

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**Instituto de Física Gleb Wataghin**

CONTAMINAÇÃO DO AR AMBIENTAL POR RADÔNIO E FILHOS  
Estudo de Características do  $^{220}\text{Rn}$  e Filhos Utilizando o Detector CR-39

**Narciso Ferreira Santos**

Orientador: Prof. Dr. Julio César Hadler  
Neto.

TESE SUBMETIDA AO INSTITUTO DE FISICA GLEB WATAGHIN DA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DO IFGW - UNICAMP**

Sa59c

Santos, Narciso Ferreira

Contaminação do ar ambiental por Radônio e Filhos : estudo de características do  $^{220}\text{Rn}$  e Filhos utilizando o detector CR-39 / Narciso Ferreira Santos. - Campinas, SP : [s.n.], 2003.

Orientador: Júlio César Hadler Neto..

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

1. Radon. 2. Torônio. 3. Traços de partícula (Física nuclear). 4. Espectrometria de raio alfa.  
I. Hadler Neto, Júlio César. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física "Gleb Wataghin".  
III. Título.

(vsv/ifgw)

**BANCA EXAMINADORA:**

**Prof. Dr. Júlio César Hadler Neto**  
**Orientador – IFGW – UNICAMP**

**Profa. Dra. Carol Hollingworth Collins**  
**IQ – UNICAMP - Campinas**

**Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto**  
**IGCE - UNESP – Rio Claro**

**Profa. Dra. Carola Dobrigkeit Chinellato**  
**IFGW - UNICAMP**

**Prof. Dr. José Augusto Chinellato**  
**IFGW - UNICAMP**

**SUPLENTE:**

**Prof. Dr. Sergio Roberto de Paulo**  
**ICET – UFMT – Cuiabá - MT**

**Prof. Dr. Marcio José Menon**  
**IFGW - UNICAMP**

## RESUMO:

O objetivo desse trabalho foi o de caracterizar o detector de traços nucleares de estado sólido CR-39 para uma espectroscopia alfa adequada à medição das atividades do radônio e filhos, separando-se a atividade de  $^{222}\text{Rn}$  e filhos da atividade de  $^{220}\text{Rn}$  e filhos. Foi obtida a atividade do  $^{222}\text{Rn}$  separada da atividade do  $^{220}\text{Rn}$  mediante a exposição do CR-39 em uma seqüência regularmente espaçada de filmes finos de ar. Obtivemos um diagrama de tamanhos de traços e densidade óptica que distingue de forma inequívoca os traços produzidos por filhos de cada uma das cadeias. Obtivemos ainda uma medida da atividade dos filhos do  $^{220}\text{Rn}$  referidas à atividade do  $^{222}\text{Rn}$  em um ambiente sem ventilação. Para obter estes resultados produzimos uma fonte de chumbo 212 e construímos um dispositivo adequado à calibração do CR-39, para espectroscopia alfa. Indicamos um caminho para estender o método também a ambientes ventilados.

## ABSTRACT:

The aim of this work was to characterize the solid state nuclear track detector CR-39 to do an alpha spectroscopy suitable for measuring radon and radon daughter activities, distinguishing between  $^{222}\text{Rn}$  and daughters and  $^{220}\text{Rn}$  and daughters. The  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  activities were obtained separately through a regular sequence of thin films of air. We obtained diagrams of track size and optical density, which unequivocally distinguish the tracks yielded by daughters of each decay chain. We obtained a measurement of the  $^{220}\text{Rn}$  daughters' activity relative to the  $^{222}\text{Rn}$  activity in an environment without ventilation. In order to obtain these results we manufactured a lead-212 source and a device suitable for the calibration of the CR-39 for alpha spectroscopy. Finally, we give directions for applying the method also in ventilated environments.

## AGRADECIMENTOS:

Ao Júlio pela sugestão dessa linha de trabalho e pela lealdade em todos os momentos.

Ao Roversi e à Sueli pelo grande incentivo que me transmitiram.

A todos os amigos do Grupo de Cronologia, sempre dispostos a ajudar:

Ao Sandro, ao Pedro, ao Rodrigo, ao Eduardo, ao Carlos, ao Walter, à Aline, à Rosane.

Ao Sérgio cuja tese é nossa referência.

Aos colegas do Departamento de Física, UFES, e em especial pelo incentivo e pela ajuda ao Emmerich, à Helena, ao Sydney, ao Luciano e ao Reinaldo.

Ao colega do Depto. de Química, UFES, Luiz Carlos Machado pelas boas conversas a respeito desse trabalho.

Ao amigo César Engelberg Moraes pela ajuda na confecção de dispositivos que utilizei.

Ao amigo Antonio Romero Lopes que colaborou em algumas das exposições.

Dedico aos meus filhos

Lívia e Ivan

e

Aos meus pais

Antônio Vieira Santos

Ernestina Ferreira Santos (1925-1993)

## ÍNDICE:

| <b>Conteúdo.....</b>   | <b>página</b> |
|--|---------------|
| Introdução.....  | 1             |
| 1-1 Motivação Inicial.....   | 3             |
| 1-2 Exposições Preliminares em Vitória e Guarapari.....                                      | 6             |
| 2-1 Distribuição Espacial da Atividade do Radônio e Filhos.....                              | 10            |
| Distribuição Espacial com Degradador Acoplado ao Detector.....                               | 14            |
| 2-2 Sanduíche de Placas Paralelas – Atividade do $^{220}\text{Rn}$ Próximo da Parede.....    | 18            |
| 3-1 Produção de uma Fonte de $^{212}\text{Pb}$ .....   | 28            |
| 3-2 Uma Colméia de Colimadores para Calibração do CR-39.....                                 | 32            |
| 3-3 A Atividade do $^{222}\text{Rn}$ no Ar do Ambiente.....                                  | 41            |
| 4-1 A Presença de $^{212}\text{Pb}$ no Ar Ambiental.....                                     | 44            |
| 5-1 Análise dos Resultados – Atividade do $^{222}\text{Rn}$ no Ar do Ambiente.....           | 54            |
| 5-2 Análise dos Resultados – Atividade dos Filhos do $^{220}\text{Rn}$ no Ar do Ambiente.... | 56            |
| 5-3 Conclusão.....   | 57            |
| Referências.....   | 58            |

**Figuras..... página**

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1-1  | Cadeia do $^{222}\text{Rn}$ .....  | 4  |
| 1-2  | Cadeia do $^{220}\text{Rn}$ .....  | 4  |
| 1-3  | Traços de alfas registrados por detector CR-39.....  | 5  |
| 1-4  | Geometria 2Π.....  | 6  |
| 1-5  | Geometria de placas paralelas – filme fino de ar.....  | 6  |
| 1-6  | O tonel de 200 litros.....   | 6  |
| 2-1  | Ambiente 1 – exposição de 507 dias.....  | 10 |
| 2-2  | Ambiente 8 – exposições de 356 e 120 dias.....   | 11 |
| 2-3  | Ambiente 7 – exposição de 204 dias – ventilação forçada.....   | 13 |
| 2-4  | Energia residual das alfas – alcance.....  | 14 |
| 2-5  | Montagem com degradador.....   | 15 |
| 2-6  | Ambiente 7 – exposição com degradador.....   | 17 |
| 2-7  | Sanduíche de placas paralelas – corte longitudinal.....  | 19 |
| 2-8  | Ambiente 8 – exposição de 321 dias em sanduíche de placas paralelas.....                               | 20 |
| 2-9  | Ambiente 8 – razão das densidades (com campo/sem campo).....   | 20 |
| 2-10 | Ambiente 7 – exposição de 189 dias em sanduíche de placas paralelas.....                               | 21 |
| 2-11 | Ambiente 3 – exposição de 323 dias em sanduíche de placas paralelas.....                               | 21 |
| 3-1  | Produção de uma fonte de $^{212}\text{Pb}$ .....   | 28 |
| 3-2  | Histograma – detector exposto à fonte de $^{212}\text{Pb}$ .....                                       | 30 |
| 3-3  | Histograma – detector exposto à fonte de $^{212}\text{Pb}$ – degradador de 27,2 g/m <sup>2</sup> ..... | 31 |
| 3-4  | Histograma – detector exposto à fonte de $^{212}\text{Pb}$ – degradador de 54,4 g/m <sup>2</sup> ..... | 31 |
| 3-5  | Uma colméia de colimadores – exposição simultânea de dois detectores.....                              | 32 |
| 3-6  | Uma colméia de colimadores – detalhes.....   | 33 |
| 3-7  | Histograma – CR-39 na parte inferior da colméia.....   | 35 |
| 3-8  | Traços de alfas registrados no detector do topo da colméia.....  | 36 |
| 3-9  | Histograma – CR-39 no topo da colméia.....   | 37 |
| 3-10 | Efeito da restrição no ângulo de incidência pela colméia.....  | 38 |
| 4-1  | Colméia acoplada a uma Gaiola de Faraday.....  | 45 |
| 4-2  | Colméia acoplada a uma Gaiola de Faraday no ambiente 7.....  | 46 |
| 4-3  | Histograma – CR-39 no topo da colméia acoplada à gaiola de Faraday.....                                | 47 |
| 4-4  | Diagrama – produto dos diâmetros X densidade óptica.....   | 48 |
| 4-5  | Histograma – alfas do $^{212}\text{Po}$ e do $^{214}\text{Po}$ .....                                   | 49 |
| 5-1  | Montagem de placas paralelas com labirinto.....  | 55 |

## INTRODUÇÃO:

O nosso objetivo nesta tese é o de buscar características da contaminação do ar em ambientes de convívio humano, produzida pelo isótopo 220 do radônio, utilizando o detector de traços nucleares de estado sólido CR-39.

O estudo da contaminação de ambientes por radônio 222 e filhos é amplo e bem estabelecido. A meia-vida do radônio 222 de 3,8 dias permite que o gás se distribua em todo o volume do ambiente, produzindo uma atividade que pode ser considerada uniforme.

Os filhos gerados pelo decaimento do radônio 222 apresentam geralmente uma atividade uniforme longe das paredes. Somente nas proximidades das paredes a atividade dos filhos é diminuída em virtude do fenômeno do “plate-out”, a deposição dos filhos nas superfícies de paredes e objetos.

Nos ambientes contaminados pelo radônio 220 (meia-vida 55,6 s) a distribuição espacial das atividades de radônio e filhos se modifica drasticamente. A atividade próxima das paredes é em geral mais alta, e não se distribui uniformemente por todo o ambiente.

O trabalho se desenvolveu inicialmente realizando-se exposições preliminares para identificar ambientes que produzissem alta densidade de traços nos detectores instalados em suas paredes.

No capítulo 1 apresentamos esses resultados preliminares, obtidos de exposições de CR-39 em ambientes de convívio humano localizados nas cidades de Vitória e Guarapari, no Estado do Espírito Santo.

No capítulo 2 estudamos mais detalhadamente o comportamento da densidade de traços produzidos nos detectores expostos diretamente às alfas emitidas no ar, em diferentes distâncias das paredes dos ambientes escolhidos. Outra parte dessas exposições foi efetuada com CR-39 recobertos com degradador que impedia o registro de traços de alfas emitidas pelo isótopo 222. E ainda uma terceira forma de expor foi realizada: Os detectores foram instalados entre placas paralelas regularmente espaçadas, ficando expostos apenas a um filme fino de ar. Chamamos essa montagem sanduíche de placas paralelas.

No capítulo 3 buscamos um padrão para identificar os filhos do radônio 220. Com esse objetivo produzimos uma fonte extensa e rarefeita de chumbo 212, o isótopo de maior meia-vida na cadeia do radônio 220. Construimos também um dispositivo, uma colméia de colimadores, que nos permitiu medir a densidade de isótopos depositados na superfície da fonte. Com essa fonte e essa colméia conseguimos determinar a eficiência do CR-39, calculando o ângulo máximo de incidência da radiação alfa que permite o registro do traço no detector.

No capítulo 4 buscamos identificar de forma inequívoca a presença do chumbo 212 no ambiente investigado. Utilizamos a mesma colméia já citada para medir a quantidade de radioisótopos capturados do ar do ambiente, após ultrapassarem os limites de uma Gaiola de Faraday invertida<sup>1</sup>, e depositados em uma janela delgada justaposta à colméia. Obtivemos também neste experimento uma separação dos traços por tamanho e densidade óptica que permite distinguir filhos do <sup>220</sup>Rn de filhos do <sup>222</sup>Rn.

No capítulo 5 apresentamos as perspectivas que temos, inspirados nos resultados até aqui obtidos, de realizar aperfeiçoamentos na metodologia de medição da atividade de radônio (220 e 222) e filhos utilizando CR-39.

---

<sup>1</sup> O campo elétrico é diferente de zero no interior da gaiola, e nulo no exterior da mesma.

# Capítulo 1

## 1-1 Motivação Inicial

É bem conhecida a ocorrência de depósitos litorâneos de areias ilmeníticas e monazíticas<sup>1</sup> na costa dos Estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro. A maior concentração desses depósitos ocorre entre a cidade de Vitória e a foz do rio Itapemirim, bem como na foz do rio Doce [1].

Essas jazidas costeiras já foram muito exploradas em virtude de seu conteúdo em terras raras. Em sua composição se encontra também urânio e tório<sup>2</sup>, sem valor econômico para efeito da exploração desses minerais. Essa ocorrência de urânio e tório é responsável pela radioatividade natural que se verifica nessa região do Estado do Espírito Santo.

Nosso interesse inicial foi dirigido para a cidade de Guarapari, devido às suas praias de areia radioativa. No entanto, foi em Vitória, situada cerca de sessenta quilômetros de Guarapari, que coletamos a quase totalidade dos dados experimentais inseridos nesse trabalho.

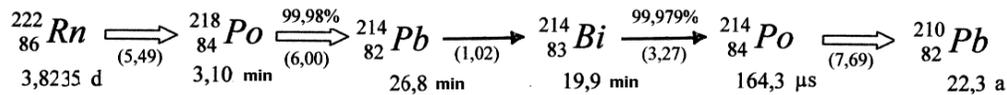
Estamos interessados na contaminação ambiental produzida pelo gás nobre radônio oriundo das cadeias de decaimento radioativo do urânio e do tório. São gerados dois isótopos distintos do radônio, que possuem meias-vidas muito diferentes entre si: O  $^{222}\text{Rn}$  é oriundo da cadeia do urânio 238 e tem meia vida de 3,8235 dias; o  $^{220}\text{Rn}$  é oriundo da cadeia do tório 232 e tem meia vida de 55,6 segundos [2].

As figuras 1-1 e 1-2 representam as duas cadeias de decaimento radioativo, a partir do respectivo isótopo do radônio. A seta dupla representa decaimento  $\alpha$  e a seta simples representa decaimento  $\beta^-$ . Estão representados os tempos correspondentes às meias vidas de cada um dos nuclídeos e, entre parênteses, estão representadas as energias (em MeV) das alfas e betas emitidas [2].

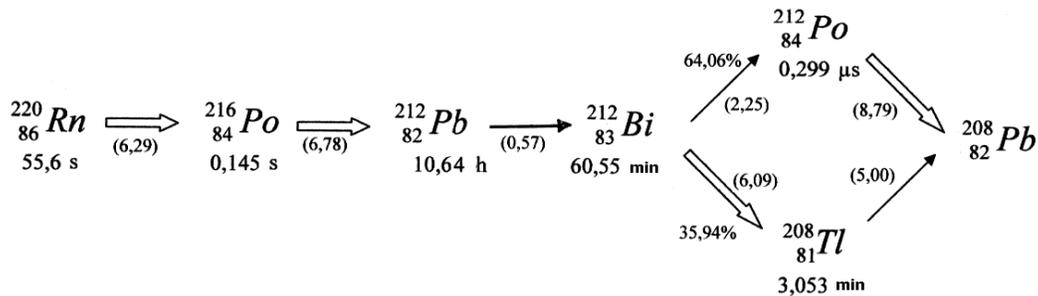
---

<sup>1</sup> Essas areias contêm: óxido de ferro e titânio (ilmeníticas) e fosfato natural de cério, lantânio, tório e outras terras raras (monazíticas)

<sup>2</sup> O tório atinge concentrações de até 5% e o urânio atinge concentrações de partes por milhão [20]



**Figura 1-1:** O  ${}^{222}\text{Rn}$  e seus descendentes até o  ${}^{210}\text{Pb}$ , que pode ser tratado como estável porque tem meia-vida muito maior do que os tempos de exposição dos detectores. O  ${}^{222}\text{Rn}$  é originário da cadeia do decaimento radioativo do  ${}^{238}\text{U}$  (meia-vida =  $4,468 \times 10^9$  anos).



**Figura 1-2:** O  ${}^{220}\text{Rn}$  e seus descendentes até o  ${}^{208}\text{Pb}$  (estável). O  ${}^{220}\text{Rn}$  é originário da cadeia do decaimento radioativo do  ${}^{232}\text{Th}$  (meia-vida =  $1,405 \times 10^{10}$  anos).

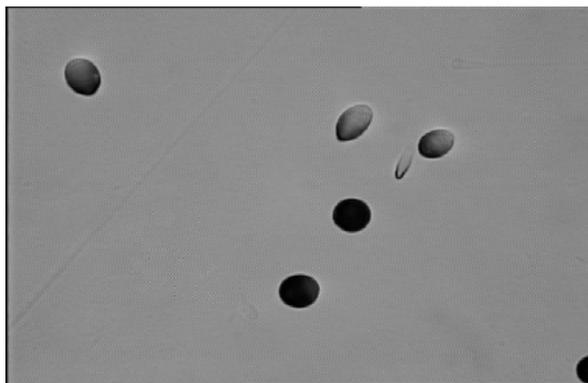
Utilizamos o detector de traços nucleares de estado sólido (SSNTD) CR-39, largamente empregado na medição da atividade de radônio e filhos [21,22]; é um excelente detector de traços de alfas. Trata-se de um polímero de fórmula  $[\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7]_n$  que teve seu uso como SSNTD iniciado no final dos anos 70 [3-4].

Os traços das alfas registrados pelo CR-39 tornam-se visíveis ao microscópio óptico após serem submetidos a um ataque químico adequado. O alargamento nos traços nucleares decorre do ataque químico nos SSNTD; resulta da velocidade da reação ser muito maior na região do traço deixado pela alfa do que no corpo do detector [5-6].

Os nossos detectores foram submetidos a um ataque químico em solução de hidróxido de sódio, concentração 6,25 mol/L, à temperatura de  $70^\circ\text{C}$ , durante 400 minutos.

Os detectores não expostos já apresentam uma densidade de traços mensurável após o ataque químico; esses traços são inevitáveis, eles aparecem em menor quantidade quanto menor for o tempo decorrido entre a fabricação do detector e sua utilização. Essa densidade de traços, dita de “background” é subtraída das contagens dos detectores expostos de forma a se trabalhar apenas com os traços oriundos da atividade alfa presente no ambiente.

A figura 1-3 é uma fotografia colhida no microscópio LEITZ do Laboratório de Cronologia do DRCC, com objetiva 63X, utilizando câmara digitalizadora Sony, Modelo: DXC-107<sup>a</sup> (CCD). Os traços que são vistos nesta imagem foram produzidos pelas alfas do  $^{212}\text{Bi}$  (6,09 MeV) e do  $^{212}\text{Po}$  (8,79 MeV) emitidas a partir de uma fonte de  $^{212}\text{Pb}$ .



**Figura 1-3:** Traços de alfas registrados por detector CR-39. O campo fotografado tem dimensões de 120  $\mu\text{m}$  X 157  $\mu\text{m}$ . Os traços foram produzidos pelas alfas do  $^{212}\text{Bi}$  (6,09 MeV) e do  $^{212}\text{Po}$  (8,79 MeV) emitidas a partir de uma fonte de  $^{212}\text{Pb}$  sobreposta ao detector.

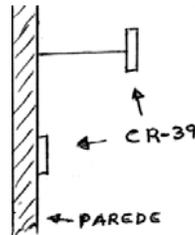
Utilizamos o CR-39 na forma de placas planas, com espessuras de 0,50 mm e de 0,75 mm fabricado por duas empresas britânicas (Pershore Moldings e Track Analysis Systems). Essas placas podem ser cortadas nos tamanhos convenientes a cada experimento.

Os detectores utilizados nesse trabalho foram cortados em lâminas de no máximo 9  $\text{cm}^2$  (um quadrado de lado = 3 cm) e no mínimo 4  $\text{cm}^2$  (um quadrado de lado = 2 cm). Foram expostos nos ambientes basicamente de duas formas:

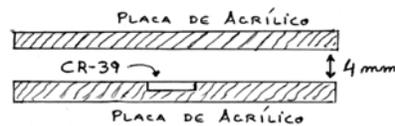
I – *Na geometria 2II:* o detector é fixado à parede ou a uma certa distância da parede e são contados ou medidos os traços das alfas registrados na face voltada para o ambiente. Vide figura 1-4.

II – *Na geometria de placas paralelas:* o detector é instalado no interior de uma montagem constituída de duas placas de acrílico paralelas entre si, e são contados ou medidos os traços registrados na face voltada para a camada de ar delimitada pelas placas de acrílico. Vide figura 1-5. Essa montagem permite medir a atividade do  $^{222}\text{Rn}$  [7] porque os filhos provenientes do ambiente ficam retidos na entrada da montagem em virtude do

fenômeno do “plate-out” [13].



**Figura 1-4:** Na geometria 2Π observamos os traços das alfas oriundas do semi-espço à frente do detector. As alfas se movem no sentido do ambiente para a parede e atingem a superfície do detector. Os dois detectores representados na figura ilustram uma exposição em diferentes distâncias de uma parede.

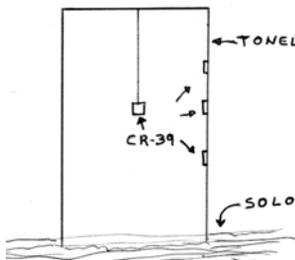


**Figura 1-5:** Na geometria de placas paralelas o detector registra as alfas emitidas no interior de uma camada estreita de ar, delimitada por placas de acrílico, grandes o suficiente para que os filhos do radônio não alcancem o detector CR-39 instalado no centro da montagem. Temos utilizado placas quadradas com dimensão de aproximadamente 15 cm X 15 cm. Geralmente se inclui um detector externamente à montagem, no centro da face de uma das placas de acrílico, com a finalidade de registrar em geometria 2Π a atividade alfa no ar do ambiente.

## 1-2 Exposições Preliminares em Vitória e Guarapari

Apresentamos aqui as densidades de traços registrados diariamente em detectores CR-39 expostos na geometria 2Π, junto à parede em diversos ambientes de convívio ou de trabalho nas cidades de Vitória e Guarapari.

Incluimos também uma exposição de detectores CR-39, na mesma geometria 2Π, no interior de um tonel (figura 1-6) de volume 200 litros, feito de metal, instalado em ambiente externo entre dois laboratórios do Departamento de Física – UFES, com a boca aberta voltada para o solo.



**Figura 1-6:** Na parede vertical do tonel de 200 litros (altura 82 cm, diâmetro da base 56 cm, feito de metal) instalamos três detectores, distantes do solo 32 cm, 50 cm e 67 cm. Instalamos ainda um detector dependurado por um fio, que ficou distante 48 cm do solo.

## Resultado das Exposições Preliminares

Densidade líquida diária de traços/cm<sup>2</sup> registrada em detectores CR-39 expostos junto da parede, na geometria 2II, em diversos ambientes aqui enumerados de 1 a 9:

**Ambiente 1** Vitória, Praia do Canto, exposição de 445 dias, em apartamento, primeiro andar: ..... $\rho_{\text{diário}} = 2,02 \pm 0,23$

**Ambiente 2** Guarapari, Praia das Castanheiras, exposição (\*) de 267 dias no andar térreo, em dois hotéis.

Recepção do Hotel 1: ..... $\rho_{\text{diário}} = 2,50 \pm 0,38$

Recepção do Hotel 2: ..... $\rho_{\text{diário}} = 1,93 \pm 0,32$

**Ambiente 3** Vitória, Jucutuquara, exposição (\*) de 207 dias, em apartamento, primeiro andar: .....  $\rho_{\text{diário}} = 2,5 \pm 0,3$

**Ambiente 4** Vitória, Departamento de Física, exposição de 445 dias, em laboratório no andar térreo: ..... $\rho_{\text{diário}} = 2,99 \pm 0,31$

**Ambiente 5** Vitória, Bairro de Lourdes, exposição (\*) de 204 dias, em apartamento, segundo andar: ..... $\rho_{\text{diário}} = 11,4 \pm 0,6$

**Ambiente 6** Guarapari, Praia do Morro, exposição de 132 dias, em apartamento, andar térreo: ..... $\rho_{\text{diário}} = 25,7 \pm 1,6$

**Ambiente 7** Vitória, Camburi, exposição de 211 dias, apartamento no 3<sup>o</sup> andar de edifício residencial: ..... $\rho_{\text{diário}} = 41,9 \pm 1,0$

**Ambiente 8** Vitória, Departamento de Física, exposição de 120 dias, em sala de trabalho no andar térreo: .....  $\rho_{\text{diário}} = 50,0 \pm 2,0$

**Ambiente 9** Vitória, interior do tonel de 200 litros, exposição de 64 dias em área externa dos laboratórios do Departamento de Física.

Detectores na parede vertical:..... $\rho_{\text{diário}} = 1150 \pm 55$

Detector suspenso: ..... $\rho_{\text{diário}} = 2200 \pm 85$

(\*) Nos experimentos assinalados os detectores foram instalados sobre placas de acrílico quadradas com 15 cm de lado, fixadas junto à parede do ambiente (detector externo na montagem de placas paralelas).

Os resultados preliminares mais significativos foram encontrados na cidade de Vitória. Encontramos um fator 25 entre a menor e a maior densidade diária traços medida em ambiente de convívio; esse fator chega a 10<sup>3</sup> se incluirmos os detectores instalados no

interior do tonel de 200 litros emborcado sobre o solo.

O resultado obtido com os detectores do interior do tonel (figura 1-6) não será explorado nesse trabalho. Fica a observação de que a atividade alfa registrada pelos detectores instalados no interior do tonel resulta da emissão de radônio do solo, originalmente um mangue que recebeu terra adequada para correção do terreno e para jardinagem.

Estamos interessados na contaminação do ar por radônio e filhos em ambientes de convívio humano. Vamos examinar, nos próximos capítulos, com maior detalhamento a contaminação do ar nos ambientes em que encontramos as maiores densidades de traços entre os resultados preliminares, os de números 7 e 8:

**Ambiente 7** - Um apartamento no 3<sup>o</sup> andar de edifício residencial situado na região de Camburi, zona norte de Vitória-ES.

**Ambiente 8** - Uma sala de trabalho no Departamento de Física, Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Goiabeiras.

Os ambientes escolhidos são os que apresentam de forma marcante a contaminação simultânea por radônio e filhos provenientes das duas cadeias, i.e., do Urânio (o  $^{222}\text{Rn}$ ) e do Tório (o  $^{220}\text{Rn}$ ).

Quanto aos demais ambientes serão abordados apenas dois deles, os ambientes 1 e 3, para efeito de comparação da distribuição espacial da atividade do radônio e filhos nas proximidades das paredes dos diferentes ambientes investigados.

Utilizamos detectores CR-39 instalados no interior de montagens como a ilustrada na Figura 1-5 para medir a atividade do  $^{222}\text{Rn}$  [7]. Essas montagens têm sido utilizadas pelo Grupo de Cronologia do DRCC do IFGW para medição da atividade do  $^{222}\text{Rn}$ . Já receberam modificações fechando-se as aberturas laterais, e deixando apenas um orifício para entrada do radônio [8].

As dimensões adotadas para as placas são escolhidas de forma que os filhos do radônio não alcancem a região central, onde se instala o detector CR-39. Os filhos grudam nas faces paralelas internas, próximo ao orifício de entrada, devido à pequena distância entre as placas (4 mm).

Veremos no próximo capítulo que a ocorrência do  $^{220}\text{Rn}$  simultânea com o  $^{222}\text{Rn}$  pode levar a erro na medição da atividade do isótopo 222. A meia-vida de 55,6 segundos não é suficientemente curta para impedir que o  $^{220}\text{Rn}$  alcance o detector CR-39, fixado no interior da montagem da figura 1-5.

O radônio não gruda nas paredes da montagem de placas paralelas porque é um gás nobre. Se a montagem for instalada próximo da parede de onde emana o  $^{220}\text{Rn}$ , ou se houver circulação forçada do ar do ambiente que arraste o isótopo 220, este pode alcançar o detector CR-39 instalado no interior da montagem, acrescentando traços de alfas.

Utilizamos neste trabalho duas formas de medir os traços de alfas nos detectores.

A forma mais simples de medição de traços consiste em contar os traços visíveis dentro de um retículo instalado na ocular de um microscópio.

A outra forma consiste em colher as imagens no microscópio Leitz com câmara acoplada, gravar essas imagens e posteriormente medir esses traços utilizando o programa CRTRAN<sup>3</sup>.

Com o programa CRTRAN obtém-se: diâmetro menor, diâmetro maior, produto dos diâmetros, área, razão dos diâmetros, perímetro, nível de cinza e densidade óptica. O programa cria um arquivo com esses dados.

A análise dos dados foi efetuada utilizando o software Microcal Origin disponível nos computadores do IFGW.

---

<sup>3</sup> Programa elaborado por Dr. Sergio Roberto de Paulo

## Capítulo 2

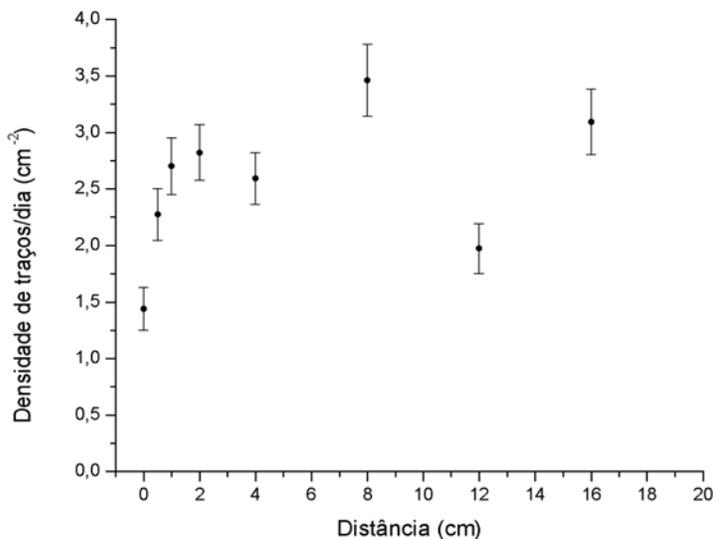
### 2-1 Distribuição Espacial da Atividade do Radônio e Filhos

Os resultados que apresentamos a seguir foram obtidos em longas exposições de detectores CR-39 na geometria 2Π, nos ambientes 1 e 8 identificados previamente no capítulo 1. São os ambientes de convívio que apresentaram respectivamente a menor e a maior densidade diária de traços dentre os resultados preliminares vistos no capítulo 1.

Os detectores foram instalados em diferentes distâncias da parede, fixados por arame conforme ilustra a figura 1-4. Todos os detectores de um mesmo ambiente foram expostos simultaneamente.

A distribuição espacial das densidades de traços registrada no ambiente 1, representada na figura 2-1, é semelhante à que se encontra nos ambientes sujeitos exclusivamente à contaminação por  $^{222}\text{Rn}$  e filhos [7, 9].

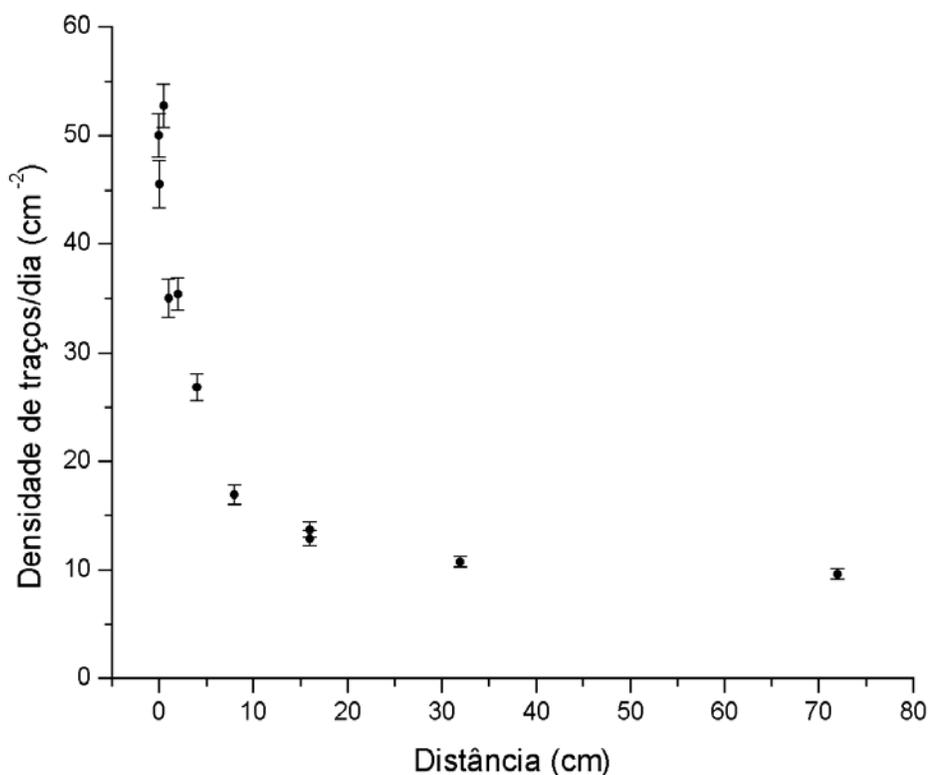
A densidade de traços cresce à medida que aumenta a distância do detector à parede, e se estabiliza a cerca de três a quatro centímetros de distância da parede (DME – distância média efetiva). Esse comportamento se verifica mesmo em condições de ventilação forçada, com um ventilador movimentando o ar de encontro aos detectores [10].



**Figura 2-1:** (Ambiente 1) Densidades diárias de traços obtidas pela exposição simultânea de 8 detectores CR-39 fixados em diversas distâncias de uma parede em apartamento localizado no segundo piso de edifício residencial no bairro Praia do Canto, Vitória-ES. O tempo de exposição foi de 507 dias, na geometria 2Π.

A figura 2-2 mostra a distribuição espacial das densidades de traços registradas no ambiente 8. Aqui a densidade de traços nos detectores instalados junto à parede é cerca de trinta vezes maior do que a densidade encontrada no ambiente 1 à mesma distância zero da parede. Porém a densidade de traços diminui muito rapidamente à medida que os detectores ficam mais afastados da parede.

Temos nesse ambiente uma evidência clara da contaminação por  $^{220}\text{Rn}$ . O gás constituído pelos isótopos 220 do radônio emana da parede e decai nas proximidades dessa parede emitindo alfas de 6,3 MeV. O isótopo resultante desse decaimento é o  $^{216}\text{Po}$  que tem meia-vida de 0,145 s e emite alfa de 6,8 MeV.



**Figura 2-2** (Ambiente 8) Densidade diária de traços, medida em diferentes distâncias de uma parede em sala de trabalho no Departamento de Física, UFES, Vitória-ES. Os tempos de exposição envolvidos são 356 dias (distâncias 0 cm, 16 cm, 32 cm e 72 cm) e 120 dias (demais distâncias, incluindo 0 cm e 16 cm repetidas), na geometria 2II.

O próximo descendente na cadeia é o  $^{212}\text{Pb}$  que decai por emissão beta, e não deixa registro no detector CR-39. Além disso tem meia-vida de 10,64 horas e tem, portanto, grande probabilidade de aderir às paredes e à superfície dos objetos presentes no ambiente, antes de decair, gerando o  $^{212}\text{Bi}$ .

O  $^{212}\text{Bi}$  tem meia-vida de 60,55 minutos e pode emitir uma alfa de 6,1 MeV (36%) ou se transformar por emissão beta (64%) em  $^{212}\text{Po}$ , que decai imediatamente ( $0,3\mu\text{s}$ ) emitindo uma alfa de 8,8 MeV. São essas alfas de 8,8 MeV que vão permitir identificar a presença do  $^{212}\text{Pb}$  e do  $^{212}\text{Bi}$  no ar do ambiente.

O ambiente 7 nos permitiu levantar a distribuição espacial da densidade de traços nos detectores em duas condições muito diferentes de ventilação. A figura 2-3 (a) mostra a distribuição espacial da densidade de traços que se obteve mantendo-se o ambiente com pouca ventilação: janela fechada e a porta aberta. A figura 2-3 (b) mostra a distribuição espacial da densidade de traços obtida quando a ventilação do ambiente é forçada: janela aberta durante o dia, fechada à noite com um ventilador no teto funcionando no sentido reverso, forçando a circulação do ar no interior do ambiente.

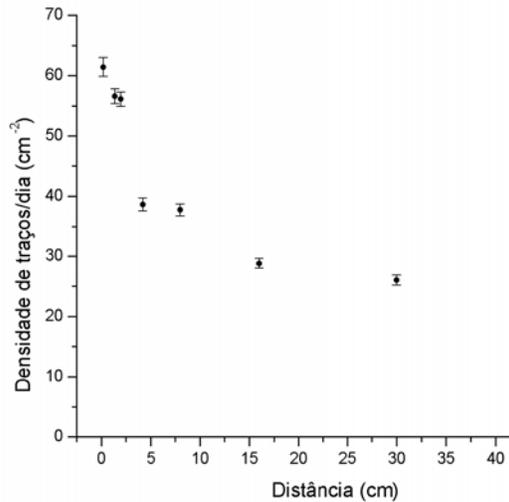
A ventilação interna forçada alterou a distribuição espacial da densidade de traços dos detectores, o que não ocorre de forma tão marcante em ambientes contaminados apenas por  $^{222}\text{Rn}$ . O isótopo 220 foi arrastado das vizinhanças das paredes e teto e distribuiu-se por todo o ambiente, por consequência alterando a distribuição de seus descendentes.

Isso fica mais evidente quando consideramos as densidades de traços obtidas no detector instalado no interior de montagem de placas paralelas, fechada, com orifício para entrada do radônio. Uma montagem foi instalada junto da parede e outra no centro do ambiente. Os tempos de exposição foram 211 dias no caso (a) e 208 dias no caso (b).

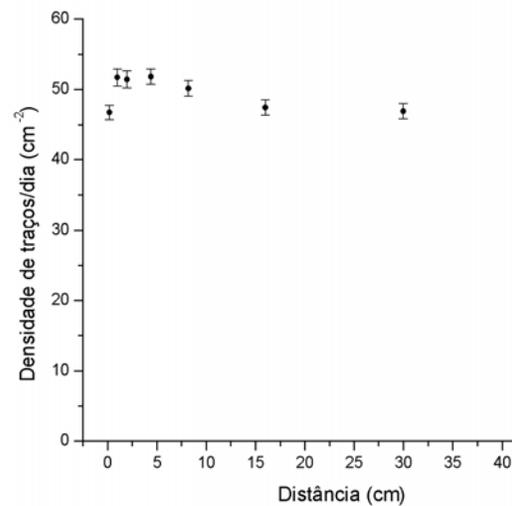
Os resultados para a densidade diária de traços por  $\text{cm}^2$  foram:

$$\text{Ambiente 7 (a)} \quad \rho_{\text{junto da parede}} = 0,95 \pm 0,15 \quad \rho_{\text{centro}} = 0,66 \pm 0,11$$

$$\text{Ambiente 7 (b)} \quad \rho_{\text{junto da parede}} = 1,06 \pm 0,16 \quad \rho_{\text{centro}} = 1,19 \pm 0,16$$



(a)



(b)

**Figura 2-3** (Ambiente 7) Os dados que resultaram nos gráficos (a) e (b) foram obtidos em 204 dias de exposição na geometria 2Π. Os dados foram colhidos em dois ambientes idênticos de um mesmo apartamento no terceiro andar de edifício residencial em bairro da zona norte de Vitória. No ambiente (a) houve pouca ventilação durante o período que durou a exposição dos detectores, a janela permaneceu fechada. No ambiente (b) o ventilador de teto permaneceu ligado durante todas as noites, girando no sentido reverso, e a janela foi mantida aberta durante o dia.

A montagem de placas paralelas fechada, mas com orifício para entrada do radônio, não permite correntes internas de ar. O radônio <sup>222</sup>Rn preenche a cavidade por difusão. No caso do ambiente (a) obtivemos  $\rho_{\text{junto da parede}}$  ligeiramente maior do que  $\rho_{\text{centro}}$  sugerindo que o isótopo <sup>220</sup>Rn do radônio alcance o detector CR-39 instalado no interior da montagem junto da parede.

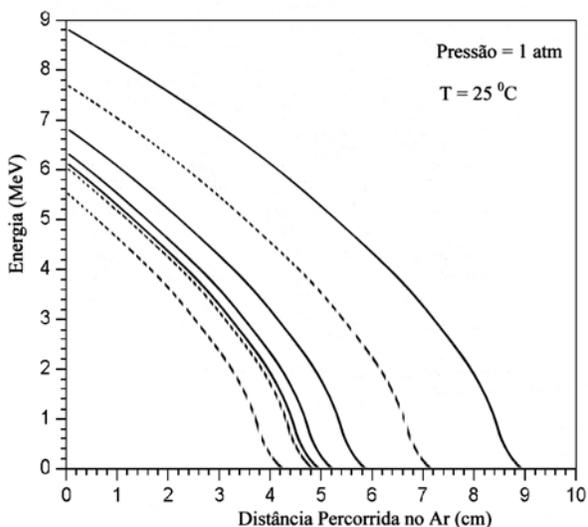
No caso (b) ocorreu concordância entre  $\rho_{\text{junto da parede}}$  e  $\rho_{\text{centro}}$ . Esse resultado nos permite interpretar que o isótopo <sup>220</sup>Rn foi arrastado pela circulação forçada do ar do ambiente, e alcançou o detector CR-39 nas duas montagens, i.e., junto da parede e no centro do ambiente. A medição da atividade do <sup>222</sup>Rn no ar apresenta resultados não confiáveis se essa montagem for utilizada em ambientes contaminados simultaneamente pelo <sup>220</sup>Rn.

## Distribuição Espacial com Degradador Acoplado ao Detector

Os detectores CR-39 utilizados nos experimentos que resultaram nas figuras 2-1 a 2-3 foram expostos diretamente à radiação alfa proveniente do ar do ambiente. As alfas depositam no detector a energia cinética que resta após percorrer a distância que separa o emissor da superfície do detector. Uma parte dos traços registrados foi produzida por alfas emitidas por filhos do radônio que aderiram à superfície do detector.

Nas proximidades da parede os detectores registram alfas provenientes de todos os emissores, das duas cadeias. À medida que nos afastamos da parede, nos ambientes com pouca ventilação, o  $^{220}\text{Rn}$  e o  $^{216}\text{Po}$  desaparecem e não contribuem mais para a densidade de traços.

A figura 2-4 ilustra a perda de energia das alfas no ar, à pressão de 1 atmosfera e temperatura de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . As curvas representam a energia residual (MeV) da partícula alfa a partir do ponto em que essa foi emitida até a distância representada na abscissa (cm).



**Figura 2-4:** Energia residual das alfas em função da distância percorrida no ar a partir do ponto em que são emitidas.

As curvas cheias se referem à cadeia do  $^{220}\text{Rn}$  e filhos e as curvas tracejadas a cadeia do  $^{222}\text{Rn}$  e filhos.

As três curvas tracejadas se referem às alfas emitidas por  $^{222}\text{Rn}$  (5,5 MeV),  $^{218}\text{Po}$  (6,0 MeV) e  $^{214}\text{Po}$  (7,7 MeV).

As quatro curvas cheias se referem às alfas emitidas por 36% do  $^{212}\text{Bi}$  (6,1 MeV),  $^{220}\text{Rn}$  (6,3 MeV),  $^{216}\text{Po}$  (6,8 MeV),  $^{212}\text{Po}$  (8,8 MeV, 64% do  $^{212}\text{Bi}$ ).

Bethe e Ashkin (1955) [11]

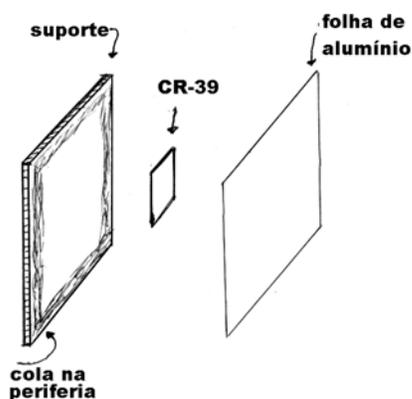
Os dados originais que permitiram construir essas curvas são de Bethe e Ashkin e valem para a temperatura de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pressão de 1 atmosfera, representando o alcance da partícula alfa em função de sua energia inicial [11].

Os dados originais foram corrigidos para a temperatura de 25 °C e a representação gráfica foi modificada para energia residual em função da distância percorrida [7]. A correção do alcance R das alfas no ar para temperaturas T diferentes, mas próximas da temperatura original de 15 °C, é linear com a temperatura absoluta se for mantida a pressão original [7,12]. Vide equação 2-1, onde T deve estar representada em °C.

$$R(T) = R(15) \frac{273 + T}{273 + 15} \quad (2-1)$$

Em outro experimento utilizamos degradadores acoplados aos detectores CR-39 (figura 2-5) expostos na geometria 2Π em diferentes distâncias da parede no apartamento do terceiro andar do edifício residencial, região de Camburi (ambiente 7). Os resultados dessa exposição estão na figura 2-6 (a, b, c, d); os histogramas representam o número de traços redondos, com a razão dos diâmetros menor do que 1,100.

Utilizamos degradadores de 27,2 g/m<sup>2</sup> e de 54,4 g/m<sup>2</sup> recortados de folha de alumínio<sup>1</sup> encontrada no comércio de produtos domésticos.



**Figura 2-5:** Montagem com degradador. O detector CR-39 foi encerrado em um envelope conforme mostra a figura: a folha de alumínio ficou colada ao suporte pela borda. O suporte é constituído por uma lâmina de plástico semi-rígido de espessura 0,5 mm e dimensões de 4,5 cm X 6,5 cm. O detector tem dimensões de 2,0 cm X 2,5 cm.

O degradador com densidade 54,4 g/m<sup>2</sup> bloqueia a chegada das alfas do <sup>222</sup>Rn ao detector. A densidade de 54,4 g/m<sup>2</sup> equivale a 4,6 cm de ar à pressão de 1 atmosfera e

<sup>1</sup> Utilizamos folha alumínio de uma amostra previamente testada no laboratório de Cronologia quanto ao baixo teor de urânio.

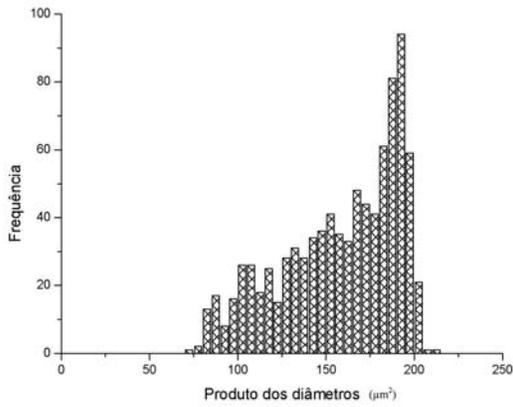
temperatura de 25 °C. A figura 2-4 mostra que a alfa do  $^{222}\text{Rn}$  percorre no ar apenas 4,2 cm até perder toda a sua energia inicial.

Na figura 2-6 (a) estão os resultados do detector instalado diretamente sobre a parede. Nessa distância é alta a atividade do  $^{220}\text{Rn}$  e do  $^{216}\text{Po}$ . As alfas que eles emitem nas proximidades do detector, com energias de 6,3 MeV e 6,8 MeV, atravessam o degradador e chegam até o CR-39. O resultado é um histograma largo, sem picos evidentes.

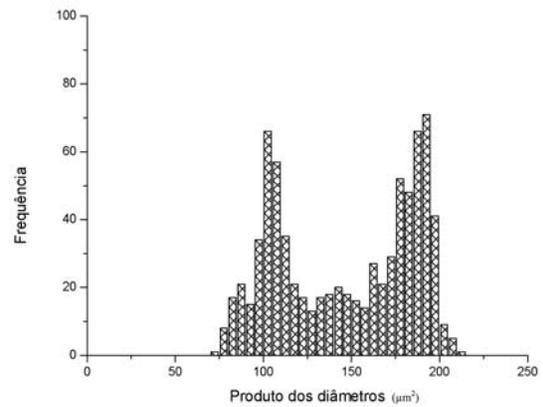
As figuras 2-6 (b), (c) e (d) referentes às distâncias de 20 cm, 36 cm e 68 cm da parede mostram claramente dois picos. Tendo em mente que os menores produtos dos diâmetros correspondem às maiores energias das alfas incidentes no detector e que os filhos se depositam no detector, os tamanhos dos traços estariam associados da esquerda para a direita, às alfas do  $^{212}\text{Po}$  (8,8 MeV, 64%),  $^{214}\text{Po}$  (7,7 MeV),  $^{216}\text{Po}$  (6,8 MeV) e misturadas no pico da direita os traços das alfas do  $^{220}\text{Rn}$  (6,3 MeV) do  $^{212}\text{Bi}$  (6,1 MeV, 36%) e do  $^{218}\text{Po}$  (6,0 MeV). As alfas do  $^{222}\text{Rn}$  (5,5 MeV) são bloqueadas pelo degradador.

A figura 2-6 (d) corresponde à distância de 68 cm da parede. Seguindo o mesmo raciocínio do parágrafo anterior devemos esperar que tenha desaparecido a contribuição do  $^{216}\text{Po}$  (6,8 MeV) bem como do  $^{220}\text{Rn}$  (6,3 MeV) restando três energias distintas. Nessa distância, no ambiente sem ventilação o detector com degradador de 54,4 g/m<sup>2</sup> ficou exposto apenas às alfas emitidas pelos filhos dos dois isótopos do radônio presentes na vizinhança:  $^{212}\text{Po}$  (8,8 MeV, 64%),  $^{214}\text{Po}$  (7,7 MeV) e  $^{212}\text{Bi}$  (6,1 MeV, 36%) junto com  $^{218}\text{Po}$  (6,0 MeV). Esperamos encontrar três picos nessas condições de ventilação.

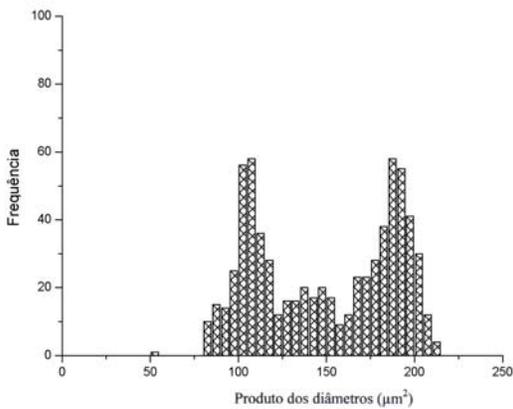
Não obteríamos picos nesses histogramas se todas as emissões viessem do ar para o detector. Os picos indicam energias bem definidas que só podem ser obtidas nas emissões produzidas diretamente sobre o detector (neste caso sobre o degradador), decorrente da deposição dos filhos do radônio na superfície desse detector.



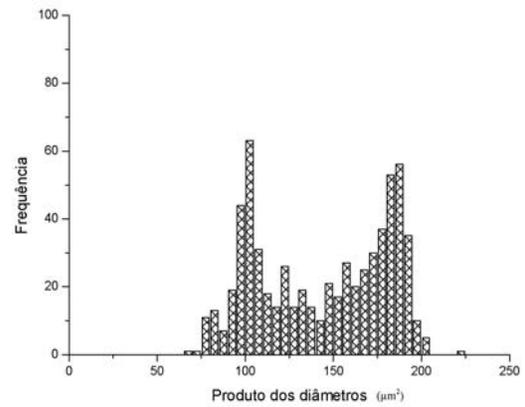
(a) Distância à parede = 0,0 cm



(b) Distância à parede = 20,0 cm



(c) Distância à parede = 36,0 cm



(d) Distância à parede = 68,0 cm

**Figura 2-6:** Exposição de 154,5 dias, com degradador de 54,4 g/m<sup>2</sup> na geometria 2Π no apartamento, no 3<sup>o</sup> andar, edifício residencial na zona norte de Vitória (Ambiente 7). A porta e janela foram mantidas fechadas durante o período da exposição.

## 2-2 Sanduíche de Placas Paralelas – Atividade do $^{220}\text{Rn}$ Próximo da Parede

Os experimentos que apresentamos nesta seção (vide figura 2-7) foram realizados com o intuito de obter informação sobre a dependência da atividade do  $^{220}\text{Rn}$  com a distância, à medida que se afasta o detector da parede. Os detectores foram expostos no interior de montagens de placas paralelas como a da figura 1-5, porém reduzidas em tamanho para que uma fração apreciável do isótopo 220 (55,6 s) pudesse alcançar o CR-39 instalado no interior da montagem<sup>1</sup>.

As montagens utilizadas para medir  $^{222}\text{Rn}$  são feitas com placas quadradas de dimensão 15 cm X 15 cm; são suficientemente grandes para que os filhos do radônio sejam capturados via “plate-out” na entrada, e não alcancem o detector.

Reduzir essas dimensões implica permitir que alfas emitidas pelos filhos sejam registradas porque uma fração destes filhos chegaria até o CR-39. Para reduzir a entrada dos filhos aplicamos um campo elétrico nas aberturas da montagem, conforme mostra a figura 2-6, com o objetivo de reter os íons que aí chegam. Estamos considerando que o radônio não fica retido (ainda que possa se ionizar) porque não estabelece ligação química com o metal dos eletrodos instalados na entrada.

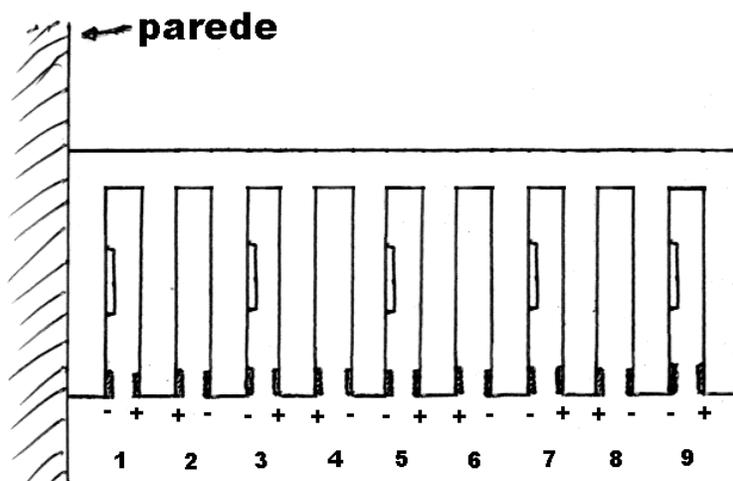
Sabemos que os filhos do radônio ficam positivos no ar. Essa característica já foi explorada com o objetivo de reduzir a atividade dos filhos no ar instalando-se, no interior do ambiente, fios condutores e carregando-os negativamente [14]. A concentração do radônio 222 nesse experimento era bastante alta (cerca de  $10^5 \text{ Bq/m}^3$ ) se comparada com as concentrações típicas de ambientes de convívio humano ( $10^2 \text{ Bq/m}^3$ ).

Outro experimento realizado em laboratório, envolvendo concentrações ainda mais altas ( $10^7$  a  $10^{10} \text{ Bq/m}^3$ ) de radônio 220 obtido de uma fonte de tório 228, mostrou que 85-88% dos átomos de  $^{212}\text{Pb}$  estão carregados positivamente quando formados [15].

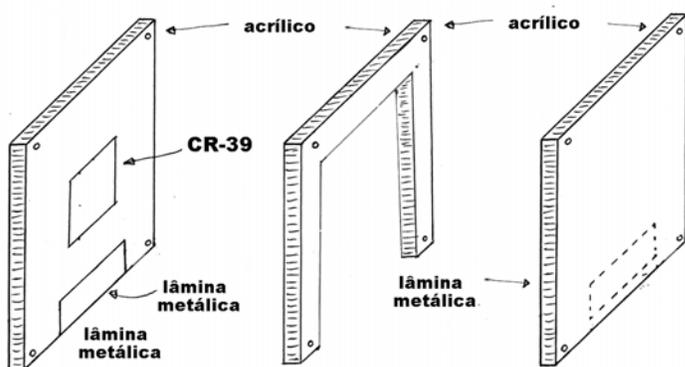
---

<sup>1</sup> Reduzindo-se as dimensões das placas, que delimitam um filme fino de ar, diminui a distância a ser percorrida pelo  $^{220}\text{Rn}$ , difundindo-se no interior da montagem, até alcançar o detector instalado no centro.

Espera-se que concentrações elevadas de radônio favoreçam o aparecimento de filhos com carga negativa<sup>2</sup>. Os filhos ficam positivos ou neutros em condições de baixa concentração de radônio.



**Figura 2-7 (a)** Sanduíche de placas paralelas. Corte longitudinal. As cavidades delimitam uma camada estreita de ar; estão numeradas de 1 a 9. As cavidades 1, 3, 5, 7 e 9 mostram em seu interior o detector CR-39 instalado. As aberturas têm dimensões 3,0 mm X 5,0 cm, já descontada a espessura das duas chapas metálicas que formam os eletrodos. A tensão aplicada foi fornecida por bateria de 9 V.



**Figura 2-7 (b)** Sanduíche de placas paralelas. Construção de um elemento. As placas de acrílico são quadradas (7,0 X 7,0 cm) e têm espessura de 3,80 mm. A lâmina metálica retangular (1,0 X 5,0 cm) tem espessura de 0,40 mm. O separador em forma de U é feito do mesmo acrílico; tem largura de 1,0 cm. No centro da placa da esquerda instala-se o detector CR-39.

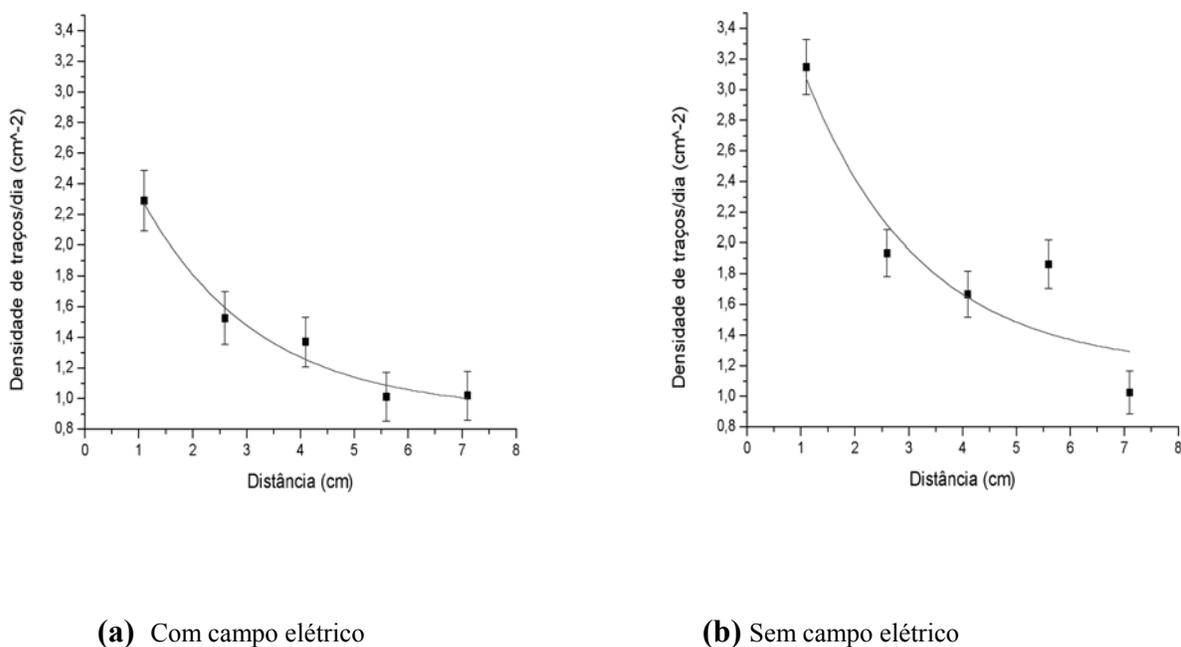
<sup>2</sup> O autor desse comentário, N. Jonassen [14], não esclareceu porque esperava encontrar íons negativos em grandes concentrações de radônio, mas que em baixas concentrações ocorrem apenas íons positivos.

O incremento na distância à parede entre as sucessivas cavidades da figura 2-7 (a) ficou previamente fixado pela espessura de 3,80 mm das placas de acrílico. A separação entre as cavidades com CR-39 instalado (1, 3, 5, 7 e 9) cresce em incrementos de 15,2 mm.

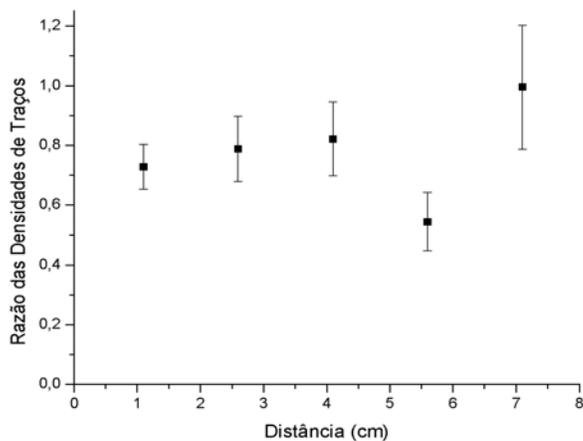
Montagens como as da figura 2-7 foram instaladas nos ambientes 7 e 8 em condições de pouca ventilação. Foram instaladas duas montagens no ambiente 8: uma com tensão aplicada e outra de referência, sem tensão aplicada.

As figuras 2-7 (a) e (b) mostram a dependência da densidade diária de traços com a distância do centro da abertura das cavidades à parede, encontrada no ambiente 8 utilizando-se CR-39 exposto em sanduíche de placas paralelas. As tensões aplicadas foram 9 V em (a) e zero V em (b). O tempo de exposição foi 321 dias.

Encontramos densidades de traços menores nas montagens com tensão diferente de zero na abertura das cavidades. A figura 2-9 ilustra o efeito produzido pelo campo elétrico, bloqueando a entrada de filhos carregados eletricamente.



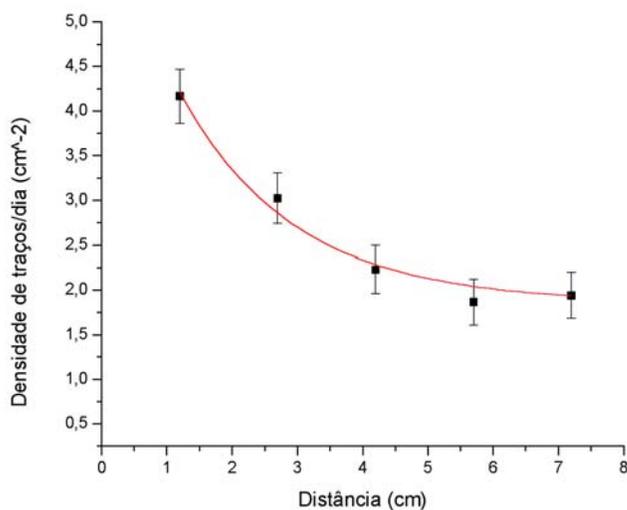
**Figura 2-8:** (Ambiente 8) Exposição de 321 dias de detectores CR-39 em montagens sanduíche de placas paralelas, efetuada em sala de trabalho do Departamento de Física – UFES. A figura da direita mostra maior densidade de traços do que a figura da esquerda, para cada distância do detector à parede. A razão das densidades de traços obtidas na montagem com campo (9 V) e sem campo está representada na figura 2-8.



**Figura 2-9:** (Ambiente 8)

Razão entre a densidade de traços encontrada para cada distância do detector à parede, na montagem com campo elétrico, e a correspondente densidade de traços na montagem sem campo elétrico.

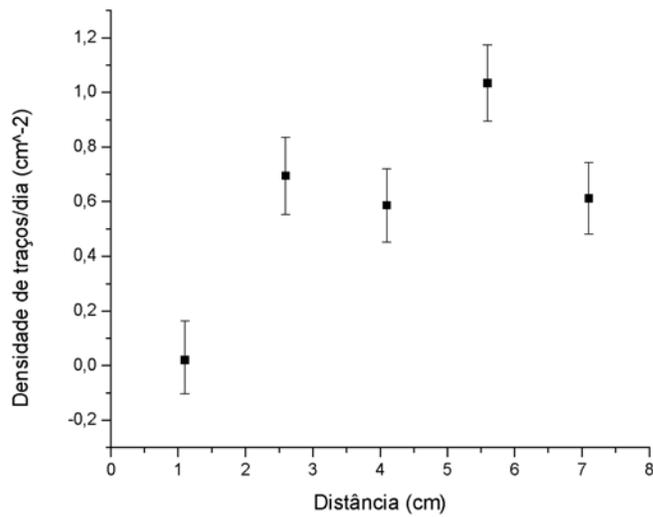
Apresentamos a seguir mais dois resultados de exposições de detectores CR-39 em montagens de sanduíche de placas paralelas com tensão aplicada, sendo um deles no ambiente 7 e o outro no ambiente 3 que não apresentou evidência de contaminação por radônio 220, para efeito de comparação com os ambientes 7 e 8 anteriores. Vide figuras 2-10 e 2-11.



**Figura 2-10:** (Ambiente 7)

Exposição de 189 dias realizada com montagem de sanduíche de placas paralelas, no apartamento do 3<sup>o</sup> andar do edifício residencial em bairro da zona norte de Vitória.

A tensão aplicada nas aberturas de entrada das cavidades foi 9 V.



**Figura 2-11:** (Ambiente 3) Exposição de 323 dias em apartamento no primeiro andar de edifício residencial em bairro próximo ao centro de Vitória. A densidade diária de traços é menor do que a encontrada nos ambientes 7 e 8 e sua dependência com a distância da parede não indica a presença do radônio 220 nesse ambiente.

A tensão aplicada foi 9 V, na abertura das cavidades.

As densidades de traços, em função da distância dos detectores à parede, obtidas nas medições realizadas nos ambientes 7 e 8 com tensão aplicada se ajustam bem a uma curva do tipo exponencial decrescente somada com uma constante. Vide equação (2-2).

$$\rho = \rho_{222} + \rho_{220} e^{-\frac{x}{l}} \quad (2-2)$$

A constante ( $\rho_{222}$ ) é a densidade diária dos traços produzidos pela atividade do radônio 222 e filhos em equilíbrio de atividades no interior da cavidade; os traços pré-existent nos detectores (background) já foram descontados no cálculo da densidade diária.

O segundo termo do lado direito da equação (2-2) é proporcional à atividade do radônio 220 na entrada de cada cavidade do sanduíche de placas paralelas. Esse termo mede a densidade diária de traços produzidos pelo  $^{220}\text{Rn}$  no detector contido na cavidade que se encontra à distância  $x$  da parede.

O parâmetro  $l$  representa o alcance médio do  $^{220}\text{Rn}$  por difusão antes de decair. Esse parâmetro está relacionado com as constantes de decaimento ( $\lambda$ ) e de difusão ( $D$ ) do  $^{220}\text{Rn}$ :

$$l = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (2-3)$$

A equação de difusão [15] para o radônio 220 na direção  $z$  perpendicular à parede, recebe o acréscimo de um termo de decaimento na forma  $\lambda n$ , sendo  $n$  a concentração do  $^{220}\text{Rn}$  na posição  $z$ :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} - \lambda n \quad (2-4)$$

Estamos admitindo que o radônio 220 emana a uma taxa constante da parede onde instalamos o sanduíche de placas paralelas e portanto o lado esquerdo da equação (2-4) se anula. O segundo termo no lado direito da equação é a atividade ( $A$ ) do  $^{220}\text{Rn}$ . A equação assume então a forma:

$$\frac{D}{\lambda} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - A = 0 \quad (2-5)$$

que admite uma solução em forma de exponencial decrescente:

$$A = C e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}} z} \quad (2-6)$$

O valor para o coeficiente de difusão dos filhos do radônio livres é  $D = 0,054 \text{ cm}^2/\text{s}$ , bem aceito [17] mas está sujeito às condições do ambiente como a umidade do ar [13]. Se adotarmos o mesmo valor  $D = 0,054 \text{ cm}^2/\text{s}$  também para o  $^{220}\text{Rn}$ , e substituirmos  $\lambda$  por  $[\ln(2)/55,6\text{s}]$  na equação (2-3), obteremos  $l = 2,08 \text{ cm}$ .

Contudo o movimento do ar próximo das paredes do ambiente pode impedir que o valor de  $l$  obtido dos dados experimentais mediante o ajuste dos parâmetros da equação (2-2) seja o mesmo previsto pela equação (2-3).

Os valores do chi-quadrado resultante do ajuste da equação (2-2) aos dados experimentais foram 0,44 e 0,30 para as exposições com tensão aplicada, nos ambientes contaminados simultaneamente por radônio 220 e 222 (ambientes 7 e 8).

Na exposição com a tensão nula o valor do chi-quadrado que resulta do ajuste pela equação (2-2) é muito maior (6,7) do que 0,44 ou 0,30 obtido nas exposições com tensão aplicada. A montagem sem campo não seleciona os isótopos que penetram nas cavidades e portanto o ajuste desses dados a uma função tipo equação (2-2) não é adequado.

Os valores que encontramos para os parâmetros  $l$ ,  $\rho_{222}$  e  $\rho_{220}$  da equação (2-2) para os dois ambientes contaminados por radônio 220, com tensão aplicada de 9 V, estão relatados na tabela 2-1.

Obtivemos a densidade de traços ( $\rho_{222}$ ) produzida pela atividade do  $^{222}\text{Rn}$  separadamente da densidade de traços ( $\rho_{220}$ ) oriunda da atividade do  $^{220}\text{Rn}$ . Temos agora condições de calcular a atividade do radônio 222 no ar do ambiente apesar da contaminação simultânea produzida pelo radônio 220.

| Ambiente | $l$<br>(cm) | $\rho_{222}$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | $\rho_{220}$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|-------------|---|---|
| 7        | 2,10 ± 0,98 | 1,68 ± 0,39                               | 4,45 ± 1,02                               |
| 8        | 2,15 ± 1,17 | 0,92 ± 0,25                               | 2,26 ± 0,56                               |

**Tabela 2-1:** As colunas apresentam: ( $l$ ) o alcance médio do <sup>220</sup>Rn por difusão; ( $\rho_{222}$ ) a densidade diária de traços produzidos pela atividade do <sup>222</sup>Rn e filhos no interior da cavidade; ( $\rho_{220}$ ) representa apenas uma fração da atividade do isótopo 220 à distância zero da parede. A medida de  $l$  foi obtida em dois ambientes distintos, com pouca ventilação; a média dos dois valores é: 2,12 ± 0,75 cm

Os dados que geraram os gráficos das figuras 2-8 a 2-11 estão nas tabelas 2-2 a 2-5.

O conteúdo de cada coluna das tabelas é:

- Coluna A – distância à parede (cm).
- Coluna B – valor bruto da densidade de traços (traços/cm<sup>2</sup>),  
sem descontar a densidade dos traços do background.
- Coluna C – valor líquido da densidade diária de traços (traços/cm<sup>2</sup>),  
obtido pela subtração da densidade dos traços do background  
e dividindo-se o resultado pelo número de dias da exposição.
- Background - A densidade dos traços do background dos detectores CR-39 neste experimento foi (296 ± 33) traços/cm<sup>2</sup>.

| A   | B             | C                 |
|-----|---------------|-------------------|
| 1,1 | 1030,9 ± 54,2 | 2,28941 ± 0,19768 |
| 2,6 | 784,9 ± 44,6  | 1,52305 ± 0,17284 |
| 4,1 | 735,2 ± 40,5  | 1,36822 ± 0,16275 |
| 5,6 | 620,6 ± 38,9  | 1,01121 ± 0,15892 |
| 7,1 | 622,6 ± 39,1  | 1,01745 ± 0,15939 |

**Tabela 2-2:** Exposição de 321 dias no ambiente 8 com tensão aplicada. Vide figura 2-8 (a)

| A   | B             | C                 |
|-----|---------------|-------------------|
| 1,1 | 1305,9 ± 47,3 | 3,14611 ± 0,17967 |
| 2,6 | 916,5 ± 36,9  | 1,93302 ± 0,15422 |
| 4,1 | 830,9 ± 35,5  | 1,66636 ± 0,15099 |
| 5,6 | 892,8 ± 38,2  | 1,85919 ± 0,15726 |
| 7,1 | 624,4 ± 30,8  | 1,02305 ± 0,14062 |

**Tabela 2-3:** Exposição de 321 dias no ambiente 8 sem tensão aplicada. Vide figura 2-8 (b)

| A   | B            | C                 |
|-----|--------------|-------------------|
| 1,1 | 302,6 ± 22,6 | 0,02043 ± 0,12383 |
| 2,6 | 519,8 ± 31,2 | 0,69288 ± 0,14060 |
| 4,1 | 484,9 ± 28,5 | 0,58483 ± 0,13499 |
| 5,6 | 629,7 ± 30,7 | 1,03313 ± 0,13954 |
| 7,1 | 493,1 ± 26,7 | 0,61022 ± 0,13142 |

**Tabela 2-4:** Exposição de 323 dias no ambiente 3 com tensão aplicada. Vide figura 2-11

| A   | B             | C                 |
|-----|---------------|-------------------|
| 1,2 | 1083,4 ± 46,7 | 4,16614 ± 0,30256 |
| 2,7 | 867,2 ± 41,5  | 3,02222 ± 0,28054 |
| 4,2 | 716,8 ± 39,0  | 2,22646 ± 0,27031 |
| 5,7 | 648,0 ± 35,4  | 1,86243 ± 0,25606 |
| 7,2 | 662,5 ± 36,3  | 1,93915 ± 0,25957 |

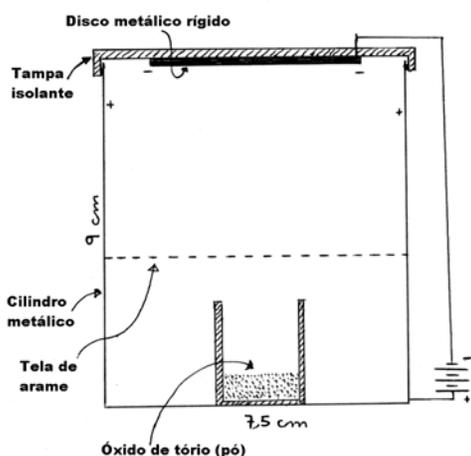
**Tabela 2-5:** Exposição de 189 dias no ambiente 7 com tensão aplicada. Vide figura 2-10

## Capítulo 3

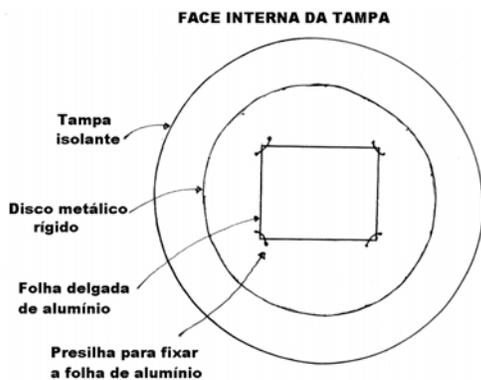
### 3-1 Produção de uma Fonte de $^{212}\text{Pb}$

Apresentamos nesta seção uma maneira simples de produzir uma fonte radioativa de  $^{212}\text{Pb}$  de baixa atividade. Uma pequena quantidade de óxido de tório, cerca de  $1 \text{ a } 2 \text{ cm}^3$ , é utilizada como fonte de radônio 220 no dispositivo esquematizado na figura 3-1. O  $^{220}\text{Rn}$  emana do pó de óxido de tório e decai em  $^{216}\text{Po}$  que, por sua vez, decai em  $^{212}\text{Pb}$ . Este último tem meia vida de 10,6 horas, fica em grande parte na forma de íons positivos no ar [17], e pode então ser atraído por um eletrodo carregado negativamente.

Átomos de  $^{212}\text{Pb}$  ionizados são atraídos pelo disco metálico conectado ao terminal negativo da bateria, conforme desenho da figura 3-1 (a).



**Figura 3-1: (a)** O radônio 220 emana do óxido de tório, gera polônio 216 e este gera chumbo 212 muito rapidamente. Este último encontra na parte superior, acima da tela metálica, um campo elétrico que conduz os íons positivos para o disco metálico fixado na parte interna da tampa. A tensão da bateria utilizada foi 28 V.



**Figura 3-1: (b)** A área do disco metálico é aproximadamente  $20 \text{ cm}^2$ , seu diâmetro tem cerca de 5 cm, e a folha de alumínio tem dimensões aproximadas de  $3,5 \text{ cm} \times 3,5 \text{ cm}$ . A folha de alumínio é facilmente removida com uma pinça. Coletamos portanto átomos de chumbo 212 depositados sobre a folha de alumínio.

As fontes que produzimos com esse arranjo têm uma densidade máxima aproximada de  $1,24 \times 10^5$  átomos de  $^{212}\text{Pb}$  por  $\text{cm}^2$ .

Sobre o disco metálico rígido fixamos uma folha delgada de alumínio ( $27,2 \text{ g/m}^2$ ), conforme ilustra a figura 3-1 (b), de dimensões um pouco maiores do que os detectores que utilizamos. A folha de alumínio é o suporte para a nossa fonte extensa e rarefeita de  $^{212}\text{Pb}$ .

Deixamos transcorrer várias meias-vidas do  $^{212}\text{Pb}$ , com o sistema ligado, de forma que a fonte alcançasse sua atividade máxima permitida pela taxa de deposição  $\mathbf{R}$  do  $^{212}\text{Pb}$  no eletrodo negativo<sup>1</sup>:

$$\mathbf{R} = \lambda \mathbf{n} \quad (3-1)$$

O lado direito da equação 3-1 representa a atividade máxima da fonte por unidade de área;  $\lambda$  é a constante de decaimento do  $^{212}\text{Pb}$ ;  $\mathbf{n}$  é o número máximo de átomos por  $\text{cm}^2$  de  $^{212}\text{Pb}$  que se pode obter (equilíbrio secular) durante a produção da fonte [18].

Utilizamos então essas fontes para irradiar detectores CR-39. O tempo de irradiação foi maior do que três dias permitindo o decaimento de mais de 99% do  $^{212}\text{Pb}$  (10,6 horas). A face da fonte que continha os radioisótopos foi justaposta à face do detector. Dessa forma o detector é irradiado por alfas com duas energias bem definidas: 64% das alfas com 8,8 MeV e os 36% restantes com 6,1 MeV emitidas respectivamente por  $^{212}\text{Po}$  e  $^{212}\text{Bi}$ .

Utilizamos o critério de restringir a contagem apenas aos traços que apresentam a razão dos diâmetros menor do que 1,100. Os traços que obedecem a esse critério serão chamados redondos. O histograma resultante está na figura 3-2.

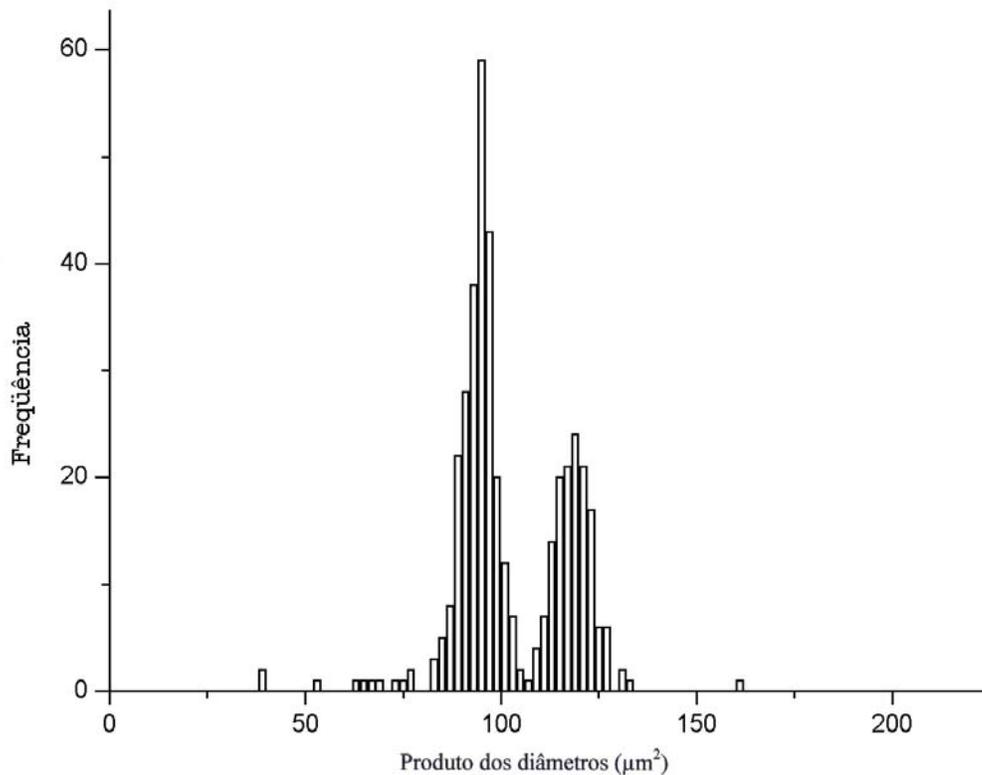
Irradiamos ainda dessa mesma forma detectores CR-39 recobertos por degradador de  $27,4 \text{ g/m}^2$  e de  $54,4 \text{ g/m}^2$ . As figuras 3-3 e 3-4 mostram os histogramas dos produtos dos diâmetros dos traços medidos nesses experimentos.

Os dois picos correspondentes às energias iniciais de 8,8 e 6,1 MeV se afastam à medida que aumenta a densidade do degradador. Os traços são redondos; obedecem ao critério da razão dos diâmetros menor que 1,100 (redondos).

---

<sup>1</sup> O número  $\mathbf{n}$  de átomos radioativos depositados na fonte obedece à equação  $\frac{dn}{dt} = R - \lambda n$ .

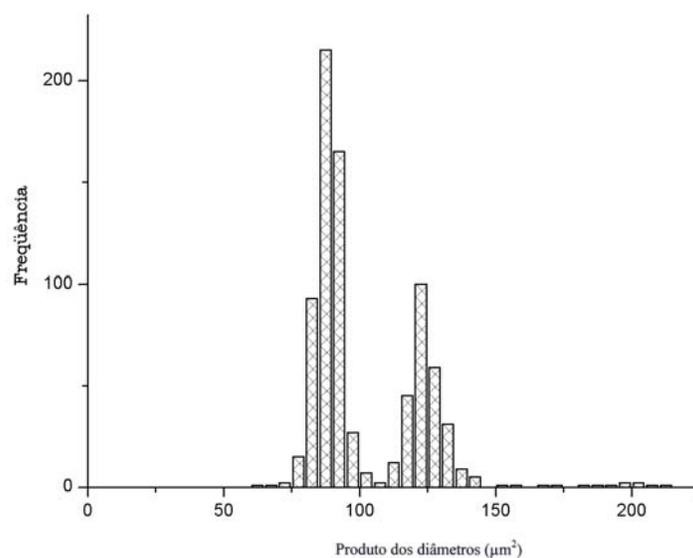
A derivada  $dn/dt$  se anula no limite do tempo tendendo para  $\infty$ . Nesta situação, em que  $\mathbf{R}$  se iguala a  $\lambda \mathbf{n}$ , temos o equilíbrio secular.



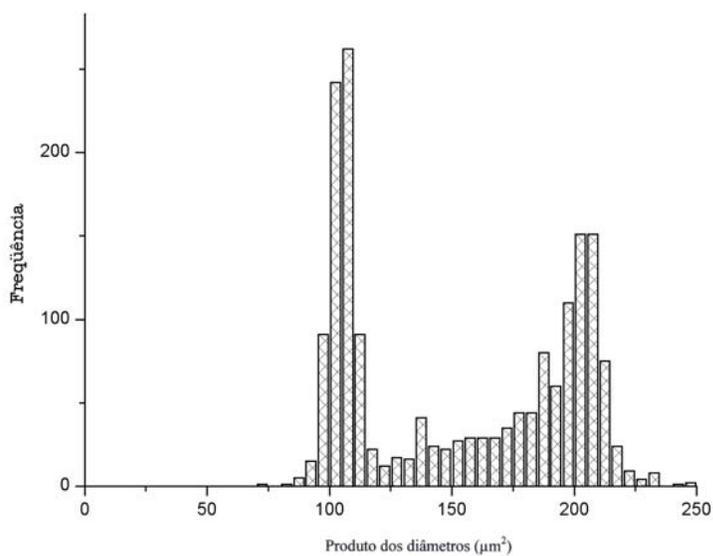
**Figura 3-2:** Histograma dos traços redondos produzidos no detector exposto diretamente à fonte de chumbo 212 depositado em folha de alumínio. O número de eventos nos dois picos é 247 e 141. Correspondem respectivamente a 63,66% e 36,34% do total de 388, valores muito próximos de 64% e 36% conhecidos para a razão de ramificação (branching ratio) do  $^{212}\text{Bi}$ . O pico da esquerda corresponde às alfas de 8,8 MeV e o pico da direita corresponde às alfas de 6,1 MeV.

O efeito da densidade do degradador sobre a energia residual da alfa quando alcança a superfície do detector pode ser visto na figura 2-4. A figura mostra o comportamento da energia residual das alfas após percorrer uma determinada distância no ar. Deve-se fazer a correspondência da densidade de  $27,4 \text{ g/m}^2$  com 2,3 cm no ar à temperatura de  $25^\circ\text{C}$  e da densidade de  $54,4 \text{ g/m}^2$  com 4,6 cm no ar nestas condições.

As alfas de menor energia, ao atravessarem o mesmo degradador, perdem mais energia em valor absoluto do que as alfas de maior energia. A perda de energia por unidade de comprimento,  $dE/dx$  (stopping power), contém um fator inversamente proporcional à energia cinética da alfa [19].



**Figura 3-3:** Histograma dos traços redondos registrados em detector CR-39, exposto com degradador de  $27,2 \text{ g/m}^2$  às alfas de 8,8 e 6,1 Mev emitidas pela fonte de chumbo 212.

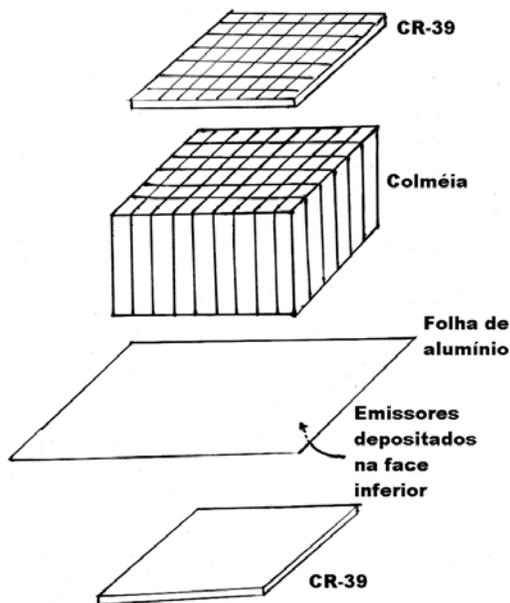


**Figura 3-4:** Histograma dos traços redondos registrados em detector CR-39, exposto com degradador de  $54,4 \text{ g/m}^2$  às alfas de 8,8 e 6,1 Mev emitidas pela fonte de chumbo 212.

### 3-2 Uma Colméia de Colimadores para Calibração do CR-39

O dispositivo que descrevemos nesta seção (vide figuras 3-5 e 3-6) permite medir a densidade de emissores alfas presentes inicialmente na fonte de chumbo 212 que produzimos. Obter essa informação nos permitiu medir o ângulo limite de incidência ( $\Theta_{lim}$ ) das alfas no CR-39, cujos traços permanecem após o ataque químico. O dispositivo permitiu obter o ângulo de incidência máximo que produz os traços redondos (razão dos diâmetros  $< 1,100$ ).

A figura 3-5 ilustra o arranjo experimental que permite efetuar as medições citadas no parágrafo anterior. Duas lâminas de CR-39 são expostas simultaneamente às alfas emitidas pela fonte de chumbo 212. As partes são juntadas em sanduíche de forma que a face inferior da folha de alumínio encoste no CR-39 inferior; a colméia encosta na face oposta da folha de alumínio; e o segundo CR-39 encosta no topo da colméia.



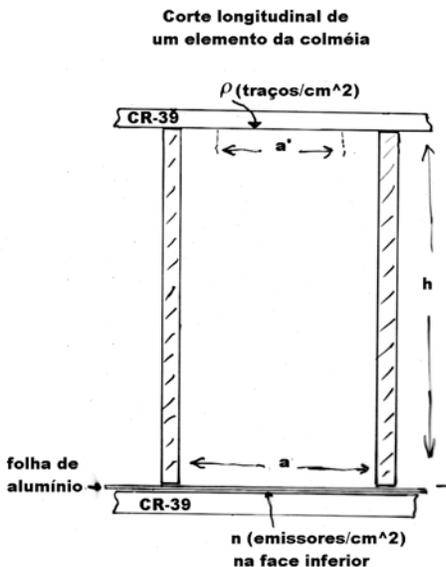
**Figura 3-5:** Exposição simultânea de dois detectores CR-39 para o cálculo da densidade de emissores  $^{212}\text{Pb}$  depositados na face inferior da folha de alumínio, para o cálculo de  $\Theta_{lim}$  e para o cálculo o ângulo de incidência máximo que produz traços os traços redondos (razão dos diâmetros  $< 1,100$ ).

Os quatro elementos se juntam, justapondo-se na mesma ordem que aparece na figura.

O CR-39 superior foi riscado de forma que a localização das paredes da colméia fosse preservada para referência das medições ao microscópio.

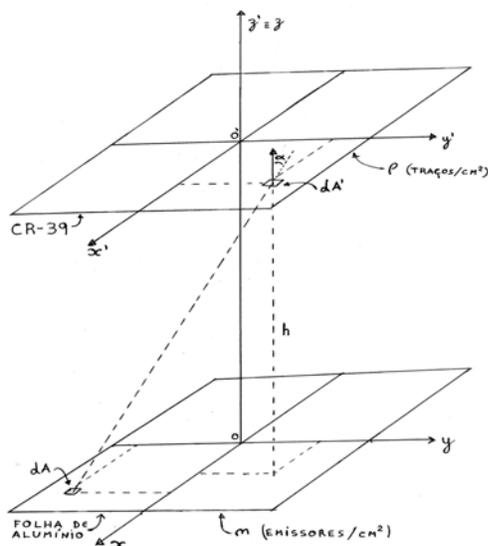
A figura 3-6 apresenta uma ampliação em corte de um elemento colimador da colméia junto com a fonte de chumbo 212, montados em sanduíche entre dois detectores CR-39. As alfas que atingem o detector superior são emitidas a partir de um quadrado de lado  $a$ , delimitado pelas paredes do colimador, atravessam a folha de alumínio e produzem traços redondos no detector superior.

Examinamos no microscópio os traços contidos em um quadrado de lado  $a' < a$ , evitando, dessa forma, a região sombreada pelas paredes do colimador. As paredes foram feitas de papelão rígido, com espessura de 0,4 mm.



**Figura 3-6 (a):** Corte ampliado de um elemento da colméia destacando-se as grandezas geométricas necessárias para estabelecer a relação entre a densidade de traços  $\rho$  no detector superior e a densidade de emissores  $n$  presentes inicialmente na fonte.

O detector inferior é exposto diretamente à fonte de  $^{212}\text{Pb}$  permitindo relacionar o número de traços registrados nesse detector com o número de emissores da fonte.



**Figura 3-6 (b):** A relação entre  $\rho$  e  $n$  é obtida por integração das contribuições provenientes de cada elemento de área  $dA = dx dy$  da fonte para o elemento de área  $dA' = dx' dy'$  do detector. Obtém-se dessa maneira  $\rho(x', y')$  no detector.

O valor de  $\rho$  que medimos é um valor médio de  $\rho(x', y')$  sobre o quadrado de lado  $a'$  examinado ao microscópio para todos os colimadores que formam a colméia.

Vamos calcular a relação entre  $\rho$  (médio) e  $\mathbf{n}$  com base nos parâmetros definidos nas figuras 3-6 (a) e 3-6 (b). O quadrado inferior tem área  $A = a^2$  e o quadrado superior tem área  $A' = a'^2$ .

A distância entre os elementos de área  $dA$  e  $dA'$  é  $r$ , com  $r^2 = h^2 + (y'-y)^2 + (x'-x)^2$ , e podemos escrever a equação 3-2.

$$\rho(x', y') dA' = \iint_A \frac{dA' \cos(\alpha)}{r^2} \frac{ndxdy}{4\pi} \quad (3-2)$$

O valor médio de  $\rho$  definido na equação 3-3 é obtido após substituir  $\cos(\alpha)$  por  $h/r$  de forma que  $\cos(\alpha)/r^2$  é substituído por  $h/r^3$  na equação anterior:

$$\rho_m = \frac{1}{A'} \iint_{A'} \rho(x', y') dx' dy' \quad (3-3a)$$

$$\rho_m = \frac{hn}{4\pi a'^2} \iint_{A'} dx' dy' \iint_A \frac{dxdy}{[h^2 + (y'-y)^2 + (x'-x)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-3b)$$

Os limites de integração vão de  $-a'/2$  a  $+a'/2$  em  $A'$  e vão de  $-a/2$  a  $+a/2$  em  $A$ . Colocando-se em evidência o termo  $h^2$  que aparece no denominador e redefinindo-se as variáveis de integração como  $x'/h, y'/h, x/h$  e  $y/h$ , obtemos a relação:

$$\rho_m = \frac{na^2}{4\pi h^2} \text{ fator} \quad (3-4)$$

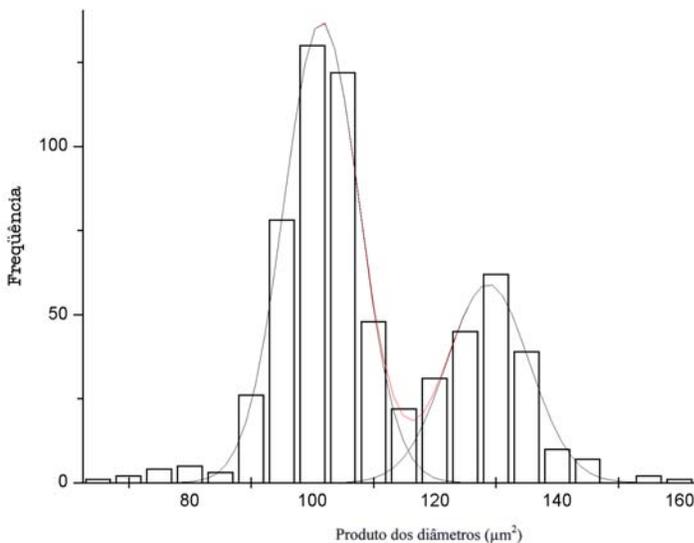
$$fator = \left(\frac{h}{a'}\right)^2 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \int_{\frac{-a'}{2h}}^{\frac{+a'}{2h}} dx' \int_{\frac{-a'}{2h}}^{\frac{+a'}{2h}} dy' \int_{\frac{-a}{2h}}^{\frac{+a}{2h}} dx \int_{\frac{-a}{2h}}^{\frac{+a}{2h}} dy \left[1 + (y'-y)^2 + (x'-x)^2\right]^{-3} \quad (3-5)$$

Temos, pois como calcular a densidade **n** de emissores da fonte de chumbo 212, medindo a densidade **ρ** de traços no detector superior, calculando o valor do fator definido na equação 3-5 e substituindo na equação 3-4 para obter:

$$n = \frac{4 \pi h^2 \rho}{a^2 fator} \quad (3-6)$$

Os valores dos parâmetros **h**, **a** e **a'** foram 20,0 mm 5,5mm e 4,0 mm, neste experimento. Com esses dados calculamos numericamente o lado direito da equação 3-5 obtendo: **fator = 0,9722**.

Os traços redondos registrados pelo detector inferior estão representados no histograma da figura 3-7.



**Figura 3-7:** Histograma dos traços redondos registrados pelo CR-39 irradiado diretamente pela fonte de <sup>212</sup>Pb na parte inferior da colméia. (passo = 5 μm<sup>2</sup>). O número de traços contidos sob cada uma das gaussianas é 421 e 201. Os centros de cada pico estão localizados em 101,5 e 128,7 μm<sup>2</sup> respectivamente. Foram examinados 800 campos no microscópio.

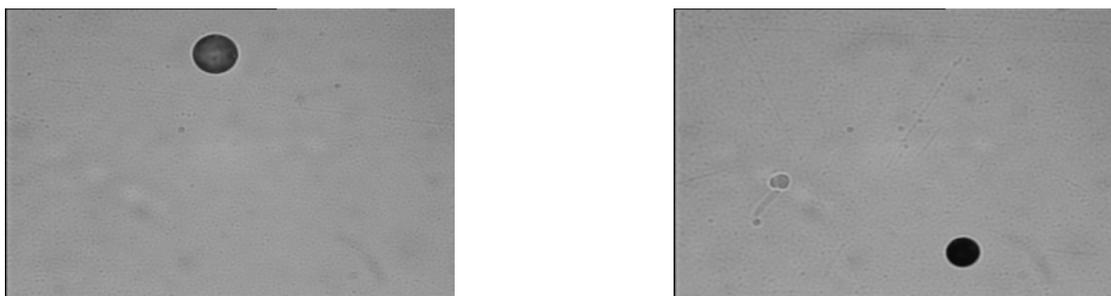
No cálculo da densidade de traços consideramos a área efetiva do campo para cada um dos tamanhos médios de traços. A imagem fotografada com a câmara acoplada ao microscópio (usando-se a objetiva 63X) cobre um retângulo de dimensões 157,3 X 120,3  $\mu\text{m}^2$ . Para medir os dois diâmetros do traço é necessário que o mesmo esteja totalmente contido dentro do retângulo que delimita o campo. Dessa forma a área efetiva do campo fica reduzida a  $(157,3 - D) \times (120,3 - D) \mu\text{m}^2$ , onde D é a raiz quadrada do produto dos diâmetros encontrado no centro de cada pico.

Considerando-se que foram varridos 800 campos, que o número de traços em cada pico é 421 e 201 e considerando-se a área efetiva do campo descrita no parágrafo anterior, obtemos as densidades de traços ( $\pm 4\%$ ) correspondentes a cada pico:

$$\rho_1 = 3252 \text{ traços/cm}^2 \quad (67\% \text{ do total}) \quad (3-7a)$$

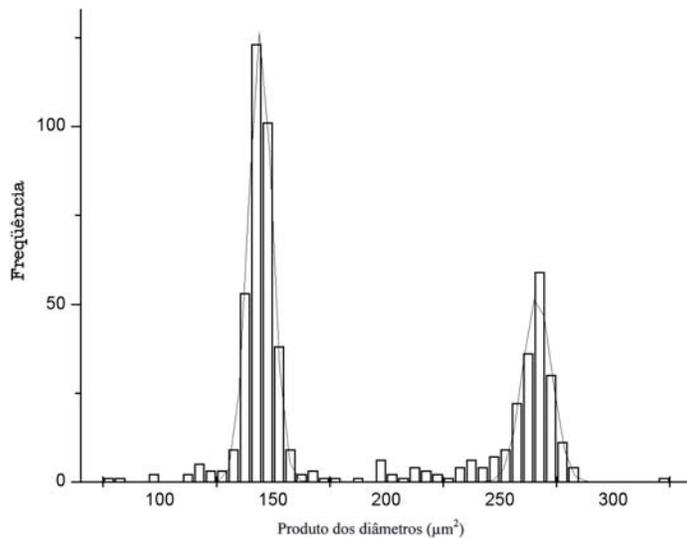
$$\rho_2 = 1580 \text{ traços/cm}^2 \quad (33\% \text{ do total}) \quad (3-7b)$$

A diferença de tamanhos dos traços no detector superior (figura 3-6a) é marcante; é possível distingui-los com facilidade durante a varredura campo a campo no microscópio. As duas fotografias da figura 3-8 ilustram esse comentário.



**Figura 3-8:** Traços de alfas emitidas pela fonte de  $^{212}\text{Pb}$  e registrados no detector Cr-39 do topo da colméia. As energias iniciais das alfas que produziram esses traços foram 6,1 MeV do  $^{212}\text{Bi}$  (fotografia da esquerda) e 8,8 MeV do  $^{212}\text{Po}$  (fotografia da direita).

Na figura 3-9 apresentamos o histograma dos traços redondos medidos no detector superior, que registrou as alfas que atravessaram a folha de alumínio e o colimador, incidindo no CR-39 com ângulo próximo da normal à superfície.



**Figura 3-9:** Histograma dos traços redondos registrado pelo CR-39 na parte superior da colméia. (passo =  $5 \mu\text{m}^2$ )

O número de traços contidos sob cada uma das gaussianas é 331 e 168. Os centros de cada pico estão localizados em  $144,2$  e  $266,5 \mu\text{m}^2$  respectivamente. Foram examinados 4500 campos no microscópio.

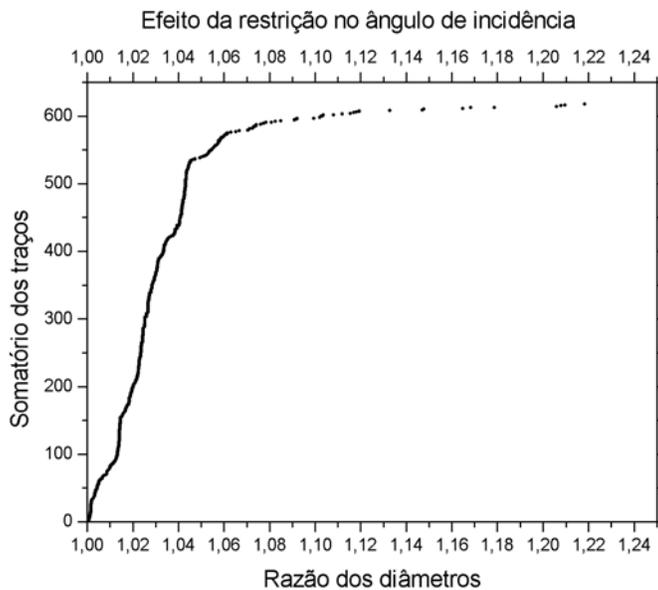
Considerando-se que foram varridos 4500 campos, que o número de traços em cada pico é 331 e 168 e considerando-se as áreas efetivas dos campos conforme descritas anteriormente, obtemos as densidades de traços ( $\pm 4,5\%$ ) correspondentes a cada pico:

$$\rho_{c1} = 468 \text{ traços/cm}^2 \quad (64,7\% \text{ do total}) \quad (3-8a)$$

$$\rho_{c2} = 255 \text{ traços/cm}^2 \quad (35,3\% \text{ do total}) \quad (3-8b)$$

É importante salientar que os colimadores que constituem a colméia limitam o ângulo de incidência das alfas no detector superior e, por conseqüência, limitam o valor máximo da razão dos diâmetros. A razão dos diâmetros dos traços redondos ficou limitada ao valor 1,060, como podemos conferir na figura 3-10, onde o eixo das ordenadas

representa o número total de traços com a razão dos diâmetros menor ou igual ao valor lido na abscissa.



**Figura 3-10:** A colméia selecionou os traços redondos limitando a razão dos diâmetros ao valor 1,060.

Calculamos o número de emissores por unidade de área contidos na fonte quando se iniciou a exposição utilizando as densidades de traços (equações 3-8) obtidas do histograma da figura 3-9, e a equação 3-6 repetida abaixo:

$$n = \frac{4 \pi h^2 \rho}{a^2 \text{ fator}}$$

sendo  $h = 20,0 \text{ mm}$ ,  $a = 5,5 \text{ mm}$ ,  $\text{fator} = 0,9722$  e  $\rho = \rho_{c1,2}$

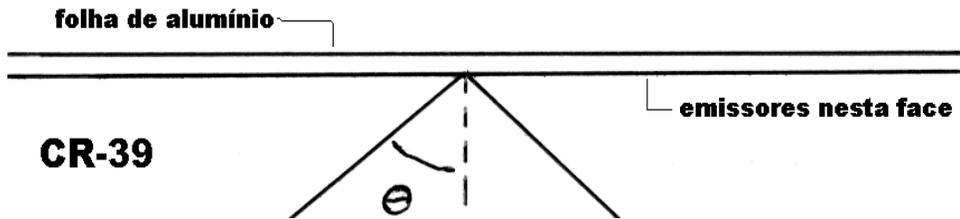
$$\text{Pico maior (do } ^{212}\text{Po): } n_1 = 8,00 \times 10^4 \text{ emissores/cm}^2 \quad (3-9a)$$

$$\text{Pico menor (do } ^{212}\text{Bi): } n_2 = 4,36 \times 10^4 \text{ emissores/cm}^2 \quad (3-9b)$$

$$\text{Total de emissores: } n = 1,236 \times 10^5 \text{ emissores/cm}^2 \quad (3-9c)$$

De posse desses números bem como das densidades de traços redondos registradas pelo CR-39 inferior calculamos o ângulo de incidência máximo com relação à normal ao detector, que ainda produz traços redondos (razão < 1,100) no CR-39 inferior.

Observe-se que a fonte é constituída de uma só camada, muito rarefeita, de chumbo 212. Nestas condições cada ponto da fonte irradia uniformemente em todas as direções:



O cone de ângulo  $\Theta$  representado na figura delimita o ângulo sólido  $\Omega$  dentro do qual os traços das alfas são registrados pelo detector CR-39 que ficou embaixo da fonte.

$$\Omega = 2\Pi(1-\cos(\Theta)) \quad (3-10)$$

Os ângulos máximos de incidência que ainda produzem traços com razão dos diâmetros menor que 1,100 chamam  $\Theta_{\max}$  e  $\Omega_{\max}$ . Definimos agora a eficiência (E) do detector para traços redondos:

$$E = \frac{\Omega_{\max}}{4\pi} = \frac{1}{2}(1 - \cos \Theta_{\max}) \quad (3-11)$$

$$\cos\Theta_{\max} = 1 - 2E \quad (3-12)$$

O valor de E obtido experimentalmente é  $\rho/n$ , a razão da densidade de traços redondos pelo número de emissores que os produziu. Temos esse resultado ( $\pm 6,0\%$ ):

$$E_1 = \rho_1 / \mathbf{n}_1 = 0,04066 \quad (\text{emissores de 8,8 MeV}) \quad (3-13a)$$

$$E_2 = \rho_2 / \mathbf{n}_2 = 0,03625 \quad (\text{emissores de 6,1 MeV}) \quad (3-13b)$$

$$E = (\rho_1 + \rho_2) / \mathbf{n} = 0,03910 \quad (\text{todos os emissores}) \quad (3-13c)$$

Os valores de  $\Theta_{\max}$  que encontramos ( $\pm 0,7^\circ$ ) para traços redondos foram:

$$\Theta_{1\max} = 23,3^\circ \quad (3-14a)$$

$$\Theta_{2\max} = 22,0^\circ \quad (3-14b)$$

$$\Theta_{\max} = 22,8^\circ \quad (3-14c)$$

Temos dados que permitem calcular o ângulo limite ( $\Theta_{\lim}$ ) para o registro de traços de alfas pelo CR-39. A contagem de todos os traços do detector inferior deu a densidade  $\rho_{\text{total}}$  de traços que permitiu calcular  $E_{\lim}$  ( $\pm 5,9\%$ ):

$$\rho_{\text{total}} = 29231 \pm 1128 \text{ traços/cm}^2 \quad (3-15)$$

$$E_{\lim} = \rho_{\text{total}} / \mathbf{n} = 0,2365 \quad (3-16)$$

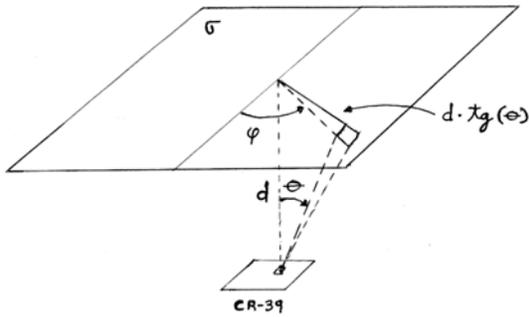
Com este resultado substituído na equação 3-12 obtivemos o valor de  $\Theta_{\lim}$ :

$$\Theta_{\lim} = 58,2^\circ \pm 1,9^\circ \quad (3-17)$$

Utilizamos o valor deste ângulo para calcular a eficiência do CR-39 na geometria de filme fino de ar delimitado pela montagem de placas paralelas.

### 3-3 A Atividade do $^{222}\text{Rn}$ no Ar do Ambiente

O valor de  $\Theta_{\text{lim}}$  apresentado na seção anterior foi utilizado no cálculo da atividade do radônio 222, expondo-se o detector à atividade desse isótopo e filhos em uma estreita camada de ar como a que obtivemos nas montagens em placas paralelas de acrílico.



A figura ao lado ilustra a forma de calcular a eficiência (E) do CR-39 para exposição na geometria de filme fino de ar (entre placas paralelas) [7,8].

Os filhos contribuem com atividade  $\sigma$  por unidade de área, presos às paredes das placas paralelas ou diretamente sobre o detector.

Uma exposição a essa atividade superficial com duração  $t$  produz uma densidade de traços que podemos calcular, considerando-se que existe um ângulo  $\Theta_{\text{lim}}$  além do qual o registro dos traços não permanece após o ataque químico.

Na figura temos  $d \text{tg}(\Theta) = r$ .

A atividade gerada pelo elemento de área  $r \, dr \, d\varphi$  é  $\sigma \, r \, dr \, d\varphi$ .

Essa atividade produz no elemento de área  $dS$  do detector uma quantidade de traços  $d\rho \, dS$  tal que:

$$d\rho \cdot dS = t \cdot \frac{\sigma \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi}{4\pi (d^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \cos \Theta \cdot dS \quad (3-18)$$

O termo  $\cos\Theta$  é substituído por  $\frac{d}{\sqrt{d^2 + r^2}}$  e obtém-se:

$$\rho = \frac{t \sigma}{4 \pi} \iint \frac{r \cdot dr \cdot d \varphi}{(d^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3-19)$$

sendo que a integração de  $\varphi$  se estende de 0 a  $2\Pi$ , mas em r a integração é limitada ao intervalo de 0 a  $d \cdot \text{tg} \Theta_{\text{lim}}$

O resultado da integral é a densidade de traços gerada pela atividade superficial  $\sigma$  e independe da distância d:

$$\rho = \frac{1}{2} \sigma \cdot t \cdot \left[ 1 - \left( 1 + \text{tg}^2 \Theta_{\text{lim}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (3-20)$$

O termo entre colchetes representa a eficiência **E**.

A atividade volumétrica  $A_0$  do radônio 222 produz no mesmo tempo t a densidade de traços  $\rho_0$ :

$$\rho_0 = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot d \cdot t \cdot E \quad (3-21)$$

No equilíbrio de atividades do  $^{222}\text{Rn}$  e filhos, que se estabelece no filme de ar confinado entre as placas de acrílico, a atividade superficial  $\sigma$  de cada um dos dois filhos que emitem alfas se iguala ao produto  $A_0 \cdot d$  do radônio 222.

Dessa forma a densidade de traços no CR-39 instalado no interior da montagem de placas paralelas apresenta uma densidade de traços igual a três vezes a quantidade de traços gerados pela atividade isolada do  $^{222}\text{Rn}$ :

$$\rho = \frac{3}{2} \cdot A_0 \cdot d \cdot t \cdot E \quad (3-22a)$$

$$E = \left[ 1 - \left( 1 + t g^2 \Theta_{\text{lim}} \right)^{-1/2} \right] \quad (3-22b)$$

Calculamos o valor de E utilizando o valor  $\Theta_{\text{lim}} = 58,2^0 \pm 1,9^0$ , apresentado na seção anterior (equação 3-17):

$$\mathbf{E = 0,473 \pm 0,028} \quad (3-23)$$

Encontram-se na tabela 2-1 as densidades diárias de traços produzidas pelo  $^{222}\text{Rn}$  e filhos nos detectores do sanduíche de placas paralelas.

A distância entre as placas é de 3,80mm e a espessura do CR-39 utilizado foi de 0,50 mm de forma que o parâmetro d na equação (3-10 a) vale  $3,30 \times 10^{-3}$  m.

O tempo t é  $24 \times 3600$  s porque se trata de densidade diária.

Na tabela 2-1 encontramos os valores  $1,68 \pm 0,39$  traços/cm<sup>2</sup> (ambiente 7) e  $0,92 \pm 0,25$  traços/cm<sup>2</sup> (ambiente 8), referentes aos traços de  $^{222}\text{Rn}$  e filhos, que substituídos na equação (3-10 a) deram para a atividade do  $^{222}\text{Rn}$  no ar:

**83 Bq/m<sup>3</sup> no Ambiente 7** (apto., terceiro andar, edifício residencial)

**45 Bq/m<sup>3</sup> no Ambiente 8** (sala de trabalho no Depto de Física, UFES)

## Capítulo 4

### 4-1 A Presença de $^{212}\text{Pb}$ no Ar Ambiental

Nos capítulos anteriores apresentamos resultados experimentais que mostram a presença de radônio 220 próximo da parede, nos ambientes 7 e 8 que investigamos mais detalhadamente, em condições de pouca ventilação.

Verificou-se no ambiente 7 que, em condições de ventilação interna forçada, a distribuição espacial das densidades de traços, obtida nos detectores expostos na geometria 2II, se altera fortemente, passando de redução com o afastamento da parede (figura 2-3 a), para ligeiro crescimento com o afastamento da parede (figura 2-3 b) e posterior estabilização.

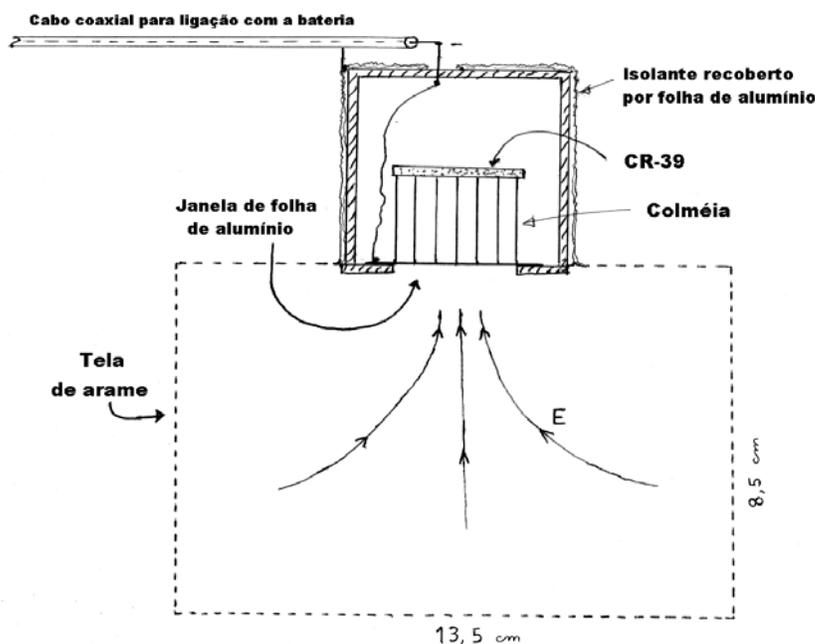
Investigamos também no ambiente 7 a distribuição espacial dos filhos dos dois isótopos do radônio, utilizando detectores CR-39 na geometria 2II com degradador. A figura 2-6 contém os resultados dessa exposição que foi realizada com o ambiente totalmente fechado.

Eram esperados, nos detectores mais afastados da parede, encontrar-se apenas três picos correspondentes, respectivamente, às energias de 8,8 MeV ( $^{212}\text{Po}$ ), 7,7 MeV ( $^{214}\text{Po}$ ) e 6,1 MeV junto com 6,0 MeV ( $^{212}\text{Bi}$  mais  $^{218}\text{Po}$ ). Neste aspecto, o de registrar apenas três picos longe da parede, os histogramas apresentados na figura 2-6 não foram conclusivos.

Realizamos então um novo experimento com a esperança de resolver os dois primeiros picos (correspondentes a 8,8 e 7,7 MeV). Vide figura 4-1.

Utilizamos a mesma colméia descrita no capítulo 3, encerrada em um pequeno recipiente lacrado, com uma janela de folha de alumínio para permitir apenas a entrada das partículas alfas. As alfas que atravessaram a janela foram emitidas pelos filhos do radônio que ultrapassaram a tela de arame e foram então transportados até a janela, pelo campo elétrico, porque os filhos ficam positivos no ar.

A janela de alumínio foi conectada ao pólo negativo de uma bateria pelo condutor central de um cabo coaxial. Dessa forma o campo elétrico ficou restrito ao interior da Gaiola de Faraday feita de tela de arame.

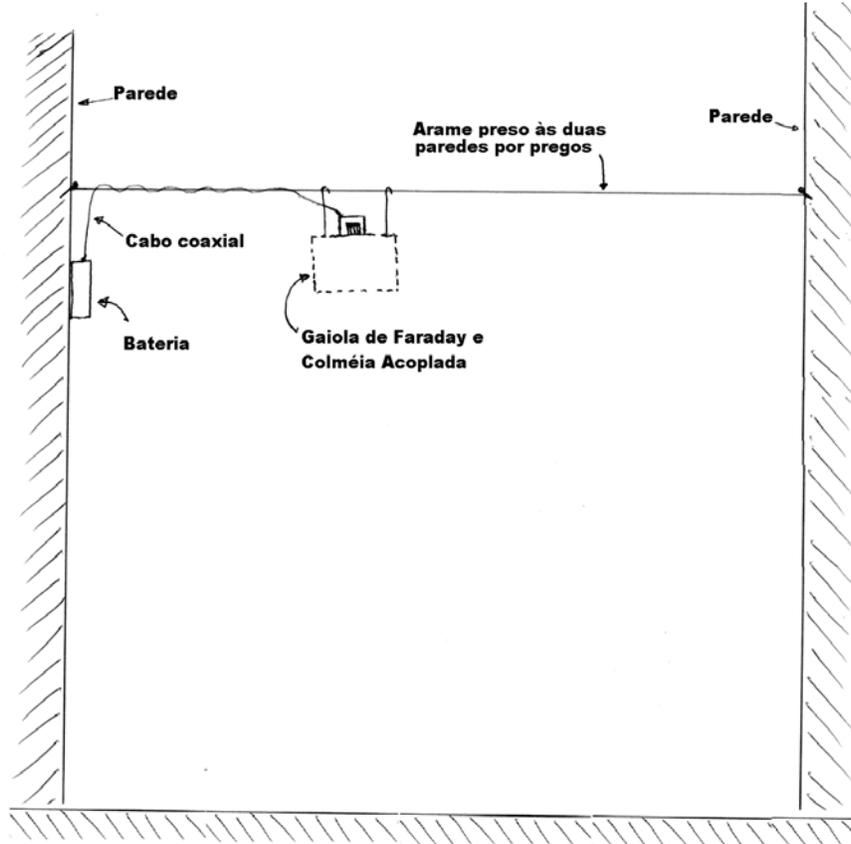


**Figura 4-1:** A figura ilustra o arranjo experimental utilizado para expor o detector CR-39 às alfas dos filhos do radônio (os dois isótopos), utilizando-se a colméia descrita no capítulo 3 para restringir o ângulo de incidência das alfas no detector.

Um fio de arame foi fixado em duas paredes opostas desse ambiente 7, e neste arame suspendeu-se o dispositivo, descrito na figura 4-1, que ficou à distância de 1 m da parede em que a emanção de radônio  $^{220}\text{Rn}$  foi constatada.

A montagem ficou na altura de 2 m do piso, suspensa por dois ganchos de arame conforme ilustra a figura 4-2. A exposição durou 117 dias, durante os quais a porta e a janela foram mantidas fechadas.

Foi utilizada uma bateria de 140 V para criar o campo elétrico no interior da Gaiola de Faraday.



**Figura 4-2:** Gaiola de Faraday instalada no ambiente 7 - A montagem ficou à distância de 1 m da parede. A altura a partir do piso foi 2 m. O radônio 220 e o polônio 216 se extinguem a cerca de 30 cm da parede, não alcançam a montagem, e por isso não registram traços de suas alfas neste experimento. O radônio 222 preenche todo o ambiente, porém a alfa de 5,5 MeV que emite não pode alcançar o CR-39 no topo da colméia. A janela de alumínio ( $27,2 \text{ g/m}^2$ ) equivale a 2,3 cm de ar nas condições do ambiente, que somados com os 2,0 cm da altura da colméia perfaz 4,3 cm. Mas essa alfa perde toda a energia de 5,5 MeV em 4,2 cm (vide figura 2-4).

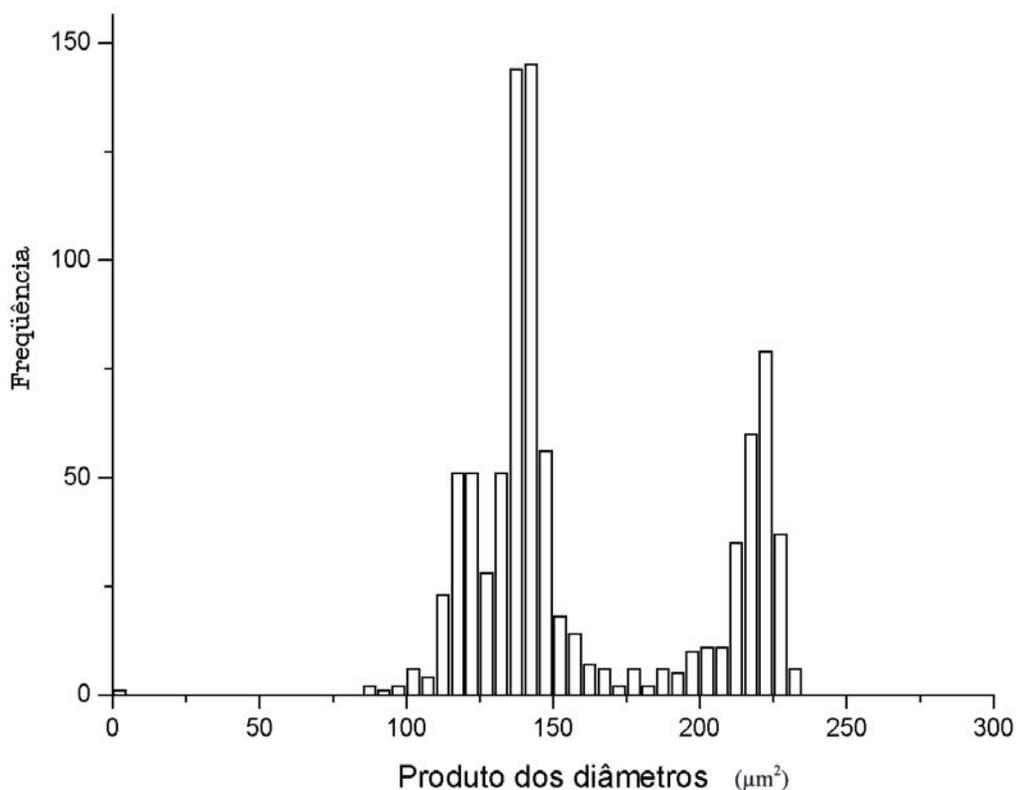
Os valores das energias iniciais das alfas que, sendo emitidas por isótopos grudados na janela da colméia, alcançaram o detector CR-39 foram apenas três:

- **8,8 MeV** ( $^{212}\text{Po}$ , 64% do  $^{212}\text{Bi}$ ),
- **7,7 MeV** ( $^{214}\text{Po}$ ) e
- **6,1 MeV junto com 6,0 MeV** (36%  $^{212}\text{Bi}$  mais  $^{218}\text{Po}$ ).

As alfas perderam energia atravessando a janela de alumínio (equivale a 2,3 cm de ar) e atravessando os 2 cm no interior da colméia, perfazendo 4,3 cm equivalentes de ar nas condições de 25 °C e pressão de 1 atm. As energias residuais (figura 2-4) que carregavam ao atingir o detector foram:

- **5,7 MeV** ( $^{212}\text{Po}$ , 64% do  $^{212}\text{Bi}$ ),
- **4,0 MeV** ( $^{214}\text{Po}$ ) e
- **1,3 MeV junto com 1,0 MeV** (36%  $^{212}\text{Bi}$  mais  $^{218}\text{Po}$ ).

A figura 4-3 mostra o histograma dos traços medidos nesse experimento. Os três picos correspondentes às energias residuais ficaram claramente delineados, vide figura 4-3. Os traços têm razão dos diâmetros menor que 1,060. Essa restrição foi obtida no experimento descrito na seção 3-2, figura 3-9, referente à exposição do CR-39 à fonte de  $^{212}\text{Pb}$  utilizando-se a mesma colméia.

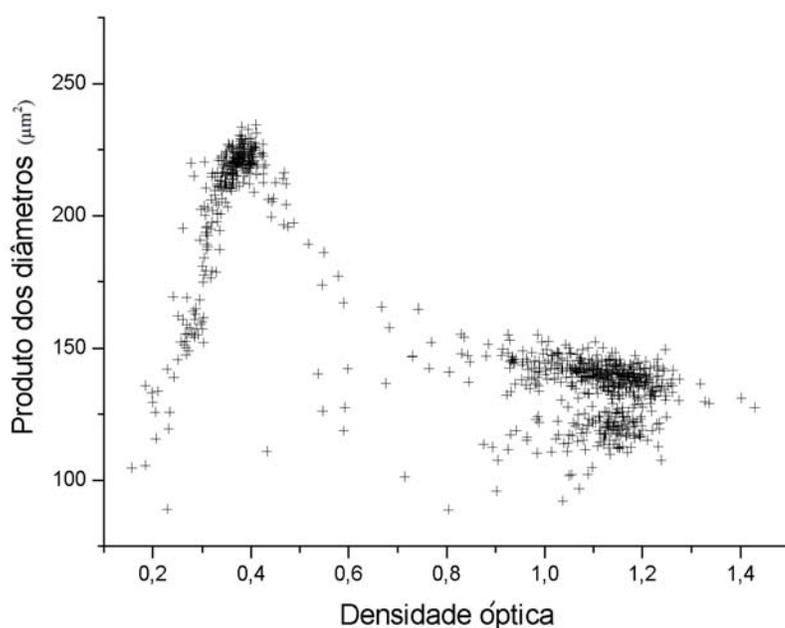


**Figura 4-3:** Os três picos no gráfico deveriam corresponder, da esquerda para a direita, às energias iniciais de 8,8 MeV (64% do  $^{212}\text{Bi}$ ), 7,7 MeV ( $^{214}\text{Po}$ ) e 6,1 MeV junto com 6,0 MeV (36%  $^{212}\text{Bi}$  mais  $^{218}\text{Po}$ ).

Na figura 4-3 estão misturados traços claros e escuros. As alfas de menor energia residual produzem traços claros porque ficam rasos após o ataque químico [7] e então começam a diminuir de tamanho. Em vista dessa característica apareceram traços claros varrendo um contínuo de tamanhos tal que se adicionaram inclusive aos dois picos da esquerda da figura 4-3, onde os traços são menores e escuros.

Fizemos o diagrama da figura 4-4 para identificar a densidade óptica dos traços das alfas de maior energia residual de forma que encontramos um critério de seleção dos traços para esse experimento.

No diagrama da figura 4-4 observamos três regiões com alta densidade de pontos.



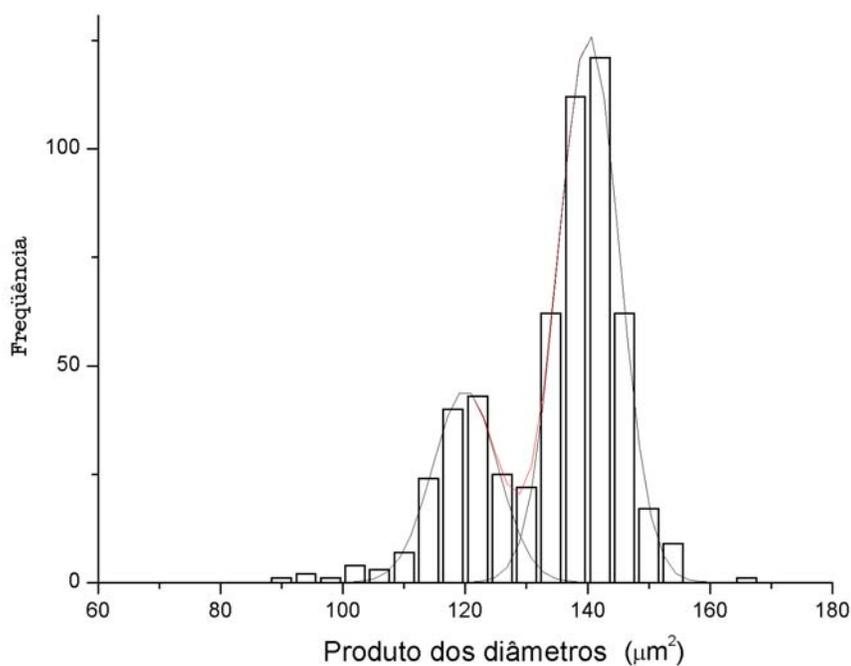
**Figura 4-4:** Diagrama do tamanho dos traços X densidade óptica, obtido em exposição de 117 dias no experimento feito com exposição do detector CR-39 via colméia acoplada à Gaiola de Faraday. A mancha inferior, no lado direito do diagrama corresponde às alfas do  $^{212}\text{Po}$  (8,8MeV, 64 % dos decaimentos do  $^{212}\text{Bi}$ ).

Os menores produtos dos diâmetros (maiores energias) ficaram concentrados à direita do diagrama em duas regiões vizinhas, de alta densidade óptica. Poucos traços

correspondentes ao mesmo produto dos diâmetros, porém com baixa densidade óptica, ficaram no lado esquerdo do diagrama.

Tomamos o diagrama da figura 4-4 como base para selecionar os dados referentes aos traços das duas alfas de maior energia inicial (8,8 e 7,7 MeV). Fizemos o corte no valor da densidade óptica igual a 0,7.

O resultado está na figura 4-5 onde os dois picos representam apenas os traços das alfas do  $^{212}\text{Po}$  (8,8 MeV) e do  $^{214}\text{Po}$  (7,7 MeV).



**Figura 4-5:** Histograma dos tamanhos dos traços das alfas do  $^{212}\text{Po}$  (8,8 MeV) e do  $^{214}\text{Po}$  (7,7 MeV) registrados pelo detector no experimento da Colméia acoplada à Gaiola de Faraday. (Exposição de 117 dias). O número de traços contidos sob a gaussiana da esquerda foi 147 e da direita foi 394 (passo =  $4 \mu\text{m}^2$ ). Os picos estão localizados em  $120,0 \mu\text{m}^2$  e  $140,2 \mu\text{m}^2$ . A densidade óptica é maior do que 0,7. O número de campos varridos no microscópio foi 7460.

É preciso considerar a possibilidade de que o radônio 222 tenha se infiltrado no ambiente lacrado onde se instalou a colméia com o detector (figura 4-1). Essa ocorrência

teria sido constatada durante a varredura da lâmina ao microscópio porque seria observado um grande número de traços não redondos. Isto não ocorreu; o número de traços alongados foi pequeno em comparação com os traços grandes, escuros e redondos (1,060).

Além disso, o radônio 222 infiltrado na parte interna da colméia irradiaria o CR-39 de uma distância entre zero e dois centímetros (altura h da colméia) e as alfas chegariam ao detector em um contínuo de energias (na faixa de 5,5 a 3,6 MeV). O mesmo ocorreria com os filhos: polônio 218 (na faixa de 6,0 a 4,2 MeV) e polônio 214 (na faixa de 7,7 a 6,3 MeV).

O pouco radônio 222 e filhos que se infiltrou irradiou o CR-39 com ângulos de incidência que, em grande parte, ultrapassaram as limitações impostas às alfas que vieram da parte externa da janela (razão dos diâmetros menor que 1,060). Grande parte dos traços resultantes da pequena infiltração, foi excluída pelo critério da razão dos diâmetros. Os traços que restaram foram em quantidade insuficiente para aparecer no gráfico apresentado na figura 4-5. O diagrama da figura 4-4 mostra um contínuo de tamanhos apenas para os traços claros, mas estes não estão incluídos na figura 4-5.

As densidades de traços ( $\pm 4,3\%$ ) obtidas nos dois picos da figura 4-5 são:

$$\rho_1 = 123,3 \pm 5,3 \text{ traços/cm}^2 \quad (4-1a)$$

$$\rho_2 = 334,7 \pm 14,4 \text{ traços/cm}^2 \quad (4-1b)$$

O número de traços em cada pico (147 e 394) foi dividido pelo número de campos varridos (7460), e o resultado foi dividido pela da área efetiva do campo. No cálculo da área efetiva do campo descontamos o diâmetro médio dos traços em cada um dos picos:

$1,600 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$  para o pico da esquerda e

$1,578 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$  para o pico da direita.

Utilizamos a equação 3-6 para calcular o número de emissores que se depositaram na janela da colméia durante os 117 dias que durou o experimento. No cálculo do **fator** (equação 3-5) os parâmetros utilizados foram os mesmos da seção 3-2, exceto **a'** que foi

modificado: **h = 20,0 mm**, **a = a' = 5,5 mm**, o que resultou em **fator = 0,96285**.

Repetimos aqui a equação 3-6:

$$n = \frac{4\pi h^2 \rho}{a^2 \text{ fator}}$$

$$n_1 = 21279 \pm 915 \text{ emissores/cm}^2 \text{ (64\% do } ^{212}\text{Bi decai em } ^{212}\text{Po, cadeia do } ^{220}\text{Rn)}$$

$$n_2 = 57562 \pm 2485 \text{ emissores/cm}^2 \text{ (} ^{214}\text{Po, cadeia do } ^{222}\text{Rn)}$$

Para compreender a origem dos números **n<sub>1</sub>** e **n<sub>2</sub>**, que calculamos acima, tivemos que fazer algumas considerações sobre o processo da captura dos filhos do radônio na Gaiola de Faraday :

- Não são capturados pela gaiola, devido à meia-vida muito curta, os isótopos <sup>212</sup>Po (0,30 μs) da cadeia do radônio 220 e <sup>214</sup>Po (164 μs) da cadeia do 222.
- Não são capturados pela gaiola devido à meia-vida curta, mas principalmente porque decaem nas proximidades da parede no ambiente sem ventilação, os isótopos <sup>216</sup>Po (0,145 s) da cadeia do radônio 220.

Consideramos também a hipótese simplificadora de que o número de emissores depositados foi:

- Proporcional ao tempo **t** de exposição, e também
- Proporcional à concentração **C (X)** dos isótopos **X** na vizinhança da gaiola.

Consideramos ainda que o isótopo capturado não se afastou da janela de alumínio da colméia, mesmo após decair por emissão de alfa ou beta. Consideramos que o filho descendente ficou positivo e permaneceu confinado pelo campo elétrico.

Estas considerações nos permitiram escrever as equações:

$$n_1 = t \cdot 0,64 [C(^{212}\text{Pb}) + C(^{212}\text{Bi})] \text{ constante} \quad (4-2)$$

$$n_2 = t [C(^{218}\text{Po}) + C(^{214}\text{Pb}) + C(^{214}\text{Bi})] \text{ constante} \quad (4-3)$$

Uma concentração C de um dado isótopo produz uma atividade  $A = \lambda C$  sendo  $\lambda$  a constante de decaimento do isótopo. Substituímos esta relação nas equações (4-2) e (4-3) e dividimos  $n_1$  por  $n_2$  para obter a equação 4-4:

$$\frac{n_1}{0,64 n_2} = \frac{\frac{A(^{212}\text{Pb})}{\lambda(^{212}\text{Pb})} + \frac{A(^{212}\text{Bi})}{\lambda(^{212}\text{Bi})}}{\frac{A(^{218}\text{Po})}{\lambda(^{218}\text{Po})} + \frac{A(^{214}\text{Pb})}{\lambda(^{214}\text{Pb})} + \frac{A(^{214}\text{Bi})}{\lambda(^{214}\text{Bi})}} \quad (4-4)$$

Na equação 4-4, o numerador à direita do sinal de igualdade permitiria obter atividades de filhos do radônio 220 no ar do ambiente, se fossem conhecidas as atividades dos filhos do radônio 222 neste ambiente.

O valor da razão no lado esquerdo da equação 4-4 foi obtido, e refere-se à contaminação do ar no ambiente 7 por filhos dos dois isótopos do radônio:

$$\frac{n_1}{0,64 n_2} = 0,5756 \quad (4-5)$$

O ambiente 7 foi mantido com porta e janela fechadas durante todo o experimento. Nestas condições, as atividades do radônio 222 e filhos ficaram próximas do equilíbrio. Não podemos dizer o mesmo para a atividade do radônio 220 e filhos.

Porém o chumbo 212 tem meia vida muito longa e foi detectado no ar do ambiente, revelado pelos resultados apresentados nas figuras 4-4 e 4-5. Fizemos então outra hipótese

simplificadora, de que as atividades do chumbo 212 e do bismuto 212 também ficaram próximas do equilíbrio.

Resumindo, fizemos as hipóteses simplificadoras:

$$A(^{212}\text{Pb}) = A(^{212}\text{Bi}) \quad (4-6)$$

$$A(^{218}\text{Po}) = A(^{214}\text{Pb}) = A(^{214}\text{Bi}) = A(^{222}\text{Rn}) \quad (4-7)$$

Colocamos em evidência  $A(^{222}\text{Rn})$  no denominador da equação 4-4 após substituir as atividades dos filhos pela atividade do radônio 222, e no numerador substituímos a atividade do chumbo 212 pela atividade do bismuto 212.

Sobraram os somatórios dos inversos das constantes de decaimento, no numerador e no denominador, que substituímos pelos somatórios das meias-vidas (figuras 1-1 e 1-2):

$$\frac{n_1}{0,64 n_2} = 0,5756 = \frac{A(^{212}\text{Bi}) [60 \ 10,64 + 60,55]}{A(^{222}\text{Rn}) [3,10 + 26,8 + 19,9]} \quad (4-8)$$

Efetuando-se as contas, chegamos ao seguinte resultado possível para a contaminação (razão das atividades dos filhos do  $^{220}\text{Rn}$  pela atividade do  $^{222}\text{Rn}$ ) do ar no ambiente 7:

$$\frac{A(^{212}\text{Bi})}{A(^{222}\text{Rn})} = \frac{A(^{212}\text{Pb})}{A(^{222}\text{Rn})} = 0,0410 \quad (4-9)$$

Apontamos um caminho para determinar as concentrações dos filhos do radônio 220 no ambiente 7, referidas à concentração do radônio 222 neste ambiente.

## Capítulo 5

### 5-1 Análise dos Resultados – Atividade do $^{222}\text{Rn}$ no Ar do Ambiente

O objetivo que buscamos com a realização deste trabalho foi investigar a contaminação do ar ambiental por radônio e filhos, utilizando o detector CR-39, em ambientes que apresentem contaminação por  $^{220}\text{Rn}$ . Este isótopo do radônio pertence à cadeia de decaimento radioativo do tório, que ocorre em concentrações mais elevadas do que a média mundial em poucas regiões do mundo, em particular ocorre no sul de Minas Gerais e parte do Espírito Santo.

Concentramos nossa atenção em dois ambientes de convívio e trabalho na cidade de Vitória-ES que apresentaram contaminação simultânea pelos dois isótopos do radônio.

A primeira dificuldade que apareceu foi a de se fazer uma medição da atividade do  $^{222}\text{Rn}$ , porque o isótopo  $^{220}\text{Rn}$  também penetra no filme fino de ar, delimitado por duas placas paralelas de acrílico (15 cm X 15 cm), nas montagens que utilizamos.

Construímos então as montagens descritas na figura 2-7, sanduíche de placas paralelas, expondo vários detectores CR-39 em uma seqüência regularmente espaçada de filmes finos de ar, de forma a obter dados referentes ao decréscimo da atividade do  $^{220}\text{Rn}$  com o afastamento da parede.

As dimensões foram reduzidas para 7 cm X 7 cm para que maior quantidade de traços fossem produzidos pelo isótopo 220 e filhos. Essa redução nas dimensões implicaria no aumento do número de filhos do radônio, principalmente do isótopo 220, vindos de fora e que chegariam ao CR-39 no centro da cavidade. Um campo elétrico foi criado na entrada de cada cavidade para capturar os filhos do radônio vindos do ar do ambiente.

O radônio foi considerado neutro por ser um gás nobre. Na hipótese de ficar ionizado e ser atraído pelos eletrodos, o radônio não se liga quimicamente ao metal dos eletrodos justamente por ser gás nobre. Consideramos nesta hipótese que o átomo de radônio recupera o elétron e volta a ser neutro.

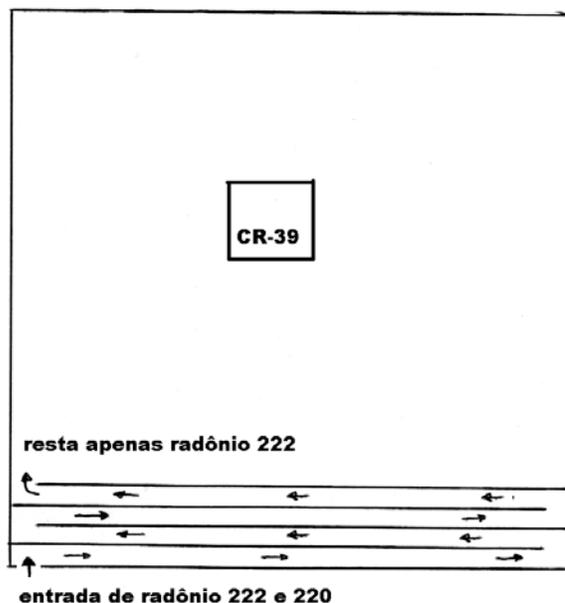
Os dados, ajustados por uma exponencial decrescente mais uma constante, nos permitiram obter a densidade de traços produzidos isoladamente por  $^{222}\text{Rn}$  e filhos no interior de cada uma das cavidades. A equação 2-2 utilizada está repetida abaixo:

$$\rho = \rho_{222} + \rho_{220} e^{-\frac{x}{l}}$$

Constatamos também nesse experimento que o alcance médio ( $l$ ) do  $^{220}\text{Rn}$  não ultrapassa cerca de 3 cm de distância à parede (vide tabela 2-1). Isto sugere uma pequena modificação na construção das montagens para a geometria de filme fino de ar (cavidade entre placas paralelas), de forma a impedir que o radônio 220 alcance o detector e possamos fazer uma medida da atividade do radônio 222 isenta de contaminação pelo isótopo 220.

Se obrigarmos o gás radônio a percorrer um labirinto na entrada da cavidade, com um percurso muito maior do que valor de  $l$ , a concentração do isótopo 220 na cavidade ficará várias ordens de grandeza menor que a concentração deste isótopo no ar do ambiente.

Os filhos ficarão grudados nas paredes do labirinto, preservando a característica dessa geometria, a de ser fechada para os filhos do radônio. A figura 5-1 ilustra o argumento que estamos utilizando.



**Figura 5-1:** Uma possibilidade de se medir a atividade do  $^{222}\text{Rn}$  isenta da contaminação por  $^{220}\text{Rn}$  bem como pelos filhos dos dois isótopos presentes no ambiente. Vista de topo da montagem de placas paralelas acrescentando um labirinto na entrada do gás radônio. O gás entra por difusão, não há correntes de ar no interior do labirinto.

Um detector para medir radônio 222 como sugerido na figura 5-1 poderia ser utilizado inclusive em ambientes com ventilação forçada, onde o isótopo 220 é arrastado para longe das paredes (ambiente 7, vide figura 2-3 b). Estudos recentes sugerem que essa montagem deve ser feita de material condutor [23] devido à possível perturbação que campos eletrostáticos produziram na medição da concentração do radônio.

## **5-2 Análise dos Resultados – Atividade dos Filhos do $^{220}\text{Rn}$ no Ar do Ambiente**

O maior mérito do experimento relatado no capítulo 4 foi o de identificar a presença do  $^{212}\text{Pb}$  no ar do ambiente 7. Os resultados apresentados nas figuras 4-4 e 4-5 separam os traços das alfas de 8,8 MeV ( $^{212}\text{Po}$ ) daqueles produzidos pelas alfas de 7,7 MeV ( $^{214}\text{Po}$ ).

O diagrama da figura 4-4 aponta caminhos a serem tomados na identificação das energias iniciais das alfas, associando-as ao tamanho médio dos traços. O traço escuro é profundo, produzido por alfa de maior energia. O diagrama mostra de forma muito evidente o corte que precisa ser feito na densidade óptica.

Essa forma de detectar os filhos do radônio não é, contudo adequada para qualquer ambiente. É útil como um laboratório piloto de testes. É uma montagem relativamente grande, devido à Gaiola de Faraday fios e bateria.

A colméia de colimadores pode ser utilizada para calibrar detectores CR-39 recobertos com degradador. Para utilizá-la desta forma basta substituir o CR-39 da parte inferior da figura 3-5 por um detector recoberto pelo degradador adequado ao experimento.

Se produzirmos degradadores de espessura maior do que os de  $54,4 \text{ g/m}^2$ , que utilizamos neste trabalho, a separação entre os picos vistos na figura 4-5 vai aumentar e os traços claros no lado esquerdo da figura 4-4 vão desaparecer.

Se testarmos degradadores com espessura entre  $54,4 \text{ g/m}^2$  e  $68,6 \text{ g/m}^2$  certamente encontraremos um valor ótimo no que se refere à separação das duas energias que estamos utilizando para identificar os filhos das duas cadeias: 8,8 MeV e 7,7 MeV.

Um degradador de espessura 68,6 g/m<sup>2</sup> equivale a 5,8 cm de ar (25 °C, 1 atm). A distância de 5,8 cm é justamente o alcance das alfas de 6,8 MeV do <sup>216</sup>Po (figura 2-4). Não é necessário ultrapassar essa espessura limite.

Com essa espessura limite, sugerida para a exposição do CR-39 com degradador, apenas as alfas de 8,8 e de 7,7 MeV alcançariam a superfície do detector. As energias residuais disponíveis seriam respectivamente 4,3 e 2,5 MeV.

A experiência que resultou nos gráficos da figura 2-6, se refeita com o degradador limite que sugerimos, mostraria apenas os dois picos em qualquer ambiente, inclusive com ventilação forçada. Os filhos depositados na face do degradador seriam capturados via “plate-out”.

Seria uma forma de se obter, sem aplicação de campo elétrico, o resultado expresso na equação 4-4 em qualquer ambiente, independente das condições da ventilação deste ambiente.

Seria ainda um teste para a hipótese de que o número de emissores depositados na janela da colméia, pelo campo elétrico, foi proporcional à concentração dos filhos na vizinhança da Gaiola de Faraday.

### **5-3: Conclusão**

Obtivemos um decréscimo muito rápido da atividade do <sup>220</sup>Rn com a distância da parede. Identificamos os filhos do <sup>220</sup>Rn e do <sup>222</sup>Rn, no ambiente utilizado como laboratório, capturando-os em uma gaiola de Faraday invertida acoplada à colméia de colimadores. Separamos as atividades de <sup>220</sup>Rn e <sup>222</sup>Rn utilizando um sanduíche de placas paralelas. A metodologia desenvolvida aqui dá a possibilidade de se determinar as atividades de cada um dos filhos de <sup>220</sup>Rn e do <sup>220</sup>Rn com o uso de degradadores acoplados aos detectores, que devem ser devidamente calibrados com a colméia de colimadores.

## Referências

1. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, Projeto RadamBrasil, Levantamento de Recursos Naturais, vol.32, p.261, 1983.
2. SYF Chu, LP Ekström and RB Firestone, WWW Table of Radioactive Isotopes, database version 1999-02-28 from URL <http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/toi/>
3. Cartwright BG, and Shirk EK, “A Nuclear-Track-Recording Polymer of Unique Sensitivity and Resolution “, Nucl. Instr. and Meth., 153, 457-460, 1978.
4. Cassou RM, and Benton EV, “Properties and Applications of CR-39 Polymeric Nuclear Track Detector”, Nucl. Track. Detection., 2, 173-179,1978.
5. Somogyi G, and Szalay SA, “Track-Diameter Kinetics in Dielectric Track Detectors”, Nucl. Instr. and Meth., 109, 211-232,1973.
6. Green PF, Ramli AG, Al-Najjar SAR., Abu-Jarad, and Durrani SA, “A Study of Bulk-Etch Rates and Track-Etch Rates in CR-39”, Nucl. Instr. and Meth., 203, 551-559,1982.
7. Paulo SR, Tese de Doutorado, IFGW – UNICAMP, ago/1991.
8. Neman RS, Schmitman ID, Hadler JC, Iunes PJ, Paulo SR, Guedes S, “Measurement of indoor Rn-222 using CR-39 under a thin film geometry”, Rad. Meas. 34, 145-148, 2001.
9. Hadler JC, Paulo SR, “Indoor Radon Daughter Contamination Monitoring - The Absolute Efficiency Of Cr-39 Taking Into Account The Plate-out Effect And Environmental-Conditions” Radiat. Protect. Dosim. 51, 283-296, 1994.
10. Godoy M, Hadler JC, Iunes PJ, Mestanza SN, Oliveira RA, Osorio AM, Paulo SR, “Effects of environmental conditions on the radon daughters spatial distribution” Radiat. Measurem. 35, 213-221, 2002.

11. Bethe HA, Ashkin J, “Experimental Nuclear Physics”, vol 1, John Wiley & Sons, New York. pp. 166-248, (1955)
12. Zuniga Gamarra AR, Tese de Doutorado, IFGW-UNICAMP, 1998
13. Wrenn ME, Rosen JC, Van Pelt WR, “Steady State Solutions for the Diffusion Equations of Radon-222 Daughters”, Health Phys., 16, 647-656, 1969
14. Jonassen N, “The Effect of Electric Fields on  $^{222}\text{Rn}$  Daughter Products in Indoor Air”, Health Phys., 45, 487-491, 1983
15. Postendörfer J, Mercer TT, “Influence of Electric Charge and Humidity upon the Diffusion Coefficient of Radon Decay Products”, Health Phys., 37, 191-199, 1979
16. Reif R, “Fundamentals of Statistical and Thermal Physics”, McGraw Hill, Tokio, 483-484, (1965).
17. Chamberlain AC, Dyson ED, Br. J. Radiol. 29, 317, 1956
18. Meyerhof WE, “Elements of Nuclear Physics”, McGraw Hill, Colorado, 117, (1967).
19. Krane KS, “Introductory Nuclear Physics”, Wie Wiley, Singapore, 194, (1988).
20. Abreu SF, “Recursos Minerais do Brasil”, vol 2, MIC - Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro, 633, (1962).
21. Nikolaev VA, Ilic R, “Etched track radiometers in radon measurements: a review”, Radiat. Measure. 30, 1-13, 1999
22. George AC, “State-of-the-art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings – a review”, Health Phys, 70, 451-463, 1996
23. Neman RS, comunicação pessoal.