

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN

*Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida
pela aluna e aprovada pela Comissão Julgadora.*

19/08/91 

MEDIDA DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DO RADÔNIO-222
ATRAVÉS DE TINTAS USADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

ALUNA: ANA PAULA DE OLIVEIRA VILLALOBOS
ORIENTADOR: JÚLIO CESAR HADLER NETO

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

JULHO DE 1991

UF 2103625

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

BANCA EXAMINADORA.

Prof. Dr. Júlio Cesar Hadler Neto
IFGW/UNICAMP

Profa. Dra. Carol H. Collins
IQ/UNICAMP

Prof. Dr. Ross Allan Douglas
IFGW/UNICAMP

Profa. Dra. Carola D. Chinellato
IFGW/UNICAMP

Prof. Dr. Edison Hiroyuki Shibuya
IFGW/UNICAMP

DEDICO À DINDA

AOS MEUS PAIS

AOS MEUS IRMÃOS

AGRADECIMENTOS.

Agradeço ao Júlio por ter me aceito no grupo de Cronologia, o que me proporcionou um grande aprendizado-profissional e humano devido à convivência com as pessoas desse departamento.

Aos professores do Departamento de Raios Cósmicos, em especial ao professor Bellandi por sua colaboração neste trabalho.

À Marilena, Sandra e Maria Inês pela ajuda prestada.

Ao Sérgio por sua participação nesta tese.

Ao Biral "por sempre querer o melhor para mim".

Aos amigos pelos momentos de descontração e alegria.

I - INTRODUÇÃO.

Os vários isótopos do gás nobre radioativo, radônio - entre eles o radônio-222 - estão presentes em diferentes concentrações no ar, na água e no solo, e são provenientes de decaimentos de isótopos do rádio, os quais são membros das séries radioativas originadas a partir - de urânio-235, urânio-238 e tório-232, que são constituintes das rochas que compõem a crosta terrestre.

Uma vez formado, em materiais que contenham rádio, um átomo de radônio é relativamente livre para se mover, ou seja o transporte do radônio é possível, através da difusão ou através do transporte convectivo. E se o transporte do radônio for suficientemente rápido para que seja completado antes do decaimento, o radônio pode alcançar o ar ou a água, produzindo um grau de contaminação ambiental que é função da concentração de radônio - que teve acesso ao ambiente. Do ponto de vista de contaminação ambiental, é o isótopo radônio-222 o mais importante, por possuir a meia-vida mais longa que os outros isótopos do radônio, o que lhe permite maior acesso aos ambientes, antes do decaimento radioativo. Assim quando houver referência ao radônio, este é o isótopo radônio - 222.

Estando presente em um ambiente de convívio humano, o radônio decai e inalamos tanto o radônio - que por ser um gás nobre não é retido no sistema respiratório humano - como seus produtos de decaimento, que devido as -

suas propriedades químicas tem grande probabilidade de permanecerem retidos no aparelho respiratório.

Dentre a radiação emitida pelos produtos de decaimento do radônio é a radiação alfa dos isótopos polônio -218 e polônio -214, a que contribui para a dose de radiação a que pessoas estão sujeitas. Esta dose pode representar um risco de incidência de cancer no sistema respiratório humano (Ref. 1).

Este risco é associado à exposição aos produtos de decaimento do radônio, por esta se constituir na maior componente da exposição à radiação natural recebida pela população em geral (Ref. 2).

Monitoração em vários países tem resultado em concentrações médias de radônio, variando de 10 a 100 Bq/m³ (0.3 a 3pCi/l). Para uma média de 40 Bq/m³, o risco médio de incidência fatal de cancer pulmonar ao longo do tempo correspondente à expectativa média de vida de uma pessoa, ocasionado por exposição aos produtos de decaimento do radônio é estimado em aproximadamente 0.3% (Ref. 3).

Assim sendo, a principal razão para a realização deste trabalho é a verificação da correlação entre exposição aos produtos de decaimento do radônio e incidência de cancer pulmonar, constatada inicialmente entre trabalhadores de minas de urânio e tório. Nestes locais se verificou altas taxas fatais de cancer pulmonar, que somente posteriormente foram atribuídas à exposição dos trabalhadores aos produtos de decaimento do radônio (Ref. 4).

Os materiais de construção, por serem feitos de-

materiais naturais (areia, rocha, cimento), que contem urânio entre seus elementos constituintes, contribuem para a emanação de radônio, que se difunde para os ambientes, antes do decaimento radioativo, produzindo graus de contaminação ambiental, em função da concentração que teve acesso ao ambiente.

A decoração interna das paredes, usada para revestir os materiais de construção, atua de forma a aumentar ou diminuir a emanação de radônio para os ambientes, já que o material usado no revestimento pode barrar ou contribuir para a emanação (Ref. 5).

Neste trabalho é feita uma análise de tintas comercialmente disponíveis no estado de São Paulo, usadas para revestimento de paredes internas, objetivando a especificação da tinta que reduz de forma mais eficaz a emanação de radônio de materiais de construção, diminuindo a dose que as pessoas estão sujeitas, devido à presença de radônio e seus produtos de decaimento no ambiente.

II - FONTES QUE CONTRIBUEM PARA A CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL POR RADÔNIO E SEUS PRODUTOS DE DECAIMENTO.

Vários tipos de poluentes do ar, inclusive radônio e seus produtos de decaimento, podem ocorrer em níveis mais altos em ambientes do que ao ar livre, devido à presença de fontes.

O radônio surge do decaimento radioativo do rádio existente na crosta terrestre e as concentrações ambientais dependem do acesso do radônio para os ambientes. O radônio pode entrar nos ambientes originado das seguintes fontes: I) o solo ou rochas que ainda estão na crosta terrestre; II) através da contaminação da água que posteriormente é conduzida, armazenada e consumida; III) através do gás natural do solo, que transporta o radônio; IV) de materiais da crosta que estão incorporados às estruturas de construção, na forma de concreto, rocha e tijolos.

A importância de cada fonte para o ingresso do radônio nos ambientes, depende do comportamento de vários fatores, mas a contribuição do solo é responsável pela maior contribuição para as concentrações ambientais observadas (Ref. 6). Entretanto, em construções que estão relativamente isoladas do solo, as concentrações são esperadas serem menores do que a média e são produzidas pela emanção de radônio de materiais de construção e do ar externo (Ref. 7).

Outra fonte de radônio é a água doméstica retirada de fontes subterrâneas. A água da superfície tem con-

centrações de radônio muito pequenas para afetar os níveis ambientais, quando usada domesticamente (Ref. 8).

Para casas e outras estruturas de um ou dois andares, o solo constitui a principal fonte, mas podem existir contribuições significativas de radônio trazidas pelo ar externo (Ref. 9). Em contraste, em apartamentos, o solo é de menor importância; neste caso, o ar externo e os materiais de construção são dominantes para a contaminação ambiental, embora o solo e o abastecimento de água possam ser importantes em alguns casos (Ref. 10).

Outras fontes, como por exemplo o gás natural, por comparação com as outras fontes citadas acima, não contribuem significativamente (Ref. 11 e 12).

Grande quantidade do radônio formado no solo, ou em materiais de construção, pode penetrar em ambientes internos de residências, se caminhos de transporte com alta permeabilidade são acessíveis (solos de pedregulhos, fissuras no solo ou em junções solo-concreto, fissuras em junções encanamento-paredes). Nestes casos, o radônio originado de estruturas de até um metro de concreto, ou vários metros de solo, podem aumentar significativamente a contaminação ambiental, dado que estes ambientes tem, em geral, volume de ar pequeno, comparado com a quantidade de material fonte (Ref. 13),

Existem, como mencionado, várias fontes que podem contribuir para a contaminação ambiental por radônio e seus produtos de decaimento. Embora a contribuição dada pelo ingresso direto do solo seja a mais significativa, isto não exclui a importância de outras fontes.

Dentro do contexto da presente tese, vários trabalhos tem demonstrado que mesmo uma pequena contribuição de radônio dada pela emanção dos materiais de construção, (Ref. 14), causa um aumento significativo na dose de radiação a que as pessoas estão sujeitas, comparado com outros tipos de exposição à radiação. Com o agravante de que em alguns países materiais de construção com concentrações altas de rádio são usados, em alguns casos são materiais naturais como granito, e em outros casos são usados como materiais de construção subprodutos industriais, que possuem atividades elevadas, contribuindo com uma grande parcela para a contaminação ambiental por radônio e produtos de decaimento.

III - CARACTERIZAÇÃO GERAL DO RADÔNIO-222 E PRODUTOS DE DECAIMENTO.

O radônio é formado na série radioativa do urânio-238 (esquema abaixo), do decaimento do rádio-226.

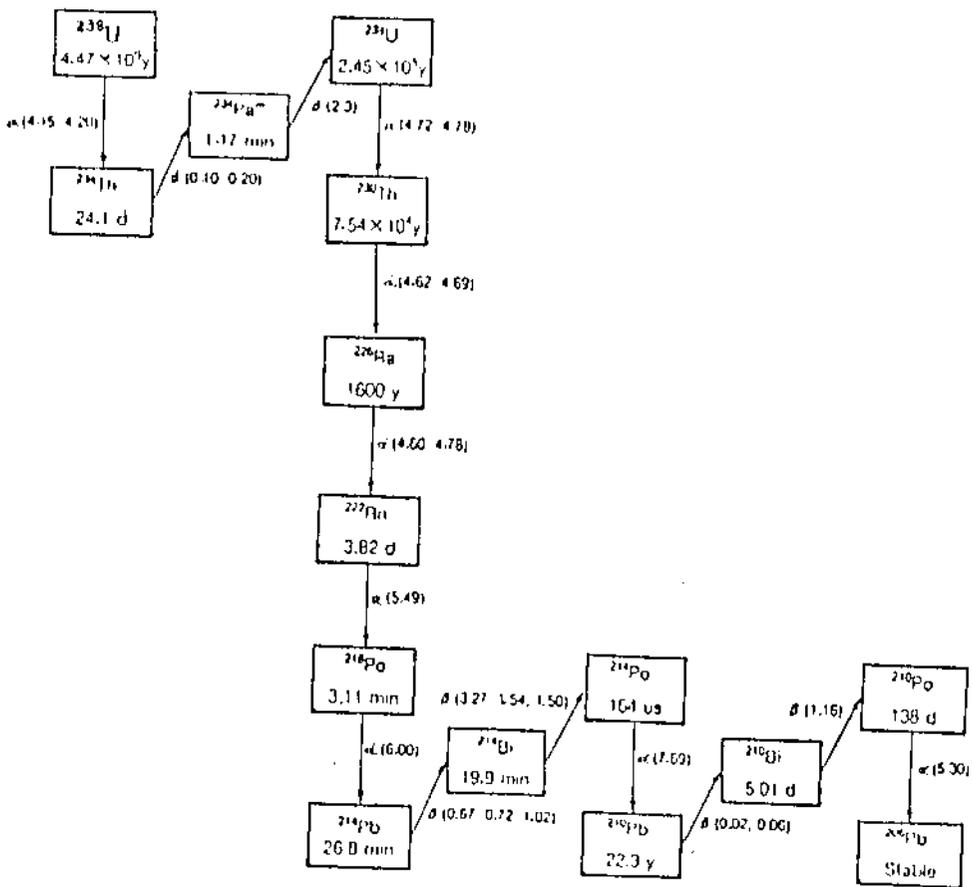


Figura 1: Cadeia de decaimento do ^{238}U , incluindo ^{222}Rn e seus produtos de decaimento. As concentrações de ^{218}Po , ^{214}Pb e ^{214}Bi são de interesse radiológico devido ao coeficiente de retenção no pulmão que apresentam esses produtos de decaimento, gerando uma dose de radiação devido principalmente aos decaimentos alfa do ^{218}Po e ^{214}Po . Meias-vidas (nos quadrados) e energias das alfas (em MeV) da Referência (16). Energias das partículas betas (em MeV) da Referência (17), exceto para ^{234}Th e $^{234}\text{Pa}^{\text{III}}$, da Referência (18).

O radônio tem maior significado radiológico que os isótopos provenientes das séries do urânio-235 e tório-232, por ser um gás nobre e possuir meia vida mais longa (3.8 dias), que permite que grande quantidade de radônio formado possa vir a contaminar os ambientes.

Em contraste, embora uma grande quantidade de radônio-220 (torônio) seja formada, neste caso do decaimento do tório-232 substancialmente uma menor quantidade alcança o ar, devido a sua meia vida pequena (56 s) - que limita a distância que ele pode percorrer antes de decair (Ref. 19 e 20).

Existe também o isótopo radônio-219, que pertence à cadeia de decaimento do urânio-235; o fato desta série ter uma abundância natural que é um fator de 100 menor do que a do urânio-238, aliado à meia-vida curta deste isótopo (4s), nos assegura a presença deste elemento em concentrações muito reduzidas nos ambientes (Ref. 13).

O radônio decai para radionuclídeos que são quimicamente ativos e de meia-vida relativamente curta. Como indicado na figura 1, os quatro primeiros radionuclídeos originados do decaimento do radônio-222, tem meias-vidas menor que 30 minutos, de forma que quando inalados se forem retidos no pulmão, eles decaem para chumbo-210, antes de serem removidos por mecanismos de metabolismo orgânico. Os decaimentos responsáveis pela dose mais significativa, do ponto de vista radiológico, é o alfa do polônio-218 e o alfa do polônio-214.

Os produtos de decaimento do radônio podem formar pequenos aglomerados de átomos, devido às suas pro -

priedades químicas, que são transportados pelo ar, e podem também se ligar em partículas que se encontram em suspensão no ar (os aerossóis). Este comportamento influencia a taxa de deposição em superfícies materiais (Ref. 21 e 22), a probabilidade de penetração e o grau de deposição no pulmão, e, conseqüentemente, a magnitude e a distribuição da dose de radiação no aparelho respiratório (Ref. 23).

A concentração no ar dos produtos de decaimento de meia-vida curta normalmente não é dada em termos de concentrações individuais, mas por uma concentração global, normalizada para a energia total do decaimento alfa dos produtos de decaimento presentes. Essa concentração global é a concentração dos produtos de decaimento em equilíbrio (E.E.D.C.) e representa a quantidade de cada produto de decaimento necessária para, coletivamente, produzir a energia alfa total presente no ar. Este fator é representado por P.A.E.C. (Ref. 24).

A razão da concentração dos produtos no equilíbrio (E.E.D.D.) para a concentração de radônio é o fator de equilíbrio, que é igual a 1, se radônio e seus produtos de decaimento estão em equilíbrio radioativo (possuem a mesma atividade) e na faixa de 0.2-0.6 para a maioria dos ambientes, e um pouco maior em atmosferas externas (Ref. 25).

A concentração total dos produtos de decaimento, dada pela quantidade de energia alfa (P.A.E.C.), depende da concentração dos três primeiros produtos de decaimento (^{218}Po , ^{214}Pb e ^{214}Bi), e da quantidade de energia alfa que cada um produzirá.

Em uma atmosfera onde a concentração de radônio não varia com o tempo e onde cada produto de decaimento, uma vez formado, é removido apenas pelo decaimento radioativo, radônio e seus produtos de decaimento poderiam estar em um estado de equilíbrio, todos tendo a mesma atividade. Em uma atmosfera ambiental onde o ar é trocado - com uma taxa de ventilação fixa, não apenas a concentração de radônio é menor, como também as concentrações dos produtos de decaimento são reduzidas relativamente à do radônio, devido à ventilação (Ref. 21).

Devido às suas propriedades químicas os produtos de decaimento do radônio podem se ligar a partículas e superfícies (este comportamento pode ser visto através da figura 2. tirada da referência 22 onde se nota uma depleção no número de átomos dos produtos de decaimento do radônio próximo a superfícies materiais) e estas taxas de ligação podem variar dependendo de vários fatores tais como: umidade, tamanho e composição química dos aerossóis, temperatura, pressão (Ref. 30).

O comportamento geral dos produtos de decaimento e sua dependência com taxas de ventilação, com concentrações de partículas e com outros fatores é muito complicada. Entretanto, desde que nós estamos tratando com elementos químicos cuja taxa de produção é determinada somente pelo conhecimento das meias-vidas envolvidas, é possível fazer algumas simplificações para considerar o comportamento dos produtos de decaimento no ar.

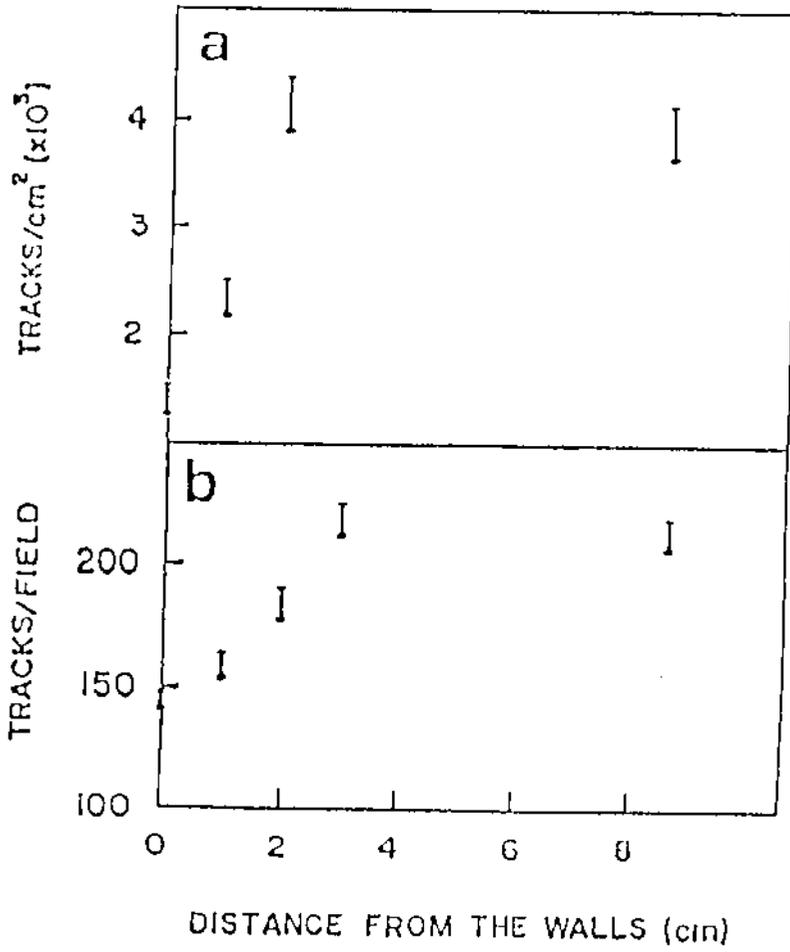


Figura 2: Densidade média de traços observada em emulsões nucleares (a), e em detectores do tipo Cr-39 (b) a diferentes distâncias da parede do recipiente. Esta figura foi tirada da (Ref. 22).

Uma das simplificações usuais é considerar uma atmosfera homogênea de radônio-222 e seus produtos de decaimento. Outra simplificação é a ausência de diferenças nas taxas de deposição com as dimensões ou com a composição química dos aerossóis (Ref. 27).

Além do decaimento radioativo os produtos de decaimento podem ser removidos de um dado ambiente por plate-out, que significa a deposição de um produto de decaimento em uma superfície material, por ventilação ou por um purificador de ar.

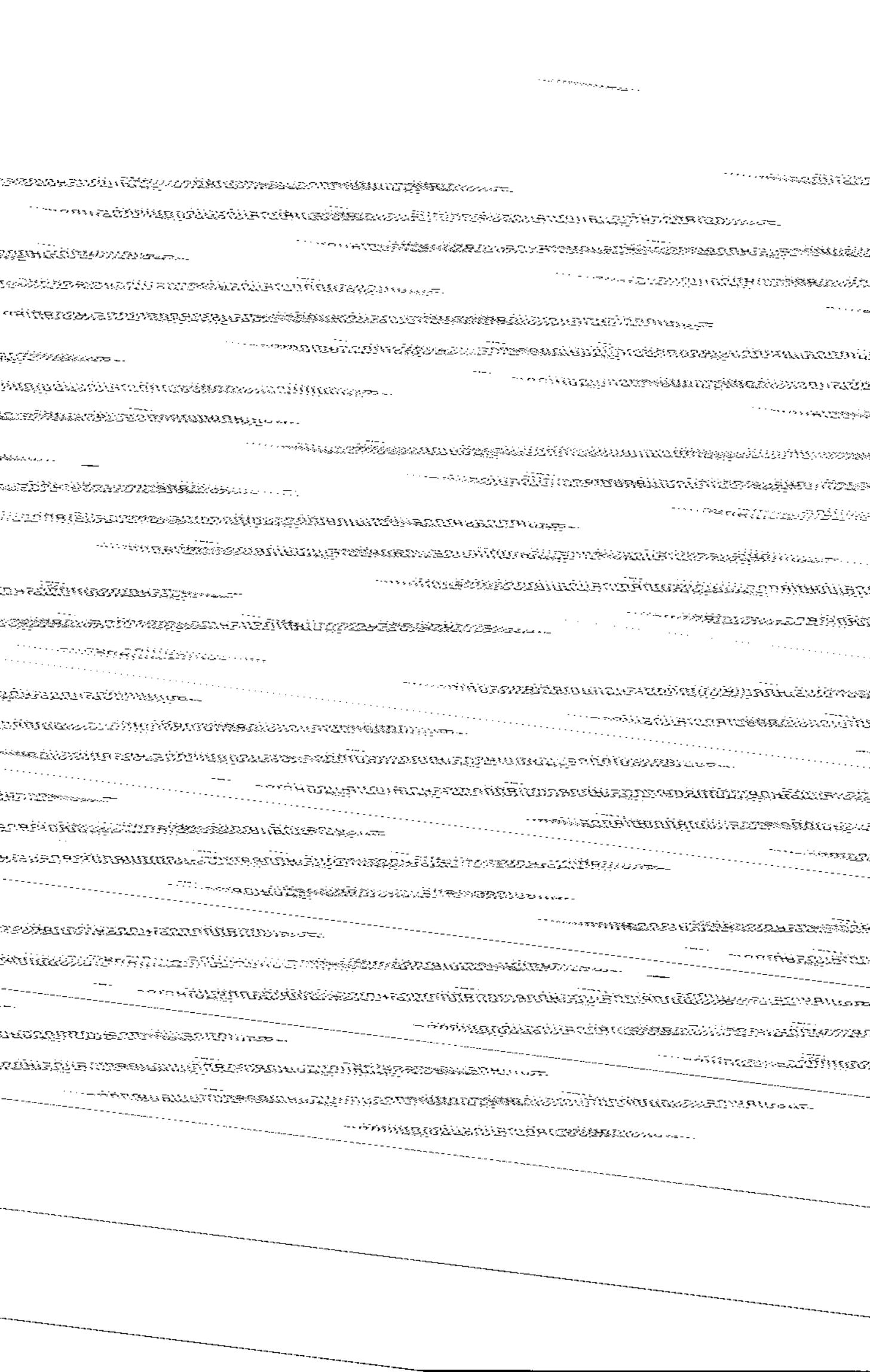
A deposição em superfícies é um processo que depende fortemente do fato dos produtos de decaimento estarem ligados a partículas ou não e também das características das partículas. Dessa forma, partículas presentes no ambiente são importantes para determinação da dose que resulta de uma dada concentração dos produtos de decaimento. Os produtos de decaimento não ligados a partículas tem maior probabilidade, sendo inalados, de se depositarem no pulmão, sendo responsáveis por uma dose de radiação mais significativa em relação a dose referente a exposição aos produtos de decaimento ligados a partículas que apresentam um coeficiente de retenção menor (Ref. 28).

Para se ter uma idéia geral, enquanto que taxas típicas de ventilação são da ordem de $0.5h^{-1}$, taxas de ligação a partículas para concentrações usuais de partículas são da ordem de $50h^{-1}$ e talvez taxas de $15h^{-1}$ para o plate-out dos produtos de decaimento não ligados em superfícies ambientais. Em contraste, taxas para deposição em paredes dos produtos de decaimento são da ordem de $0.1h^{-1}$.

A diminuição da concentração de aerossóis acarreta um aumento na taxa de deposição em superfícies materiais (por que uma maior proporção de produtos de decaimento não estão ligados, possuindo um coeficiente de difusão maior - em relação aos produtos de decaimento ligados a aerossóis) e uma diminuição no fator de equilíbrio (Ref. 29 e 30).

Vários trabalhos - em particular medidas em tubos de difusão (Ref. 31) - tem demonstrado que a taxa na qual os produtos de decaimento não ligados se depositam (taxa de plate-out), embora muito alta comparada com taxas de deposição de outras partículas, é menor do que pode ocorrer se os produtos de decaimento estivessem presentes na forma de átomos livres (o que acarretaria um coeficiente de difusão muito alto). Esta conclusão - um produto de decaimento não ligado faz parte de um conjunto de átomos incluindo um átomo do produto de decaimento parece ser confirmada em experimentos que medem a distribuição por tamanho dos produtos de decaimento. Eles parecem se dividir em dois grupos, um tendo um diâmetro médio de mais ou menos 100nm, como deveria ser esperado baseado na distribuição por tamanho de partículas presentes em um ambiente, e uma fração menor com diâmetro médio próximo de 10nm, talvez uma ordem de grandeza maior do que o tamanho de um único átomo de ^{218}Po (Ref. 32).

Estudos dosimétricos mais recentes nos sugerem - que mesmo para variação no estado dos produtos de decaimento (ligados a partículas ou não) causada pela variação na concentração de partículas, a concentração de radônio-222 pode ser uma melhor estimativa da dose que o E.E.D.C. (Ref. 13).



A importância e a complexidade do comportamento do radônio e seus produtos de decaimento no ar é um assunto que deve ser estudado melhor. Este fato, porém não exclui que se deva entender também o papel desempenhado pelos materiais de construção como origem desta contaminação, e qual o efeito de revestimentos (como tintas) - na redução desta contaminação, que é o objetivo da presente tese.

IV - DETECTORES PLÁSTICOS DE TRAÇOS.

IV.1. INTRODUÇÃO.

As medidas das concentrações de radônio e de seus produtos de decaimento, são baseadas na detecção da radiação associada com o decaimento radioativo. A radiação é capaz de criar ions no material através do qual ela passa. Métodos de medida são baseados na detecção dessa ionização ou suas consequências.

Na detecção de partículas ionizantes, os monitores mais amplamente utilizados, são materiais plásticos. A radiação, ao atravessar esse tipo de detector, causa danos em sua estrutura, rompendo as cadeias moleculares (Ref. 41). Esses danos, ou traços latentes, podem ser observados ao microscópio óptico, se o detector plástico for submetido a um ataque químico adequado.

IV - 2. CARACTERÍSTICAS DOS DETECTORES PLÁSTICOS

Uma das aplicações dos detectores plásticos é a medida da radioatividade alfa. Uma de suas vantagens, - nesse caso, é que esse tipo de detector não é sensível à radiação beta ou gama, ou a fótons, isto é, pode ser utilizado na presença de luz e em locais onde a radiação beta e gama seja significativa. Particular importância tem sido dada ao emprego desses detectores na medida da contaminação ambiental por radônio e seus produtos de decai

Dos detectores citados, os três primeiros são fabricados há mais tempo e possivelmente são os menos eficientes. A eficiência dos nitratos de delulose é equivalente. O LR-115 é uma exceção com relação aos outros detectores, já que possui uma coloração avermelhada. O CN-85 tem as mesmas características que o LR-115, mas é incolor. Alguns desses detectores são extremamente finos - (Lexan - 10 microns, LR-115 - 13 microns), sendo suportados por uma base constituída por algum plástico não - sensível como detector. Entre os detectores plásticos, o mais eficiente e conseqüentemente, o mais utilizado, é o CR-39.

IV - 3. PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS TRAÇOS LATENTES

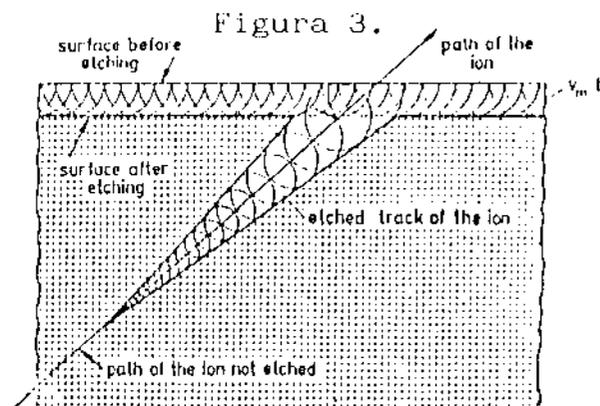
Como já mencionado, os traços latentes em um detector plástico são produzidos quando partículas ionizantes transferem parte de sua energia aos átomos do material plástico.

Em detectores plásticos em geral, observa-se que apenas são produzidos traços latentes, observáveis ao microscópio óptico após o ataque químico padrão, quando a taxa de transferência de energia da partícula ao meio, - por unidade de comprimento, é maior que um determinado - valor crítico, que depende do tipo de plástico. Acima - desse valor, os traços latentes são produzidos.

A profundidade do traço latente produzido depende da energia da partícula e do ângulo de incidência da mesma.

IV - 4. ATAQUE QUÍMICO.

Ao ser submetido ao ataque químico, a superfície do detector plástico é corroída por uma solução básica - as bases mais utilizadas são: hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) - até a profundidade dos traços latentes. A velocidade com que a solução corroi o plástico ao longo do traço (V_t) é maior que a velocidade com que a superfície é corroída (V_b), já que a região danificada pela radiação é mais sensível ao ataque químico. Isso faz com que, gradativamente, apareçam "cones" como mostrado na figura 3 abaixo.



Se V_t muda ao longo do traço, teremos traços diferentes caso V_t aumente ou diminua, como mostrado abaixo

Figura 4.

Figura 5.

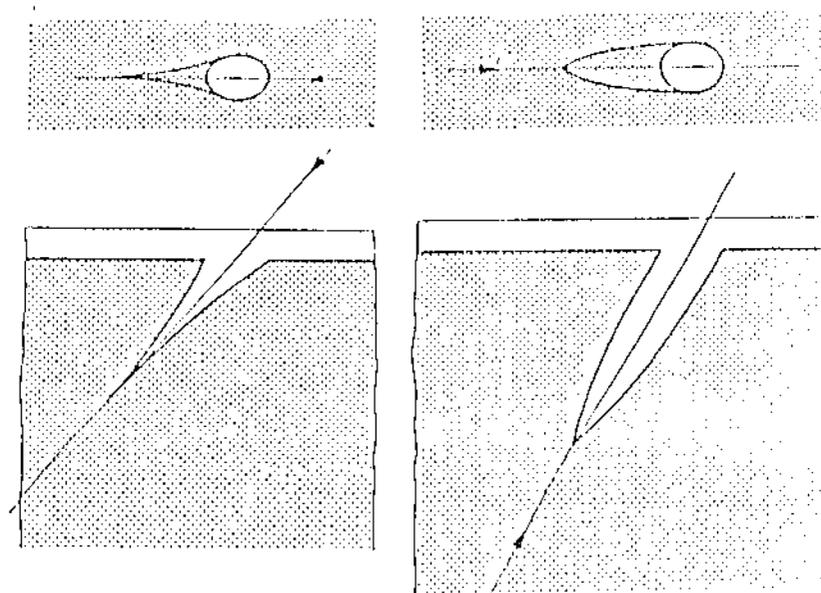
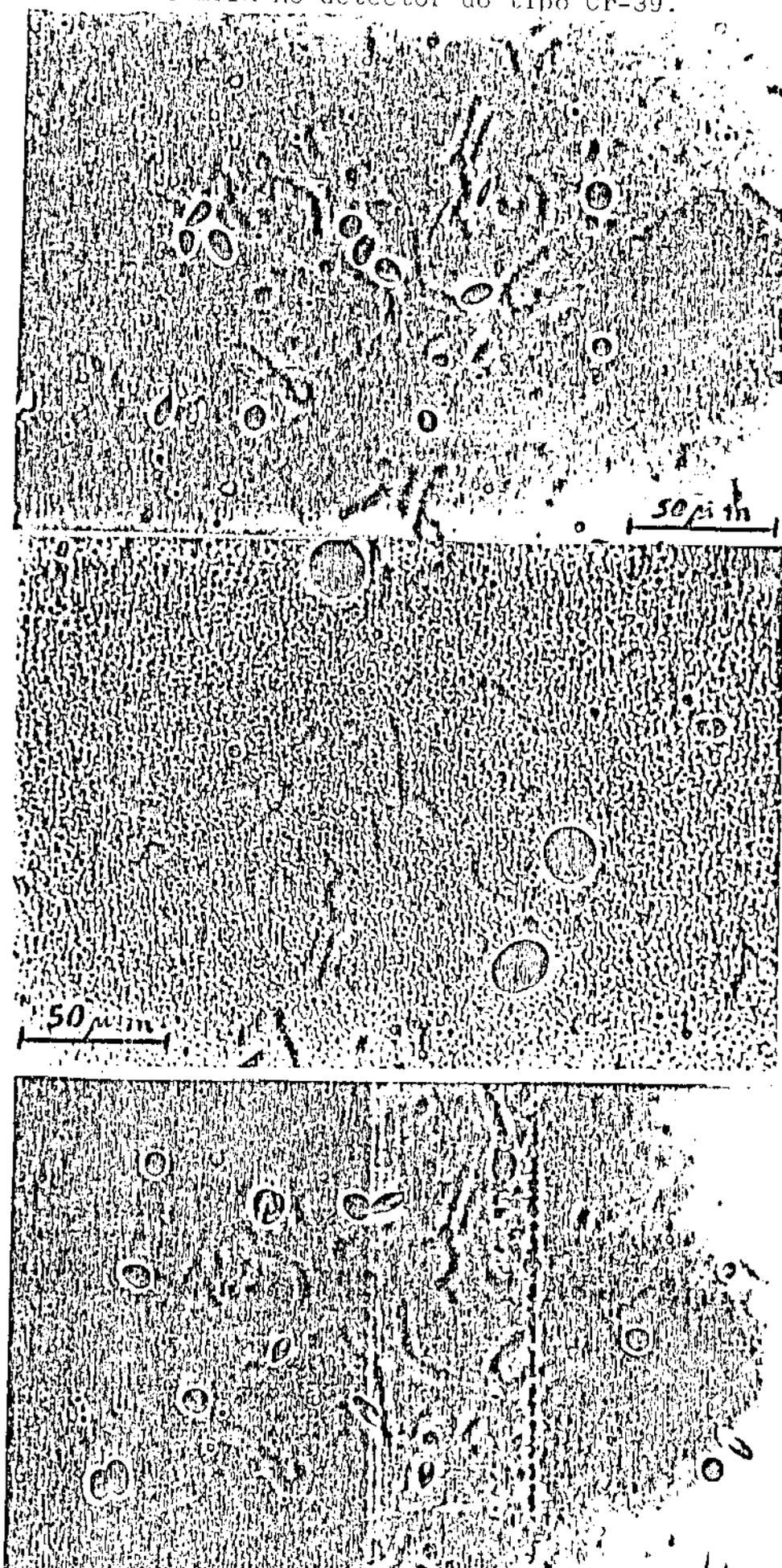


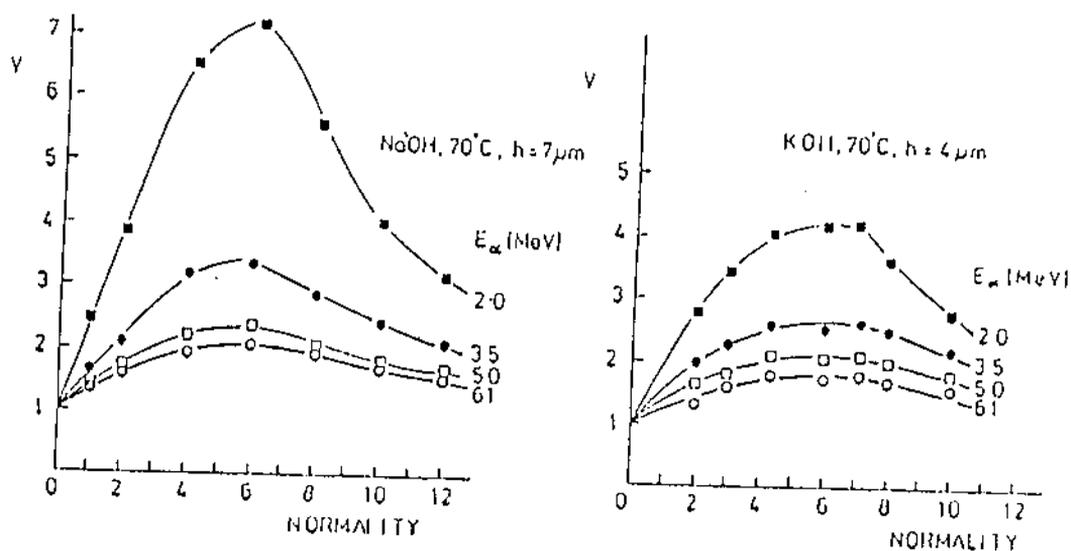
Figura 6: Nas fotos abaixo podem ser vistos traços de partículas alfa no detector do tipo Cr-39.



Um bom aproveitamento de um detector plástico, - requer um estudo que indique qual será o ataque químico - mais eficiente. Os parâmetros envolvidos em um ataque - químico são: 1) Tipo de solução a ser utilizada: 2) Nor- malidade da solução: 3) Temperatura: 4) Tempo de ataque.

vários trabalhos tem sido publicados apresentan- do a resposta de detectores plásticos para diversas va- riantes de todos os parâmetros envolvidos. Por exemplo, - P.F. Green et al (Ref. 43) apresentam resultados do - comportamento do Cr-39 em função da concentração de duas soluções (NaOH e KOH) mostrados na figura 7 abaixo.

Figura 7.



Na figura 7, $V = V_t/V_b$. O melhor aproveitamento - do plástico se dá quanto maior for V. No caso, vemos que uma solução de NaOH 6N a 70°C é um bom ataque químico pa- ra partículas alfa. Os valores de V_t e V_b variam bastan- te em função do detector empregado. Para o Cr-39 são da- ordem de microns/hora, nessas condições de ataque.

Para se determinar o tempo de ataque mais adequado, constroi-se uma curva relacionando o número de traços contados (ao microscópio) por unidade de área com o tempo de ataque, fazendo-se vários ataques seguidos. O tempo de ataque correspondente a uma densidade máxima de traços será adotado. Para o Cr-39, por exemplo, quando utilizado como detector de partículas alfa, a curva de ataque atinge um máximo próximo a 250 minutos de ataque (Ref. 44), para uma solução 6.25N de NaOH a 70°C, que se estende em um patamar relativamente grande (vide figura 8). O que indica que um ataque químico de algumas horas (utilizamos entre 6 e 7 horas) é recomendável.

A curva de ataque, como é chamado o gráfico que relaciona a densidade de traços com o tempo de ataque, depende dos parâmetros já mencionados e também do tipo de partícula incidente, da energia da partícula e do tipo de detector empregado. Modificações nesses fatores ocasionam variações na curva de ataque químico.

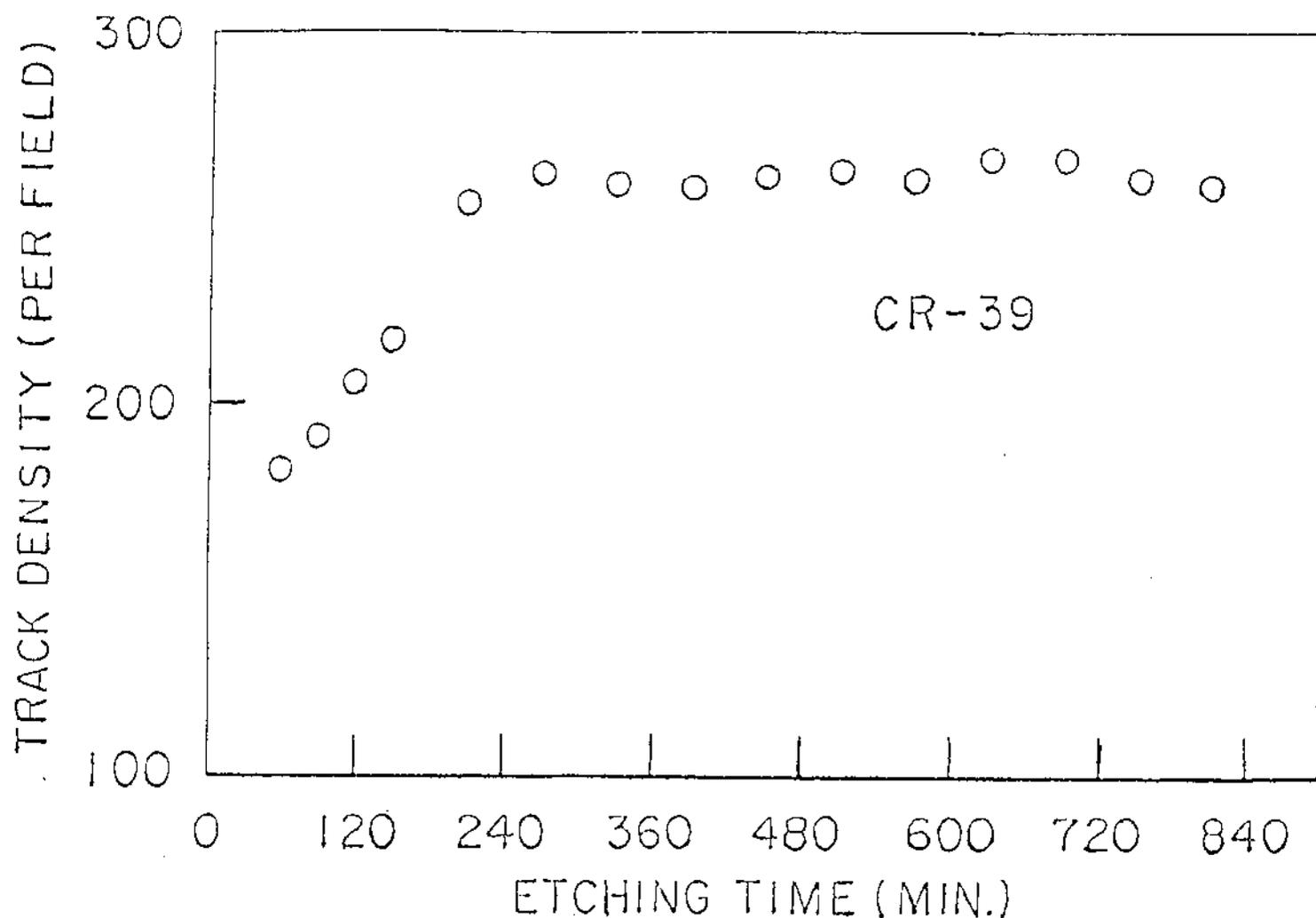


Figura 8. Densidade de traços no detector do tipo Cr-39 versus tempo de ataque usando solução NaOH 6.25N a temperatura de 70°C, o diâmetro dos círculos é um desvio padrão em unidades de traços por campo.

IV - 5. EFICIÊNCIA DOS DETECTORES PLÁSTICOS.

Quando o detector plástico é exposto a partículas com energias diferentes e/ou ângulos de incidência diferentes, um único ataque químico não poderá revelar todos os traços. Ou seja, um único ataque químico corroerá a superfície do plástico até uma certa profundidade, traços bem abaixo dessa profundidade não poderão ser observados ao microscópio, bem como traços que se encontravam na parte que foi corroída pelo ataque químico e que desapareceram. Isso significa que a eficiência de detecção não é de 100%. Após ter sido determinada a melhor condição de ataque para se fazer a dosimetria é necessário que se determine a eficiência dos detectores plásticos. Isso pode ser feito através de medidas comparativas envolvendo outros detectores mais eficientes (como emulsões nucleares, que não apresentam um limiar de detecção ou de um dE/dx crítico), ou detectores de eficiência conhecida).

IV - 6. O PROBLEMA DO BACKGROUND.

Desde a sua fabricação, os detectores plásticos são expostos a partículas pesadas naturalmente presentes no ambiente, a partículas alfa de contaminantes naturais, a elementos pesados da radiação cósmica e a partículas alfa de reações (n, α). Dessa forma, ao se empregar os detectores plásticos, os mesmos apresentam traços latentes que, após o ataque químico, coexistirão com os-

traços oriundos da radiação que se quer medir. Em alguns casos, como na medida de baixas atividades, o problema do background se torna crítico, sendo necessário se empregar tempos longos de exposição. Assim, o problema do background deve ser considerado ao se utilizar detectores plásticos de traços.

V - MECANISMOS DE TRANSPORTE - O TRANSPORTE
DIFUSIVO DO RADÔNIO.

O transporte por difusão é a causa para os fluxos observados de radônio através de materiais de construção, e através do solo exposto e pode ser a causa para pequenos fluxos através da estrutura, tal como concreto. Além da difusão existe outro mecanismo que também contribui para a entrada de radônio do solo para o interior de residências, que é o fluxo do gás do solo que transporta o gás radônio. Este fluxo é mantido por pequenas diferenças de pressão entre a parte inferior do interior da residência e o exterior e é chamado transporte convectivo (Ref. 37).

Quando o transporte do radônio através de materiais de construção é analisado, apenas transporte por difusão é considerado. O transporte convectivo é de menor importância, já que a maioria dos materiais que produzem radônio tem uma permeabilidade muito baixa (Ref. 38).

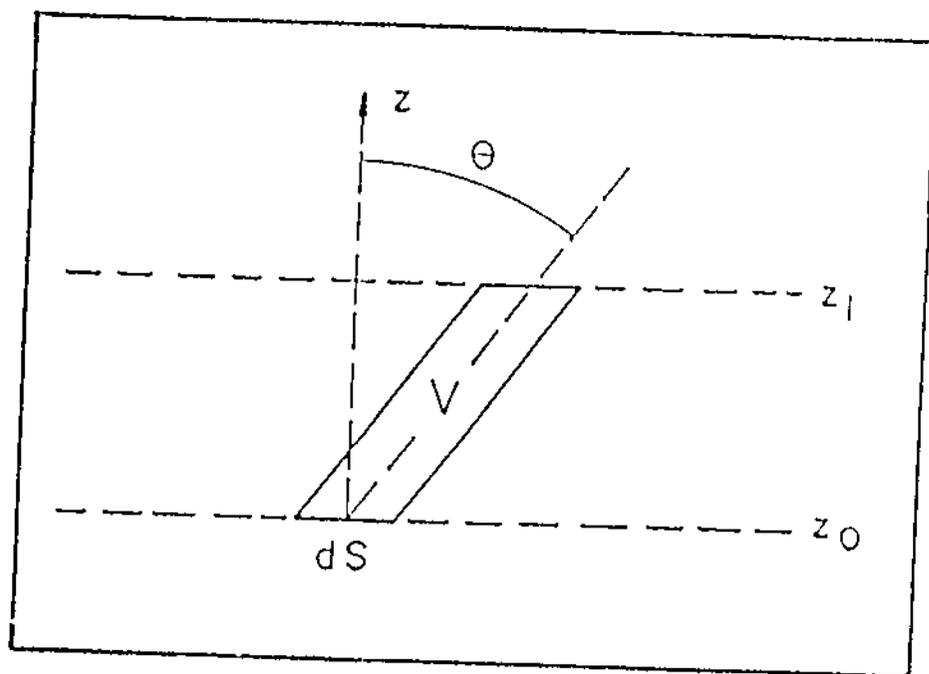
Com relação à difusão ou movimento molecular, existe uma tendência de uma substância de migrar de acordo com o seu gradiente de concentração. Esta tendência é descrita pela lei de Fick (Ref. 39), a qual relaciona o gradiente de concentração com uma densidade de fluxo de partículas. O coeficiente que relaciona estes parâmetros é o coeficiente de difusão. Em um meio poroso, o coeficiente de difusão é uma propriedade que depende dos fatores: i) espécie que está se difundindo; ii) fluido contido nos poros do material; iii) estrutura dos poros-

ou geometria do material no qual ocorre a difusão.

A equação de difusão foi deduzida por Boltzmann, em seu trabalho de 1896 (Ref. 40). A seguir reproduzo o desenvolvimento matemático feito por Boltzmann.

Suponha, num certo meio, um volume V delimitado por uma área unitária (dS) e pelos planos Z_1 e Z_0 como na figura 9. No plano Z_1 o número de moléculas é n_1 e no plano Z_0 , n_0 , onde $n_1 > n_0$.

Figura 9:



A seguir deve se calcular o número de átomos que vão do plano Z_1 ao plano Z_0 (e vice-versa). Para isso, calcula-se o número de átomos ($dn_{v,\theta}$) que passam por dS com uma velocidade entre v e $v+dv$, em uma trajetória delimitada por um ângulo zenital entre θ e $\theta+d\theta$:

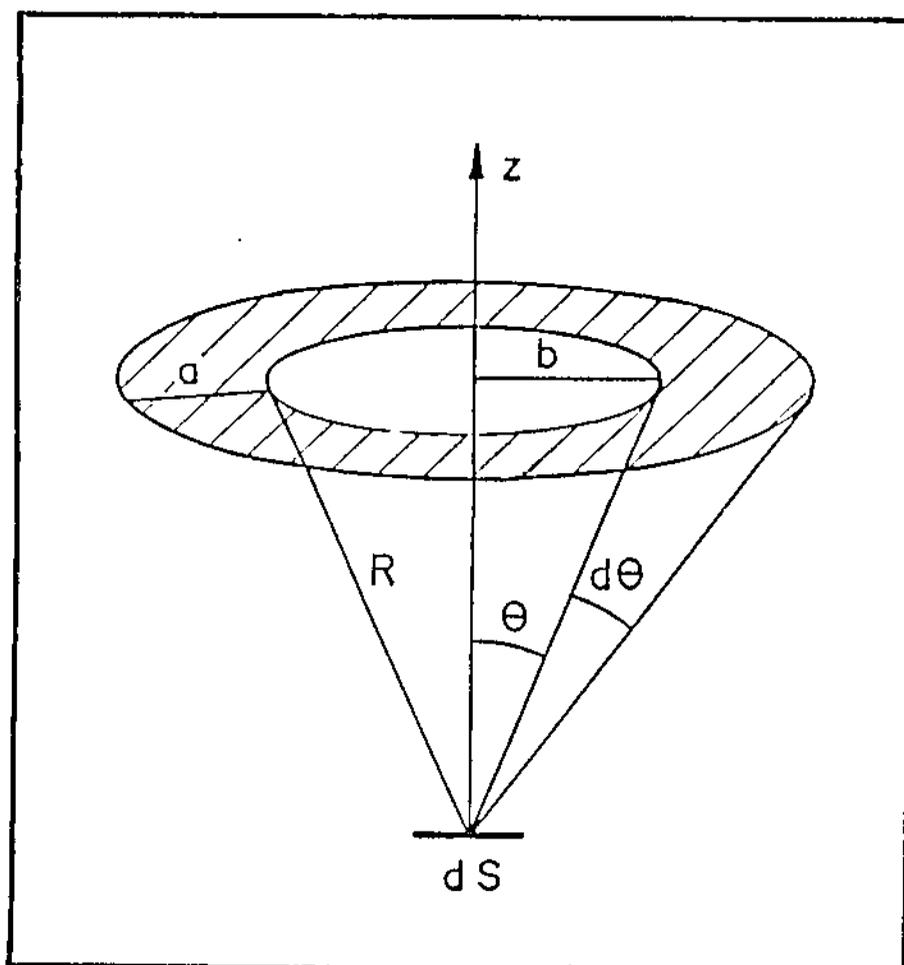
$$dn_{v,\theta} = dn_v p(\theta) d\theta \quad (1)$$

onde dn_v é o número de átomos com velocidade entre v e $v + dv$ e $p(\theta) d\theta$ é a probabilidade de um átomo se movimentar numa direção cujo ângulo zenital se encontra entre θ e $\theta + d\theta$, $p(\theta) d\theta$ pode ser calculado como a razão entre o ângulo sólido delimitado por θ e $\theta + d\theta$ e o ângulo sólido total (4π):

$$p(\theta) d\theta = \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (2)$$

$d\Omega$ pode ser calculado supondo que as partículas que chegam a dS num ângulo situado entre θ e $\theta + d\theta$ delimitam um cone no ar (uma vez que devemos considerar todos os ângulos azimutais), conforme mostrado na figura 10.

Figura 10:



$d\Omega$ será igual a área hachurada na figura anterior dividido por r^2 , mas:

$$A = 2\tilde{\pi} r \operatorname{sen}\theta \, d\theta \quad (3)$$

Portanto $d\Omega$ é dado por:

$$d\Omega = \frac{2\tilde{\pi} r \operatorname{sen}\theta \, r \, d\theta}{r^2} = 2\tilde{\pi} \operatorname{sen}\theta \, d\theta \quad (4)$$

$$p(\theta) \, d\theta = \frac{1}{2} \operatorname{sen}\theta \, d\theta \quad (5)$$

$$dn_{v,\theta} = \frac{1}{2} dn_v \operatorname{sen}\theta \, d\theta \quad (6)$$

Os átomos que se movem com velocidade entre v e $v + dv$ percorrem a distância que separa os planos Z_0 e Z_1 em um dado tempo dt , assim o volume V indicado na figura 9 será dado por:

$$V = dS \, v \, dt \, \cos\theta \quad (7)$$

Então, o número de átomos, vindos do plano Z_1 , que passam por unidade de tempo através de dS , entre $t = 0$ e $t = dt$, cujas velocidades estejam entre v e $v + dv$ e trajetórias entre θ e $\theta + d\theta$ será:

$$dr = \frac{1}{2} dn_v \, v \, \operatorname{sen}\theta \, \cos\theta \, d\theta \quad (8)$$

Considerando em particular um dos átomos, que passa em dS no tempo t , denotando por λ_i a distância que ele percorre no meio, desde sua última colisão, podemos dizer que essa partícula vem de um plano definido por

$Z_1 = Z_0 + \lambda_i \cos\theta$, onde $n \equiv n(Z_0 + \lambda_i \cos\theta)$. Se n não varia muito na distância correspondente a λ_i , podemos considerar que, entre Z_0 e Z_1 , n sofre uma alteração correspondente a:

$$\lambda_i \cos\theta \frac{\partial n}{\partial z} \quad (9)$$

ou seja, se λ_i representa uma distância que é pequena em relação à variação espacial de n , as derivadas de ordem superior ($\partial^2 n / \partial z^2$, $\partial^3 n / \partial^3 z$, etc.) são desprezíveis em relação à derivada primeira ($\partial n / \partial z$).

Em geral, nos casos de interesse (pelo menos no âmbito da física clássica), a variação das grandezas físicas ocorrem a distâncias bastante grandes quando comparadas com o livre caminho médio das partículas em questão. Assim sendo, podemos dizer que a quantidade n , para dS (situado no ponto (X, Y, Z)) é:

$$N(z) + \lambda_i \cos\theta \frac{\partial n}{\partial z} \quad (10)$$

Considerando todos os dr átomos que passam por dS , por unidade de tempo, temos que a quantidade total (Q) de átomos é dada por:

$$Q = dr n(z) + \cos\theta \frac{\partial n}{\partial z} \sum_{i=1}^{dr} \lambda_i \quad (11)$$

mas:

$$\sum_{i=1}^{dr} \lambda_i = \lambda dr \quad (12)$$

onde λ é o livre caminho médio percorrido pelos átomos -

no meio considerado.

Assim, a equação (11) corresponde a:

$$Q = dv \left(n(z) + \lambda \cos\theta \frac{\partial n}{\partial z} \right) \quad (13)$$

Utilizando o resultado da equação (8):

$$Q = \frac{1}{2} dv_v v n(z) \sin\theta \cos\theta d\theta + \frac{1}{2} dv_v v \sin\theta \cos^2\theta \frac{\partial n}{\partial z} d\theta \quad (14)$$

Integrando Q em todas as direções possíveis (entre 0 e $\pi/2$):

$$Q = \frac{1}{4} v dv_v n(z) + \frac{1}{6} v \lambda dv_v \frac{\partial n}{\partial z} \quad (15)$$

Similarmente, seja Q' a quantidade de átomos que migram no sentido oposto (de Z_0 a Z_1):

$$Q' = \frac{1}{4} v dv_v n(z) - \frac{1}{6} v \lambda dv_v \frac{\partial n}{\partial z} \quad (16)$$

Assim sendo, a quantidade de átomos que migram - ($d\Gamma$) é:

$$d\Gamma = - \frac{v \lambda dv}{3} \frac{\partial n}{\partial z} \quad (17)$$

que é a equação básica, deduzida por Boltzmann, que descreve o movimento molecular (o sinal negativo vem do facto de que o fluxo de átomos ($d\Gamma$) se dá no sentido negativo de $\partial n/\partial z$, ou seja, da região com n maior para a região com n menor).

Para calcular a quantidade total, integra-se a -

equação (17) com respeito a todas as velocidades possíveis de propagação dos átomos; para isso deve-se conhecer a função distribuição de velocidade $f(v)dv$. Assim:

$$\Gamma_z = \frac{1}{3} \left(\int_0^{\infty} v \lambda f(v) dv \right) \frac{\partial n}{\partial z} \quad (18)$$

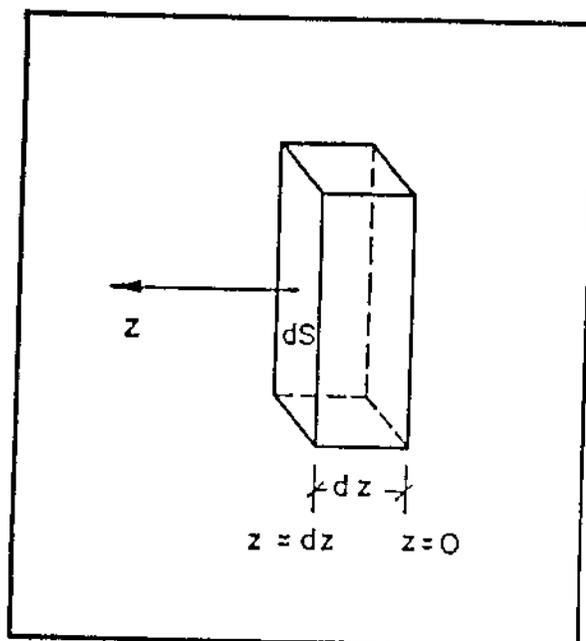
Como n é o número de átomos por unidade de volume (n), a equação acima representa a equação de difusão:

$$\Gamma_z = D \frac{\partial n}{\partial z} \quad (19)$$

onde Γ é o número de átomos que atravessam uma unidade de área por unidade de tempo e D é o coeficiente de difusão.

É possível transformar a equação (19) de forma que a única variável explícita (além do coeficiente de difusão D) seja o próprio número de átomos/cm³ (n). Para isso suponha um volume limitado lateralmente por duas áreas unitárias (dS) localizadas em planos paralelos ao plano xy . A largura desse volume é dZ , conforme mostrado na figura 11.

Figura 11:



Supondo que haja um fluxo de partículas na direção Z (z), vamos calcular qual é a taxa de variação no número de partículas no interior do volume (número de partículas por cm^3 por segundo).

Essa quantidade (n/t) é igual a diferença entre o fluxo de partículas que existe em uma das faces do volume ($Z = 0$) e aquele que existe na outra face ($Z = dZ$), ou seja:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \quad (20)$$

O sinal negativo vem do fato de que, se Γ crescer no sentido positivo de Z , menos partículas entram no lado direito do que saem pelo lado esquerdo do volume considerado, de modo que o número total de partículas no interior do volume diminui com o tempo.

Por outro lado, a quantidade $\partial \Gamma / \partial z$, segundo a equação (19) é:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial n}{\partial z} \right) \quad (21)$$

Assim, no caso em que D não varia no espaço, temos das equações (20) e (21):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \quad (22)$$

que é a chamada lei de Fick, uma expressão que somente envolve a variável n .

As equações acima são válidas quando apenas existe dependência de n com uma variável. No caso tridimensional tem-se:

$$\vec{\Gamma} = - D \vec{\nabla} n \quad (23)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \nabla^2 n \quad (24)$$

VI - O EFEITO DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO NAS CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO AMBIENTAIS.

Existem variações nas taxas de exalação de radônio do material de construção, em função de vários parâmetros como: conteúdo de rádio, umidade, pressão, temperatura, etc. (Ref. 45).

A importância do material de construção como fonte de radônio depende não só da taxa de exalação, mas também da frequência do uso do material. Por exemplo, concreto é usado como o principal material de construção em apartamentos. Um tipo especial de concreto ("alum shale concret") usado em residências na Suécia (Ref. 46) - tem altas concentrações de rádio e taxas elevadas de exalação de radônio. É estimado que concentrações da ordem de 800 Bq m^{-3} pode ser causada por tal material de construção, quando este tipo de concreto é o principal material usado na construção (Ref. 13).

Em residências onde os materiais de construção - causam altas concentrações de radônio, o principal mecanismo e mais econômico de redução do transporte de radônio do material de construção, é a aplicação de revestimentos, como tintas, nas paredes internas, cujo efeito é a redução da emanção (Ref. 48). Para que este método seja eficiente é necessário a integridade do revestimento. Se existirem rachaduras, por exemplo na película de tinta, o efeito é contrário ao desejado, ou seja, ocorre aumento da emanção de radônio na região danificada da tinta.

Em geral, o transporte do radônio pode ser classificado em:

1) Convectivo, onde o fluido (água, ar ou vapor d'água) dentro dos poros do material atua como transportador dos átomos de radônio;

2) Difusivo, onde o radônio se move relativamente ao fluido nos poros internos do material;

Quando o radônio é transportado por um dos mecanismos acima, o transporte se dá nos poros do material.- Assim é importante a fração de radônio produzido no material de construção, que penetra nos poros. Este parâmetro é denominado coeficiente de emanação e depende de fatores como: dimensão dos poros e conteúdo de umidade nos poros do material (Ref. 49 e 50).

Diversos autores demonstram que o coeficiente de emanação aumenta rapidamente quando a umidade nos poros aumenta (Ref. 51 e 52).

O Fluxo convectivo de radônio depende do gradiente de umidade, de pressão, ou de temperatura, enquanto que o fluxo difusivo depende da concentração de radônio no material (Ref. 53).

O transporte por difusão é dado pela lei de Fick onde o coeficiente de difusão é um parâmetro vital para o entendimento da difusão em materiais de construção. O coeficiente de difusão depende da geometria interna do material, da temperatura e da umidade.

Quando se faz referência ao transporte do radônio em materiais de construção apenas a difusão é considerada; acredita-se que o transporte convectivo seja de menor importância, já que a maioria dos materiais que

produzem radônio tem uma permeabilidade muito baixa -
(Ref. 13).

Uma solução simples da equação de difusão para -
materiais de construção é discutida abaixo.

A taxa de produção de radônio que penetra nos po-
ros do material por unidade de volume de ar é:

$$f = \frac{1}{\varepsilon} \lambda I \rho \eta \quad (1)$$

onde:

f = taxa de produção de radônio (Bq h⁻¹ m⁻³);

I = concentração de ²² Ra (Bq kg⁻¹);

λ = constante de decaimento do radônio (h⁻¹);

ρ = densidade do material (kg m⁻³);

ε = porosidade do material;

η = coeficiente de emanação.

Para uma parede, sem revestimento interno e ex-
terno, com espessura d , a solução da equação de difusão,
é a taxa de exalação de radônio para os ambientes:

$$E_d = \varepsilon f L \tanh (d/2L) \quad (2)$$

onde:

E_d = taxa de exalação por unidade de área;
(Bq m⁻² h⁻¹)

L = comprimento de difusão (m) = $\sqrt{D/\lambda}$;

D = coeficiente de difusão (m² h⁻¹);

λ = constante de decaimento do radônio (h⁻¹);

d = espessura da parede.

Esta solução é válida apenas quando ambas as su-
perfícies interna e externa da parede são livres para e-

xalar radônio.

Se L é grande comparado com a espessura da parede, d , a equação (2) pode ser aproximada por:

$$E_d = E f \frac{d}{2} = I \lambda \rho \eta \frac{d}{2} \quad (3)$$

As equações 1, 2 e 3 foram tiradas da Ref. 13.

A seguir será descrito o procedimento teórico utilizado ao se estudar o transporte difusivo do radônio através de tintas usadas como revestimentos de materiais de construção.

VII - EQUAÇÃO DE DIFUSÃO - CONSIDERAÇÕES
TEÓRICAS.

A estimativa da eficiência de uma tinta na redução da emanção do radônio do material de construção é feita através da caracterização de sua permeabilidade ao radônio.

É esperado que a medida da permeabilidade através de tintas, possa ser bem estimada pelo coeficiente de difusão do radônio na tinta (Ref. 53).

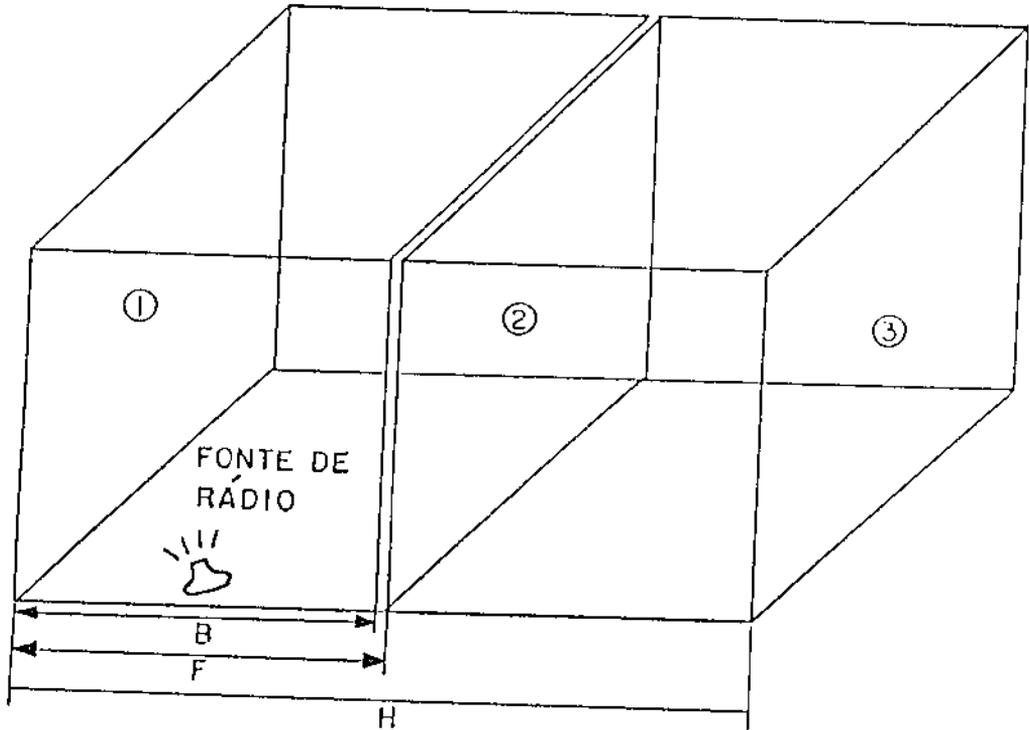
Foi desenvolvido um procedimento matemático (Ref. 54), baseado em condições de não equilíbrio, para determinar o coeficiente de difusão do radônio nas tintas estudadas. O método permite a utilização de tempos de exposição pequenos da ordem de horas.

Considere a geometria esquematizada na figura 12 onde há uma fonte que emana radônio em um volume V_1 [cm³] separado do volume de detecção V_2 [cm³] por uma camada de tinta com espessura L [cm] (na figura esta espessura é representada pela diferença $F - B$), área A [cm²] e permeabilidade K [cm²s⁻¹]. Se as concentrações de radônio no tempo t nos dois volumes são C_1 e C_2 [cm⁻³], a taxa de produção de radônio é Φ [cm⁻³ s⁻¹] e a constante de decaimento do radônio é λ [s⁻¹] então as equações que representam o comportamento de C_1 e C_2 são as seguintes (Ref. 54):

$$\frac{dC_1}{dt} = -\lambda C_1 + \Phi - \frac{KA}{V_1 L} (C_1 - C_2) \quad \frac{dC_2}{dt} = -\lambda C_2 + \frac{KA}{V_2 L} (C_1 - C_2)$$

(1)

Figura 12: Montagem experimental utilizada para a determinação da permeabilidade de cada tinta testada - ao radônio. Na figura os meios 1, 2 e 3 se referem respectivamente ao Volume V_1 onde foi colocada a fonte, à camada de tinta de espessura L (na figura representada por $F - B$), e ao volume de detecção V_2 .



Definindo: $\alpha = \frac{KA}{V_1 L}$, $\beta = \frac{KA}{V_2 L}$

temos:

$$\frac{dc_1}{dt} = -\lambda c_1 + \Phi - \alpha (c_1 - c_2)$$

$$\frac{dc_2}{dt} = -\lambda c_2 + \beta (c_1 - c_2) \quad (2)$$

Subtraindo a equação (2) da (1), temos:

$$\frac{d(c_1 - c_2)}{dt} = - \lambda (c_1 - c_2) + \bar{\Phi} - (\alpha + \beta)(c_1 - c_2) \quad (3)$$

Da definição acima:

$$\alpha + \beta = \gamma = \frac{KA}{L} \frac{(V_1 + V_2)}{V_1 V_2}$$

$$\text{Seja } c_- = c_1 - c_2$$

$$\frac{dc_-}{dt} = - (\lambda + \gamma) c_- + \bar{\Phi} \quad (4)$$

A solução dessa equação é:

$$c_-(t) = e^{-(\lambda + \gamma)t} \int_0^t e^{(\lambda + \gamma)z_a} dz$$

$$c_-(t) = \frac{\bar{\Phi}}{\lambda + \gamma} | 1 - e^{-(\lambda + \gamma)t} | \quad (5)$$

Somando as equações (2) e definindo:

$$c_+ = c_1 + c_2$$

$$\frac{dc_+}{dt} = - \lambda c_+ + \bar{\Phi} + (\beta - \alpha) c_-(t)$$

$$C_+ = e^{-\lambda t} \int_0^t e^{-\lambda t} [\bar{\Phi} + (\beta - \alpha) C_-(z)] dz$$

$$C_+ = e^{-\lambda t} \frac{\bar{\Phi}}{\lambda} [e^{\lambda t} - 1] + e^{-\lambda t} (\beta - \alpha) \int_0^t e^{\lambda z}$$

$$C_-(z) dz$$

$$C_+ = \frac{\bar{\Phi}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] + (\beta - \alpha) e^{-\lambda t} \int_0^t e^{\lambda z} \frac{\bar{\Phi}}{\lambda + \gamma}$$

$$[1 - e^{-(\lambda + \gamma)z}] dz + \frac{\bar{\Phi}}{\lambda + \gamma} (\beta - \alpha) e^{-\lambda t} \int_0^t (e^{\lambda z} -$$

$$e^{-\gamma z}) dz$$

$$C_+(t) = \frac{\bar{\Phi}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] + \frac{\bar{\Phi}}{\lambda + \gamma} (\beta - \alpha) e^{-\lambda t} [\frac{1}{\lambda}$$

$$(e^{-\lambda t} - 1) + \frac{1}{\gamma} (e^{-\gamma t} - 1)]$$

$$C_+(t) = \frac{\bar{\Phi}}{\lambda} [1 - e^{-\lambda t}] + \frac{\bar{\Phi}}{\lambda + \gamma} (\beta - \alpha) [\frac{1}{\lambda} (1 -$$

$$e^{-\lambda t}) + \frac{1}{\gamma} (e^{-(\lambda + \gamma)t} - e^{-\lambda t})]$$

$$\text{Seja: } c_1 = \frac{1}{2}[c_+ + c_-] \text{ e } c_2 = \frac{1}{2}[c_+ - c_-]$$

$$c_1 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Phi}{\lambda} \frac{\beta}{\gamma} [1 - e^{-\lambda t}] - \frac{\Phi(\beta - \alpha)}{\lambda + \gamma} \frac{1}{\gamma} (1 - e^{-(\lambda + \gamma)t}) + \frac{\Phi}{\lambda + \gamma} (1 - e^{-(\lambda + \gamma)t}) \right\}$$

$$c_1(t) = \Phi \left\{ \frac{1}{\lambda} \frac{\beta}{\gamma} (1 - e^{-\lambda t}) + \frac{\alpha}{\gamma} \frac{1}{\lambda + \gamma} (1 - e^{-(\lambda + \gamma)t}) \right\}$$

$$c_2(t) = \Phi \left[\frac{1}{\lambda} \frac{\beta}{\gamma} (1 - e^{-\lambda t}) - \frac{1}{\lambda + \gamma} \frac{\beta}{\gamma} (1 - e^{-(\lambda + \gamma)t}) \right]$$

$$\text{Mas: } \frac{\beta}{\gamma} = \frac{v_1}{v_1 + v_2} \qquad \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{v_2}{v_1 + v_2}$$

Portanto as soluções das equações que representam o comportamento de $c_1(t)$ e de $c_2(t)$ são:

$$c_1(t) = \frac{v_1}{v_1 + v_2} \frac{\Phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + \frac{v_2}{v_1 + v_2} \frac{\Phi}{\lambda + \gamma} (1 - e^{-(\lambda + \gamma)t})$$

$$C_2(t) = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \Phi \left[\frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \gamma} (1 - e^{-(\lambda + \gamma)t}) \right]$$

Na montagem experimental representada na figura-12, o volume V_1 onde foi colocada a fonte de Ra-226 tem as mesmas dimensões que o volume de detecção V_2 , ou $V_1 = V_2 = 16^3 \text{ cm}^3$.

A razão (R) entre as concentrações $C_2(t)$ e $C_1(t)$ integradas durante o tempo de exposição t , é dada pelo quociente entre $C_2(t)$ e $C_1(t)$ integrados no tempo t , ou:

$$R = \frac{\int_0^t C_2(t) dt}{\int_0^t C_1(t) dt} \quad \text{ou também} = a:$$

$$\frac{\frac{1}{\lambda} \left(t + \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) - \frac{1}{\lambda + \gamma} \left(t + \frac{e^{-(\lambda + \gamma)t}}{\lambda + \gamma} - \frac{1}{\lambda + \gamma} \right)}{\frac{1}{\lambda} \left(t + \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) + \frac{1}{\lambda + \gamma} \left(t + \frac{e^{-(\lambda + \gamma)t}}{\lambda + \gamma} - \frac{1}{\lambda + \gamma} \right)}$$

$$\frac{1}{\lambda} \left(t + \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) - \frac{1}{\lambda + \gamma} \left(t + \frac{e^{-(\lambda + \gamma)t}}{\lambda + \gamma} - \frac{1}{\lambda + \gamma} \right)$$

$$\text{onde: } \gamma = \frac{KA}{L} \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right), \text{ mas } V_1 = V_2 = V, \text{ então } \gamma = \frac{2KA}{LV}$$

Definindo:

$$a = \frac{1}{\lambda} \left(t + \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{\lambda + \gamma} \left(t + \frac{e^{-(\lambda + \gamma)t}}{\lambda + \gamma} - \frac{1}{\lambda + \gamma} \right) \quad (6)$$

A razão R definida acima pode ser dada em termos de a e b definidos acima: $R = \frac{a - b}{a + b} \quad (7)$

VIII - PROCEDIMENTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Como já foi mencionado em capítulos anteriores, a presente tese consiste no estudo de tintas utilizadas como revestimento de paredes internas de residências. De forma mais precisa este trabalho consiste na determinação da permeabilidade destas tintas ao gás nobre radônio.

O arranjo experimental utilizado na determinação da permeabilidade K [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$], mostrado na figura 12 consiste de uma fonte de Rádio-226 (atividade $3\mu\text{Ci}$), da qual emana Radônio-222, colocada no volume V_1 , e equipado com detectores do tipo Cr-39. Cada tinta estudada foi colocada entre a fonte de Ra-226 e o detector de traços.

Os detectores plásticos foram expostos durante alguns dias às partículas alfa de decaimentos radioativos dos emissores alfa presentes: Rn-222, Po-218 e Po-214. Posteriormente os detectores foram atacados quimicamente durante o tempo de 400 minutos a temperatura de $(70 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ em uma solução de NaOH e analisados ao microscópio óptico.

A densidade de traços observada em cada detector plástico, descontando-se o background é proporcional a atividade alfa total, soma das atividades dos três emissores alfa citados acima.

Apenas uma porcentagem dos átomos de radônio que emanam da fonte de Ra-226 atravessam a camada de tinta -

antes do seu decaimento radioativo. A razão entre a atividade alfa no volume da fonte V_1 , e a atividade alfa no volume de detecção V_2 é função dos parâmetros: espessura e área da camada de tinta, tempo de exposição, volumes V_1 e V_2 e contante de decaimento do radônio. Já o coeficiente de difusão, que para o caso de radônio é uma estimativa da permeabilidade da tinta ao radônio, é uma grandeza que depende apenas da espécie química que esta se difundindo, no caso o radônio, e de características da tinta como porosidade, densidade e composição química.

A Razão(R) entre as atividades nos volumes V_1 e V_2 , integrada no tempo de exposição t , é dada pela equação (7) do capítulo VII, e descreve a razão entre as densidades de traços no detector exposto no volume V_1 e no detector exposto no volume V_2 , ou a Razão(R) também pode ser representada por:

$$R = \frac{\bar{X}_2}{\bar{X}_1}$$

onde: \bar{X}_2 = número médio de traços no detector exposto no volume de detecção V_2 .

\bar{X}_1 = número médio de traços no detector exposto no volume V_1 .

O erro associado ao valores \bar{X}_2 e \bar{X}_1 foi tomado como o maior valor dentre o erro de Poisson e o erro Experimental, os quais tem as seguintes expressões:

$$\sigma)_{\text{poisson}} = \frac{\bar{X}}{\sqrt{NT}}$$

$$\sigma)_{\text{experimental}} = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{(NC - 1)NC}}$$

onde: \bar{X} = número médio de traços por campo;

X_i = número de traços no i-ésimo campo;

NT = número total de traços;

NC = número total de campos;

σ = desvio padrão dos valores de X.

É importante salientar que as tintas acrílica e-latéx foram pintadas sobre uma base de isopor de espessura (2.4 \pm 0.1)cm, enquanto que as tintas epoxi, esmalte, óleo e o impermeabilizante Neutrol não puderam ser aplicados sobre o isopor, esses materiais corroem o isopor, o recurso encontrado foi aplicar sobre o isopor uma camada de silicone e sobre o silicone aplicou-se a tinta. O resultado das medidas prévias feitas no isopor e no silicone são:

Isopor:

$$R = \frac{\bar{X}_2}{\bar{X}_1} = (0.947 \pm 0.042).$$

Isopor + silicone:

$$R = \frac{\bar{X}_2}{\bar{X}_1} = (0.907 \pm 0.041).$$

Além das contribuições citadas acima deve ser considerada a contribuição dada pelos traços de background, inerentes aos detectores plásticos cuja medida resultou em:

$$\bar{X} = (0.191 \pm 0.023) \text{ traços por campo.}$$

Os valores experimentais da Razão(R) = \bar{X}_2/\bar{X}_1 , para as diferentes exposições realizadas, descontados o background e a contribuição dada pelo material sobre o qual se aplicou a tinta estão expressos na Tabela 1.

De acordo com a equação de difusão no estado não estacionário, equação (1), capítulo VII. para o cálculo da permeabilidade do radônio através de uma membrana-permeável, no caso em questão a camada de tinta, é necessário além da medida experimental da Razão(R), e dos parâmetros conhecidos: tempo de exposição, volumes V_1 e V_2 e área da camada de tinta, a medida da espessura da camada de tinta através da qual os átomos de radônio se difundem.

Para o cálculo da espessura da camada de tinta foram feitas pesagens do isopor (em alguns casos do isopor mais a camada de silicone) com a camada de tinta e sem a camada de tinta, dessa forma pude estimar a massa da camada de tinta após a sua secagem.

De posse do valor da densidade (ρ) da tinta fornecido pelo fabricante e do valor da massa (M) da camada de tinta seca, através da relação ($V' = M/\rho$) en-

tos, mas este efeito também pode ser desprezado neste - trabalho, por se tratar aqui com uma razão entre densidades de traços em dois detectores.

A seguir reproduzo os cálculos efetuados para se obter os valores da permeabilidade de cada tinta.

Onde os parâmetros: Razão (R) entre as densidades de traços, espessura (L) da camada de tinta, área (A) dessa camada, tempo (t) de exposição, foram tirados da Tabela 1, e o termo (a) foi calculado através - da fórmula (5) do capítulo VII.

EPOXI.

$$\begin{aligned} R &= 0.345 \pm 0.027; \\ L &= (0.024 \pm 0.001) \text{ cm}; \\ A &= 248 \text{ cm}^2; \\ t &= 8 \text{ dias} = 6.91 \cdot 10^5 \text{ s}; \\ a &= 1.551 \cdot 10^{11}. \end{aligned}$$

Da fórmula (7) do capítulo VII, a Razão (R) é dada por:

$$R = \frac{a - b}{a + b}$$

Substituindo os valores de a e de R na fórmula acima, obtemos o valor $b = 7.553 \cdot 10^{10}$, que deve ser substituído na equação (6) do capítulo VII, para se obter a equação abaixo envolvendo o parâmetro γ que está relacionado com a permeabilidade (K).

$$7.553 \cdot 10^{10} \gamma^2 - 3.723 \cdot 10^5 \gamma - 0.122 - 0.232e^{-6.91 \cdot 10^5 \gamma} = 0$$

Esta equação foi resolvida utilizando um programa de computador e o resultado é:

$$\gamma(R) = 5.252 \cdot 10^{-6}.$$

O valor da permeabilidade $K(R, L)$ está relacionado com $\gamma(R)$ da seguinte forma:

$$K = \frac{\gamma_{LV}}{2A} = 1.04 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Para o cálculo do erro associado à permeabilidade (K), somou-se ao valor de R o erro associado, cuja soma vou representar por R^+ , e utilizando o procedimento acima foi calculado $\gamma(R^+)$, e posteriormente utilizando o valor da espessura também somado ao seu erro associado calculou-se $K(R^+, L^+)$, onde a equação que governa o comportamento de $\gamma(R^+)$ e os valores calculados são:

$$7.099 \cdot 10^{10} \gamma^2 - 3.918 \cdot 10^5 \gamma - 0.142 - 0.232e^{-6.91 \cdot 10^5 \gamma} = 0$$

$$\gamma(R^+) = 5.87 \cdot 10^{-6};$$

$$K(R^+, L^+) = 1.21 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

A diferença dos valores $K(R^+, L^+)$ e $K(R, L)$ é igual ao erro associado ao valor da permeabilidade, então:

$$K = (1.04 \pm 0.17) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Este procedimento adotado para o cálculo do erro

foi utilizado após a verificação de que a combinação $K(R^+ , L^+)$ comparada com as demais combinações possíveis $K(R^+ , L^-)$, $K(R^-, L^-)$, e $K(R^-, L^+)$ fornece o maior intervalo de variação para o valor calculado da permeabilidade. Deve ser notado que os valores R^+ e L^+ se referem respectivamente aos valores da Razão (R) e da espessura (L) somados aos seus respectivos erros. Em oposição aos valores R^- e L^- que correspondem aos mesmos parâmetros citados diminuídos de seus respectivos erros. Foi considerado que os erros associados aos demais parâmetros envolvidos no cálculo da permeabilidade não são significativos.

A seguir foram calculados os valores de permeabilidade de cada tinta utilizando o mesmo procedimento adotado para o caso da tinta Epoxi explicitado acima.

LATEX.

$$\begin{aligned}
 R &= 0.402 \pm 0.029; \\
 L &= (0.026 \pm 0.001) \text{ cm}; \\
 A &= 246.48 \text{ cm}^2; \\
 t &= 9 \text{ dias} = 7.77 \cdot 10^5 \text{ s}; \\
 a &= 1.874 \cdot 10^{11}; \\
 b &= 7.993 \cdot 10^{10}.
 \end{aligned}$$

A equação que governa o comportamento de $\gamma(R)$ é:

$$7.993 \cdot 10^{10} \gamma^2 - 4.397 \cdot 10^5 \gamma - 0.283 - 0.194e^{-7.77 \cdot 10^5 \gamma} = 0$$

Cuja solução é: $\gamma(R) = 6.08 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R, L) = 1.31 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

A equação que governa o comportamento de $\gamma(R^+)$ é:

$$7.451 \cdot 10^{10} \gamma^2 - 4.626 \cdot 10^5 \gamma - 0.307 - 0.194 e^{-7.77 \cdot 10^5 \gamma} = 0$$

Cuja solução é: $\gamma(R^+) = 6.81 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R^+, L^+) = 1.53 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Então o valor da permeabilidade para a tinta Latex é:

$$K = (1.31 \pm 0.22) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

ESMALTE.

$$R = 0.357 \pm 0.025;$$

$$L = (0.047 \pm 0.004) \text{ cm};$$

$$A = 239.61 \text{ cm}^2;$$

$$t = 8 \text{ dias} = 6.91 \cdot 10^5 \text{ s};$$

$$a = 1.55 \cdot 10^{11};$$

$$b = 7.345 \cdot 10^{10};$$

A equação que governa o comportamento de $\gamma(R)$ é:

$$7.345 \cdot 10^{10} \gamma^2 - 3.811 \cdot 10^5 \gamma - 0.131 - 0.233 e^{-6.91 \cdot 10^5 \gamma} = 0$$

Cuja solução é: $\mathcal{V}(R) = 5.52 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R, L) = 2.22 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

A equação que governa o comportamento de $\mathcal{V}(R^+)$ é:

$$6.931 \cdot 10^{10} \mathcal{V}^2 - 3.985 \cdot 10^5 \mathcal{V} - 0.150 - 0.233e^{-6.91 \cdot 10^5 \mathcal{V}} = 0$$

Cuja solução é: $\mathcal{V}(R^+) = 6.11 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R^+, L^+) = 2.66 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Então o valor da permeabilidade para a tinta esmalte é:

$$K = (2.22 \pm 0.44) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

ÓLEO.

$$R = 0.375 \pm 0.024:$$

$$L = (0.027 \pm 0.002) \text{ cm};$$

$$A = 257.40 \text{ cm}^2;$$

$$t = 8 \text{ dias} = 6.91 \cdot 10^5 \text{ s};$$

$$a = 3.302 \cdot 10^{11};$$

$$b = 7.05 \cdot 10^{10}.$$

A equação que governa o comportamento de $\mathcal{V}(R)$ é:

$$7.05 \cdot 10^{10} \mathcal{V}^2 - 3.935 \cdot 10^5 \mathcal{V} - 0.144 - 0.233e^{-6.91 \cdot 10^5 \mathcal{V}} = 0$$

Cuja solução é: $\hat{\gamma}(R) = 5.93 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta em:

$$K(R, L) = 1.27 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

A equação que governa o comportamento de $\hat{\gamma}(R^+)$ é:

$$6.663 \cdot 10^{10} \hat{\gamma}^2 - 4.098 \cdot 10^5 \hat{\gamma} - 0.161 - 0.233e^{-6.91 \cdot 10^5 \hat{\gamma}} = 0$$

Cuja solução é: $\hat{\gamma}(R) = 6.53 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R^+, L^+) = 1.51 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Então o valor da permeabilidade da tinta óleo é:

$$K = (1.27 \pm 0.24) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

ACRÍLICA.

$$R = 0.335 \pm 0.023;$$

$$L = (0.072 \pm 0.002) \text{ cm};$$

$$A = 251.20 \text{ cm};$$

$$t = 7 \text{ dias} = 6.048 \cdot 10^5 \text{ s};$$

$$a = 1.247 \cdot 10^{11};$$

$$b = 6.212 \cdot 10^{10};$$

A equação que governa o comportamento de $\hat{\gamma}(R)$ é:

$$6.212 \cdot 10^{10} \hat{\gamma}^2 - 3.427 \cdot 10^5 \hat{\gamma} - 0.0001 - 0.279e^{-6.048 \cdot 10^5 \hat{\gamma}} = 0$$

Cuja solução é: $\gamma(R) = 5.54 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R, L) = 3.25 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

A equação que governa o comportamento de (R^+) é:

$$5.895 \cdot 10^{10} \gamma^2 - 3.560 \cdot 10^5 \gamma - 0.014 - 0.279 e^{-6.048 \cdot 10^5 \gamma} = 0$$

Cuja solução é: $\gamma(R^+) = 6.10 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R^+, L^+) = 3.73 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Então, o valor da permeabilidade da tinta Acrílica é:

$$K = (3.25 \pm 0.48) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

NEUTROL.

$$R = 0.306 \pm 0.027;$$

$$L = (0.037 \pm 0.002) \text{ cm};$$

$$A = 248.00 \text{ cm}^2;$$

$$t = 6 \text{ dias} = 5.18 \cdot 10^5 \text{ s};$$

$$a = 9.630 \cdot 10^{10};$$

$$b = 5.117 \cdot 10^{10}.$$

A equação que governa o comportamento de $\delta(R)$ é:

$$5.117 \cdot 10^{10} \delta^2 - 3.021 \cdot 10^5 \delta + 0.135 - 0.335 e^{-5.18 \cdot 10^5 \delta} = 0$$

Cuja solução é: $\hat{\gamma}(R) = 5.493 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R) = 1.68 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

A equação que governa o comportamento de $\hat{\gamma}(R^+)$ é:

$$4.818 \cdot 10^{10} \hat{\gamma}^2 - 3.145 \cdot 10^5 \hat{\gamma} + 0.121 - 0.335e^{-5.18 \cdot 10^5 \hat{\gamma}} = 0$$

Cuja solução é: $\hat{\gamma}(R) = 6.17 \cdot 10^{-6}$,

o que resulta:

$$K(R^+, L^+) = 1.99 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Então o valor da permeabilidade do Neutrol é:

$$K = (1.68 \pm 0.31) \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}.$$

TABELA 1.

Material e tempo de exposição	Densidade(ρ) (g/cm ³)	Espessura(L) (cm)	Área(A) (cm ²)	Razão(R)
Tinta Esmalte t=8 dias	1.056 \pm 0.095	0.047 \pm 0.004	239.61	0.357 \pm 0.025
Tinta Óleo t=8 dias	1.056 \pm 0.095	0.027 \pm 0.002	257.40	0.375 \pm 0.024
Tinta Latex t=9 dias	1.150 \pm 0.050	0.026 \pm 0.001	246.48	0.402 \pm 0.020
Tinta Acrílica t=7 dias	1.150 \pm 0.050	0.072 \pm 0.003	251.20	0.335 \pm 0.023
Tinta Epoxi t=8 dias	1.338 \pm 0.067	0.024 \pm 0.001	248.00	0.345 \pm 0.027
Neutrol t=6 dias	0.940 \pm 0.047	0.037 \pm 0.002	248.00	0.306 \pm 0.027

Tabela 1: Parâmetros utilizados no cálculo da permeabilidade de cada tinta ao radônio, onde o tempo t se refere ao tempo de exposição empregado para a análise de cada tinta. A Razão (R) foi determinada experimentalmente utilizando os parâmetros especificados acima.

TABELA 2.

Material	Permeabilidade(K) $10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	Razão(R1)	Razão(R2)
Tinta Esmalte	2.22 ± 0.44	0.549 ± 0.038	0.378 ± 0.026
Tinta Óleo	1.27 ± 0.24	0.417 ± 0.027	0.263 ± 0.017
Tinta Latex	1.31 ± 0.22	0.444 ± 0.022	0.285 ± 0.014
Tinta Acrílica	3.25 ± 0.48	0.650 ± 0.045	0.481 ± 0.033
Tinta Epoxi	1.04 ± 0.17	0.364 ± 0.028	0.223 ± 0.017
Neutrol	1.68 ± 0.31	0.494 ± 0.043	0.328 ± 0.029

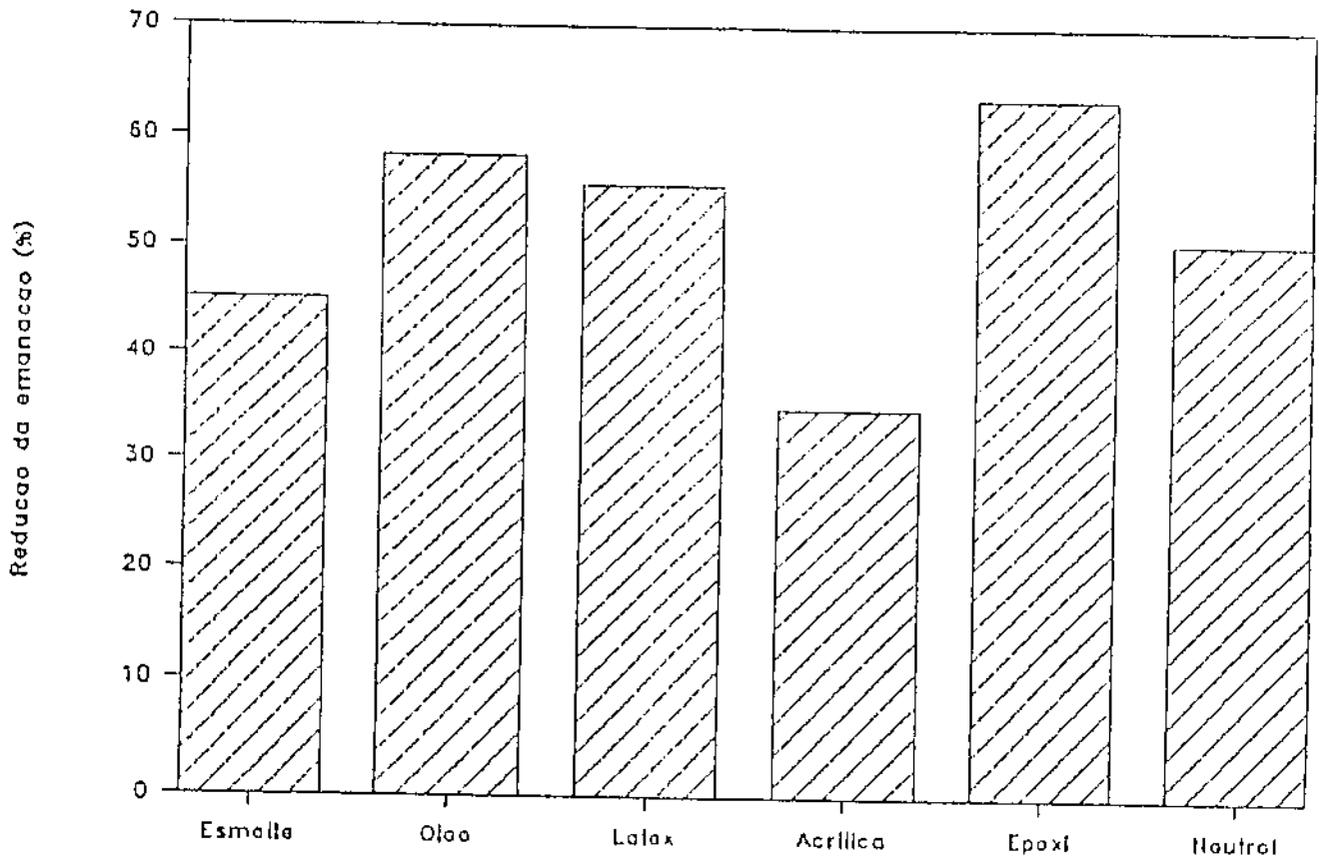
Tabela 2: Valores da permeabilidade de cada tinta ao gás nobre radônio. A Razão (R1) se refere à razão entre as densidades de traços nos dois detectores, calculada para tempos da ordem de 100 dias (para tempos dessa ordem ou maiores, a razão entre as densidades de traços nos detectores é independente do tempo), e espessuras de 0.05 cm. Já razão (R2) se refere à razão entre as densidades de traços calculada para tempos da ordem de 100 dias e espessura de 0.1 cm.

TABELA 2.

Material	Permeabilidade(K) $10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	Razão(R1)	Razão(R2)
Tinta Esmalte	2.22 ± 0.44	0.549 ± 0.038	0.378 ± 0.026
Tinta Óleo	1.27 ± 0.24	0.417 ± 0.027	0.263 ± 0.017
Tinta Latex	1.31 ± 0.22	0.444 ± 0.022	0.285 ± 0.014
Tinta Acrílica	3.25 ± 0.48	0.650 ± 0.045	0.481 ± 0.033
Tinta Epoxi	1.04 ± 0.17	0.364 ± 0.028	0.223 ± 0.017
Neutrol	1.68 ± 0.31	0.494 ± 0.043	0.328 ± 0.029

Tabela 2: Valores da permeabilidade de cada tinta ao gás nobre radônio. A Razão (R1) se refere à razão entre as densidades de traços nos dois detectores, calculada para tempos da ordem de 100 dias (para tempos dessa ordem ou maiores, a razão entre as densidades de traços nos detectores é independente do tempo), e espessuras de 0.05 cm. Já razão (R2) se refere à razão entre as densidades de traços calculada para tempos da ordem de 100 dias e espessura de 0.1 cm.

Figura 13: Porcentagem de redução na emissão obtida através da utilização dos materiais testados. Essa porcentagem se refere à Razão(RI) especificada na Tabela 2.



X - CONCLUSÃO.

Nesta tese foram testadas várias tintas e o protetor contra unidade Neutrol, com intenção de caracterizar esses materiais com respeito a suas permeabilidades ao gás radônio. Esses testes visam a verificação da possibilidade de se utilizar esses materiais como revestimento interno de residências de forma a diminuir a contaminação ambiental por radônio e seus produtos de decaimento causada pela emissão de radônio do material de construção.

Como pode ser visto na Tabela 2, os valores de permeabilidade dos materiais testados - no caso do radônio o seu coeficiente de difusão é uma estimativa da permeabilidade dos materiais a este gás - estão na faixa de 1 a $3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. A tinta que apresentou uma menor permeabilidade ao radônio foi a tinta Epoxi; em oposição, a tinta Acrílica apresentou uma maior permeabilidade em relação às tintas testadas.

O transporte do radônio do material de construção pode portanto ser reduzido devido à aplicação de revestimentos internos, como tintas, por exemplo. Para que seja eficiente esta prática requer a integridade da camada de tinta ou de qualquer outro revestimento interno. Se existirem rachaduras, por exemplo, na película de tinta, haverá um aumento da emissão de radônio na região que não possua o revestimento citado. O grau de eficiência desse método depende da espessura do revestimento interno utilizado, como pode ser visto através da Tabela -

2., comparando-se a Razão(R1), calculada para tempos de exposição da ordem de 100 dias (para tempos dessa ordem ou maiores, a razão entre as densidades de traços nos detectores é independente do tempo), e espessura de 0.05-cm e a Razão (R2) calculada para tempos da ordem de 100-dias e espessura de 0.1 cm. Através dessa comparação nota-se o efeito de redução na razão entre as densidades de traços nos detectores obtida pelo aumento da espessura da película de tinta testada.

Deve ser notado também que a aplicação de revestimentos em paredes internas de residências, por dificultar a emissão de radônio do material de construção, impede a diminuição de sua concentração (e de seus produtos de decaimento) no material de construção e no próprio revestimento interno, resultando em "aumento" da atividade gama da parede. Do ponto de vista de danos causados pela radiação, este efeito nocivo, entretanto, é muito pequeno comparado com o efeito benéfico que pode ser obtido pela redução da atividade alfa no ar através da utilização de revestimentos internos em residências.

A técnica utilizada neste experimento pode ser utilizada para o estudo de vários tipos de membranas usadas como filtros para a separação de isótopos radioativos gasosos. Uma mistura de radioisótopos com diferentes meias-vidas podem ser separados mediante a passagem de um volume a outro através de uma membrana de permeabilidade adequada, tal que os radioisótopos de meia-vida curta decaem antes de alcançarem o detector colocado após a membrana. Esta técnica de separação utiliza detectores sólidos de traços e foi utilizada para a separação do tório (^{220}Rn) e do radônio (^{222}Rn) (Ref. 53).

REFERÊNCIAS:

- (1) Cohen, B.L. (1980) - "Health effects of radon from ensulation of buildings,"- Health Phys., vol.39, pp 937 - 941.
- (2) Kerr, R.A. (1988) - "Indoor radon: the deadliest pollutant,"- Science, vol.240, pp 606-608.
- (3) Nero, A.V., Schwer, M.B., Nazaroff, W.W., and Rev - zan, K.L (1986) - "Distribution of airborne radon-222 - concentrations in U.S. homes",- Science, vol.234, pp992.
- (4) Groer, P.G., R.D. Evans and D.A. Gordon (1973) -"An instant working level meter for uranium mines",- Health-Phys., vol.24, pp 387-395.
- (5) F. Abu-Jarad and J.H.Fremlin (1983) -"Effect of in - ternal wall covers on radon emanation inside houses", - Health Phys., vol.44, pp 243-248.
- (6) Nero, A.V., and Nazaroff, W.W (1984) - "Characteri - sing the source of radon indoors",- Radiat. Prot. Dosim. vol.7,p23.
- (7) Hildingson, O. (1982) - "Radon measurements in 12000 Swedish homes",- Environ. Int., vol.8, p67.
- (8) Hess, C.T., Weiffenbach, C.V., and Norton, S.A. (19- 83) - "Environmental radon and cancer correlations in - Maine",- Health Phys., vol.45, p339.
- (9) Gesell, T.F. (1983) - "Background atmospheric ²²²Rn- concentrations outdoors and indoors: A review",- Health-Phys., vol 45, p289.

- (10) Nero, A.V. (1983) - "Airborne radionuclides and radiation in buildings: A review", - Health Phys., vol 45 - p303.
- (11) Gesell, T.F. (1973) - "Some radiological aspects of radon-222 in liquified petroleum gas". In Stanley, R.E., and Moghissi, A.A. (eds), Noble gases, U.S. Energy Research & Dev. Admin., CONF-730915, Las Vegas, NV, p612.
- (12) Johnson, R.H., Bernhardt, D.E., Nelson, N.S., and Galley, H.V. (1973) - "Radiological health significance of radon in natural gas". In Stanley, R.E., and Moghissi, A.A. (eds), Noble Gases, U.S. Energy Research & Dev. Admin., CONF-730915, Las Vegas, NV, p532.
- (13) William W. Nazaroff and Anthony V. Nero, JR (1989)- "Radon and its decay products in indoor air", - Wiley - Interscience - John Wiley & Sons, New York.
- (14) Sciochetti, G., Clemente, G.F., Ingrao, G., and Scacco, F. (1983) - "Results of a survey on radioactivity of building materials in Italy", Health Phys., vol. - 45, p385.
- (15) Ingersoll, J.G. (1983) - "A survey of radionuclide contents and radon emanation rates in buildings materials used in the U.S., Health Phys., vol 45, p377.
- (16) Browne, E., and Firestone, R.B. (1986). Table of Radioactive Isotopes (V.S. Shirley, ed.), Wiley-Interscience, New York.
- (17) National Council on Radiation Protection and Measurements (1985). A Handbook of Radioactivity Measurement-Procedures, 2nd ed. Report N° 58, National Council on - Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.

- (18) Lederer, C.M., and Shirley, V.S. (1978). Table of Isotopes, Wiley-Interscience, New York.
- (19) Jacobi, W. (1972) - "Activity and potential alpha energy of radon 222 and radon 220 daughters in different-air atmospheres", Health Phys. vol 22, p441.
- (20) Gunning, C., and Scott, A.G. (1982) - "Radon and -thoron daughters in housing", Health Phys., vol 42, p527.
- (21) Bigazzi, G., J.C. Hadler and S.R. Paulo (1988) -"On indoor radon contamination monitoring with plastic nuclear track detectors: the influence of plate-out effect",- Nuclear Tracks and Radiation Measurements, vol. 15, N^os. 1-4, pp539-542.
- (22) Bigazzi., G., J.C. Hadler and S.R. Paulo (1989) - "On indoor radon monitoring with SSNTDs: Experimental results concerning plate-out and self-plate-out effects",- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A - 280, pp506-509.
- (23) Harley, N.H. and B.S. Pasternack (1972) - "Alpha absorption measurements applied to lung dose from radon - daughters", Health Phys., vol. 23, pp771-782.
- (24) Bruno, R.C. (1983) - "Verifyng a model of radon decay product behavior indoors", Health Phys., vol. 45, - p471.
- (25) Porstendörfer, J. (1984) - "Behaviour of radon daughter products in indoor air", Radia. Prot. Dosim., vol. 7, p107.
- (26) Porstendörfer, J., A. Wicke and A. Schraub (1978) - "The influence of exhalation, ventilation and deposition processes upon the concentration of radon (Rn-222), tho-

- ron (Rn-220) and their decay products in room air", Health Phys., vol. 34, pp465-473.
- (27) Raabe, O.G. (1969) - "Concerning the interactions that occur between radon decay products and aerosols", Health Phys., vol. 17, pp177-185.
- (28) Task Group of Lung Dynamics of ICRP (1966) - "Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract", Health Phys., vol. 12, pp173 - 207.
- (29) George, A.C., Knutson, E.O., and Tu, K.W. (1983) - "Radon daughter plateout-I. Measurements", Health Phys., vol. 45, p439.
- (30) Knutson, E.O., George, A.C., Frey, J.J., and Koh, B.R. (1983) - "Radon daughter plateout-II. Prediction model", Health Phys., vol. 45, p445.
- (31) Busigin, A., van der Vooren, A.W., Babcock, J.C., and Phillips, C.R. (1981) - "The nature of unattached RnA (^{219}Po) particles", Health Phys., vol. 40, p333.
- (32) Knutson, E.O., George, A.C., Knuth, R.H., and Koh, B.R. (1984) - "Measurements of radon daughter particle size", Radiat. Prot. Dosim., vol. 7, p121.
- (33) Schiller, G.A., Nero, A.V., Revzan, K.L., and Tien, C.L. (1984) - "Radon decay product behavior indoors: Numerical modeling of convection effects", Report LBL-17609, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.
- (34) Majborn, B. (1986) - "Measurement of radon in dwellings with CR-39 track detectors", Nuclear Tracks and Radiation Measurements, vol. 12, Nos. 1-6, pp763-766.
- (35) Moses, H., A.F. Stehney and H.F. Lucas, Jr. (1960)-

- "The effect of meteorological variables upon the vertical and temporal distributions of atmospheric radon", - Journal of Geophysical Research, vol 65, N^o 4, pp1223 - 1238.
- (36) Abu-Jarad, F. and M.I. Al Jarralah (1986) - "Radon-in Saudi houses", Radiation Protection Dosimetry, vol.14 N^o 3, pp243-249.
- (37) Nazaroff, W.W., Lewis, S.R., Doyle, S.M., Moed, B.-A., and Nero, A.V. (1987) - Experiments on pollutant - transport from soil into residential basements by pressure-driven air flow", Environ. Sci. Technol., Vol. 21, - p459.
- (38) U.S. Dept. of Commerce (1981) - Radon transport - through and exhalation from buildings materials: A review and assesment, NBS technical note 1139, Washington, - DC.
- (39) Kennard, E.H. (1938) -"Kinetic theory of gases", McGraw-Hill Book Company, Inc.
- (40) Boltzmann, L. (1964) - "Lectures on gas theory", University of California Press, Berkeley and Los Angeles.
- (41) Fleischer, R.L., P.B. Price and Walker. - "Nuclear-tracks in solids", University of California Press (1975)
- (42) Enge, W. (1980) -"Introduction to plastic nuclear - track detectors", Nuclear Tracks, vol. 4, N^o 4, pp283 - 308.
- (43) Green, P.F., A.G. Ramli, S.A.R. Al Najjar, F. Abu - Jarad and S.A. Durrani (1982) - "A study of bulk-etch - rates and track-etch rates in CR-39", Nuclear Instru - ments and Methods, 203, pp551-559.

- (44) Bigazzi, G., J.C. Hadler, A.L.F. Marques and S.R. - Paulo (1986) - "Measurement of the relative efficiencies between plastic nuclear track detectors of radon and daughters alpha radioactivity in air", Nuclear tracks, vol. 11.
- (45) Stranden, E., Kolstad, A.K., and Lind, B. (1984) - "The influence of moisture and temperature on radon exhalation", Radiat. Prot. Dosim., vol. 7, p55.
- (46) Zapalac, G.H. (1983) - "A time-dependent method for characterizing the diffusion of ^{222}Rn in concrete", Health Phys. vol. 45, N^o 2, pp377-383.
- (47) Swedjemark, G.A., and Mjones, L. (1984) - "Radon - and radon daughter concentration", in Swedish houses", - Radiat. Prot. Dosim., vol. 7, p333.
- (48) Jonassen, N., and McLaughlin, J.P. (1980) - "Exhalation of radon-222 from building materials and walls", in T.F. Gessel and W.M. Lowder (eds), Natural Radiation Environment III, U.S. Dept. of Energy CONF-780422, p1211.
- (49) Tanner, A.B. (1964) - "Radon migration in the ground: A review", In J. A.S. Adams and W.M. Lowder (eds), - Natural Radiation Environment, University of Chicago - Press, Chicago, p161.
- (50) Tanner, A.B. (1980) - "Radon migration in the ground: A supplemental review", In T. F. Gessel and W.M. - Lowder (eds), Natural radiation Environment III, U.S. - Dept. of Energy, rep. CONF-780422, p5.
- (51) Pettersson, H., Hildingson, O., Samuelsson, C., and Hedvall, R.R. (1982) - "Radon exhalation from building - materials", Statens Provningsanstalt Tekn, rapport SP - Rapp 1982:32, Boras, Sweden.

- (52) van der Lugt, G., and Scholten, L.C. (1985) - "Radon emanation from concrete and the influence of using fly ash in cement", Sci. Total Environ., vol. 45, p143.
- (53) T.V. Ramachandran, B.Y. Lalit and U.C. Mishra (1987) - "Measurement of Radon Permeability through some membranes", Nucl. Tracks Radiat. Meas., vol. 13, pp81-84.
- (54) J. Hakl, I. Hunyadi and M. Tóth-Szilágyi, - "Radon-Permeability of foils measured by SSNTD technique" (non equilibrium approach), 15th Inf. Conf. on Particle Tracks in Solids, Marburg, sept. 3-7, 1990.