**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Caracterização do polímero Durolon como detector de
traços nucleares de estado sólido**

FÁBIO PUGLIESI

Tese apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.

**Orientador:
Prof. Dr. Valdir Sciani**

São Paulo
2008

Dedico este trabalho ao meu pai Reynaldo Pugliesi, meu exemplo e referência como pessoa e cientista, e a minha avó Serafina Pugliesi.

Agradecimentos

Prof. Dr. Valdir Sciani pela dedicação e orientação neste trabalho;

Aos colegas do CAC pelo apoio importante para a realização deste trabalho;

IPEN, CAPES, e Pós graduação, pela bolsa de estudos e estrutura para a realização deste trabalho;

Aos colegas do CRPQ;

Aos amigos Marco Antonio Stanojev e Marcos Leandro Garcia Andrade do grupo de radiografia do CRPQ pela colaboração e pelos equipamentos disponibilizados;

A minha esposa Thais pela paciência e ajuda sempre;

Ao meu pai Reynaldo Pugliesi e minha mãe Marilene A Pugliesi pelo incentivo e ajuda em todos os momentos da minha vida;

Aos meus irmãos Eduardo, Mauricio e Marco pela amizade e ajuda em todos os momentos;

A todos que de alguma maneira colaboraram para a execução deste trabalho.

INTRODUÇÃO	1
CAPITULO 1 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	10
1.1 - Interação das partículas carregadas pesadas com a matéria	13
1.2 - Nêutrons e a Matéria	13
1.2.1 – Nêutron	13
1.2.2 - Interação Nêutron – Matéria	13
1.3 - Detectores de Traços Nucleares de Estado Sólido – SSNTD	16
1.3.1 - Geometria do traço	18
1.4 - Considerações sobre a caracterização de um SSNTD	19
1.5 - Imagem digital	23
1.5.1 - Representação de Imagens Digitais	24
1.5.2 - Passos Fundamentais do Processamento de Imagens	24
CAPITULO 2 - MATERIAIS E MÉTODOS	26
2.1 – Polímeros	26
2.2 - Tela Conversora de Boro	27
2.3 – Irradiações	28
2.4 - Ataque químico	31
2.5 - Sistema digital	32
2.6 - Sistema analógico	35
CAPITULO 3 - OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	38
3.1 - Caracterização do sistema digital	38
3.1.1 - Taxa de crescimento do traço	38
3.1.2 Taxa de produção de traços	42
3.1.3 - Intervalo de exposição para a obtenção do melhor contraste ótico	45
3.1.4 - Análise e comparação dos resultados	47
3.1.4.1 - Quanto a qualidade dos resultados	47
3.1.4.2 - Quanto a obtenção de dados	48
3.2 - Reprodutibilidade do sistema digital	50

3.2.1 - Taxa de crescimento do traço-----	50
3.2.2 - Taxa de produção de traços-----	50
3.2.3 - Intervalo de exposição para ótimo contraste-----	51
3.3 - Caracterização do polímero Durolon como um SSNTD-----	52
3.3.1 - Taxa de crescimento do traço-----	52
3.3.2 - Taxa de produção de traços-----	54
3.3.3 - Intervalo de exposição para obtenção do melhor contraste ótico-----	56
3.3.4 - Angulo critico-----	59
3.3.5 - Transparência à luz visível-----	61
 CAPITULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS-----	 63
4.1 - Conclusões referentes ao Durolon-----	63
4.2 - Conclusões referentes ao sistema digital-----	64
4.3 – Aplicações do Durolon-----	64
4.4 - Trabalhos sugeridos-----	69
 REFERENCIAS-----	 71

Caracterização do polímero Durolon como detector de traços nucleares de estado sólido

FÁBIO PUGLIESI

Resumo

O polímero Durolon foi caracterizado para ser utilizado como um detector de traços nucleares de estado sólido. Nestes detectores, o testemunho da passagem da radiação é um dano na estrutura molecular do polímero que após ser atacado em uma solução química se transforma em um traço, permanente e visível em um microscópio ótico. A caracterização do Durolon foi feita mediante estudos do diâmetro do traço, da eficiência de produção de traços, da transmissão de luz pelo polímero e do ângulo crítico de incidência da partícula em sua superfície, visando fornecer os subsídios necessários para interpretar as informações registradas. No presente trabalho os danos no polímero foram causados por partículas - α da reação nuclear $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, mediante a irradiação de uma tela de boro em um feixe de nêutrons térmicos, oriundo de um equipamento instalado no canal 08 do reator nuclear de pesquisas IEA-R1 do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP. Estes estudos foram realizados mediante o emprego de um sistema digital que foi desenvolvido neste trabalho. A sua utilização permitiu uma maior qualidade e eficácia quanto a aquisição e a análise de dados bem como acesso a diversos outros parâmetros referentes aos traços, até então inacessíveis pelo sistema analógico que estava em uso no IPEN e, assim, acesso a teoria da formação da imagem nestes detectores.

As características determinadas para o Durolon foram comparadas com as obtidas para outros dois detectores de traços nucleares, o Makrofol-E e o Makrofol-DE e, demonstram a viabilidade de sua utilização.

Characterization of the polymer Durolon as a solid state nuclear track detector

FÁBIO PUGLIESI

Abstract

The polymer Durolon has been characterized as a solid state nuclear track detector. In these detectors a track, resulting from the damages in its molecular structure, induced by a heavy charged particle, is the testimony of the passage of the particle through the polymer.

In order to characterize the Durolon the track diameter, track production rate, light transmission through the polymer and the critical angle of incidence of the particle have been studied. The main objective of such studies was to provide the necessary subsidies to understand the information registered.

The damages have been induced by alpha particles from the nuclear reaction $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, by irradiating a boron screen in a thermal neutron field from an experimental facility installed in the beam – hole 08 of the IEA-R1 nuclear research reactor of IPEN-CNEN/SP.

The study of the parameters have been performed by using a digital system developed in the present work. Its use has provided a higher quality and quickness regarding data acquisition and data analysis as well as the opportunity to quantify several other parameters regarding the imaging formation theory in solid state nuclear track detectors.

The characteristics of the Durolon have been compared with the ones of two other detectors Makrofol-E and Makrofol-DE and have demonstrated its potentiality to use.

INTRODUÇÃO

Polímeros são macromoléculas formadas por unidades moleculares menores e que se repetem, denominadas monômeros. Em 1909, o químico Leo Baekeland sintetizou o primeiro polímero, a baquelite, que é amplamente utilizado até os dias de hoje para fabricar maçanetas, telefones, peças de automóveis, móveis, jóias. Na década de 30, o químico Wallace Carruthers desenvolveu um outro polímero, o nylon, que além de ser leve, forte e durável se tornou a base de muitos tipos de roupas, coberturas, barracas, bagagens, bolsas e cordas [1].

Em geral os polímeros são muito resistentes à ruptura e ao desgaste, são elásticos, resistentes ao calor, à ação dos agentes atmosféricos e possuem elevada resistividade elétrica. Estas propriedades, juntamente com a sua fácil obtenção à baixas temperaturas, têm possibilitado a sua fabricação e uso em grande escala. Atualmente os polímeros são utilizados nas indústrias aeronáutica e automotiva, na confecção de produtos e embalagens, fabricação de lentes, CD's ou DVD's [1,2].

FIGURA 1 – Imagem de um CD fabricado com o Makrolon

Dentre as aplicações mais espetaculares dos polímeros destaca-se o seu uso como um detector de radiações nucleares e neste caso são denominados detectores de traços nucleares de estado sólido ou solid state nuclear track detectors – SSNTD. Este nome provem do fato de que o testemunho da detecção da radiação é uma região, na estrutura molecular do material, danificada pela passagem da radiação, a qual após um ataque químico adequado terá as suas dimensões aumentadas milhares de vezes formando o que se denomina um traço. O traço é permanente, visível em um microscópio óptico comum e, em geral possui a forma cônica com a base localizada na superfície do detector. Estes detectores são especialmente eficientes para a detecção de partículas carregadas pesadas como fragmentos de fissão, prótons, partículas - α e outros ions [3, 4, 5, 6]. A figura 2 mostra o aspecto de um traço, causado por uma partícula - α no SSNTD CR-39, visto com o auxílio de um microscópio eletrônico, aumentado 20.000x.

FIGURA 2 – Aspecto de um traço visto em um microscópio eletrônico

Dentre as principais aplicações deste tipo de detector, destaca-se o seu uso na área nuclear, em ciências da Terra, dosimetria, radiografia, auto - radiografia, filtros, estudos da radiação cósmica, do gás radônio em minas, etc [7].

Da mesma forma que para interpretar a informação registrada em um detector a gás é necessário estudar as características dos pulsos eletrônicos formados pela passagem da radiação, a interpretação da informação registrada em um SSNTD requer o estudo dos traços formados [3,8].

Levando em conta a crescente utilização dos SSNTD como filme radiográfico, dosímetro ou simplesmente para registrar a presença da radiação nuclear, o desenvolvimento de novas técnicas e teorias nesta área, o que conduz a novas oportunidades de pesquisa, bem como, às constantes dificuldades na sua importação e o fato de termos polímeros disponíveis no mercado interno brasileiro, decidimos propor um trabalho cujo principal objetivo seria a caracterização de um polímero fabricado no Brasil, no caso o Durolon, para ser utilizado como um SSNTD [9]. As irradiações seriam realizadas em um equipamento que está instalado no reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP que é capaz de produzir um feixe de nêutrons térmicos com características de energia e de intensidade adequadas para esta finalidade e os traços seriam produzidos por partículas - α geradas em uma tela de boro irradiada neste feixe de nêutrons [10].

Os traços produzidos no Durolon seriam analisados em um sistema de leitura analógico, que está em uso no IPEN desde fins de 1970 o qual vem fornecendo ao longo destes trinta e cinco anos resultados confiáveis e consistentes referentes a este tipo de estudo [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Entretanto pelas limitações deste sistema o estudo fica restrito a quantificação de basicamente três parâmetros, a taxa de crescimento do traço, a taxa de produção de traços e a intensidade de luz transmitida pelo detector, os quais são suficientes para se determinar as condições de irradiação e de ataque químico adequados para a grande maioria das aplicações de um SSNTD. Apesar de confiáveis, medidas analógicas neste tipo de estudo significam severo cansaço visual o que eventualmente induz a erros. Além disto e por causa do tipo de medida, esta é sujeita à interpretações individuais de cada pessoa que a realiza. Por exemplo, para determinar a taxa de crescimento do traço é necessário medir o seu diâmetro aparente com uma régua milimetrada em imagens projetadas na tela de um monitor de vídeo. A determinação da taxa de produção de traços requer a contagem visual de traços também na tela de um monitor de vídeo. A determinação da intensidade da luz transmitida pelo detector é feita em um

microfotômetro ótico, que é pouco adequado para tal finalidade pois, por exemplo, a área analisada do detector é muito pequena [17].

Entretanto, no início dos trabalhos soubemos repentinamente que o microfotômetro que sempre fora utilizado para este fim, estava fora de operação permanentemente. Sabendo da importância deste parâmetro para o presente trabalho, passamos a estudar outras maneiras de quantificar a intensidade da luz transmitida pelo detector. Dentre os estudos realizados, destacam-se os testes feitos em dois tipos de densitômetros óticos (instrumento comumente utilizado para se medir transmissão de luz em filmes comuns para raios – X), o emprego de luz incidente com comprimento de onda variável, de luz incidente razante e o emprego de um ampliador fotográfico comum. Destes, o resultado mais promissor foi o obtido com o ampliador. Neste caso um feixe de luz incide no detector e, a imagem resultante é projetada em uma tela branca e opaca. A verificação da possibilidade de seu uso foi realizada em um teste no qual diversos detectores irradiados e atacados foram posicionados no ampliador e visualmente pudemos observar que havia uma variação significativa na tonalidade ou grau de enegrecimento dos detectores em função dos tempos de irradiação, como mostrado na figura 3. Motivados por este resultado, passamos a utilizar uma câmera de vídeo para capturar esta imagem, a qual foi digitalizada por uma placa de captura instalada em um PC convencional. Os graus de enegrecimento dos detectores puderam então ser quantificados e analisados em uma escala de níveis de cinza, no caso com 8 bits, ou seja, com 256 tons de cinza que varia desde 0 (pixel mais escuro) à 255 (pixel mais claro).

Paralelamente a este estudo, já tínhamos obtido algum sucesso referente à captura e ao processamento de imagens de traços individuais o que nos permitiu, como mostrado na figura 4, observar suas bordas com boa definição em uma imagem relativamente grande, quando comparada com aquela obtida no sistema analógico. Este resultado associado à possibilidade de contar traços, automaticamente por meio de um software, em uma imagem digital processada, foram os incentivos que nos motivaram a desenvolver, a partir destes passos iniciais, um sistema digital para a captura, processamento e análise de imagens e de dados registrados em SSNTD's [18,19].

FIGURA 3 - Variação nos graus de enegrecimento dos SSNTD's em função dos tempos de irradiação

Com o progresso do presente trabalho este sistema digital foi sendo aperfeiçoado e hoje ele nos permite também ter acesso ao diâmetro interno dos traços e à distribuição de luz no interior de um único traço, ou seja, em uma área de aproximadamente $10\mu\text{m}^2$, o que abriu novas perspectivas de pesquisa uma vez que pudemos ter acesso a estes que são parâmetros fundamentais da teoria da formação da imagem em um SSNTD [20, 21, 22, 23].

Tendo em vista a facilidade de torná-lo operacional, pois todas as suas partes são disponíveis no mercado interno e o baixo custo para sua implementação, este sistema está ao alcance de qualquer laboratório que realize pesquisas nesta área.

Este sistema demonstrou ser altamente viável para este tipo de estudo de modo que a sua importância e os testes de sua caracterização ocuparam um lugar de destaque neste trabalho.

FIGURA 4 – Imagem digital de um traço processado

Originalidade

A originalidade do presente trabalho baseia-se fundamentalmente em dois pontos principais:

1 - Caracterização de um polímero fabricado no Brasil para ser empregado como SSNTD, fornecendo as condições de ataque químico e de irradiação para que possa ser empregado como detector de radiação.

2 – Projeto, desenvolvimento e implementação de um sistema digital para aquisição, análise e processamento de imagens e de dados registrados em um SSNTD.

Metodologia

A metodologia utilizada seguiu as seguintes etapas:

- 1- Verificação da disponibilidade de algum polímero fabricado no Brasil que atendesse alguns requisitos mínimos de partida tais como, transparência adequada à luz visível, superfície não rugosa, resistividade elétrica maior do que $2000\Omega\cdot\text{cm}$ e preço acessível
- 2- Seleção de dois SSNTD conhecidos e comumente empregados, a serem utilizados como padrões na caracterização e verificação da viabilidade do sistema digital proposto. Este estudo envolve a comparação dos parâmetros mencionados acima, destes dois SSNTD, determinados no sistema digital desenvolvido e no analógico já em uso.
- 3- Caracterização do polímero selecionado, o Durolon, para ser utilizado como um SSNTD empregando o sistema digital.
- 4- Comparação dos valores dos parâmetros do Durolon com aqueles determinados, também no sistema digital, para os dois SSNTD selecionados na etapa 2
- 5- Possíveis aplicações do polímero caracterizado.

A tese foi dividida em 4 capítulos e abaixo estão apresentados os resumos do principais tópicos desenvolvidos em cada um deles.

No Capítulo 1 são apresentados os principais aspectos da interação das partículas carregadas pesadas com a matéria abordando assuntos fundamentais como perda de energia e alcance. Foi também mencionada a metodologia utilizada para os cálculos destes parâmetros. Em seguida foram apresentados os fundamentos da interação dos nêutrons com a matéria, definindo os conceitos de secção de choque microscópica e de secção de choque total macroscópica esta última, empregada nos cálculos de transmissão de nêutrons pelos materiais. Foram também mencionados conceitos sobre reações nucleares com nêutrons e especificadas algumas das mais importantes para o presente trabalho.

Quanto aos detectores de traços nucleares de estado sólido, foram apresentados alguns fatos históricos referentes ao seu descobrimento e os aspectos conceituais importantes quanto a produção de danos em sua estrutura por radiações nucleares e a sua transformação em traços mediante um ataque

químico. Destacamos os conceitos de velocidade de ataque ao longo do dano e ao longo da superfície não danificada, cujos valores refletirão a forma do traço que, em geral, é preferencialmente cônica. Ainda quanto aos SSNTD foram abordadas algumas considerações de modo a justificar a seleção dos parâmetros para a caracterização do Durolon.

Foram também abordados aspectos importantes sobre imagens digitais, sua representação, bem como os passos fundamentais referentes à sua captura e processamento.

O Capítulo 2 é dedicado à parte experimental do trabalho. Primeiramente são mencionados os três polímeros utilizados destacando que dois deles o Makrofol - E (Mk-E) e o Makrofol - DE (Mk-DE), já sendo detectores comumente utilizados, foram utilizados como padrões para verificar a viabilidade do sistema digital e para a caracterização do Durolon.

Além disto são também descritos o equipamento instalado no canal de irradiação 08 do reator IEA-R1 onde foram realizadas todas as irradiações deste trabalho, o dispositivo no qual foram realizados os ataques químicos aos detectores e os dois sistemas de leitura, digital e analógico, onde os polímeros foram estudados.

O Capítulo 3 foi dividido em dois itens. O primeiro referente à caracterização do sistema digital, realizada mediante a comparação dos valores dos parâmetros, taxa de crescimento do traço, taxa de produção de traços e intervalo de exposição para obtenção do melhor contraste ótico, determinados para os detectores Mk-E e Mk-DE em ambos os sistemas (analógico e digital), bem como mediante testes de reprodutibilidade referentes as medidas das grandezas que originam estes parâmetros.

No segundo item estão descritos os procedimentos empregados para a caracterização do polímero Durolon para ser empregado como um detector de traços nucleares de estado sólido. As medidas dos parâmetros foram feitas no sistema digital e, os resultados comparados com aqueles para o Mk-E e para o Mk-DE obtidos neste mesmo sistema, o que demonstrou a sua viabilidade para ser utilizado como um detector de radiação nuclear.

O Capítulo 4 resume as principais conclusões deste trabalho. Primeiramente as referentes ao polímero estudado onde são apresentadas as condições que o Durolon deve ser submetido para se obter a melhor eficiência de

detecção e o melhor contraste ótico, bem como as suas características nestas condições.

Em seguida são apresentadas as conclusões referentes ao sistema digital destacando a qualidade dos resultados obtidos, a facilidade para obtê-los e analisá-los bem como a possibilidade de estudar novos parâmetros referentes aos traços.

São também apresentados alguns exemplos de aplicação do Durolon, quanto a sua utilização como um filme para registrar imagens das técnicas de radiografia com nêutrons e com partículas - α e, como um dosímetro de nêutrons térmicos.

Para finalizar, é sugerida a realização de dois trabalhos. O primeiro voltado à explorar toda a potencialidade do sistema digital no estudo da distribuição ou transmissão de luz por um único traço, através dos quais se pode ter acesso aos parâmetros fundamentais a respeito da teoria da formação da imagem neste tipo de detector e, o segundo, referente à outras aplicações do Durolon quando nêutrons epitérmicos são utilizados como partícula de prova.

CAPITULO 1 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Como explicado na Introdução, neste trabalho os danos nos SSNTD foram causados por partículas - α oriundas de uma tela de boro natural irradiada em um feixe de nêutrons térmicos. Desta forma, ao se abordar os fundamentos referentes aos SSNTD serão também abordados os processos de interação das partículas - α com a matéria e os processos básicos da interação dos nêutrons com a matéria. Além disto e, pelo fato de se ter desenvolvido um sistema digital para aquisição e análise dos dados registrados nos SSNTD, será também apresentada uma breve introdução a respeito de imagens digitais.

1.1 - Interação das partículas carregadas pesadas com a matéria

Partículas carregadas pesadas, como prótons e alfas, interagem com a matéria causando ionizações e excitações. Estas interações ocorrem entre os campos Coulombianos, da partícula e, principalmente dos elétrons do meio em que a interação esteja ocorrendo. Desde que a massa das partículas é muito maior do que a massa dos elétrons (~ 2000 vezes no caso de prótons) as suas trajetórias neste meio são efetivamente linhas retas. Entretanto podem ocorrer desvios no final da trajetória quando a sua energia for muito pequena [24 25].

A partícula perde a sua energia por uma série de muitas interações individuais e em cada uma, somente uma pequena fração da sua energia inicial é perdida. Por exemplo, para ionizar uma molécula de ar são necessários 32 eV, o que representa uma fração de aproximadamente 10^{-5} à 10^{-6} da energia de uma partícula com alguns MeV. O parâmetro que descreve a perda de energia das partículas carregadas pesadas é denominado poder de freamento (stopping power) “S” definido como a quantidade de energia “ dE ” transferida ao meio ao longo da distância percorrida “ dx ”:

$$S = - (dE/dx) \quad (1.1)$$

A perda de energia da partícula neste meio é quantificada pela equação de Bethe e Bloch[24]:

$$-dE/dx = (4\pi e^4 z^2 / m_0 v^2) * N B \quad (1.2)$$

onde:

$$B = Z[\ln(2m_0v^2/I) - \ln(1-v^2/c^2) - v^2/c^2]$$

- v , z - velocidade e carga da partícula incidente
- N , Z - densidade e número atômico dos átomos do absorvedor
- I - potencial médio de excitação e ionização ($I \sim 11,5 \cdot Z - \text{eV}$)
- e , m_0 – carga e massa do elétron

De acordo com esta equação, para energias entre $I \ll E < 100\text{MeV}$ o primeiro termo do parâmetro “B”, varia muito lentamente enquanto que os outros são desprezíveis, de modo que nesta condição $dE/dx \sim 1/E$. A figura 1.1 mostra o comportamento da equação de Bethe (1.2) em função de E , entre ~ 0 e $\sim 100\text{MeV}$ [24].

FIGURA 1.1 – Comportamento da equação de Bethe em função da energia E

O alcance é definido como a distância que a partícula percorre antes de perder todo o seu poder de ionização. Experimentalmente pode se quantificar o alcance registrando a intensidade de um feixe de partículas monoenergético e colimado em função da espessura do meio absorvedor. Na figura 1.2 [25] é mostrada uma curva de transmissão onde I_0 e I representam o número de partículas incidente e transmitido pelo material de espessura “ t ”. Para pequenas espessuras do meio absorvedor o efeito predominante é o da perda de energia

das partículas do feixe e, o número total de partículas permanece o mesmo. Não há diminuição do número de partículas até que a espessura do absorvedor seja maior ou igual ao comprimento total da trajetória, ou seja, que o alcance da partícula e, neste caso a intensidade do feixe cai rapidamente a zero.

FIGURA 1.2 – Típica curva de alcance para uma partícula - α

Entretanto como as perdas de energia por unidade de comprimento não são rigorosamente as mesmas, mesmo para um feixe colimado e com partículas de mesma energia, o comprimento total da trajetória no absorvedor varia ligeiramente para cada partícula o que origina uma flutuação (straggling) de alguns percentuais em relação ao valor médio do alcance.

A equação de Bethe falha para baixas energias onde a variação de carga da partícula no meio absorvedor se torna importante [24]. Hoje em dia existem disponíveis softwares para o cálculo de “S” e do alcance de diversos tipos de partículas em diferentes materiais. Um dos mais utilizados é o do NIST “Stopping - Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions”[26].

1.2 - Nêutrons e a Matéria

1.2.1 - Nêutron

Entre 1930 e 1931, Bothe e Becker na Alemanha e Frederico e Joliot Curie na França estudavam a natureza de uma radiação penetrante, resultante do bombardeamento de partículas - α emitidas pelo polônio em diversos alvos de elementos leves. Dentre estes alvos, os que exibiam a maior quantidade de radiação eram o lítio, o berílio e o boro. Bothe e Becker constataram em se tratar de radiação gama com energias de $\sim$ MeV. Entretanto no caso do berílio, juntamente com a radiação gama, eram também produzidos nêutrons, mas Bothe não pôde detectá-los, pois o detector por ele utilizado não era sensível à esta partícula. Entretanto os Curies utilizavam em seus experimentos um detector sensível a nêutrons e, nos estudos realizados no alvo de berílio, determinaram que a energia da radiação gama deveria ser da ordem de 50MeV, valor muito acima do determinado por Bothe e Becker. Desta forma havia uma dificuldade ao se atribuir o caráter de radiação gama, para a radiação originária deste alvo. Em 1932 Chadwick comprovou experimentalmente que esta radiação era um nêutron, uma partícula sem carga e com massa comparável à do próton e que no estado livre decai com uma meia-vida de 12,8 minutos em um próton, um elétron e um anti – neutrino, ou seja, [10]:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (1.3)$$

1.2.2 - Interação Nêutron - Matéria

A interação do nêutron com a matéria ocorre mediante forças nucleares ou magnéticas. Devido à sua importância para o presente trabalho, será dada ênfase à primeira.

Uma reação nuclear entre um nêutron e um núcleo alvo pode ser representada segundo a seguinte notação:

$$X + n \rightarrow Y + b \quad (1.4)$$

ou em notação compacta:

$$X(n,b)Y \quad (1.5)$$

Isto significa que um nêutron “n” interage com o núcleo “X” para produzir o núcleo “Y” e uma partícula “b”.

Neste processo os nêutrons podem ser espalhados ou absorvidos pelos núcleos alvo. A probabilidade de ocorrência destes processos é caracterizada pela grandeza denominada secção de choque microscópica (σ), expressa na unidade “barn – [b]” ($1\text{barn} \equiv 10^{-24} \text{ cm}^2$) e classicamente é interpretada como uma área efetiva que o núcleo alvo apresenta ao nêutron para a ocorrência da interação. A secção de choque total (σ_T) para a ocorrência de qualquer um destes processos vem dada simbolicamente por:

$$\sigma_T = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{esp}} \quad (1.6)$$

onde σ_{abs} e σ_{esp} são as seções de choque microscópicas para absorção e espalhamento, respectivamente.

Usualmente os nêutrons são classificados de acordo com a sua energia cinética, como mostrado na tabela (1.1) [10, 27].

TABELA 1.1 - Classificação dos nêutrons de acordo com sua energia cinética

CLASSES	FAIXA DE ENERGIA(eV)
Frios	$E < 0,01$
Térmicos	$0,01 < E < 0,5$
Epitérmicos	$0,5 < E < 10^4$
Rápidos	$10^3 < E < 20 \cdot 10^6$
Ultra-rápidos	$E > 20 \cdot 10^6$

Experimentalmente se verifica que na região térmica, a seção de choque de espalhamento apresenta um valor constante ($\sigma_{\text{esp}} \sim \text{cte}$) enquanto que a de absorção cresce inversamente proporcional a velocidade do nêutron ($\sigma_{\text{abs}} \propto 1/v$) [28].

Teoricamente a transmissão de nêutrons pela matéria é governada pela seguinte lei exponencial [10]:

$$\phi(x) = \phi_0 \cdot e^{-N \cdot \sigma_T(v) \cdot x} \quad (1.7)$$

sendo:

ϕ_0 = fluxo de nêutrons incidente no material;

$\phi(x)$ = fluxo de nêutrons que não sofreu interação após atravessar o material de espessura “x” (cm);

N = densidade atômica do material (cm⁻³).

O produto $N \cdot \sigma_T(v)$ é denominado secção de choque total macroscópica e representa a probabilidade do nêutron, com velocidade “v”, sofrer qualquer tipo de interação por unidade de caminho percorrido neste material:

$$\Sigma_T(v) = N \cdot \sigma_T(v) \quad (1.8)$$

Abaixo estão apresentadas algumas reações nucleares com nêutrons, importantes para este trabalho:

Finalidade: Produção das partículas - α na tela de boro que causarão os danos nos SSNTD's

Finalidade: Produção de nêutrons rápidos no reator nuclear

Finalidades: Termalização de nêutron rápidos produzidos na fissão

Produção de danos no SSNTD's causados por prótons de recuo devido a interação com nêutrons epitérmicos e rápidos

1.3 - Detectores de Traços Nucleares de Estado Sólido - SSNTD

A ciência dos detectores de traços nucleares de estado sólido nasceu em 1958 quando D.Young descobriu traços em um cristal de fluoreto de lítio – LiF ao atacar quimicamente danos, na sua estrutura molecular, causados por fragmentos de fissão de uma amostra de urânio irradiada por nêutrons térmicos [29]. Um ano mais tarde Silk e Barnes utilizando um microscópio eletrônico de transmissão encontraram danos também em cristais de mica. Fleisher e colaboradores conduziram diversas investigações deste método a outros materiais como minerais, plásticos e vidros [30]. Desde então a ciência dos SSNTD se expandiu vertiginosamente e atualmente eles são utilizados em diversas áreas, como por exemplo, para a detecção de radônio e radiação cósmica, em radiografia, dosimetria, etc. Em termos de pesquisas, as mais recentes são voltadas ao estudo da formação e da morfologia dos traços bem como da caracterização de novos materiais para esta finalidade. Hoje existem periódicos dedicados quase que exclusivamente a publicação de artigos desta área e as conferências internacionais tem ocorrido periodicamente, a primeira em 1958 e a última em 2004 [8].

A produção dos traços nos SSNTD ocorre da seguinte maneira: Partículas carregadas pesadas causam ionizações e excitações aos átomos e moléculas ao longo de seu percurso no interior do SSNTD. Os elétrons, emitidos como consequência das ionizações, podem causar mais ionizações secundárias e mais excitações. Os átomos e as moléculas excitadas podem adquirir considerável energia vibracional e passar por um processo de ruptura, levando a uma redução na massa molecular da substância e formando, por exemplo, uma cadeia complexa de outras moléculas, radicais livres e outros íons. Como consequência, estas interações deixarão uma estreita trilha (diâmetro aproximado entre 30 e 100 Å), rica em danos ao longo do percurso da partícula e, caso a resistividade elétrica do meio seja maior do que $2000\Omega\cdot\text{cm}$, parte destes danos serão permanentes. As regiões danificadas constituem zonas quimicamente mais reativas do que as regiões não danificadas de modo que sob a ação de certas soluções químicas adequadas, as estreitas trilhas de danos dão lugar a traços que nada mais são do que “buracos” com dimensões milhares de vezes maiores ao longo da direção radial dos danos. Tendo atingido o contorno da trilha de danos a solução química continua a aumentar o “buraco”, mas a uma velocidade

igual a das regiões não danificadas. Os traços podem ser aumentados radialmente até que sejam visíveis em microscópios óticos comuns. Um meio capaz de formar traços permanentes é denominado detector de traços nucleares de estado sólido ou SSNTD (solid state nuclear track detector) [3, 31].

É importante salientar que a formação do traço está diretamente relacionada à produção de trilhas com elevada densidade de danos e em primeira aproximação a sua formação somente ocorrerá quando esta densidade exceder um certo valor mínimo, o qual varia de um tipo de material para outro. Experimentalmente se verifica que doses elevadas de elétrons, de radiação gama ou raios – X causam um pequeno efeito nos SSNTD, ou seja, uma densidade de danos muito pequena, o que vem a ser uma característica muito útil principalmente quando se pretende registrar partículas carregadas pesadas em um campo misto de radiação [3, 32, 33, 34]. Para se ter uma idéia dos números envolvidos nestes processos se pode dizer que para uma partícula - α com 6 MeV de energia o processo inicial de perda de energia ocorre em aproximadamente 10^{-12} s e em seu trajeto cria aproximadamente 150.000 pares de íons em um SSNTD típico. Desde que o alcance destas partículas neste material é de $40\mu\text{m}$, significa uma densidade média de 3700 pares de íons por micrômetro de caminho percorrido. No caso de elétrons, este número é aproximadamente 500 vezes menor mesmo para energias de 100KeV [8].

Os SSNTD podem ser tanto de origem orgânica quanto inorgânica entretanto, somente os materiais dielétricos são capazes de formar traços. Para o interesse deste trabalho será dada ênfase aos SSNTD orgânicos e dentre estes os mais utilizados são aqueles constituídos a base de nitratos de celulose e os policarbonatos tais como o CR-39, Makrofol, CN-85, LR-115. Nestes casos, as soluções químicas mais freqüentemente utilizadas para o ataque aos danos são as aquosas à base de NaOH ou de KOH [3].

1.3.1 - Geometria do traço

Até o presente, não existe uma teoria única ou modelo único que explique satisfatoriamente a formação do traço e que calcule previamente os parâmetros que o caracterizam [8, 32, 35]. Dentre os diversos parâmetros que um modelo ou teoria deve considerar estão a velocidade de ataque " V_t " ao longo do dano e a velocidade de ataque à superfície não danificada " V_s " uma vez que a combinação de ambas, juntamente com as condições de ataque, é que determinarão a forma final do traço. O modelo deve permitir o estudo da influência de V_t e do ângulo de incidência da partícula com relação à superfície do detector, na geometria do traço. O modelo deve também permitir o estudo da influência de V_s , com relação à composição e preparação do SSNTD e com relação as condições de ataque e irradiação do SSNTD. Para os objetivos desta tese serão apresentados aqui somente os aspectos mais importantes referentes à geometria de formação do traço. No caso mais simples, o traço é oriundo de uma partícula que incide perpendicularmente na sua superfície e a velocidade V_t é constante, como mostrado na figura 1.3. Como $V_t > V_s$, os traços adquirem o formato de cones, cujos eixos estão ao longo das trilhas dos danos e suas bases tem a forma de circunferências.

FIGURA 1.3 – Aspecto do traço para uma partícula que incide perpendicularmente à superfície do detector

Para o caso de uma incidência oblíqua, a condição para que uma trilha de danos forme um traço visível, é que a componente de V_t , perpendicular à superfície do SSNTD seja maior do que V_s , ou seja, $V_t \cdot \sin\theta > V_s$ (sendo θ o ângulo de incidência da partícula), como mostrado na figura 1.4. Desta forma, existe assim um ângulo mínimo de incidência, θ_c , denominado ângulo crítico dado por (1.12), abaixo do qual o traço não será observado. Em geral este ângulo é relativamente pequeno e para os detectores orgânicos, $\theta_c < 5^\circ$ [3].

$$\theta_c = \arcsen(V_s/V_t) \quad (1.12)$$

FIGURA 1.4 - Aspecto do traço para uma partícula com Incidência oblíqua à superfície do detector

Neste caso os traços também adquirem o formato de cones e, suas bases tem a forma de elipses, cuja excentricidade dependerá do ângulo de incidência.

1.4 - Considerações sobre a caracterização de um SSNTD

Como já mencionado anteriormente os SSNTD tem a habilidade de registrar eventos individuais de alguns tipos de radiações mediante danos permanentes causados em sua estrutura, os quais após um ataque químico adequado são ampliados e transformam-se em traços também permanentes. Assim, traços são os testemunhos do registro da passagem da radiação por um SSNTD. Da mesma forma que para caracterizar outros detectores de radiação é necessário quantificar e estudar alguns parâmetros que definem por exemplo o

pulso elétrico que registrou a passagem da radiação, nos SSNTD é necessário quantificar e estudar os parâmetros que definem um traço bem como alguns parâmetros referentes ao próprio SSNTD. A quantidade de parâmetros que podem ser estudados depende logicamente de diversos fatores que variam desde as condições de irradiação e de ataque até o desempenho do sistema de leitura empregado. No caso do presente trabalho o conjunto experimental, com o sistema digital, possibilita o estudo dos seguintes parâmetros:

- taxa de crescimento do traço - permite determinar o tempo de ataque químico para se obter a dimensão adequada do traço, para uma finalidade específica; a transmissão de luz pelo traço varia com a sua forma e dimensões
- taxa de produção de traços - permite determinar a eficiência de detecção dos SSNTD e permite também avaliar a quantidade de traços de fundo; a transmissão de luz pelo detector varia inversamente proporcional a sua quantidade
- intervalo de exposição para obtenção do melhor contraste ótico - permite determinar as melhores condições de irradiação para sua utilização como filme radiográfico ou dosimétrico
- ângulo crítico de incidência - parâmetro de eficiência de detecção que se torna importante dependendo da geometria do feixe de radiação incidente no SSNTD
- transparência à luz visível - não é incomum um SSNTD tornar-se quase opaco sob a ação do ataque químico, dificultando a visualização dos traços. Este parâmetro é muito importante quando se pretende quantificar a quantidade de traços ou a transmissão de luz através de um SSNTD
- transmissão de luz por um único traço - parâmetro importante a ser estudado pois é fundamental para a compreensão e análise da teoria da formação da imagem, ou da transmissão de luz, em um SSNTD

Destes parâmetros, praticamente todos afetam direta ou indiretamente a quantidade de luz transmitida pelo SSNTD e, desde que uma de suas mais importantes aplicações é como filme e, devido a sua importância para o presente

trabalho, a seguir serão abordados alguns dos aspectos qualitativos mais importantes referentes à transmissão de luz por um SSNTD [36 37].

Se um feixe de luz incidir em um SSNTD repleto de traços, a intensidade transmitida será menor do que a incidente e a causa da atenuação é o espalhamento sofrido pelo feixe ao interagir com os traços. O processo de transmissão de luz pelos traços é governado pelas leis da refração [38] e desta forma dependerá de sua forma geométrica, a qual basicamente é determinada pelas condições do ataque químico tais como o tempo de duração do ataque, a temperatura e a composição da solução química. Traços obtidos em tempos de ataque pequenos exibem um perfil lateral cônico enquanto que os obtidos em tempos grandes tendem a uma forma esférica. Mediante considerações puramente geométricas pode-se mostrar que os cônicos espalham mais a luz do que os esféricos de modo que os primeiros fornecerão um maior contraste ótico numa imagem radiográfica formada em sua superfície.

De acordo com a teoria da formação da imagem em SSNTD's [20,21] um traço pode ser representado bidimensionalmente por um círculo interno circundado por um anel externo como mostrado na figura 1.5. O anel é o responsável pelo espalhamento da luz. Quando dois traços estão sobrepostos, a área resultante dos anéis externos é menor do que a soma das áreas individuais e consequentemente o espalhamento é menor como mostrado na figura 1.6.

FIGURA 1.5 – Representação esquemática de um traço de acordo com a teoria da formação da imagem

FIGURA 1.6 - Representação esquemática de dois traços sobrepostos de acordo com a teoria da formação da imagem

Considerando uma área $A(0)$ do detector contendo um único traço e composta pela soma de outras duas, $A(t)$ coberta pelo traço e $A(f)$ livre, a transmissão de luz através de $A(0)$ é dada por [20]:

$$T = I/I_0 = 1/A(0) \cdot [T(f) \cdot A(f) + \sum T_i \cdot A(t)] \quad (1.13)$$

sendo:

I_0 e I – as intensidades da luz incidente e transmitida através de A_0

$T(f)$ – a transmissão de luz através de $A(f)$

$\sum T_i$ – a transmissão de luz integrada através de $A(t)$

Esta teoria admite que as superfícies dos traços formados são circulares e de mesma área, que a transmissão de luz é a mesma para todos os traços, que existe uma dependência radial “ $T(r)$ ” da transmissão no interior do traço e considerando ainda o efeito de sobreposição de traços, a transmissão de luz, em função da exposição “ E ” ao feixe de radiação e da densidade de traços – “ ρ ”, pode ser dada por:

$$T = T(f) \cdot \exp(-E) + 2\pi\rho(r) \int T(r) \cdot \exp(\pi \cdot \rho(r) \cdot r^2) \cdot r \cdot dr \quad (1.14)$$

Desde que a função $T(r)$ pode ser determinada através de uma varredura da transmissão da luz ao longo do diâmetro do traço, como mostrado

na figura 1.7, a expressão (1.14) também estará determinada e, aí está a importância em se conhecer a distribuição da luz no interior de um único traço.

Esta teoria prevê que enquanto prevalecerem traços individuais no SSNTD, um aumento do número de traços será acompanhado por uma diminuição proporcional na intensidade da luz transmitida. Entretanto na condição de uma sobre exposição, a sobreposição dos traços aumenta causando um aumento da transmissão da luz pelo SSNTD.

FIGURA 1.7 – Diagrama esquemático mostrando a varredura da transmissão de luz no interior de um único traço.

1.5 - Imagem digital [39]

O interesse em métodos de processamento de imagens digitais decorre fundamentalmente da necessidade de melhoria da informação visual, bem como do processamento de dados através de máquinas. Devido ao advento de computadores rápidos e de softwares, as técnicas de processamento digital de imagens evoluíram bastante em meados dos anos 60. Entretanto a disponibilização de computadores com grande capacidade de processamento, bem como o desenvolvimento de mais algoritmos específicos para lidar com

sinais digitais estão permitindo uma gama de aplicações cada vez maior, tanto para imagens bi ou tridimensionais oriundas de diversos setores tais como, da análise de recursos naturais, meteorologia via satélite, médico (ultra-som, radiação nuclear) incluindo a contagem automática de células e exame de cromossomos, metalográfico, automação industrial, etc.

1.5.1 - Representação de Imagens Digitais

O termo imagem refere-se à uma função bidimensional de intensidade de luz $f(x,y)$, onde x e y são coordenadas espaciais e o valor f em qualquer ponto (x, y) é proporcional ao brilho da imagem naquele ponto.

Uma imagem digital é uma imagem $f(x,y)$ quantizada tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho e pode ser representada por meio de uma matriz onde cada um de seus elementos identifica um ponto na imagem e, o seu valor identifica o nível do brilho naquele ponto. Os elementos dessa matriz digital são chamados de elementos da imagem, ou "pixels"(picture elements). Quanto mais pixels uma imagem tiver melhor é a sua qualidade.

1.5.2 - Passos Fundamentais do Processamento de Imagens

O primeiro passo no processo é a aquisição da imagem digital. Para isso é necessário um sensor podendo ser uma câmera de TV ou um scanner. Após a aquisição, a imagem é digitalizada o que é feito por meio de um conversor analógico – digital (placa digitalizadora). Uma imagem digitalizada com “ n ” bits possui 2^n níveis de cinza de modo que para $n = 8$ a escala terá 256 níveis que varia de 0 para o nível mais escuro até 255 para o mais claro. Após a digitalização, a imagem poderá então ser processada. Cada processamento é uma operação matemática entre os pixels de uma mesma imagem ou entre pixels de imagens diferentes, cuja finalidade é melhorar aspectos de sua forma original. A representação matemática de um processamento pode ser expressa como:

$$g(x,y) = T[f(x,y)] \quad (1.15)$$

onde:

$f(x,y)$ é a imagem de entrada, $g(x,y)$ é a imagem processada e T é o operador sobre “ f ” que representa um processamento qualquer.

Dentre as operações mais comumente utilizadas estão o realce de contraste e de bordas, remoção de ruído, zoom, correção de não homogeneidade na imagem, etc.

CAPITULO 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Polímeros [40]

No presente trabalho foram empregados três polímeros. O primeiro é o Durolon, que será caracterizado para ser utilizado como um detector de traços nucleares de estado sólido. Os outros dois são o Makrofol – DE e o Makrofol – E que por serem detectores comumente empregados para a detecção de partículas carregadas pesadas e possuem suas características bem conhecidas, foram utilizados como referência tanto na verificação da viabilidade do sistema digital desenvolvido quanto na verificação dos dados determinados para o Durolon.

O Makrofol - DE (Mk-DE) é um policarbonato manufaturado pela Bayer A.G, baseado no Makrolon. Apresenta elevada transmitância à luz visível (>90%) e possui ambas as superfícies polidas. Está disponível com espessuras entre 175 - 1000 μm e, o utilizado neste trabalho possui espessura de 500 μm .

O Makrofol - E (Mk-E) é também um policarbonato manufaturado pela Bayer A.G baseado no Makrolon. É fabricado com espessuras entre 200 e 500 μm . É um material translúcido apresentando uma face rugosa e a outra polida, sendo nesta última por onde as partículas devem penetrar para causar os danos. O Mk-E utilizado neste trabalho possui espessura de 200 μm [9]

Para danos causados por partículas - α , estes detectores são atacados quimicamente em uma solução padrão denominada PEW, a 70°C, cuja composição em massa é [12, 41]:

- Hidróxido de Potássio, grau P.A - 15%
- Álcool etílico absoluto, grau P.A - 40%
- Água deionizada - 45%.

O Durolon foi o polímero utilizado no presente trabalho pois é o que estava disponível no mercado nacional. É um policarbonato produzido pela Policarbonatos do Brasil S.A e, também, manufaturado a partir do Makrolon. Possui algumas propriedades desejáveis para ser utilizado como um detector de radiação tais como, superfícies polidas e parcialmente transparentes a luz visível

exibindo uma transmitância de aproximadamente 90% e uma resistividade elétrica superior a $10^{16}\Omega\cdot\text{cm}$. Desde que aproximadamente 99,5% da composição (em peso) do Durolon é policarbonato, que o seu ponto de fusão está entre 220 e 230°C e, que os danos também foram causados por partículas - α , a solução química para o ataque foi a mesma utilizada para o MK-E e MK-DE, ou seja, a PEW a 70°C [9].

2.2 - Tela Conversora de Boro[28]

A tela conversora geradora das partículas - α foi confeccionada pela Kodak - Pathé (França). É composta por uma base plástica com espessura de 105 μm coberta por uma camada de boro natural de pureza superior a 99% e com espessura de 65 μm . Esta camada permanece aderida a base plástica formando uma superfície lisa, homogênea e de coloração marrom.

As partículas - α são geradas mediante reações nucleares do tipo $\text{B}^{10}(\text{n},\alpha)\text{Li}^7$, ou seja, entre nêutrons e núcleos do isótopo boro-10 (abundância 20%), com uma seção de choque microscópica de absorção de aproximadamente 7000 barn para o feixe de nêutrons utilizado, que possui energia média de 7 meV, (vide tabela 2.1). Pelo fato do isótopo boro-11 (abundância 80%) possuir uma seção de choque para absorção de aproximadamente 20 barn, a tela terá uma seção de choque efetiva de aproximadamente 1400 barn para este feixe de nêutrons, o que significa uma transmissão de 66% ou que 34% do feixe gerara partículas - α [41]. Embora estas partículas - α possuam energia de 1,47 MeV, o espectro que atinge os polímeros possui energias entre 0 e 1,47 MeV, pois as reações nucleares ocorrem à distâncias diferentes da superfície da tela. O outro produto desta reação nuclear, núcleos de lítio - 7 de energia 0,84 MeV, não foi considerado na formação dos traços pois seus danos aos detectores sendo muito superficiais não formam traços visíveis [32].

Embora até este capítulo, o Durolon ainda não tenha sido caracterizado como um SSNTD e, por uma questão de simplicidade, deste ponto em diante o Durolon também será denominado simplesmente de “detector ou de SSNTD”.

2.3 – Irradiações

As irradiações com nêutrons referentes ao presente trabalho foram realizadas no canal de irradiação 08 do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP, onde existe instalado um equipamento operacional que vem sendo utilizado para radiografia com nêutrons, figuras 2.1 e 2.2, capaz de gerar um feixe com intensidade, energia, homogeneidade e dimensões adequados para este estudo [18].

De uma forma geral, em um reator nuclear, os feixes de nêutrons são gerados da seguinte maneira. Primeiramente são gerados nêutrons rápidos como consequência do processo de fissão do núcleo de urânio – 235. Ao emergirem destes núcleos os nêutrons penetram no meio moderador do reator, que no caso é água leve e, por uma série de espalhamentos elásticos com os prótons deste meio, parte deles perde energia cinética até atingirem o equilíbrio térmico com este meio. Nesta condição os nêutrons são chamados de térmicos e, o seu espectro de velocidade é da forma de uma distribuição Maxwelliana. Se a temperatura do meio for de 20°C a velocidade mais provável da distribuição é de 2200m/s o que corresponde a uma energia de 25meV [28, 42]. Ainda como consequência da reação de fissão e de outras reações nucleares, surgirão também radiações gama. Inseridos no meio moderador estão os canais de irradiação que de uma forma geral são cilíndricos e tipicamente possuem diâmetros entre 6 e 8 polegadas. Em termos práticos, penetrarão nos canais de irradiação um espectro de nêutrons com energia entre 0 e ~ 2 MeV e um outro de radiação gama. No interior dos canais eles serão “tratados” de forma a maximizar a passagem das radiações desejáveis ao experimento (normalmente nêutrons com energia na região térmica) e minimizar as indesejáveis (normalmente nêutrons epitérmicos, rápidos e radiações gamas).

Especificamente, no interior do canal 08 existem instalados um filtro confeccionado em bismuto cuja finalidade é minimizar a contribuição da radiação - γ e dos nêutrons epitérmicos e rápidos no local de irradiação das amostras e, um colimador de nêutrons do tipo cônico divergente com paredes de parafina borada para dar forma ao feixe térmico. Ao deixar o canal, o feixe encontra dois obturadores cuja finalidade é aumentar a segurança do equipamento em termos de proteção radiológica; o primeiro para o feixe de nêutrons e o outro para o feixe de radiação - γ remanescente. Quando os obturadores permitem a passagem do

feixe, este penetra na câmara de irradiação com dimensões aproximadas de 2,0m x 2,0m x 2,0m e com paredes compostas basicamente por parafina, ácido bórico, cádmio, chumbo e concreto de barita.

FIGURA – 2.1. Equipamento para radiografia onde as irradiações foram realizadas

FIGURA 2.2 – Visão da câmara de irradiação

O equipamento possui também um beam – catcher, ou seja, uma blindagem maciça que intercepta as radiações que emergem do canal, após passarem pela amostra. Possui uma massa de aproximadamente 4.000Kg e pode se mover até 2m ao longo do feixe de nêutrons permitindo várias posições de irradiação e um fácil manuseio de amostras. As características do feixe de nêutrons na posição onde o fluxo de nêutrons é máximo estão apresentadas na tabela 2.1 [10].

Para as irradiações, os detectores são cortados no formato de retângulos, com dimensões aproximadas de 15 x 35 mm. Estes pedaços, juntamente com a tela, são posicionados no interior de um suporte de alumínio denominado cassete onde permanecem em firme contato durante a irradiação. Como mostrado na figura 2.3 o feixe de nêutrons passa através do detector e causara reações nucleares na tela. O feixe de partículas - α gerado até uma distância de aproximadamente 10 μm de sua superfície (alcance destas partículas na tela), interage com o detector gerando os danos, os quais após ataque químico geram os traços.

FIGURA 2.3 – Diagrama esquemático mostrando como são feitas as irradiações

Nesta geometria de irradiação em que os nêutrons atingem primeiro o detector, a quantidade de partículas - α geradas é maior do que no caso em que o

nêutron atinge primeiro a tela de boro [41]. Isto porque no segundo caso o feixe de nêutrons necessita primeiramente penetrar por toda a extensão do boro depositado na tela e, portanto ser constantemente atenuado, para então nos últimos 10 μ m gerar as partículas - α que poderão causar os danos no detector.

TABELA 2.1 – Características do feixe de nêutrons extraído do arranjo experimental.

Fluxo no local de irradiação	1,75x10 ⁶ n/cm ² .s
Razão fluxo térmico/epitérmico	5,7
Homogeneidade	~5%
Diâmetro útil	20cm
Energia média	7meV

2.4 - Ataque químico (revelação)

Após as irradiações, os detectores são então atacados quimicamente. Para tal finalidade uma cuba de pyrex com volume de 400 ml que contém a solução “PEW” é imersa em água aquecida. Quando a temperatura da solução atingir 70°C e permanecer constante, os detectores são inseridos na cuba de pyrex para serem atacados. O volume de água é de 35 litros e o gradiente de temperatura é minimizado por agitação mecânica da água mediante uma hélice acoplada a um motor elétrico como mostrado na figura 2.4 [18].

FIGURA 2.4 – Equipamento para o ataque químico

Após a revelação, os detectores são lavados em água corrente e filtrada. Para a sua secagem, são envolvidos em papéis suaves e absorventes. Nesta situação, estão prontos para serem analisados [12].

2.5 - Sistema digital [18, 19]

O sistema digital desenvolvido neste trabalho está mostrado esquematicamente na figura 2.5. Consta basicamente de um ampliador fotográfico e de um microscópio ótico, ambos acoplados a um computador.

FIGURA 2.5. Diagrama esquemático do sistema digital de leitura

Este sistema foi elaborado com o objetivo de se poder avaliar as grandezas:

- dimensões dos traços;
- quantidade de traços em uma área do detector;
- intensidade de luz transmitida pelos detectores;

Para a avaliação das duas primeiras os detectores irradiados e atacados são posicionados no microscópio e as imagens dos traços podem ser ampliadas até 1500x. A imagem é capturada por uma câmera de vídeo acoplada

à uma placa de captura de imagens, que está instalada em um computador onde a imagem é digitalizada. Nesta forma digital a imagem pode ser processada de modo a torná-la adequada para a determinação das dimensões e da quantidade dos traços. Este sistema denominado SATI (Sistema para Análise de Traços Individuais) é mostrado na figura 2.6 e, abaixo são listadas as suas principais características:

Microscópio: Marca: Leitz; Modelo: Ergolux; Modos de operação: transmissão e reflexão de luz; Aumentos: 300x - 600x - 1500x; Sistema ocular bifocal

Câmera de vídeo: Marca: Burle; Modelo: TC651B analógica; CCD: dimensão - 1/3"

Placa de captura: Marca: Pixel View; Modelo: PC TV 4.1; Resolução da imagem digital: 160x120 - 320x240 - 640 x 480 linhas x colunas

Software para o processamento da imagem: Image-pro plus v 4.1

Computador: Processador Pentium 4; 1Gb de RAM

FIGURA 2.6 – Sistema digital SATI

Para a avaliação da intensidade da luz transmitida pelos detectores o sistema digital é composto pelo ampliador de fotografias, uma câmera de vídeo, um conjunto transmissor/receptor de ondas e pelo computador. Este sistema possui uma fonte de luz (lâmpada especial para fotografia de 75W) que fornece um feixe luminoso divergente. Após a sua passagem através de um jogo de lentes (condensador), o feixe luminoso atinge o detector, perpendicularmente à sua superfície. A intensidade transmitida passa por outro jogo de lentes que transforma o feixe original em outro feixe também divergente que é projetado em uma tela branca e opaca com dimensões 18 cm x 24 cm. Para a atual configuração o fator de ampliação da imagem original é de aproximadamente 1,5. A câmera de vídeo está posicionada a 50 cm da tela e, captura a imagem projetada. Esta imagem é conduzida ao computador por meio de um transmissor de ondas de rádio sem fio onde é digitalizada e processada. De modo a minimizar a contribuição da luz ambiente na imagem capturada, este sistema está instalado no interior de uma câmara escura utilizada para a revelação de filmes. A intensidade da luz transmitida é avaliada em uma escala de níveis de cinza de 8 bits ou com 256 tons de cinza, que varia de 0 (para o pixel o mais escuro) a 255 (para o mais claro). Este sistema denominado SACT (Sistema para Análise de Conjunto de Traços) é mostrado na figura 2.7 e abaixo são listadas as suas principais características:

Ampliador fotografico: Simmon Bros Inc.; Modelo - 211

Câmera de vídeo: Marca Javelin; Modelo JE8242 analógica

Placa de captura: Marca: Pixel View; Modelo: PC TV 4.1; Resolução da imagem digital: 160x120 - 320x240 - 640 x 480 linhas x colunas

Software para o processamento da imagem: Image-pro plus v 4.1

Computador: Processador Pentium 4; 1Gb de RAM

Transmissor/Receptor: Fujika; modelo Fk-812

FIGURA 2.7 – Sistema digital SACT

2.6 - Sistema analógico [15, 16]

Para a avaliação das duas primeiras grandezas, o sistema analógico é composto pelo mesmo microscópio mencionado anteriormente e, as imagens dos traços capturadas pela câmara de vídeo são projetadas em um monitor de vídeo comum de 14 polegadas para avaliação direta do tamanho e da quantidade de traços. Este sistema é mostrado na figura 2.8.

Para a avaliação da intensidade da luz transmitida pelos detectores o sistema emprega um microfotômetro ótico (Jarrel – Ash). Neste aparelho um feixe de luz visível atinge o detector perpendicularmente. O feixe de luz transmitido pelo detector é colimado por uma fenda com dimensões típicas de $3\text{ }\mu\text{m} \times 700\text{ }\mu\text{m}$ e a sua intensidade é avaliada em um fotômetro analógico em uma escala de densidade ótica (D.O) que varia entre 0 e 2, correspondendo ao feixe de luz não atenuado e, à uma transmissão de 1% respectivamente. Este sistema é mostrado na figura 2.9 [17].

FIGURA 2.8 – Sistema de leitura analógico

FIGURA 2.9 – Diagrama esquemático do microfotômetro

CAPITULO 3 - OBTENÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

3.1 - Caracterização do sistema digital

Antes da caracterização do polímero Durodon para ser utilizado como um detector de traços nucleares é necessário verificar se o sistema digital desenvolvido é viável para ser utilizado nesta caracterização. Esta verificação foi feita comparando os valores de três parâmetros, taxa de crescimento do traço, taxa de produção de traços e, intervalo de exposição para obtenção do melhor contraste ótico, para os detectores Mk-DE e Mk-E, que foram obtidos no sistema digital e no sistema analógico. Além disto, fez parte desta verificação, uma avaliação da reprodutibilidade deste sistema digital.

Embora no presente trabalho os traços tenham sido causados por partículas - α , a exposição dos SSNTD foi considerada em relação ao feixe de nêutrons por dois motivos. O primeiro porque estas partículas foram geradas em uma tela de boro irradiada em um feixe de nêutrons e o segundo que as características deste feixe são bem conhecidas. A exposição aos nêutrons é dada por $E = \phi.t$ sendo " ϕ " o fluxo de nêutrons ($n.s^{-1}.cm^{-2}$) e " t " o tempo de irradiação (s).

3.1.1 - Taxa de crescimento do traço

A taxa de crescimento do traço foi determinada mediante o estudo do comportamento de seu diâmetro externo (Fig. 1.5), ou anel externo, em função do tempo de ataque. Para esta finalidade diversos detectores foram irradiados durante 10 segundos e atacados em intervalos de tempo que variaram entre 3 e 25 minutos. Após irradiação e ataque, os detectores foram posicionados e analisados no sistema SATI e as imagens dos traços ampliadas 1500x, o que corresponde a uma área do detector de $1,9 \times 10^{-4} cm^2$. Para esta condição de irradiação, existem em média 50 traços nesta área e, desde que a distribuição dos traços é mais ou menos homogênea e que para estes tempos de ataque os diâmetros variaram entre $2\mu m$ e $9\mu m$, a fração da área coberta pelos traços varia entre 1% e 16% respectivamente. Esta condição é desejável para este estudo

pois minimiza a possibilidade de sobreposição dos traços e portanto de uma avaliação falsa de seus diâmetros individuais.

Após serem capturadas as imagens dos traços foram digitalizadas e processadas de modo à melhor definir a sua borda. Em seguida foram ampliadas, via software, até 16 vezes e o diâmetro é determinado medindo a distância linear entre dois pixels localizados na borda do traço e que estejam diametralmente opostos, como mostrado na figura 3.1. Para esta medida foi utilizada uma escala de comprimento previamente calibrada, através de um padrão que é uma lâmina de vidro de dimensões 50mm x 30 mm com 2mm de espessura no centro da qual está gravada uma escala de 200 μ m com divisões de 10 μ m.

A figura 3.2 mostra o gráfico dos resultados para o Mk-E e Mk-DE onde cada ponto é uma média entre dez diâmetros individuais e as barras de erro são os desvios padrões das médias. Aos pontos experimentais foi ajustada uma reta pelo método dos mínimos quadrados e, a taxa de crescimento do traço corresponde ao valor de seu coeficiente angular.

Para a avaliação do diâmetro no sistema analógico, foram utilizados estes mesmos detectores. As imagens dos traços individuais ampliadas 1500x foram projetadas na tela do monitor de vídeo e os diâmetros avaliados diretamente nesta tela mediante o uso de uma régua plástica graduada cuja menor divisão da escala é de “meio milímetro”, como mostrado na figura 3.3. A figura 3.4 mostra o gráfico dos resultados para o Mk-E e Mk-DE em função do tempo de ataque, onde o valor de cada ponto corresponde a média entre dez diâmetros individuais e as barras de erro foram determinadas considerando os desvios padrões das médias e a incerteza de cada medida introduzida pela utilização da régua [12, 43, 44].

Os valores das taxas de crescimento dos traços obtidas para ambos os detectores e para ambos os sistemas estão apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2.

FIGURA 3.1 - Imagem digital para a medida do diâmetro do traço

FIGURA 3.2 - Gráfico do diâmetro do traço em função do tempo de ataque – sistema digital

FIGURA 3.3 - Imagem analógica para medida do diâmetro do traço

FIGURA 3.4 - Gráfico do diâmetro do traço em função do tempo de ataque – sistema analógico

3.1.2 - Taxa de produção de traços

A taxa de produção de traços é definida como o valor máximo da razão traço/nêutron e foi determinada mediante o estudo do comportamento da densidade de traços (traço/cm²) no detector em função da exposição aos nêutrons (n.cm⁻²). Para a sua determinação os detectores foram irradiados em diversas exposições e revelados durante 6 minutos, que é o tempo de ataque para o qual a eficiência de conversão do nêutron em traço é máxima [12].

Após irradiação e revelação, os detectores foram posicionados no sistema digital SATI e as imagens dos traços analisadas a uma ampliação de 600x. Para este aumento a área visualizada do detector é de $4,79 \times 10^{-4}$ cm². Após um processamento que envolve a aplicação repetida e combinada de dois tipos de filtros, cuja finalidade é transformar “traços em pontos”, os traços foram contados automaticamente pelo software image – pro, como mostrado na figura 3.5. A figura 3.6 mostra os resultados obtidos para o Mk-E e Mk-DE. Cada ponto deste gráfico corresponde a média entre dez contagens individuais realizadas em dez áreas distintas e, as barras do erro correspondem ao desvio padrão da média. Aos pontos experimentais foi ajustada uma reta pelo método dos mínimos quadrados e o seu coeficiente angular é a taxa de produção de traços.

Para a avaliação no sistema analógico, foram utilizados os mesmos detectores. As imagens dos traços ampliadas 1500x são projetadas na tela do monitor de vídeo e a contagem é feita visualmente da seguinte maneira: uma fina membrana plástica e transparente é colada na tela do monitor e utilizando uma caneta vermelha de ponta porosa, cada traço é marcado nesta membrana ao mesmo tempo em que é registrado em um contador semi-automático, como mostrado na figura 3.7 [16, 41]. Para esta ampliação cada área do detector na qual a contagem foi feita corresponde a $1,37 \times 10^{-4}$ cm². Os resultados obtidos estão mostrados na figura 3.8 e cada ponto do gráfico foi obtido calculando a média das contagens em dez áreas distintas e as barras do erro correspondem ao desvio padrão da média.

As taxas da produção de traços obtidas para ambos os detectores para os sistemas digital e analógico estão apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2.

São também apresentados nestas tabelas os valores das densidades de traços de fundo para cada detector, ou seja, de traços causados por radiação

cósmica, idade, danos mecânicos, que são numericamente iguais aos coeficientes lineares das retas ajustadas.

FIGURA 3.5 - Imagem digital dos traços processados para contagem

FIGURA 3.6 - Gráfico da densidade de traços em função da exposição para 6 minutos de ataque - sistema digital

FIGURA 3.7 - Imagem analógica para a contagem dos traços

FIGURA 3.8 - Gráfico da densidade de traços em função da exposição para 6 minutos de ataque - sistema analógico

3.1.3 - Intervalo de exposição para obtenção do melhor contraste ótico

O intervalo de exposição para se obter o melhor contraste ótico foi determinado mediante o estudo do comportamento da curva que relaciona a intensidade da luz transmitida pelos detectores, irradiados e revelados, em função da exposição ao feixe de nêutrons. O contraste ótico é definido pela relação $G = \Delta NC / \Delta(\log E)$ e é máximo na região mais íngreme desta curva[45].

Para esta finalidade, diversos detectores foram irradiados no intervalo de tempo entre 5 segundos e 4 horas o que corresponde ao intervalo de exposição $1 \times 10^7 < E < 2 \times 10^{10} \text{ n.cm}^{-2}$. Os detectores foram atacados durante 6 minutos e posicionados no sistema digital (SACT). A imagem dos detectores foi capturada e digitalizada e o nível de cinza – NC correspondente a cada um foi determinado usando o mesmo software image - pro, que avalia simultaneamente a média da intensidade de aproximadamente 1700 pixels individuais em uma área de $0,4 \text{ cm}^2$ do detector. A figura 3.9 mostra a imagem digital de um conjunto de 12 detectores irradiados e atacados nas condições mencionadas acima, bem como a área na qual a intensidade da luz foi determinada.

As curvas obtidas de “NC” em função de “E” para os detectores Mk-E e Mk-DE são mostrados na figura 3.10 e, os intervalos de exposição para os quais o contraste ótico é máximo estão indicados por setas.

Os resultados para o sistema analógico foram extraídos das referências [12, 41] uma vez que estes não puderam ser refeitos para estes mesmos detectores, pois como já mencionado o microfotômetro no qual estas medidas deveriam ser realizadas não está mais disponível.

Os intervalos e as razões de exposição bem como os tempos de irradiação para se obter o melhor contraste para ambos os detectores, para os sistemas analógico e digital estão apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2.

FIGURA 3.9 - Imagem digital mostrando as diferenças nos níveis de cinza para detectores irradiados em exposições diferentes.

FIGURA 3.10 - Gráfico do nível de cinza em função da exposição para 6 minutos de ataque – sistema digital

3.1.4 - Análise e comparação dos resultados

3.1.4.1 - Quanto a qualidade dos resultados

As tabelas 3.1 e 3.2 abaixo resumem os dados referentes a ambos os sistemas para os dois detectores Mk-DE e Mk-E.

TABELA 3.1 - Dados comparativos entre os sistemas analógico e digital para o detector Mk-DE

Mk-DE	Sistema digital	Sistema analógico
Taxa de crescimento do traço ($\mu\text{m}/\text{min}$)	$0,29 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,01$
Taxa de produção de traços (traços/nêutron)	$0,0106 \pm 0,0008$	$0,0114 \pm 0,0005$
Traços de fundo (tr/cm ²)	$(0,7 \pm 0,4) \times 10^5$	$(1,6 \pm 0,3) \times 10^5$
Intervalo de exposição(n.cm ⁻²)	$2 \times 10^8 < E < 8 \times 10^9$	$1 \times 10^9 < E < 3 \times 10^{10}$
Razão de exposição	40	30
Tempo de irradiação(h)	1,2	4,7

TABELA 3.2 - Dados comparativos entre os sistemas analógico e digital para o detector Mk-E

Mk-E	Sistema digital	Sistema Analógico
Taxa de crescimento do traço ($\mu\text{m}/\text{min}$)	$0,33 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,02$
Taxa de produção de traços (traços/nêutron)	$0,0095 \pm 0,0006$	$0,0093 \pm 0,0004$
Traços de fundo (tr/cm ²)	$(0,3 \pm 0,3) \times 10^5$	$(1,5 \pm 0,3) \times 10^5$
Intervalo de exposição (n.cm ⁻²)	$2 \times 10^8 < E < 6 \times 10^9$	$1 \times 10^9 < E < 2 \times 10^{10}$
Razão de exposição	30	20
Tempo de irradiação(h)	1	3,2

De acordo com os resultados obtidos, se pode concluir que:

- as taxas, de crescimento do diâmetro e da produção de traços para o Mk-DE e para o Mk-E obtidas em ambos os sistemas concordam dentro das suas incertezas
- para ambos os detectores a quantidade de traços de fundo quando lida no sistema digital é menor do que quando lida no analógico. Desde que o microscópio em ambos os sistemas é o mesmo, a diferença na quantidade de traços de fundo provem da metodologia de leitura. De acordo com os dados a maior diferença ocorre para o Mk-E. Como uma das faces deste detector é rugosa e esta contém muitos traços “falsos”, os dados mostram que existe uma tendência maior em considerá-los verdadeiros ao se realizar a contagem visual.
- as razões de exposição são maiores quando avaliadas no sistema digital significando que o contraste permanece máximo por um intervalo de exposição maior. Além disto, desde que o fim deste intervalo é alcançado antes no sistema digital, significa que é necessário menos tempo de irradiação para se atingir a região de contraste máximo.

3.1.4.2 - Quanto a obtenção de dados

Com relação ao modo de como os dados são obtidos em ambos os sistemas, vale a pena mencionar que:

- no sistema analógico, o diâmetro do traço é avaliado utilizando uma régua plástica transparente pressionada contra a tela curva do monitor de video.
- no digital, o diâmetro é avaliado medindo a distância entre dois pixels em uma imagem bem definida e ampliada.
- no sistema analógico a contagem dos traços é visual e feita diretamente em uma imagem ampliada 1500x na tela do monitor. Tipicamente em uma tela contendo 150 traços a contagem é feita em aproximadamente 10 minutos.
- no sistema digital o mesmo trabalho é executado pelo software em aproximadamente 10 segundos e, em uma área aproximadamente 2,5 vezes maior do que a anterior pois a imagem é ampliada 600x. Desta forma, o tempo gasto para a obtenção de uma das curvas da figura 3.6 utilizando o sistema digital

é de aproximadamente 10 minutos enquanto que para a obtenção de uma das curvas da figura 3.8 utilizando o sistema analógico, por causa do cansaço visual, é de aproximadamente 15 horas. Assim, além de evitar o cansaço visual, o sistema digital pode propiciar um menor erro estatístico na contagem dos traços.

- no sistema analógico, a leitura da luz transmitida pelo detector é realizada no microfotômetro mediante uma varredura ao longo de cada detector como mostrado na figura 3.11. Para cada varredura são realizadas 100 leituras individuais, cada uma correspondendo à uma área de $2,1 \times 10^{-5} \text{cm}^2$, o que significa uma área total de $2,1 \times 10^{-3} \text{cm}^2$. O valor da intensidade da luz transmitida para cada detector é determinado mediante a média destas 100 medidas individuais e o tempo total gasto nesta avaliação é de aproximadamente 20 minutos.

FIGURA 3.11 - Esquema mostrando como a luz transmitida pelo detector é lida no microfotômetro

- no sistema digital, a intensidade do nível de cinza e a sua incerteza, são avaliadas pela média das intensidades de aproximadamente 1700 pixels individuais, dentro de uma área de aproximadamente $0,4 \text{ cm}^2$ do detector e este procedimento leva alguns segundos. Desta forma o tempo despendido para a obtenção de uma curva, como a da figura 3.10, é de 5 minutos enquanto que utilizando o sistema analógico, o tempo necessário é de 4 horas de trabalho ininterrupto e em uma área aproximadamente 200 vezes menor.

A facilidade para tornar o sistema digital operacional deve também ser mencionada. À exceção do microscópio ótico, todos os outros componentes são padrões, o que torna este sistema acessível a qualquer laboratório.

3.2 - Reprodutibilidade do sistema digital [46]

No presente trabalho a reprodutibilidade foi expressa, em termos do desvio padrão percentual, relativo ao valor médio das medidas efetuadas para as grandezas que originam os três parâmetros estudados.

3.2.1 - Taxa de crescimento do traço

Com relação ao parâmetro taxa de crescimento do traço a grandeza medida foi o diâmetro do traço e, o procedimento para a determinação da reprodutibilidade foi o seguinte:

- 1 – irradiação de 10 detectores
- 2 – ataque químico a cada detector um em sua própria solução
- 3 – para cada detector medir o diâmetro de 10 traços individuais e calcular a sua média. O desvio padrão das 10 médias foi - $\sigma = 0,2\mu\text{m}$ e o percentual foi 5,4%.

O procedimento para a verificação da influência do sistema SATI foi o seguinte:

- 1 - irradiação e ataque químico em um único detector
- 2 – medir 5 vezes o diâmetro de um mesmo traço e calcular a sua média
- 3 – repetir 10 vezes o procedimento 2. O desvio padrão das 10 médias foi - $\sigma = 0,05\mu\text{m}$ e o percentual foi 1,6%

Considerando que a influência do sistema digital na medida seja independente da influência dos outros fatores:

$$\sigma^2 = \sigma_{(\text{SATI})}^2 + \sigma_{(\text{outros fatores})}^2 \quad (4.1)$$

$$0,2^2 = 0,05^2 + \sigma_{(\text{outros fatores})}^2$$

$$\sigma_{(\text{outros fatores})} = 0,19\mu\text{m}$$

Portanto a influência do sistema digital na reprodutibilidade da medida do diâmetro é desprezível.

3.2.2 - Taxa de produção de traços

Com relação ao parâmetro taxa de produção de traços a grandeza medida foi a contagem de traços em uma área específica e o procedimento para a determinação da reprodutibilidade foi o seguinte:

- 1 – irradiação de 10 detectores a mesma exposição
- 2 – ataque químico a cada detector em sua própria solução

3 – para cada detector contar os traços em 10 áreas individuais e calcular a sua média. O desvio padrão das 10 médias foi - $\sigma = 15$ e o percentual foi 4,4%.

O procedimento para a verificação da influência do sistema SATI foi o seguinte:

1 – irradiação e ataque químico em um único detector

2 – contar 5 vezes o número de traços em uma mesma área e calcular a sua média

3 – repetir 10 vezes o procedimento 2. O desvio padrão das 10 médias foi - $\sigma = 0$ e o percentual foi 0%.

Portanto não existe influência do sistema digital na reprodutibilidade da medida do número de traços.

3.2.3 - Intervalo de exposição para ótimo contraste

Com relação ao parâmetro intervalo de exposição para ótimo contraste a grandeza medida foi a Intensidade de luz transmitida pelo detector e o procedimento foi o seguinte:

1 – irradiação individual de 10 detectores a mesma exposição

2 – ataque químico a cada detector um em sua própria solução

3 – para cada detector medir a intensidade da luz transmitida em 10 áreas individuais e calcular a sua média. O desvio padrão das 10 médias foi - $\sigma = 6,7$ e o percentual foi 3,9%.

O procedimento para a verificação da influência do sistema SACT foi o seguinte:

1 - irradiação e ataque químico em um único detector

2 – medir 10 vezes a intensidade da luz transmitida em uma mesma área e calcular a sua média. O desvio padrão das 10 médias foi - $\sigma = 1,6$ e o percentual foi 0,9%

Considerando que a influência do sistema digital na medida seja independente da influência dos outros fatores:

$$\sigma^2 = \sigma_{(\text{SACT})}^2 + \sigma_{(\text{outros fatores})}^2 \quad (4.2)$$

$$6,7^2 = 1,6^2 + \sigma_{(\text{outros fatores})}^2$$

$$\sigma_{(\text{outros fatores})} = 6,5$$

Portanto a influência do sistema digital na reprodutibilidade da medida de transmissão de luz é desprezível.

Dentre os fatores que contribuem para a influência do sistema digital na reprodutibilidade destacam-se:

- erros de calibração da escala do sistema SATI
- erros de posicionamento do cursor para a medida do diâmetro
- instabilidade do sistema de contagem SATI
- instabilidade do sistema de leitura SACT

Dentre os fatores que contribuem para a influência dos “outros fatores” na reprodutibilidade destacam-se:

- quantidade de energia depositada ao longo do dano
- ângulo de incidência da partícula
- qualidade dos produtos químicos e temperatura utilizados na revelação
- tempo de irradiação
- quantidade de traços gerados

3.3 - Caracterização do polímero Durolon como um SSNTD

Esta caracterização refere-se a quantificação dos parâmetros:

- taxa de crescimento do diâmetro externo do traço
- taxa de crescimento do diâmetro interno do traço
- taxa de produção de traços
- intervalo de exposição para obtenção do melhor contraste ótico
- ângulo crítico de incidência
- transparência à luz visível

Nas figuras abaixo estão apresentados os dados que foram obtidos para o Durolon. Entretanto, e com o intuito de se realizar uma comparação, nas tabelas 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 estão também apresentados os resultados para o Mk-DE e para o Mk-E obtidos utilizando este mesmo sistema digital.

3.3.1 - Taxa de crescimento do traço

A determinação da taxa de crescimento do traço seguiu o mesmo procedimento empregado em 3.1.1. A figura 3.12 mostra o gráfico do diâmetro do

traço em função do tempo de ataque. A taxa de crescimento do traço obtida está apresentada na tabela 3.3.

Por meio do sistema digital foi possível se ter acesso ao diâmetro interno do traço, também mostrado nesta figura, e assim à área de seu anel externo, que é o responsável pelo enegrecimento do detector, dado até então inacessível pelo sistema analógico. Isto nos permitiu explicar o motivo pelo qual a região de trabalho do Durolon começa e termina antes do que a dos outros detectores (vide item 3.3.3).

FIGURA 3.12 - Gráfico dos diâmetros interno e externo em função do tempo de ataque.

Como mostrado nesta tabela, com exceção do valor da taxa de crescimento do diâmetro externo para o Mk-E, todos os outros valores tanto para o diâmetro externo quanto para o interno concordam dentro de suas incertezas. A princípio já esperávamos que todos os valores destas taxas fossem próximos, uma vez que os três SSNTD são policarbonatos e que foram atacados pela mesma solução química e à mesma temperatura.

TABELA 3.3 - Comparação entre os valores das taxas de crescimento dos diâmetros externo e interno para os três SSNTD estudados

	Diâmetro externo	Diâmetro interno
	($\mu\text{m}/\text{min}$)	($\mu\text{m}/\text{min}$)
Mk-E	$0,33 \pm 0,01$	$0,14 \pm 0,01$
Mk-DE	$0,29 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,01$
Durolon	$0,29 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$

3.3.2 - Taxa de produção de traços

Afim de determinar a taxa de produção de traços foi necessário determinar primeiramente o tempo de ataque para o qual a conversão traço/nêutron é máxima. Para esta finalidade diversas tiras do detector foram irradiadas à uma mesma exposição $E = 6 \times 10^7 \text{ n.cm}^{-2}$. Após contagem no sistema SATI, à um aumento de 600x, o comportamento da densidade de traços em função do tempo de ataque é mostrado na figura 3.13. Cada ponto do gráfico corresponde a média das densidades de cinco áreas distintas e, as barras de erro ao desvio padrão da média. Como pode ser observado, a conversão é máxima para 8 minutos de ataque.

A taxa da produção de traços foi determinada mediante o mesmo procedimento empregado em 3.1.2. A figura 3.14 mostra os resultados obtidos para a densidade de traços em função da exposição para este tempo de ataque. Os valores para a taxa da produção de traços e para a densidade de traços de fundo do detector estão apresentados na tabela 3.4.

FIGURA 3.13 - Gráfico mostrando o comportamento da densidade de traços em função do tempo de ataque

FIGURA 3.14 - Gráfico da densidade de traços em função da exposição para 8 minutos de ataque

Como mostrado nesta tabela, quanto ao tempo ótimo do ataque químico, também esperávamos resultados próximos para os SSNTD pois todos são oriundos do Makrolon e foram atacados na mesma solução.

Quanto aos traços de fundo, ou seja, traços que existem no detector sem serem irradiados e, que são oriundos de sua interação com as radiações cósmicas, idade, fabricação, manipulação, etc, o Durolon, e o Mk-DE são os detectores “mais sujos”. Isto de certa forma é esperado para o Durolon uma vez que dos três polycarbonatos analisados, somente o Durolon não foi produzido para esta finalidade. Com relação as taxas de produção de traços, os três detectores apresentaram valores muito próximos dentro de suas incertezas significando que suas eficiências, ou seja, que a quantidade de traços produzidos por nêutron incidente no conversor de boro são muito próximas.

TABELA 3.4 - Comparação entre o tempo ideal de ataque químico, as taxas de produção de traços e a quantidade de traços de fundo para os três SSNTD estudados

	Tempo de ataque (min)	Taxa de produção de traços (tr/n)	Traços de fundo
Mk-E	6	0,0095±0,0006	(0,3±0,3).10 ⁵
Mk-DE	6	0,0106±0,0008	(0,7±0,4).10 ⁴
Durolon	8	0,0109±0,0004	(0,9±0,2).10 ⁵

3.3.3 - Intervalo de exposição para obtenção do melhor contraste ótico

A determinação da exposição para se obter o melhor contraste seguiu o mesmo procedimento de 3.1.3. Os detectores foram irradiados no intervalo de exposição $1 \times 10^7 < E < 1,5 \times 10^{10} \text{ n.cm}^{-2}$. Após 8 minutos de ataque eles foram posicionados no sistema digital e, o nível de cinza correspondente a cada detector, determinado usando o mesmo software. O comportamento do nível de cinza em função da exposição é mostrado na figura 3.15 e o intervalo de exposição para o qual o contraste ótico é máximo esta indicado por setas. Este resultado, bem como a razão de exposição correspondente à este intervalo e, o tempo de irradiação para se obter o melhor contraste estão apresentados na Tabela 3.5.

FIGURA 3.15 - Gráfico do nível de cinza em função da exposição para 8 minutos de ataque

De acordo com os resultados mostrados nesta tabela, é importante frisar que o Durolon é o SSNTD que exibe a maior razão de exposição, ou seja, é o que possui o maior intervalo de trabalho para o qual o contraste se mantém elevado o que é muito importante se o detector estiver sendo utilizado como um filme radiográfico. Outro fato relevante é que a sua região de trabalho começa e termina antes do que a dos demais detectores, significando uma exposição ou tempo de irradiação menores.

TABELA 3.5 - Comparação entre os intervalos de exposição para o qual o contraste ótico é máximo para os três SSNTD estudados

	Intervalo de exposição (n.cm ⁻²)	Razão de exposição	Tempo de irradiação (h)
Mk-E	$2 \times 10^8 < E < 6 \times 10^9$	30	1
Mk-DE	$2 \times 10^8 < E < 8 \times 10^9$	40	1,2
Durolon	$7 \times 10^7 < E < 4 \times 10^9$	57	0,7

Estas conclusões foram baseadas em curvas traçadas pela guia dos olhos aos gráficos de nível de cinza em função da exposição e, portanto, os valores da exposição do início e do fim das regiões são, a princípio, mais ou menos arbitrários. Entretanto, por meio do sistema digital foi possível ter acesso a outras características dos traços, até então inacessíveis pelo sistema analógico e, explicar esta conclusão. Como mostrado na figura 3.12, o sistema digital permitiu acesso tanto ao diâmetro externo como interno dos traços e assim à área de seu anel externo, que é o responsável pelo enegrecimento do detector. De acordo com a figura 3.16 os valores destas áreas, correspondentes aos melhores tempos de ataque (mostrado por flechas) são os seguintes: Durolon $\sim 10\mu\text{m}^2$; Mk-DE $\sim 9\mu\text{m}^2$; Mk-E $\sim 6\mu\text{m}^2$. Desde que o Durolon exibe a maior área, a sua região de melhor contraste deve começar e terminar antes dos demais pois traços maiores espalham mais a luz, mas se sobrepõe primeiro.

FIGURA 3.16 - Gráfico das áreas das coroas dos traços em função do tempo de ataque

3.3.4 - Ângulo crítico[47]

O ângulo crítico de incidência já foi definido no Capítulo 1, pela expressão (1.12) e para a sua determinação é necessário se conhecer as velocidades de ataque no dano - V_t e na superfície do detector não danificado - V_s .

No presente trabalho, foi desenvolvida uma técnica para a determinação de V_t denominada de “focalização seletiva” cuja idéia central é a seguinte: a profundidade de um dano corresponde ao alcance da partícula - α no detector [8]. Sabe-se que estas regiões são quimicamente mais reativas do que as não danificadas e que um traço possuirá forma cônica enquanto a solução estiver atacando esta região. Assim, a distância relativa entre a base e o vértice do cone aumenta com o tempo de ataque, até que a solução química atinja o fim do dano, para então permanecer constante. Esta distância foi determinada mediante “focalização” seletiva”, ou seja, medindo a distância que a objetiva do microscópio se desloca entre a focalização da base de um cone situado na superfície do detector e do seu vértice. Repetindo-se este procedimento, se determina o valor do tempo de ataque para o qual esta distância permaneça constante. De acordo com os dados apresentados na figura 3.17, o valor deste tempo é de aproximadamente 8 minutos. Desde que o alcance da partícula - α no detector é de $\sim 7\mu\text{m}$, encontra-se para $V_t \sim 0,8\mu\text{m}/\text{min}$.

Por outro lado V_s é numericamente igual ao coeficiente angular da reta ajustada aos pontos que relacionam variação de espessura do detector em função do tempo de ataque [8]. Os pontos experimentais estão mostrados na figura 3.18 e o resultado obtido foi $V_s = 0,144\mu\text{m}/\text{min}$, resultando para $\theta_c \sim 10^\circ$, mostrado na tabela 3.6.

FIGURA 3.17 - Gráfico da profundidade do traço em função do tempo de ataque

FIGURA 3.18 - Gráfico da variação da espessura do detector em função do tempo de ataque

Os resultados para os três detectores estudados neste trabalho, estão apresentados nesta tabela 3.6.

TABELA 3.6 - Comparação entre as velocidades de ataque ao longo do traço (V_t) e na superfície não irradiada (V_s) e entre os ângulo críticos determinados pelo método proposto, para os três SSNTD estudados

	$V_t(\mu\text{m/min})$	$V_s(\mu\text{m/min})$	ângulo crítico($^\circ$)
Mk-E	1,1	$0,142 \pm 0,007$	7,4
Mk-DE	1,27	$0,138 \pm 0,009$	6,2
Durolon	0,825	$0,144 \pm 0,004$	10,05

Desde que a velocidade – V_s de ataque na superfície para os três SSNTD são iguais dentro de suas respectivas incertezas, a explicação para as diferenças entre os ângulos críticos está na velocidade - V_t de ataque nas trilhas de danos e neste caso, a correspondente ao Durolon é a menor. Como é sabido V_t depende da estrutura molecular de cada policarbonato e dos aditivos empregados na fabricação (que é uma componente de segredo industrial).

Entretanto, mesmo que o ângulo crítico do Durolon seja o menor deles, os dados da tabela 3.4 mostram que isto não influenciou na sua eficiência de gerar traços. A explicação deste fato deve vir da presente geometria de irradiação (figura 2.3) que neste caso propicia um feixe de partículas - α paralelo e não cônico divergente.

3.3.5 - Transparência à luz visível

Alguns detectores transparentes podem passar a apresentar um aspecto translúcido e/ou uma coloração amarela clara ao serem atacados pelas soluções químicas comumente utilizadas. A consequência da perda desta transparência é a elevação do fundo ótico do detector e portanto uma diminuição de sua razão sinal/ruído.

Para a avaliação da transparência, diversos pedaços de Durolon não irradiados foram submetidos ao ataque químico em um tempo de até 16 minutos. Os resultados obtidos apresentados na figura 3.19 mostram que o Durolon não perde a sua transparência à luz visível mesmo após 15 minutos, o qual é

praticamente o dobro do utilizado no ataque. Isto significa que de acordo com os dados da literatura [9] sua transmitância permanece próxima a 90%.

FIGURA 3.19 - Comportamento da transparência do detector à luz visível em função do tempo de ataque

De acordo com os resultados obtidos, os três SSNTD estudados não apresentam qualquer variação significativa em sua transparência à luz visível até 15 minutos, o qual é superior ao tempo ótimo de ataque. O Mk-E exibe uma transparência intrínseca menor do que os demais porque este SSNTD é translúcido enquanto que os outros são transparentes. Desta forma nenhum dos três SSNTD terá redução do contraste ótico causada pelo ataque químico, o que vem a ser importante se forem utilizados como filmes radiográficos.

TABELA 3.7 - Comparação entre as transparências a luz visível para os três SSNTD estudados

	Tempo de ataque (min)	Nível de cinza medio
Mk-E	0 a 15	200
Mk-DE	0 a 15	255
Durolon	0 a 15	255

CAPITULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 - Conclusões referentes ao Durolon

Baseado nos resultados obtidos é possível concluir que o policarbonato Durolon exhibe características desejáveis para ser empregado como um detector de traços nucleares de estado sólido.

As condições que o Durolon deve ser submetido para se ter a melhor eficiência de detecção e o melhor contraste ótico são as seguintes:

- Exposição: $4 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2}$
- Tempo de ataque: 8 minutos
- Tempo de irradiação em um fluxo de $1,75 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}\text{cm}^{-2}$: 0,7 horas

As características do Durolon nestas condições são as seguintes:

- Taxa de produção de traços: 0,01 traços/nêutron
- Diâmetro do traço: $3,8 \mu\text{m}$
- Intervalo de exposição: $7 \times 10^7 < E < 4 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2}$
- Transparência: inalterada com uma transmitância de $\sim 90\%$

Comparando as características do Durolon com as do Mk-DE e do Mk-E se pode concluir que embora o tempo de ataque ao Durolon para se obter a maior eficiência de conversão traço/nêutron seja de 8 minutos, o qual é 2 minutos maior do que para os outros dois, o tempo de irradiação necessário para atingir a região de melhor contraste é de 42 minutos, o qual é 20 minutos menor do que para o Mk-E e 30 minutos menor do que para o Mk-DE.

Quanto aos outros parâmetros estudados, eles apresentaram valores muito similares.

Ainda é importante salientar que além do Durolon estar disponível no mercado interno, possui um preço acessível. Uma chapa com 2m^2 e $500 \mu\text{m}$ de espessura pode ser adquirida por um preço de R\$ 60,00.

4.2 - Conclusões referentes ao sistema digital

De acordo com os resultados obtidos nos testes de caracterização, nos quais os sistemas analógico e digital foram utilizados para a determinação dos mesmos parâmetros, dos mesmos detectores Mk-E e Mk-DE, o sistema digital mostrou-se viável quanto a qualidade dos resultados e, em muitos aspectos desejável quanto a facilidade para a obtenção e o processamento de dados registrados. Viável porque os valores obtidos para as taxas de crescimento dos traços e para a produção de traços para o Mk-E e para o Mk-DE concordaram dentro de suas incertezas e a quantidade de traços de fundo bem como o tempo de irradiação necessário para se obter o melhor contraste ótico nestes detectores são menores. Desejável porque tanto o cansaço visual quanto o tempo demasiadamente elevado para a realização das medidas, que são características do sistema analógico, são minimizados mediante a utilização do sistema digital. Por exemplo, medidas de comprimento na escala microscópica são feitas em imagens grandes e de contornos bem definidos, contagens de traços e medidas de intensidade de luz transmitida pelo detector são feitas automaticamente. As escalas de tempo para a obtenção dos dados passam de muitas horas, para minutos ou até mesmo segundos e a qualidade dos resultados é pelo menos similar as obtidas no sistema analógico.

Para finalizar vale a pena mencionar novamente que o sistema digital permitiu o acesso a outros dados, como a área do anel externo dos traços bem como a inspeção da transmissão de luz por um único traço, que são parâmetros fundamentais para a compreensão e o acesso a teoria da formação da imagem em SSNTD.

4.3 – Aplicações do Durolon

Ainda como conclusões, são mostrados abaixo alguns exemplos da aplicação do Durolon. Vale a pena enfatizar que nestes exemplos o Durolon foi irradiado no equipamento instalado no canal de irradiação 08 do reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP.

No primeiro exemplo o Durolon foi utilizado como um filme para registrar imagens da técnica da radiografia com nêutrons [48]. Nesta técnica o feixe de nêutrons passa pela amostra a ser radiografada e a intensidade transmitida incide em uma tela de boro gerando um feixe de partículas - α , cuja

intensidade modulada segue o mesmo padrão daquela dos nêutrons transmitidos. O feixe alfa incide no Duroton formando os danos, os quais após ataque químico transformam-se em traços que formam a imagem. O Duroton é então posicionado no sistema digital SACT e a imagem é processada mediante o software image-pro. Nas figuras 4.1 e 4.2 são mostradas as imagens processadas das radiografias de um isqueiro a gás e de um aerosol obtidas nas condições descritas no início deste capítulo. Nestas imagens podem ser vistos diversos detalhes das estruturas internas destas amostras.

FIGURA 4.1 – Radiografia com nêutrons de um isqueiro a gás obtida com o Duroton

FIGURA 4.2 - Radiografia com nêutrons de um aerosol obtida com o Duroton

No segundo exemplo o Durolon também foi utilizado como um filme, na técnica da radiografia com partículas - α induzida por nêutrons [45]. Nesta técnica, o feixe de nêutrons atravessa o Durolon, atravessa a amostra a ser radiografada e incide na tela de boro gerando partículas - α . Parte destas partículas incide na amostra e a intensidade transmitida causará danos no Durolon, os quais como anteriormente, após ataque químico transformam-se em traços formando a imagem. O Durolon é então posicionado no sistema digital SACT e a imagem registrada é processada mediante o software image-pro. Na figura 4.3 esta mostrada a radiografia de uma colônia de bactérias e na figura 4.4 detalhes ampliados desta colônia.

FIGURA 4.3 – Colônia de bactérias radiografada com partículas - α .

FIGURA 4.4 – Detalhe ampliado da colônia da figura 4.3.

No terceiro exemplo o Durolon foi empregado como um dosímetro de nêutrons térmicos. O conjunto Durolon – tela foi irradiado no mesmo feixe de nêutrons e como anteriormente a informação foi levada ao detector pelo feixe de partículas - α gerado na tela de boro.

Num primeiro teste estabelecemos uma correspondência entre dose e densidade de traços. O conjunto Durolon - tela foi submetido à irradiações de até 40 segundos, o que para o presente feixe de nêutrons corresponde a uma dose de $\sim 80\text{mRem}$ [49]. Este tempo foi limitado a 40 segundos pois sabíamos previamente que para este feixe, irradiações acima deste tempo levam a sobreposição dos traços, o que torna a sua contagem imprecisa. Após irradiação e ataque os detectores foram posicionados no sistema SATI e o comportamento da dose em função da densidade de traços está mostrado na figura 4.5. Aos pontos experimentais foi ajustada uma reta pelo método dos mínimos quadrados e a função que fornece o valor da dose em função da densidade de traços é a seguinte:

$$Y = (-9 \pm 2) + (1,06 \pm 0,04) \times 10^{-4} \cdot X \quad (4.1)$$

sendo:

$Y = \text{Dose}[\text{mRem}]; X = \text{Densidade de traços}[\text{tr}/\text{cm}^2]$

No segundo teste, o conjunto foi irradiado em até 4 horas, o que corresponde a dose máxima de $\sim 30\text{Rem}$. Neste caso estabelecemos uma correspondência entre dose e nível de cinza. Os detectores foram posicionados no sistema SACT e o comportamento da dose em função dos níveis de cinza está mostrado na figura 4.6. Neste caso a função ajustada foi uma hipérbolica e a expressão que fornece o valor da dose em função do nível de cinza é a seguinte:

$$Y = (1000 \pm 120) \cdot X / ((-69,5 \pm 0,3) + X) \quad (4.2)$$

sendo:

$Y = \text{Dose}[\text{mRem}]; X = \text{Nível de cinza}$

A curva mostra que o intervalo de dose mensurável está entre ~ 100 e $\sim 15000\text{mRem}$.

É importante salientar que os intervalos de dose correspondentes a cada método praticamente se sobrepõe, significando uma faixa muito ampla de sua aplicação para esta finalidade, ou seja, entre $\sim 5\text{mRem}$ e 30Rem [50].

FIGURA 4.5 - Valores da dose de nêutrons térmicos em função da densidade de traços

FIGURA 4.6 - Valores da dose de nêutrons térmicos em função do nível de cinza

4.4 - Trabalhos sugeridos

Para finalizar é muito importante salientar que como o sistema digital permitiu acesso a distribuição de luz no interior de um único traço, tornou possível novas perspectivas de pesquisa pois como já mencionado, tem-se acesso aos parâmetros fundamentais que norteiam a teoria mais aceita hoje a respeito da formação da imagem em um SSNTD [20, 21, 22, 23]. A seguir, estão apresentados alguns dados que demonstram a viabilidade do emprego deste sistema para o tipo de estudo sugerido. De acordo com esta teoria, o enegrecimento de um detector de traços nuclear ocorre fundamentalmente devido ao espalhamento da luz por um único traço, ou melhor, em regiões específicas do traço.

Na figura 4.7 são mostrados sobrepostos, um traço do Durolon obtido à 8 minutos de ataque e a varredura da transmissão de luz ao longo da sua direção radial.

FIGURA 4.7 - Imagem digital de um único traço e a distribuição de luz em seu interior.

Como pode ser observado nesta figura, o sistema digital permite acesso à transmissão de luz por diversas regiões do traço bem como à função $T(r)$ (1.14) que define a dependência radial da transmissão no interior do traço e portanto, acesso à todos os parâmetros desta teoria. Os resultados obtidos para o Durolon e para os outros dois detectores, Mk-DE e o Mk-E, estão apresentados na tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Dados referentes à transmissão de luz (em unidade de nível de cinza) por um único traço para os detectores estudados

	Durolon	Mk-DE	Mk-E
Área livre	185	175	180
Anel externo	100	120	150
Circulo interno	255	255	250

É importante salientar que estes dados foram aqui apresentados com o único intuito de demonstrar a viabilidade do sistema digital na exploração dos parâmetros importantes referentes ao estudo dos traços, até então inacessíveis pelo sistema analógico. Qualquer comparação entre os dados aqui apresentados é inviável, pois estes não foram obtidos nas mesmas condições experimentais.

Outro trabalho a ser realizado é a caracterização do Durolon quanto a detecção de nêutrons epitérmicos e rápidos. Neste caso o detector é irradiado no feixe de nêutrons sem a tela de boro e os traços são formados por prótons de recuo oriundos da interação direta com os nêutrons. Este trabalho é muito importante, pois muitas das aplicações dos SSNTD são referentes à detecção destes nêutrons em campos de pesquisa tais como em terapia por captura de nêutrons (BNCT), radiografia, dosimetria, etc [51].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MORRISON, R. T ; BOYDE, R.N.. **Organic Chemistry**. Ed. Boston: Allyn and Bacon, Inc., 3 Ed., 1977.
2. ALFREY T.; GURNEE, E.F. **Polimeros Organicos**. Ed. Edgard Blucher Ltda, SP, 1971
3. DURRANI, S.A.; BULL, R.K. **Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Applications**. International Series in Natural Philosophy vol-111. Pergamon Press, 1987.
4. FLEISCHER, R.L. **Tracks to Innovation: Nuclear Tracks in Science and Technology**, Springer, 1998.
5. ILIC, R; SKVAR, J.; GOLOVCHENCO A.N. **Nuclear tracks: present and future perspectives**. Radiation Measurements 36 (2003)83 – 88
6. DURRANI, S.A.; ILIC, R. **Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection**. Earth Sciences and the Environment, World Scientific, Singapore, 1997.
7. <http://www.barc.ernet.in/webpages/letter/2005/200506-2.pdf> acesso em 04/2007
8. NIKEZIC, D.; YU, K.N. **Formation and Growth of tracks in nuclear track materials**. Materials science and engineering r.46 (2004) 51-123.
9. <http://www.policarbonatos.com.br/durolon/index.htm>, acesso em 09/2006
10. CURTISS, L.F. **Introduction to Neutron Physics**. D. van Nostrand Co.; Inc., Princenton, New Jersey, 1959
11. SCIANI, V.; PUGLIESI, R.; MORAES, A.P.V.; MENEZES, M.O.; MIRANDA, A. **Estudo de Algumas Características do Policarbonato Durolon Como Detetor de Traços Nucleares**. V Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 29/08-02/09/1994, vol. II, pp. 401-403.
12. PEREIRA, M.A.S. **Emprego dos policarbonatos makrofol-DE e CR-39 em radiografia com nêutrons**. Dissertação de Mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2000.

13. VILELA, E. C. **Detecção de nêutrons rápidos utilizando detectores sólidos de traços nucleares**. Dissertação de mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear IPEN-CNEN/SP, 1990
14. ASSUNÇÃO, M.P.M; PUGLIESI, R; DE MENEZES, M.O. **Characteristics of the Solid State Nuclear Track Detector CN-85 for Neutron Radiography**. Proceedings of the Fourth World Conference on Neutron Radiography. San Francisco, California, USA May 10-16, 1992
15. ASSUNÇÃO, M.P.M; PUGLIESI, R; DE MENEZES, M.O. **Study of the Neutron Radiography Characteristics for the Solid State Nuclear Track Detector Makrofol-E**. International Journal of Applied Radiations and Instrumentation vol45 n8 pp851-855, 1994
16. PUGLIESI, R.; STANOJEV PEREIRA, M.A.. **Study of the Neutron Radiography Characteristics for the Solid State Nuclear Track Detector Makrofol-DE**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research(A), 484(2002), 613-618.
17. <http://mw1.m-w.com/dictionary/microphotometer>, acesso em 06/2006
18. PUGLIESI, F.; SCIANI, V.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R. **Digital System to Characterize Solid State Nuclear Track Detectors**. Braz. J. Phys. vol.37 no.2a São Paulo June 2007
19. SCIANI, V.; PUGLIESI, F.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; PUGLIESI, R. **Digital system for track-etch neutron radiography**. XXVIII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil – 07-11/09. Guarujá, 2005
20. ILIC', R.; NAJZER, M. **Image Formation in Track-Etch Detector-I. The Large Area Signal Transfer Function**. Nucl. Track Radiat. Meas. 17, 453-460, 1990
21. ILIC', R.; NAJZER M. **Image Formation in Track-Etch Detector-II. The Space-Dependent Transfer Function in Thin Detectors**. Nucl. Track Radiat. Meas. 17, 461-468, 1990
22. ILIC', R.; NAJZER, M. **Image Formation in Track-Etch Detector-III. The Space-Dependent Transfer Function in Thick Detectors**. Nucl. Track Radiat. Meas. 17, 469-473, 1990
23. ILIC', R. ;NAJZER, M. **Image Formation in Track-Etch Detector-IV. Image Quality**. Nucl. Track Radiat. Meas. 17, 475-481, 1990
24. MARMIER, P.; SHELDON, E.. **Physics of nuclei and particles .Vol. 1**. New York - Academic Pr, 1969. v.1

25. PRICE, W. J. **Nuclear Radiation Detection**. New York: McGraw-Hill. McGraw-Hill series in nuclear engineering, 1958
26. National Institute of Standards and Technology – NIST. **Stopping-power and range tables for helium ions**. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>>. Acesso em 17 set. 2007.
27. BURCHAM, W. E. **Nuclear physics .An introduction**. London - Longmans, Green, 1963
28. HUGHES, D.J; HARVEY, J.A. **Neutron Cross Sections**, New York, N.Y. McGRAW- Hill, (BNL-325), 1955
29. YOUNG, D.A. Nature 182 (1958) 375.
30. SILK, E.C.H.; BARNES, R. S. Philos. Mag. 4(1959) 970
31. FLEISCHER, R.L.; PRICE, P.B.; WALKER, R.M. Annu. Rev. Nucl. Sci. 15, 1965
32. FLEISCHER, R. L., PRICE, P.B. AND WALKER R.M. **Nuclear Tracks in Solids. Principle and Applications**. University of California, Berkeley, California-U.S.A, 1975
33. M.F.ZAKI A ;U.SEDDIK A. **Changes produced in etching n parameters of CR-39 by high-dose pre-and post-. Irradiation**. Radiation Effects and Defects in Solids,162:6,449 –453, 2007
34. SINGH, N. L; SHAH, N.; SINGH, K. P. **Proton induced modification in makrofol-DE**. Bull. Mater. Sci., Vol. 28, No. 6, pp. 599–602. Indian Academy of Sciences, October 2005.
35. DÖRSCHEL, B.; BRETSCHNEIDER, R.; HERMSDORF, D.; KADNER, K. ; KÜHNE, H. **Measurement of the track etch rates along proton and alpha particle trajectories in CR-39 and calculation of the detection efficiency**. Radiation Measurements. vol 31, 103-108, 1999
36. YU, K.N.; LEE, H.H.W.; WONG, A.W.T.; LAW, Y.L.; CHEUNG, S.F.L.; NIKEZIC, D.; NG, F.M.F. **Optical appearance of alpha particle tracks in CR-39 SSNTD**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (B). 263 271–278, 2007

37. NIKEZIC, D.; YU, K.N. **Analyses of light scattered from etched alpha-particle tracks in PADC**. Radiation Measurements.; aceito para publicação em 04 Fevereiro 2008
38. RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; WALKER, J. **Fundamentals of Physics Extended**. Ed. John Wiley & Sons, 4 ed, 1993
39. CASTLEMAN, K.R. **Digital Image Processing**. Prentice Hall Upper Saddle River. New Jersey, EUA, 1962
40. Application Technology Information. **The Makrolon 3200 series of grades**. Bayer AG, 1997
41. ASSUNCAO M.P.M. **Desenvolvimento da Técnica da Radioografia com nêutrons pelo Método do Registro de Traços Nucleares**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1992.
42. MURRAY, R L. **Introduction to Nuclear Engineering**. Englewood Cliffs. Prentice Hall, 1957
43. PUGLIESI, R.; PEREIRA, M.A.S; MORAES, M.A.P.V. **Characteristics of the Solid State Nuclear Track Detector CR-39 for Neutron Radiography Purposes**. Applied Radiation and Isotopes vol 50(2), pp 375-380, 1999
44. VUOLO, J.H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. Ed. Edgard Blucher, 1992.
45. STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R.; PUGLIESI, F. – **Neutron-induced alpha Radiography**. Aceito para publicação no Radiation Measurements, 2008
46. INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM - 4ª edição – 2005**
47. TUREK, K.; PIESCHT, E.; BEDN/kl, J. **Direct Measurements of the Critical Angle of Incidence in Eletrochemically Etched CR-39 and Makrofol Detectors**. Radiation Measurements, Vol. 24, No. I, pp. 43-51, 1995
48. PUGLIESI, R.; ANDRADE, MLG.; PEREIRA, M.A.S.; PUGLIESI, F. **Fundamentos da Física de Nêutrons. Fundamentos da Tecnica da Radiografia com Neutrons** Cap.5; Livraria da Fisica Ed., 2007

49. American National Standard – ANSI/ANS-6.1.1. **Neutron and gamma – ray flux – to – dose –rate factors, 1977.**
50. MIRANDA, A.; SCIANI, V.. **The Influence of Gamma Radiation Conditions on the Properties of a Polycarbonate-Durolon.** VI International Macromolecular Colloquium, Gramado-RS, September, 04-08/1994, vol. I. pp. 807-809.
51. ABUMURAD, K.M.; ISMAIL, A. M.; ABU-SAFIA, HASSAN. **A photometry method for measuring tracks density on SSNTDs.** Radiation Measurements. Volume 40, Issues 2-6. pp. 125-794, November 2005