

BR8714581  
INIS-BR-724

EVALDO SIMÕES DA FONSECA

ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DO DETECTOR SOLIDO DE TRAÇOS CR-39  
PARA REGISTRO DE PROTONS E PARTÍCULAS ALFA DE BAIXA ENERGIA

Tese de

MESTRADO

Resumo:

- Detector sólido de traços
- CR-39
- Contadores convencionais
- Ionização
- Ataque químico

FÍSICA NUCLEAR

SERIE DE TRABALHOS

T6  
F676

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS - CBPF/CNPq

Rio de Janeiro

- 1983 -

## AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Odilon A.P. Tavares, pela orientação segura durante este trabalho, apoio e amizade permanentes que muito me auxiliaram;
- Ao Prof. Tom M.J. Knöfel, pelo apoio, sugestões, incentivo e atenção ao meu trabalho;
- Ao Prof. Evandro J. Pires pelo apoio concedido;
- À Dra. Dagmar C.C. Reis, ex-Diretora do IRD/CNEN, e ao Dr. Carlos Eduardo V. de Almeida, atual Diretor, pelas oportunidades e facilidades concedidas;
- Aos Profs. Arthur G. da Silva e Luis T. Auler pelo apoio, presença e empenho colocados durante as irradiações no Ciclotron do IEN/CNEN;
- À Equipe do Departamento de Física do IEN/CNEN pela assistência durante as irradiações;
- Ao Dr. Hans Schröbe (GSF-München) que gentilmente cedeu as amostras de CR-39 utilizadas;
- Às Equipes de apoio bibliográfico do CBPF/CNPq, IRD/CNEN, IEN/CNEN e CIN/CNEN pela busca de referências e cópias necessárias ao desenvolvimento deste trabalho;
- Aos colegas do CBPF/CNPq, especialmente Heloisa Helena V. Ferreira e João Batista T. Boechat;
- Aos colegas do IRD/CNEN;
- À Equipe do LCC/CNPq pelas facilidades computacionais;
- À Sra. Helena S. Ferreira, pela excelente datilografia deste trabalho;
- Às microscopistas do CBPF;
- Ao CBPF/CNPq, IRD/CNEN e CAPES pelo apoio financeiro recebido;
- Finalmente agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

## RESUMO

São apresentados e discutidos resultados experimentais referentes a propriedades de registro de partículas carregadas no Detector Sólido de Traços CR-39.

Um estudo das características do ataque químico do CR-39 em soluções de NaOH e KOH de concentração e temperatura variadas (2-10N e 50-90°C) mostrou a existência de um tempo de indução, o qual decresce com o aumento da temperatura e da concentração das soluções. Para soluções de NaOH a 70°C, a velocidade geral de ataque químico,  $v_G$ , aumenta com a normalidade de acordo com  $v_G = 0,064N^{1,89} \mu\text{m/h}$ ; a energia de ativação do processo foi obtida como  $E_a = 0,76 \pm 0,05 \text{ eV}$  para as soluções de NaOH e KOH. Valores de  $v_G$  para soluções de NaOH se ajustam a uma expressão da forma  $v_G = CN^\alpha \exp(-E_a/kT)$ , onde  $C = (7,75 \pm 0,86) \times 10^9 \mu\text{m/h}$ ;  $\alpha = 1,89 \pm 0,09$ ;  $k = 8,616 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$ , sendo  $T$  a temperatura absoluta.

Determinou-se experimentalmente a energia e a ionização limiares para o registro de prótons no CR-39. Amostras foram expostas a feixes de prótons de 24 MeV do Ciclotron (CV-28) do IEN-CNEN utilizando-se uma câmara de espalhamento com alvo fino de tântalo e absorvedores de alumínio junto às amostras para se obter variações em energia do feixe espalhado. A partir das curvas de variação do diâmetro médio dos traços com a energia para 16 h e 24 h de ataque químico (6,25N NaOH, 70°C), e considerando 1,5 $\mu\text{m}$  como o diâmetro mínimo observável, foram obtidos os valores (21,0  $\pm$  1,5)MeV e (22,5  $\pm$  1,5) MeV, respectivamente, para a energia limiar. A partir da curva calculada ionização vs. energia, foi estimada em (24  $\pm$  2)MeV cm<sup>2</sup>/g a ionização limiar para o registro de prótons no CR-39.

Por fim, foi investigada a resposta do CR-39 para partículas alfa de baixa energia ( $E \leq 6 \text{ MeV}$ ). Os resultados indicam que boa resolução em energia pode ser conseguida desde que se utilizem tempos de ataque químico prolongados ( $\geq 7 \text{ h}$ ) para soluções de NaOH 6,25N a 70°C. Mostra-se, também, que ataques químicos sucessivos não produzem a mesma geometria de traço que uma revelação única de mesmo tempo total.

## SUMMARY

Experimental results related to certain registration properties of the CR-39 Solid State Nuclear-Track Detector for charged particles are presented and discussed.

The determination of the CR-39 chemical etching in NaOH and KOH solutions, comprising concentration (2-10N) and temperature effects (50-90°C), showed the existence of an inverse proportion between the induction time and the temperature as well as the normal concentration of the solutions. For NaOH solutions at 70°C, the bulk-etch rate ( $v_G$ ) measurements showed a significant proportional dependence on the normal concentration as  $v_G = 0.064N^{1.89}$   $\mu\text{m/h}$ ; the activation energy of the process was calculated as:  $E_a = 0.76 \pm 0.05$  eV for NaOH and KOH solutions. The set of the  $v_G$ -values for NaOH solutions were fitted to the expression  $v_G = Cn^\alpha \exp(-E_a/kT)$ , where  $C = (7.75 \pm 0.86) \times 10^9$   $\mu\text{m/h}$ ;  $\alpha = 1.89 \pm 0.09$ ;  $k = 8.616 \pm 10^{-5}$  eV/°K and  $T$  is the absolute temperature.

The critical energy and the critical energy-loss rate of CR-39 track-detectors for registration of protons were experimentally determined. A number of samples was exposed to 24-MeV proton beams in the IEN-CNEN Cyclotron (CV-28), using a scattering chamber with a tantalum thin target and aluminium absorber in contact with the samples in order to provide the required fluctuation in the scattered beam energy. From the mean track-diameter plotted against incident proton energy for 16h and 24 h chemical etching (6.25 NaOH, 70°C), and considering 1.5  $\mu\text{m}$  as the minimum observable track-diameter, the values (21.0  $\pm$  1.5) MeV and (22.5  $\pm$  1.5) MeV were deduced, respectively, for the critical energy. From the calculated energy-loss rate vs. energy curve, the critical energy-loss rate was evaluated as 24  $\pm$  2 MeV.cm<sup>2</sup>/g.

Finally, the CR-39 response for low energy alpha particles ( $E \leq 6$  MeV) was studied. The results stressed the needing for prolonged etching times ( $\geq 7$ h) under the conditions of 6.25 N NaOH at 70°C if a good energy resolution is required. It was demonstrated also that successive chemical etchings do not produce the same track geometry as obtained by means of a continuous revelation with the same total etching time.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
AGRADECIMENTO .....	iii
RESUMO .....	iv
SUMMARY .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
INTRODUÇÃO .....	1
<u>CAPÍTULO I</u> - DETECÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS EM DETECTORES SÓLIDOS DE TRAÇOS .....	5
1.1 - Considerações Básicas .....	5
1.2 - Mecanismos de Formação de Traços Latentes .....	7
1.3 - Revelação e Geometria do Traço .....	8
1.4 - O Detector Sólido de Traços CR-39 .....	11
<u>CAPÍTULO II</u> - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	15
2.1 - Seleção das Amostras de CR-39 .....	15
2.2 - Comportamento do CR-39 em Soluções de NaOH e KOH .....	16
2.3 - Detecção de Prótons com CR-39 .....	25
2.3.1 - Irradiação .....	25
2.3.2 - Determinação da Energia do Próton .....	27
2.3.3 - Revelação e Microscopia .....	28
2.4 - Detecção de Partículas Alfa com CR-39 .....	31
<u>CAPÍTULO III</u> - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
3.1 - Resposta do CR-39 para Prótons .....	34
3.1.1 - Diâmetro dos Traços .....	34
3.1.2 - Curvas de Calibração do CR-39 para Prótons .....	37
3.1.3 - Determinação de $E_c$ e $(-dE/dx)_c$ .....	39
3.2 - Resposta do CR-39 para Partículas Alfa .....	44
3.3 - Conclusões .....	46
<u>APÊNDICE A</u> - PERDA DE ENERGIA E ALCANCE DE PRÓTONS NO CR-39 .....	48
BIBLIOGRAFIA .....	52

## LISTA DE FIGURAS

<u>Fig.</u>	<u>Pág.</u>
1.1.1 - Representação esquemática das relações básicas de irradiação, ataque químico e visualização do traço .....	6
1.3.1 - Representação esquemática do perfil microscópico do traço, formado mediante dissolução química preferencial ao longo da trajetória da partícula .....	8
1.3.2 - Representação esquemática da forma da superfície do traço, para $v_T$ crescente (a), constante (b) e decrescente (c), em relação à distância de penetração no detector .....	9
1.3.3 - Geometria do traço com $v_T$ e $v_G$ constante para a partícula com incidência normal à superfície do detector .....	9
1.3.4 - Geometria do traço com $v_T$ e $v_G$ constante para partícula incidindo com um ângulo $\phi_i$ sobre a superfície do detector.....	9
1.3.5 - Esquema ilustrando o conceito de ângulo crítico de incidência, $\theta_c$ .....	10
1.3.6 - Representação do perfil do traço latente de um próton, associado à curva de Bragg .....	11
1.4.1 - Forma estrutural do monômero Carbonato de Diglicol Alílico..	11
2.2.1 - Desenho do banho termostático utilizado para os ataques químicos .....	16
2.2.2 - Espessura removida em função do tempo de ataque químico para amostras de CR-39 em solução de NaOH 6,25N a diferentes temperaturas. As retas são o resultado de ajustes por mínimos quadrados dos pontos experimentais .....	18
2.2.3 - Espessura removida em função do tempo de ataque químico para amostras de CR-39 em solução de KOH 6,25N a diferentes temperaturas. As retas são o resultado de ajustes por mínimos quadrados dos pontos experimentais .....	18
2.2.4 - Comportamento de amostras de CR-39 em soluções de ataque químico de NaOH de diferentes normalidades e à temperatura de 70°C. As retas são o resultado de ajustes por mínimos quadrados dos pontos experimentais .....	20
2.2.5 - Dependência da velocidade geral de ataque químico no CR-39 com a concentração de NaOH à temperatura de 70°C .....	22
2.2.6 - Dependência da velocidade geral de ataque químico no CR-39 com a temperatura para soluções de NaOH e KOH. Os dados estão ajustados por mínimos quadrados à uma equação da forma $v_G = v_0 \exp(-E_a/KT)$ .....	23

2.2.7 - Variação do tempo de indução, $t_0$ , com a temperatura e a normalidade de soluções de NaOH e KOH. As curvas são um traçado a olho pelos pontos experimentais .....	24
2.3.1.1 - Partes relevantes do arranjo das instalações do Ciclotron...	25
2.3.1.2 - Arranjo experimental na câmara de espalhamento .....	26
2.3.2.1 - Perda de energia por unidade de comprimento e alcance residual de prótons no alumínio. As curvas foram calculadas a partir das expressões dadas no texto .....	29
2.3.2.2 - Atenuação de prótons de 24 MeV no alumínio .....	30
3.1.1.1 - Distribuição de diâmetro para cada uma das regiões das amostras de CR-39 reveladas durante 16 horas (NaOH, 6,25N 70°C) .....	35
3.1.1.2 - Distribuição de diâmetro para cada uma das regiões das amostras de CR-39 reveladas durante 24 horas (NaOH, 6,25N 70°C) .....	35
3.1.2.1 - Diâmetro médio dos traços em função da energia do próton incidente no CR-39. As curvas contínuas para 16 h e 24 h de ataque químico (6,25N NaOH 70°C) são ajustes obtidos pelo método de mínimos quadrados (eqs. (3.1.2.1) e (3.1.2.2) respectivamente). As demais curvas foram ajustadas a olho aos pontos experimentais .....	37
3.1.3.1 - Perda de energia por unidade de comprimento, $-dE/dx$ , e alcance residual, $R$ , em função da energia para prótons no CR-39 .....	40
3.1.3.2 - Forma da função resposta do CR-39 na região de ionização de prótons .....	42
3.2.1 - Variação do diâmetro médio de traços de partículas alfa com o tempo de ataque químico. As curvas foram ajustadas a olho aos pontos experimentais .....	44
3.2.2 - Variação do diâmetro médio dos traços de partículas alfa em função da energia para 3 tempos de ataques químicos .....	45

## LISTA DE TABELAS

<u>Tab.</u>	<u>Pág.</u>
1.4.1 - Principais características dos Detetores Sólidos de Traços CR-39 e Nitrato de Celulose .....	13
2.2.1 - Valores de $v_G$ e $t_0$ obtidos a partir dos dados mostrados nas Figuras 2.2.2 e 2.2.3 .....	19
2.2.2 - Valores de $v_G$ e $t_0$ obtidos a partir dos dados mostrados na Figura 2.2.4 .....	20
2.4.1 - Condições de irradiação das amostras de CR-39 com partículas alfa .....	31
2.4.2 - Resultado dos efeitos de ataques químicos sucessivos e ininterruptos sobre o diâmetro dos traços de partículas alfa nas amostras de CR-39 .....	32
3.1.1.1 - Diâmetro médio dos traços em função da energia do próton incidente no CR-39 .....	36
3.1.3.1 - Valores de energia crítica e correspondente ionização crítica para detecção de prótons no CR-39 (6,25N NaOH, 70°C)....	43
A.1 - Número de átomos por $cm^3$ , $N$ , para cada composto do CR-39 ....	50



## INTRODUÇÃO

O primeiro resultado sobre a utilização de Detectores Sólidos de Traços foi descrito por Young<sup>(1)</sup> em 1958, que observou traços microscópicos na superfície de um cristal de fluoreto de lítio, irradiado com fragmentos de fissão, após um ataque químico com uma solução de ácido acético e fluorídrico. Em 1959 Silk e Barnes<sup>(2)</sup> publicaram os resultados de suas observações de traços de fragmentos de fissão em mica com um microscópio eletrônico de transmissão. Estas investigações deram início ao desenvolvimento de novos detectores sólidos de traços em Física Nuclear, como mica, vidros, quartzos e posteriormente os plásticos.

A partir de 1962, esta técnica de detecção ganhou grande impulso, e surgiram várias aplicações em estudos de fissão e física nuclear; alfagrafia, neutrongrafia e radiografia com outras partículas carregadas; raios cósmicos e astrofísica; porosidade e microfiltros; dosimetria alfa e neutrons; prospecção de urânio e medidas de emissão de radônio; proteção radiológica e monitoração; radiobiologia e medicina nuclear; medidas em meteoritos, amostras lunares, balões e veículos espaciais e pesquisa de elementos superpesados.

Os Detectores Sólidos de Traços têm mostrado ser bons substitutos das emulsões nucleares que são também utilizadas em problemas de detecção de partículas carregadas. Algumas vantagens apresentadas por eles sobre estas são as seguintes:

1) são insensíveis aos níveis normais de radiação eletromagnética

- ca, elétrons, temperatura e umidade ambiente;
- 2) sofrem menor desvanecimento dos traços latentes ("fading") ;
  - 3) são econômicos, de fácil manipulação e observação.

Fleischer e Price<sup>(3)</sup> apresentaram os primeiros resultados referentes à detecção de partículas ionizantes em polímeros em 1963, o que aumentou bastante o espectro de aplicação destes detectores.

As primeiras idéias sobre a revelação de traços através de um ataque químico, e sobre a natureza do dano responsável por este fenômeno, foram descritas nos modelos de Ionização Primária ("Primary Ionization Model") e Perda de Energia Restrita ("Restricted Energy Loss Model") formulados por Fleischer e col.<sup>(4)</sup> em 1965, Benton<sup>(5)</sup> em 1967 e Benton e Nix<sup>(6)</sup> em 1969. Uma teoria mais completa sobre a deposição de energia ao longo da trajetória da partícula associada com a ionização primária e secundária foi desenvolvida por Monnin<sup>(7)</sup> em 1970 e Fain e col.<sup>(8)</sup> em 1974. Cada um destes modelos implica em diferentes mecanismos de formação de traços como no critério dos raios delta proposto por Katz e Kobetich<sup>(9)</sup> para calcular a fração da energia depositada que é responsável pela formação de danos reveláveis. A utilidade, significado e implicações físicas destes modelos foram discutidas por vários autores.

Em 1975, Fleischer, Price e Walker publicaram o livro "Nuclear Tracks in Solids"<sup>(10)</sup> que fez uma revisão sobre o assunto citando mais de 1300 trabalhos de vários grupos de pesquisa.

Com a descoberta do plástico thermoset CR-39 por Cartwright, Shirk e Price<sup>(11)</sup> (1978) e da confirmação por Cassou e

Benton<sup>(12)</sup> (1978) de sua excelente sensibilidade e resolução para o registro de traços de partículas carregadas, tornou-se necessário um estudo mais detalhado deste detector para delimitar a faixa adequada de operação conforme um dado tipo de aplicação. Os Detectores Sólidos de Traços apresentam limiares de detecção, ou seja, conforme a energia e natureza das partículas carregadas, poderão ou não serem formados traços latentes reveláveis por um processo de dissolução química preferencial ao longo da trajetória da partícula no detector. Outro aspecto muito importante é a dependência da resposta destes tipos de detectores com a geometria de irradiação.

Devido à sua sensibilidade o CR-39 veio a preencher o espaço existente na detecção de partículas carregadas menos ionizantes, como prótons ou partículas alfa de alta energia. Além disso o CR-39 possui uma grande estabilidade molecular o que faz com que o desvanecimento de traços latentes ("fading") seja muito pequeno. Estes fatores permitem uma utilização bastante eficiente do CR-39 para a determinação de exposições ou contaminações devidas a emissores de partículas alfa, dosimetria de neutrons (mediante a revelação do próton de recuo), etc.

O objetivo principal deste trabalho é determinar experimentalmente a energia crítica,  $E_c$ , e a correspondente ionização crítica,  $(-dE/dx)_c$ , para a formação de danos reveláveis para prótons incidentes no CR-39. Faz-se, também, um estudo detalhado da cinética de ataque químico do CR-39. A resposta para partículas alfa de baixa energia é também investigada bem como o efeito de ataques sucessivos sobre a geometria do traço revelado.

O Capítulo I é uma breve descrição dos princípios de

detecção de partículas carregadas nos Detectores Sólidos de Traços e das propriedades específicas do detector CR-39. No Capítulo II é apresentada uma descrição detalhada dos procedimentos experimentais utilizados nos ataques químicos com NaOH e KOH, na irradiação das amostras de CR-39 com prótons e partículas alfa e os procedimentos de observação de traços (microscopia). Finalmente no Capítulo III são apresentados e discutidos os resultados e apresentadas as conclusões.

## CAPÍTULO I

### DETECÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS EM DETECTORES SÓLIDOS DE TRAÇOS

#### 1.1 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

O Princípio de utilização dos Detectores Sólidos de Traços (Figura 1.1.1) consiste em relacionar os parâmetros do traço revelado ( $T$ ) com os parâmetros da partícula incidente ( $P$ ). Após exposição do detector a partículas de carga  $Z$ , massa  $M$  e energia  $E$  que incidiram sobre o mesmo com um ângulo  $\theta$  e tendo um alcance  $R(E)$  segue-se a fase intermediária da qual resultam traços visíveis ao microscópio ótico. A fase intermediária con-

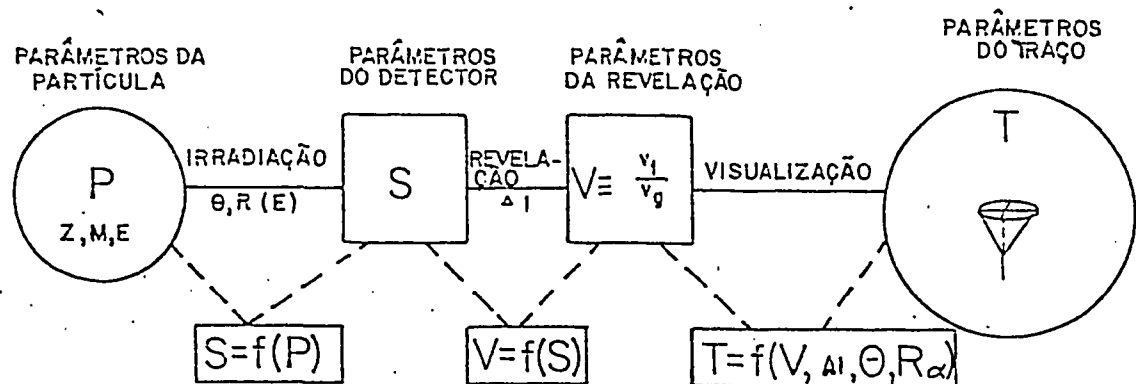


Figura 1.1.1 - Representação esquemática das relações básicas de irradiação, ataque químico e visualização do traço.

siste de um complexo processo físico-químico que compreende duas partes: a primeira, é a formação de um traço latente ao longo da trajetória da partícula, constituído de modificações na estrutura e composição do meio ( $S$ ); a segunda é a revelação do traço latente através de um ataque químico seletivo ( $V$ ), que resul

ta na remoção de uma camada superficial,  $\Delta l$ , do detector. A revelação do traço latente é resultante da competição entre a Velocidade Geral de ataque químico,  $v_G$ , responsável pela remoção de camadas superficiais do detector não danificadas pela radiação e a Velocidade Preferencial de ataque químico,  $v_T$ , responsável pela remoção de material ao longo da trajetória da partícula no detector. Finalmente os traços podem ser visualizados ao microscópio ótico em que as características do traço são determinadas em função das grandezas: ângulo de incidência,  $\theta$ , espessura removida,  $\Delta l$ , comprimento do traço,  $R_0$  e a razão entre  $v_T$  e  $v_G$ ,  $V$ . Estas grandezas são fundamentais para compreensão do desenvolvimento da geometria dos traços nucleares revelados e está representada pela função  $T = f(V, \Delta l, \theta, R_0)$  na Figura 1.1.1.

Resumindo, podemos dizer que as características do traço revelado podem ser relacionadas com os parâmetros físicos da partícula, propriedades do meio detector e condições de revelação (composição, concentração, temperatura do reagente e tempo de ataque químico).

Há, atualmente, pouco conhecimento da relação fundamental,  $V = f(S)$ , que é frequentemente referida na literatura como função resposta, que fornece a ligação entre o ataque químico,  $V$ , e os danos do detector,  $S$ . O atual conhecimento dessa função é completamente empírico e insuficiente para descrever teoricamente a variação da razão de ataque químico ao longo do traço especificamente em termos do detector e dos parâmetros de ataque químico. Determinar a função resposta é o problema central de qualquer trabalho quantitativo com um detector sólido de traços.

## 1.2 - MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE TRAÇOS LATENTES

Existem vários modelos propostos para explicar o mecanismo de formação de traços latentes nos Detectores Sólidos de Traços, cada um apresentando vantagens e desvantagens específicas sobre os outros. Para os materiais que apresentam estrutura cristalina os principais modelos são o da Ponta de Explosão Iônica ("Ion Explosion Spike")<sup>(4)</sup> e da Ponta Térmica ("Thermal Spike")<sup>(14)</sup>.

Os traços latentes nos polímeros (Nitrato de Celulose, CR-39, etc) são formados a partir da ruptura das longas cadeias moleculares e da criação de radicais livres, ou seja, a região danificada caracteriza-se pelas seguintes propriedades:

- redução da molaridade;
- ruptura (ou aumento do número de rupturas) das cadeias moleculares;
- aumento da solubilidade;
- variação da densidade;
- presença de radicais livres e gases;
- aumento do coeficiente de absorção ótica, particularmente na região ultra-violeta;

que definem o Modelo de Formação de Traços por Danos Radioquímicos<sup>(15,16,17)</sup>.

Outro modelo que descreve a formação de traços latentes em polímeros é o da Perda Restrita de Energia ("Restricted Energy Loss Model")<sup>(6)</sup> que apesar de apresentar boa concordância com os resultados experimentais, ignora todas as deposições de energia efetuadas por raios delta (energia dissipada pelos elétrons secundários).

### 1.3 - REVELAÇÃO E GEOMETRIA DO TRAÇO

A revelação do traço latente ocorre pela dissolução química preferencial de uma região muito estreita, ao longo e ao redor da trajetória da partícula no detector sólido de traços (Figura 1.3.1).

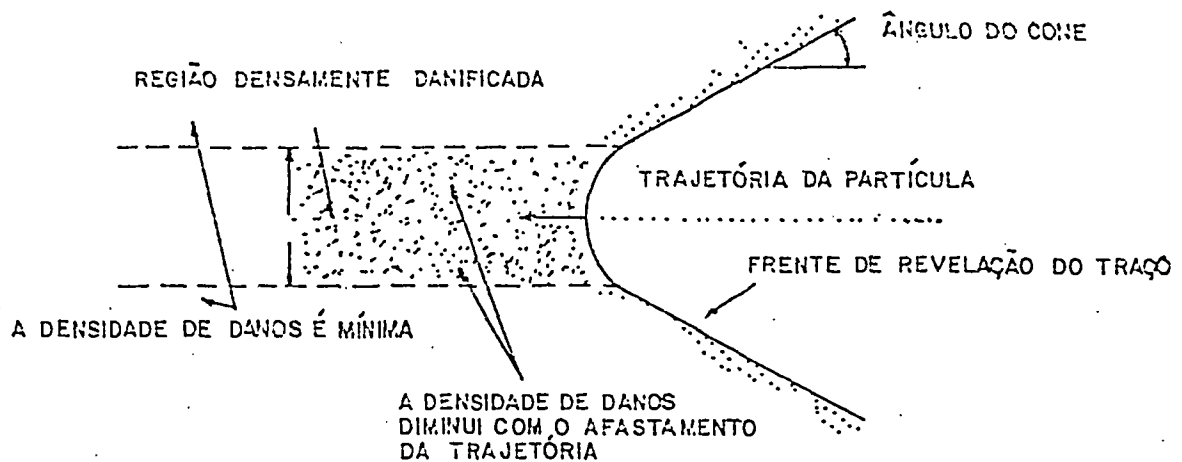


Figura 1.3.1 - Representação esquemática do perfil microscópico do traço, formado mediante dissolução química preferencial ao longo da trajetória da partícula.

A evolução geométrica do traço ocorre através de dois processos de dissolução química aos quais estão associadas duas velocidades: uma é denominada  $v_G$ , Velocidade Geral de Ataque Químico (ou Velocidade de Dissolução Normal) que é função da composição e das condições de ataque químico do detector; a outra é chamada  $v_T$ , Velocidade Preferencial de Ataque Químico (ou Velocidade de Dissolução Preferencial) que atua somente ao longo da trajetória da partícula no detector.

O processo de evolução do traço pode ser simulado como uma frente de onda, que se desloca ao longo da trajetória da partícula, com velocidade variável  $v_T$  (função da posição), em um meio onde a velocidade de propagação da onda é igual a  $v_G$  (constante). A superfície envoltória de sucessivas esferas crescentes



simulam a dissolução química do detector (Figura 1.3.2).

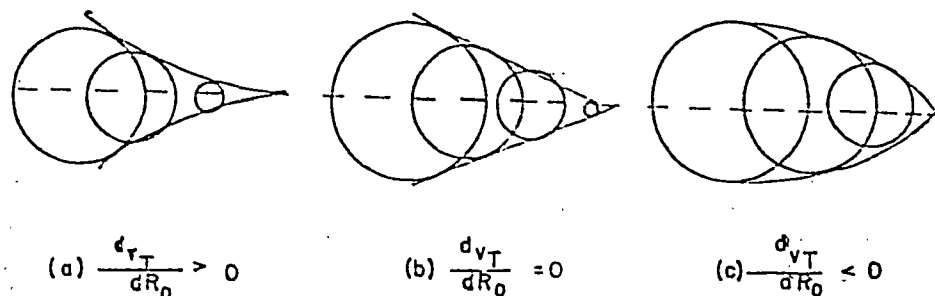


Figura 1.3.2 - Representação esquemática da forma da superfície do traço, para  $v_T$  crescente (a), constante (b) e decrescente (c), em relação à distância de penetração no detector.

As Figuras 1.3.3 e 1.3.4 ilustram o fenômeno da evolução do traço para partículas incidindo perpendicularmente e obliquamente à superfície do detector.

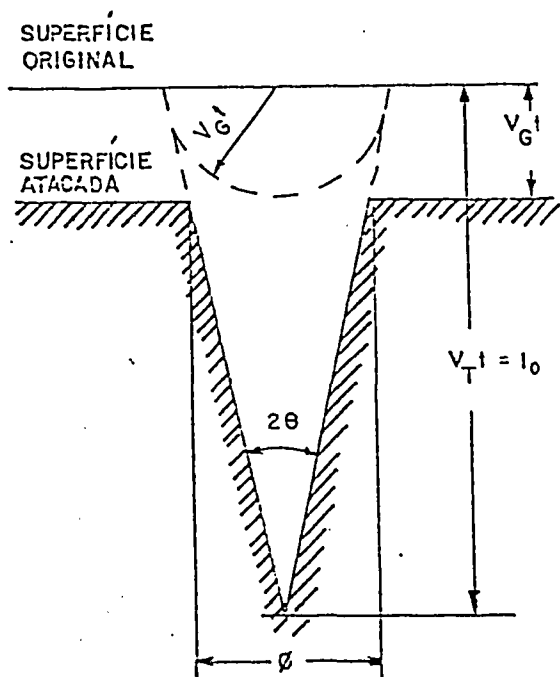


Figura 1.3.3 - Geometria do traço com  $v_T$  e  $v_G$  constante para partícula com incidência normal à superfície do detector.

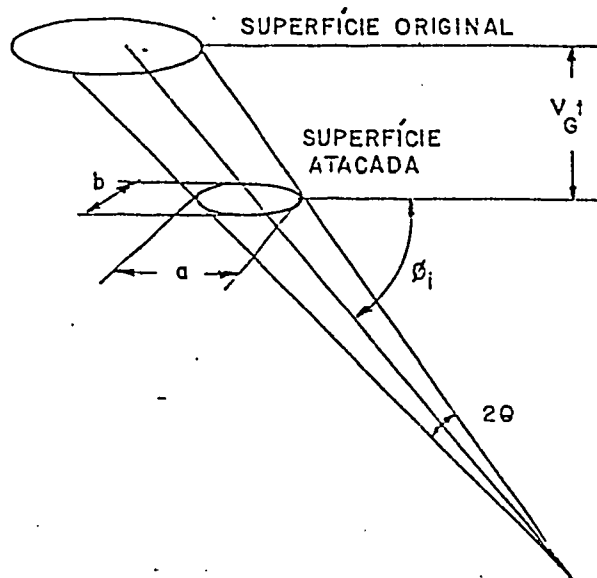


Figura 1.3.4 - Geometria do traço com  $v_T$  e  $v_G$  constante para partícula incidindo com um ângulo  $\phi_i$  sobre a superfície do detector.

Quando a incidência é normal à superfície do detector, alguns parâmetros do traço podem ser obtidos através das expressões (10):

$$\Delta l = v_G (t - t_0) \quad (1.3.1)$$

$$v_T = v_G \left[ \frac{1+r^2}{1-r^2} \right] \quad (1.3.2)$$

$$r = \frac{c}{2L\lambda} \quad (1.3.3)$$

$$\frac{v_T}{v_G} = \frac{1 + [\phi/2v_G(t-t_0)]^2}{1 - [\phi/2v_G(t-t_0)]^2} \quad (1.3.4)$$

onde  $\Delta z$  é a espessura removida,  $v_G$  a Velocidade Geral de Ataque Químico,  $t$  o tempo total de ataque químico,  $t_0$  o tempo de indução,  $v_T$  a Velocidade Preferencial de Ataque Químico e  $\phi$  o diâmetro do traço que são válidas quando  $v_T$  é constante ao longo do traço e  $v_G$  é constante e isotrópica. Para incidências oblíquas os traços na superfície do detector, ficam mais elípticos quanto maior for o ângulo de incidência em relação à normal à superfície, neste caso para que ocorra a revelação do traço a componente  $v_T$  em relação à normal à superfície deve ser maior que  $v_G$ . Quando não ocorre revelação o ângulo de incidência da partícula é denominado ângulo crítico,  $\theta_c$  (Figura 1.3.5).

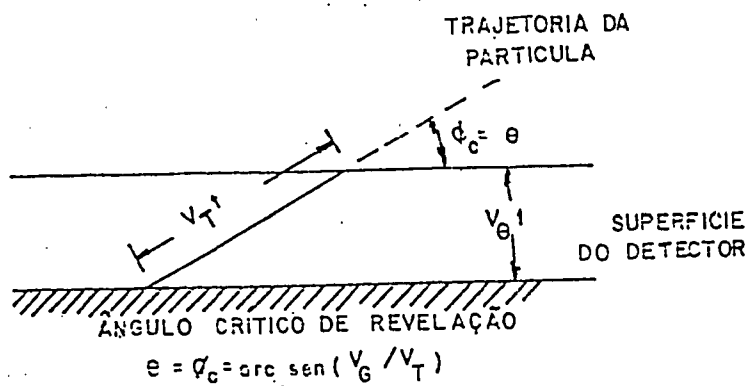


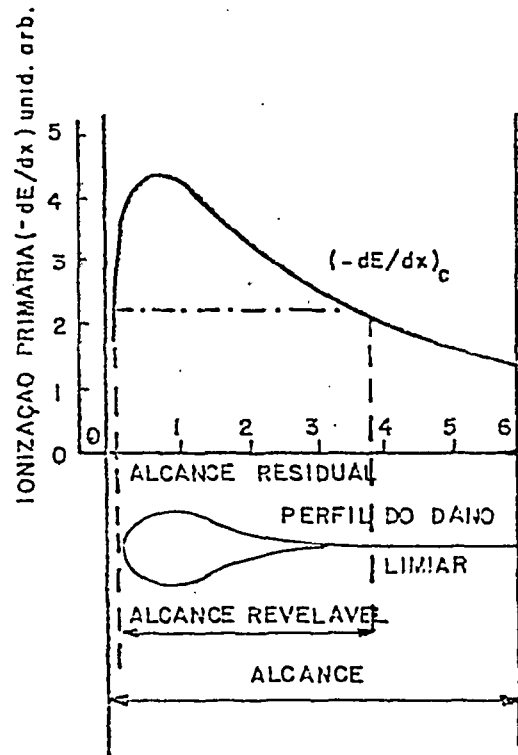
Figura 1.3.5 - Esquema ilustrando o conceito de ângulo crítico de incidência,  $\theta_c$ .

Para partículas pesadas como fragmentos de fissão, o  $-dE/dz$  é uma função sempre

decrecente. Para próton o  $-dE/dz$  segue a Curva de Bragg. A Figura 1.3.6 é uma representação do perfil do traço latente de um próton associado à Curva de Bragg, ilustrando o conceito de  $-dE/dz$  crítico. Também é mostrado que para um dado valor arbitrário de  $-dE/dz$  crítico, correspondem duas energias críticas, que

delimitam o alcance revelável no detector.

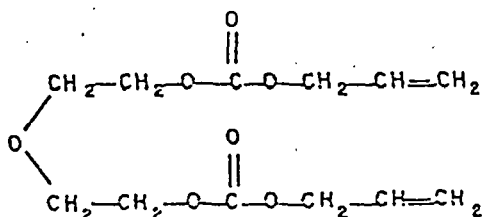
Figura 1.3.6 - Representação do perfil do traço latente de um próton, associado à curva de Bragg.



#### 1.4 - O DETECTOR SÓLIDO DE TRAÇOS CR-39

Desde sua descoberta por Cartwright e col. (11) o CR-39 tem sido utilizado como Detector Sólido de Traços em várias áreas da ciência e tecnologia tendo apresentado alta sensibilidade e uniformidade em sua resposta.

O CR-39 é um plástico resultante da polimerização do monômero líquido Carbonato de Diglicol Alílico (Allyl Diglycol Carbonate), cuja fórmula estrutural é mostrada na Fig. 1.4.1. A



presença de dois grupos funcionais alílicos  $[CH_2 = CH - CH_2 -]$  faz com que o monômero se poli-

Figura 1.4.1 - Forma estrutural do monômero Carbonato de Diglicol Alílico.

merize formando uma cadeia de ligações cruzadas ("cross-linked") originando um plástico thermoset e não um termoplástico. Os termoplásticos são caracterizados pelo amolecimento ao serem aquecidos e endurecimento ao serem resfriados (processo que pode ser repetido), são solúveis em alguns solventes e não existem fortes ligações entre as macromoléculas individualmente. Os plásticos thermoset, tal como o CR-39, são caracterizados pela dureza, infusibilidade e insolubilidade. Uma amostra de material thermoset pode ser considerada como sendo uma única molécula macroscópica, onde todas as ligações (do material) são do tipo covalente. Consequentemente uma partícula carregada ao quebrar uma cadeia molecular criará um dano permanente, já que as ligações rompidas não encontram radicais livres para se ligar. No caso do Nitrato de Celulose (termoplástico) e do CR-39 (thermoset) a energia necessária para o rompimento de uma cadeia é muito baixa, o que faz com que esses polímeros sejam bastante sensíveis para a detecção de partículas carregadas de baixo poder de ionização.

Lâminas de CR-39 são fabricadas a partir da dissolução do peróxido iniciador no monômero líquido. Esta solução iniciada é injetada entre duas placas de vidro que são separadas por uma flange de vinil. Esse conjunto é preso e tem sua temperatura gradualmente aumentada até que a polimerização seja completada. A taxa de polimerização é determinada pela quantidade e pelo tipo de iniciador utilizado e pela temperatura do monômero. Os iniciadores comumente usados são: Peroxibicarbonato de Isopropila (Diisopropyl Peroxydicarbonate-IPP) e Peroxibicarbonato de Dicitlohexila (Dicyclohexyl Peroxydicarbonate-CHCP). Estes iniciadores são altamente inflamáveis à temperatura ambiente, devendo ser conservados em ambientes refrigerados e protegidos da luz. Para mi-

nimizar as fraturas e maximizar a taxa de produção, são utilizadas espessas placas de vidro temperado de grande área que no entanto apresentam dois inconvenientes: 1) a transferência do calor de polimerização através do vidro é ineficiente; um aumento de temperatura e um alto gradiente térmico na fase de endurecimento do polímero podem ocorrer, e o produto final pode quebrar antes que o tempo de tratamento (aumento da temperatura versus tempo) seja cuidadosamente programado. 2) a menos que um desmoldador seja empregado, fica muito difícil separar as placas de vidro do plástico tratado. Uma solução de 40g de IPP por litro do monômero Carbonato de Diglicol Alílico (Allyl Diglycol Carbonate) é utilizada por Kinoshita e Price<sup>(18)</sup> para produzir folhas de CR-39 pelo processo descrito acima.

Na Tabela 1.4.1 são apresentadas algumas características do CR-39 e do Nitrato de Celulose para comparação.

Tabela 1.4.1 - Principais características dos Detetores Sólidos de Traços CR-39 e Nitrato de Celulose.

Característica	CR-39	Nitrato de Celulose
ótica	transparente	transparente
estrutura	amorfo	amorfo
térmica	thermoset	termoplástico
cadeia	tridimensional (cross-linked)	tridimensional (não cross-linked)
ebulição	160°C	13°C
congelamento	-4°C	-
autoignição	-	170°C
densidade (g/cm <sup>2</sup> )	1,31	1,66
viscosidade	9 cp	-

Dentre as várias aplicações do CR-39, podemos destacar

a detecção de raios cōsmicos, dosimetria e espectrometria de neu  
trons, dosimetria de radônio do ar, espectroscopia de partículas  
alfa e inúmeras outras aplicações em problemas específcos de Fí  
sica Nuclear (19,20).

## CAPÍTULO II

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 2.1 - SELEÇÃO DAS AMOSTRAS DE CR-39

Folhas de CR-39 (300mm×300mm×1mm) manufaturadas pela American Acrylics and Plastics Inc., foram cortadas em pequenos pedaços para preparação de 3 conjuntos de amostras.

No primeiro conjunto, as amostras foram cortadas nas dimensões de  $\approx 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ . Estas amostras foram utilizadas na determinação da velocidade geral de ataque químico ( $v_G$ ) e do tempo de indução ( $t_0$ ) para várias condições de ataque químico, e na escolha de uma condição de ataque químico padronizada para o estudo de detecção de prótons e partículas alfa no CR-39. Com a finalidade de minimizar o "background" indesejável (devido principalmente a partículas alfa do radônio no ar) as amostras vêm protegidas por uma fina película de polietileno que é retirada antes de serem usadas.

As dimensões do segundo conjunto de amostras foram de  $\approx 100\text{mm} \times 25\text{mm}$  e estas foram utilizadas na determinação da energia limiar de detecção de prótons no CR-39.

O terceiro conjunto de amostras foi utilizado num estudo de detecção de partículas alfa no CR-39 e suas dimensões foram de  $\approx 18\text{mm} \times 14\text{mm}$ . Com estas amostras foram estudados a capa

cidade de discriminação em energia do CR-39 para partículas alfa e o efeito de ataques químicos sucessivos sobre a evolução do traço revelado.

## 2.2 - COMPORTAMENTO DO CR-39 EM SOLUÇÕES DE NaOH E KOH

Amostras de CR-39 do primeiro conjunto foram submetidas a ataque químico utilizando-se o arranjo experimental ilustrado na Figura 2.2.1.

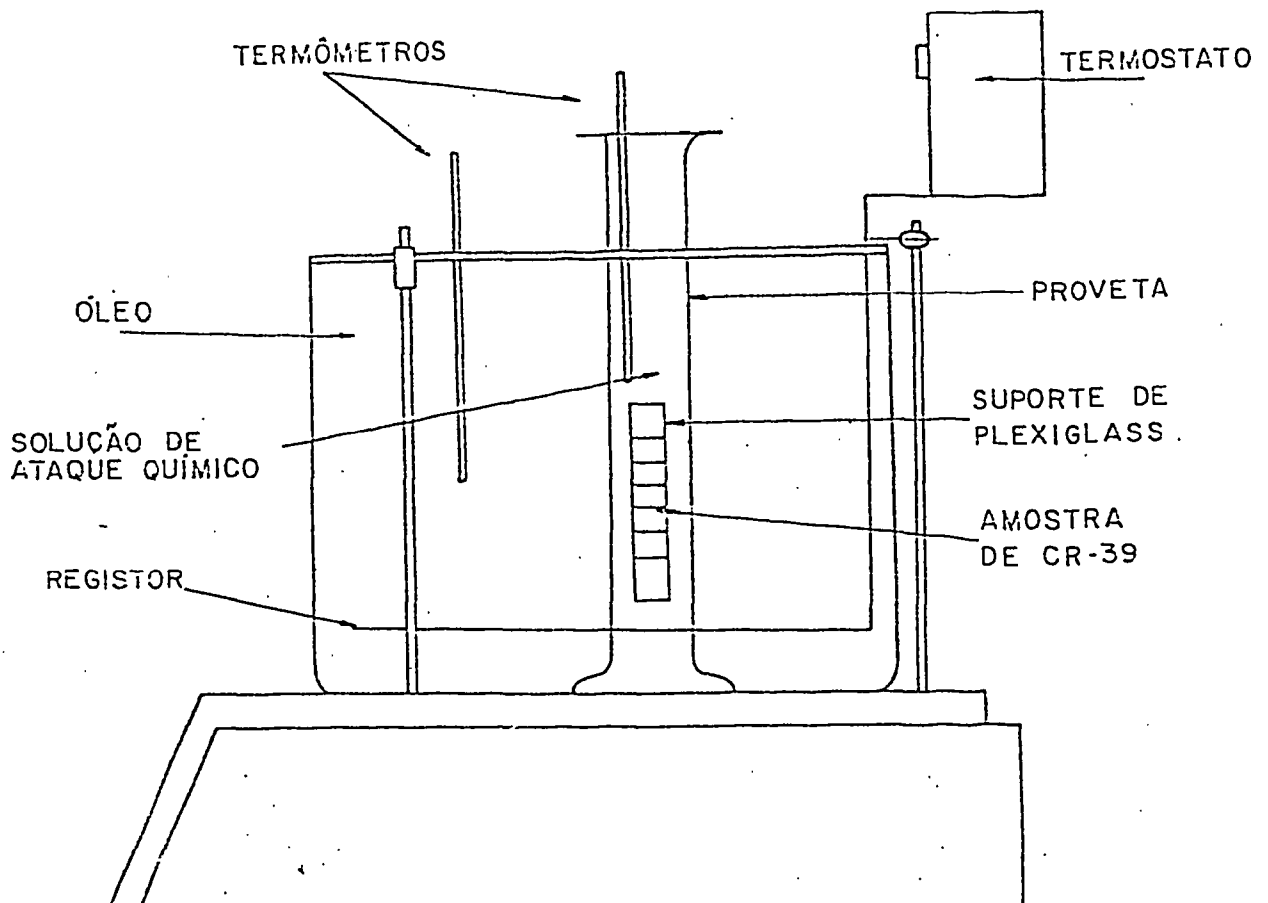


Figura 2.2.1 - Desenho do banho termostático utilizado para os ataques químicos.

Uma proveta contendo uma solução de NaOH 6,25N foi colocada no interior da cuba termalizada de um banho termostático. Esta cuba foi enchida com óleo vegetal, que apresenta como princi -



pal vantagem sobre a água o fato de não evaporar a temperaturas relativamente baixas (50 – 100°C). Esse fato tem grande importância, pois, os ataques químicos são muito prolongados, e o uso da água implicaria em periódicas correções de seu volume, o que poderia comprometer a estabilidade térmica do banho. O banho tem seu termostato ajustado para manter a solução de ataque químico na temperatura desejada. Quando a solução atinge esta temperatura, é mergulhado em seu interior um suporte de plexiglass, contendo as amostras de CR-39. A proveta deve permanecer fechada para evitar evaporação, que implicaria numa variação da normalidade da solução.

Foi obtida, para cada amostra, a espessura removida:

$$\Delta l = (l_0 - l) / 2 \quad (2.2.1)$$

em uma face utilizando o seguinte procedimento. Antes da imersão do suporte de plexiglass na solução de ataque químico, cada uma das amostras de CR-39 nele colocadas, teve sua espessura original,  $l_0$ , medida em vários pontos da superfície com auxílio de um micrômetro de precisão. O mesmo procedimento foi usado após o ataque químico, depois da limpeza da amostra de CR-39 em água destilada, de tal forma a se obter a espessura final,  $l$ . Esse processo foi repetido para ataques químicos em soluções de NaOH 6,25N a várias temperaturas, e os resultados das medidas são mostrados na Figura 2.2.2.

Idêntico procedimento foi utilizado para amostras atacadas quimicamente em soluções de KOH 6,25N, e os resultados das medidas são mostrados na Figura 2.2.3.

Observando cada uma destas figuras notamos a existên-

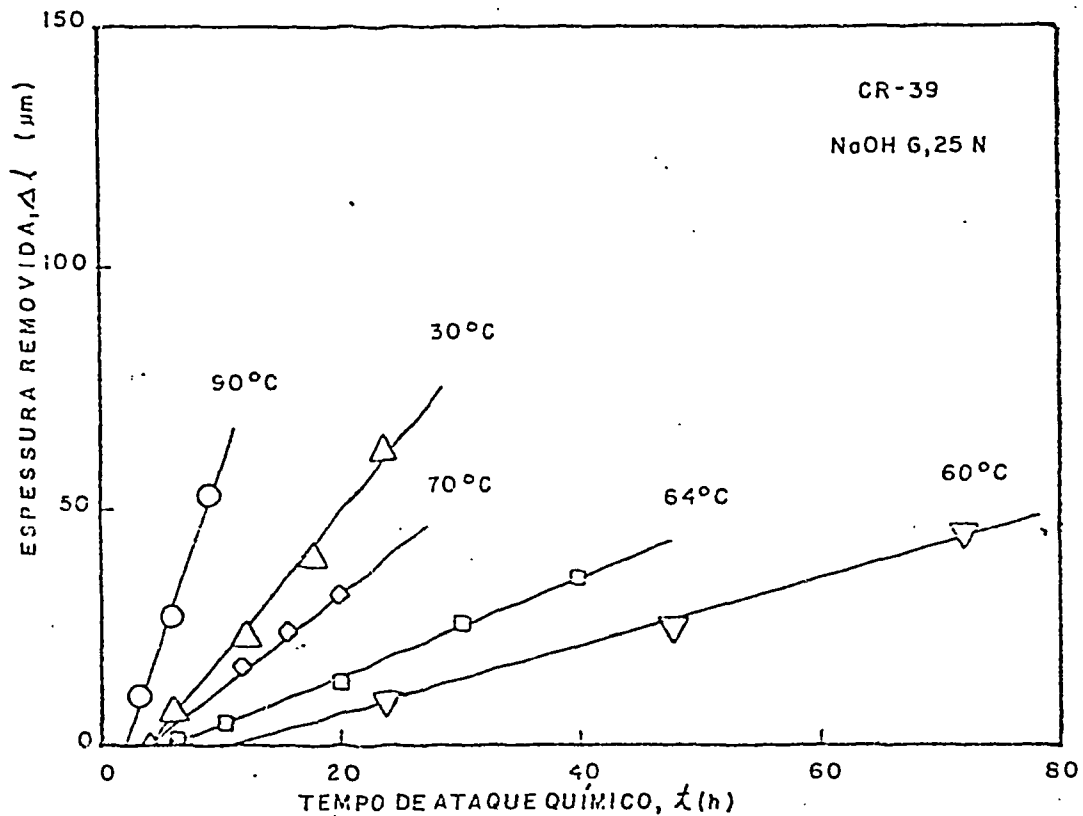


Figura 2.2.2 - Espessura removida em função do tempo de ataque químico para amostras de CR-39 em solução de NaOH 6,25 N a diferentes temperaturas. As retas são o resultado de ajustes por mínimos quadrados dos pontos experimentais.

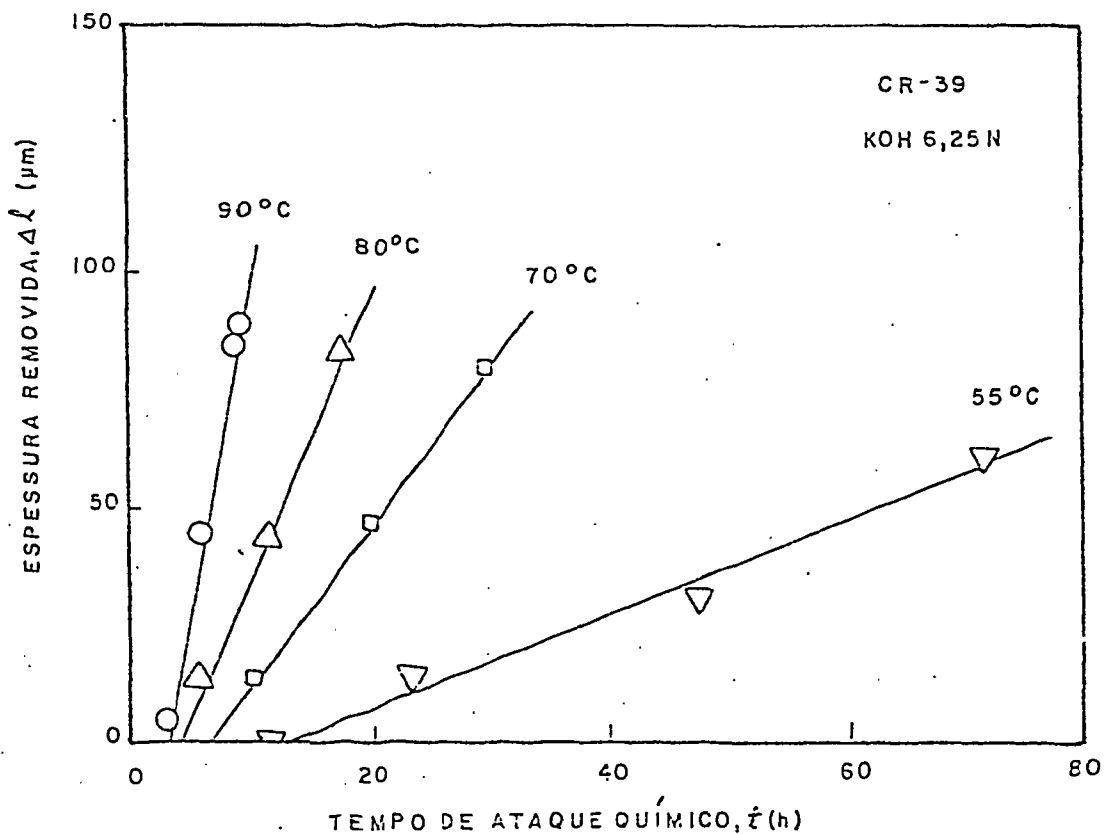


Figura 2.2.3 - Espessura removida em função do tempo de ataque químico para amostras de CR-39 em solução de KOH 6,25 N a diferentes temperaturas. As retas são o resultado de ajustes por mínimos quadrados dos pontos experimentais.

cia de um tempo de indução  $t_0$ , isto é, as amostras de CR-39 não são atacadas imediatamente após serem mergulhadas na solução de ataque químico.

Os resultados mostram que a remoção do material é linear com o tempo de ataque, isto é,

$$\Delta l = v_G (t - t_0) \quad (2.2.2)$$

Ajustando os dados mostrados nas Figuras 2.2.2 e 2.2.3 pelo método de mínimos quadrados foram obtidos os valores da velocidade geral de ataque químico,  $v_G$ , e do tempo de indução,  $t_0$ , os quais estão mostrados na Tabela 2.2.1.

Tabela 2.2.1 - Valores de  $v_G$  e  $t_0$  obtidos a partir dos dados mostrados nas Figuras 2.2.2 e 2.2.3.

Solução de ataque químico	Temperatura (°C)	$10^3/T$ (°K)	$v_G$ (um/h)	$t_0$ (h)
NaOH 6,25 N	60	3,002	$0,71 \pm 0,02$	$9,9 \pm 1,2$
	64	2,966	$1,02 \pm 0,04$	$4,9 \pm 0,8$
	70	2,914	$2,01 \pm 0,05$	$3,8 \pm 0,4$
	80	2,832	$3,00 \pm 0,12$	$3,7 \pm 0,6$
	90	2,754	$6,85 \pm 0,77$	$1,4 \pm 0,7$
KOH 6,25 N	55	3,047	$0,97 \pm 0,08$	$11,6 \pm 3,8$
	70	2,914	$3,21 \pm 0,03$	$5,5 \pm 0,1$
	80	2,832	$5,63 \pm 0,43$	$3,6 \pm 1,0$
	90	2,754	$13,1 \pm 0,25$	$2,7 \pm 0,1$

Foi investigado também o comportamento de amostras de CR-39 em soluções de ataque químico de NaOH de diferentes normalidades e à temperatura de 70°C (Figura 2.2.4). Na Tabela 2.2.2 estão mostrados os valores de  $v_G$  e  $t_0$  obtidos a partir dos dados mostrados na Figura 2.2.4.

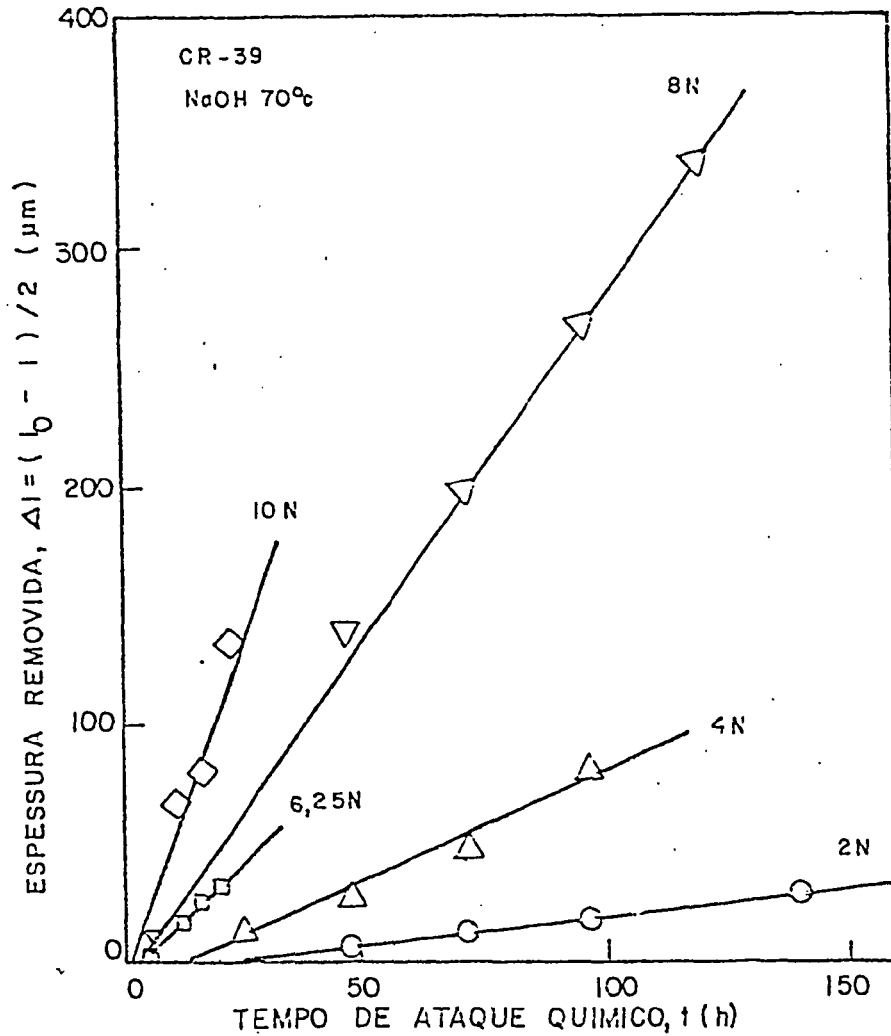


Figura 2.2.4 - Comportamento de amostras de CR-39 em soluções de ataque químico de NaOH de diferentes normalidades e a temperatura de 70°C. As retas são o resultado de ajustes por mínimos quadrados dos pontos experimentais.

Tabela 2.2.2 - Valores de  $v_G$  e  $t_0$  obtidos a partir dos dados mostrados na Figura 2.2.4.\*

Normalidade	$v_G$ ( $\mu\text{m}/\text{h}$ )	$t_0$ (h)
2,0	$0,24 \pm 0,01$	$21 \pm 2$
4,0	$0,92 \pm 0,09$	$14 \pm 7$
6,25	$2,00 \pm 0,05$	$3,8 \pm 0,4$
8,0	$2,85 \pm 0,04$	$2,7 \pm 0,9$
10,0	$5,68 \pm 0,48$	$1,0 \pm 1,6$

\* Condições de ataque químico: NaOH 70°C.

A análise dos resultados mostra que  $v_G$  aumenta com a normalidade da solução,  $N$ , de acordo com a equação:

$$v_G = 0,064 N^{1,89} \quad \mu\text{m/h} \quad (2.2.3)$$

para soluções de NaOH a temperatura de 70°C (Figura 2.2.5, linha contínua). Nesta figura também estão apresentados, para comparação, os resultados obtidos por Gruhn e col. (21), Khan e Ahmad (22) e Green e col. (23), os quais mostram uma diferença sistemática em relação ao presente resultado. Este fato pode ser atribuído a diferenças no método de obtenção de  $v_G$  que neste trabalho foi obtida através da diferença de espessura da amostra antes e depois do ataque químico, e nos demais casos foi determinada pela evolução do diâmetro de traços de fragmentos de fissão ou partículas alfa que incidiram perpendicularmente na superfície da amostra.

A energia de ativação do processo de ataque químico,  $E_a$ , para as soluções de NaOH e KOH foi calculada como 0,76±0,05 eV, que está em bom acordo com os valores citados por Gruhn e col. (21) para o CR-39 e Dwivedi e Mukherji (24) para os detectores sólidos de traços Lexan, Acetado de Celulose e Mica.

Uma expressão geral da forma:

$$v_G = CN^\alpha \exp(-E_a/kT) \quad (2.2.4)$$

onde  $N$  é a normalidade da solução,  $k$  a constante de Boltzman ( $8,66 \times 10^{-5}$  eV/°K),  $T$  a temperatura absoluta e  $C$ ,  $\alpha$  e  $E_a$  parâmetros a serem determinados, foi ajustada aos dados experimentais para as várias condições de ataque químico. Os valores dos parâmetros obtidos para as soluções de NaOH são os seguintes:

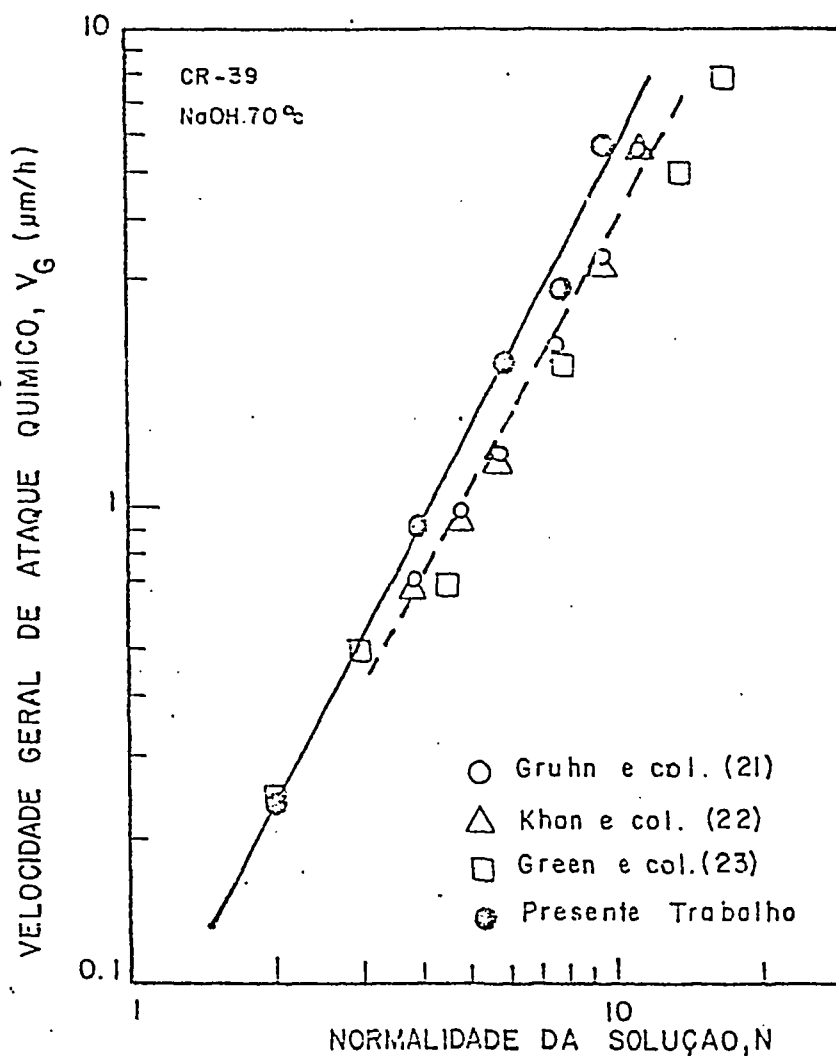


Figura 2.2.5 - Dependência da velocidade geral de ataque químico no CR-39 com a concentração de NaOH a temperatura de 70°C.

$C = (7,75 \pm 0,86) \times 10^9 \mu\text{m/h}$ ,  $\alpha = 1,89 \pm 0,09$  e  $E_a = 0,76 \pm 0,05$  eV. A Figura 2.2.6 ilustra a dependência de  $v_G$  com a temperatura para as soluções de NaOH e KOH. Vê-se claramente que soluções de KOH são mais efetivas na remoção das camadas superficiais do polímero. Esse fato tem um inconveniente, pois imperfeições no CR-39 (geradas durante a polimerização) são atacadas com grande violência pelo KOH prejudicando, portanto, a identificação de traços de partículas carregadas.

Também foi observado que o tempo de indução,  $t_0$ , decresce

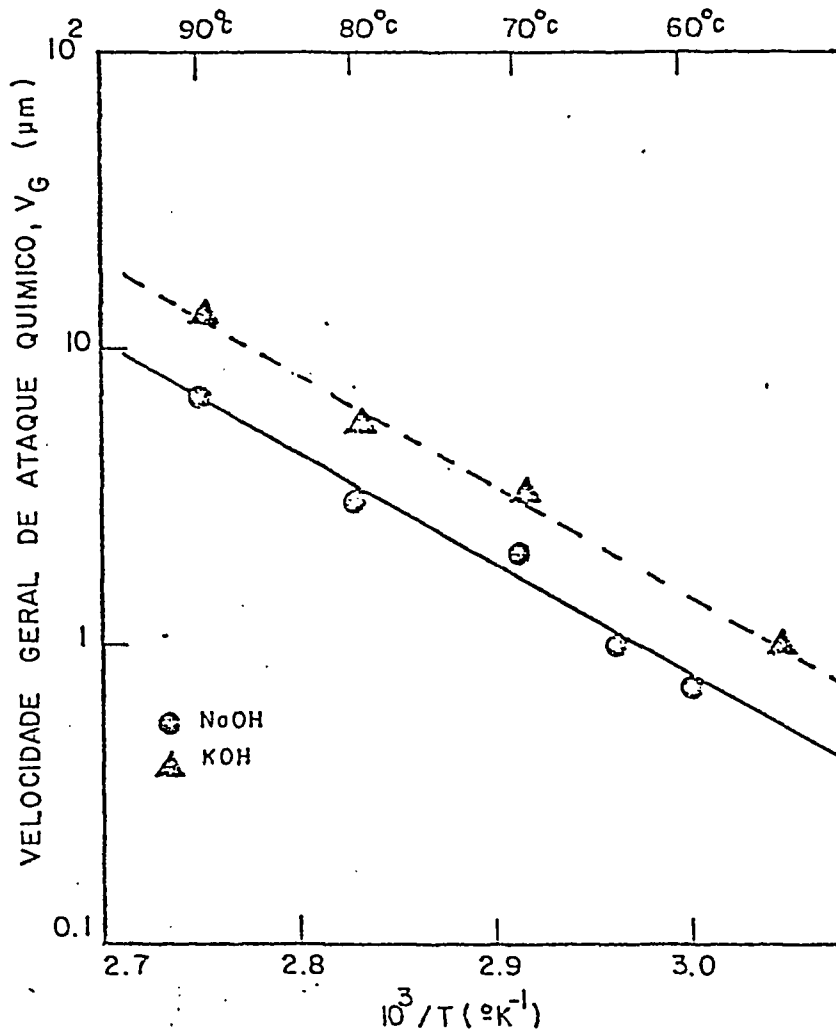


Figura 2.2.6 - Dependência da velocidade geral de ataque químico no CR-39 com a temperatura para soluções de NaOH e KOH. Os dados estão ajustados por mínimos quadrados a uma equação da forma  $v_G = v_0 \exp(-E_a/kT)$ .

ce com o aumento da temperatura da solução de ataque químico e com o aumento da normalidade, como está ilustrado na Figura 2.2.7. Estes resultados também foram importantes na escolha da solução padrão para os ataques químicos, pois a escolha de temperatura ou normalidade muito baixas implicaria num considerável aumento no tempo de ataque químico necessário para revelar traços de prótons no CR-39.

Cada uma das soluções utilizadas no ataque químico deve ser titulada para ter sua normalidade bem determinada e cali-

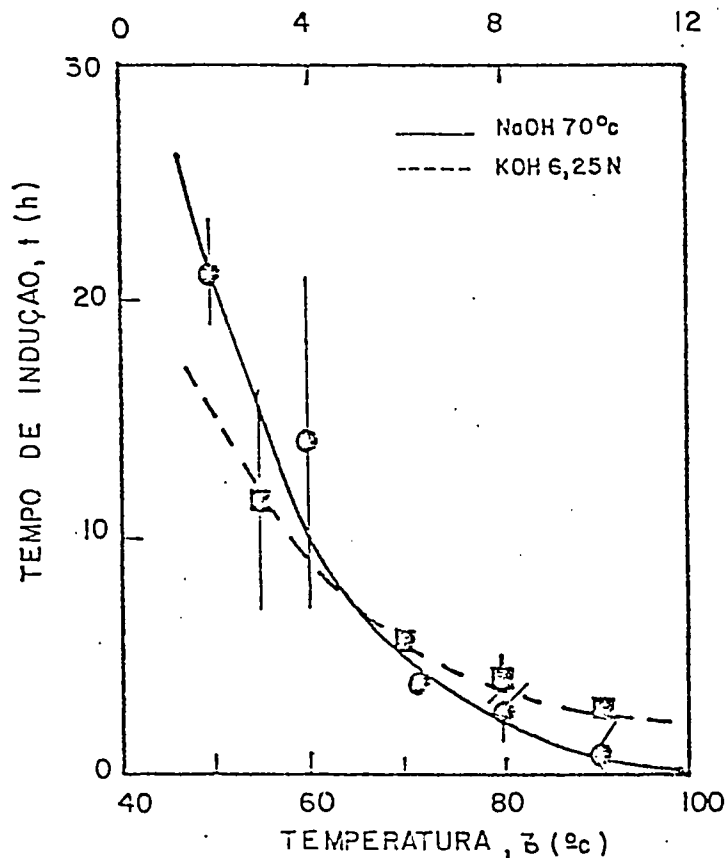


Figura 2.2.7 - Variação do tempo de indução,  $t_0$ , com a temperatura e a normalidade de soluções de NaOH e KOH. As curvas são um traçado à olho pelos pontos experimentais.

brada. Um outro cuidado é de não se colocar um número muito grande ( $\geq 10$ ) de amostras de CR-39 no volume da solução de ataque químico ( $\sim 500$  ml) pois, para tempos prolongados de ataque químico, pode haver uma diminuição da normalidade da solução.

Para as aplicações que se seguem no presente trabalho, baseados nos resultados obtidos para  $v_G$  e  $t_0$ , foi padronizada a seguinte solução de ataque químico: soluções aquosas de NaOH 6,25 e 70°C. A utilização desta condição de ataque químico permite uma comparação direta de nossos resultados com os de outros autores.



## 2.3 - DETECÇÃO DE PRÓTONS COM CR-39

### 2.3.1 - IRRADIAÇÃO

Amostras de CR-39 foram expostas a feixes de prótons produzidos no Ciclotron (CV-28) do Instituto de Engenharia Nuclear-IEN/CNEN (Rio de Janeiro).

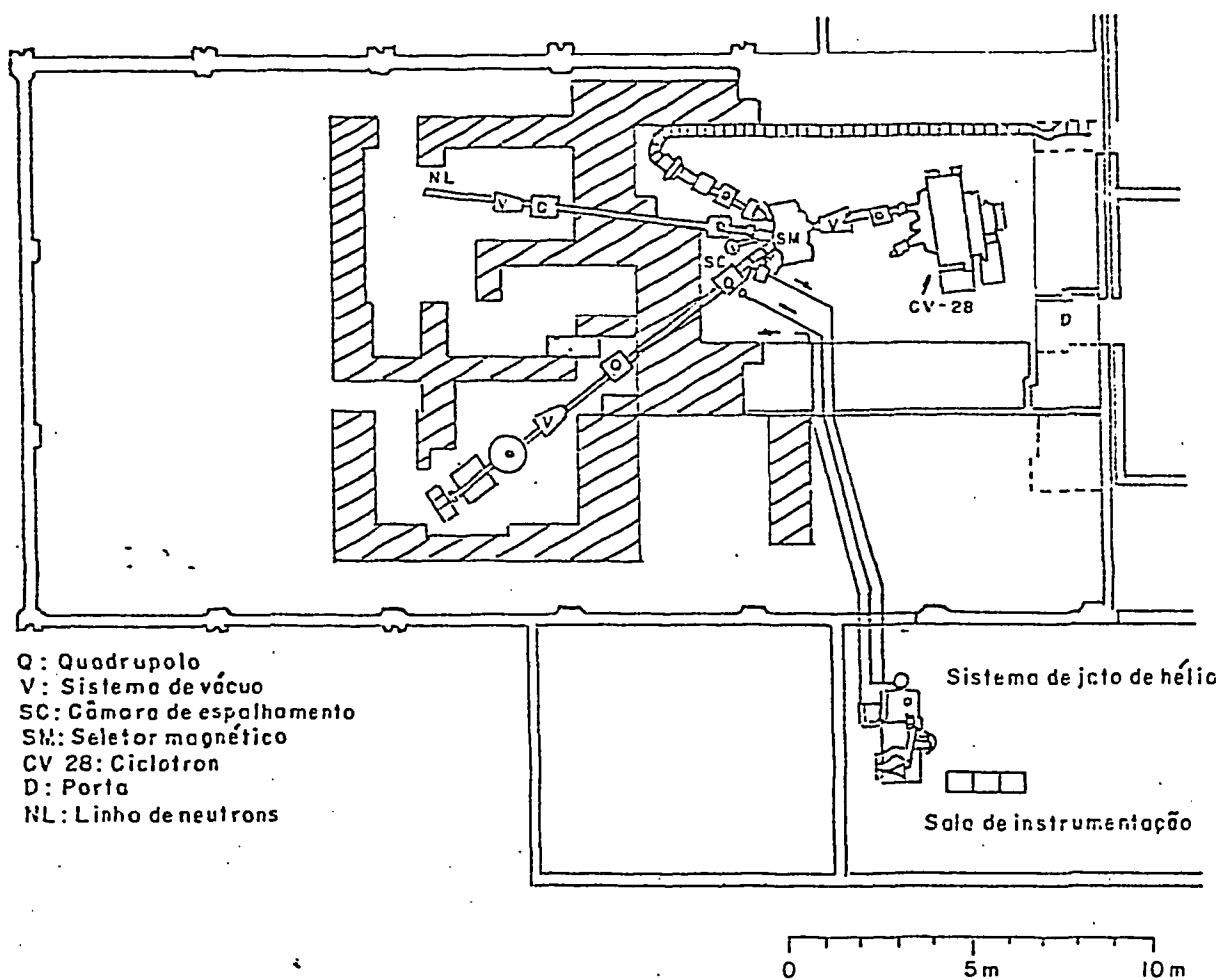


Figura 2.3.1.1 - Partes relevantes do arranjo das instalações do ciclotron.

As irradiações foram feitas na posição 4 dos tubos de saída de feixe do Ciclotron, utilizando-se uma câmara de espalhamento (SC, Figura 2.3.1.1) com alvo fino de tântalo com a finalidade de diminuir a intensidade do feixe incidente sobre as amos-

tras. A redução da intensidade do feixe é de grande importância para a análise posterior das amostras, pois se o feixe de prótons incidisse diretamente sobre elas, o número de traços por unidade de área que seriam revelados seria tão grande ( $\sim 10^{12}/\text{cm}^2$ ) que impossibilitaria a análise das amostras. Com a finalidade de permitir uma melhor definição geométrica do feixe, foi utilizado um colimador de plexiglass e alumínio o qual foi introduzido no tubo de entrada do feixe na câmara de espalhamento. Na extremidade do colimador foi colocada uma folha de tântalo de 6 $\mu\text{m}$  de espessura, que atuou como centro espalhador de prótons (Figura 2.3.1.2).

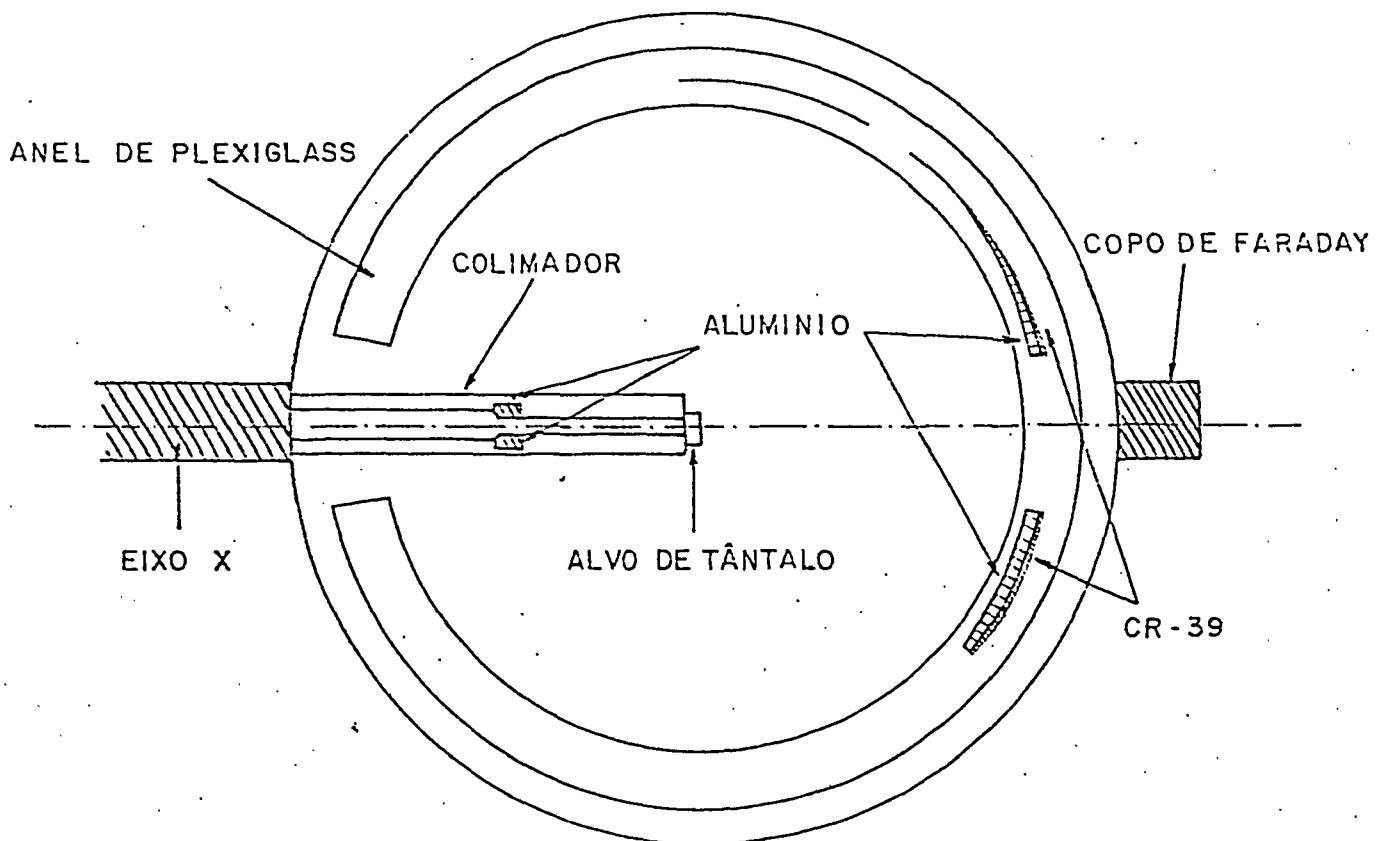


Figura 2.3.1.2 - Arranjo experimental na câmara de espalhamento.

As amostras de CR-39 foram encaixadas em um anel de plexiglass colocado no interior da câmara de espalhamento concentricamente com o centro espalhador. Sendo de 24 MeV a energia do

feixe espalhado foram utilizados como atenuadores de energia folhas de alumínio de espessura variável, colocadas junto às amostras de CR-39 (Figura 2.3.1.2).

Como o espalhamento é simétrico em relação ao eixo X, duas amostras de CR-39 ( $\approx 100\text{mm} \times 25\text{mm}$ ) foram irradiadas de cada vez e as espessuras de alumínio variaram de  $150\mu\text{m}$  ( $40\text{ mg/cm}^2$ ) a  $2800\mu\text{m}$  ( $750\text{mg/cm}^2$ ). Cada espessura de alumínio definiu sobre a amostra de CR-39 uma região de  $22\text{mm} \times 10\text{mm}$  que foi posteriormente analisada com o auxílio de um microscópio ótico.

### 2.3.2 - DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DO PRÓTON

Para determinar a energia do próton incidente,  $E$ , sobre o CR-39 após atravessar uma dada espessura,  $x$ , de alumínio foram utilizadas as expressões propostas por Andersen e Ziegler<sup>(25)</sup>, da perda de energia por unidade de comprimento,  $-dE/dx$ , de prótons no alumínio. Em unidades de  $\text{eV}/(10^{15}\text{ átomos/cm}^2)$ , as expressões são as seguintes:

para  $1\text{ KeV} \leq E \leq 10\text{ KeV}$ ,

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = A_1 E^{1/2} \quad ; \quad (2.3.2.1)$$

para  $10\text{ KeV} < E \leq 1000\text{ KeV}$ ,

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = A_2 E^{0,45} + \frac{A_3}{E} \ln\left(1 + \frac{A_4}{E} - \frac{A_5}{E}\right) \quad (2.3.2.2)$$

e para  $1000\text{ KeV} < E < 100.000\text{ KeV}$ ,

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \frac{A_6}{B^2} \left[ \ln\left(\frac{A_7 B^2}{1-B^2}\right) \right] - B^2 - \sum_{i=0}^4 A_{i+8} (\ln E^i) \quad (2.3.2.3)$$

onde  $A_i$  são coeficientes tabelados para a perda de energia de prótons no alumínio e  $B$  são coeficientes tabelados para prótons em função da energia <sup>(25)</sup>. A partir destas expressões se construiu a curva de alcance residual de prótons no alumínio em função da energia de acordo com:

$$R(E) = \int_{E_0}^0 - \frac{dE}{dE/dx} \quad (2.3.2.4)$$

O resultado está mostrado na Figura 2.3.2.1, a partir da qual foi possível construir o gráfico da Figura 2.3.2.2 que nos fornece, para prótons de energia inicial de 24 MeV, a energia após atravessar uma dada espessura  $x$  de alumínio. Para energias acima de 5 MeV, a curva da Figura 2.3.2.2 pode ser descrita pela equação:

$$x = 2,94 - 0,0116 E^{1,74}, \quad E \geq 5 \text{ MeV} \quad (2.3.2.5)$$

onde  $x$  está expresso em milímetros e  $E$  em MeV.

### 2.3.3 - REVELAÇÃO E MICROSCOPIA

Após as irradiações, as amostras de CR-39 foram reveladas segundo a condição padronizada de 6,25 N NaOH 70°C, e para tempos de ataque de 16 e 24 horas.

Todas as regiões irradiadas de cada amostra foram ob -

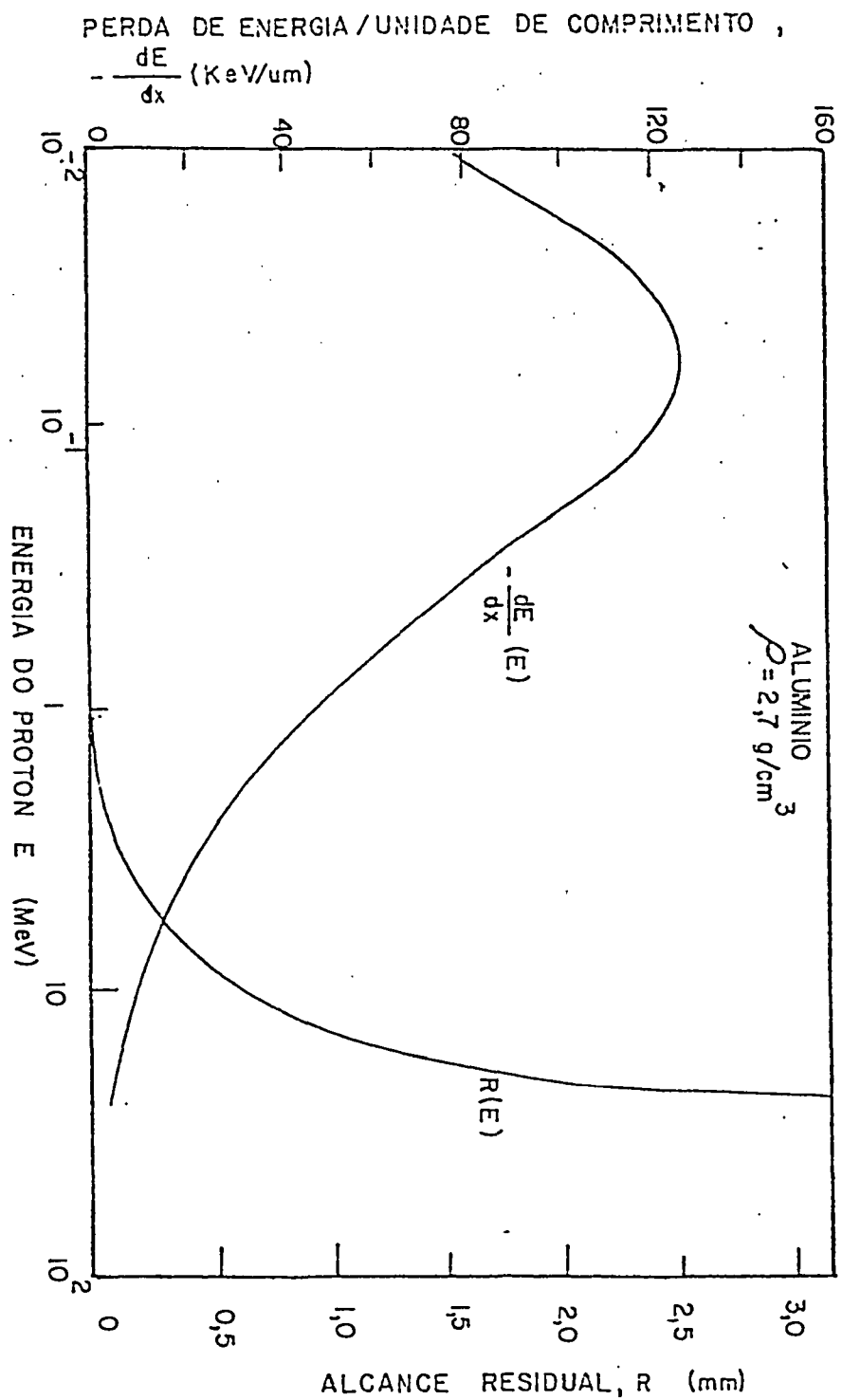


Figura 2.3.2.1 - Perda de energia por unidade de comprimento e alcance residual de prótons no alumínio. As curvas foram calculadas a partir das expressões dadas no texto.

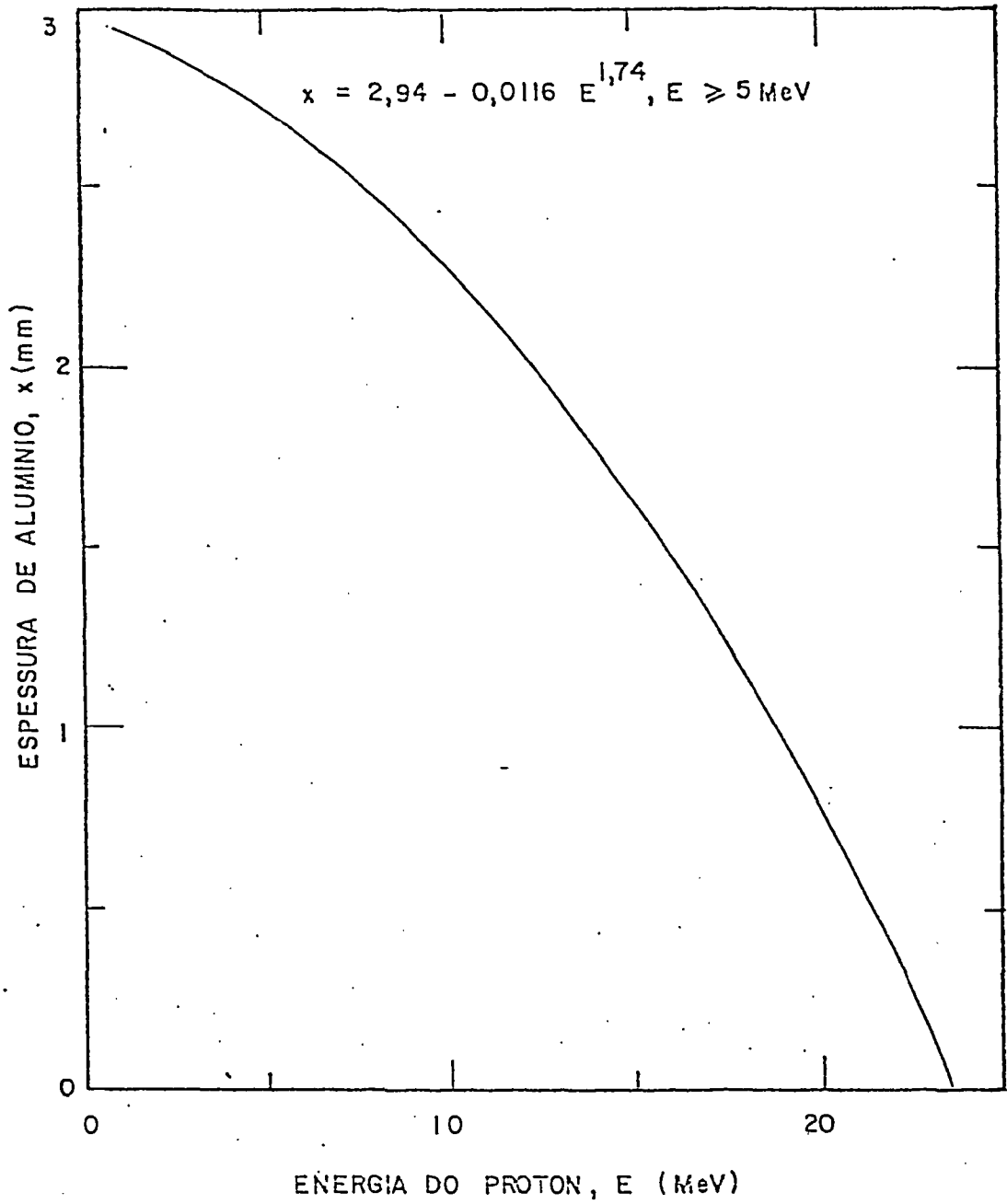


Figura 2.3.2.2 - Atenuação de prótons de 24 MeV no alumínio.

servadas com o auxílio de um microscópio ótico ORTHOLUX Leitz Wetzlar. Como o principal objetivo é determinar o limiar experimental de detecção de prótons no CR-39 através de medidas de diâmetro dos traços, foi utilizado o conjunto de lentes oculares Leitz Wetzlar GF 12,5 x M e objetiva Leitz Wetzlar FL 63/0.83, o que totaliza um aumento de  $\sim 780$  vezes. A calibração do reticulado da ocular (1,47  $\mu\text{m}$ /divisão) foi feita utilizando-se o reticulado de calibração Micrometer E. Leitz. Os resultados das medidas serão apresentados no Capítulo III.

## 2.4 - DETECÇÃO DE PARTÍCULAS ALFA COM CR-39

O terceiro conjunto de amostras de CR-39 (18mmx14mm) foi utilizado numa experiência de detecção de partículas alfa de baixa energia. Para tanto foram utilizadas fontes finas e extensas de  $\text{Pu}^{238}$  e  $\text{Cf}^{252}$  depositadas sobre discos de platina.

As condições de irradiação acham-se descritas na Tabela 2.4.1. O valor de energia da partícula alfa do  $\text{Pu}^{238}$  após atravessar uma determinada espessura de ar foi estimado a partir das curvas alcance-energia por Beth e Ashkin <sup>(26)</sup>.

Tabela 2.4.1 - Condições de irradiação das amostras de CR-39 com partículas alfa.

Grupo de amostras	Natureza	Fonte Atividade (geometria 2 $\pi$ )	Distancia da fonte ao detector(mm)	Tempo de exposição (min)	Meio	$E_{\alpha}$ (MeV)
I	$\text{Pu}^{238}$	1360 $\alpha$ /s	03	03	ar	5,3
II	$\text{Pu}^{238}$	1340 $\alpha$ /s	15	03	ar	4,1
III	$\text{Pu}^{238}$	1340 $\alpha$ /s	30	03	ar	2,2
IV	$\text{Cf}^{252}$	$1,6 \times 10^6$ $\alpha$ /h	50	50	vácuo	6,1

Inicialmente foi estudado o efeito de ataques químicos sucessivos sobre a evolução do traço. Para tanto foram utilizadas duas amostras do Grupo IV. Estas amostras foram reveladas na condição padrão de ataque químico do seguinte modo: a amostra A foi inicialmente submetida a um ataque químico durante 08 horas, após o que os traços tiveram os diâmetros medidos. Em seguida ela foi novamente submetida a ataque químico por mais 08 horas, tendo sido medidos os diâmetros dos traços. A amostra B foi revelada durante 16 horas sem interrupção tendo sido em seguida efetuadas as medidas dos diâmetros dos traços.

Observando os resultados mostrados na Tabela 2.4.2, vê-se claramente que os traços de partículas alfa evoluem de modo diferente quando se consideram ataques químicos sucessivos ou somente um período de ataque químico de mesmo tempo total.

Tabela 2.4.2 - Resultado dos efeitos de ataques químicos sucessivos e ininterruptos sobre o diâmetro dos traços de partículas alfa nas amostras de CR-39.

Amostra	Tempo de ataque(h)	Diâmetro dos traços ( $\mu\text{m}$ )	Condição de ataque químico
A	08	8,7	
A	+08	21,4	NaOH 6,25N 70°C
B	16	23,4	

Na revelação ininterrupta, o diâmetro dos traços resulta ser maior que no caso de revelações sucessivas. Este resultado provavelmente é devido ao efeito cumulativo de um tempo de indução para revelação de traços em cada uma das etapas da revelação sucessiva. Este tempo de indução para revelação de traços





que se formam na superfície do detector é um processo pouco conhecido e, portanto, merece um maior estudo.

Em vista deste resultado, os Grupos I, II e III foram constituídos por várias amostras para que se pudesse fazer o estudo da evolução dos traços em função do tempo de ataque químico em revelações sem interrupção. Medidas de diâmetro dos traços foram feitas conforme já descrito anteriormente.

## CAPÍTULO III

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 - RESPOSTA DO CR-39 PARA PRÓTONS

##### 3.1.1 - DIÂMETRO DOS TRAÇOS

Após a revelação, as amostras foram analisadas ao microscópio ótico conforme descrito anteriormente (§ 2.3.3). Para cada região das amostras de CR-39 correspondente a uma determinada espessura de alumínio, foram medidos os diâmetros de  $\sim 100$  traços. Para tanto, foram selecionados traços correspondentes à incidência normal de prótons na superfície do detector.

Os dados permitiram construir as distribuições de diâmetro para cada uma das regiões das amostras de CR-39. A Figura 3.1.1.1 apresenta os resultados para as amostras atacadas quimicamente durante 16 h segundo as condições de ataque descritas no Capítulo II (§ 2.2). A Figura 3.1.1.2 mostra os resultados para 24 horas de ataque químico. O erro calculado para o diâmetro médio dos traços em cada histograma não é maior que  $0,4\mu\text{m}$ .

Um comportamento interessante é observado nos histogramas das Figuras 3.1.1.1 e 3.1.1.2: o diâmetro médio dos traços no CR-39 diminui com o aumento da energia do próton incidente.

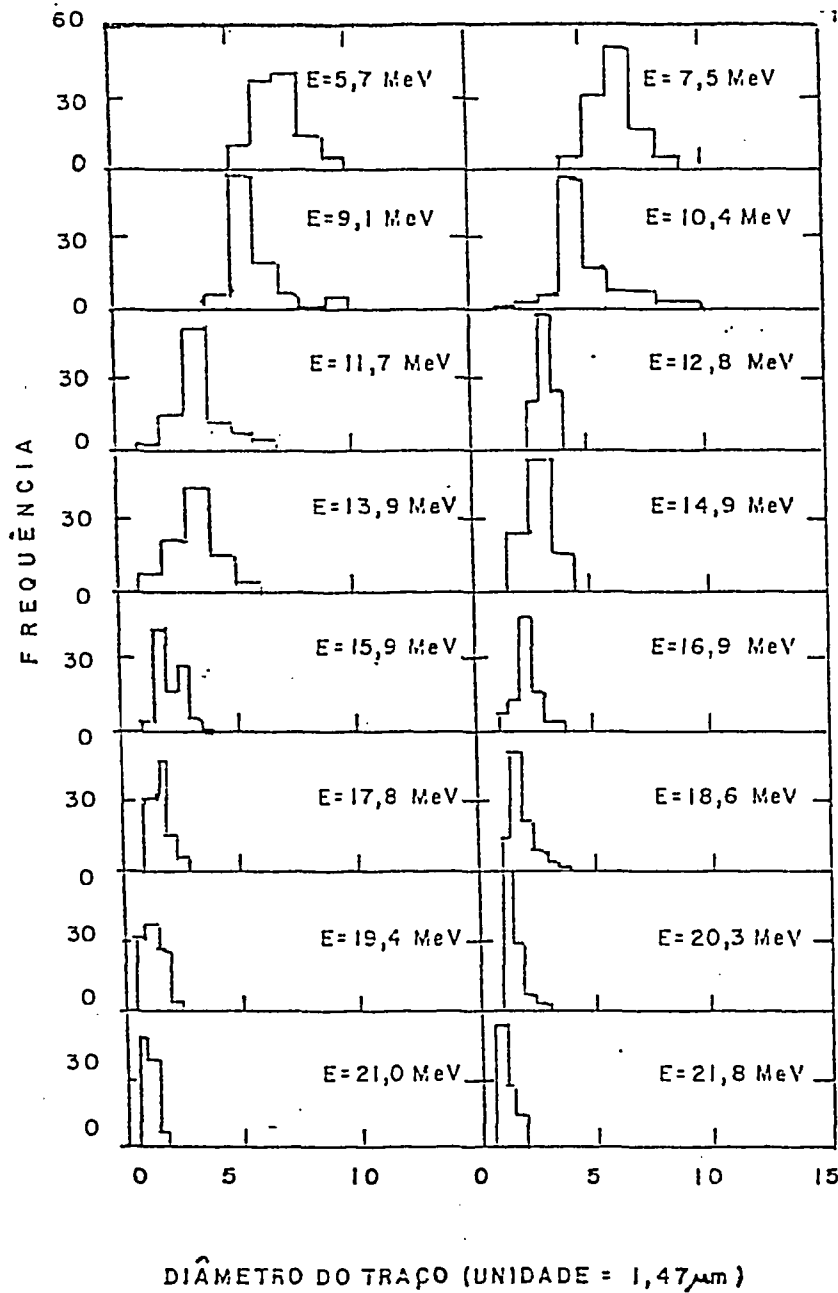
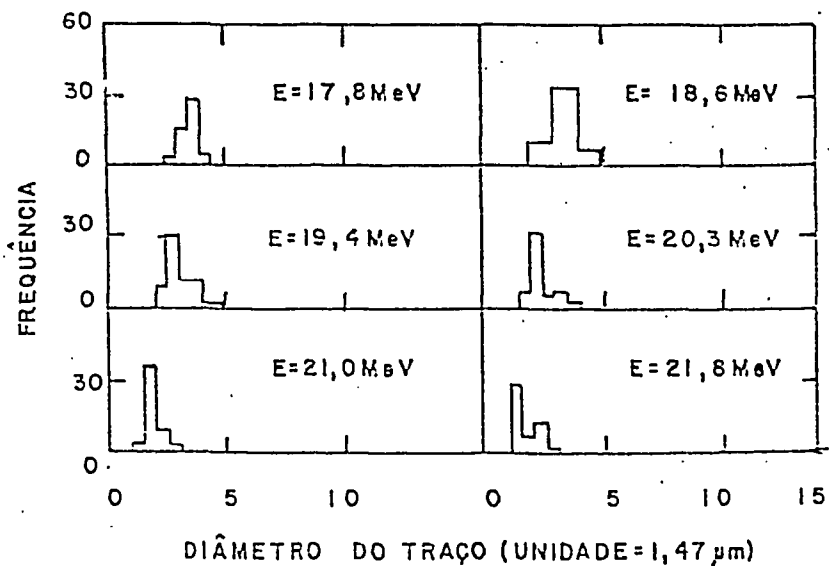


Figura 3.1.1.1 - Distribuição de diâmetro para cada uma das regiões das amostras de CR-39 reveladas durante 16 horas (NaOH, 6,25N 70°C).

Figura 3.1.1.2 - Distribuição de diâmetro para cada uma das regiões das amostras de CR-39 reveladas durante 24 horas (NaOH, 6,25N 70°C).



Este comportamento evidencia que prótons com energias maiores produzem menor densidade de danos no meio detector que os de menor energia.

Para se obter uma boa resolução em energia é necessário medir um grande número de diâmetros de traços, pois como pode ser observado nos histogramas, há uma interseção de valores dos diâmetros medidos para uma determinada energia com os de energias próximas.

A Tabela 3.1.1.1 apresenta a espessura de alumínio atravessada a energia correspondente do próton incidente no detector e o diâmetro médio dos traços para 16 h e 24 h de ataque químico.

Tabela 3.1.1.1 - Diâmetro médio dos traços em função da energia do próton incidente no CR-39\*.

Espessura de Alumínio(mm)	Energia do próton incidente (MeV)	Diâmetro médio (µm)	
		16 h de ataque químico**	24 h de ataque químico**
2,85	3,2	12,9 ± 0,3	—
2,70	5,7	10,5 ± 0,3	—
2,55	7,5	9,3 ± 0,3	—
2,40	9,1	8,7 ± 0,4	—
2,25	10,4	7,6 ± 0,4	—
2,10	11,7	5,4 ± 0,3	—
1,95	12,8	4,8 ± 0,1	—
1,80	13,9	4,8 ± 0,3	—
1,65	14,9	4,0 ± 0,2	—
1,50	15,9	3,3 ± 0,2	—
1,35	16,9	3,4 ± 0,2	5,9 ± 0,3
1,20	17,8	2,5 ± 0,1	4,9 ± 0,2
1,05	18,6	2,8 ± 0,1	4,3 ± 0,2
0,900	19,4	1,9 ± 0,2	3,8 ± 0,2
0,750	20,3	2,2 ± 0,1	2,9 ± 0,2
0,600	21,0	1,5 ± 0,1	2,4 ± 0,2
0,450	21,8	1,6 ± 0,1	2,0 ± 0,1

\* A energia do próton incidente no CR-39 foi calculada pelo método descrito no parágrafo 2.3.2.

\*\* Condições de ataque químico: 6,25N NaOH 70°C.

### 3.1.2 - CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO CR-39 PARA PRÓTONS

Os valores dos diâmetros dos traços em função da energia foram plotados na Figura 3.1.2.1. Para permitir uma comparação, estão também mostrados os resultados obtidos por Benton e col. (27), Gold e col. (28) e Rimpl e col. (29).

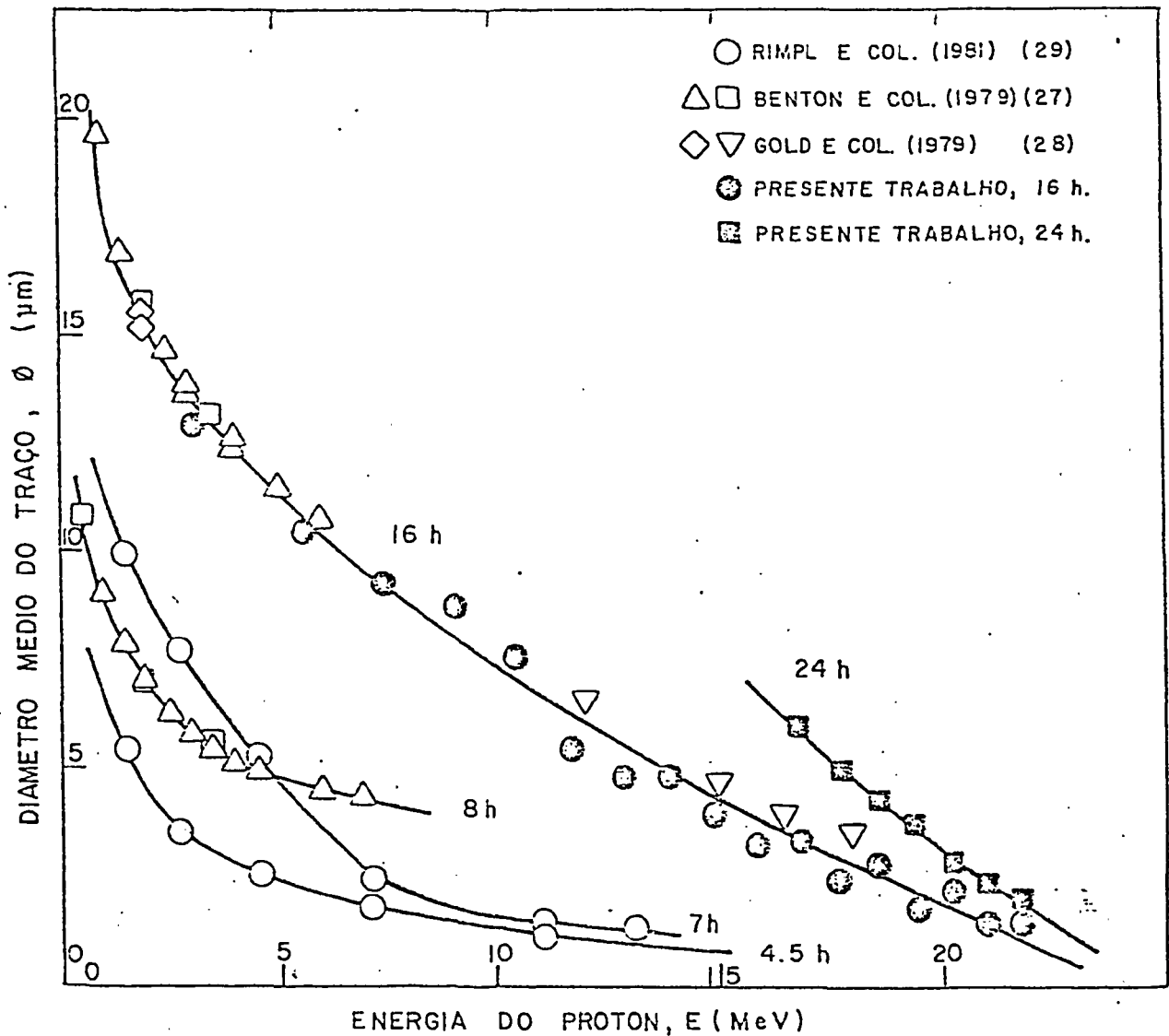


Figura 3.1.2.1 - Diâmetro médio dos traços em função da energia do próton incidente no CR-39. As curvas contínuas para 16 h e 24 h de ataque químico (6,25N NaOH 70°C) são ajustes obtidos pelo método de mínimos quadrados (equações (3.1.2.1) e (3.1.2.2) respectivamente). As demais curvas foram ajustadas a olho aos pontos experimentais.

Pode-se ver que aumentando o tempo de ataque químico o diâmetro médio dos traços aumenta (comparando diâmetros correspondentes à mesma energia); isso significa que prótons de energia mais alta podem ser revelados com um ataque químico prolongado; na curva de 8 horas foram revelados traços de prótons de até 7 MeV de energia, e na curva de 16 horas traços de prótons de até 21,8 MeV.

Outro fato a ser comentado é o possível erro sistemático que ocorre entre as medidas de diâmetro realizadas para 7 e 8 horas de ataque químico por Rimpl e col. (29) e Benton e col. (27), pois há uma interseção entre as duas curvas e o comportamento mais provável é o de que para a curva de 7 horas todos os pontos deveriam estar abaixo dos da curva de 8 horas de ataque químico, não havendo portanto interseção.

Nesta figura fica evidenciado o fato de existir uma energia crítica  $E_c$  e uma correspondente ionização crítica  $(-dE/dx)_c$  para a formação de uma quantidade mínima de danos reveláveis para prótons incidentes no CR-39.

Na Figura 3.1.2.1 observamos que para a curva correspondente a 16 horas de ataque químico os pontos obtidos neste trabalho apresentam um bom acordo com os pontos de outros autores obtidos para o mesmo tempo de ataque químico. Os pontos obtidos no presente trabalho vêm completar a curva de calibração para 16 horas de ataque químico além de permitir uma melhor definição de seu comportamento para energias maiores que  $\sim 18$  MeV. Ajustando uma parábola aos pontos experimentais, obtivemos a seguinte equação:

$$E = 0,061\phi^2 - 2,39\phi + 24,4 \quad (\phi < 20\mu\text{m}) \quad (3.1.2.1)$$

onde  $\phi$  é o diâmetro dos traços em  $\mu\text{m}$  e  $E$  a energia do próton incidente em MeV.

Procedendo de modo análogo para os pontos obtidos para 24 horas de ataque químico, resultou a seguinte equação:

$$E = 0,070\phi^2 - 1,79\phi + 25,0 \quad (\phi < 7\mu\text{m}) \quad (3.1.2.2)$$

Estas duas equações ((3.1.2.1) e (3.1.2.2)) podem ser consideradas como curvas de calibração da resposta do CR-39 para prótons revelados com 16 horas e 24 horas de ataque químico, respectivamente.

### 3.1.3 - DETERMINAÇÃO DE $E_c$ E $(-dE/dx)_c$

Fisicamente existem dois valores para a energia crítica  $E_c$ : um valor máximo acima do qual a partícula atravessa o meio detector sem praticamente produzir danos reveláveis, e um mínimo abaixo do qual a energia da partícula é insuficiente para produzir danos reveláveis. Para cada um destes valores de energia ocorrerá uma densidade de danos mínimos (número de cadeias rompidas ao longo da trajetória da partícula) revelável no meio detector. Neste estudo determinou-se a energia crítica correspondente à máxima energia de um próton incidente no CR-39 necessária para criar uma densidade mínima de danos reveláveis.

Fazendo  $\phi$  igual a zero nas equações (3.1.2.1) e (3.1.2.2), o que corresponde a não haver danos reveláveis no meio detector (CR-39), obtemos que o valor da energia crítica é de  $24,4 \pm 0,4$  MeV e  $25,0 \pm 0,5$  MeV para 16 horas e 24 horas de

ataque químico, respectivamente. A diferença existente entre os valores pode ser atribuída a flutuações de medida e de ajuste das curvas.

Com este resultado para a energia crítica, pode ser obtido o valor de  $(-dE/dx)_c$  (ionização mínima) para prótons no CR-39 desde que se tenha a curva da perda de energia em função da energia do próton no CR-39. Uma descrição resumida da Teoria de Perda da Energia e o processo de cálculo utilizado para obtenção desta curva é apresentado no Apêndice A, e o gráfico da perda de energia e alcance contra energia de prótons no CR-39 está mostrado na Figura 3.1.3.1.

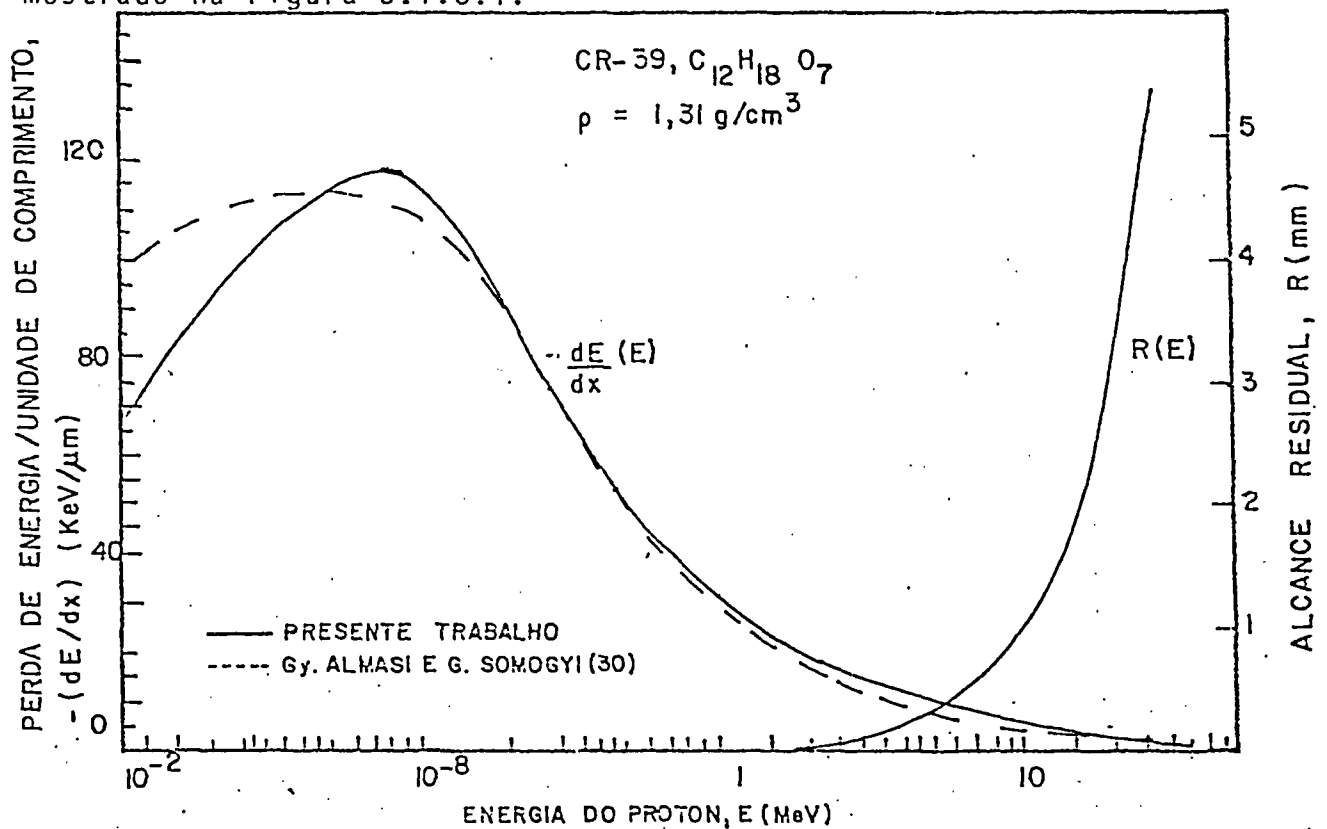


Figura 3.1.3.1 - Perda de energia por unidade de comprimento,  $-dE/dx$ , e alcance residual, R, em função da energia para prótons no CR-39.

Para efeito de comparação, nesta mesma figura foram plotados os resultados de  $-dE/dx$  e alcance de prótons no CR-39 obtidos por Almasi e Somogyi (30) que utilizaram um processo de cálculo diferente do apresentado neste trabalho. As maiores diferen



cas entre os dois resultados, ocorrem na região de baixa energia onde também são muito grandes as incertezas na contribuição dos mecanismos de perda de energia. Para os valores de alcance de prótons no CR-39 os resultados deste trabalho estão em bom acordo com os desses autores.

Utilizando então as curvas da Figura 3.1.3.1, determinou-se o valor da perda de energia crítica ou ionização crítica,  $(-dE/dx)_c$  como sendo  $(21 \pm 1) \times 10^{-3}$  MeV.cm<sup>2</sup>/mg a partir da curva calculada neste trabalho e  $(14 \pm 1) \times 10^{-3}$  MeV.cm<sup>2</sup>/mg utilizando os resultados de Almási e Somogyi<sup>(30)</sup> (curva tracejada). Estes resultados permitem estimar energias críticas para o registro de partículas carregadas de  $Z \geq 2$  no CR-39.

Um outro método que permite determinar  $(-dE/dx)_c$  consiste em plotar a razão entre a velocidade de ataque químico ao longo do traço  $v_T$  e a velocidade geral de ataque químico  $v_G$  em função da ionização.  $(-dE/dx)_c$  é obtido então quando  $v_T/v_G = 1$ . A razão  $V = v_T/v_G$  tem a seguinte expressão (ver § 1.3):

$$V = \frac{v_T}{v_G} = \frac{1 + [\phi/2v_G(t-t_0)]^2}{1 - [\phi/2v_G(t-t_0)]^2}, \quad (3.1.3.1)$$

onde  $\phi$  é o diâmetro do traço,  $t$  o tempo de ataque químico e  $t_0$  o tempo de indução. Na Figura 3.1.3.2 está mostrada a curva  $V$  versus  $-dE/dx$  ( $-dE/dx$  está expresso em MeV.cm<sup>2</sup>/mg para permitir uma comparação direta com resultados de outros autores).

Quando a ionização está atingindo o valor crítico,  $v_G$  se aproxima de  $v_T$  fazendo a razão  $V = v_T/v_G$  tender a 1. No limite quando  $v_T = v_G$  o valor de  $(-dE/dx)_c$  encontrado é de  $(24 \pm 2) \times 10^{-3}$  MeV.cm<sup>2</sup>/mg.

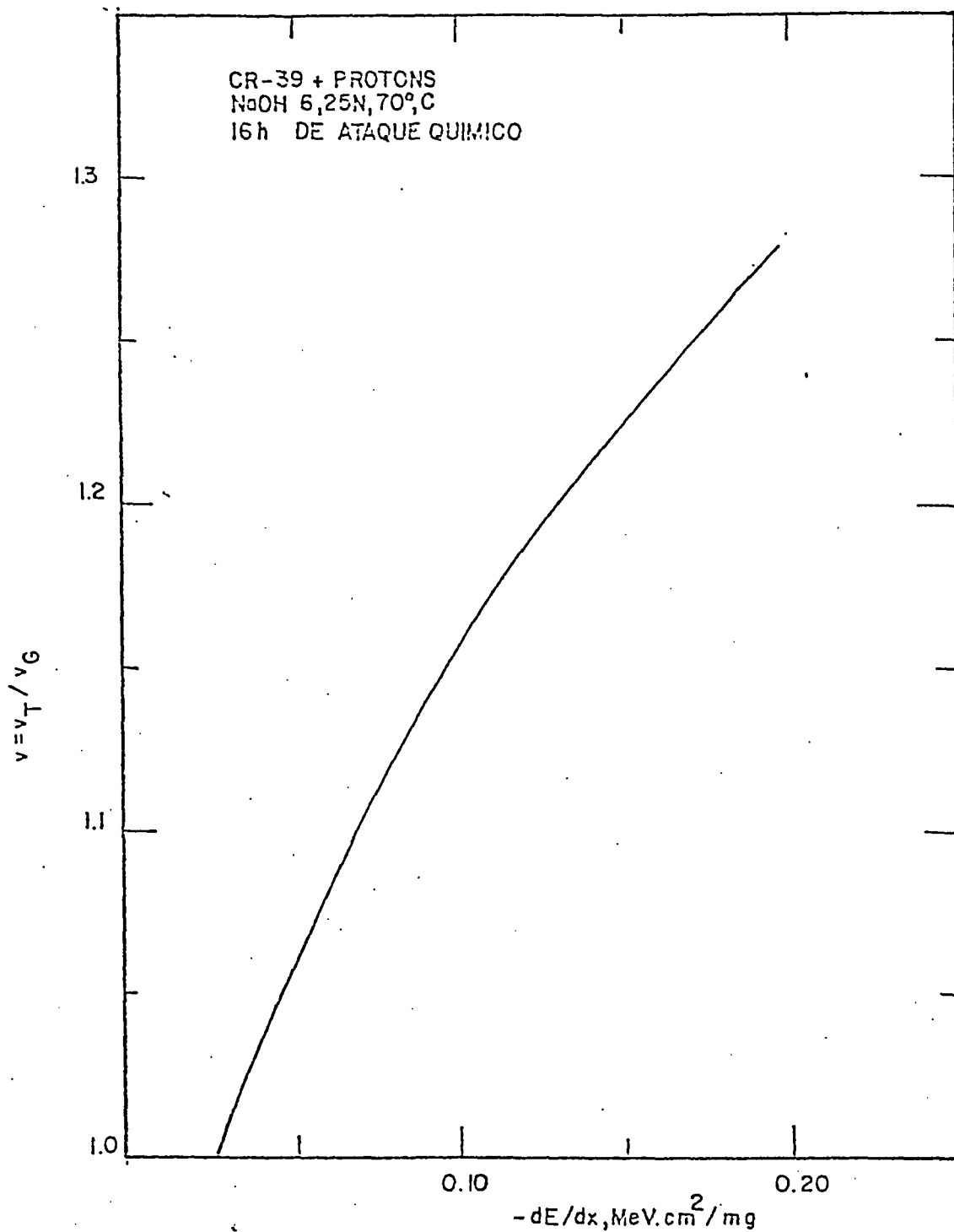


Figura 3.1.3.2 - Forma da função resposta do CR-39 na região de ionização de prótons.

O gráfico da Figura 3.1.3.2 foi feito para os resultados referentes a 16 horas de ataque químico que apresentam uma variação maior em energia que os resultados para 24 horas, o que permite apreciar uma variação significativa no valor de  $-dE/dx$ .

Considerando que o diâmetro mínimo mensurável com as condições óticas descritas no parágrafo 2.3.3 é de  $1,5\mu\text{m}$  determinamos os valores operacionais de  $E_c$  e  $(-dE/dx)_c$  para esta condição. Sendo assim, a energia crítica operacional para detecção de prótons no CR-39 é de  $21,0 \pm 1,5$  MeV para 16 horas de ataque químico e  $22,5 \pm 1,5$  MeV para 24 horas. Os valores estimados para a ionização crítica operacional são de  $(24 \pm 2) \times 10^{-3} \text{ MeV.cm}^2/\text{mg}$  e  $(23 \pm 1) \times 10^{-3} \text{ MeV.cm}^2/\text{mg}$ , respectivamente.

A Tabela 3.1.3.1 mostra um resumo dos valores de  $(-dE/dx)_c$  obtidos neste trabalho e por outros autores para comparação.

Tabela 3.1.3.1 - Valores de energia crítica e correspondente ionização crítica para detecção de prótons no CR-39 (6,25N NaOH, 70°C).

Energia crítica $E_c$ (MeV)	Ionização crítica $(-dE/dx)_c$ ( $10^{-3} \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$ )	Referência
$24,7 \pm 0,5^a$	$21 \pm 1^b$	Este trabalho
$24,7 \pm 0,5^a$	$14 \pm 1^c$	Este trabalho
$21,0 \pm 1,5^d$	$24 \pm 2^b$	Este trabalho
$22,5 \pm 1,5^e$	$23 \pm 1^b$	Este trabalho
$24,4 \pm 0,4^f$	$24 \pm 2^g$	Este trabalho
—	$\sim 33^h$	Green e col. (23)
—	$\sim 53^h$	Henshaw e col. (31)

<sup>a</sup>Valor médio obtido fazendo-se  $\phi = 0$  nas Eqs. (3.1.2.1) e (3.1.2.2).

<sup>b</sup>Valor estimado a partir da curva contínua da Fig. 3.1.3.1.

<sup>c</sup>Valor estimado a partir da curva tracejada da Fig. 3.1.3.1.

<sup>d</sup>Valor obtido fazendo-se  $\phi = 1,5\mu\text{m}$  na Eq. (3.1.2.1).

<sup>e</sup>Valor obtido fazendo-se  $\phi = 1,5\mu\text{m}$  na Eq. (3.1.2.2).

<sup>f</sup>Valor obtido fazendo-se  $\phi = 0$  na Eq. (3.1.2.1).

<sup>g</sup>Valor estimado utilizando-se o gráfico da Fig. 3.1.3.2.

<sup>h</sup>Valor estimado por extrapolação.

### 3.2 - RESPOSTA DO CR-39 PARA PARTÍCULAS ALFA

A Figura 3.2.1 apresenta os resultados obtidos para as amostras de CR-39 irradiadas com partículas alfa e reveladas segundo as condições descritas no parágrafo 2.4. Estes resultados consistem das medidas de diâmetro dos traços de incidência normal versus tempo de ataque químico, resultando 3 curvas.

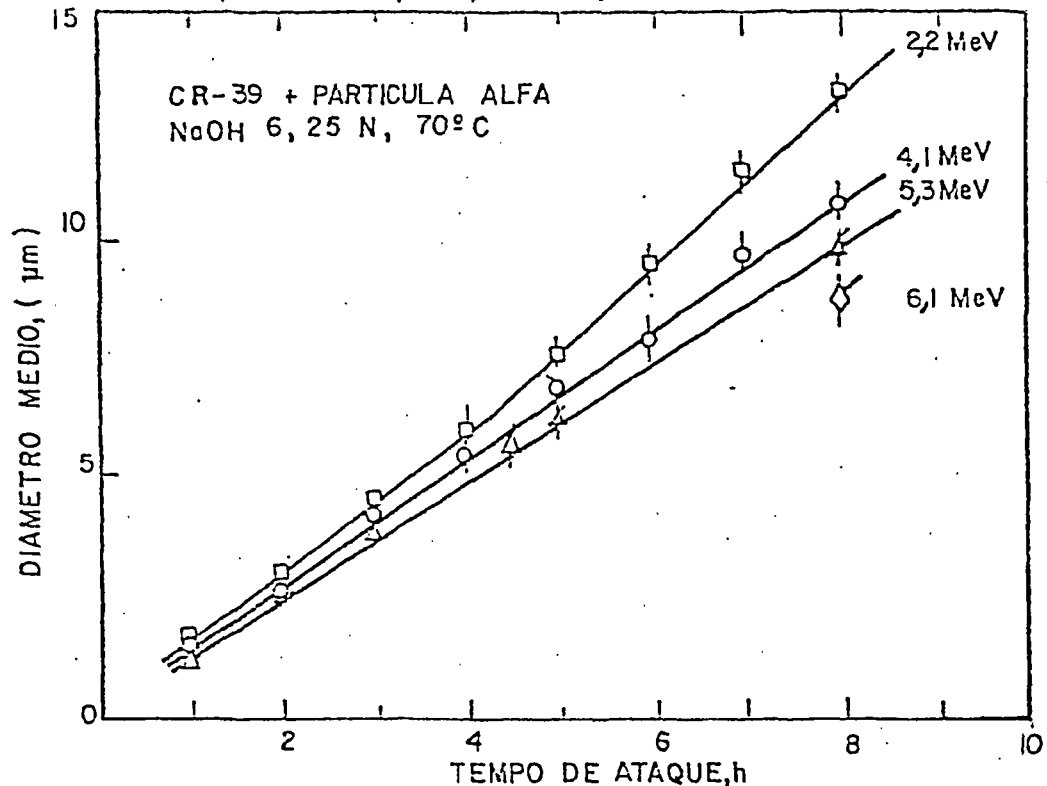


Figura 3.2.1 - Variação do diâmetro médio de traços de partículas alfa com o tempo de ataque químico. As curvas foram ajustadas a olho aos pontos experimentais.

Nesta figura é observado que traços de partículas alfa são revelados dentro do tempo de indução para a remoção do material não danificado (§ 2.2). Isto sugere que as partículas alfa perdem uma quantidade de energia necessária para produzir danos reveláveis na superfície do detector (CR-39). O efeito de  $v_G$  e  $v_T$  deve se manifestar somente na região onde a partícula incidiu, e como a densidade de danos é grande o fenômeno de forma-

ção do traço é iniciado antes que as partes não danificadas pela irradiação sofram os efeitos de  $\nu_G$ .

Na Figura 3.2.1 observamos que para tempos de ataque químico maiores que  $\sim 7$  horas pode-se obter uma boa resolução em energia para partículas alfa.

A Figura 3.2.2 é uma maneira alternativa de apresentar os dados mostrados na Figura 3.2.1. Estas curvas (Fig. 3.2.2) podem ser consideradas como curvas de calibração de partículas alfa no CR-39. Mais uma vez pode ser verificada a eficiência de tempos de ataque químico prolongados para obter boa resolução em energia para partículas alfa.

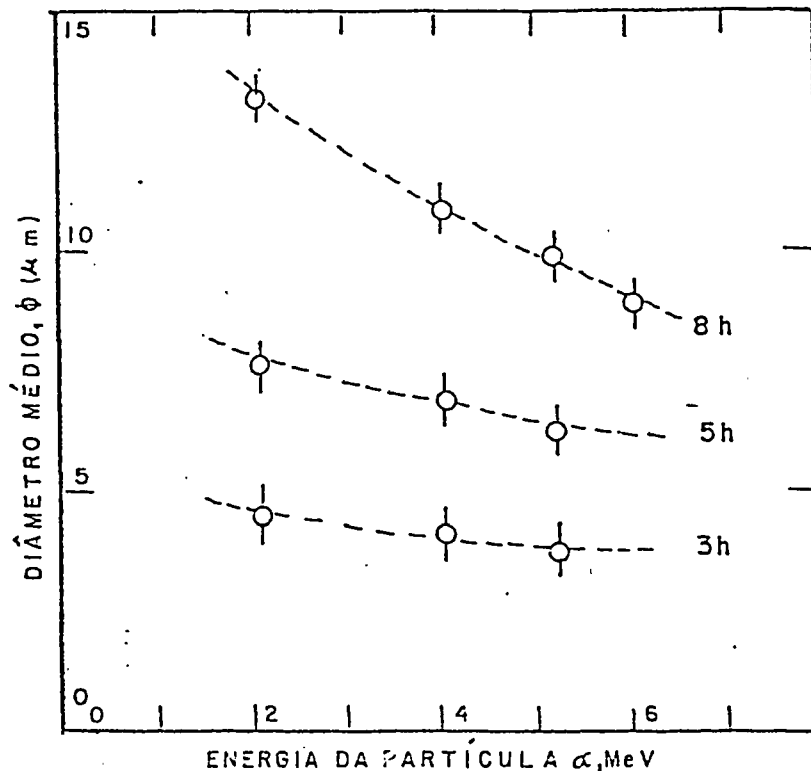


Figura 3.2.2 - Variação do diâmetro médio dos traços de partículas alfa em função da energia para 3 tempos de ataques químicos.

### 3.3 - CONCLUSÕES

No presente estudo de algumas características e propriedades de registro de partículas carregadas no plástico thermo-set CR-39 como detector sólido de traços, vários resultados obtidos foram confrontados com os de outros pesquisadores, bem como novos resultados foram apresentados. Embora o conjunto de dados de que dispomos seja ainda pequeno, e existam erros inerentes nas medidas realizadas como descrito nos parágrafos precedentes, estes resultados são suficientes para permitir concluir que:

- 1 - existe um tempo de indução,  $t_0$ , para a remoção de camadas superficiais não danificadas do detector CR-39 em soluções aquosas de NaOH e KOH de diferentes concentrações e temperaturas. O tempo de indução diminui com o aumento da normalidade e da temperatura da solução;
- 2 - a partir das curvas de calibração para prótons no CR-39 para 16 horas e 24 horas de ataque químico, foi possível determinar a energia crítica e a correspondente ionização crítica neste detector; os valores obtidos foram  $24,7 \pm 0,5$  MeV e  $(21 \pm 1) \times 10^{-3}$  MeV cm<sup>2</sup>/mg, respectivamente e mostram ser independentes do tempo de ataque químico;
- 3 - a energia crítica e a correspondente energia crítica operacional dependem das condições óticas de observação do diâmetro mínimo dos traços (1,5  $\mu$ m neste trabalho); esses valores são reduzidos para  $21,0 \pm 1,5$  MeV e  $(24 \pm 2) \times 10^{-3}$  MeV cm<sup>2</sup>/mg para 16 horas de revelação e  $22,5 \pm 1,5$  MeV e  $(23 \pm 1) \times 10^{-3}$  MeV cm<sup>2</sup>/mg para 24 horas de revelação;

- 4 - a eficiência de registro de prótons no CR-39 é dependente do ângulo de incidência da partícula. Para o registro de prótons de baixa energia o ângulo de incidência deve ser maior que  $53^{\circ}$ . À medida que a energia incidente aumenta o ângulo crítico para registro de prótons se aproxima de  $90^{\circ}$ , isto é, incidência próxima à normal (cf. Fig. 3.1.3.2);
- 5 - não ocorre aditividade de ataques químicos sucessivos para traços de partículas alfa no CR-39; a formação destes traços ocorre dentro do tempo de indução  $t_0$ ;
- 6 - uma boa resolução em energia para traços de partículas alfa pode ser obtida com aumento adequado do tempo de ataque químico.

É desejável que futuros trabalhos com este tipo de detector sejam realizados, os quais poderão fornecer resultados adicionais que venham a confirmar os resultados aqui apresentados.

## APÊNDICE A

### PERDA DE ENERGIA E ALCANCE DE PRÓTONS NO CR-39

De uma maneira formal, a perda de energia de um próton não relativístico em um meio é dada pela fórmula de Bethe:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_\beta = \frac{4\pi e^4 ZN}{m_0 c^2 \beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_0 c^2 \beta^2}{I} \right) - \frac{C_K}{Z} \right] \quad (\text{A.1})$$

onde:

- e - carga do elétron;
- Z - número atômico dos átomos do material (considerando o material homogêneo);
- N - número de átomos por  $\text{cm}^3$ ;
- $m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV}$  - energia de repouso do elétron;
- $\beta = v/c$  - velocidade do próton (c é a velocidade da luz no vácuo);
- I - potencial médio de ionização;
- $C_K$  - termo corretivo que leva em conta a não participação dos elétrons da camada mais interna K no mecanismo da perda de energia.

O potencial médio de ionização pode ser obtido com boa aproximação mediante a expressão:

$$I[\text{eV}] = 13,4 Z^{0,93} \quad (\text{A.2})$$



O termo corretivo  $C_K$  depende da velocidade da partícula e do número atômico  $Z$ ; sendo que a influência de  $Z$  nos valores de  $C_K$  é pequena. Uma expressão que reduz com boa aproximação os valores teóricos de  $C_K$  é a seguinte:

$$C_K = \frac{3\alpha^2 (Z-0,3)^2}{\beta^2} \exp \left( - \frac{1,119\alpha^2 (Z-0,3)^2}{\beta^2} \right) \quad (A.3)$$

sendo  $\alpha = 1/137$  a constante de estrutura fina. Esta equação pode ser reescrita na seguinte forma:

$$C_K = \frac{1,6 \times 10^{-4} (Z-0,3)^2}{\beta^2} \exp \left( - \frac{6 \times 10^{-5} (Z-0,3)^2}{\beta^2} \right) . \quad (A.4)$$

Substituindo a expressão do potencial médio de ionização (equação (A.2)) na fórmula de Bethe (equação (A.1)), e escolhendo como unidade de ionização o MeV/ $\mu\text{m}$  a equação (A.1) passa a ser escrita como:

$$\left( - \frac{dE}{dx} \right)_\beta = 5,1 \times 10^{-29} \frac{ZN}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{7,62 \times 10^4 \beta^2}{Z^{0,93}} \right) - \frac{C_K}{Z} \right] \text{ MeV}/\mu\text{m} . \quad (A.5)$$

Esta equação aplica-se no caso em que o meio é homogêneo contendo  $N$  átomos/ $\text{cm}^3$  de uma mesma espécie  $Z$ .

Suponhamos que temos um meio constituído de  $n$  diferentes elementos e com densidade  $\rho$  constante. Sejam  $Z_i$  o número atômico,  $A_i$  o peso atômico e  $p_i$  o percentual em peso dos diferentes elementos do meio. Sendo assim o número de átomos por  $\text{cm}^3$ ,  $N_i$ , de cada constituinte do meio será dado por:

$$N_i = \rho N_0 p_i / A_i \quad (A.6)$$

onde  $N_0$  é o número de avogadro.

Assim as diferentes espécies de átomos contribuem com parcelas para a ionização total, e a perda de energia de um próton em um meio composto é dada pela expressão:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_p = 3,07 \times 10^{-5} \frac{\rho [\text{g/cm}^3]}{\beta^2} \sum_{i=1}^n \frac{Z_i^2 p_i}{A_i} \left[ \ln \left( \frac{7,62 \times 10^4 \beta^2}{Z_i^{0,93}} \right) - \frac{C_K(Z_i, B)}{E_i} \right] \text{ MeV/\mu m} \quad (\text{A.7})$$

Para um meio composto como o CR-39 ( $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$ ), determinamos a perda de energia do próton em cada um destes compostos, utilizando este procedimento e as expressões (2.3.2.1), (2.3.2.2) e (2.3.2.3) descritas no Capítulo II, e fazendo um somatório do produto de cada um destes resultados pelo valor de  $N$  correspondente a cada um dos compostos. Todo esse processo pode ser melhor visualizado como sendo uma combinação com a seguinte forma:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{(\text{CR-39})} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{(\text{C})} \times N_{(\text{C})} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{(\text{H})} \times N_{(\text{H})} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{(\text{O})} \times N_{(\text{O})} \quad (\text{A.8})$$

que é análoga à equação (A.7).

O número de átomos por  $\text{cm}^3$ ,  $N$ , para cada composto do CR-39 que tem uma densidade  $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$  está mostrado na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Número de átomos por  $\text{cm}^3$ ,  $N$ , para cada composto do CR-39.

Composto	$N$ *
C	3,453
H	5,183
O	2,015

\*No cálculo de  $N$ , o valor de  $N_0$  (número de avogadro) é tomado como sendo 6,023 sem a potência de 10 ( $10^{23}$ ). Esse procedimento é efetuado para permitir que ao se multiplicar o valor da perda de energia em cada componente (na unidade de  $eV/(10^{15} \text{ átomos}(cm^2))$ ) pelo seu valor de  $N$  correspondente, o resultado da perda de energia do próton no CR-39 seja automaticamente expresso na unidade de KeV/ $\mu m$ .

## BIBLIOGRAFIA

- (1) - A. Young, "Etching of Damage in Lithium Fluoride", Nature 182 (1958), 375-377.
- (2) - E.C.H. Silk and R.S. Barnes, "Examination of Fission Fragment Tracks with an Electron Microscope", Phil. Mag. 4 (1959), 970-971.
- (3) - R.L. Fleischer and P.B. Price, "Tracks of Charged Particles in High Polymers", Science 140 (1963), 1221.
- (4) - R.L. Fleischer, P.B. Price and R.M. Walker, "The Ion Explosion Spike Mechanism for Formation of Charged Particles Tracks in Solids", J. Appl. Phys. 36 (1965), 3645-3652.
- (5) - E.V. Benton, "Charged Particle Tracks in Polymers No. 4 : Criterion for Track Registration", USNRDL-TR-67-80, (1967), U.S. Nav.Rad.Def.Lab., San Francisco, California.
- (6) - E.V. Benton and W.D. Nix, "The Restricted Energy Loss Criterion for Registration of Charged Particles in Plastics", Nucl. Instr. and Meth. 67 (1969), 343-347.
- (7) - M. Monnin, "Mechanism of the Formation of Tracks in Polymers", Rad. Effects 5 (1970), 69-73.
- (8) - J. Fain, M. Monnin and M. Montret, "Spatial Energy Distribution Around Heavy Ion Paths", Rad. Research 57 (1974), 379-389.
- (9) - R. Katz and E. Y. Kobetich, "Formation of Etchable Tracks in Dielectrics", Phys. Rev. 170 (1968), 401-405.
- (10) - R.L. Fleischer, P.B. Price and R.M. Walker, "Nuclear Tracks in Solids", University of California Press (1975), Berkeley and Los Angeles, California.

- (11) - B.G. Cartwright, E.K. Shirk and P.B. Price, "A Nuclear-Track-Recording Polymer of Unique Sensitivity and Resolution", Nucl. Instr. and Meth. 153 (1978), 457-460.
- (12) - R.M. Cassou and E.V. Benton, "Properties and Applications of CR-39 Polymeric Nuclear Track Detector", Nucl. Track Det. 2 (1978), 173-179.
- (13) - G. Somogyi, "Development of Etched Nuclear Tracks", Nucl. Instr. and Meth. 173 (1980), 21-42.
- (14) - L.T. Chadderton and R.M. Montagn-Pollock, "Fission Fragment Damage to Crystal Lattices: Heat Sensitive Crystals" Proc. Roy. Soc. A274 (1933), 239-252.
- (15) - E.V. Benton, "On Latent Track Formation in Organic Nuclear Charged Particle Track Detectors", Rad. Effects 2 (1970), 273-280.
- (16) - J. Fain, M. Monnin and M. Montret, "Heavy Ion Effects in Polymers", Proc. Symp. Radiat. 3rd (1971), Tihany.
- (17) - R.H. Boyett, D.R. Johnson and K. Becker, "Some Studies on the Chemical Damage Mechanisms Along Charged Particle Tracks in Polymers", Rad. Research 42 (1970), 1-12.
- (18) - K. Kinoshita and P.B. Price, "Method for Producing Thin Sheets of Proton-Sensitive CR-39 Plastic Track Detectors", Rev. Sci. Instrum., 51(1) (1980), 32-34.
- (19) - Solid State Nuclear Track Detectors, Proceedings of the 10th International Conference, Lyon 2-6 July 1979, (H. François et al., ed.), Pergamon Press (Oxford, 1980).
- (20) - Solid State Nuclear Track Detectors, Proceedings of the 11th International Conference, Bristol 7 - 12 September 1981, (P.H. Fowler and V.M. Claphan, ed.), Pergamon Press (Oxford, 1982).
- (21) - T.A. Gruhn, W.K. Li, E.V. Benton, R.M. Cassou and C.S. Johnson, "Etching Mechanism and Behaviour of Polycarbonag

- tes in Hydroxide Solution: Lexan and CR-39", Solid State Nuclear Track Detectors, Proceedings of the 11th International Conference, Lyon 2-6 July 1979, (H. François et al., ed.), Pergamon Press (Oxford, 1980), 291-302.
- (22) - H.A. Khan and N.A. Khan, "Fast Neutron Dosimetry Using a CR-39 Plastic Track Detector", Nucl. Instr. and Meth. 178 (1980), 491-497.
- (23) - P.F. Green, A.G. Ramli, S.A.R. Al-Najjar, F. Abud - Yarad and S.A. Durrani, "A Study of Bulk-Etch Rates and Track-Etch Rates in CR-39", Nucl. Instr. and Meth. 203(1982); 551-559.
- (24) - K.K. Dwivedi and S. Mukherji, "Bulk and Track Etch Rate Studies with some Solid Dielectric Track Detectors", Nucl. Instr. and Meth. 159 (1979), 433-438.
- (25) - H.H. Andersen and J.F. Ziegler, The Stopping and Ranges of Ions in Matter (Volume 3), Pergamon Press Inc. (N. York, 1977).
- (26) - H.A. Bethe and Y. Ashkin, Experimental Nuclear Physics , (Volume I, E. Segrè, ed.), John Wiley & Sons, Inc. ( New York, 1953),180.
- (27) - E.V. Benton, C.C. Preston, F.H. Ruddy, R. Gold and Y.M. Roberts, "Proton and Alpha Particle Response Characteristics of CR-39 Polymer for Reactor and Dosimetry Applications", Solid State Nuclear Track Detectors, Proceedings of the 10th International Conference, Lyon 2-6 July 1979, (H. François et al., ed.), Pergamon Press (Oxford,1980), 459-467.
- (28) - R. Gold, Y.H. Roberts and F.H. Ruddy, "Advances in SSTR Techniques for Dosimetry and Radiation Damage Measurements", Proceedings of the 3. ASTM-EURATION Symposium , Ispra, 1-5 October 1979, 1172-1187.
- (29) - G. Rimpl, R. Salzberger and B. Uebigau, "Improvement of

CR-39 Foils for Application in the Dosimetry of Biological Systems", Solid State Nuclear Track Detectors, Proceedings of the 11th International Conference, Bristol, 7-12 September, 1981 (P.H. Fowler and V.M. Claphan, ed.), Pergamon Press (Oxford 1982), 133-135.

- (30) - Gy. Almási and G. Somogyi, "Range and REL Data for Light and Heavy Ions in CR-39, CN-85 and PC Nuclear Track Detectors", ATOMKI Közlemények 23 (1981), 99-112.
- (31) - D.L. Henshaw, N. Griffiths, O.A.L. Landen and E.V. Benton, "A Method of Producing Thin CR-39 Plastic Nuclear Track Detectors and their Application in Nuclear Science and Technology", Nucl. Instr. and Meth. 180 (1981), 65-77.