. A imagem $I(x,y)$, estudada é composta por objetos escuros sobre um fundo claro (background da imagem), de forma a apresentar a seguinte distribuição em frequência:

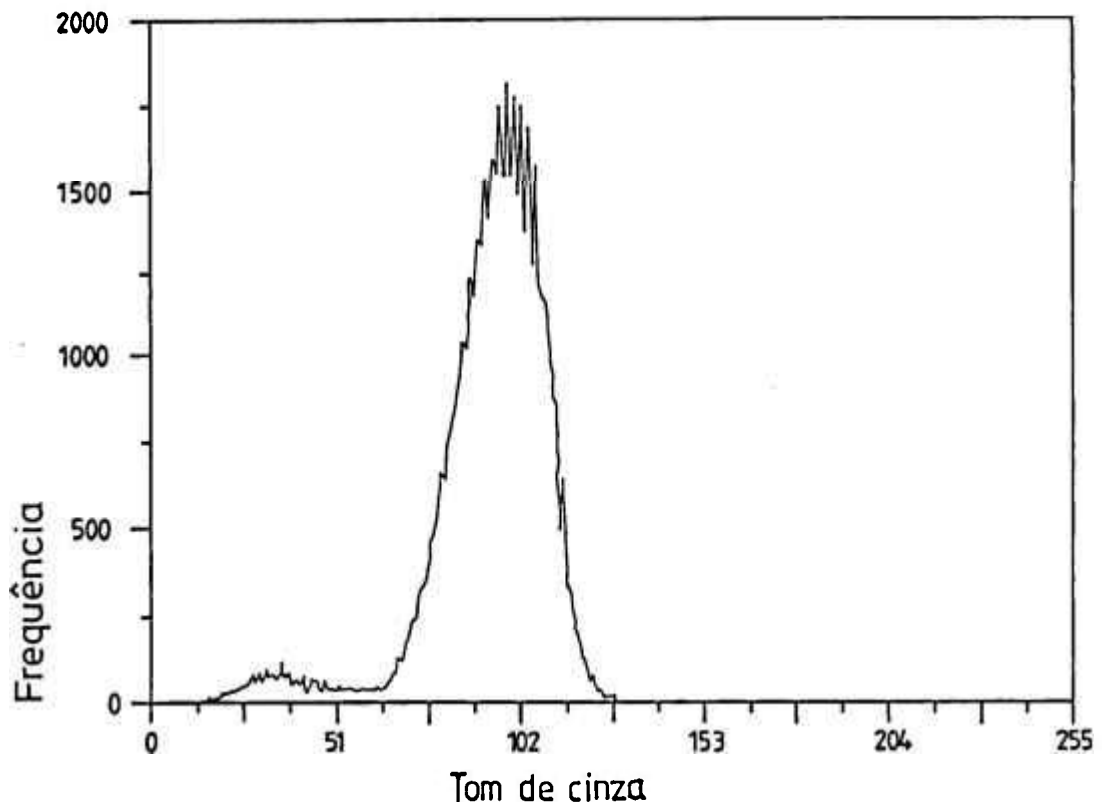


FIGURA 11 - Distribuição em frequência da imagem digitalizada.

Visando a identificação dos traços para estabelecer o valor de corte, K, adotou-se como critério 60% do valor da média desta distribuição, K, este valor apresentou-se o mais adequado [21]; desta forma, qualquer ponto (x,y) para o qual $I(x,y) < K$ pertencerá ao traço, caso contrário, comporá o "background" da imagem.

Assim sendo: $K = K - \sigma = 0,6 K$
 K = valor de corte

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{i,j}(x,y)}{M N} \quad (5)$$

Após obter o valor de corte (K), o programa determina o centro de massa do traço e avalia as coordenadas de borda do mesmo, definindo o raio vetor e calculando o raio médio, então é obtido o valor da área; sendo por meio de outras rotinas exercidos os procedimentos dois e três.

A figura 12 apresenta esquematicamente este sistema de leitura.

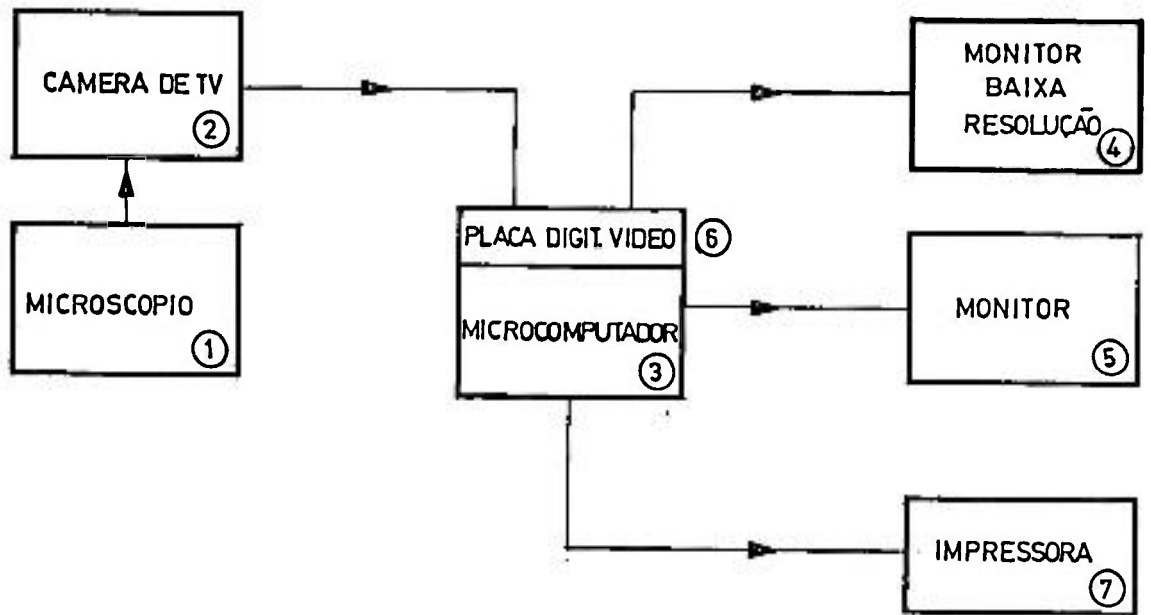


FIGURA 12 - Representação esquemática do sistema analisador de imagem utilizado nas leituras dos detectores.

IV - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

IV.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho pode ser dividido em duas etapas: numa primeira etapa foi buscada uma condição de revelação na qual fosse encontrado o melhor valor de sensibilidade possível aliado a menor dependência energética da resposta do detector a nêutrons rápidos.

A segunda etapa consistiu na determinação de condições satisfatórias para a revelação de traços devidos a nêutrons térmicos, ou seja, revelação de traços induzidos por partículas alfa provenientes da reação $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, sendo a energia da partícula alfa emitida 1,47MeV.

Para atingir o propósito deste trabalho foi necessário o estudo da influência dos vários parâmetros envolvidos na revelação do material com a utilização de PEW como solução reagente, e a comparação com resultados anteriores obtidos com a revelação em NaOH [43] e resultados da literatura [6,11].

Foram determinadas as sensibilidades e fluências máximas e mínimas registráveis pelo detector para o campo de nêutrons das duas fontes disponíveis e para nêutrons térmicos, com os respectivos equivalentes em dose.

IV.2 - A SOLUÇÃO REAGENTE

No processo de revelação de polímeros as soluções alcalinas são especialmente empregadas em várias concentrações.

As soluções de hidróxido de sódio (NaOH), e hidróxido de potássio (KOH) são as mais estudadas na revelação eletroquímica do material CR-39 [25] .

Neste trabalho foi estudada a solução PEW (15% KOH; 40% etanol e 45% água desionizada, em peso), uma solução altamente reativa.

Esta solução ataca violenta e rapidamente o material detector, a revelação em solução de KOH com adição de álcool reduz a sensibilidade do plástico, porém foi verificado que diminui a variação da sensibilidade com a energia [36,43].

A solução PEW até o presente momento foi muito pouco estudada como solução reveladora do material CR-39.

IV.3 - OS DETECTORES

O detector analisado é o CR-39 com adição de 0,2% Dop e 2,6% de IPP, produzido pela *Pershore Moundings*, Inglaterra.

Tendo sido recebido em janeiro/1990, o corte das amostras foi feito a "laser" no Instituto de Estudos Avancados - CTA, em círculos de 3,5 cm de diâmetro.

Esta geometria foi escolhida em função de melhor se adaptar ao conjunto de células utilizado nas revelações eletroquímicas otimizando o aproveitamento do material.

Amostras das várias placas do material foram medidas, a espessura dos detectores é $(507 \pm 56) \mu\text{m}$.

Os detectores foram armazenados na ausência de luz a temperaturas inferiores a 10°C.

IV.4 - O SISTEMA DE IRRADIAÇÃO

IV.4.1 - A FONTE DE AmBe

Utilizou-se neste trabalho uma fonte de AmBe de 5Ci. Esta fonte foi produzida pela Amershan a partir da compactação do radioisotopo Am-241 com Be-9. Calibrada pelo IRD-CNEN, sua taxa de emissão é $(1,12 \pm 0,02) \times 10^7$ nêutrons.segundo⁻¹.

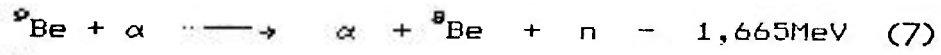
Medidas preliminares visando um melhor conhecimento das condições de irradiação mostraram que esta fonte apresenta uma uniformidade de emissão quanto a distribuição angular de 6,4%.

O Am-241 é um emissor alfa de meia vida igual a 433 anos, a principal reação por meio da qual nêutrons são produzidos é:



A reação ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ apresenta um rendimento de um nêutron a cada 10^4 partículas alfa emitidas [37].

O espectro de emissão desta fonte é mostrado na figura 13, este espectro é resultado da continua perda de energia da partícula alfa na sua interação com o meio em que se encontra, e o fato de para cada energia da partícula alfa serem possíveis diferentes energias de nêutrons devido as diferentes direções de emissão possíveis, além do que o núcleo produto C-12, pode ser deixado num estado excitado, podendo se desexcitar por emissão de um nêutron de energia diferente de 5,71MeV; outro fator é a existência de um número significativo de nêutrons com energia inferior a 1MeV que resultam de reações concorrentes com a reação (6).



A energia média do espectro de nêutrons desta fonte é aproximadamente 4,3MeV.

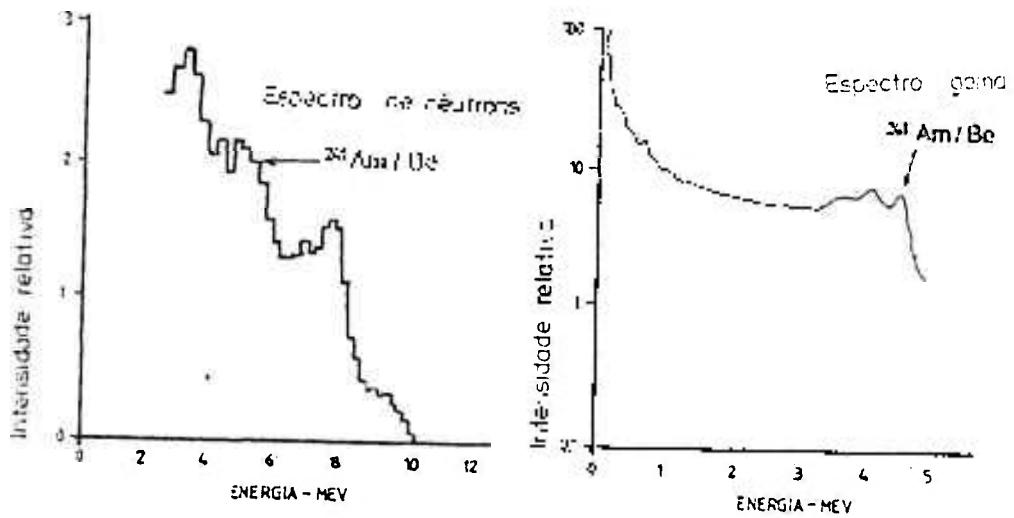


FIGURA 13 - Espectro de emissão de uma fonte de AmBe [37].

IV.4.2 - A FONTE DE Cf-252

Foram utilizadas duas fontes de Cf-252. Uma delas, no arranjo NR (arranjo utilizado para irradiações com nêutrons rápidos), apresenta uma massa da ordem de micro gramas distribuída ao longo do seu volume 44cm^3 , apresentando uma taxa de emissão de $(1,29 \pm 0,15) \times 10^7$ nêutrons.segundo⁻¹ em julho/91.

A outra utilizada como fonte de nêutrons termalizados, arranjo NT (arranjo utilizado para irradiações com nêutrons térmicos), fornece um fluxo na posição de irradiação da ordem de 10^4 nêutrons.cm⁻².s⁻¹

O Cf-252 produz nêutrons por fissão espontânea, trata-se de um elemento instável que decai por dois canais: fissão, cujo espectro de nêutrons tem uma energia média de 2,1MeV e emissão alfa de 6,117 MeV.

A meia vida do Cf-252 é de 2,65 anos, sua meia vida de fissão é de 85,5 anos, emitindo em média 3,76 nêutrons por fissão.

O espectro de fissão do Cf-252 é caracterizado por uma maxwelliana, figura 14. Este espectro é resultado dos processos estatísticos.

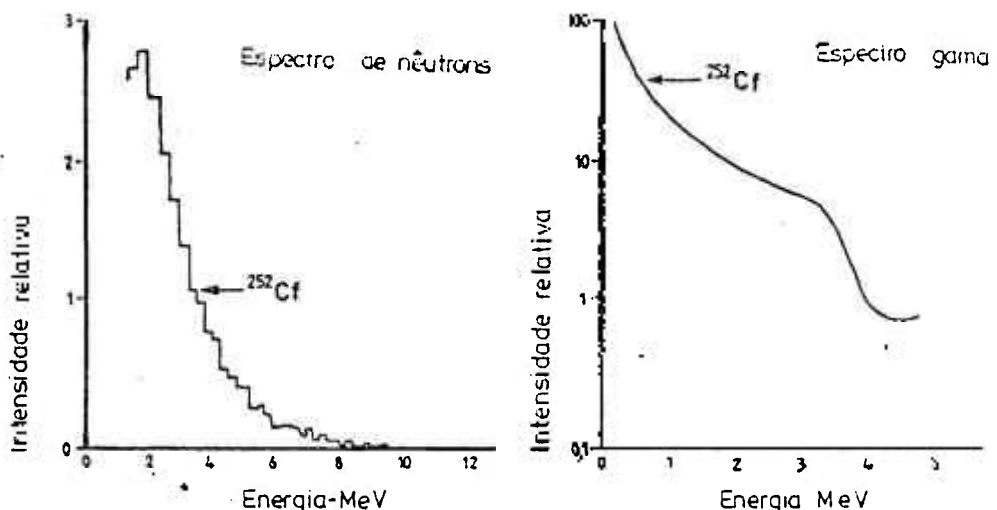


FIGURA 14 - Espectro de emissão de uma fonte de Cf-252 [37].

IV.4.3 - IRRADIAÇÕES COM NÊUTRONS RÁPIDOS

Para a realização das irradiações o material foi envolto em papel alumínio. Este procedimento contribui para a proteção do detector evitando danos durante o manuseio.

As irradiações com a fonte de AmBe foram realizadas em ângulos entre 0 e 2π , enquanto que nas irradiações com Cf-252 foi mantido o mesmo ângulo de emissão.

As irradiações foram realizadas no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, num salão projetado especialmente para irradiações com nêutrons, as dimensões do salão são de 4m x 10m x 14m.

No centro deste salão um sistema (arranjo NR) permite as irradiações, figura 15.

As fontes são armazenadas num depósito no subsolo, que comporta várias fontes. Com o auxílio de um seletor pode-se isolar a fonte desejada. Um condutor permite que a fonte escolhida deslize em seu interior podendo assumir diferentes posições a diferentes alturas.

A parcela de nêutrons espalhados detectada na posição de irradiação foi de 2,8% [12], esta posição corresponde a 3m do solo (posição de menor espalhamento).

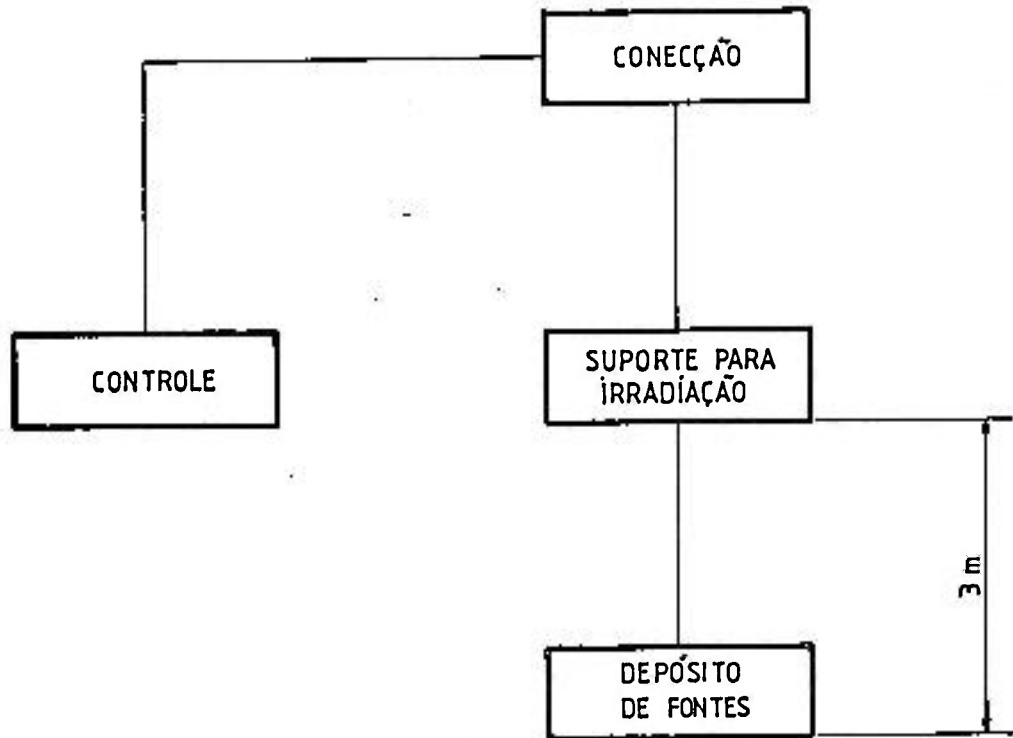


FIGURA 15 - Arranjo utilizado para as irradiações com nêutrons rápidos.

IV.4.4 - IRRADIAÇÕES COM NÊUTRONS TÉRMICOS

Nas irradiações com nêutrons térmicos, detector e conversor justapostos foram envoltos em papel alumínio; utilizou-se o arranjo NT, figura 16.

Este arranjo consiste de um tambor contendo parafina (moderador), com um canal central onde a fonte é inserida e três canais equidistantes onde são realizadas as irradiações.

A medida do fluxo foi feita pelo Laboratório de Metrologia do IPEN, a técnica empregada foi a ativação de folhas de ouro.

O fluxo de nêutrons térmicos medido no canal e na posição de irradiação foi $(2,69 \pm 0,05) \times 10^4$ nêutrons. $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Detectou-se a presença de nêutrons epitérmicos com fluxo de $(2,3 \pm 0,2) \times 10^4$ nêutrons. $\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

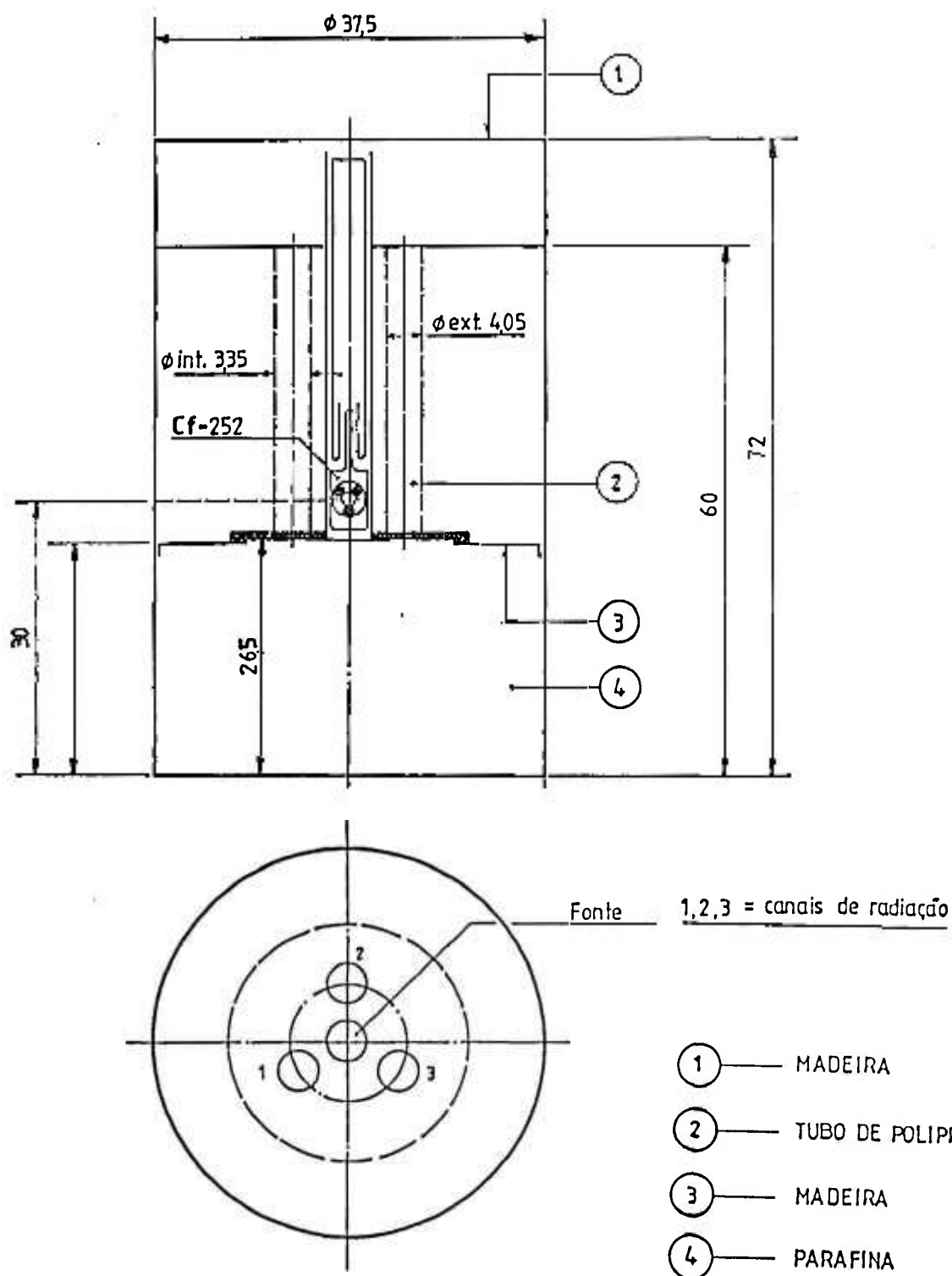


FIGURA 16 - Arranjo utilizado para as irradiações com nêutrons térmicos.

IV.5 - REVELANDO OS DETECTORES

Para a realização de revelações por meio desta técnica foram utilizadas células múltiplas, figura 17, que permitem que numa mesma revelação estejam sob o processo vários detectores, estas células são circulares confeccionadas em lucite, retentores são utilizados para melhor adesão célula-detector, o conjunto é preso numa morsa.

O detector é intercalado entre as células formando compartimentos independentes. A superfície do detector que será revelada deve permanecer em contato com uma solução reagente (solução alcalina), neste trabalho (PEW ou NaOH), e a superfície oposta permanece em contato com uma solução condutora, foi utilizado cloreto de sódio (NaCl) em água. Neste trabalho foram reveladas as superfícies opostas às irradiadas.

O campo elétrico aplicado é produzido por uma fonte de alta tensão (rms), da marca 3E, modelo PWO-510, de fabricação italiana, esta fonte apresenta as seguintes especificações:

- tensão (0 a 5kV) alternada regulável de 1 a 10 kHz;
- miliamperímetro para acompanhamento da variação de corrente entre eletrodos (0 a 10mA);
- alarme automático que dispara em caso de aumento brusco de corrente (0 a 10mA);

Os polos positivos e negativos da fonte são conectados a um dispositivo ramificador em paralelo que permite a utilização de vários eletrodos positivos e negativos simultaneamente, dependendo do número de detectores revelados.

Eletrodos de aço inoxidável conectados a este dispositivo são introduzidos nas células (pelos mesmos canais por onde é inserida a solução).

Originalmente este sistema somente permite revelações a temperatura ambiente. Uma estufa foi adaptada para revelações a temperaturas superiores.

Neste caso, o conjunto de células e detectores com as respectivas conexões com a fonte de alta tensão é colocado no interior da estufa.

Um termômetro monitora a temperatura que foi medida em intervalos de 15min. durante aproximadamente duas horas em cada revelação. A variação máxima registrada foi de 3°C.

Na figura 19 temos uma representação esquemática de todo o conjunto para revelações eletroquímicas.

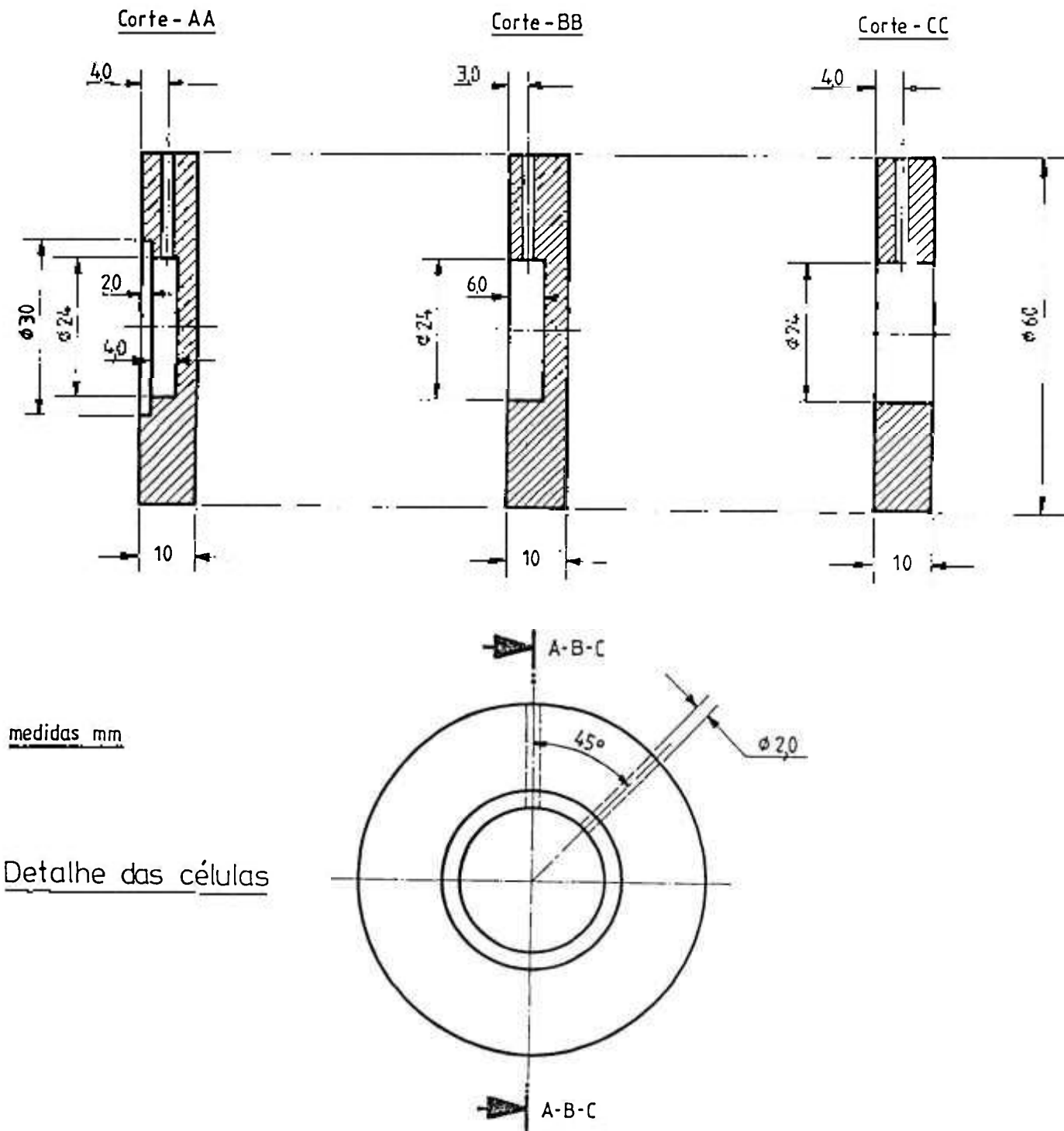
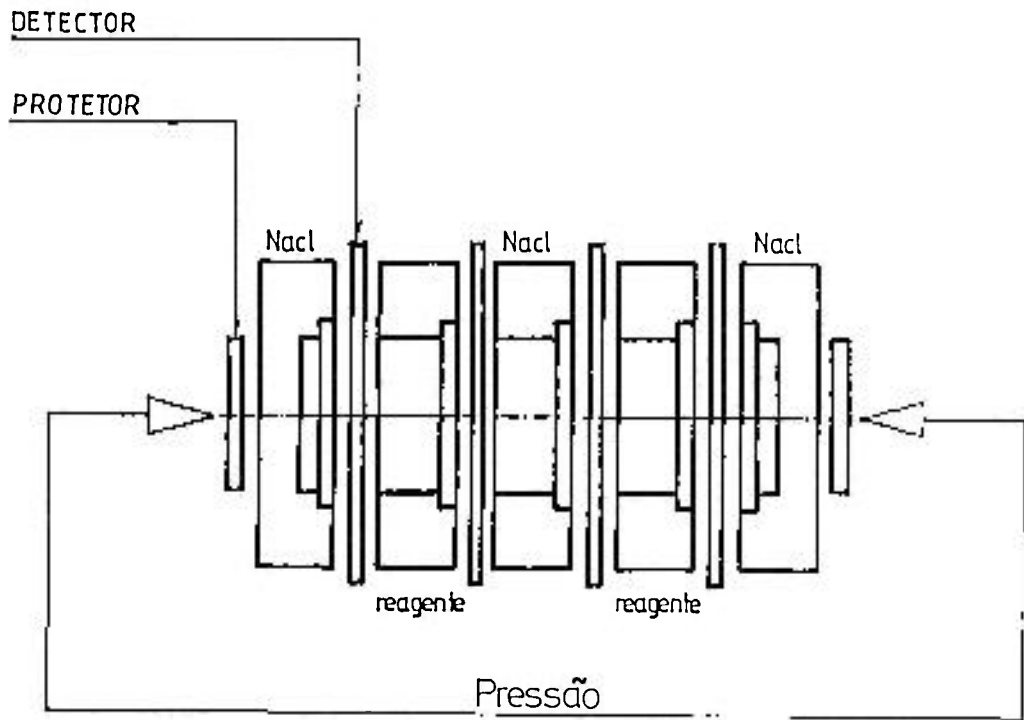


FIGURA 17 - Células utilizadas nas revelações eletroquímicas.



(LIGAÇÃO DOS ELETRODOS)

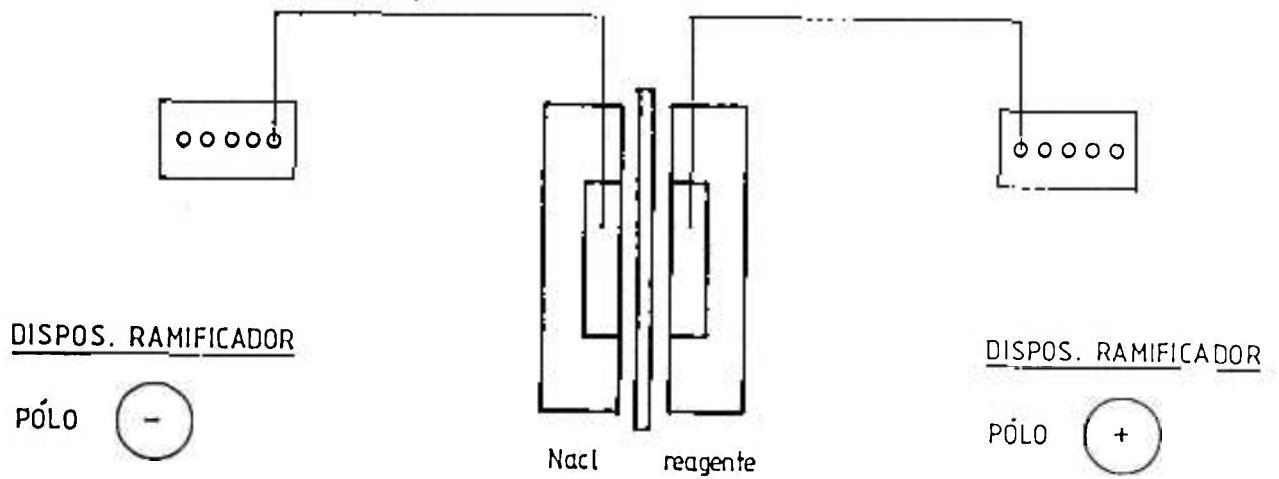


FIGURA 18 - *Conexão das células.*

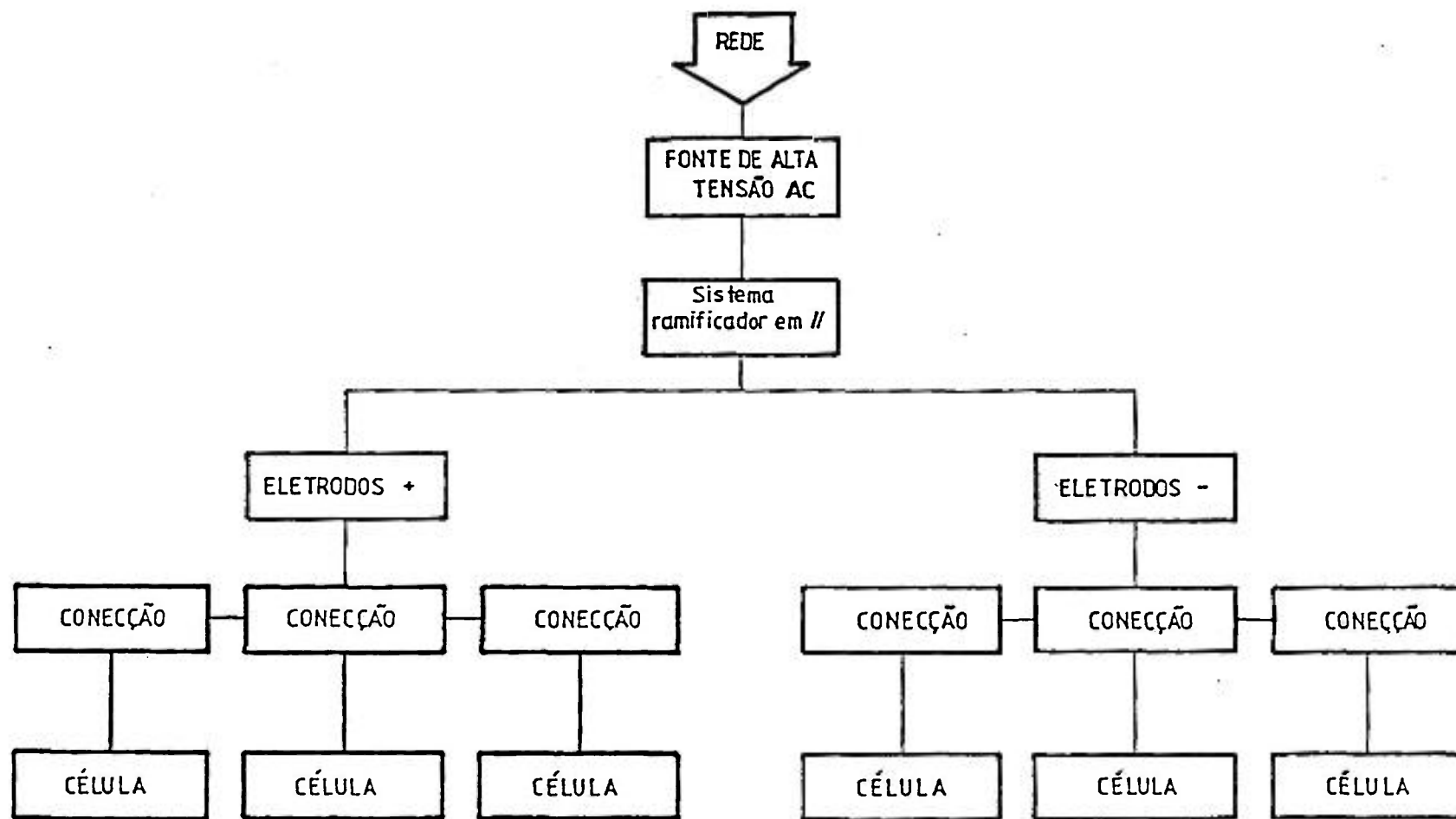


FIGURA 19 - Conjunto utilizado para revelações eletroquímicas.

IV.5 - AS LEITURAS

Este trabalho foi desenvolvido com a leitura dos detectores por meio de um projetor de "slides" (técnica de leitura principal no desenvolvimento deste trabalho) e um sistema computadorizado que permite a leitura semi-automática do detector.

Conservou-se a geometria de irradiação. O fluxo de nêutrons que atinge o detector é uniforme.

Ao se trabalhar com detectores sólidos de traços nucleares a única maneira de melhorar a estatística dos resultados é contar o maior número de traços possível.

Neste trabalho considerou-se no mínimo 1000 traços.cm⁻², isto oferece um erro percentual menor que 3%; para os detectores de "background", como apresentam uma densidade de traços pequena considerou-se aceitáveis erros menores que 6%. Entretanto tendo em vista que o maior erro verificado não é em decorrência dos erros estatísticos e sim da reprodutibilidade de todo o processo de irradiação, revelação e leitura, este último erro foi o utilizado para efeito do cálculo da sensibilidade.

Nas medidas do diâmetro dos traços é utilizada no microscópio uma ocular com escala, que é calibrada utilizando-se um micrômetro objeto.

O aumento utilizado nas leituras pelo projetor de "slides" é de aproximadamente 60 vezes.

Quando leituras foram realizadas por meio do S.A.I., os critérios de contagens foram os mesmos que os utilizados no projetor, além daqueles estabelecidos pelo próprio programa, os aumentos utilizados podiam variar de 20 a 700 vezes.

Na leitura de traços induzidos por nêutrons térmicos (diâmetros em média da ordem de 4 a 20 μ m) preferencialmente utilizou-se um aumento de 125 vezes, figura 20.

Na contagem de traços de protons de recuo (traços de dimensões em média da ordem de 25 a 200 μ m), utilizou-se o aumento de 40 vezes, com este aumento foi obtida uma melhor focalização.

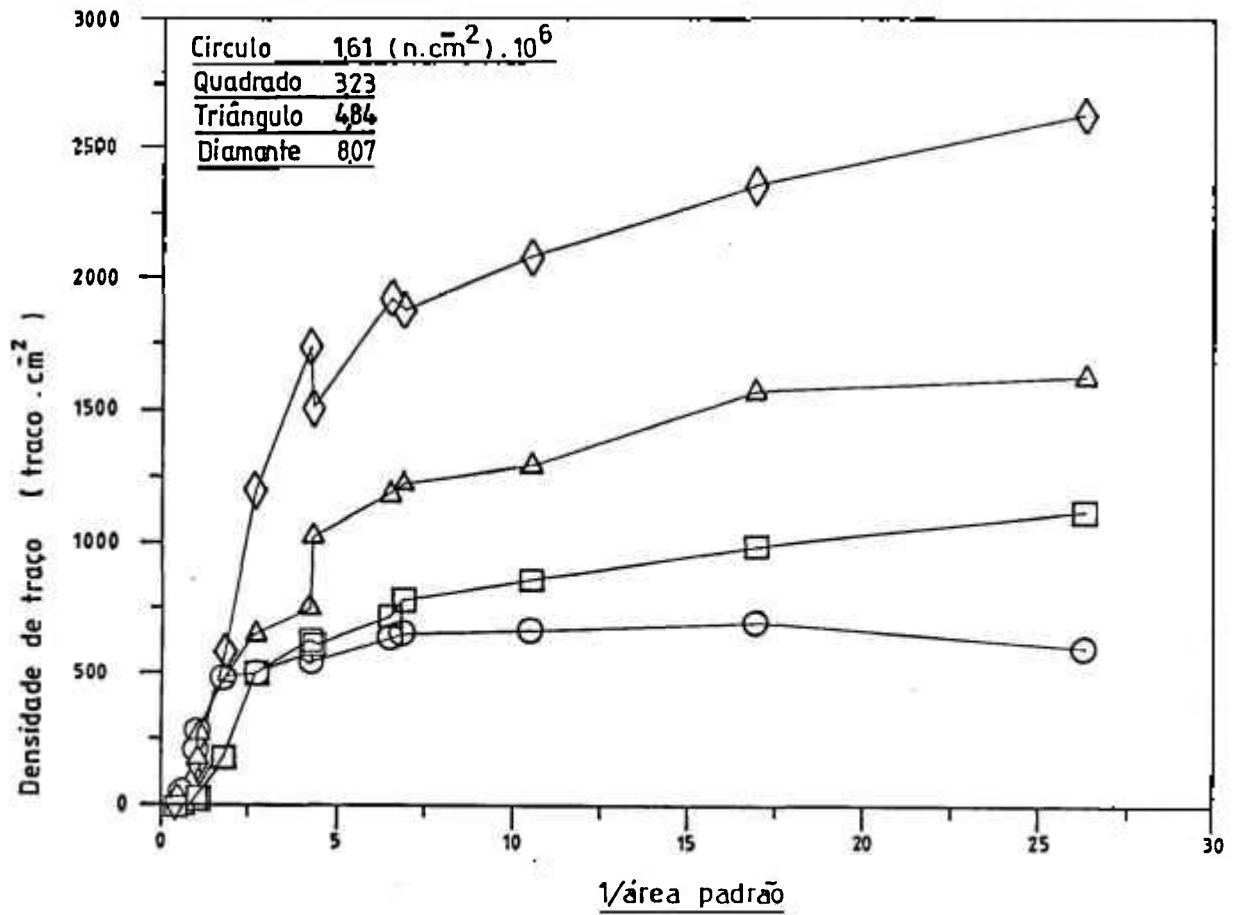


FIGURA 20 - *Os aumentos utilizados são inversamente proporcionais a área considerada para as leituras. As curvas mostram a influência do aumento nas contagens (S.A.I). (Apêndice B).*

V - DESEMPENHO DO SISTEMA DE DETECCAO

V.1 - NEUTRONS RAPIDOS

V.1.1 - EFEITO DE PARAMETROS ELETRICOS

Em um processo de revelação eletroquímica, a frequência e o campo elétrico podem afetar a sensibilidade de detectores plásticos, como é mostrado em extensivos estudos (e.g. Somogyi, 1977 [35]; Al-Najjar, Bull e Durrani, 1979 [1]; Sohrabi, 1980 [33]).

Dentro da faixa de frequência disponível (1 a 10kHz), a influência deste parâmetro é pequena tanto na sensibilidade, como dimensões de traços [43], desta forma fixou-se 2,0kHz, uma frequência amplamente estudada na literatura, garantindo estabilidade nas revelações. Embora a fonte em uso potencialmente permita a utilização de frequências até 10kHz, verificou-se oscilações indesejáveis acima de 5,0kHz

No estudo da influência do campo elétrico, detectores expostos a $2,92 \times 10^7$ nêutrons.cm² ($E_n \cong 4,3$ MeV) foram submetidos ao ataque eletroquímico, tendo sido verificada a resposta do detector numa faixa de tensão de 0,8 a 2,5kV. Os resultados são visualizados na figura 21, onde é apresentada a densidade de traços total registrada no material, assim como o comportamento do "background". Os detectores analisados foram submetidos ao processo de revelação à temperatura ambiente por 8h.

Os resultados obtidos neste estudo, em acordo com as considerações teóricas apresentadas anteriormente, mostram uma linearidade da resposta do detector em função do campo elétrico macroscópico, esta linearidade dentro de um determinado intervalo é

prevista nas considerações de Smythe [32], sendo neste estudo verificada entre aproximadamente 0,8 e 1,5kV ou em termos do campo entre 16 e 30kV.cm⁻¹. Nota-se que não somente os traços induzidos pela radiação incidente devem ser considerados, mas também o crescimento do número de traços de "background". O aumento exponencial dos traços de "background", limita a utilização do detector, figura 22. Existe um campo macroscópico crítico de aproximadamente 14kV.cm⁻¹. Este campo limiar foi obtido por extrapolação desta mesma curva. Submetendo-se o material detector a campos inferiores a este, não ocorre a ampliação dos traços.

Por meio da razão sinal ruído, figura 23, é avaliado o intervalo de tensão em que é possível a utilização do material sem perdas consideráveis nas contagens. Neste intervalo, compreendido entre 1,0 e 1,5kV, o "background" é o menor possível em relação a densidade de traços registrada, correspondendo a menos de 20%, neste caso.

O crescimento das dimensões médias de traço em função deste parâmetro pode ser visualizado na figura 24. Nota-se que a tensão de revelação afeta sensivelmente as dimensões dos traços.

Campos mais intensos revelam traços induzidos por recuos menos energéticos, o que é de grande interesse principalmente ao se trabalhar com PEW evitando desta forma que tais traços, formados nas camadas mais externas do detector, sejam perdidos reduzindo a sensibilidade do mesmo. Aplicando um campo de 30kV.cm⁻¹ foi obtida a melhor resposta, figura 22. Para este valor a análise da razão sinal/ruído, figura 23, não indicou perda significativa das contagens em função da contribuição do "background".

Desta forma, para dar continuidade ao trabalho optou-se pela utilização deste valor do campo nas revelações.

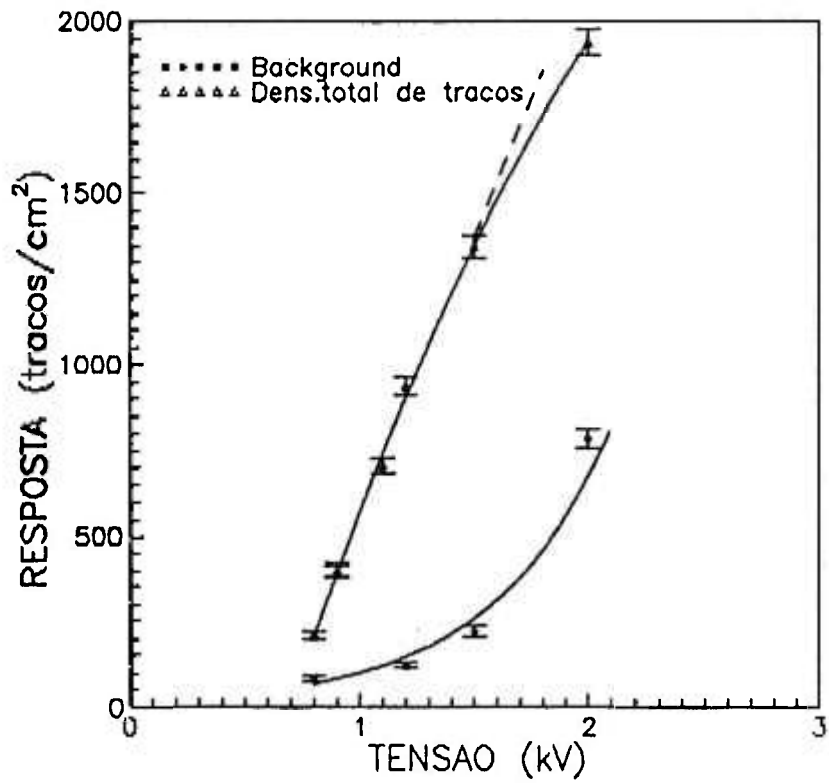


figura 21 - Contagens em função da tensão aplicada.

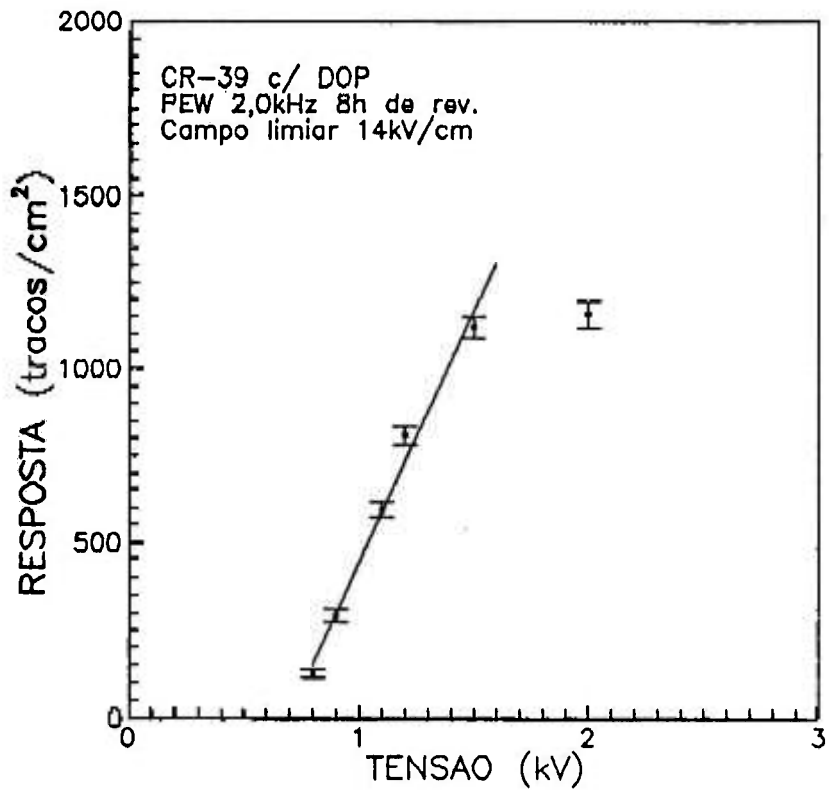


figura 22 - Contagem líquida em função da tensão aplicada.

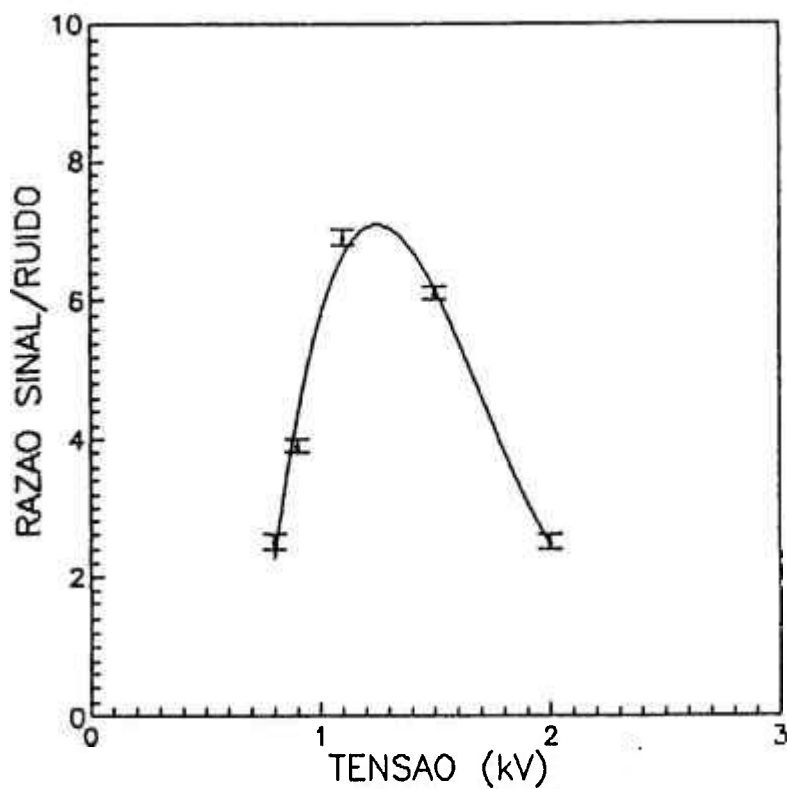


figura 23 - Razao Sinal/Ruido

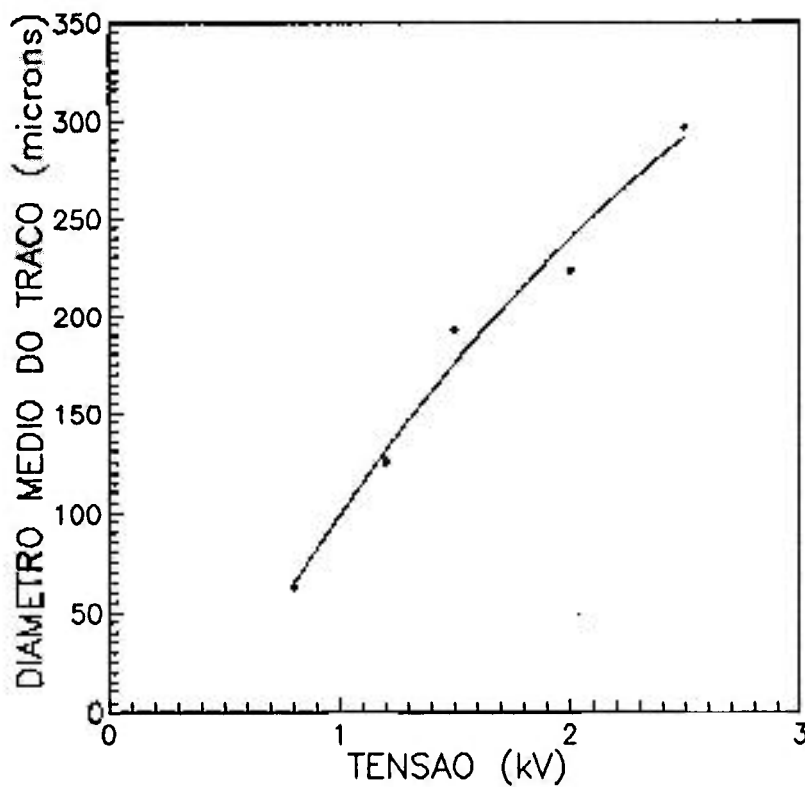


figura 24 - Variacao do diametro medio de traco em funcao da tensao aplicada.

V.1.2 - EFEITO DE PARÂMETROS DE REVELAÇÃO COMUNS AS TÉCNICAS QUÍMICA E ELETROQUÍMICA

Parâmetros, que em qualquer processo de revelação, afetam a resposta do detector são: solução, concentração, temperatura e tempo de revelação.

Neste trabalho estudou-se a resposta do material a diferentes temperaturas por vários períodos de revelação.

Da teoria é sabido, que longos períodos de revelação ampliam traços induzidos nas camadas mais profundas do detector, isto aumenta a sensibilidade do material, somente quando as dimensões de traço se tornam demasiadamente grandes para a densidade de traços que a área física do material comporta, e que a sensibilidade estabiliza-se chegando até a diminuir em função da dificuldade óptica para a discriminação entre traços.

A influência da temperatura no processo de revelação eletroquímica de detectores plásticos não é bem conhecida. Um efeito conhecido deste parâmetro no processo é relativo a velocidade de ataque. Mantendo-se a temperatura elevada durante o processo de ampliação, facilita-se a penetração da solução reagente no detector, conseqüentemente uma aceleração do processo de ampliação é esperada, efeito este, que concorda com os resultados apresentados na figura 25, considerando a evolução da resposta de 30 a 40°C, nota-se que o melhor desempenho do detector é obtido em aproximadamente 8h quando revelações são realizadas a 30°C, este valor foi reduzido para 4h com a elevação da temperatura a 40°C, tendo sido também verificado um aumento considerável na sensibilidade do material. Entretanto em temperaturas da ordem/ou superiores a 50°C, o comportamento observado não foi o esperado, isto se deve ao fato de que nesta temperatura a resposta não é bem definida, os traços não são bem delineados o que dificulta a análise.

Os traços de "background", figura 26, apresentam um comportamento exponencial em revelações acima de 40°C, acentuando-se com o aumento da temperatura.

Na figura 27, a razão sinal/ruído em função destes parâmetros pode ser analisada. Observa-se uma menor contribuição do "background" nos intervalos de aproximadamente seis a dez horas, duas a quatro horas e trinta minutos, e quatro a seis horas para as temperaturas 30, 40 e 50°C respectivamente, nesta análise considerou-se o intervalo no qual o "background" representa aproximadamente 20% das contagens (detector exposto a $2,92 \times 10^7 \text{ n.cm}^{-2}$). Dentro destes intervalos, nas respectivas temperaturas a principio pode-se utilizar qualquer dos tempos de revelação obtendo-se um bom desempenho do detector.

Por extrapolação das curvas apresentadas na figura 28, determina-se os tempos limiares para o aparecimento dos primeiros traços revelados, estes limiares são 170min. para revelações a 30°C e 40min. para revelações a 40 e 50°C.

O crescimento das dimensões médias de traços em cada um dos três casos pode ser visualizado na figura 29. Os diâmetros médios de traços considerando revelações a 40 e 50°C coincidem, entretanto trata-se de uma situação irreal, os traços revelados em 50°C não apresentam contornos definidos.

Nas condições: 1,5kV, 2,0kHz, considerando os vários períodos de revelação e as temperaturas analisadas, observa-se que aparentemente a resposta do detector esta sendo prejudicada pelas proporções das dimensões dos traços, figuras 28 e 29. A medida que as dimensões dos traços se tornam muito grande a análise do detector é imprecisa no sentido em que os traços próximos são indistinguíveis no processo de leitura do detector.

Neste estudo conclui-se que em revelações a 30°C (temperatura ambiente), bons resultados são obtidos num período de 8h, tensão 1,5kV; entretanto deve-se levar em consideração que neste caso trabalha-se com diâmetros relativamente grandes. A sensibilidade do material é aceitável, tabela 2.

A tabela 2 apresenta os valores de sensibilidade obtidos com a revelação do material CR-39 com e sem DOP utilizando NaOH* e PEW, 8h de revelação (condições de melhor resposta a temperatura ambiente, aproximadamente 30°C).

TABELA 2 - Sensibilidade do CR-39 a temperatura ambiente ($\cong 30^{\circ}\text{C}$).

SENSIBILIDADE		(traços.nêutron ⁻¹)	
NaOH* COM DOP	$(4,6 \pm 0,1) \times 10^{-5}$	NaOH* SEM DOP	$(3,5 \pm 0,5) \times 10^{-5}$ [43]
PEW COM DOP	$(3,9 \pm 0,1) \times 10^{-5}$		

* Na utilização de NaOH as condições de revelação são: concentração 20%, 1,5kV, 2,0kHz, 13h de rev., aproximadamente 30°C .

Conhecendo o comportamento da resposta do material em função dos parâmetros tempo de revelação e temperatura, o detector podera ser utilizado nas condições de maior rendimento, sendo conhecidas exatamente suas limitações.

Objetivando melhorar a resposta do detector, e o estudo do comportamento do material em revelações a temperaturas ainda superiores, o campo foi reduzido para 26kV/cm, ou seja, tensão de 1,3kV. Os resultados são apresentados na figura 30.

Esta redução no campo permitiu a observação da resposta do material a temperaturas até 60°C . Como resultado, até 50°C , observam-se curvas melhores definidas, e nota-se que o comportamento exponencial dos traços de "background" observado anteriormente, figura 26, não é decorrente só da temperatura de revelação mas principalmente da ação conjunta temperatura-tensão, figura 31. Nesta mesma curva é verificado um aumento considerável do "background" do material em função da temperatura.

Submetendo o material detector ao processo de revelação a 60°C , em aproximadamente 4h os traços começam a se descacterizar, e os diâmetros não podem mais ser definidos. A partir de 6h, tem início o fenômeno da degradação do detector.

Na figura 32, observa-se a razão sinal/ruído em função deste do tempo de revelação para as duas temperaturas estudadas 50 e 60°C .

A resposta do detector, (densidade líquida de traços) é apresentada na figura 33, por extrapolação destas curvas estima-se um tempo limiar para o surgimento dos primeiros traços

revelados em aproximadamente 80 min. considerando revelações a 50°C. Em revelações realizadas a 60°C este limiar não pôde ser definido.

A figura 34, apresenta o crescimento do diâmetro médio do traço em função do tempo de revelação. Reduzindo o campo, verificou-se uma redução global das dimensões do traço, o que é interessante no sentido em que amplia a fluência máxima que o detector comporta.

Na figura 35, pode-se notar um aumento de aproximadamente 100% na sensibilidade do material em função da temperatura, conclui-se portanto que as condições de melhor desempenho do detector na revelação em PEW são: 1,3kV, 2,0kHz, e 4h de revelação, 50°C.

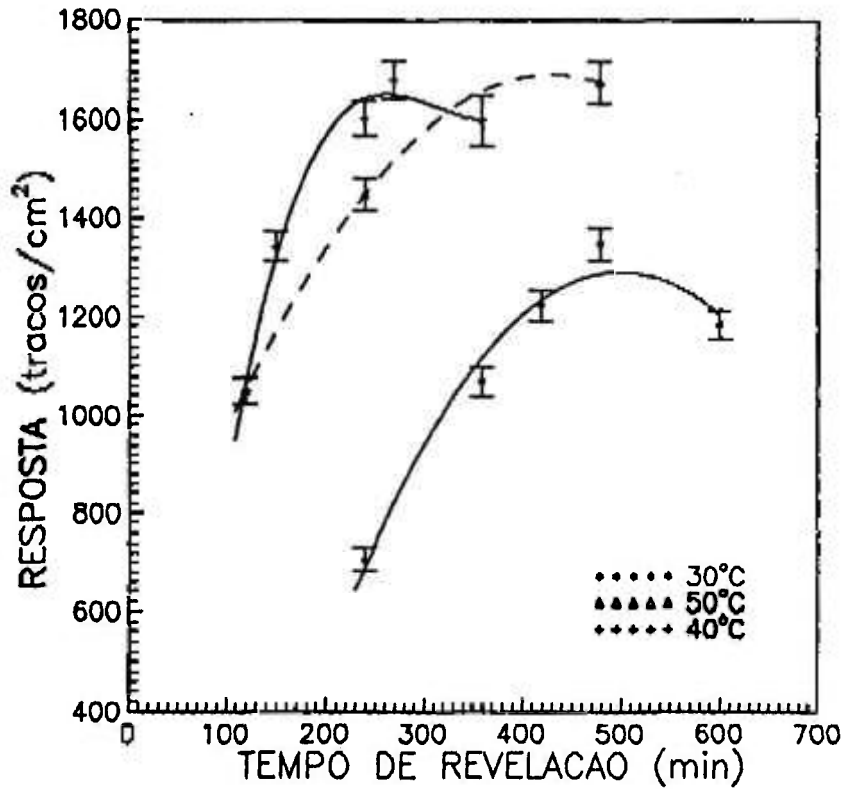


figura 25 - Resposta em funcao do tempo de revelacao para diferentes temperaturas. PEW 1,5kV.

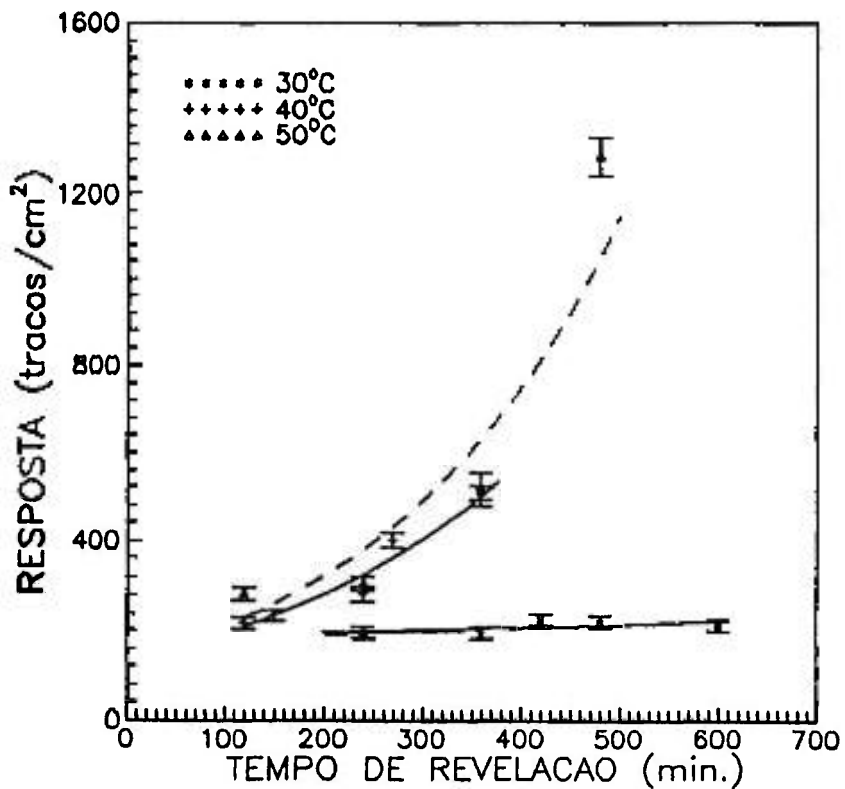


figura 26 - Crescimento do background em funcao do tempo de revelacao.

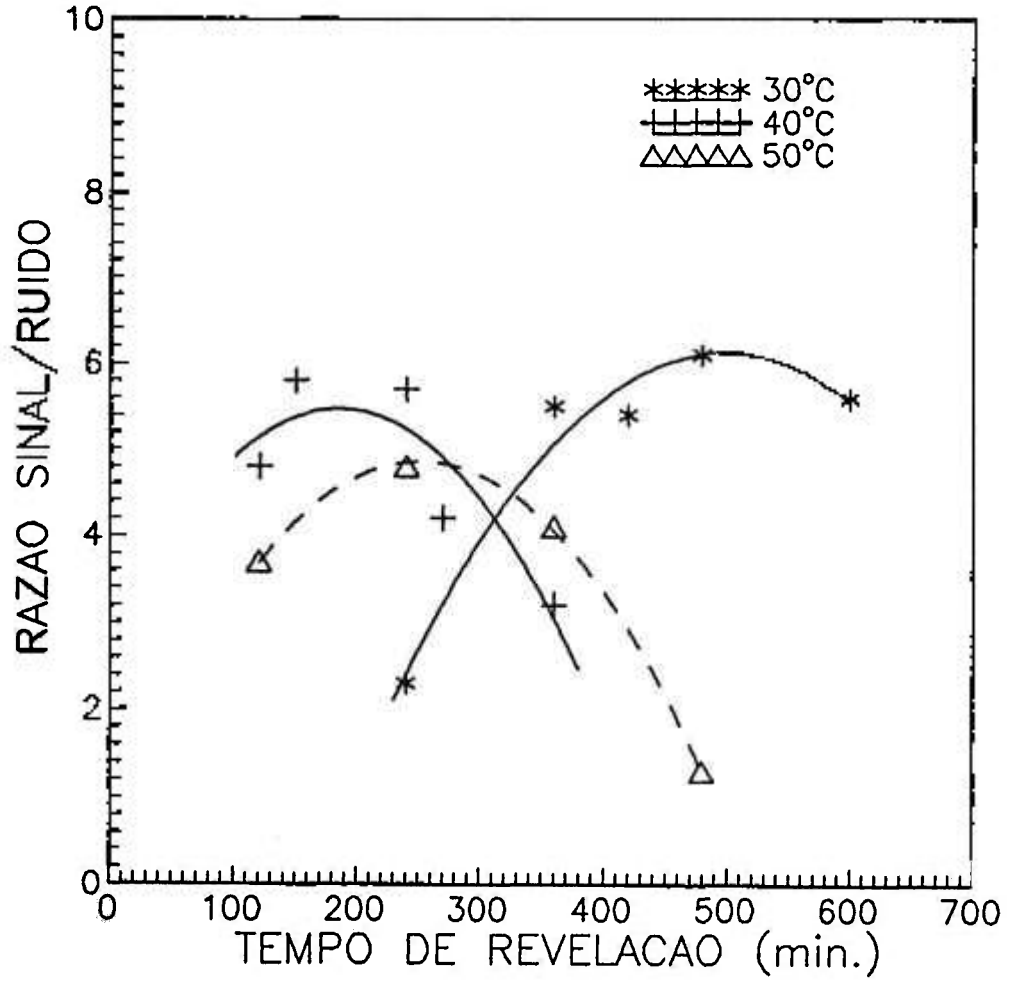


figura 27 - Razao Sinal/Ruido.

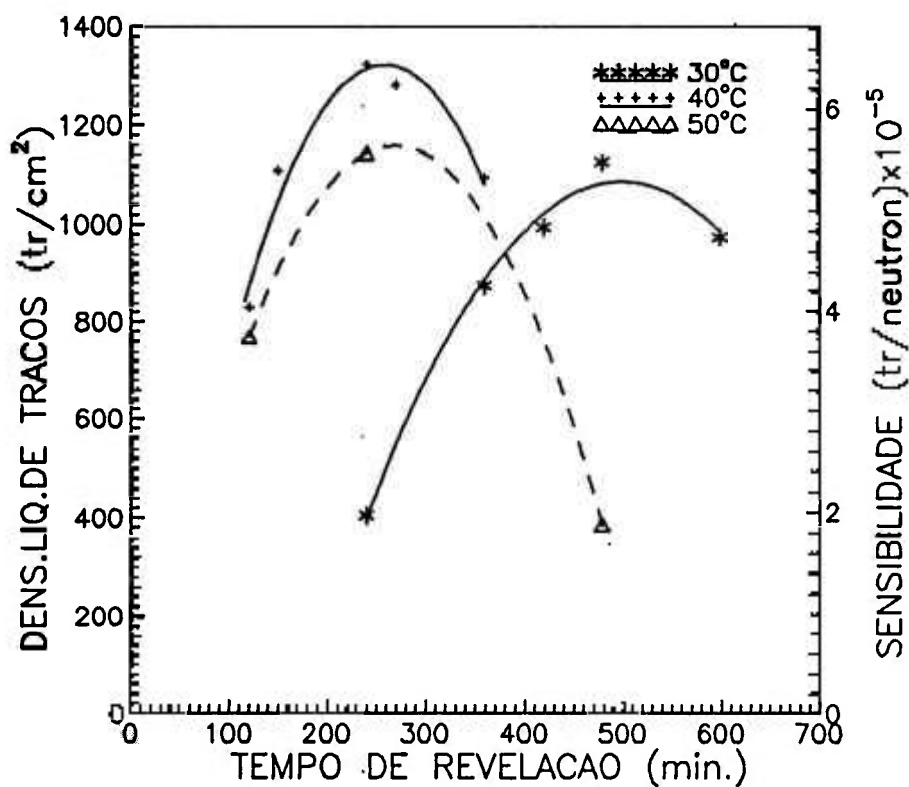


figura 28 - Resposta em funcao do tempo de revelacao.

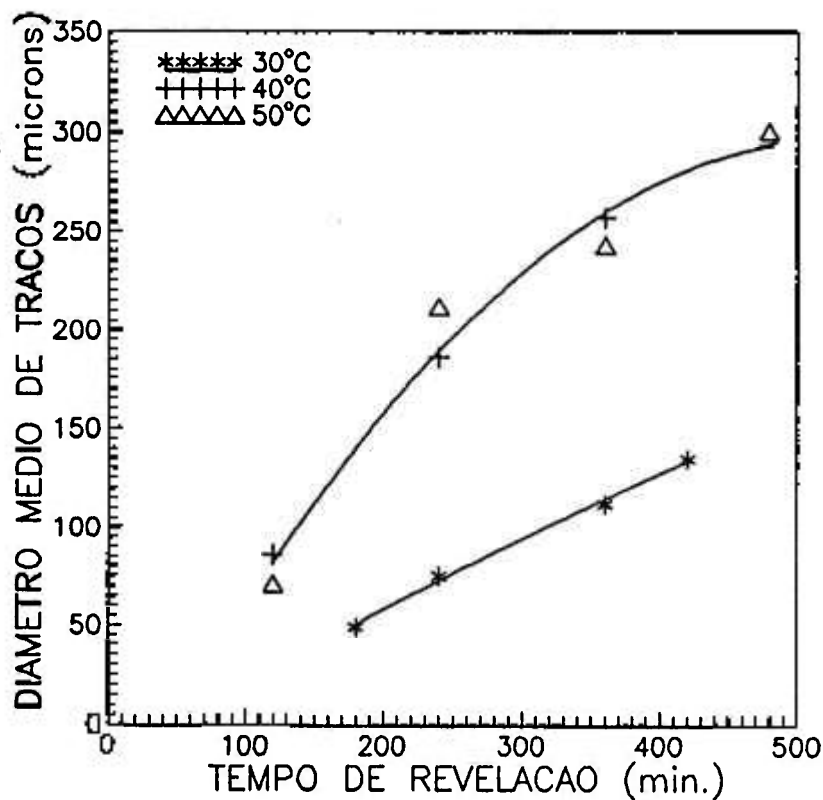


figura 29 - Variacao do diametro medio de traco em funcao do tempo de revelacao.

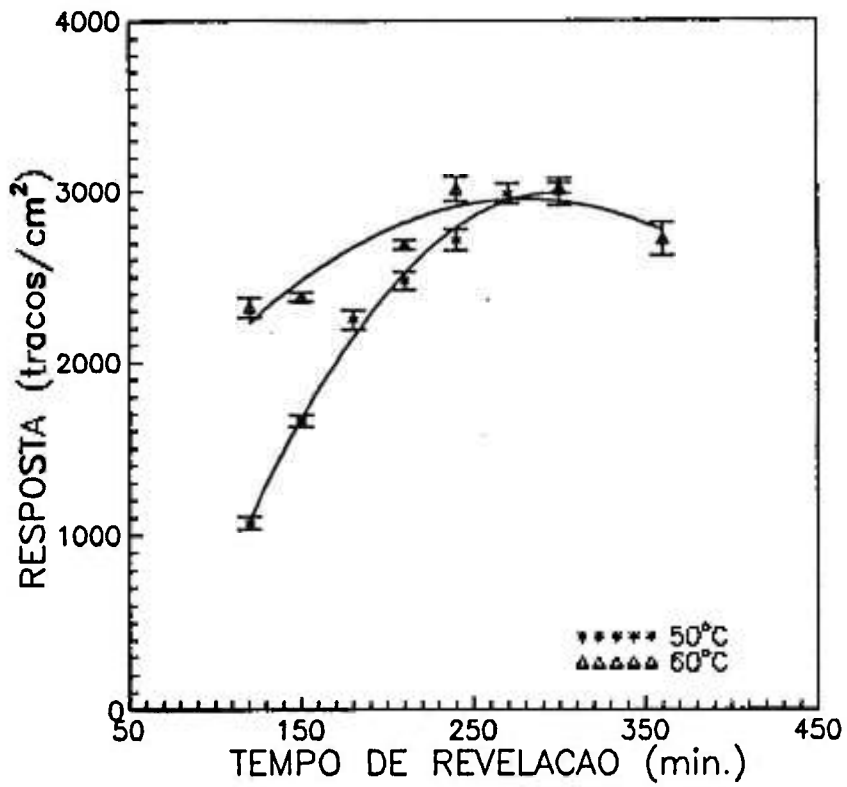


figura 30 - Contagens em função do tempo de revelação.

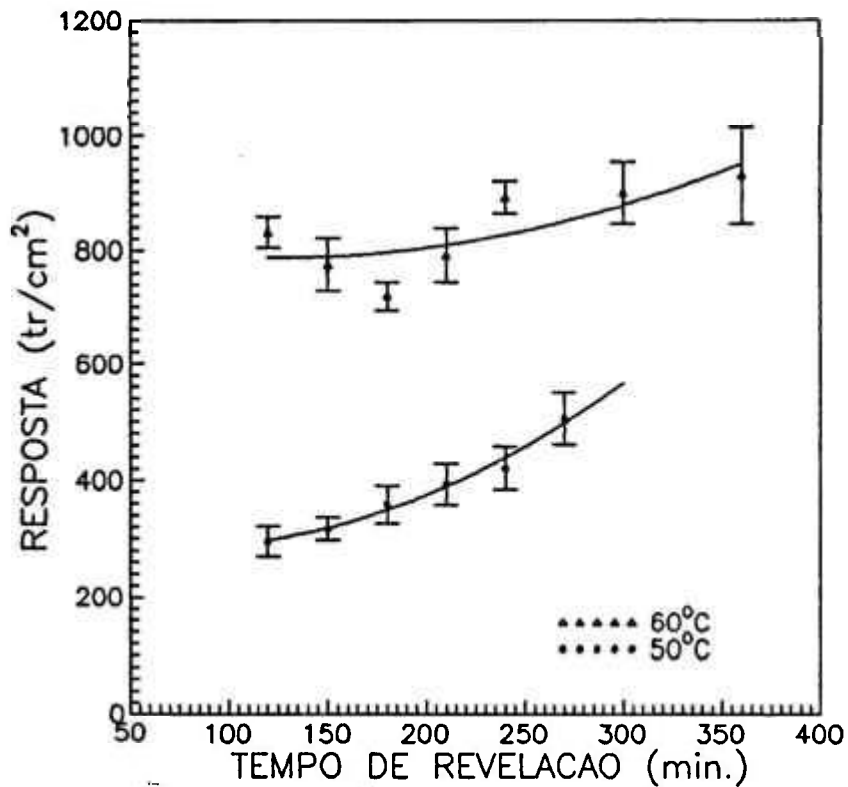


figura 31 - Crescimento do background em função do tempo de revelação.

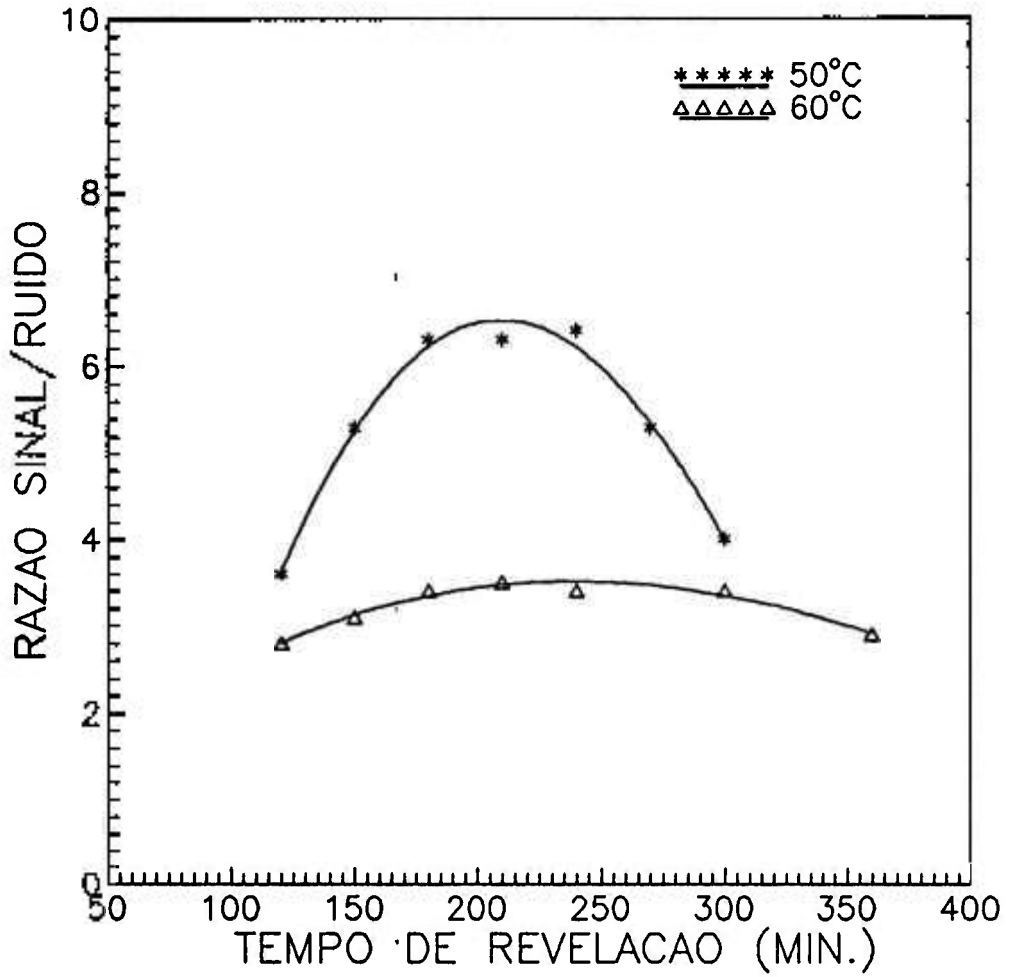


figura 32 - Razao Sinal/Ruido

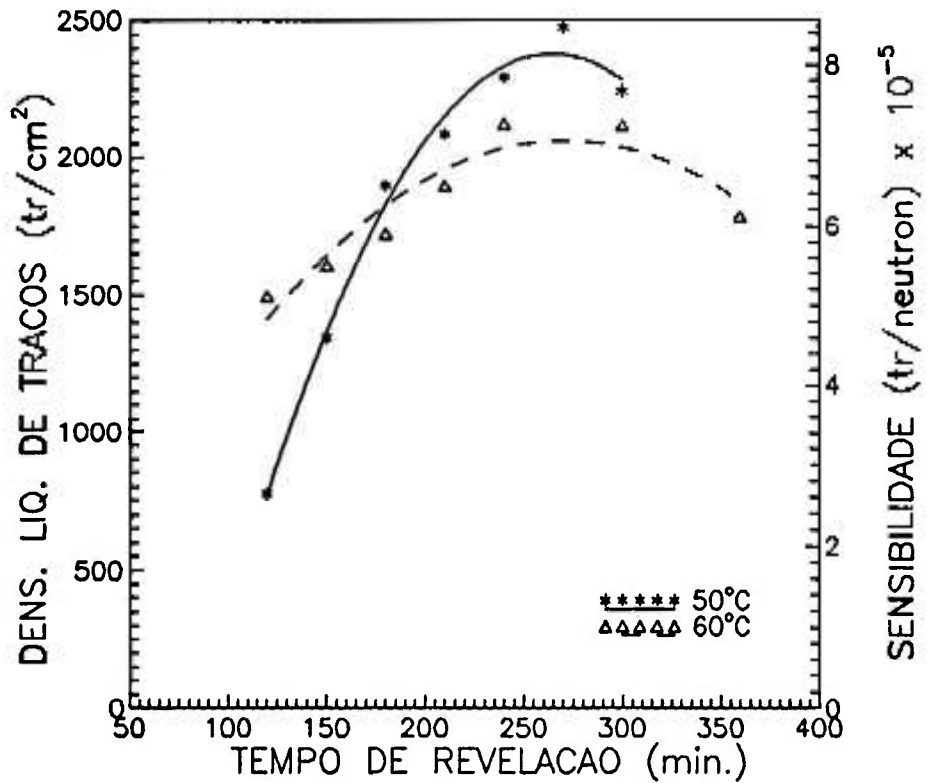


figura 33 - Resposta do CR-39 com DOP em função do tempo de revelação.

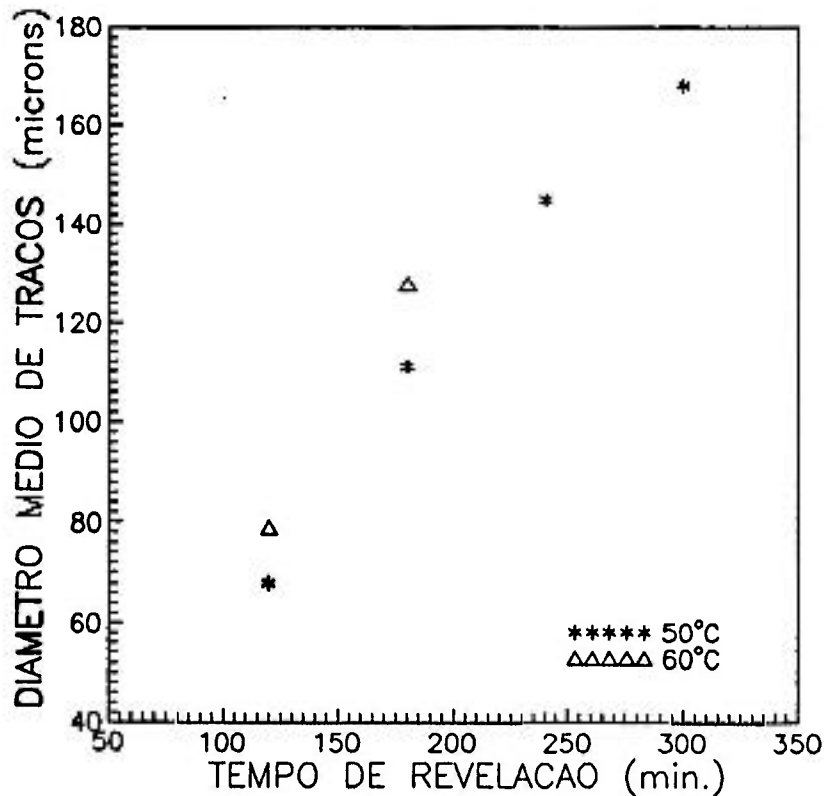


figura 34 - Variação do diâmetro médio de traco em função do tempo de revelação.

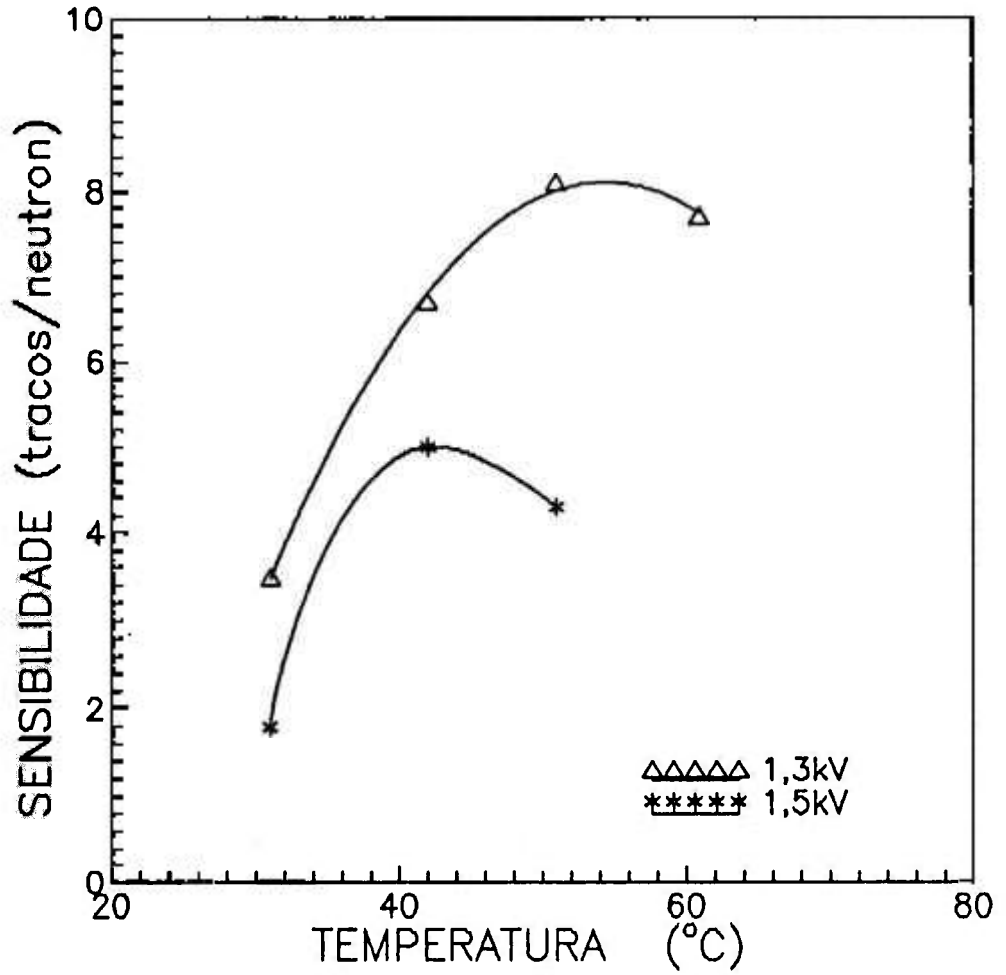


figura 35 - Sensibilidade do CR-39 com dop em função da temperatura de revelação para as duas tensões aplicadas.

V.1.3 - "BACKGROUND" & DOSE MÍNIMA DETECTADA

Os detectores para estudo do "background" foram manuseados e revelados nas mesmas condições que os detectores irradiados.

O material CR-39 foi avaliado com relação aos traços de fundo em uma das placas e em várias placas do material detector de mesmo lote/1990, nas melhores condições determinadas com o tratamento em PEW (tensão 1,3kV, frequência 2,0kHz, 4h, temperatura 50°C).

A variação de "background" considerando apenas uma das placas é apresentada na tabela 3.

O material CR-39 é sensível em todo seu volume, desta forma foi realizado um estudo analisando os traços de fundo em ambas as faces do material.

TABELA 3 - Traços de "background" (avaliando uma das placas do material detector).

AMOSTRAS	"BACKGROUND" (traços.cm ⁻²)	
	FACE 1	FACE 2
1	371 ± 22	421 ± 34
2	382 ± 19	422 ± 25
3	369 ± 22	443 ± 27
4	375 ± 23	438 ± 29

Nas várias placas do detector, os traços de "background" expressos em traços.cm⁻² variaram de 296 a 583 (despreza-se o valor 1114, por estar muito afastado da média. A placa 4 apresenta um "background" maior em relação ao conjunto).

Os resultados desta análise são apresentados na tabela 4.

TABELA 4 - Traços de "background" (avaliando várias placas do material detector).

AMOSTRAS	"BACKGROUND" (traços.cm ⁻²)	
	FACE1	FACE2
1	374 ± 22	431 ± 24
2	296 ± 18	583 ± 35
3	452 ± 27	526 ± 37
4	402 ± 24	1114 ± 33

Estes resultados são comparáveis àqueles obtidos em outros laboratórios [6,15], sendo que na referência 6, em particular, foi estudado o mesmo material (com a dopagem). É de conhecimento, que o tempo de armazenamento influi no crescimento do número de traços de "background". O material utilizado neste trabalho tem aproximadamente dois anos, sempre que possível o período de estocagem não deve ultrapassar a meses [6].

Em particular o CR-39 sem dopagem [43], apresentou um "background" médio de 18 traços.cm⁻², este fato não é comprovado mas é possível que o processo de fabricação (dopagem) possa ser responsável pelo crescimento acentuado do "background" no material em estudo.

É importante salientar que o "background" tanto na revelação nas condições aqui determinadas (PEW, 1,5kV, 2,0kHz, 8h rev., 30°C), quanto na revelação do mesmo CR-39 com DOP, nas condições extraídas da ref[43], (NaOH, 1,5kV, 2,0kHz, 13h rev., 30°C), apresentou-se em média o mesmo valor.

Nas condições de tratamento do material (PEW - 50°C), o "background" foi reproduzido dentro de 2%, face 1 e 3% face 2, considerando uma das placas.

Analisando as várias placas, foi obtida uma reprodutibilidade dentro de 17 e 15% para as faces 1 e 2

respectivamente, e 22% considerando ambos os lados.

A fluência mínima, ou dose mínima que o material detector pode registrar esta intimamente relacionada aos traços de fundo do material. Existem vários modos de estimar este limite mínimo detectável. Neste trabalho, este valor foi determinado de acordo com o critério utilizado por Piesch [24].

Por este critério a dose mínima detectada é definida como duas vezes o desvio padrão do valor médio do "background".

A dose mínima detectável, em geral, é fornecida em termos da sensibilidade determinada para nêutrons do espectro de emissão do Cf-252, portanto este valor mínimo avaliado para revelações nas condições: PEW, 1,5kV, 2,0kHz, 8h a temperatura ambiente $\approx 30^{\circ}\text{C}$, equivale a 30 traços. cm^{-2} , o que corresponde a uma fluência de $7,69 \times 10^5$ nêutrons. cm^{-2} ($3,9 \times 10^{-5}$ traços.nêutron $^{-1}$), equivalendo em dose a 0,3mSv.

Este estudo repetido para as melhores condições estabelecidas para revelações de nêutrons rápidos: PEW, 1,3kV, 2,0kHz, 4h, 50°C , leva a um limite mínimo correspondente a uma densidade de 44 traços. cm^{-2} ($8,8 \times 10^{-5}$ traços.nêutron $^{-1}$), equivalendo a uma fluência de $5,12 \times 10^5$ nêutrons. cm^{-2} ou 0,2mSv.

TABELA 5 - Limite mínimo registrável pelo sistema de detecção.

MELHOR RESPOSTA	2kHz	DENS. MINIMA (traços. cm^{-2})	FLUENCIA MINIMA * (nêutrons. cm^{-2})	DOSE MINIMA * (mSv)
PEW $\approx 30^{\circ}\text{C}$		30	$7,69 \times 10^5$	0,3
PEW $\approx 50^{\circ}\text{C}$		44	$5,12 \times 10^5$	0,2

* Conversão fluência em dose, ver apêndice A.

V.1.4 - SENSIBILIDADE

Para a determinação dos valores de sensibilidade considerou-se a expressão:

$$S \times \Phi = D \quad (6)$$

onde:

- S ... sensibilidade [traços.neutron⁻¹]
- Φ ... fluência [neutrons.cm⁻²]
- D ... densidade de traços [traços.cm⁻²]

Os valores de sensibilidade podem ser obtidos por dois métodos:

- 1- tangente da curva (*densidade de traços x fluência*)
- 2- média aritmética das sensibilidades obtidas para uma série de detectores expostos a mesma fluência.

A sensibilidade do detector é uma função do tempo de revelação, como pode ser visto pela figura 36, estas curvas apresentam a sensibilidade do detector para as duas energias médias avaliadas. Por meio das tangentes das curvas apresentadas na figura 37, este valor foi determinado, tabela 7, concordando perfeitamente com os valores da tabela 6, cujas sensibilidades foram obtidas pela

média aritmética de detectores expostos à mesma fluência.

TABELA 6 - Sensibilidade do material avaliada para o detector CR-39 com DOP exposto às emissões das fontes de Cf-252 e AmBe, em diferentes condições de revelação.

SENSIBILIDADE (traços.nêutron ⁻¹)x10 ⁻⁵			
Cf-252	NaOH - 30°C (13h)	PEW - 30°C (8h)	PEW - 50°C (4h)
	(5,0 ± 0,5)	(3,6 ± 0,5)	(8,2 ± 0,5)
RESPOSTA EM DOSE (traços.cm ⁻² .mSv ⁻¹)			
	130±8	94±6	213±13
SENSIBILIDADE (traços.nêutron ⁻¹)x10 ⁻⁵			
AmBe	NaOH - 30°C	PEW - 30°C	PEW - 50°C
	(4,9 ± 0,1)	(3,9 ± 0,1)	(8,0 ± 0,1)
RESPOSTA EM DOSE (traços.cm ⁻² .mSv ⁻¹)			
	118±7	95±6	193±12

Dos resultados apresentados na tabela 6 verifica-se praticamente uma independência energética da resposta (em dose) do material, que a principio pode-se atribuir a dopagem uma vez que considerando revelações nas soluções PEW e NaOH foi obtida a mesma variação.

Considerando revelações a temperatura superior a ambiente (50°), utilizando PEW como solução reveladora, foi obtida uma sensibilidade aproximadamente 50% maior que o valor encontrado à temperatura ambiente (8h de revelação), o que é bastante satisfatório. Detectores com alta sensibilidade apresentam uma capacidade maior de registro, o que permite a distinção entre pequenas variações de dose.

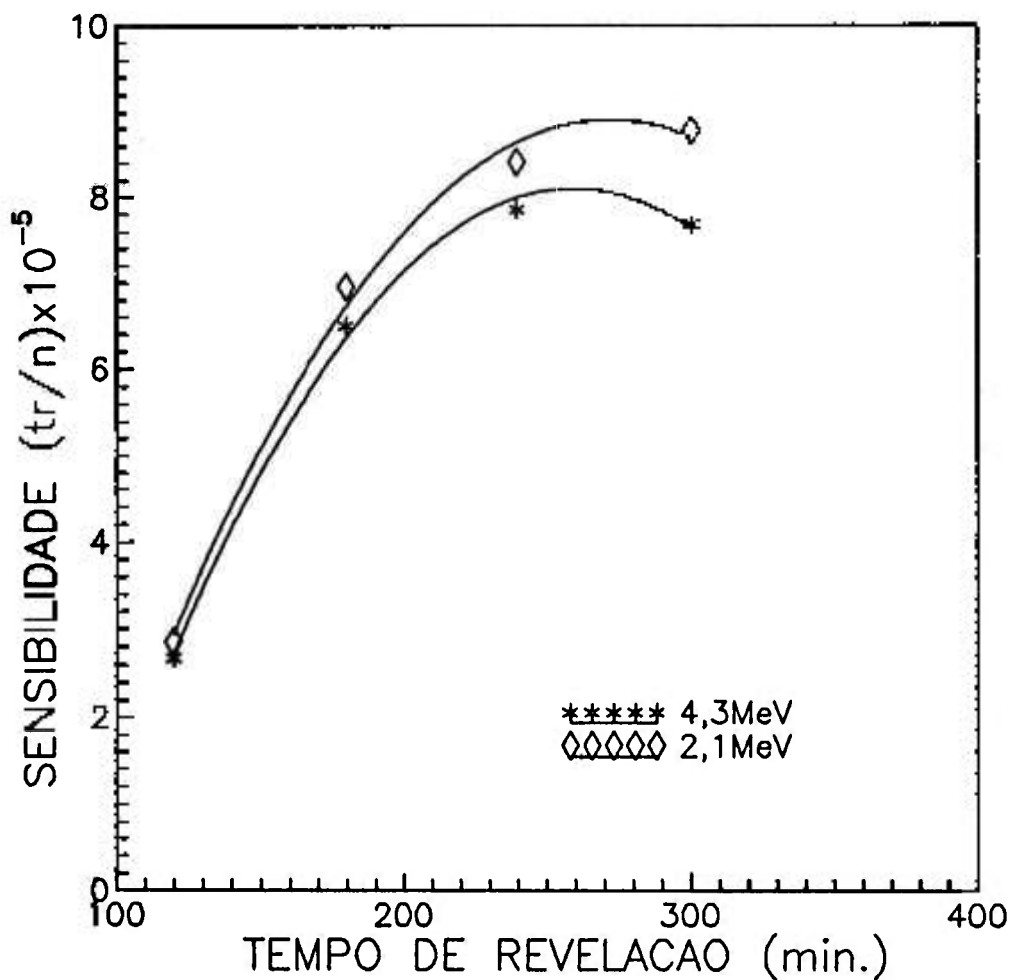


figura 36 - Sensibilidade do material CR-39 com DOP a neutrons provenientes de fontes de Cf-252 ($E_n = 2,1\text{MeV}$) e AmBe ($E_n = 4,3\text{MeV}$).

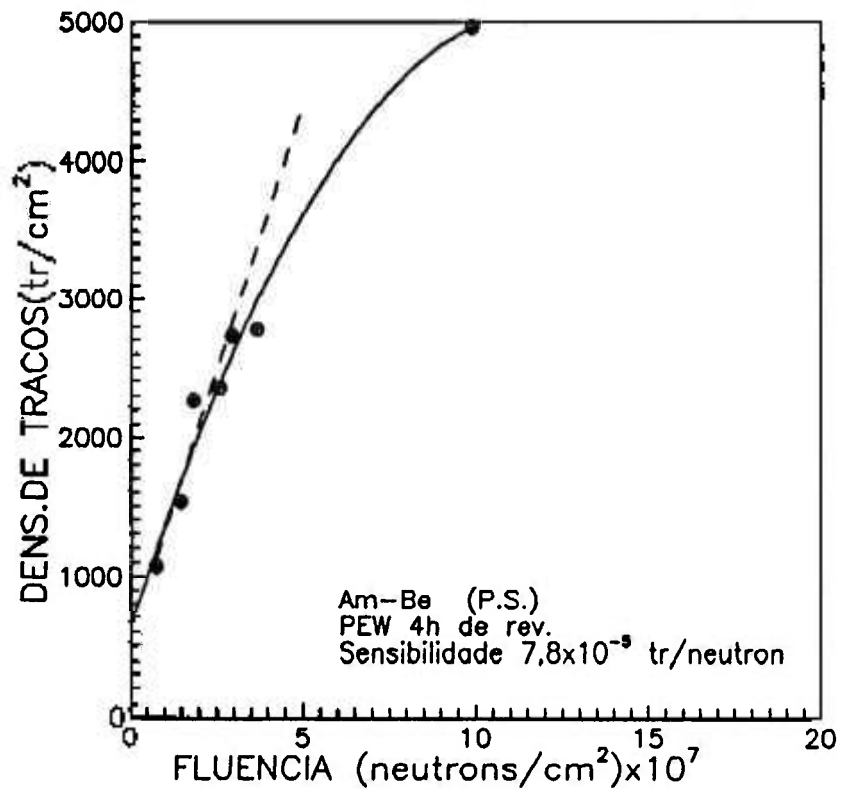
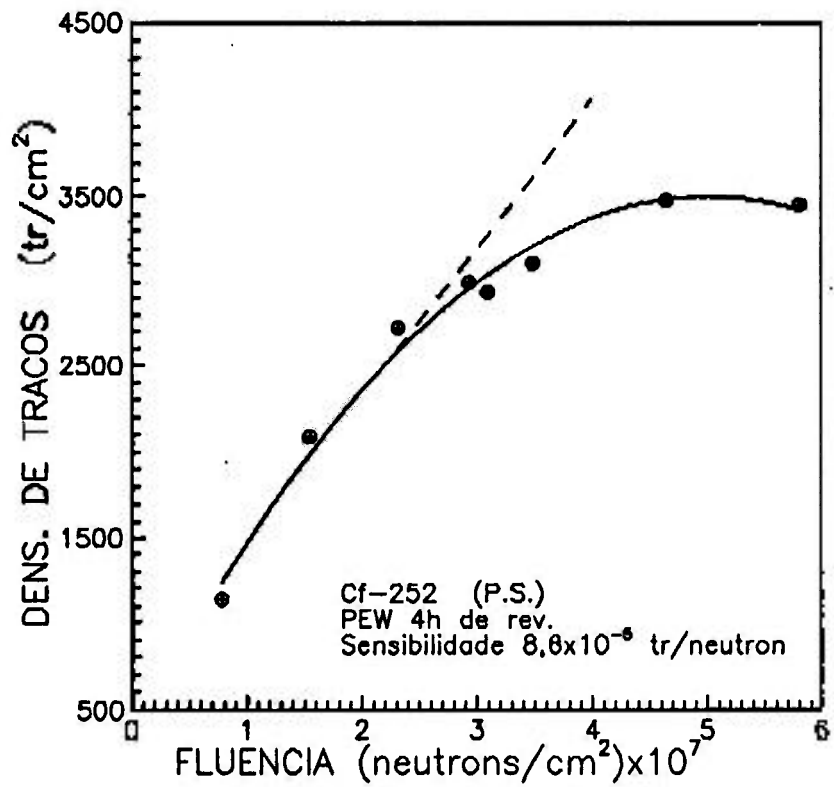


figura 34 - Resposta em função da fluência de neutrons.

V.1.5. - EFEITO DA FLUÊNCIA DE NÊUTRONS & DOSE MÁXIMA DETECTADA

Como foi mostrado por Al-Najjar, Bull e Durrani, 1979 [1], Pitt e Werner, 1988 [26], com o aumento da fluência de partículas além de certo limiar, a sensibilidade do material começa a decair. Dependência semelhante foi verificada neste trabalho como mostra a figura 38. Sob as condições de tratamento do detector: PEW, 2,0kHz, 1,3kV, 4h, 50°C, este efeito aparece para fluências superiores a aproximadamente $2,4 \times 10^7$ nêutrons.cm⁻². Este limite é afetado pela sensibilidade do material e portanto pelas condições de revelação, é possível ainda que o espectro de nêutrons também tenha alguma contribuição.

O critério para estabelecer a fluência máxima, ou densidade máxima de traços que o detector é capaz de registrar é muito variado. Ramli e Durrani [30] propuseram um critério que leva em consideração a análise dos diâmetros dos traços revelados, de forma que a saturação é atingida quando traços começam a apresentar deformações. Para que os traços não sejam deformados, segundo Ramli, a separação mínima entre eles deve ser da ordem de duas vezes o diâmetro máximo dos mesmos. A densidade máxima de traços é determinada levando-se em conta os diâmetros e a área ocupada por cada traço.

Outras maneiras para esta determinação é considerar a queda da sensibilidade do material, figura 38, ou a parte linear das curvas (*densidade de traços x fluência*), figura 37.

A resposta do material detector a nêutrons provenientes das fontes Cf-252 e AmBe é apresentada na tabela 7.

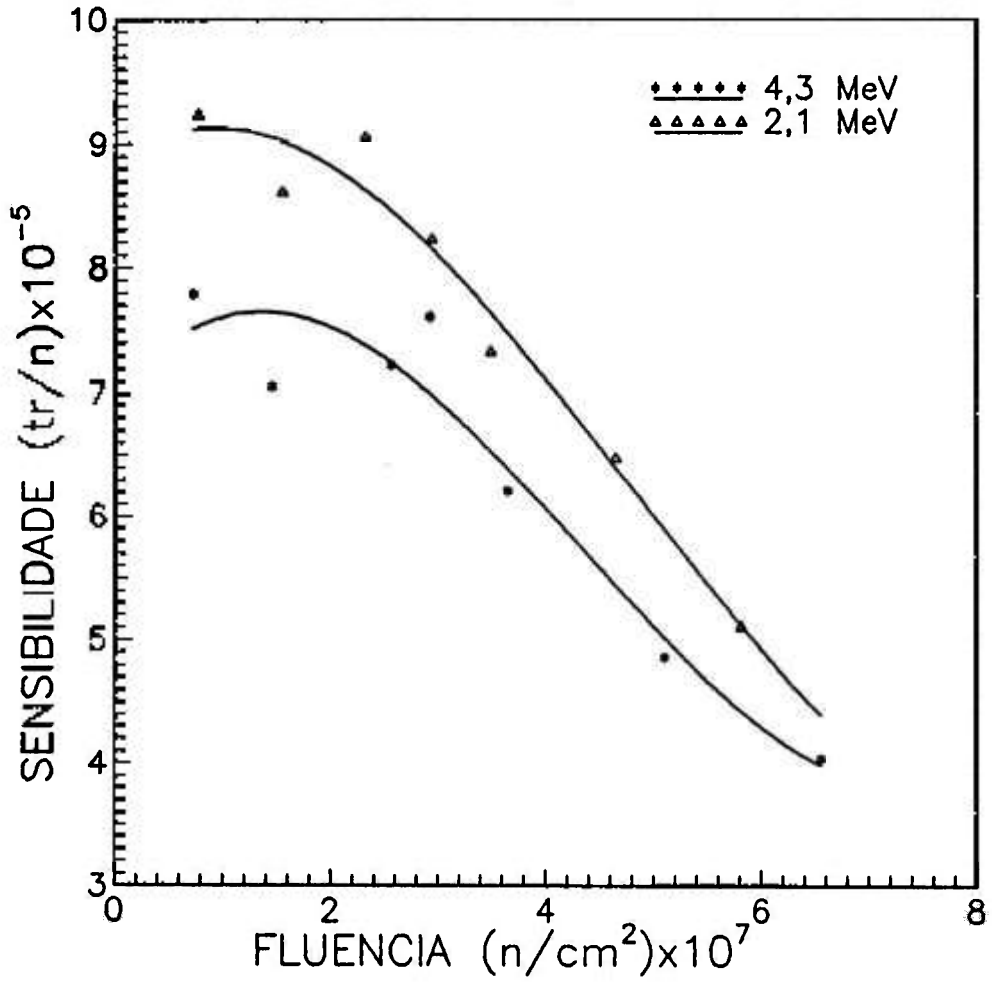


figura 38 - Sensibilidade do material CR-39 com DOP em função da fluência de neutrons. PEW; 1,3kV; 2,0kHz; 4h de rev.; 50°C.

TABELA 7 - Limite máximo registrável pelo sistema de detecção.

<i>densidade máxima</i> (t.cm ⁻²)	<i>fluência máxima</i> (n.cm ⁻²)x10 ⁷	<i>dose máxima</i> (mSv)	<i>sensibilidade</i> (t.n ⁻¹)x10 ⁻⁵
(a) 2700	2,4	9	(8,8 ± 0,5)
(b) 2100	2,0	8	(7,8 ± 0,1)

obs Os valores (a) e (b) representam a resposta do detector a nêutrons emitidos pelas fontes Cf-252 e AmBe respectivamente. As densidades incluem os valores de "background" \cong 600 traços.cm⁻².

Pelas considerações teóricas apresentadas anteriormente, tem-se que os traços revelados eletroquimicamente não se interligam.

Este fato indica que existe uma relação entre a fluência da radiação e diâmetro de traço revelado. Esta relação, foi verificada pelos resultados apresentados na figura 39. Constatou-se uma redução nas dimensões de traço em função da fluência de nêutrons incidentes.

Segundo Al-Najjar e colaboradores, 1979 [1], na faixa de fluência para a qual observa-se a redução progressiva nas dimensões do diâmetro de traço é também observada uma perda na linearidade de resposta. Em outras palavras, muitos traços não estariam tendo a chance de serem revelados devido a proximidade entre eles.

Foi verificado que a saturação é atingida quando o detector é exposto a fluências maiores que $2,4 \times 10^7$ nêutrons.cm⁻², a redução nas dimensões de traço também é acentuada a partir desta fluência considerando o espectro do Cf-252, entretanto as dimensões médias de traços se mantem aproximadamente invariante até fluências da ordem de $5,0 \times 10^7$ nêutrons.cm⁻² no caso do AmBe.

A explicação para este comportamento distinto no limiar de saturação pode estar no espectro de emissão das fontes, submetendo-se o material detector a tratamento com PEW, tem-se aparentemente uma forte dependência do diâmetro de traço com

a energia do próton de recuo, como o espectro de emissão do Cf-252 é uma maxwelliana, tem-se prótons de recuo numa faixa mais estreita que no caso do AmBe, que emite nêutrons numa larga faixa de energia, portanto neste segundo caso, enquanto diâmetros maiores são inibidos, ainda existe a chance de traços com diâmetros menores não sofrerem o processo, e então tem-se uma redução mais lenta das dimensões medias dos traços.

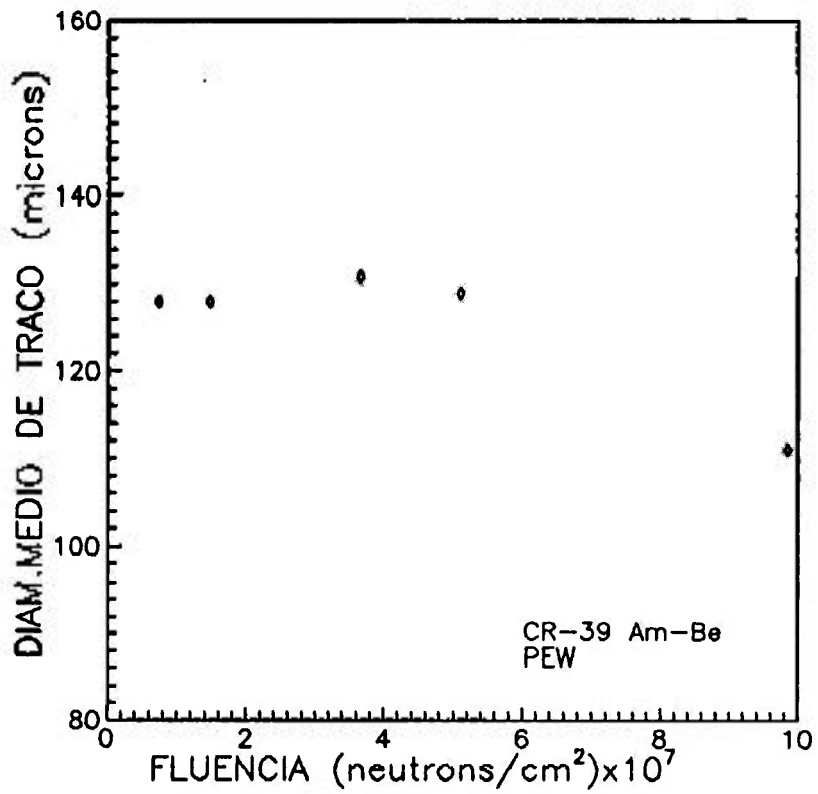
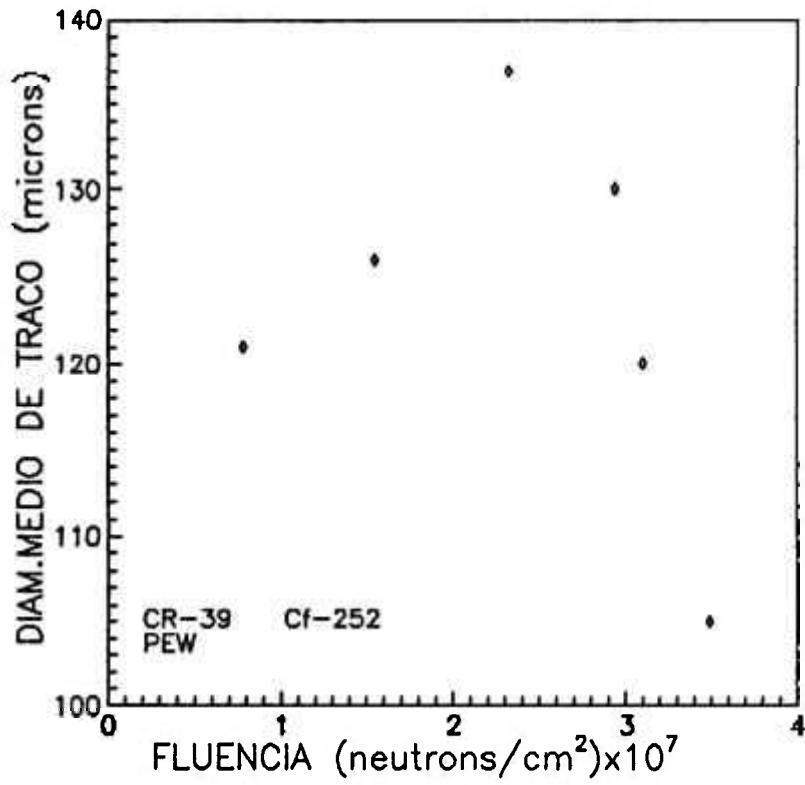


figura 39 - Diametro medio de traco em funcao da fluencia de neutrons.

V.2 - NEUTRONS TERMICOS

V.2.1 - EFEITO DE PARAMETROS DE REVELAÇÃO

Neste estudo é avaliada a possibilidade do sistema de detecção registrar nêutrons térmicos ($E_n < 0,4\text{eV}$).

A principal dificuldade na detecção de nêutrons nesta faixa de energia é a determinação de condições de tratamento tais que o detector opere num intervalo de dose significativa para a dosimetria [20].

Para determinação dos parâmetros aplicados no processo de revelação, a principio utilizou-se condições nas quais comprovadamente é baixa a sensibilidade do material a nêutrons rápidos.

Traços induzidos por partículas alfa de 1,47MeV (via conversor BN) são superficiais e neste caso a ampliação é mais fácil em comparação com a de traços decorrentes de prótons de recuo. A contribuição destes últimos foi verificada juntamente com a determinação do período de duração do processo de ampliação.

Detectores expostos a nêutrons térmicos, $1,61 \times 10^6$ nêutrons. cm^{-2} , e outros expostos a nêutrons rápidos, $2,92 \times 10^7$ nêutrons. cm^{-2} , $E_n = 4,3\text{MeV}$, foram submetidos a revelação em FEW sob as seguintes condições : tensão 1,0kV, frequência 2,0kHz, temperatura aproximadamente 30°C. Os resultados da variação do tempo de revelação entre 2,0 e 4,0h são apresentados na tabela 8. Não foram observados traços nos detectores irradiados com nêutrons rápidos.

TABELA 8 - resultado da revelação do detector nas condições: PEW, 1,0kV, 2,0kHz, 30°C. As fluências de exposição foram, $2,9 \times 10^7$ e $1,6 \times 10^6$ nêutrons.cm⁻², nêutrons rápidos e térmicos, não detectou-se a presença de prótons de recuo.

tempo de revelação (h)	sensibilidade (tr.n ⁻¹) térmicos	"BG" (tr.cm ⁻²)	diâmetro médio (μm)
2	$(2,2 \pm 0,1) \times 10^{-3}$	-----	15
3	$(2,5 \pm 0,1) \times 10^{-3}$	254±15	31
4	$(3,6 \pm 0,1) \times 10^{-3}$	370±22	51

Para utilização do sistema de detecção como dosímetro de nêutrons térmicos, é necessário trabalhar com densidades de traços muito elevadas uma vez que a dose depositada por nêutrons térmicos é muito menor que aquela depositada por nêutrons rápidos.

Verifica-se que a sensibilidade do sistema detector a nêutrons térmicos é duas ordens de grandeza maior que no caso da detecção de nêutrons rápidos, tabela 8. Desta forma, na determinação das condições de revelação para esta detecção, não foi buscado o melhor valor de sensibilidade do material, mas sim condições as quais permitam trabalhar com a maior densidade de traços possível, ou seja, com o menor valor de diâmetro compatível com o sistema de leitura utilizado.

Com o mesmo propósito, detectores submetidos a fluência de $1,6 \times 10^6$ nêutrons.cm⁻² (nêutrons térmicos), foram expostos a fluências de até $4,4 \times 10^8$ nêutrons.cm⁻² (nêutrons rápidos - fonte AmBe). e revelados nas mesmas condições (1,0kV, 2,0kHz, 30°C, 2h). Os resultados das revelações são apresentados na tabela 9.

TABELA 9 - Resultados obtidos para detectores irradiados com nêutrons térmicos e rápidos.

Detector	rápidos ($n.cm^{-2}$)	dens.total de traços ($t.cm^{-2}$)
1	$3,22 \times 10^7$	$(5,85 \pm 0,08) \times 10^8$
2	$4,03 \times 10^7$	$(5,93 \pm 0,06) \times 10^8$
3	$4,38 \times 10^7$	$(5,9 \pm 0,1) \times 10^8$
4	$5,84 \times 10^7$	$(6,0 \pm 0,1) \times 10^8$
5	$4,38 \times 10^8$	$(7,8 \pm 0,2) \times 10^8$

Verificou-se a influência de nêutrons rápidos na resposta do detector em fluências da ordem de 10^8 nêutrons. cm^{-2} . Entretanto fluências desta ordem correspondem a uma condição de saturação para o registro de nêutrons rápidos nas condições estabelecidas para esta detecção. Portanto é possível o registro de nêutrons térmicos na presença de rápidos sem que os últimos afetem a resposta.

A tabela 10, apresenta os resultados obtidos com a revelação do CR-39 com DOP estudado neste trabalho em diferentes situações.

Utilizando as condições (1) extraídas da literatura foi encontrado o melhor valor de sensibilidade na detecção de nêutrons térmicos. Adaptando estes parâmetros as condições do equipamento utilizado nas revelações eletroquímicas, reduzindo a frequência de operação para 2,0kHz, não foi verificado o registro de traços de "background" ou dos de prótons de recuo.

Utilizando PEW, a medida que se aumenta o campo ou o período de revelação, no caso de 1,0kV para 1,3kV ou de 2,0h para 3,0h de revelação, verifica-se uma contribuição de nêutrons rápidos na resposta do material.

TABELA 10 - Parâmetros testados para a revelação de nêutrons térmicos (temperatura ambiente).

CONDIÇÕES		D_t (μm)	DENS. DE TRAÇO (traços. cm^{-2})	SENSIBILIDADE (tr.nêutron $^{-1}$)
30% KOH 5kHz 1250V 3:30h	NT	43	$(12,5 \pm 0,2) \times 10^{3*}$	$(6,74 \times 10^{-3})$ (1)
	NR		45 ± 14	
	BG		66 ± 17	
30% KOH 2,0kHz 1250V 3:30h	NT	38	$(9,5 \pm 0,2) \times 10^{3**}$	$(2,94 \times 10^{-3})$ (2)
	NR		—	
	BG		—	
PEW 2,0kHz 1300V 4h	NT	62	$(11,9 \pm 0,2) \times 10^{3**}$	$(3,59 \times 10^{-3})$ (3)
	NR		$(2,22 \pm 0,04) \times 10^3$	
	BG		301 ± 21	
PEW 2,0kHz 1300V 3h	NT	31	$(8,1 \pm 0,2) \times 10^{3**}$	$(2,41 \times 10^{-3})$ (4)
	NR		295 ± 18	
	BG		320 ± 19	
PEW 2,0kHz 1000V 2h	NT	15	$(5,8 \pm 0,1) \times 10^{3**}$	$(2,15 \times 10^{-3})$ (5)
	NR		—	
	BG		—	

* fluxo = $3,09 \times 10^4$ nêutrons. $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

NT...nêutrons térmicos

** fluxo = $2,69 \times 10$ nêutrons. $\text{cm} \cdot \text{s}$

NR...nêutrons rápidos

BG..."background"

A reação $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ também pode ocorrer com nêutrons epitérmicos embora em proporções menores ($\sigma \cong 200\text{b}$), assim sendo, foi determinada a influência de nêutrons com energia maior

do que 0,4eV na resposta do detector.

Detectores com e sem involucro de cádmio foram irradiados com fluências de $(3,23 \pm 0,05) \times 10^6$ nêutrons. cm^{-2} , nêutrons térmicos e $(2,8 \pm 0,2) \times 10^6$ nêutrons. cm^{-2} , nêutrons epitérmicos. O cádmio é um material altamente absorvedor de nêutrons térmicos ($\sigma_{\text{abs.}} = 2172$ b espectro maxwelliano).

Submetendo-se o material detector a revelação nas condições: 1,0kV, 2,0kHz, 30°C, 2h, não foi verificada contribuição de nêutrons epitérmicos. Quando revelações se estenderam por um período de 3h, observou-se uma contribuição em torno de 2% o que não alterou o valor da sensibilidade. Revelando-se o material num tempo menor (2h) sua sensibilidade é reduzida, e como a contribuição epitérmica é muito baixa não foi significativa.

Dos resultados apresentados na tabela 10, concluiu-se que o tempo de duas horas de revelação é satisfatório, como mencionado anteriormente, a sensibilidade a nêutrons térmicos via conversor (boro natural), é naturalmente alta comparada àquela verificada para nêutrons rápidos (melhores condições). Com o tempo de revelação de 2h, são obtidos os menores valores de diâmetro visíveis por meio do projetor de "slides" (15 μm), o que é de principal interesse, tendo em vista a operação do sistema de detecção à uma faixa de dose mais ampla, além de não ter sido verificado o registro de prótons de recuo.

V.2.2 - "BACKGROUND" & FLUÊNCIA MÍNIMA DETECTADA

Traços de "background" são extremamente superficiais. Nas condições determinadas para a revelação de nêutrons térmicos (PEW, 2,0kHz, 1,0kV, 30°C, 2h de revelação) o baixo campo elétrico conjuntamente com o pouco tempo de revelação criaram condições tais que não são observados traços de "background", considerando os sistemas de leitura utilizados.

V.2.3 - SENSIBILIDADE

O valor da sensibilidade nestas condições é obtido pela tangente da curva (densidade de traços em função da fluência) apresentada na figura 40. Este valor é $(2,2 \pm 0,1) \times 10^{-9}$ traços.nêutron⁻¹, o que em dose equivale a $(2,6 \pm 0,1) \times 10^5$ traços.cm⁻².mSv⁻¹.

V.2.6 - EFEITO DA FLUÊNCIA DE NEUTRONS & FLUÊNCIA MÁXIMA DETECTADA

Estudou-se o desempenho do material CR-39 com DOP sob fluências crescentes de nêutrons térmicos.

Traços podem ser visualizados até aproximadamente $3,2 \times 10^7$ nêutrons.cm⁻²; para fluências superiores o sistema de leitura não permite a identificação de traços no detector em razão das dimensões dos mesmos. Este valor limite corresponde a uma dose de 0,3mSv.

A resposta do detector CR-39 com DOP em função da fluência pode ser visualizada na figura 40.

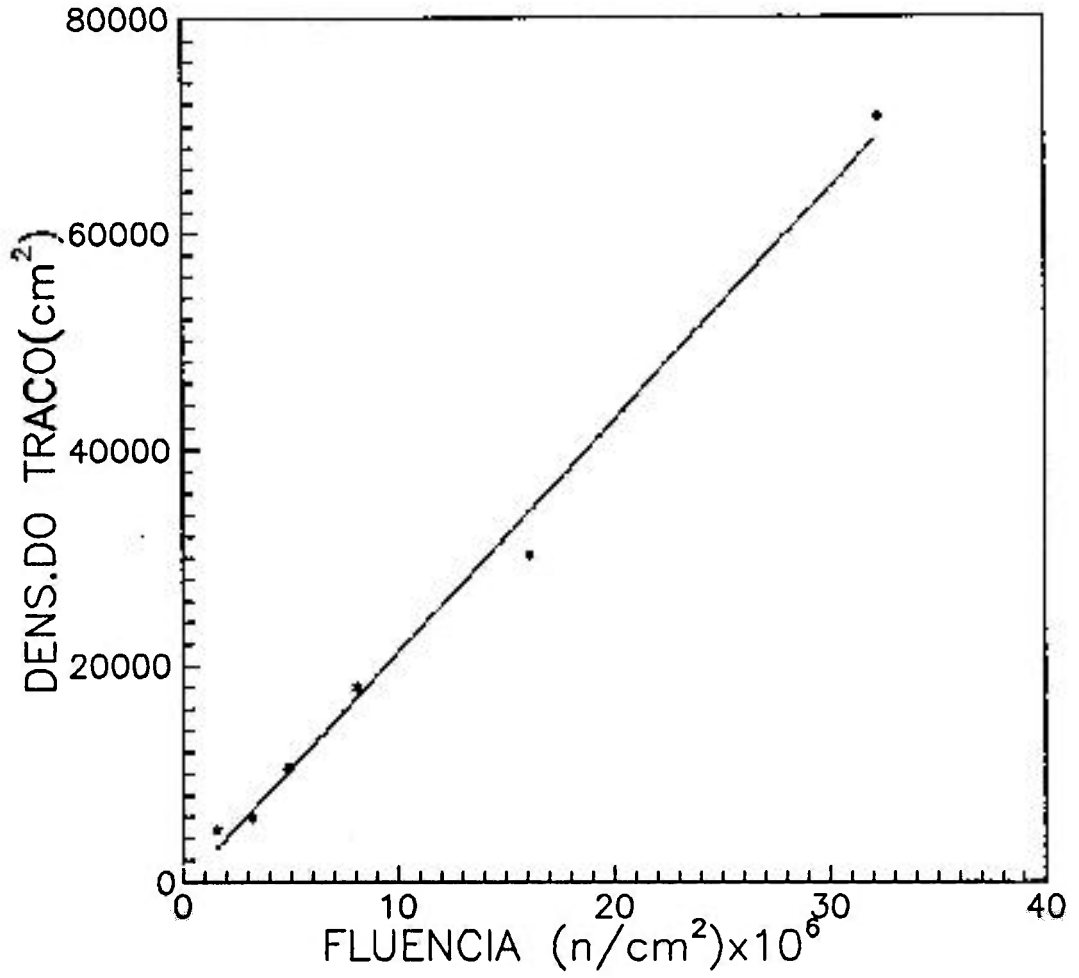


figura 40 - resposta do material CR-39 com DOP em funcao da fluencia de neutrons (P.S.)

V.3 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE LEITURA

Dois programas permitem a leitura dos detectores no sistema analisador de imagem utilizado. Um deles identifica traços pelo tamanho, este "software" (MARIANA), somente permite contagens, o outro programa, (VERONICA), efetua a discriminação levando em conta a dimensão e a forma dos mesmos, este "software" além de contar pode também medir as dimensões dos traços.

A vantagem do primeiro programa é a maior rapidez no tratamento dos dados, uma vez que este retira menos informações do detector analisado.

A utilização de um ou outro programa nas leituras depende da finalidade do estudo.

Com os programas na forma atual, existem duas dificuldades para a leitura dos traços induzidos na detecção de nêutrons rápidos, a saber: primeiramente a focalização, que é difícil principalmente quando revelações são realizadas em temperaturas superiores a ambiente, os detectores ficam ligeiramente deformados (não planos), em segundo lugar é o contraste, revelações a temperaturas elevadas deixam traços com contraste muito maior nas bordas que no centro e os programas não foram elaborados para esta consideração.

Para a análise do desempenho deste sistema de leitura (programa VERONICA) foi utilizado um aumento de 40 vezes, que a principio não se acredita que possa alterar significativamente os resultados para uma comparação com o P.S (60 vezes). no caso de leituras de traços provenientes da detecção de nêutrons rápidos, uma vez que trabalhou-se com diâmetros relativamente grandes, da ordem de 100 μ m.

Para a realização deste estudo comparativo poderia ser utilizado qualquer dos tempos de revelação entre três e cinco horas considerando a utilização de uma tensão de 1,3kV como pode ser visto nas figuras 32, 33 e 34, assim foi utilizado: PEW, 1,3kV, 2,0kHz, 50°C, 3h. O aumento utilizado nas leituras por meio do S.A.I (nêutrons rápidos) foi de 40 vezes.

Verificou-se a resposta do material detector em função da fluência de nêutrons. As leituras foram realizadas pelos dois sistemas: P.S. e S.A.I. Os resultados estão nas figuras 41 e 42. Comparando o conjunto de dados (P.S & S.A.I.), foi encontrada uma diferença de aproximadamente 40% na determinação dos valores de sensibilidade, juntamente com uma variação em torno de 25% nas contagens (*contagens maiores no P.S.*). Provavelmente o nível de discriminação do sistema esta sendo muito alto para o contraste obtido no processo de revelação.

A mesma variação não foi observada quando foram analisados nêutrons térmicos, figuras 40 (P.S.) e 43 (S.A.I. - MARIANA). Tendo sido observadas praticamente as mesmas densidades de traços nos dois sistemas. Uma verificação do diâmetro de traço foi feita utilizando o (S.A.I.- VERONICA), figura 44.

Por meio dos histogramas apresentados nas figuras 41.1 e 42.1 podem ser vistas as distribuições das dimensões do traço em função da fluência para a detecção de nêutrons das fontes de AmBe e Cf-252.

A tabela 11, apresenta os principais resultados obtidos com a utilização dos dois sistemas de leitura, projetor de slides e sistema analisador de imagem.

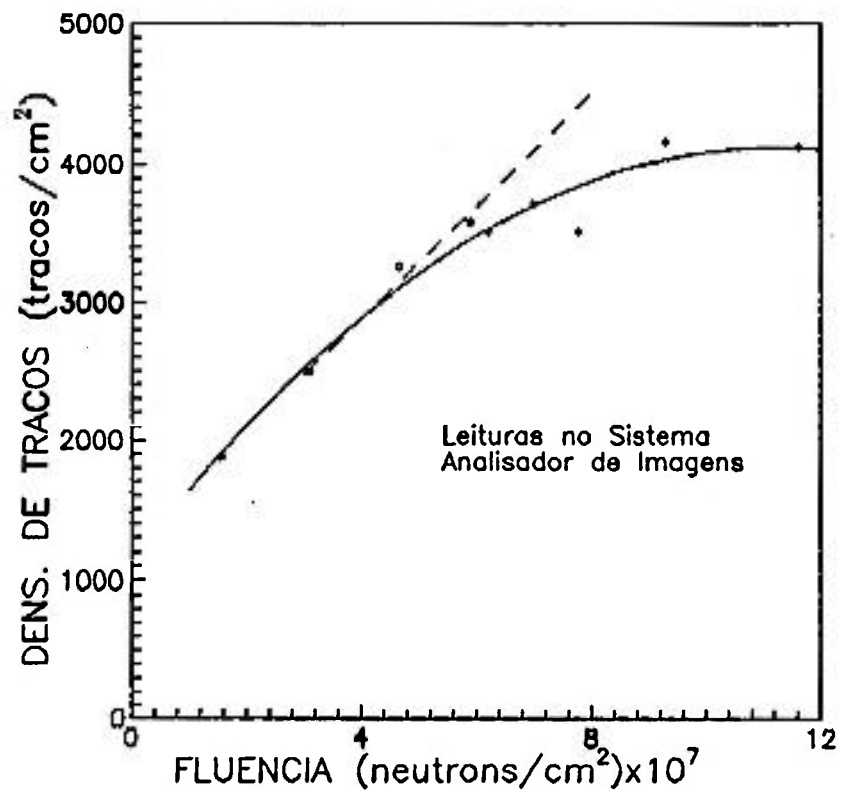
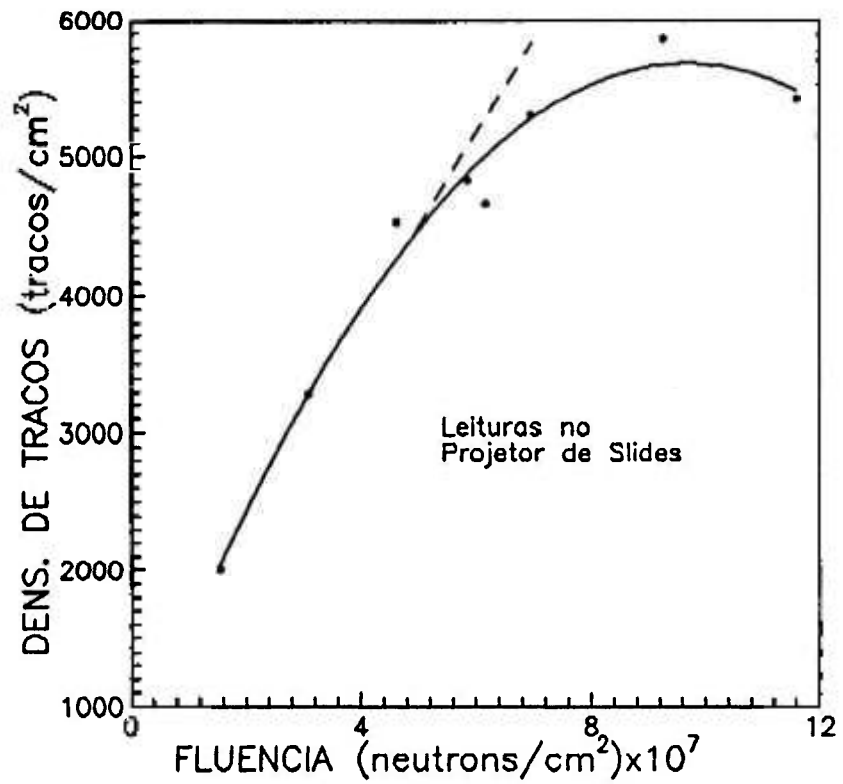


figura 41 - Resposta em funcao da fluencia de neutrons .
Resultados obtidos com leituras realizadas
pelos sistemas P.S. e S.A.I. (Cf-252)

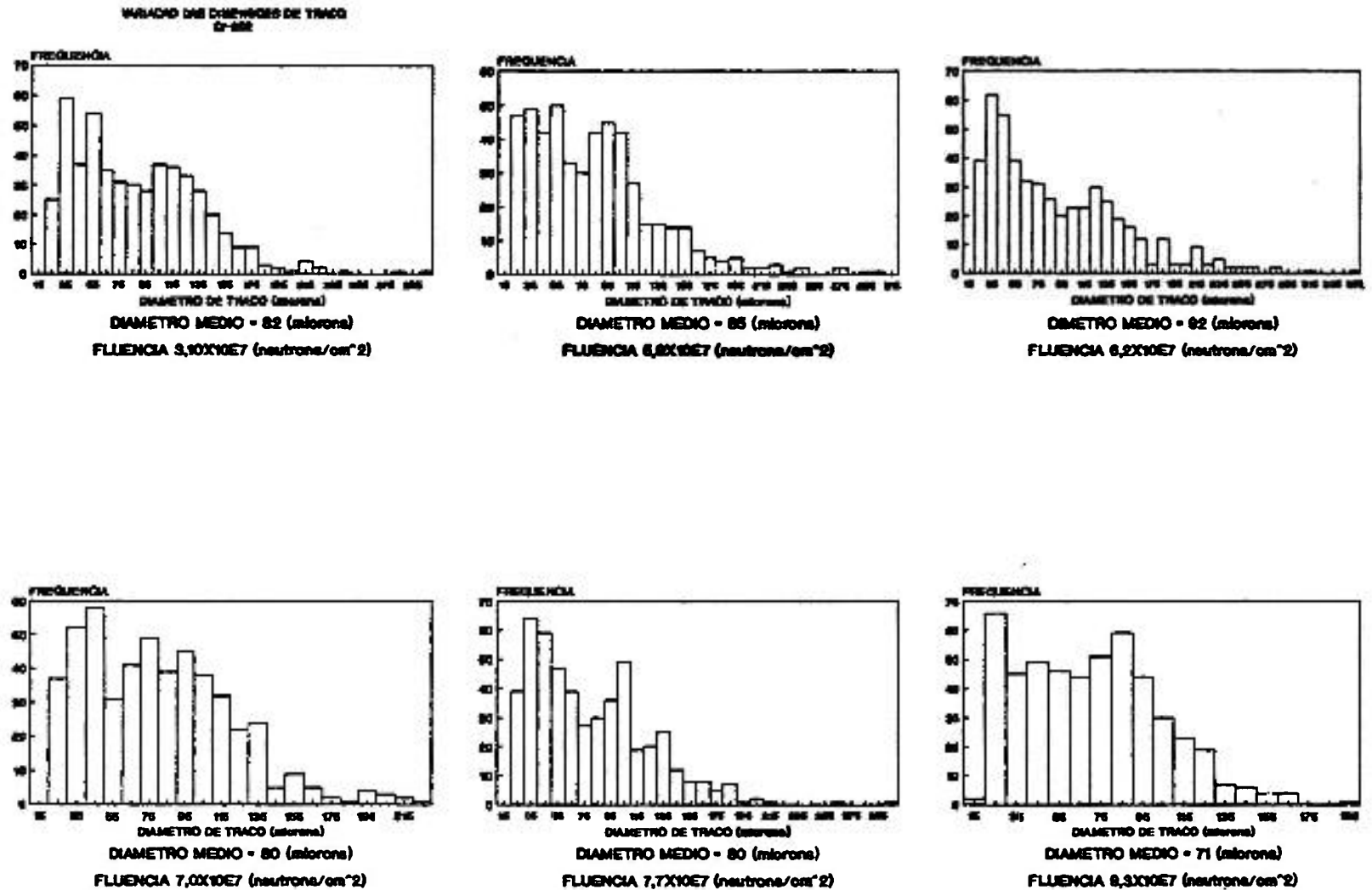


FIGURA 41.1 - *Variação das dimensões de traço considerando a emissão da fonte Cf-252.*

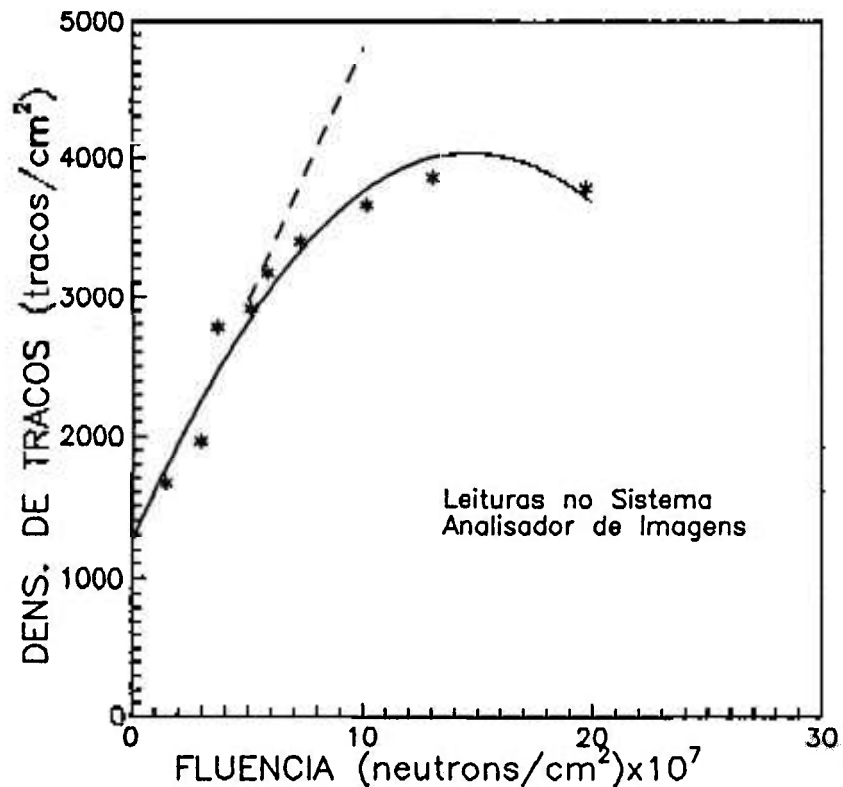
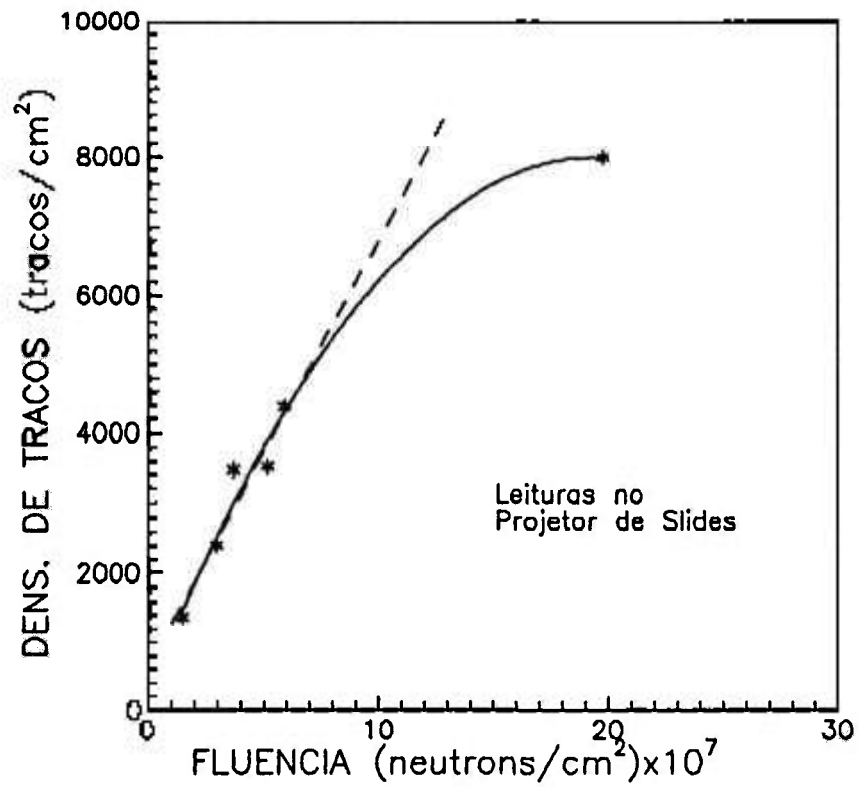


figura 42 - Resposta em funcao da fluencia de neutrons. Resultados obtidos com leituras realizadas pelos sistemas: P.S. e S.A.I (Am-Be).

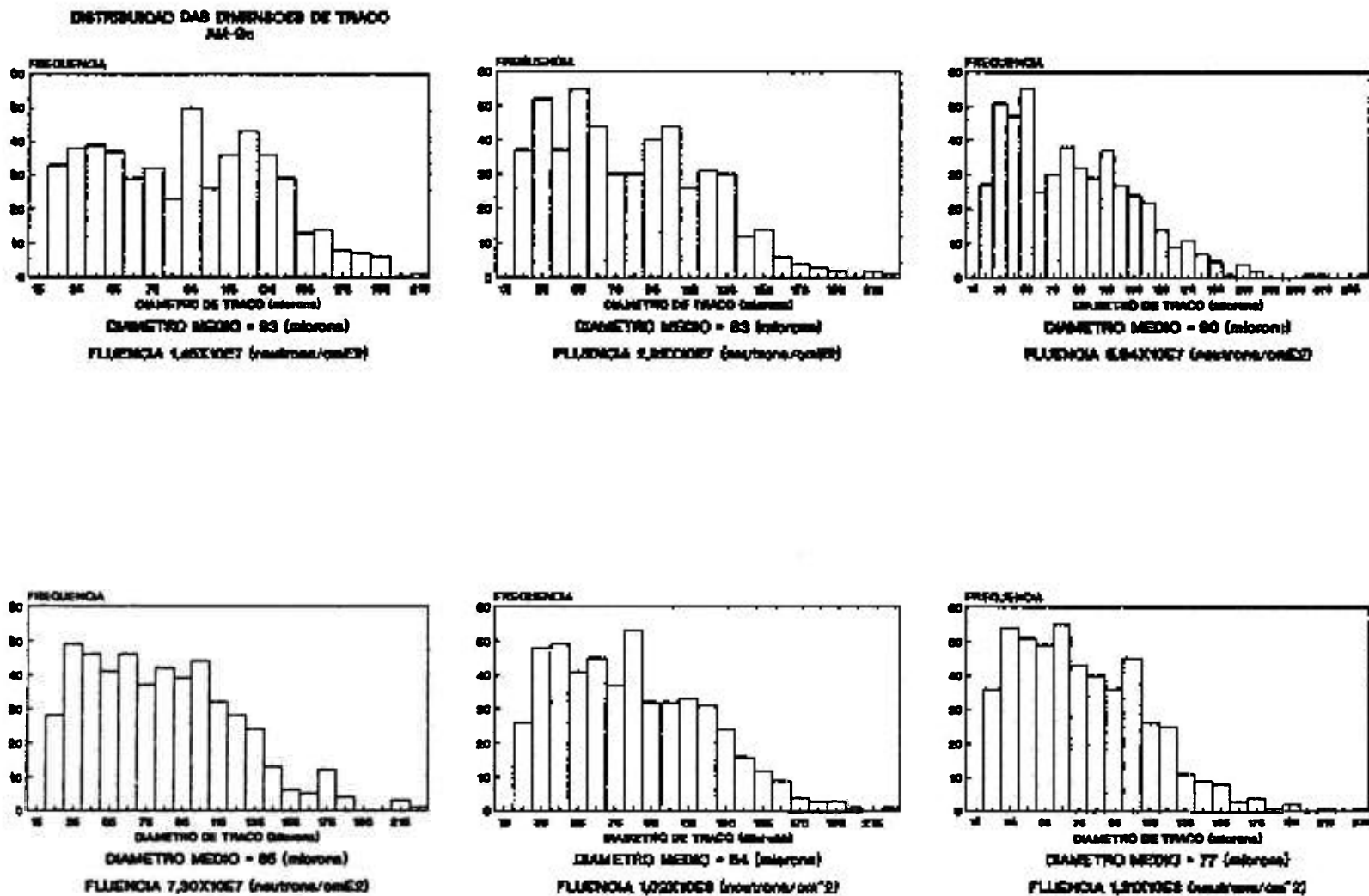


FIGURA 42.1 - Variação das dimensões de traço considerando a emissão da fonte AmBe.

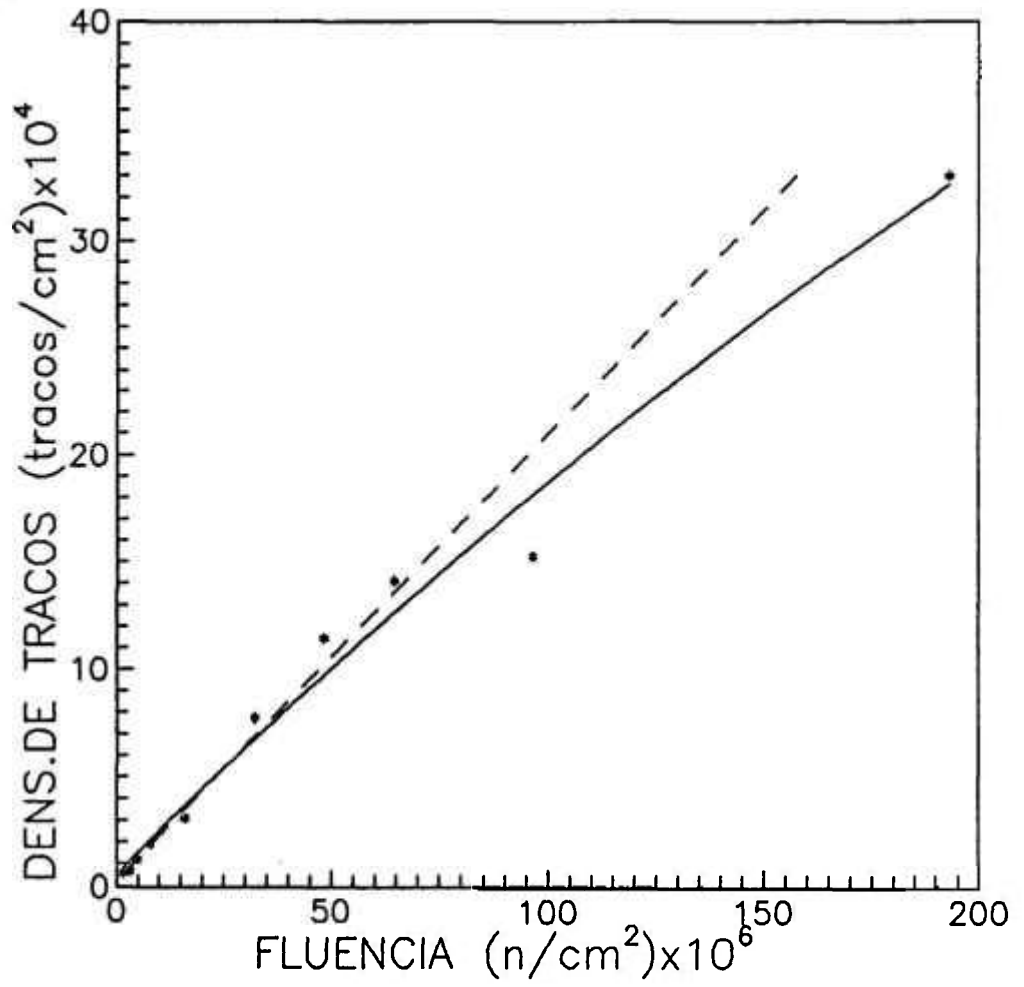


figura 43 - Resposta do material CR-39 com DOP em função da fluência de neutrons. leituras realizadas no S.A.I..

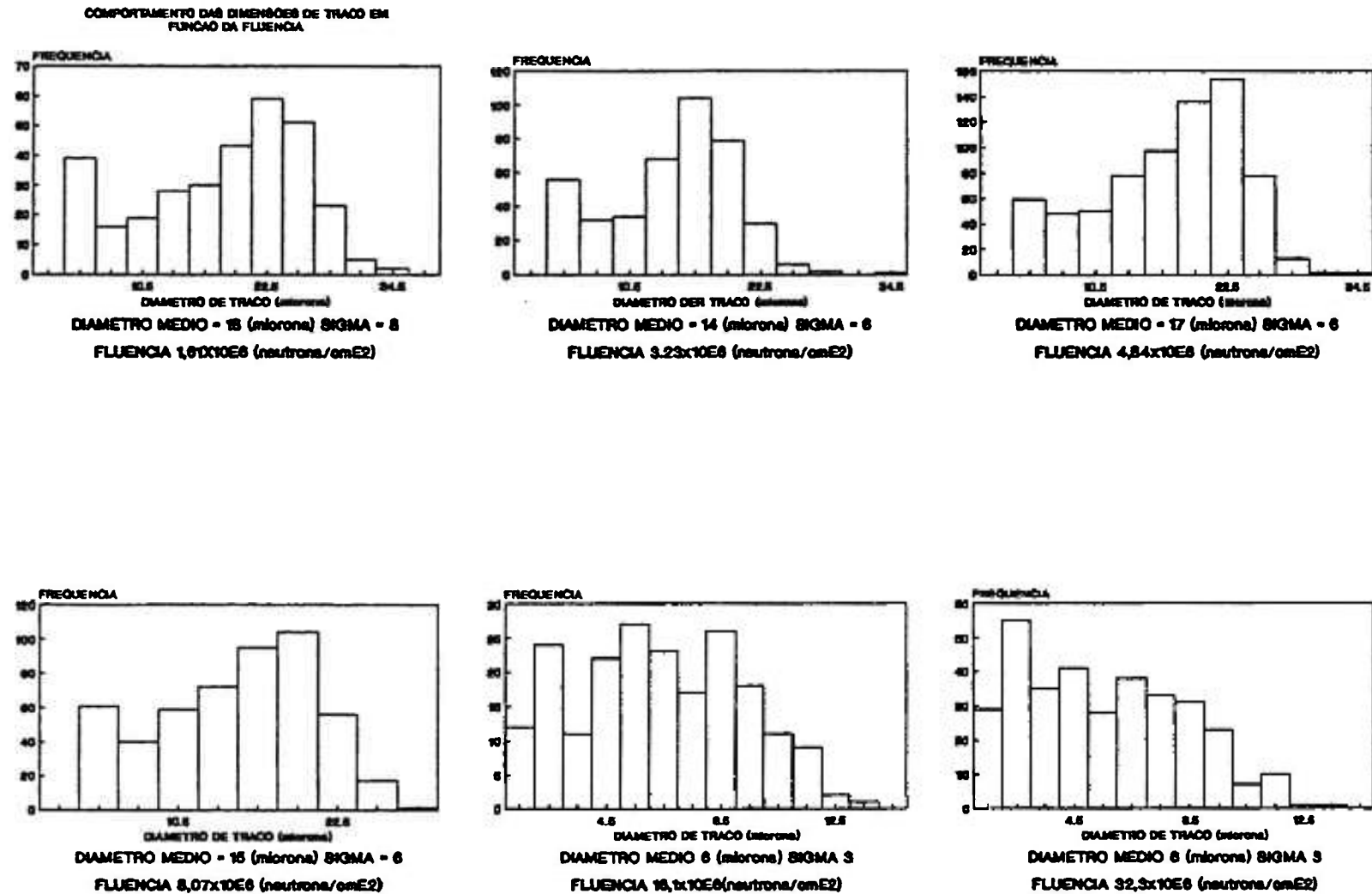


FIGURA 44 - *Variação das dimensões de traço considerando a detecção de nêutrons térmicos.*

TABELA 11 - Principais resultados obtidos com a utilização dos dois sistemas de leitura: projetor de "slides" e sistema analisador de imagem.

	NEUTRONS TÉRMICOS		NEUTRONS RÁPIDOS		
	$E_n < 0,4\text{eV}$		$E_n = 2,1\text{MeV}$	$E_n = 4,3\text{MeV}$	
SENSIBILIDADE (tr. neutron) ⁻¹ (tr. cm ⁻² . mSv ⁻¹)	(2,2±0,1)×10 ⁻³		(8,8±0,5)×10 ⁻⁵	(7,8±0,5)×10 ⁻⁵	A
	(2,1±0,1)×10 ⁻³		(5,2±0,3)×10 ⁻⁵	(4,7±0,3)×10 ⁻⁵	B
	(2,6±0,1)×10 ⁵		229±15	189±13	A
	(2,5±0,1)×10 ⁵		135±9	114±8	B
FLUENCIA MÁXIMA (n. cm ⁻²)	(3,2×10 ⁷)		(2,4×10 ⁷)	(2,0×10 ⁷)	A
	(4,5×10 ⁷)		(4,2×10 ⁷)	(4,3×10 ⁷)	B
DOSE MÁXIMA (mSv)	0,3		9,2	8,2	A
	0,4		15,0	14,0	B
FLUENCIA MÍNIMA (n. cm ⁻²)	(4,6×10 ⁴)		(8,4±10 ⁵)		A
	(4,8×10 ⁴)		(2,5×10 ⁶)		B
DOSE MÍNIMA (mSv)	(3,9×10 ⁻⁴)		0,2		A
	(4,0×10 ⁻⁴)		0,9		B
BG (tr. cm ⁻²)			600±36*		A
			1061±64		B
DENS. MAX. (tr. cm ⁻²)	(7,1×10 ⁴)		(2,7×10 ³)	(2,1×10 ³)	A
	(9,5×10 ⁴)		(2,2×10 ³)	(2,0×10 ³)	B
DIAMETRO MÉDIO (μm)	15		156	165	A
	16		105	111	B

OBS - A e B são os resultados obtidos com a utilização do PS e SAI respectivamente.

* O "BG" do material nos últimos estudos se apresentou maior em relação ao início deste trabalho.

VI - CONCLUSOES E ANALISE

Da análise da tabela 11, nota-se que o sistema semi-automático de leitura desenvolvido no decorrer do presente trabalho ainda não está totalmente adequado, podendo ser melhorado. Entretanto a sistemática de leitura possibilita uma influência menor do operador na análise do detector o que permite resultados mais confiáveis cujos erros mais significativos são sistemáticos.

A análise do desempenho do sistema de detecção como detector de nêutrons térmicos revela um sistema ótimo para o registro de nêutrons nesta faixa energética na presença de rápidos, entretanto se tratando de dosimetria de nêutrons térmicos propriamente o sistema não apresenta um bom desempenho, tendo em vista o baixo limite superior de dose registrável. Seria necessário trabalhar com diâmetros bem menores, entretanto os sistemas utilizados para as leituras não permitem esta redução.

Como detector de nêutrons rápidos foram obtidos bons resultados utilizando os dois sistemas de leitura.

Nas duas energias estudadas, o material CR-39 com DOP, apresentou uma boa eficiência e uma dependência energética aceitável. Variando a temperatura é mostrado que utilizando a solução PEW também é possível obter bons valores de sensibilidade.

Os resultados relativos a definição da dose mínima que o sistema é capaz de registrar, evidência um problema grave na utilização destes detectores (SSNTDs), que é o problema do "background" do material.

Em dois anos, que é aproximadamente a idade atual do lote utilizado neste estudo, o "background" evoluiu consideravelmente (itens V.1.3 e V.3). Não é possível avaliar esta evolução precisamente, pois não foi registrado o "background" do detector sistematicamente em periódicos intervalos de tempo, em trabalhos futuros esta análise será aconselhável.

A proposta inicial deste trabalho, estudo do CR-39

com DOP como detector de nêutrons utilizando a solução PEW como solução reveladora foi satisfatoriamente atingida. A redução do tempo de revelação foi um resultado bastante positivo quando se considera uma utilização rotineira.

Os melhores resultados do material empregado como sistema dosimétrico encontrados na literatura são apresentados na figura 45. Os resultados obtidos neste trabalho se aproximam daqueles encontrados por PIESCH o que indica que com a utilização de PEW como solução reveladora pode-se também obter bons valores de sensibilidade.

Conclui-se que um sistema de detecção empregando CR-39 com DOP, baseado nos parâmetros estabelecidos neste trabalho, tem grande chance de poder ser empregado como dosímetro de nêutrons rápidos, considerando que podera operar dentro do intervalo de dose de interesse, havendo para isto necessidade de um estudo principalmente para energias entre 100keV e 1,0MeV.

Outra possível utilização da técnica desenvolvida é a medida de baixos fluxos, tanto de nêutrons térmicos quanto rápidos, estas medidas são problemáticas exigindo longos períodos de irradiação quando é empregada a técnica de ativação de folhas metálicas.

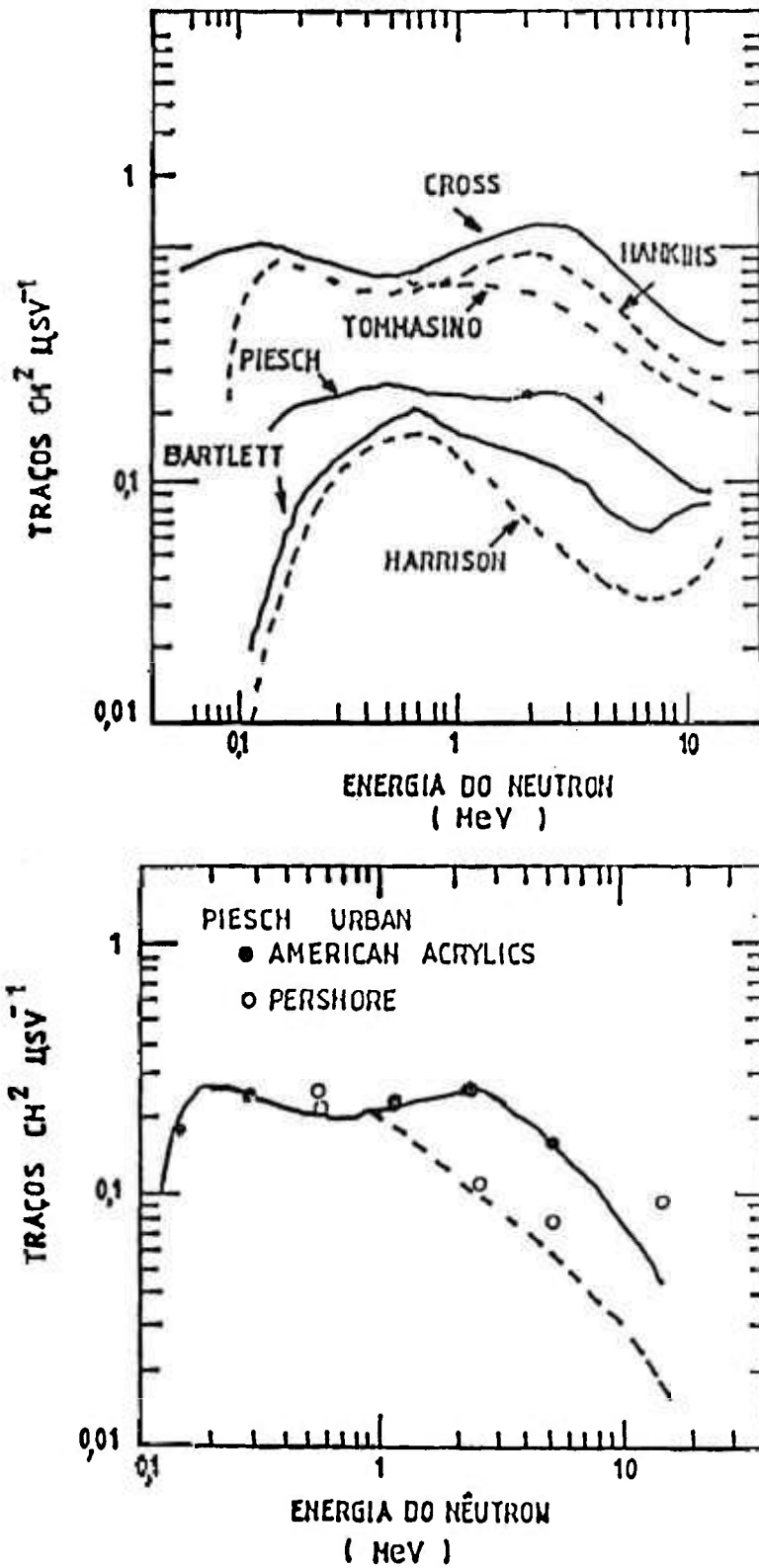


FIGURA 45 - *Melhores resultados encontrados na literatura. Os resultados obtidos neste trabalho aproximam-se daqueles obtidos por Piesch.*

++ pontos obtidos neste trabalho

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como extensão deste trabalho seria importante a verificação da resposta do detector em outras energias, principalmente considerando as baixas energias, mesmo da ordem de keV, para avaliar perdas de traços induzidos por partículas menos energéticas utilizando PEW nas revelações. Também se faz necessária a análise da resposta a energias superiores a 10MeV, uma vez que nestas energias recuos pesados também começam a influir apresentando mais variáveis envolvidas.

Este estudo seria conclusivo para indicar se a utilização da solução PEW possibilita um sistema dosimétrico com uma resposta independente da energia, dentro dos limites permitidos, como espera-se pela análise dos resultados do presente trabalho.

Outro estudo interessante é a espectrometria de nêutrons com CR-39 utilizando PEW. Medidas realizadas no desenvolvimento deste trabalho indicaram que com a utilização desta solução, as dimensões de traço são mais dependente da energia depositada no material detector, que considerando revelações em NaOH. A análise do espectro de nêutrons num dado ambiente poderia ser outra maneira de avaliar a dose recebida pelo trabalhador.

Seria interessante também a combinação de frequências. Utilizando uma frequência menor seguida por uma maior, poderia minimizar a ampliação do diâmetro de traço o que seria de interesse principalmente no estudo nêutrons térmicos, o que possibilitaria ao sistema de detecção operar num intervalo maior.

APENDICE A

RELAÇÃO ENTRE DOSE EQUIVALENTE E A FLUÊNCIA

Os cálculos de dose para nêutrons são mais complexos que para radiação eletromagnética devido à maneira com que eles interagem com a matéria.

Na determinação da dose equivalente, é necessário levar em consideração o fato de que o fator de qualidade é uma função de energia da partícula ionizante. Portanto quando um nêutron rápido sofre repetidas colisões, produzindo núcleos de recuo de várias energias, a deposição de energia de cada um desses núcleos deve ser multiplicada pelo fator de qualidade apropriado. Neste caso a deposição de energia deve ser calculada numericamente com a utilização de um computador (normalmente pelo método de Teoria de Transporte ou de Monte Carlo).

As quantidades recomendadas para monitoração individual são definidas em termos da dose equivalente depositada no tecido humano.

Entretanto as medidas com nêutrons realizadas pelos laboratórios são definidas em termos de fluência.

Portanto laboratórios que pretendem desenvolver ou calibrar dosímetros de nêutrons precisam conhecer as relações entre as grandezas dosimétricas (quantidades da ICRU) e fluência, para determinadas faixas de energia e geometrias de irradiação.

Segundo Harvey [19] uma expressão matemática que se ajusta em boa concordância com valores experimentais relacionando dose equivalente com a fluência é:

$$\log (H^*(10)/\emptyset) = \frac{A}{1+(B + Cx)^2} + \frac{D}{1+\exp(F - Gx)} + \frac{H}{1+\exp(J - Kx)}$$

onde:

$H^*(10)$ dose equivalente [pSv].
 \emptyset fluência [nêutrons/cm²].

$x = \log E$ (energia em eV)

As constantes foram obtidas por regressão não linear.

A = 1,02	B = 0,0102	C = 0,208
D = 2,33	F = 9,56	G = 1,98
H = 0,187	J = 93,3	K = 13,1

Esta expressão, assim como outras de mesma função, é referente à radiação de incidência normal.

Alguns trabalhos [9] descrevem a influência da distribuição angular de emissão na resposta energética do detector. Formalmente não existe uma correção para a expressão levando em conta tal influência, entretanto existem análises de grande número de dados avaliando tal dependência [9,44].

APENDICE B

RELAÇÃO AUMENTO DO MICROSCÓPIO X ÁREA

O aumento utilizado é inversamente proporcional a área de leitura considerada [21], a tabela b apresenta a área analisada associada aos respectivos aumentos disponíveis.

TABELA B - Objetiva x ocular = aumento do microscópio.

aumento do microscópio:		
objetiva	ocular	área de leitura (cm ²)
4	8.0	2.345
4	10.0	1.519
4	12.5	0.980
10	5.0	0.924
10	6.3	0.549
10	8.0	0.371
10	10.0	0.235
20	5.0	0.231
10	12.5	0.153
20	6.3	0.145
20	8.0	0.095
20	10.0	0.059
40	5.0	0.059
20	12.5	0.038
40	6.3	0.038
40	8.0	0.025
40	10.0	0.015
40	12.5	0.010

REFERENCIAS

- [1] AL-NAJJAR, S.A.R.; BULL, R.K.; DURRANI, S.A. Electrochemical etching of CR-39 plastic applications to radiation dosimetry. Nucl. Tracks, 3: 169-83, 1979.
- [2] AL-NAJJAR, S.A.R. & PIESCH, E. Further investigations on neutron energy response of CR-39 detectors. Rad. Prot. Dosim., 20 (1/2): 57-61, 1987.
- [3] AL-NAJJAR, S.A.R.; Ninomiya, K.; PIESCH, E. Properties of electrochemically etched CR-39 plastic for fast neutron neutron dosimetry. Rad. Dosim., 23 (1/4): 165-9, 1988.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for use of electron-capture detectors used in gas chromatography. Aug. 31, 1979. (ASTM E697-79). In: 1987 ANNUAL book of ASTM standards, section 14: General methods and instrumentation. vol. 14.01, p.699.
- [5] AMIN, S.A. & HENSHAW, D.L. Effect of various etching solutions on the response of CR-39 plastic track detector Nucl. Instrum. Methods, 190: 415-21, 1981.
- [6] BADRA, L.M.; ALBERTS, W.G.; PIESCH, E. Neutrons energy response and background of electrochemically etched nuclear track detectors: study of various CR-39 materials. Radiat. Protet. Dosime., 32 (2): 99-103, 1990.
- [7] CARTWRIGHT, B.G.; SHIRT, E.K.; PRICE, P.B. A nuclear track recording polymer of unique sensitivity and resolution Nucl. Instrum. Methods, 153: 457-60, 1978.
- [8] CHART of radionuclides Knolls Atomic Power Laboratorie 10ed., 1968.
- [9] CHEN, S.Y. & CHILTON, A.B. Calculation of fast neutron depth-dose in the ICRU standard tissue phantom and the derivatin of the neutron fluence to dose-index conversion fators. Radiat. Res. 78: 335-370, 1979.
- [10] CROSS, W.G.; ARNEJA, A.; ING, H. The response of electrochemically etched CR-39 to protons of 10keV to 3MeV Nucl. Tracks 12: p641-44, 1986.

- [11] CROSS, W.G.; ARNEJA, A.; KIM, J.L. The neutron energy and angular response of electrochemically etched CR-39 dosimeters. Radiat. Prot. Dosim., 20 (1/2): 49-55, 1987.
- [12] CRUZ, M.T. & FRATINI, L. Comunicação pessoal.
- [13] FLEISHER, R.L.; PRICE, P.B.; WALKER, R.M. Nuclear tracks in solids: principles and applications. California, Berkeley, 1975.
- [14] GRIFFITH, R.V.; THORNGATE, J.H.; DAVISON, K.J.; RUEPPEL, D.W.; FISHER, J.C.; TOMMASINO, L.; ZAPPAROLI, G. Monoenergetic neutron response of selected etch plastics for personnel dosimetry. Radiat. Prot. Dosim., 1: 61-71, 1981.
- [15] GRUHN, T.A.; LI, W.K.; BENTON, E.V.; CASSOU, R.M.; JHONSON, C.S. Etching mechanism and behavior of polycarbonates in hydroxide solution: lexan and CR-39. FRANCOIS, H.; MASSUE, J.P.; SCHMITT, R.; KURTZ, N.; MONNIN, M.; DURRANI, S.A. In: Solid state nuclear track detectors: proceedings of the 10th international conference, held in Lyon, 2-6 july, 1979. Oxford, Pergamon, 1980. p 291-302.
- [16] GOLDBERG, M.D.; MUGHABHAB, S.F.; MAGURNO, B.A.; MAY, V.M. Neutron cross section. z equals 21 to 40. Upton, N.Y.; Brookhaven Nat. Lab., 1966 (BNL-325 (2nd ED. (suppl.2 (vol.2A)).
- [17] HASSIB, G.M. & PIESCH, E.K. Effect of some manufacturing parameters on the application of CR-39 in neutron dosimetry. Nucl. Tracks Radiat. Meas., 8: 271-4, 1964.
- [18] HASSIB, G.M. & PIESCH, E.K. Electrochemical etching of neutron induced tracks in plastic detectors using a 50Hz electric supply. Nucl. Instrum. Methods, 154: 377-81, 1979.
- [19] HARVEY, J.R. & MILL, A.J. A proposed procedure for standardising the relationship between ambient dose equivalent and neutron fluence. Radiat. Prot. Dosim., 12: 141-3, 1985.
- [20] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, 1977. (ICRP-26).
- [21] JONEN & COHENCA Comunicação pessoal.
- [22] KHOURI, M.T.F.C. & VILELA, E.C. Comunicação pessoal.

- [23] MASON, J.H. The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges. Proc. IEEE, 98: 44-59, 1951. apud PITT, E. & WERNER, B. Estimation of the tip field of electrochemically etched nuclear track detectors. Kerntechnik, 52 (2): 126-9, 1988.
- [24] PIESCH, E.; AL-NAJJAR, S.A.R.; NINOMIYA, K. Neutron dosimetry with CR-39 track detectors using electrochemical etching: recent improvements, dosimetric characteristics and aspects of routine application. Radiat. Prot. Dosim., 27 (4): 215-30, 1989.
- [25] PIESCH, E. Neutron irradiations of proton-sensitive track etch detectors: results of the Joint European/USA/Canadian irradiations EURADOS-CENDOS. Karlsruhe, 1987. (KFK-4305).
- [26] PITT, E. & WERNER, B. Estimation of the tip field of electrochemically etched nuclear track detectors. Kerntechnik, 52 (2): 126-9, 1988.
- [27] PORTWOOD, T. & STEJNY, J. Analysis of CR-39 and effect of additives, Nucl. Tracks, 8: 151-4, 1984.
- [28] PRICE, P.B. & SULLIVAN, D.O. Improving the etching properties and tailoring the response of CR-39 plastic track detectors with dopants. Proc. 11th Int. Conf. SSNTDs, pp 929-932, Bristol. Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [29] PUGLYESI, R. Comunicação pessoal.
- [30] RAMLI, A.G.; DURRANI, S.A. Electrochemical etching of CR-39: optimization of parameters for the processing of neutron irradiated samples. in: Solid state nuclear track detectors: proceedings of the 11th international conference on held in Bristol, 7-12 September, 1981. Oxford, Pergamon, 1982. p. 237-40.
- [31] SILK, E.C. & BARNES, R.S. Examination of fission tracks with electron microscope. Philos. Mag., 4: 970-2, 1959.
- [32] SMYTHE, W.R. Static and dynamic electricity. New York, Mac Gran Hill, 1939.
- [33] SOHRABI, M. Electrochemical etching of fast neutron recoil tracks: the effects of field strength and frequency. Nucl. Tracks, 4: 131-40, 1980.

- [34] SOMOGYI, G. Status of development in the field of CR-39 track detectors. In: Solid state nuclear track detectors; proceedings of the 11th international conference, held in Bristol, 2-6 july, 1981. Oxford, Pergamon, 1982. p 101-13.
- [35] SOMOGYI, G.; NEDVECZKY, L.; HUNYADI, I.; NYAKO, B. Automatic spark counting of alpha-tracks in plastics foils. Nucl. Track Detect., 1: 131-8, 1977.
- [36] SOMOGYI, G.; TOTH-SZILAGYI, M.; HUNYADI, I.; HAFEZ ABDEL-FATTAH Effect of certain production parameters and post production fragments on the etching characteristics of CR-39 sheets. Nucl. Tracks Radiat. Meas., 12: 97-100, 1986.
- [37] TECHNICAL BULLETIN 66/15 The radiochemical centre Amersham Buckinghamshire - England.
- [38] TOBAZEON, R. AND GARTNER, E. (1974) On the behavior of ions at insulator liquid interfaces and its consequence for the losses in impregnated insulators Proceedings of the Conference on Eletrical insulation and dieletric phenomena. National Academy of Ciencias, 1984 Anual repost, p. 404-13 apud TOMMASINO, L.; ZAPPAROLI, G.; GRIFFITH, V.R. Nucl. Tracks, 4: 191-6, 1980.
- [39] TODO, A.S. Determinação de funções de distribuição de energia para microdosimetria de fons e nêutrons São Paulo, 1989. (Tese de doutoramento, Instituto de Pesquisas Energéticas e nucleares).
- [40] TOMMASINO, L.; ARNELLINI, C. A new etching technique for damage track detectors. Radiat. Eff., 20: 253-5, 1973.
- [41] TOMMASINO, L.; ZAPPAROLI, G.; GRIFFTH, V.R. Electrochemical etching mecanisms. Nucl. Tracks, 4: 191-6, 1980.
- [42] TOMMASINO, L.; ZAPPAROLI, G.; GRIFFITH, R.V.; DJEFFAL, S.; SAPIEZIA, P. Personal neutron dosimetry by CR-39 plastics with chemical etching, electrochemical etching and their combination, in: Radiation Protection Association: proceedings of the 6th international congress on held in Berlin, 7-12 May, 1984. Koeln, Compacts ISBN. V.3, P 1201-4.

- [43] VILELA, E.C. Detecção de nêutrons rápidos utilizando detectores sólidos de traços nucleares São Paulo, 1990. (Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- [44] WAGNER, S.R.; GROSSWENDT, B.; HARVEY, J.R.; MILL, A.J.; SELBACH, H.J.; SIEBERT, B.R.L. Unified conversion functions for the new ICRU operational radiation protection quantities. Radiat. Prot. dosim. 12: 231-5, 1985.
- [45] YOUNG, D.A. Etching of radiation damage in lithium fluoride. Nature, 182: 375-7, 1958.