

Processo: 2005/01758-8

“Otimização de um sistema de detecção da atividade alfa do ^{222}Rn e filhos no ar ambiental e comparação entre este sistema, que utiliza o CR-39 como detector e outro, que utiliza o LR-115”.

Aluno: Osvaldo Luiz dos Santos Pereira

Orientador: Dr. Pedro José Iunes

Co-orientador: Prof. Dr. Julio Cesar Hadler Neto

Resumo

Neste trimestre, foram feitas novas tentativas de encontrar o ataque SMW otimizado, capaz de diminuir consideravelmente o tempo em laboratório, dessa vez utilizando diferentes concentrações de solução NaOH e metanol, foram realizadas também novas exposições com fonte de **radio natural** nos detectores LR-115 e CR-39 durante um curto intervalo de tempo, para que fosse possível a comparação entre os dois, sendo essa a parte em laboratório da Iniciação científica. A parte teórica consistiu de aprofundamento bibliográfico (artigos e teses), além de refazer os cálculos da monitoração em Poços de Caldas.

Objetivo

Nesta etapa final da iniciação científica, tivemos como objetivo estudar um outro tipo de detector do tipo estado sólido (SSNTD), o LR-115, realizando irradiação no detector e fazendo o ataque químico, para que fosse possível a comparação com os dados colhidos utilizando o CR-39. Tivemos ainda o objetivo de refazer os cálculos do tratamento estatístico, utilizando os dados colhidos na monitorização em Poços de Caldas, e comparar os resultados obtidos, realizando algumas mudanças na montagem utilizada, e comparando então os resultados obtidos, dando ênfase ao erro obtido ao calcular atividade dos filhos do Radônio devido ao plate-out, e os erros propagados no cálculo da atividade total alfa.

1 – Ataques químicos

1.1 – Resumo sobre os ataques químicos utilizados

Nesta iniciação científica, foram estudados dois tipos de ataque químico para revelação dos traços de partícula alfa em CR-39, o ataque padrão e o ataque SMW otimizado (Matiullah, 2005). E foi estudado ataque padrão para o ataque de traços no LR-115.

O ataque padrão (NaOH) CR-39 foi estudado logo no início da iniciação científica, com bons resultados, foi realizado pelo próprio aluno, para se adquirir experiência em laboratório experimental, e proporcionar amostras para observação ao microscópio, além de servir como amostra de comparação com a nova proposta de solução de ataque químico contendo o metanol (SMW) como solvente, que prometia um menor tempo de ataque para revelar traços de mesma propriedade que o ataque padrão.

O ataque químico ao LR-115 foi feito no último trimestre (outubro-dezembro) da iniciação científica, utilizando o ataque padrão (Laboratório de Dosimetria do IF/USP).

1.2 – Ataque Padrão CR-39

O ataque padrão utilizado no grupo Cronologia (DRCC-UNICAMP), consiste de uma solução de NaOH 6M (Seis Molar) em água à 70°C, o tempo de duração do ataque é de 400 minutos, em banho térmico.

Os traços ficam bem revelados, com grau de opacidade excelente, e diâmetros da ordem de dez micrometros (10 μm), perfeito para a observação ao microscópio, como pode ser visto na figura abaixo:

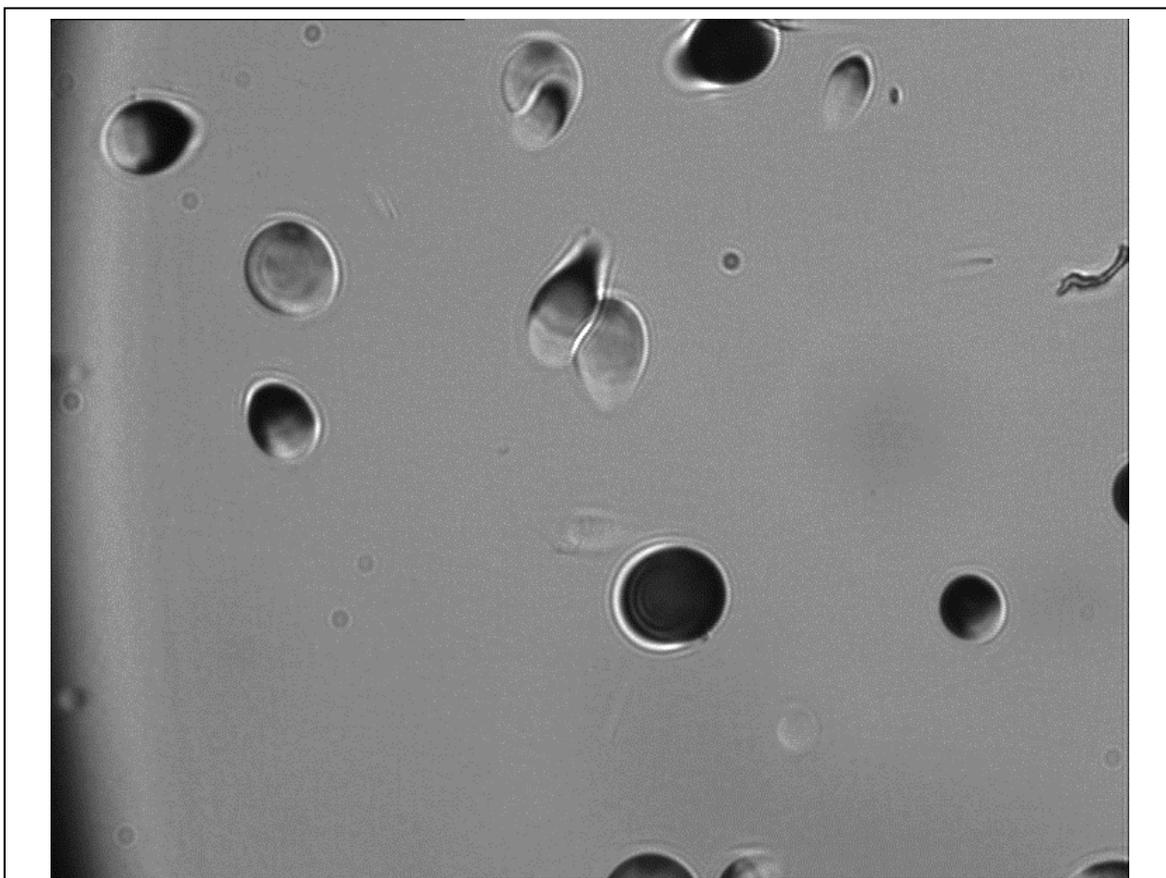


Figura 1.2.1 – Traços de partículas alfa de radônio e filhos atacados com 6M NaOH em água a 70 °C por 400 minutos aumento 50(objetiva)x ~20 (câmera CCD).

2 – Detectores

2.1 – Considerações sobre o CR-39

Nesta iniciação, trabalhou-se em sua maior parte estudando o CR-39 como detector, procurando uma solução para o ataque químico otimizado, onde se gastasse menos tempo no laboratório.

Devido a sua forma compacta, e resistente, o CR-39 apresentou qualidades importantes, tanto para a medição no campo (domicílios habitados), quanto na irradiação usando fontes (irradiação na campânula).

Apresentou fácil manuseio tanto no ataque químico, quanto na irradiação dentro da campânula, utilizando-se fonte sintética ^{252}Cf , foi utilizado em maior parte na iniciação científica, devido a busca pelo ataque químico utilizado, e na observação ao microscópio óptico, a única dificuldade foi recortá-lo para obter um maior numero de amostras, devido a sua robustez, como um plástico de grandes cadeias carbonadas e alta massa molecular.

O ponto forte do CR-39, é o fato dele ter uma sensibilidade maior a partículas alfa, de energias até 7 Mev, apresentou características de um espectrômetro alfa (Augustin, 1998), podendo-se ter uma boa correlação entre as características observáveis ao microscópio como diâmetro do traço, opacidade, e características, devido a geometria do detector e das próprias partículas como ângulo de incidência, energia e ângulo crítico de detecção.

O fato de ser um espectrômetro alfa, mostrou-se uma ótima qualidade, pois permite a separação de diversos tipos de traço, isso por que traços de partículas mais energéticas são muito escuros (opacidade) observados no software

CRTRAN, dessa maneira é possível distinguir os traços devido ao auto plate-out dos traços devido a atividade alfa do Radônio sendo os traços mais claros, pois sofreram perda de energia no ar, até ser detectado pelo CR-39.

Uma das dificuldades do uso do CR-39 como detector é o estudo de seu background, isso devido a suas cadeias carbonadas e de grande massa molar, apresentam uma grande interação com partículas muito energéticas, fato este que fica evidente sob ataques químicos mais demorados, quanto mais longo for o tempo de ataque mais traços devido ao background ficam evidentes (Paulo,1991), dessa maneira exclui-se a possibilidade de eliminar o background através do ataque químico, dessa maneira em todos os cálculos deverão ser feitos levando-se em conta o background.

2.2 – LR-115

O LR-115 é um nitrato de celulose de fórmula molecular $C_5H_8O_9N_2$ de cor avermelhada, porém translúcido, disponível comercialmente em lâminas de aproximadamente treze micrometros ($13 \mu m$) de espessura, montadas sobre uma base de plástico transparente comum (idêntico aos utilizados em filmes fotográficos). O ataque químico ideal, utilizado para revelar os traços no LR-115 é utilizando uma solução 2,5N de NaOH a $60^\circ C$, sendo utilizada pela maioria dos pesquisadores que trabalham com esse tipo de detector.

O tempo de ataque pode ser variado, dependendo do objetivo dos experimentos e da condição de observação desejada por cada pesquisador. Caso a observação seja feita manualmente por um observador humano, é utilizado um tempo de ataque de curta duração, para não deformar os traços do detector, o que

dificultaria a distinção entre os traços e defeitos no detector, que são revelados durante o ataque químico, juntamente com os traços de partículas alfa.

Nesta parte da Iniciação Científica, foram expostos a uma fonte de Radio Natural três detectores LR-115, por tempos respectivos de cinco (5), trinta (30) e sessenta (60) segundos, e depois atacados quimicamente, utilizando a solução usual, por um tempo de noventa (90) minutos.

2.3 – SMW Otimizado

Foi feita uma última tentativa de descobrir um ataque SMW Otimizado, com diferente concentração de soluto em solução, da seguinte maneira: 40 gramas de NaOH em água, e 100 ml, sendo 400 ml o volume de solução total, perfazendo uma solução um molar de NaOH.

Foram realizados três ataques químicos em três amostras do detector CR-39, com os respectivos tempos de trinta (30), quarenta e cinco (45) e sessenta (60) minutos. Os traços revelados foram observados ao microscópio e continuam sendo revelados de forma insatisfatória, a característica espelhada continua a aparecer, e o tamanho dos traços continua pequeno, para uma melhor observação. Essa tentativa de solução SMW, foi feita com o intuito de testar os efeitos do metanol na solução, acreditamos que ele seja responsável por consumir o detector na direção do Bulk (V_B), por isso os traços apareceriam muito rasos e pequenos. Mesmo diminuindo bastante a quantidade de metanol, foi possível ver que os detectores são rapidamente consumidos pelo metanol, mesmo a uma temperatura de solução consideravelmente baixa de 55°C , mas mesmo assim acima da temperatura de ebulição do metanol, que reage rapidamente com a água

acrescentando o íon comum, hidroxila responsável pelo consumo do detector plástico. Mesmo sendo rapidamente consumido na reação com água e o NaOH, e devido a suas propriedades termodinâmicas, o metanol tem peso considerável no que se trata de consumo do detector no bulk.

2.4 – Detecção de Radônio e o efeito do Plate-Out

O Radônio por se tratar de um gás nobre, e não realizarem ligações químicas tão facilmente, apresenta uma grande difusão em diversos tipos de ambientes, mesmo em domicílios e ambientes de trabalho como indústrias, e locais de construção (presentes no solo, como filho de elementos mais pesados, como o Tório). Além disso não se agregam nos órgãos da respiração, durante esse processo, logo neste ramo de pesquisa, não nos preocupamos com a contaminação pela radiação alfa, diretamente do Radônio, e sim dos seus filhos, pois estes podem ser ionizados facilmente, além de se agregarem a superfícies de diversos materiais, e aerossóis, o que aumenta muito o livre caminho médio de tais partículas.

Acreditamos que presas a aerossóis, os filhos do radônio possam se prender durante a respiração a células sanguíneas, e ali se tornarem maléficas devido a radiação alfa proveniente.

A montagem utilizada para detectar atividade alfa proveniente de Radônio e filhos, era provida de dois detectores, interno e externo a montagem (para mais detalhes ver seção 3.1). Uma das grandes dificuldades na área de detecção de atividade alfa, é justamente o fato de que os filhos do Radônio se “prendem” facilmente a superfícies de materiais, devido à facilidade em se ligar quimicamente a tais

estruturas (estão ionizados). Por isso no calculo da densidade de traços devem ser levados em conta os traços dos filhos que se prendem a superfície do detector, esse fenômeno é chamado de Plate-Out.

Um dos objetivos deste trabalho de iniciação científica, foi trabalhar em cima dos dados colhidos por (Neman,2004) e desenvolver e/ou melhorar a metodologia para o calculo correlacionado das densidades de traços com a atividade alfa proveniente de Radônio e filhos. O problema a ser tratado era que ao trabalhar com as atividades medidas (detectores externo e interno), o calculo da atividade total, seria a soma dessas duas atividades, mas o erro calculado seria muito alto, e no trabalho com a correlação de radiação com Câncer, seria necessária uma precisão muito grande nas doses, daí o trabalho a ser desenvolvido.

3 – Tratamento Estatístico

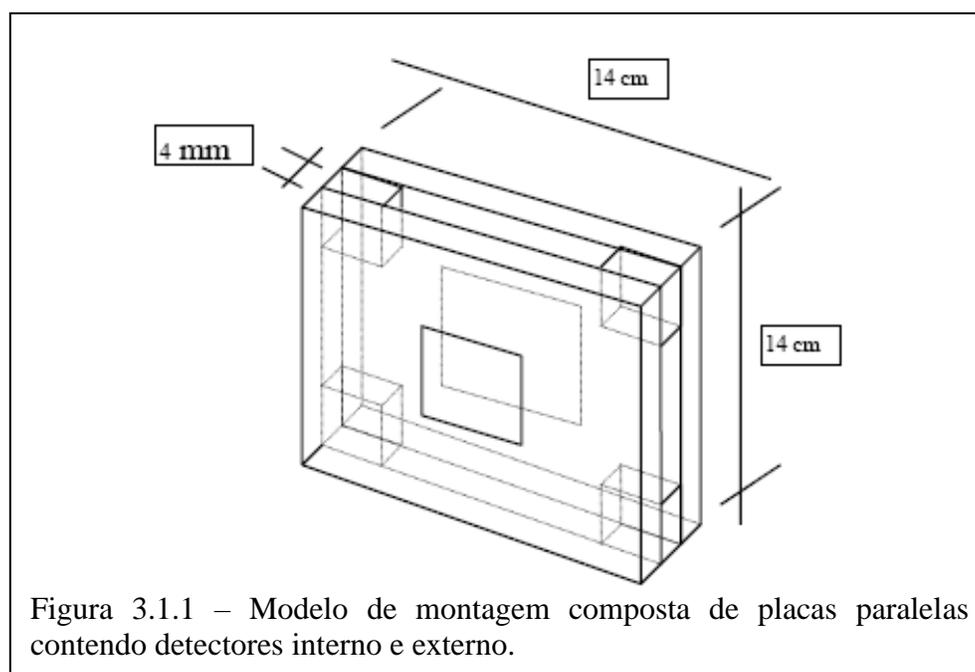
3.1 – Montagem de Alumínio

Esta montagem consiste de placas paralelas, composta por duas placas acrílicas com 14 cm de lado, distantes 4 mm uma da outra por meio de 4 separadores com 1.5 cm de lado localizados nos vértices das placas. Assim, a abertura de cada lateral da montagem equivale a 11 cm (14 cm – 2x1.5 cm). Dois detectores CR-39 são utilizados: um externo e outro interno.

O detector externo registra as emissões alfa que ocorrem no ar, próximas ao mesmo, devido aos emissores alfa ^{222}Rn , ^{218}Po e ^{214}Po , sendo possível utilizar este detector como um espectrômetro alfa caso sejam considerados apenas os

traços com excentricidade menor que 1.10 e condições de ataque químico padrão (solução 6.25 mol l^{-1} de NaOH, 70°C , 400 minutos).

Esta restrição é necessária, pois o detector externo está sujeito a uma geometria de exposição de 2π sem o uso de qualquer degradador de energia ou barreira de difusão, dessa maneira partículas alfa incidem sobre ele independentemente da energia e ângulo de incidência. Assim, a detecção está sujeita às características do CR-39, quais sejam, ângulo crítico e energia de incidência que neste detector não são variáveis independentes.



Neste tipo de montagem, foram utilizados detectores interno e externo, tendo sido observados traços de três tipos, citados logo abaixo:

- i) Traços claros formados devido a emissões alfa no ar a uma grande distância do detector.

- ii) Traços devido a emissões alfa no ar a uma distância intermediária do detector.
- iii) Traços escuros formados devido a emissões alfa muito próximas ao detector e emissões alfa de radionuclídeos depositados sobre o detector, ou seja, (traços de autodeposição) .

Nesta etapa da iniciação científica, foram refeitos os cálculos de atividade, correlacionados aos traços do tipo 3 (ρ_{iii}), cuja medição foi feita em Poços de Caldas (Neman,2004), e os dados comparados com o trabalho original.

3.2 – Dados de Poços de Caldas para o detector interno

Os dados de densidade e erro na densidade foram colhidos da Tese, Monitoração em Poços de Caldas, de Rodrigo Neman, e se encontram na pagina 65 da mesma (Densidade de traços de Dosimetro de alumínio).

$$A_0 = \frac{2\rho_{iii}}{t_e \varepsilon d \left[\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right) \right]} \quad (3.2.1)$$

- ρ é a densidade de traços medida no detector CR-39.
- t_e é o tempo de exposição.
- ε é o fator de eficiência de detecção do CR-39.
- d é a distância entre a superfície do detector e a placa oposta.
- R_0 , R_1 e R_3 são os alcances no ar das partículas alfa do ^{222}Rn , ^{214}Po e ^{210}Po , respectivamente.

Os valores encontrados para R_0 , R_1 e R_3 foram:

$$R_0 \pm \sigma_{R_0} = (0,0424 \pm 0,0042) \text{ m (para a alfa do } ^{222}\text{Rn, com energia de 5.49 MeV)}$$

$$R_1 \pm \sigma_{R1} = (0,0481 \pm 0,0048) \text{ m (para a alfa do } ^{218}\text{Po, com energia de 6.00 MeV)}$$

$$R_3 \pm \sigma_{R3} = (0,0714 \pm 0,0071) \text{ m (Para a alfa do } ^{214}\text{Po, com energia de 7.69 MeV)}$$

$$\varepsilon \pm \sigma_\varepsilon = 0,55 \pm 0,02$$

$$d \pm \sigma_d = (0,00400 \pm 0,00040) \text{ m}$$

Onde os erros de R_0 , R_1 e R_3 foram tomados como sendo 10% do valor do alcance obtido a partir da curva de Bethe e Ashkin. O fator de eficiência do CR-39 utilizado neste relatório foi apresentado por Hadler e Paulo (1994). O valor de d foi obtido subtraindo-se a espessura do CR-39 (1.0 mm) da altura interna do cilindro utilizado na montagem de alumínio (5.0 mm). Também neste caso se assumiu um erro de 10% no valor do parâmetro.

$$A_0 = 315,30 \frac{\rho_{iii}}{t_e} \quad (3.2.2)$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial \rho_{iii}} = \frac{2}{t_e \varepsilon d \left[\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right) \right]} = \frac{A_0}{\rho_{iii}} \quad (3.2.3)$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial t_e} = - \frac{2\rho_{iii}}{t_e^2 \varepsilon d \left[\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right) \right]} = - \frac{A_0}{t_e} \quad (3.2.4)$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial \varepsilon} = - \frac{2\rho_{iii}}{t_e \varepsilon^2 d \left[\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right) \right]} = - \frac{A_0}{\varepsilon} = -1,8181A_0 \quad (3.2.5)$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial d} = - \frac{2\rho_{iii}}{t_e \varepsilon} \frac{\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{R_j} \right)}{\left[\sum_{j=0,1,3} \left(d - \frac{d^2}{2R_j} \right) \right]^2} = \frac{\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{R_j} \right)}{\sum_{j=0,1,3} \left(d - \frac{d^2}{2R_j} \right)} A_0 = 239,8A_0 \quad (3.2.6)$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial R_0} = \frac{2\rho_{iii}}{t_e \varepsilon d \left[\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right) \right]^2} \left(\frac{d}{2R_0^2} \right) = \left(\frac{d}{2R_0^2} \right) \frac{A_0}{\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right)} = 0,38A_0 \quad (3.2.7)$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial R_1} = \frac{2\rho_{iii}}{t_e \varepsilon d \left[\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right) \right]^2} \left(\frac{d}{2R_1^2} \right) = \frac{d}{2R_1^2} \frac{A_0}{\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right)} = 0,29A_0 \quad (3.2.8)$$

$$\frac{\partial A_0}{\partial R_3} = \frac{2\rho_{iii}}{t_e \varepsilon d \left[\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right) \right]^2} \left(\frac{d}{2R_3^2} \right) = \frac{d}{2R_3^2} \frac{A_0}{\sum_{j=0,1,3} \left(1 - \frac{d}{2R_j} \right)} = 0,13A_0 \quad (3.2.9)$$

$$\sigma_{A_0}(\rho_{iii}, t_e) = \pm A_0 \sqrt{\frac{\sigma_{\rho_{iii}}^2}{\rho_{iii}^2} + \frac{\sigma_{t_e}^2}{t_e^2} + 0,01053} \quad (3.2.10)$$

O erro referente ao tempo de exposição foi tomado como sendo de 12 horas, ou seja: $\sigma_{te} = 0,004320 \times 10^7$ segundos. Este erro está claramente superestimado, mas, como será visto abaixo, ele praticamente não interfere no erro de A_0 , já que os tempos de exposição são longos.

Na Tabela 3.2.1 estão mostrados os resultados de ρ_{iii} e t_e apresentados em Neman (2004) e os valores de A_0 e σ_{A_0} . Nesta tabela, os valores de A_0 são da ordem de 25% maiores que os apresentados em Neman (2004). Isto se deve ao fato de que em Neman (2004) foi utilizado nos cálculos de A_0 , o valor de $d = 5.0$ mm e não $d = 4.0$ mm como neste relatório (Neman, comunicação pessoal). Ou seja, a espessura do CR-39 não foi descontada da altura interior do cilindro.

Para se estimar o peso do erro de um determinado parâmetro presente na equação 10 no erro de A_0 , se efetuou a razão entre a variância do parâmetro em

questão e a variância de A_0 . Desta forma foram obtidos os percentuais das variâncias dos parâmetros em relação as variâncias das atividades de radônio,

$\sigma^2_{\text{parâmetro}}/\sigma^2_{A_0}$:

$$\sigma^2_{\rho_{\text{iii}}}/\sigma^2_{A_0} = (\sigma_{\rho_{\text{iii}}}/\sigma_{A_0})^2 (\partial A_0/\partial \rho_{\text{iii}})^2 \quad (3.2.11)$$

$$\sigma^2_{\varepsilon}/\sigma^2_{A_0} = (\sigma_{\varepsilon}/\sigma_{A_0})^2 (\partial A_0/\partial \varepsilon)^2 \quad (3.2.12)$$

$$\sigma^2_{t_e}/\sigma^2_{A_0} = (\sigma_{t_e}/\sigma_{A_0})^2 (\partial A_0/\partial t_e)^2 \quad (3.2.13)$$

$$\sigma^2_d/\sigma^2_{A_0} = (\sigma_d/\sigma_{A_0})^2 (\partial A_0/\partial d)^2 \quad (3.2.14)$$

$$\sigma^2_{R_j}/\sigma^2_{A_0} = (\sigma_{R_j}/\sigma_{A_0})^2 (\partial A_0/\partial R_j)^2 \quad (3.2.15)$$

Na Tabela 3.2.2 são apresentados os percentuais das variâncias dos parâmetros ρ_{iii} , ε , t_e , d , R_0 , R_1 e R_3 .

Tabela 3.2.1 - resultados de ρ_{iii} e t_e apresentados em Neman (2004) e os valores de A_0 e σ_{A_0}.			
Residência	$\rho_{\text{iii}} \pm \sigma_{\rho_{\text{iii}}} (\times 10^4 \text{m}^{-2})$	$A_0 \pm \sigma_{A_0} (\text{Bq.m}^{-3})$	$t_e \pm \sigma_{t_e} (\times 10^7 \text{s})$
1	554 ± 38	105 ± 13	1,659 ± 0,004
2	445 ± 34	84 ± 11	1,659 ± 0,004
3	467 ± 35	87 ± 11	1,676 ± 0,004
4	437 ± 34	82 ± 11	1,676 ± 0,004
5	1371 ± 61	261 ± 29	1,659 ± 0,004
6	976 ± 52	186 ± 22	1,650 ± 0,004
7	658 ± 42	126 ± 15	1,650 ± 0,004
8	1623 ± 67	307 ± 34	1,668 ± 0,004
9	617 ± 40	119 ± 14	1,642 ± 0,004
10	1000 ± 52	188 ± 22	1,676 ± 0,004
11	1069 ± 54	203 ± 23	1,659 ± 0,004
12	414 ± 33	79 ± 10	1,650 ± 0,004
13	2127 ± 77	409 ± 44	1,642 ± 0,004
14	1115 ± 55	214 ± 24	1,642 ± 0,004
15	611 ± 40	117 ± 14	1,642 ± 0,004
16	790 ± 46	149 ± 18	1,668 ± 0,004
17	407 ± 32	77 ± 10	1,668 ± 0,004
18	763 ± 45	146 ± 17	1,650 ± 0,004
19	1854 ± 72	354 ± 39	1,650 ± 0,004
20	387 ± 31	73 ± 10	1,668 ± 0,004
21	787 ± 71	148 ± 20	1,676 ± 0,004
22	1187 ± 88	227 ± 29	1,650 ± 0,004
23	527 ± 57	101 ± 15	1,650 ± 0,004

24	1153 ± 86	220 ± 28	1,650 ± 0,004
25	1139 ± 86	219 ± 28	1,642 ± 0,004
26	572 ± 60	108 ± 16	1,668 ± 0,004
27	663 ± 65	127 ± 18	1,650 ± 0,004
28	656 ± 64	126 ± 18	1,642 ± 0,004
29	499 ± 55	96 ± 14	1,642 ± 0,004
30	531 ± 57	102 ± 15	1,642 ± 0,004
31	465 ± 53	89 ± 14	1,650 ± 0,004
32	1432 ± 97	275 ± 34	1,642 ± 0,004
33	119 ± 88	229 ± 29	1,642 ± 0,004
34	466 ± 53	88 ± 13	1,668 ± 0,004
35	1321 ± 93	254 ± 32	1,642 ± 0,004
36	691 ± 66	132 ± 19	1,650 ± 0,004
37	1213 ± 89	232 ± 29	1,650 ± 0,004
38	1290 ± 92	254 ± 32	1,598 ± 0,004
39	265 ± 39	50 ± 9	1,650 ± 0,004

Tabela 3.2.2 - Percentuais das variâncias dos parâmetros ρ_{iii} , e , t_e , d , R_0 , R_1 e R_3 .

Residência	σ^2_d/σ^2_{A0}	$\sigma^2_{R0}/\sigma^2_{A0}$	$\sigma^2_{R1}/\sigma^2_{A0}$	$\sigma^2_{R3}/\sigma^2_{A0}$	$\sigma^2_{\rho_{iii}}/\sigma^2_{A0}$	$\sigma^2_{t_e}/\sigma^2_{A0}$	$\sigma^2_\varepsilon/\sigma^2_{A0}$
1	60,37	0,017	0,013	0,006	30,87	0,04	8,68
2	56,19	0,016	0,012	0,005	35,65	0,04	8,08
3	56,96	0,016	0,012	0,005	34,77	0,04	8,19
4	55,46	0,015	0,012	0,005	36,49	0,03	7,97
5	73,51	0,02	0,015	0,007	15,82	0,05	10,56
6	68,79	0,019	0,014	0,006	21,22	0,04	9,89
7	62,97	0,017	0,013	0,006	27,89	0,04	9,05
8	75,17	0,021	0,016	0,007	13,92	0,05	10,8
9	62,42	0,017	0,013	0,006	28,52	0,04	8,97
10	69,49	0,019	0,015	0,006	20,42	0,04	9,99
11	70,3	0,019	0,015	0,007	19,5	0,04	10,1
12	54,48	0,015	0,011	0,005	37,62	0,03	7,83
13	77,67	0,022	0,016	0,007	11,06	0,05	11,16
14	70,94	0,02	0,015	0,007	18,76	0,17	10,19
15	62,08	0,017	0,013	0,006	28,92	0,49	8,92
16	66,07	0,018	0,014	0,006	25,12	0,32	9,49
17	55,04	0,015	0,012	0,005	38,15	1	7,91
18	65,65	0,018	0,014	0,006	25,08	0,33	9,43
19	76,39	0,021	0,016	0,007	12,65	0,07	10,98
20	54,27	0,015	0,011	0,005	39,06	1,09	7,8
21	49,27	0,014	0,01	0,005	45,44	0,24	7,08
22	57,39	0,016	0,012	0,005	34,64	0,12	8,25
23	41,38	0,011	0,009	0,004	53,17	0,44	5,95
24	57,15	0,016	0,012	0,005	34,92	0,13	8,21
25	56,66	0,016	0,012	0,005	35,11	0,13	8,14
26	42,72	0,012	0,009	0,004	52,71	0,39	6,14
27	45,67	0,013	0,01	0,004	48,21	0,31	6,56
28	45,88	0,013	0,01	0,004	47,46	0,31	6,59

29	40,56	0,011	0,009	0,004	53,55	0,48	5,83
30	41,71	0,012	0,009	0,004	52,24	0,43	5,99
31	39,11	0,011	0,008	0,004	55,8	0,53	5,62
32	60,83	0,017	0,013	0,006	30,34	0,09	8,74
33	57,49	0,016	0,012	0,005	34,17	0,12	8,26
34	39,2	0,011	0,008	0,004	56,87	0,54	5,63
35	59,39	0,016	0,013	0,005	31,99	0,1	8,53
36	46,8	0,013	0,01	0,004	46,9	0,29	6,73
37	57,8	0,016	0,012	0,005	34,17	0,12	8,31
38	58,89	0,016	0,012	0,005	30,87	0,1	8,46
39	28,58	0,008	0,006	0,003	67,98	1,2	4,11

3.3 – Dados de Poços de Caldas para o detector externo

A concentração superficial (G) dos filhos do Radônio depositados no detector, é dada por (Unidades de Bq.cm⁻².a⁻¹):

$$G = 2 \frac{\rho_{iii}}{\chi t_e} \quad (3.3.1)$$

Onde t_e é o tempo de exposição em anos, ρ_{iii} é a densidade de traços do tipo iii em cm⁻² e χ é o fator (adimensional) de calibração para a medida, definida como o quociente entre a densidade de traços redondos (e ≤ 1.10) e a densidade de traços total, ambos para traços de auto-deposição, tendo sido determinado experimentalmente e obtido o valor (Paulo, 91):

$$\chi = (6.4 \pm 0.5)\% \quad (3.3.2)$$

Os dados de densidade utilizados para este tratamento estatístico, foi o mesmo utilizado (densidades de traço ρ_{iii} para as 39 residências) na seção 3.2. A equação 3.3.1 toma a seguinte forma:

$$G = 31.25 \frac{\rho_{iii}}{t_e} \quad (3.3.3)$$

A teoria de propagação de erros nos proporciona as seguintes equações:

$$\sigma_G^2 = \left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{iii}} \right)^2 \sigma_{\rho_{iii}}^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \chi} \right)^2 \sigma_{\chi}^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial t_e} \right)^2 \sigma_{t_e}^2 \quad (3.3.4)$$

$$\frac{\partial G}{\partial \rho_{iii}} = \frac{2}{\chi t_e} = \frac{G}{\rho_{iii}} \quad (3.3.5)$$

$$\frac{\partial G}{\partial \chi} = -\frac{2\rho_{iii}}{\chi^2 t_e} = -\frac{G}{\chi} \quad (3.3.6)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t_e} = -\frac{2\rho_{iii}}{\chi t_e^2} = -\frac{G}{t_e} \quad (3.3.7)$$

Inserindo as relações 3.3.5 a 3.3.7 em 3.3.4, temos o seguinte resultado:

$$\Rightarrow \sigma_G^2 = \left(\frac{G}{\rho_{iii}} \right)^2 \sigma_{\rho_{iii}}^2 + \left(-\frac{G}{\chi} \right)^2 \sigma_{\chi}^2 + \left(-\frac{G}{t_e} \right)^2 \sigma_{t_e}^2$$

E a equação 3.3.4 toma a seguinte forma:

$$\sigma_G(\rho_{iii}, t_e) = \pm G \sqrt{\frac{\sigma_{\rho_{iii}}^2}{\rho_{iii}^2} + \frac{\sigma_{t_e}^2}{t_e^2} + 0,0061} \quad (3.3.8)$$

Da mesma maneira que na seção 3.2, foram calculados os percentuais das variâncias dos parâmetros em relação as variâncias das atividades do auto Plate-

Out, $\sigma^2_{\text{parâmetro}}/\sigma^2_G$:

$$\sigma^2_{\rho_{iii}}/\sigma^2_G = (\sigma_{\rho_{iii}}/\sigma_G)^2 (\partial G/\partial \rho_{iii})^2 \quad (3.3.9)$$

$$\sigma^2_{t_e}/\sigma^2_G = (\sigma_{t_e}/\sigma_G)^2 (\partial G/\partial t_e)^2 \quad (3.3.10)$$

$$\sigma^2_{\chi} / \sigma^2_G = (\sigma_{\chi} / \sigma_G)^2 (\partial G / \partial \chi)^2 \quad (3.3.11)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial G}{\partial \rho_{iii}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{\rho_{iii}}}{\sigma_G} \right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \chi} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{\chi}}{\sigma_G} \right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial t_e} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{t_e}}{\sigma_G} \right)^2 = 1$$

$$\Rightarrow \left(\frac{G}{\rho_{iii}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{\rho_{iii}}}{\sigma_G} \right)^2 + \left(-\frac{G}{\chi} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{\chi}}{\sigma_G} \right)^2 + \left(-\frac{G}{t_e} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{t_e}}{\sigma_G} \right)^2 = 1$$

Dessa maneira temos os parâmetros normalizados, e podemos analisar o peso de cada grandeza relacionada na equação 3.3.1.

Tabela 3.3.1 - Valores calculados da atividade do Plate-Out para o detector externo (Monitorização em Poços de Caldas).			
Residência	$\rho_{iii} \pm \sigma_{\rho_{iii}} \times (10^4 \text{m}^{-2})$	$t_e \pm \sigma_{t_e} \times (10^7 \text{s})$	$G \pm \sigma_G \text{ (Bq.m}^{-2}\text{)}$
1	554 ± 38	1,659 ± 0,004	10 ± 1
2	445 ± 34	1,659 ± 0,004	8 ± 1
3	467 ± 35	1,676 ± 0,004	9 ± 1
4	437 ± 34	1,676 ± 0,004	8 ± 1
5	1371 ± 61	1,659 ± 0,004	26 ± 2
6	976 ± 52	1,65 ± 0,004	18 ± 2
7	658 ± 42	1,65 ± 0,004	12 ± 1
8	1623 ± 67	1,668 ± 0,004	30 ± 3
9	617 ± 40	1,642 ± 0,004	12 ± 1
10	1000 ± 52	1,676 ± 0,004	19 ± 2
11	1069 ± 54	1,659 ± 0,004	20 ± 2
12	414 ± 33	1,65 ± 0,004	8 ± 1
13	2127 ± 77	1,642 ± 0,004	40 ± 3
14	1115 ± 55	1,642 ± 0,004	21 ± 2
15	611 ± 40	1,642 ± 0,004	12 ± 1
16	790 ± 46	1,668 ± 0,004	15 ± 1
17	407 ± 32	1,668 ± 0,004	8 ± 1
18	763 ± 45	1,65 ± 0,004	14 ± 1
19	1854 ± 72	1,65 ± 0,004	35 ± 3
20	387 ± 31	1,668 ± 0,004	7 ± 1
21	787 ± 71	1,676 ± 0,004	15 ± 2
22	1187 ± 88	1,65 ± 0,004	22 ± 2
23	527 ± 57	1,65 ± 0,004	10 ± 1
24	1153 ± 86	1,65 ± 0,004	22 ± 2
25	1139 ± 86	1,642 ± 0,004	22 ± 2
26	572 ± 60	1,668 ± 0,004	11 ± 1
27	663 ± 65	1,65 ± 0,004	13 ± 2
28	656 ± 64	1,642 ± 0,004	12 ± 2

29	499 ± 55	1,642 ± 0,004	9 ± 1
30	531 ± 57	1,642 ± 0,004	10 ± 1
31	465 ± 53	1,65 ± 0,004	9 ± 1
32	1432 ± 97	1,642 ± 0,004	27 ± 3
33	119 ± 88	1,642 ± 0,004	2 ± 2
34	466 ± 53	1,668 ± 0,004	9 ± 1
35	1321 ± 93	1,642 ± 0,004	25 ± 3
36	691 ± 66	1,65 ± 0,004	13 ± 2
37	1213 ± 89	1,65 ± 0,004	23 ± 2
38	1290 ± 92	1,598 ± 0,004	25 ± 3
39	265 ± 39	1,65 ± 0,004	5 ± 1

Tabela 3.3.2 - Percentuais das variâncias dos parâmetros ρ_{iii} , t_e , χ .

Residência	$\sigma^2_{\rho_{iii}}/\sigma^2_G$	$\sigma^2_{t_e}/\sigma^2_G$	$\sigma^2_{\chi}/\sigma^2_G$
1	43,5206	0,0005	56,4582
2	48,8773	0,0005	51,1034
3	47,9155	0,0005	52,0659
4	49,7847	0,0005	50,1974
5	24,4839	0,0007	75,4877
6	31,7359	0,0007	68,2377
7	40,0216	0,0006	59,9553
8	21,8206	0,0007	78,1508
9	40,7699	0,0006	59,2066
10	30,6935	0,0006	69,2818
11	29,4739	0,0007	70,4995
12	50,9945	0,0005	48,9865
13	17,6705	0,0008	82,2969
14	28,4946	0,0007	71,4771
15	41,2427	0,0006	58,7340
16	35,7034	0,0006	64,2730
17	50,3092	0,0005	49,6726
18	36,2926	0,0006	63,6828
19	19,8076	0,0008	80,1614
20	51,2410	0,0005	48,7412
21	57,1368	0,0004	42,8479
22	47,3726	0,0005	52,6070
23	65,7057	0,0003	34,2811
24	47,6755	0,0005	52,3043
25	48,2851	0,0005	51,6944
26	64,3121	0,0003	35,6749
27	61,1525	0,0004	38,8325
28	60,9197	0,0004	39,0648
29	66,5510	0,0003	33,4357

30	65,3639	0,0003	34,6224
31	68,0270	0,0003	31,9606
32	42,9047	0,0006	57,0726
33	98,8958	0,0000	1,1038
34	67,9339	0,0003	32,0543
35	44,8039	0,0005	55,1742
36	59,9056	0,0004	40,0789
37	46,8560	0,0005	53,1235
38	45,4432	0,0006	54,5322
39	78,0086	0,0002	21,9829

3.4 – Dados da Monitoração para os detectores interno e externo

Tabela 3.4.1 - Valores de atividade do Auto Plate-Out e Radônio (Neman,2004) para a monitoração em Poços de Caldas.			
Residência	$\rho_{\text{iii}} \pm \sigma_{\rho_{\text{iii}}} \times (10^4 \text{m}^{-2})$	$A_0 \pm \sigma_{A_0}$	$G \pm \sigma_G$
1	554 ± 38	85 ± 8	9 ± 1
2	445 ± 34	68 ± 7	6 ± 1
3	467 ± 35	71 ± 7	5 ± 1
4	437 ± 34	66 ± 7	4 ± 1
5	1371 ± 61	211 ± 17	31 ± 3
6	976 ± 52	151 ± 13	16 ± 2
7	658 ± 42	102 ± 9	10 ± 1
8	1623 ± 67	248 ± 19	41 ± 4
9	617 ± 40	96 ± 9	11 ± 2
10	1000 ± 52	152 ± 13	10 ± 1
11	1069 ± 54	164 ± 14	12 ± 2
12	414 ± 33	64 ± 7	6 ± 1
13	2127 ± 77	330 ± 25	49 ± 5
14	1115 ± 55	171 ± 14	18 ± 2
15	611 ± 40	94 ± 9	12 ± 2
16	790 ± 46	121 ± 11	15 ± 2
17	407 ± 32	62 ± 6	3 ± 1
18	763 ± 45	118 ± 10	17 ± 2
19	1854 ± 72	287 ± 22	25 ± 3
20	387 ± 31	59 ± 6	11 ± 1
21	787 ± 71	119 ± 11	11 ± 1
22	1187 ± 88	182 ± 15	16 ± 2
23	527 ± 57	81 ± 9	14 ± 2
24	1153 ± 86	176 ± 15	14 ± 2

25	1139 ± 86	173 ± 14	15 ± 2
26	572 ± 60	87 ± 10	7 ± 1
27	663 ± 65	101 ± 11	12 ± 2
28	656 ± 64	100 ± 10	14 ± 2
29	499 ± 55	76 ± 9	11 ± 2
30	531 ± 57	82 ± 9	10 ± 1
31	465 ± 53	71 ± 9	10 ± 1
32	1432 ± 97	220 ± 17	26 ± 3
33	119 ± 88	181 ± 15	15 ± 2
34	466 ± 53	70 ± 8	8 ± 1
35	1321 ± 93	201 ± 16	35 ± 3
36	691 ± 66	106 ± 11	10 ± 1
37	1213 ± 89	185 ± 15	25 ± 3
38	1290 ± 92	206 ± 16	25 ± 3
39	265 ± 39	40 ± 6	6 ± 1

4 – Balanço dos Resultados obtidos nos 2 anos de IC

4.1 – Amadurecimento científico e aprofundamento bibliográfico

Nos primeiros meses de Iniciação Científica, foi realizado o aprofundamento bibliográfico relacionado ao objeto de pesquisa, proporcionando uma visão crítica sobre temas abordados em artigos científicos e teses de mestrado e doutorado. A parte experimental avançou paralelamente, com a intensa atividade do aluno no laboratório de ataque químico, a procura de um novo ataque que reduzisse o tempo de laboratório, tendo como base (Matiullah et al, 2005).

Essa etapa mostrou-se bastante produtiva e de grande valia, pois proporcionou ao aluno um contato com o ambiente científico, fora das salas de aula, apontou falhas que devido ao escasso tempo durante a graduação passa-se despercebida mesmo pelos mais brilhantes professores, como a pesquisa por teses de mestrado e doutorado, e artigos científicos, tanto na web, quanto nas bibliotecas. Foi estimulando uma leitura ávida de artigos, tanto da área abordada na Iniciação

Científica, quanto em outras áreas, em alguns períodos, mantendo-se a média de dois artigos lidos por dia, pelo aluno.

Foi proporcionado ao aluno também treinamento experimental, excelente, tendo como resultado inclusive nas disciplinas experimentais de graduação, a visão crítica e objetiva de um físico experimental, otimizando ao Máximo seu tempo dentro e fora do laboratório, podendo ser citadas como frutos da IC.

A utilização do microscópio óptico, e softwares necessários para a observação de traços de partículas nucleares (CR-Tran), o aprendizado em softwares matemáticos, como Origin (Microcal), Mathematica 5.1, Minitab (Software estatístico), Excel, e mesmo softwares compiladores de texto, como Word, Látex, e Open Office, foi utilizado também o ambiente de programação C++ como curiosidade e pratica apenas, fazendo rotinas e programas para cálculos estatísticos, mas tais programas foram feitos apenas com intuito didático, pois os algoritmos carregariam muitos erros, devido a aritmética de ponto flutuante, o que despertou tal interesse foi o código fonte do software CR-Tran, criado pelo grupo para a análise física dos traços, como o diâmetro e opacidade.

Além disso, o estudo de Iniciação Científica, rendeu diversos seminários durante a graduação, promovendo uma divulgação do trabalho realizado para os colegas e professores do IFGW, projeto de Instrumentação para ensino, onde foi contado o histórico da pesquisa em detecção e análise de Traços, desde Fleischer até o presente, o trabalho de tratamento estatístico rendeu colóquio apresentado na china, e futuros artigos científicos a serem publicados em revistas indexadas.

4.2 – Análise de artigos científicos

No aprofundamento bibliográfico, foi utilizado o artigo de (Matiullah et all, 2005) como base na procura de um novo ataque químico utilizando metanol como solvente, além da água. Nessa primeira parte da IC, foi importante para desenvolver uma visão crítica sobre ciência e uma leitura imparcial e meticulosa de artigos científicos:

Etchant conc. (M)	D_a (μm)	D_{ff} (μm)	V_B ($\mu\text{m h}^{-1}$)	V_T ($\mu\text{m h}^{-1}$)	η (%)
4	8	15	1	2.34	35.6
6	9.67	19.66	1.25	5	64
8	10.66	24	1.75	6.96	56.8
10	15	29.33	2.26	6.23	41.3
12	23	47.66	3.38	7.61	37.4

Tabela 4.2.1 – Tabela retirada de (Matiullah et all, 2005), analisada na primeira parte da IC, foi anexada no relatório parcial, sendo um exemplo do aprofundamento bibliográfico, a correção da tabela foi feita no relatório acima citado.

Equações utilizadas no artigo citado do grupo paquistanês:

$$V_B = \frac{D_{ff}}{2t} \quad (4.2.1)$$

$$V_T = V_B \frac{1+x^2}{1-x^2} \quad (4.2.2)$$

$$\eta = 1 - \frac{V_B}{V_T} \quad (4.2.3)$$

$$V = \frac{V_T}{V_B} \quad (4.2.4)$$

Onde t , é o tempo de ataque, V_B é a velocidade de Bulk, V_T é a velocidade de track, η é uma variável auxiliar utilizada pelo grupo paquistanês, chamado de

eficiência, e $x = D_{\alpha} / D_{ff}$ onde D_{ff} é o diâmetro médio de um traço de fissão D_{α} é o diâmetro médio de um traço de partícula alfa. Abaixo a correção feita no relatório parcial:

Tabela 4.2.2 - Tabela com cálculos refeitos e corrigidos, tendo como base a tabela 4.2.1, retirada de Matiullah et all, 2005.

Etchant conc. (M)	D_{α} (μm)	D_{ff} (μm)	V_B ($\mu\text{m.h}^{-1}$)	V_T ($\mu\text{m.h}^{-1}$)	η (%)
4	8.00	15.00	1.00	2.34	57
6	9.67	19.66	1.25	5.00	75
8	10.66	24.00	1.75	6.96	74
10	15.00	29.33	2.26	6.23	63
12	23.00	47.66	3.38	7.61	55

4.3 – Novo Ataque Químico (SMW Otimizado)

Além do aprofundamento bibliográfico, foram feitas tentativas de novos ataques químicos, utilizando a solução proposta em (Matiullah et all, 2005), com o metanol como solvente além da água. A principio os resultados prometidos pelo grupo paquistanês não foram observados, então foram propostas novas variações da solução SMW otimizada.

- Solução 23.4 g de NaOH em 400 ml de solução, sendo 160 ml de metanol, foram atacadas quimicamente amostras de CR-39 por 15 e 30 minutos.
- Solução 2.23 M de NaOH em metanol e água a 55°C, com 87% de metanol, 20 g de NaOH em 20 ml de água e 200 ml de metanol a 55°C, foram atacadas amostras de CR-39 por 5, 10,15 e 20 minutos.

- Solução SMW “otimizada” à temperatura de 55°C e para os ataques em 1.5M de NaOH em metanol e água a 55°C, com 40% (volume) de metanol.

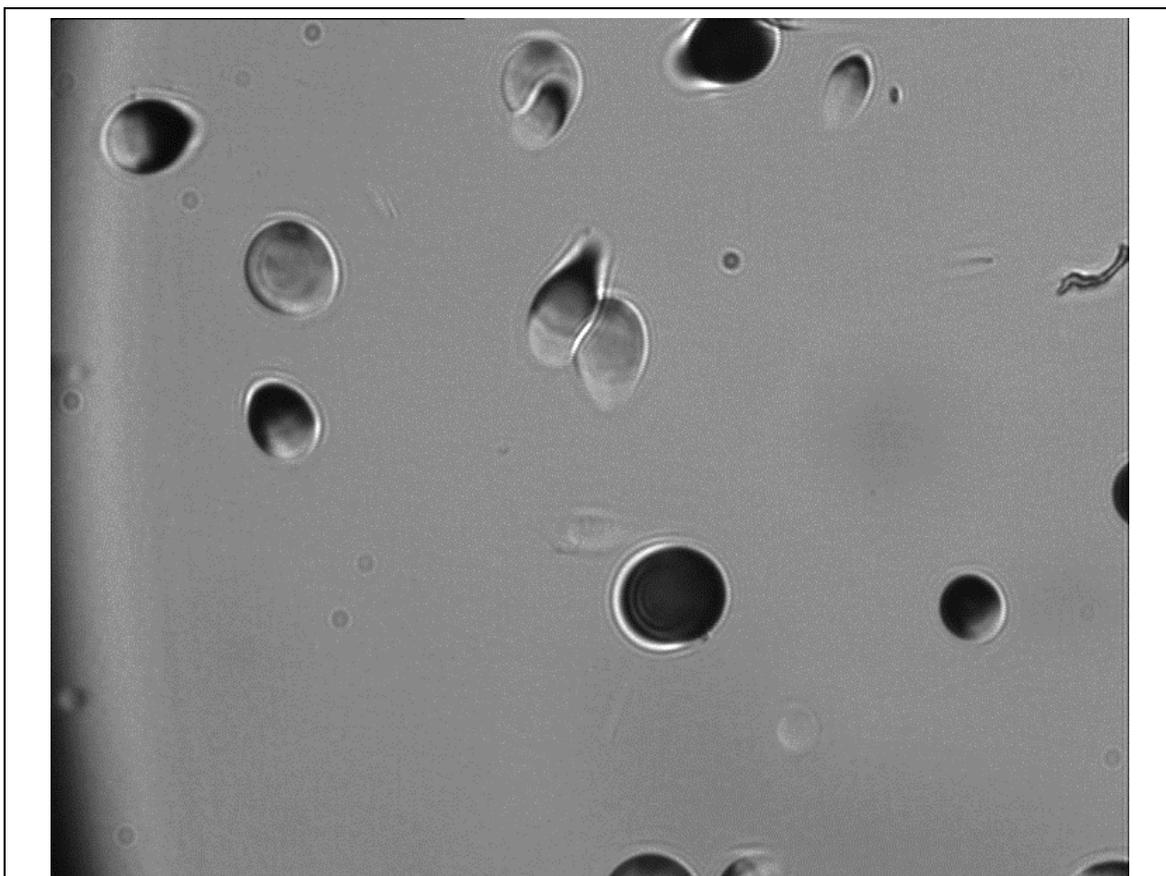


Figura 4.3.1 – Traços de partículas alfa de radônio e filhos atacados com 6M NaOH em água a 70 °C por 400 minutos aumento 50(objetiva)x ~20 (câmera CCD).

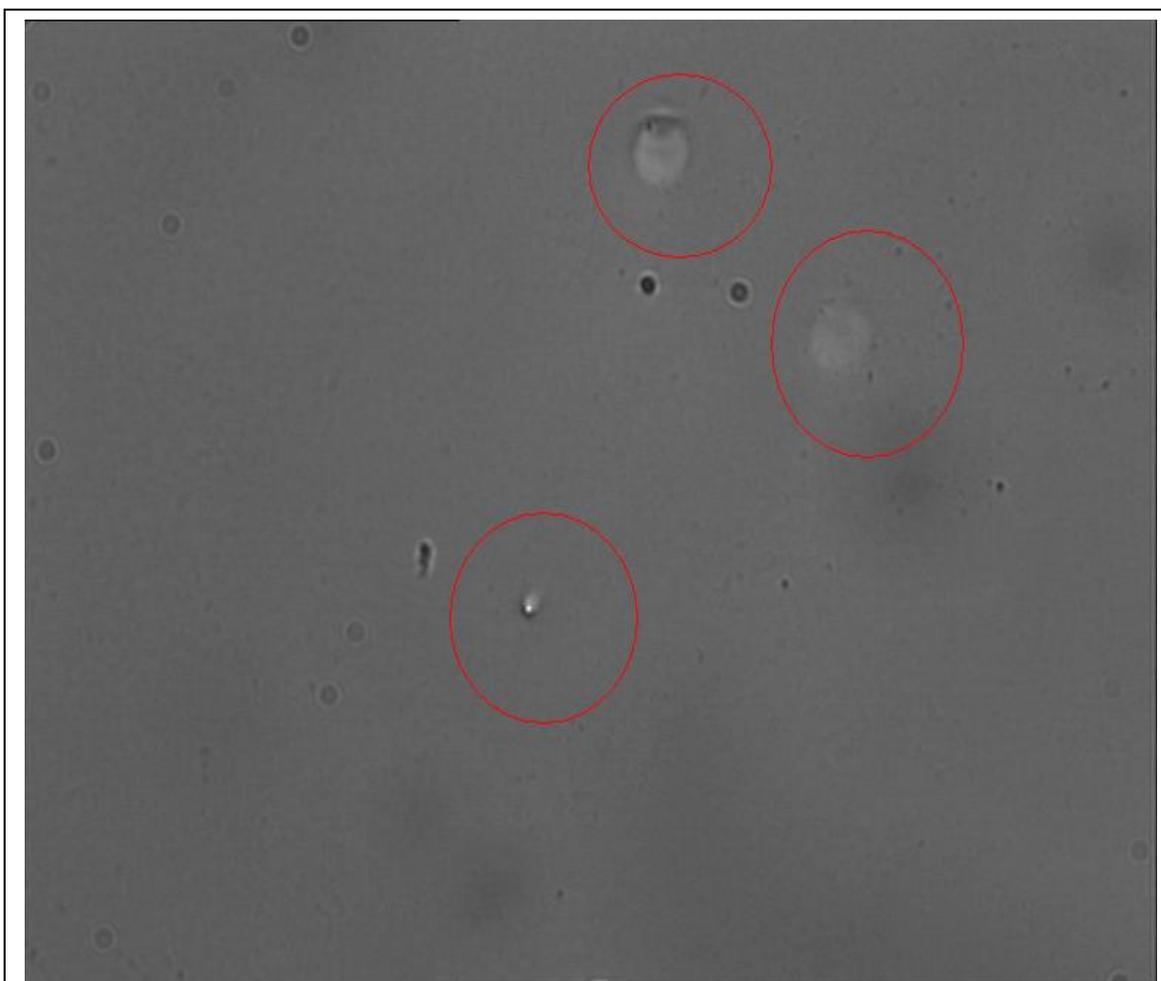


Figura 4.3.2 – Traços de partículas alfa de radônio e filhos atacados por 40 minutos na solução SMW “otimizada” à temperatura de 55°C aumento 50(objetiva) x ~20 (câmera CCD).

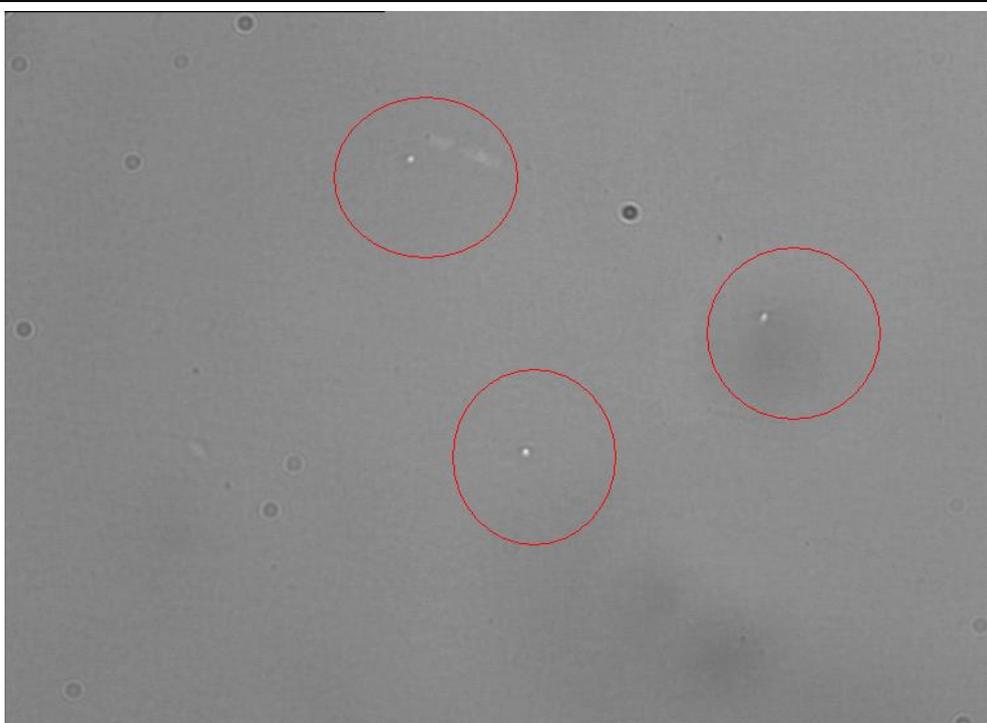


Figura 4.3.3 – Traços de partículas alfa de radônio e filhos atacados por 10 minutos em 2,23 M de NaOH em metanol e água a 55°C, com 87% de metanol em volume [aumento 50(objetiva) x ~20 (câmera CCD)].

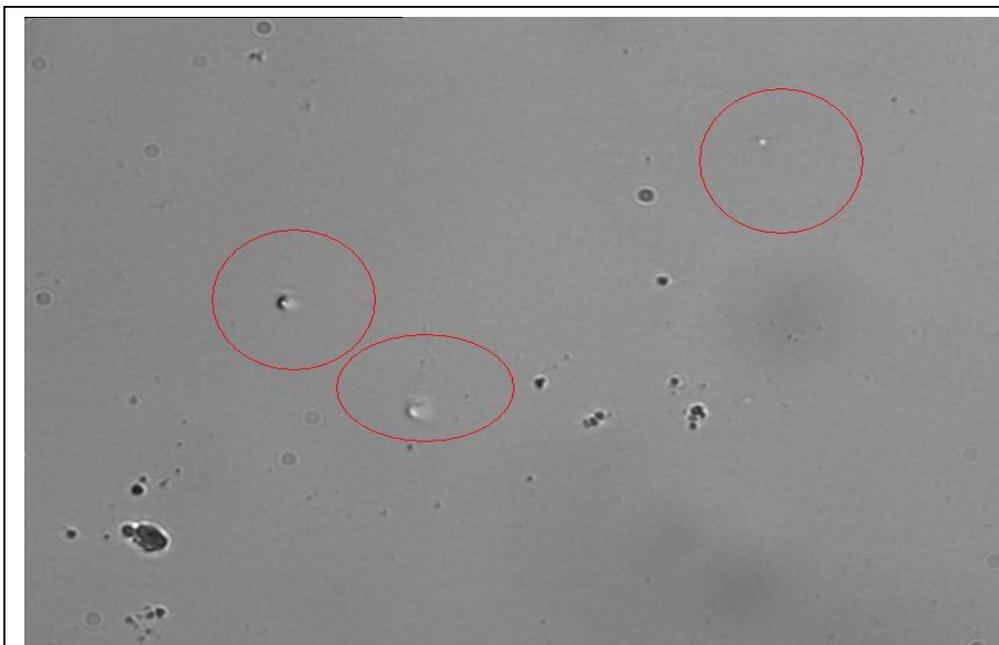


Figura 4.3.4 – Traços de partículas alfa de radônio e filhos atacados por 20 minutos em 2,23 M de NaOH em metanol e água a 55°C, com 87% de metanol em volume [aumento 50(objetiva) x ~20(câmera CCD)].

4.4 – Irradiando os CR-39 na Campânula

Para estudar o ataque químico, foi preciso irradiar os CR-39, de forma a simular atividade alfa do Radônio e filhos, para isso foi utilizado uma montagem em forma de campânula cilíndrica (Paulo,1991), para que fosse possível irradiá-los, como mostra a figura abaixo.



A fonte sintética utilizada foi de ^{252}Cf , colocada no buraco central da montagem mostrada na figura acima, os detectores eram grudados às paredes da campânula de vidro, em sua região lateral. Não foram colocados detectores na parte central, pois o intuito do experimento era apenas didático, para que fosse possível fazer os ataques químicos e as observações ao microscópio (contagem dos traços), por isso foram desconsiderados os efeitos da depleção dos traços.

Nas figuras da seção anterior, é possível observar os traços devido a esta irradiação, sendo que nas fotos que contem amostras atacadas com a solução e ataque padrão, é possível observar traços quase que perfeitamente redondos. Isso acontece por que ao decair, forma-se uma atmosfera de gás de Radônio dentro da campânula (A montagem é vedada com o-ring) para evitar que o gás escape totalmente, por causa disso temos uma grande densidade de traços, devido à incidência perpendicular de partículas alfa, devido ao gás de Radônio ali dentro. As amostras foram irradiadas por vinte dias (20d) tempo necessário para que os filhos do Radônio entrassem em equilíbrio secular com o pai, dessa forma as densidades devido à atividade alfa de Pai e filhos seria praticamente a mesma. Os traços com uma maior excentricidade (elipsidade) , são devido à incidência direta da fonte, isso devido ao buraco central, que colima (não totalmente) o feixe de partículas emitidas.

5 – Bibliografia

Bethe, H.A. and Ashkin, J. (1955). Passage of radiations through matter. In *Experimental Nuclear Physics*, **1**, edited by E. Segrè. John Wiley & Sons, New York, Chapman & Hall, London, 166-248.

Bevington, P.R. and Robinson, D.K. (1992). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, Segunda edição, McGraw-Hill.

Da Silva, A.A.R. (2000). *Determinação da concentração de ^{222}Rn e filhos em ambientes fechados com detectores plásticos*. Tese de Doutorado. Instituto de Física, USP, São Paulo-SP.

Hadler, J.C. and Paulo, S.R. (1994). Indoor radon daughters contamination monitoring: the absolute efficiency of CR-39 taking into account the plate-out effect and environmental conditions. *Radiation Protection Dosimetry*, **51**, 283-296.

Matiullah, Rehman¹, S., Rehman², S., Mati, N. and Ahmad S. (2005). Some more new etchants for CR-39 detector, *Radiation Measurements*, **39**, 551-555.

Neman, R.S. (2004). *Medida separada de radônio-222 e de seus filhos no ar: Monitoração na cidade de Poços de Caldas-MG e comparação de atividades envolvendo 2 outras técnicas de medida de radônio-222 no ar*. Tese de doutorado. Instituto de Física "Gleb Wataghin", UNICAMP, Campinas-SP.

Pereira O.L.S., *Otimização de um sistema de detecção da atividade alfa do ²²²Rn e filhos no ar ambiental e comparação entre este sistema, que utiliza o CR-39 como detector e outro, que utiliza o LR-115*, Relatório de Iniciação Científica para renovação de bolsa (FAPESP), 2006.

Taylor, J.R. (1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, Segunda edição, University Science Books.

Vuolo, J.H. (1992). *Fundamentos da Teoria de Erros*, Editora Edgard Blücher LTDA.

Zuniga, A.RG., *Caracterização do CR-39 como Espectrômetro alfa*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1998.