



CNPq



CBPF-CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS

Notas de Física

CBPF-NF-041/92

EFEITOS GEOMÉTRICOS NA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE
EQUILÍBRIO DA FAMÍLIA DO RADÔNIO EM AMOSTRAS DE AR

por

L.R. GIL, A. MARQUES E A. RIVERA

RESUMO

Examinam-se elementos geométricos afetando os valores do fator de equilíbrio da família do Radônio em medidas com amostras atmosféricas. Os argumentos gerais se aplicam igualmente a qualquer detector de partículas- α mas os exemplos aqui trabalhados são restritos ao caso de detectores sólidos de traços, em particular a CR-39. O fator de equilíbrio é calculado para placas detectoras de forma quadrada e retangular com diferentes dimensões e a diferentes temperaturas para o caso em que o agente do desequilíbrio radioativo seja comum a todos os membros da família, como no caso da ventilação. O método dispensa calibrações.

Palavras-chave: Eficiência geométrica; Radônio; Radioatividade atmosférica.

INTRODUÇÃO

Desvios do equilíbrio radioativo da família do radônio em amostras atmosféricas produzidos por agentes físicos diversos, como ventilação, fixação de nuclídeos às paredes de confinamento ou a misturas do aerosol presente no ar, são costumeiramente descritos por meio do fator de equilíbrio, $F^{(1)}$. Sua determinação envolve, no caso geral, a medida das concentrações de atividade referentes aos descendentes do Radônio (RaA, RaB, RaC e RaC'), bem como a medida da concentração do próprio Radônio na amostra desequilibrada. No caso em que o desequilíbrio é produzido por um único agente comum a todos os descendentes, como ocorre quando há troca de ar por ventilação, é possível mostrar que um regime estacionário é atingido com um acoplamento entre as concentrações de atividade de cada nuclídeo da família dada por

$$c_i = \lambda_i c_{i-1} / (\lambda_i + A) \quad [1]$$

onde λ_i é a constante de desintegração do i-gésimo descendente do Radônio e A é a taxa relativa de renovação por ventilação para qualquer membro da cadeia ⁽¹⁾.

A equação de acoplamento entre os c_i , acima referida, permite exprimir quaisquer das concentrações de atividade em função de c_0 - a concentração de atividade do Radônio. Num experimento típico com detector de traços o detector é exposto durante um tempo apropriado às partículas α originadas nas desintegrações das diferentes espécies radioativas presentes no ar e, num segundo experimento, o detector é exposto apenas às alfas do Radônio, mediante filtros especiais que removem seus descendentes. Planinič e Faj mostraram que as densidades de traços resultantes desses experimentos, juntamente com as condições de acoplamento das concentrações de atividade levam a uma equação

algébrica da qual se extrai o valor de Λ e daí se obtém o valor do fator de equilíbrio⁽²⁾. Seu cálculo, entretanto, considera como 100% a eficiência de detecção das alfas, eliminando assim todas as possíveis influências das dimensões dos detectores e dos distintos alcances em ar das alfas emitidas pelos diferentes núclídeos da cadeia do Radônio.

Neste trabalho aqueles efeitos são examinados e o fator de equilíbrio é calculado variando amplamente as condições geométricas. Um procedimento para o caso em que os diferentes agentes externos produzindo o desequilíbrio (ventilação, fixação às paredes, perda para o aerosol) atuam diferentemente para cada membro da cadeia é também esquematizado.

CÁLCULO DO FATOR DE EQUILÍBRIO.

O fator de equilíbrio, F , pode ser convenientemente calculado a partir de⁽²⁾:

$$F = \sum_1^4 f_i c_i / c_0 \quad [2]$$

onde $f_1 = 0,105$, $f_2 = 0,516$, $f_3 = 0,380$, $f_4 = 5,27 \cdot 10^{-8}$ e $c_i (i=0...4)$ são as concentrações de atividade do Radônio e descendentes relevantes (até o ^{214}Po); apenas c_0, c_1 , e c_4 se referem a emissores- α . O número total de partículas- α registradas num experimento durando um tempo T com o detector nu, isto é, sem qualquer filtragem do ar, será:

$$n_\alpha = (c_0 \varepsilon_0 v_0 + c_1 \varepsilon_1 v_1 + c_4 \varepsilon_4 v_4) T \quad [3]$$

onde os $\varepsilon_i (i=0,1 \text{ e } 4)$ são as eficiências geométricas para a detecção de

partículas- α emitidas pelo Radônio, pelo RaA e pelo RaC', respectivamente, v_i ($i=0,1$ e 4), os correspondentes volumes de amostragem, isto é, volumes do espaço circundando o detector fora dos quais nenhuma partícula emitida poderá atingir a sua face sensível. Na [3] a eficiência intrínseca do detector foi arbitrariamente fixada em 100%, o que é praticamente o caso com CR-39; outros casos podem ser incluídos sem dificuldades. O volume de amostragem depende da forma do detector e do alcance R_α das α em ar. No caso de um detector com a forma de disco de raio a onde as partículas são observadas em apenas uma das faces, o volume de amostragem é o do cilindro reto com raio da base $a+R_\alpha$, altura R_α , disco e base centrados; no caso em que o detector tenha forma retangular de lados a e b é o volume do prisma reto de lados $a+2R_\alpha$, $b+2R_\alpha$ e altura R_α , o detector centrado com a base.

Dado que $c_0 \epsilon_0 v_0 T = n_\alpha$, o número de alfas devidas exclusivamente ao Radônio (experimento com o ar filtrado) resulta:

$$n_\alpha/n_0 = 1 + \frac{\epsilon_{11} v_1}{\epsilon_0 v_0} (c_1/c_0) + \frac{\epsilon_{44} v_4}{\epsilon_0 v_0} (c_4/c_0) \quad [4]$$

Levando em conta as equações de acoplamento [1], fazendo $r = n_\alpha/n_0 - 1$ e ainda desprezando Λ em presença de $\lambda_4 = 4,234 \cdot 10^3$, se obtém de [4]:

$$\begin{aligned} \Lambda^3 + \left[\sum_1^3 \lambda_1 - \frac{\epsilon_{11} v_1}{\epsilon_0 v_0} \frac{\lambda_1}{r} \right] \Lambda^2 + \left[\sum_{1 \neq j} \lambda_1 \lambda_j - \frac{\epsilon_{11} v_1}{\epsilon_0 v_0} \frac{\lambda_1 (\lambda_2 + \lambda_3)}{r} \right] \Lambda + \\ + \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left[1 - \frac{\epsilon_{11} v_1 + \epsilon_{44} v_4}{\epsilon_0 v_0} \cdot \frac{1}{r} \right] \end{aligned} \quad [5]$$

Esta equação é equivalente à de Planinič e Faj⁽²⁾, onde $\epsilon_{i1} v_i = 1$ e o fator r é o inverso do nosso.

Com o valor de Λ , solução da [5], as [1] permitem fixar os valores de c_1/c_0 que levados em [2] dão o fator de equilíbrio, F .

Uma vez que os valores das constantes de desintegração envolvidas são bem conhecidos, as soluções da [5] dependem apenas das eficiências geométricas e dos volumes de amostragem, que por sua vez dependem dos alcances em ar. Estes foram calculados por integração numérica de $\int dE/S$, sendo S o poder de freiamento. Este foi obtido, para nitrogênio e oxigênio a partir das fórmulas de Bichsel e Porter⁽³⁾ até o limite em que são válidas ($E_\alpha \geq 1$ MeV); daí em diante os alcances empíricos de Ziegler e Chu⁽⁴⁾ até onde medidos ($E_\alpha \approx 400$ keV), o resíduo inacessível sendo desprezado como pequeno em comparação com a parte acessível em todos os casos. Os alcances foram calculados para diferentes temperaturas com o objetivo de cobrir eventuais variações de F com esse parâmetro (também foram calculados em diferentes pressões e para distintos valores da umidade relativa mas esses parâmetros foram constatados de menor significação exceto em casos muito extremos, ocorrendo dificilmente em situações práticas). As eficiências geométricas foram calculadas por simulação. Valores típicos usados neste trabalho se encontram nas Tabelas I e II; a Tabela II e as figuras 1 e 2 mostram o comportamento de ϵ_{11} em função das dimensões das placas e para diferentes temperaturas.

CONCLUSÕES

Uma comparação dos valores do fator de equilíbrio obtido dentro das hipóteses da ref.(2) e aqueles obtidos com as opções deste trabalho se apresenta na Fig.3; aí se representa graficamente o valor do fator de

equilíbrio contra o que chamamos de densidade relativa excedente: $n_{\alpha}/n_0 - 1 = d_{\alpha}/d_0 - 1$ onde os d's são densidades superficiais. A curva que escolhemos corresponde a $T=20^{\circ}\text{C}$ e dimensões do detector $1\text{cm} \times 1\text{cm}$, mas em todos os outros casos a discrepância é igualmente significativa.

É oportuno registrar uma palavra de advertência sobre os limites dos cálculos, tanto no caso da ref.(2) como no nosso. No caso de equilíbrio radioativo, $F=1$ e $\Lambda = 0$; entretanto é fácil ver que no limite em que $\Lambda \rightarrow 0$,

$$n_{\alpha}/n_0 \rightarrow 2, \text{ no caso da ref. [2]}$$

$$n_{\alpha}/n_0 \rightarrow (\epsilon_1 v_1 + \epsilon_4 v_4) / \epsilon_0 v_0, \text{ no nosso caso}$$

de modo que as duas curvas não se estendem pelo mesmo intervalo de valores no eixo-x. Também em ambos os casos, atingidos aqueles limites, o discriminante da equação cúbica [5] anula-se e as soluções reais e positivas passam por uma descontinuidade que não tem sentido fisicamente. Assim, o procedimento de medida do fator de equilíbrio aqui descrito não se aplica bem a amostras perto do equilíbrio radioativo.

Já o comportamento de nossos resultados, quer para uma dada dimensão do detector e diferentes temperaturas, quer para uma temperatura dada e diferentes dimensões do detector, representados tipicamente nas figs. 4 e 5, não revelam variações significativas, dado que o cálculo das eficiências incorpora flutuações daquela ordem de grandeza. Isto se deve ao fato de que embora os produtos $\epsilon_i v_i$ ($i=0\dots$) variem amplamente, conforme mostram as figs. 1 e 2, a equ. [5] é dominada pelos seus quocientes para $\epsilon_0 v_0$ e estes são razoavelmente constantes dentro das faixas de valores dos parâmetros aqui explorados.

Nosso resultado mostra que a introdução dos parâmetros geométricos

aquí indicada é essencial para a determinação correta do fator de equilíbrio da família do Radônio em amostras atmosféricas. Embora os exemplos manipulados se refiram a SSTD's, em particular a CR-39, com eficiência intrínseca $\approx 100\%$, os argumentos se aplicam igualmente a outros detetores e outros casos de eficiência intrínseca.

A formulação aquí desenvolvida restringe-se ao caso em que as concentrações de atividade prevalecendo no regime estacionário da amostra desequilibrada sejam principalmente afetadas por um único agente externo, como é o caso da ventilação. Assim pode ser útil, por exemplo em minas ou outras instalações subterrâneas sujeitas a ventilação forçada. Dispensa, obviamente, calibrações.

LEGENDAS DAS FIGURAS

Fig.1 - Eficiência Geométrica x Volume de Amostragem em função das áreas dos detectores, para R_n, R_{aA} e $R_{aC'}$, a 0°C .

Fig.2 - Eficiência Geométrica x Volume de Amostragem em função das áreas dos detectores, para R_n, R_{aA} e $R_{aC'}$, a 40°C .

Fig.3 -Fator de Equilíbrio calculado com Eficiência Geométrica 100% (ref.(2)) e para os valores deste trabalho consistentes com $T = 20^\circ\text{C}$ e detector com $1\text{cm} \times 1\text{cm}$.

Fig.4 -Fator de Equilíbrio com os valores das Eficiências Geométricas e volumes de amostragem calculados a 20°C e para três dimensões das placas detectoras: $3\text{cm} \times 3\text{cm}$, $5\text{cm} \times 5\text{cm}$, $3\text{cm} \times 5\text{cm}$.

Fig.5 -Fator de Equilíbrio com os valores das Eficiências Geométricas calculados para um detector de dimensões $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ e às temperaturas de 0°C , 20°C e 40°C .

LEGENDAS DAS TABELAS

Tabela I -Volumes de amostragem para diferentes temperaturas e dimensões do detector

Tabela II - Eficiências Geométricas para diferentes temperaturas e dimensões do detector

Tabela III - Produto $\epsilon_1 v_1$ ($i=0,1,4$) para diferentes temperaturas e dimensões do detector.

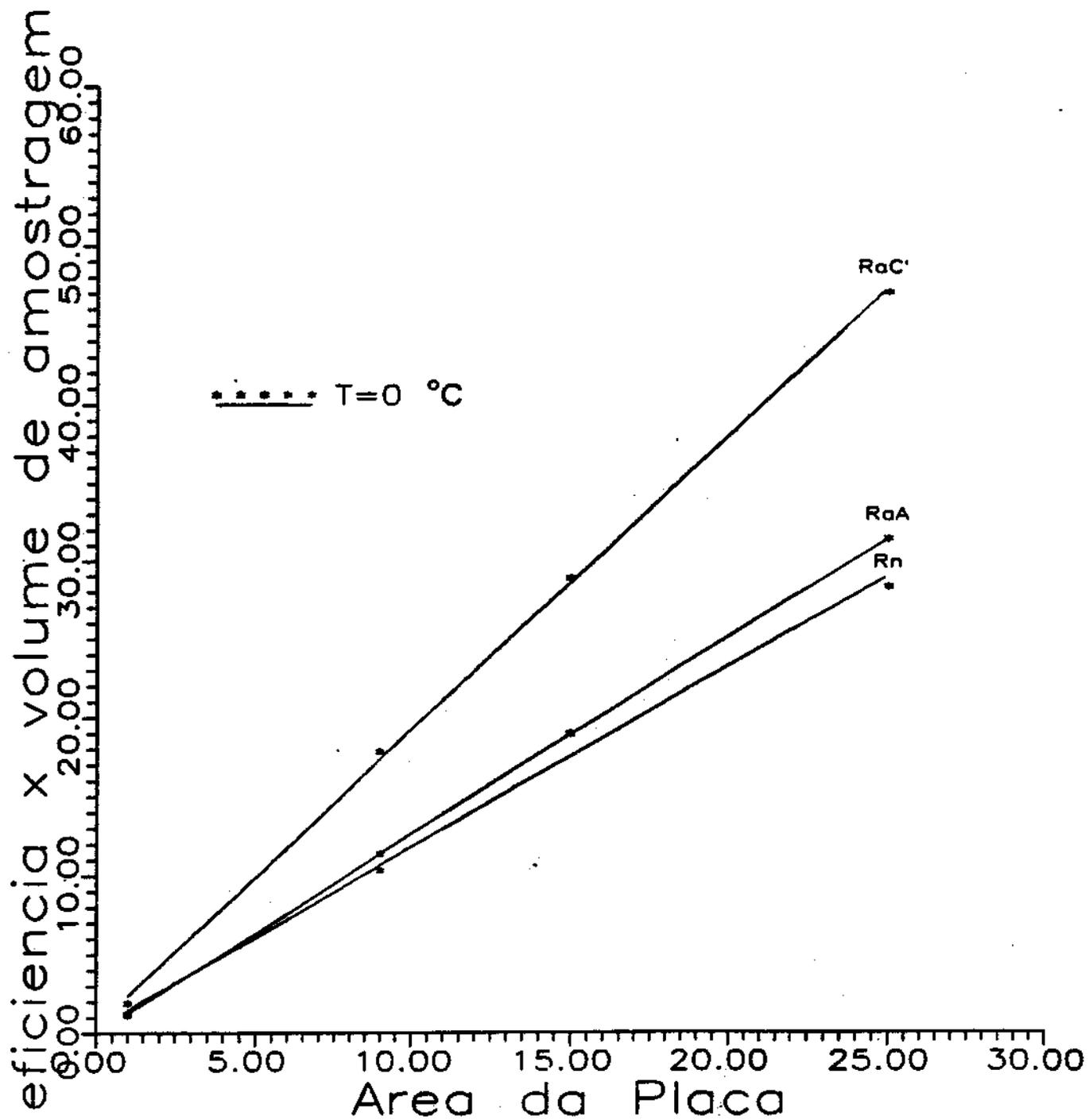


FIG. 1

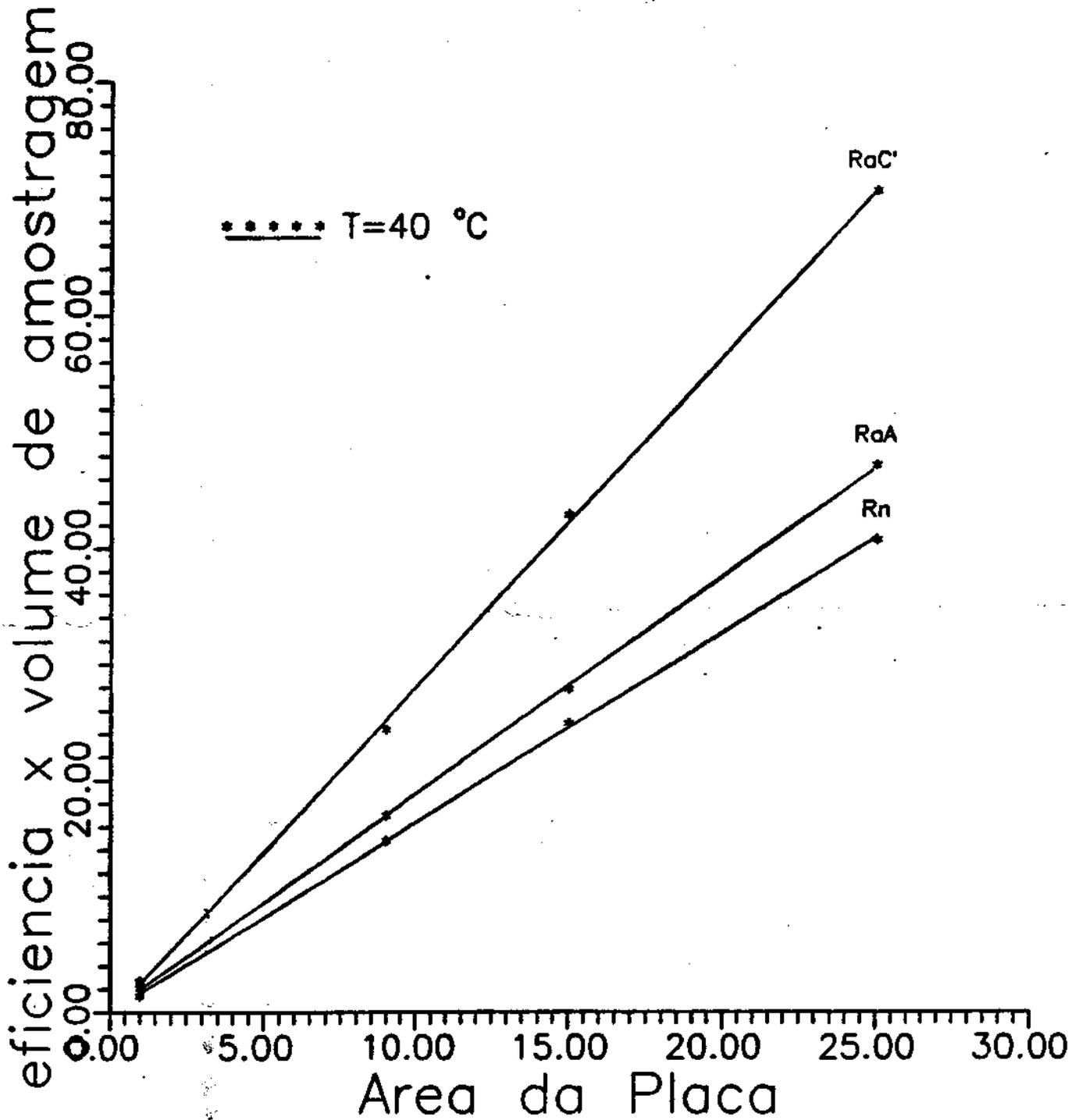


FIG. 2

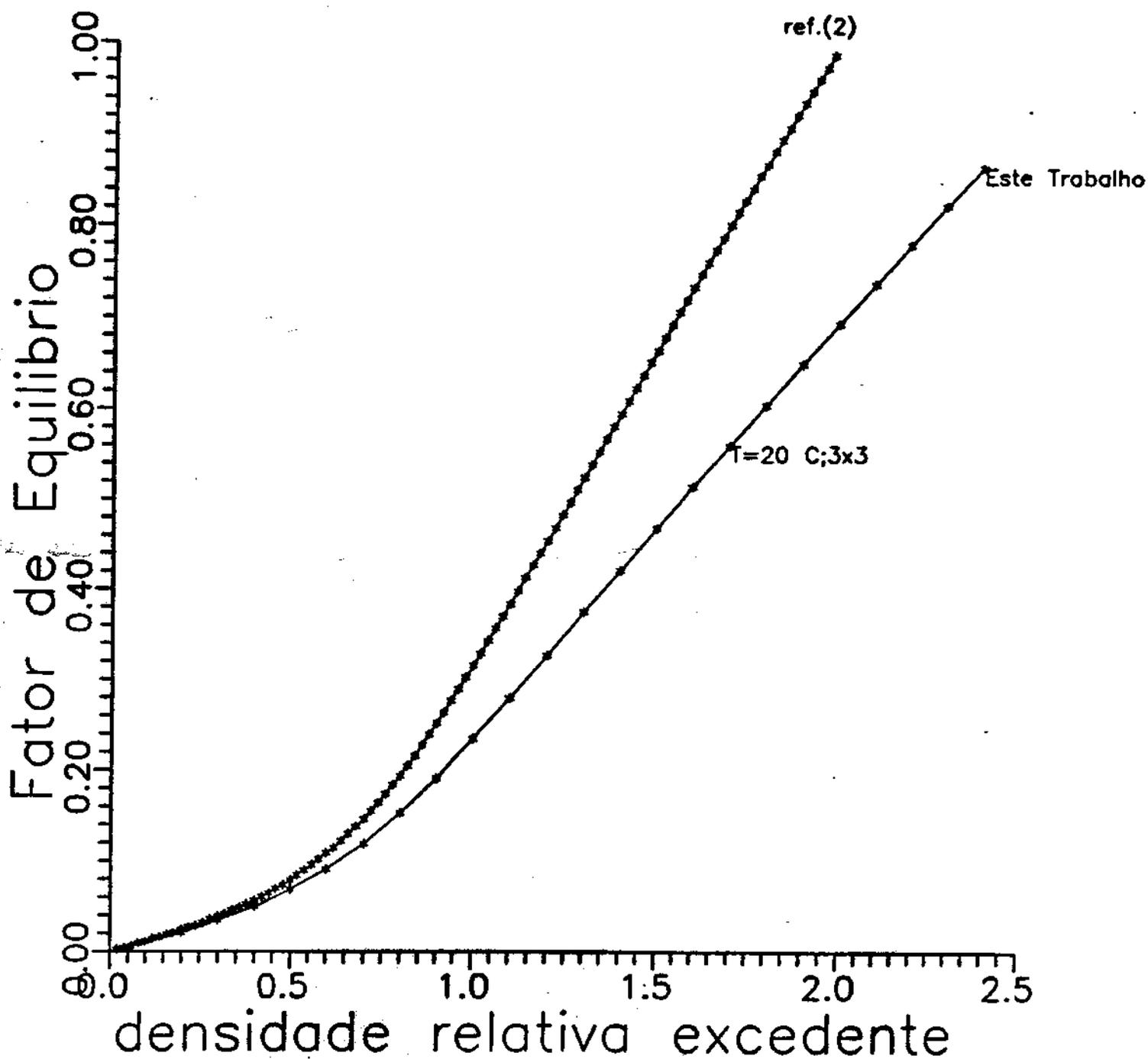
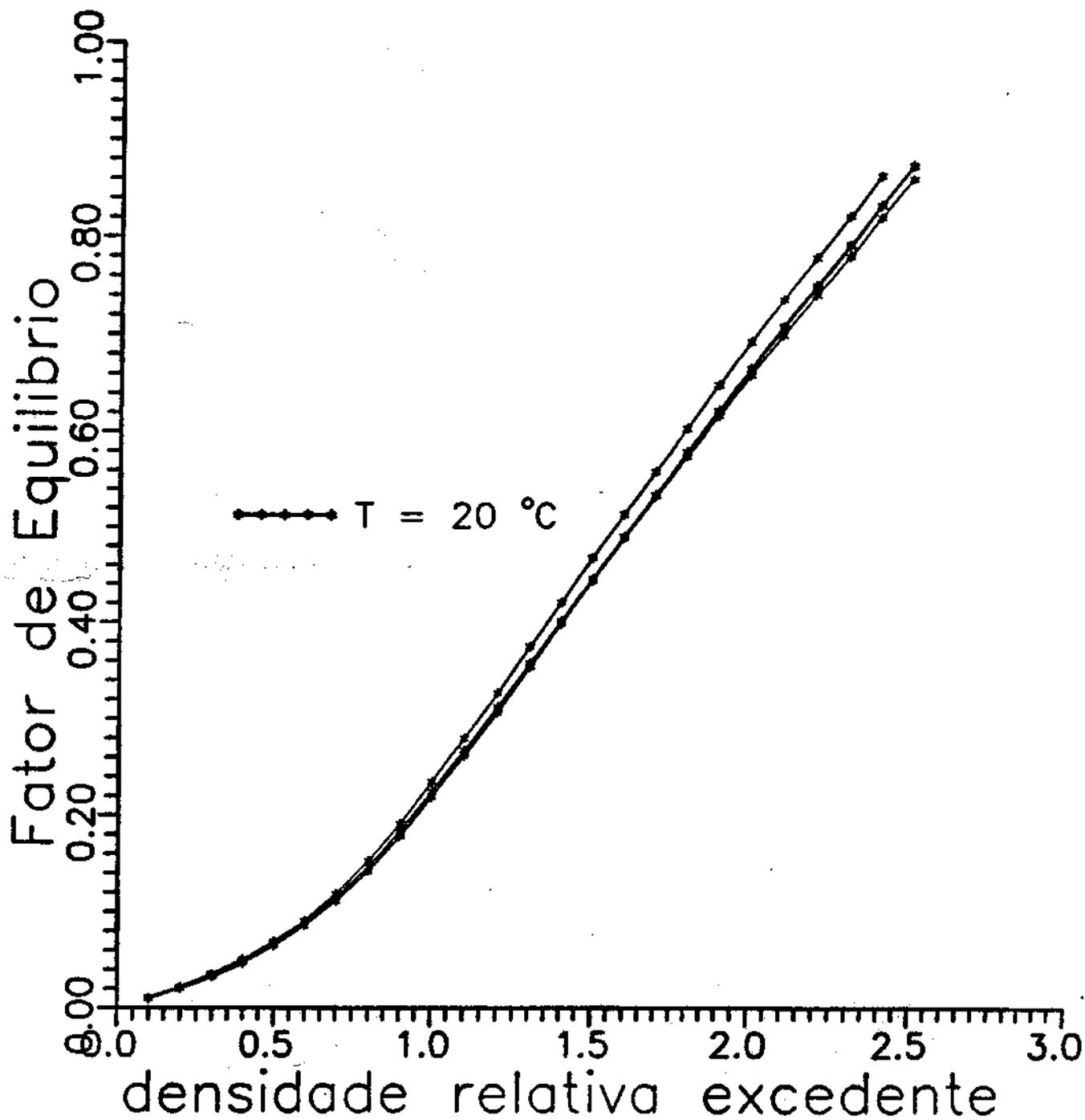


FIG. 3

**FIG. 4**

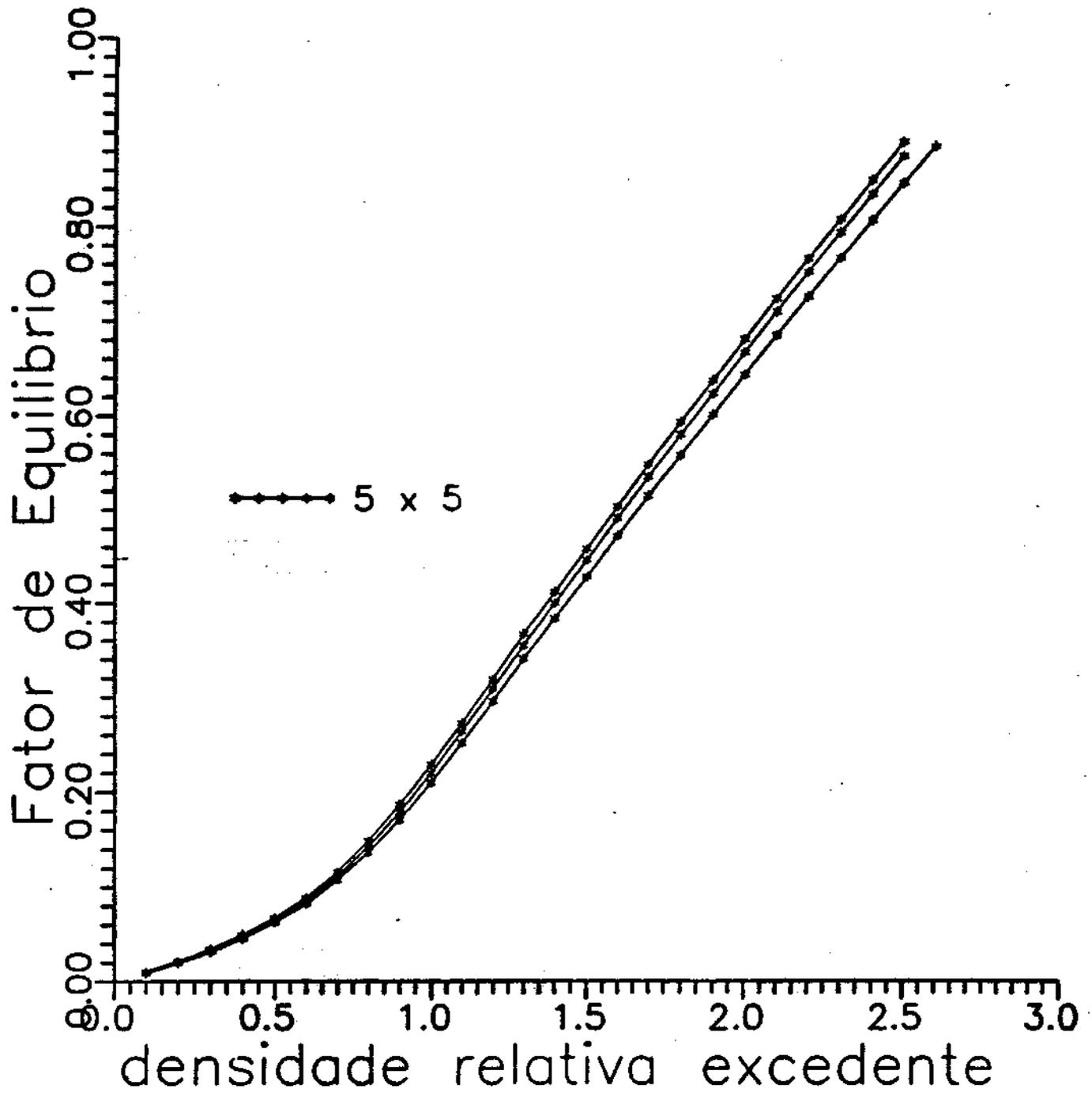


FIG. 5

TABELA I
Volumen de Amostragem

T(C)	Emissor- α	Alcance (cm)	Volume de Amostragem (cm ³)		
			3 x 3	5 x 5	3 x 5
0	Rn	5.64	1148	1496	1308
	RaA	6.34	1556	1980	1756
	RaC'	9.51	4612	5488	5028
20	Rn	6.09	1428	1696	1588
	RaA	6.88	1932	2420	2164
	RaC'	10.32	5768	6784	6256
40	Rn	6.67	1780	2244	2000
	RaA	7.55	2472	3048	2748
	RaC'	11.32	7440	8648	8024

TABLE II

Eficiências Geométricas ($\times 10^3$)

Dim. (cm)	Emissor α	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		
		0	20	40
3x3	Rn	11,21	9,800	8,320
	RaA	9,112	7,760	6,858
	RaC'	4,836	3,892	3,276
5x5	Rn	23,68	21,07	18,14
	RaA	19,80	17,73	15,46
	RaC'	10,71	9,352	8,166
3x5	Rn	16,44	14,34	12,46
	RaA	13,48	11,98	10,15
	RaC'	7,172	6,096	5,344

TABLE III

$p_1 = \epsilon_1 v_1$ em função da temperatura e das dimensões

DIM. (cm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)								
	0			20			40		
	P_0	P_1	P_4	P_0	P_1	P_4	P_0	P_1	P_4
3x3	12,89	14,20	22,30	13,75	15,00	22,45	14,82	16,96	24,38
5x5	35,40	39,24	58,76	37,87	42,93	63,45	40,70	47,16	70,62
3x5	21,56	23,69	36,07	22,77	25,91	38,13	24,90	27,88	42,87

REFERÊNCIAS

- 1 -W. JACOBI, Phys. 22,441 (1972)
- 2 -J.PLANINIČ and Z.FAJ, Health Phys.59,349 (1990)
- 3 -H.BICHSEL and L.E.PORTER, Phys.Rev.A25,2499 (1982)
- 4 -J.F.ZIEGLER and W.K.CHU, At.Data and Nucl.Data Tables,13,463 (1974).
- 5 -M.A.ABRAMOWITZ and I.A,STEGUN, Handbook of Mathematical Functions, Dover 8th Edition, 1972.