

CURSO DE CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS
U.F.M.G. - C.N.E.N.

MÉTODO DIFERENCIAL DE DETECÇÃO DE SEDIMENTOS
RADIOATIVOS EM MODELOS REDUZIDOS.

POR

ANGELO ALBERTO MAESTRINI

ORIENTADOR: OMAR CAMPOS FERREIRA

TESE APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES.

Belo Horizonte
Novembro de 1971.

AGRADECIMENTOS.

Apresento meus agradecimentos a todos os colegas que direta ou indiretamente me auxiliaram na realização d'êste trabalho. Devo, entretanto, externar meu reconhecimento a:

- ao pessoal da Seção de Hidrologia, da Divisão de Radioisótopos, Engenheiros PEDRO EDMUNDO AUN, GERALDO WILSON JR., OSWALDO VICENTE DE BELÉM MACHADO e JOSÉ OLYMPIO NARDELLI MONTEIRO DE CASTRO, pelas discussões sôbre o método proposto, sua concretização e aplicações no estudo de modêlo.
- Ao Engenheiro OSWALDO VICENTE DE BELÉM MACHADO, que primeiro mencionou a possibilidade de utilizar uma blindagem frontal.
- Ao técnico MATHEUS EUSTÁQUIO DA SILVEIRA pela sua dedicação em preparar a montagem experimental, sugestões sôbre modificações, traçado das curvas, e tratamento dos dados.
- Aos técnicos FÁBIO, JOSÉ CARLOS, JOSÉ ANTÔNIO, pelo auxílio no tratamento dos dados.
- Ao técnico LUIZ RAPHAEL AUN, pela paciente execução das figuras.

- Às secretárias GRACINHA e LEDA pelo cuidado e boa disposição com a datilografia deste trabalho.
- Ao colega JOSÉ OLYMPIO NARDELLI MONTEIRO DE CASTRO pelo auxílio no tratamento dos dados.
- Ao orientador, PROF. OMAR CAMPOS FERREIRA pelo inestimável auxílio na orientação, tratamento dos dados, interpretação e redação.

RESUMO

Descreve-se a importância do uso de traçadores radioativos em estudos sedimentológicos, na natureza e em modelos. Para conhecer a densidade superficial de traçador são necessárias: uma boa precisão das medidas e uma boa definição da área de detecção.

O método diferencial de detecção proposto como alternativa para o sistema de colimação simples, utiliza uma blindagem móvel frontal ao colimador. A diferença entre duas contagens permite conhecer com precisão a densidade superficial de traçador. A otimização dos parâmetros da blindagem diferencial é função, da área de detecção, da eficiência de detecção e da resolução, definida como a relação da diferença das duas contagens pela contagem maior.

Descreve-se o procedimento experimental para realizar o estudo simulando uma fonte plana por meio de uma fonte puntual.

A comparação dos resultados permite concluir que o sistema diferencial de colimação é vantajoso em comparação com o sistema de colimação simples.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.

- 1.1. Apresentação do problema
- 1.2. Origem e Importância do Problema
 - 1.2.1. Estudo na Natureza
 - 1.2.2. Estudo no Modelo
 - 1.2.3. A Importância
- 1.3. Finalidade do Estudo
 - 1.3.1. Precisão das Medidas em Modelo
 - 1.3.2. Área de Detecção
 - 1.3.3. Estabelecimento do Método diferencial de detecção
 - 1.3.4. Otimização das condições de detecção

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

- 2.1. Modo de tratar o problema
- 2.2. Descrição da aparelhagem
 - 2.2.1. Detector utilizado
 - 2.2.2. O colimador
 - 2.2.3. A blindagem auxiliar
 - 2.2.4. Distância ao Fundo
 - 2.2.5. A Fonte Radioativa
- 2.3. Descrição da Técnica Experimental
 - 2.3.1. O deslocamento da fonte radioativa
 - 2.3.2. A discriminação

- 2.3.3. A velocidade da fonte
- 2.3.4. A velocidade do registrador
- 2.3.5. A normalização dos resultados
- 2.4. Tratamento dos dados

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

- 3.1. Área de detecção em Colimação Simples
- 3.2. Eficiência de Detecção
- 3.3. Resolução em função do parâmetro de colimação
- 3.4. Incerteza relativa na área de detecção
- 3.5. Otimização das condições de detecção
- 3.6. Estimativa da precisão da medida em modelo

4. CONCLUSÕES.

5. SUGESTÕES PARA MELHORAR E CONTINUAR O ESTUDO.

- 5.1. Construção de uma fonte plana
 - 5.1.1. A fonte puntual
 - 5.1.2. A fonte plana
- 5.2. A vedação do Colimador
- 5.3. Método Contínuo de Detecção

6. APLICAÇÕES PRÁTICAS.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

8. FIGURAS E TABELAS.

1. INTRODUÇÃO.

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.

A construção de modelos reduzidos é muito usada para simular em laboratório os fenômenos que ocorrem na natureza.

Os estudos sedimentológicos são realizados em modelos visando os mais variados fins, porém, tendo todos, como base, a verificação do transporte dos sedimentos do fundo. Alguns dos estudos visam verificar o que acontece na natureza após a construção de certas obras, tais como terminais marítimos, molhes, interceptores oceânicos, portos oceânicos. Outros estudos visam simplesmente determinar a taxa de deslocamento dos sedimentos de fundo para realizar obras de dragagem em portos, barras, rios, canais.

De um modo geral, os estudos em modelos deveriam ser feitos com semelhança física, ou seja, com a mesma redução das escalas. No caso de modelos de rios, portos e estuários, isto implicaria em se ter uma altura de água extremamente reduzida, da ordem do centímetro, introduzindo fenômenos de superfície que afetariam fortemente o regime de escoamento (4). Adota-se, então, uma redução distorcida, onde a profundidade da água é relativamente maior que na natureza. Assim, nos modelos para estudos sedimentológicos, as reduções tem fatores de 500 a 1000 para a escala horizontal e da ordem de 100 para a escala vertical. As leis de semelhança são descritas, em geral, por equações de tipo adimensional. Com tais reduções torna-

se difícil reproduzir com perfeição os fenômenos da natureza.

Para simular o arraste, os sedimentos usados no modelo devem ter propriedades diferentes dos sedimentos naturais, por exemplo, ter menor densidade, granulometria diferente.

A experiência de longos anos levou os sedimentólogos a dimensionar adequadamente estes parâmetros.

Ainda assim resta um problema: a escala do tempo. Para simular o efeito da natureza durante determinado período de tempo por quanto tempo deverá funcionar o modelo?

Para resolver este problema a solução que mais tem sido utilizada é a calibração da escala de tempo do modelo pela comparação da evolução topográfica do local com a do modelo, desde que se conheçam dois levantamentos topográficos do local em duas épocas distintas. Mede-se então o tempo necessário para que o modelo evolua da primeira para a segunda situação.

Este método é utilizado quando se dispõe dos levantamentos topográficos de duas épocas, o que nem sempre é possível.

Deve-se ainda dizer que a calibração da escala de tempo do modelo pela obtenção da segunda configuração, é deficiente quanto ao conhecimento da movimentação dos sedimentos.

Além disto tem-se que realizar uma grande série de longas tentativas para reproduzir os efeitos da natureza e determinar a escala de tempo.

Para reduzir o tempo de calibração do modelo são usados traçadores, que permitem seguir, passo a passo, a

evolução do fenômeno de transporte dos sedimentos.

Os traçadores devem se comportar, física e quimicamente, como o meio, porém ter alguma propriedade que permita a sua distinção do meio. Assim, os sedimentos de cor diferente, ou marcados com substâncias fluorescentes podem ser seguidos com auxílio de fotografias ou de sensores especiais. Os traçadores radioativos tem se mostrado de grande utilidade nos vários ramos científicos e tecnológicos, e podem ser empregados na calibração de modelos graças à sensibilidade de detecção.

Algum trabalho tem sido feito neste setor, mas as informações são muito poucas, talvez, devido ao fato que os sedimentólogos estão mais habituados a utilizar traçadores convencionais tais como fluorescentes ou coloridos, o que não acontece na natureza, onde os traçadores radioativos são o único método prático de estudar a movimentação de sedimentos.

A vantagem dos sedimentos marcados com radioisótopos sobre os fluorescentes ou coloridos consiste na facilidade de detecção, mesmo quando o meio não é completamente transparente ou quando há enterramento de uma parte dos sedimentos. A sensibilidade dos detectores permite acompanhar sua movimentação durante maior tempo e distância.

Basicamente, são comparadas as experiências com sedimentos marcados com radioisótopos na natureza com as experiências equivalentes realizadas no modelo reduzido onde são utilizados os sedimentos artificiais, também, marcados com radioisótopos.

Existe extensa bibliografia a respeito das experiências com traçadores radioativos na natureza para estu

dar o fenômeno do transporte de sedimentos, de vários grupos, de diversos países, que se dedicam a este problema (3,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16).

Existe também bibliografia sobre trabalhos, com radionuclídeos, para estudar o transporte de sedimentos em canais, que em geral tem por finalidade estabelecer fórmulas empíricas para o transporte, ou ainda para verificar as já existentes(1).

1.2. ORIGEM E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO.

Quando da preparação do equipamento para trabalhar no modelo do porto de Mucuripe (Ceará), apresentou-se o problema da construção da sonda de detecção, já que a injeção dos sedimentos marcados é relativamente simples.

Para abordar este problema vejamos como são realizados os estudos na natureza e nos modelos.

1.2.1. ESTUDOS NA NATUREZA.

Os sedimentos marcados são depositados no fundo do mar, no local a ser estudado, por meio de um dispositivo especialmente preparado de modo que tais sedimentos sejam espalhados como uma camada superficial e com poucos metros de diâmetro.

Estes sedimentos marcados passam a fazer parte da camada superior de sedimentos do fundo do mar, rio ou canal, deslocando-se naturalmente sob os efeitos dos agentes causadores do transporte de sedimentos, tais como, correntes, marés, ondas, etc.

As detecções de material radioativo para determinar a movimentação dos sedimentos são feitas a seguir, com intervalos periódicos, cuja periodicidade depende da finalidade do estudo bem como da velocidade de movimentação.

ção. São usados trenões, arrastados por um barco. No tre
nõ estão montados os detectores de radiação, cintiladores
ou Geigers.

O importante a ser notado neste caso, para compa
rar com o estudo feito em modelos, é a relação = área de
detecção da sonda detectora pela área de espalhamento dos
sedimentos marcados.

Alguns dias após o lançamento dos sedimentos mar
cados na natureza, a área de espalhamento tem normalmente,
um diâmetro da ordem de pelo menos uma centena de metros.
Isto faz com que, sendo o diâmetro da área vista pelo de
tector da ordem de um metro, o sinal detectado representa
realmente a quantidade de radioatividade naquele ponto da
mancha radioativa.

Assim ao percorrer uma trajetória, sôbre a mancha
radioativa, pode-se obter o valor da quantidade de radioi
sôtopos de cada ponto da trajetória, e após cobrir tôda a
mancha, obter as curvas de isodose.

1.2.2. ESTUDO EM MODELO.

No modelo tudo é reduzido para reproduzir a natu
reza. No estudo com os traçadores artificiais em modelos,
a quantidade de radioisôtopos, bem como a área de deposi
ção, é bastante reduzida. Em geral esta área é de al
guns centímetros quadrados, o que corresponde a dezenas
ou centenas de metros quadrados na natureza. Considera-
se esta área da deposição no modelo equivalente à área
na qual, na natureza, os sedimentos marcados ocupam, um
ou dois dias após a injeção.

O que não pode ser reduzido, de modo, prático é o
raio de ação do detector que depende da energia da radia
ção e do coeficiente de absorção da radiação pelo meio

ambiente, de modo a se ter a mesma redução de escala que há nas dimensões do modelo.

É possível fazer o estudo com emissores β e utilizar detectores especiais, tais como geiger ou mesmo filmes de raios X. Entretanto as dificuldades cresceriam ao se ter que realizar o estudo com o modelo após esgotada a água. Fatores tais como o enterramento dos grãos em alguns milímetros causaria problemas no cálculo quantitativo, implicando em uma calibração do detector, havendo necessidade ainda de se conhecer a lei de distribuição dos grãos em função da profundidade.

Assim, usando detectores de cintilação e radioisótopos emissores de radiação gama para marcar os sedimentos, (o que é mais fácil,) esbarra-se com o problema da detecção, que apresenta uma deformação em relação à natureza. A sonda de detecção "vê" uma área relativamente grande, com diâmetro correspondente a centenas de metros na natureza.

A solução normalmente usada é uma forte colimação de modo que o detector "veja" somente uma pequena área da superfície da camada de sedimentos.

Uma forte colimação introduz alguns inconvenientes, tais como:

- a) - Pêso excessivo, o que complica o equipamento de detecção que deve ter bastante mobilidade sobre o modelo e portanto o menor pêso possível.
- b) - Profundidade de colimação muito grande, e diâmetro de colimação pequeno, fazendo com que o detector perca sensibilidade.
- c) - A radiação de fundo não é eliminada, apenas diminuída. Esta radiação de fundo é causada

por:

I - radiação cósmica

II - radiação natural da terra

III - radiação secundária de "backscattering"

Isto faz com que a detecção por colimação simples apresente imprecisão não representando fielmente a contagem relativa ao material radioativo dentro do círculo que se pretende abranger com o colimador.

Por exemplo, se a área visada estiver imediatamente vizinha a uma área quente, o detector acusará bastante radiação lateral, podendo mesmo indicar contagem superior à obtida sobre uma área que contenha sedimentos marcados que estejam mais espalhados.

A radiação proveniente do lado é composta de radiação direta e da radiação produzida por efeito Compton, dependendo a proporção, da geometria de colimação. A discriminação de energia sobre o pico do Au^{198} somente eliminaria parte desta influência, como se pode ver pela larga cauda das curvas obtidas (fig. 1).

A fim de fazer estudos em modelos, equivalentes aos realizados na natureza, onde o diâmetro da área de detecção é pequeno em relação à área de espalhamento dos sedimentos marcados, idealizou-se um sistema especial de colimação que permita manter de modo aproximado, as mesmas proporções que ocorrem no estudo na natureza (descrição, mais adiante. 1.3.3).

1.2.3. A IMPORTÂNCIA.

O estabelecimento de um sistema confiável para trabalhar com traçadores radioativos, em modelos, reveste-se de importância, considerando-se que além das possibilidades de calibração da escala de tempo pode-se realizar uma série de estudos que, muitas vezes, não se consegue realizar na natureza.

É o caso de estudos de movimentação de sedimentos

em zonas de arrebentação, bancos de areias, barras de rios, zonas rochosas ou com recifes, onde a navegação é perigosa e às vezes quase impossível. Embora os estudos em modelos não reproduzam com exatidão o deslocamento dos sedimentos na natureza, podem dar uma indicação bastante aproximada e portanto informações úteis sobre direção, velocidade, e quantidade de sedimentos que se movimentam nestas áreas.

Acrescentam-se a esta vantagem, a rapidez e a simplicidade dos estudos em modelo.

1.3. FINALIDADE DO ESTUDO.

1.3.1. PRECISÃO DAS MEDIDAS EM MODELOS.

A variável básica nos estudos de sedimentologia é a densidade superficial de distribuição dos sedimentos marcados. Conhecendo-se esta distribuição, efetua-se o balanço do traçador e obtêm-se as curvas de isodose que permitem calcular a velocidade de movimentação dos sedimentos. Portanto, o problema fundamental do estudo em modelo consiste em se definir uma área de detecção suficientemente pequena para que se possa considerar constante a densidade de traçador nessa área e medir a atividade com a maior eficiência possível. O sistema ideal de detecção resultará de um compromisso entre estas condições.

Para avaliar a influência dos diversos fatores de compromisso, considere-se a expressão do desvio relativo na densidade superficial de traçador. Sendo

D - densidade superficial de traçador

S - área de detecção

A - atividade de traçador na área S .

em zonas de arrebentação, bancos de areias, barras de rios, zonas rochosas ou com recifes, onde a navegação é perigosa e às vezes quase impossível. Embora os estudos em modelos não reproduzam com exatidão o deslocamento dos sedimentos na natureza, podem dar uma indicação bastante aproximada e portanto informações úteis sobre direção, velocidade, e quantidade de sedimentos que se movimentam nestas áreas.

Acrescentam-se a esta vantagem, a rapidez e a simplicidade dos estudos em modelo.

1.3. FINALIDADE DO ESTUDO.

1.3.1. PRECISÃO DAS MEDIDAS EM MODELOS.

A variável básica nos estudos de sedimentologia é a densidade superficial de distribuição dos sedimentos marcados. Conhecendo-se esta distribuição, efetua-se o balanço do traçador e obtêm-se as curvas de isodose que permitem calcular a velocidade de movimentação dos sedimentos. Portanto, o problema fundamental do estudo em modelo consiste em se definir uma área de detecção suficientemente pequena para que se possa considerar constante a densidade de traçador nessa área e medir a atividade com a maior eficiência possível. O sistema ideal de detecção resultará de um compromisso entre estas condições.

Para avaliar a influência dos diversos fatores de compromisso, considere-se a expressão do desvio relativo na densidade superficial de traçador. Sendo

D - densidade superficial de traçador

S - área de detecção

A - atividade de traçador na área S .

tem-se

$$D = \frac{A}{S} \quad (1)$$

ou, em termos de contagem e eficiência

$$D = \frac{C}{\epsilon S} \quad (2)$$

O desvio relativo em D será

$$\frac{\sigma_D}{D} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\epsilon}{\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_S}{S}\right)^2} \quad (3)$$

Supondo que a eficiência ϵ é medida, em cada geometria, sem restrição quanto ao tempo de contagem, conclui-se que

$$\frac{\sigma_\epsilon}{\epsilon} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{Nt} + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2}$$

será praticamente igual a $\frac{\sigma_A}{A}$, precisão na medida da atividade, e vale cerca de 2%.

Por outro lado $\frac{\sigma_S}{S}$, medirá a precisão com que se conhece a área de detecção. Veremos que, em uma série de 10 medidas com a mesma geometria,

$$\frac{\sigma_S}{S} \approx 1\%$$

Portanto

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_D}{D} &= \sqrt{(2 \times 10^{-2})^2 + \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + (1,0 \times 10^{-2})^2} = \\ &= \sqrt{5 \times 10^{-4} + \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

que mostra que a precisão na medida da densidade depende das taxas de contagem obtidas em cada caso e tempo em que se realiza a contagem.

A primeira finalidade do estudo será, pois, estudar a dependência das taxas de contagem com os diversos parâmetros de colimação, ou seja, estudar a dependência da eficiência de detecção com tais parâmetros.

1.3.2. ÁREA DE DETECÇÃO.

Primeiramente, definiremos a área de detecção para um sistema qualquer de colimação.

A fig. 2 mostra uma curva típica de taxa de contagem em função da distância da fonte ao eixo do colimador, usando-se colimação simples. Vê-se que a distribuição de contagem pode ser representada aproximadamente por uma distribuição de Gauss.

$$C(r) = C_0 e^{-a^2 r^2} \quad (5)$$

com meia largura $r_{1/2}^2 = \frac{0,693}{a^2}$.

$$\text{A forma } C(r) = C_0 e^{-0,693 \left(\frac{r}{r_{1/2}}\right)^2} \quad (6)$$

é mais cômoda para os cálculos.

Definiremos a área de detecção como sendo a área, a partir do eixo do detector, que contribui com 90% da contagem registrada quando a distribuição do traçador for uniforme.

O nível 90% parece-nos compatível com a precisão que se obtém nas medidas em sedimentologia.

No caso da blindagem simples, pode-se calcular o raio de detecção (R) a partir da expressão da contribuição do círculo de raio r para a contagem registrada.

$$N(r) = \int_0^r C_0 e^{-a^2 r^2} \frac{2\pi r dr}{s} = \frac{2\pi C_0}{s} \int_0^r e^{-a^2 r^2} r dr$$

onde s é a área da fonte radioativa.

$$N(r) = \frac{2\pi C_0}{s} \int_0^r \frac{1}{2} e^{-a^2 r^2} d(a^2 r^2) = \frac{\pi C_0}{s} \left[-e^{-a^2 r^2} \right]_0^r$$

$$= \frac{\pi C_0}{s} \left[1 - e^{-a^2 r^2} \right]$$

$$\text{Pondo } N(\infty) = \frac{\pi C_0}{s} \quad \text{e } N(R) = 0,90 N_\infty$$

resulta

$$e^{-a^2 R^2} = 0,10 \quad \text{ou} \quad -a^2 R^2 \log e = \log 0,10$$

$$e^{a^2 R^2} = \frac{1}{0,435} = 2,30 \quad \text{e} \quad R = \sqrt{\frac{2,30}{a^2}}$$

Em termos da meia largura ($r_{1/2}$)

$$R = \sqrt{\frac{2,30}{0,693/(r_{1/2})^2}} = 1,8 r_{1/2} \quad (7)$$

O resultado acima indica que, usando colimação simples é necessário adotar diâmetros de colimação muito pequenos ou/ e profundidades de colimação muito grandes.

No sistema diferencial, obtêm-se área de detecção muito bem definida pelo diâmetro de colimação. A fig. 3 mostra uma distribuição típica da contagem diferencial em função da distância da fonte ao eixo do detector.

Observa-se que 90% das contagens estão seguramente associadas com a área definida pelo diâmetro de colimação.

A razão da área de detecção para a área de colimação $\frac{\pi \phi^2}{4}$ em função da profundidade de colimação será representada graficamente para o sistema de colimação simples o que permitirá estabelecer a geometria de colimação mais adequada para se obter uma dada área de detecção.

1.3.3. ESTABELECIMENTO DO MÉTODO DIFERENCIAL DE DETECÇÃO.

Após verificar as deficiências do sistema de colimação simples, procurou-se contornar esta dificuldade, tendo-se chegado ao método diferencial de detecção ora proposto que consiste em utilizar uma blindagem frontal ao colimador, com diâmetro idêntico ao diâmetro de colimação, colocada bem próxima (alguns centímetros) da camada de sedimentos. (fig. 4).

A finalidade desta blindagem frontal é blindar, parcialmente, a radiação proveniente da área que se quer medir.

A diferença entre as contagens com e sem a blindagem frontal permite deduzir a quantidade exata de sedimentos marcados sob a área da blindagem frontal. Chamaremos a esta área de área ou círculo de detecção.

Com estas duas medidas elimina-se quase que integralmente a influência da radiação de fundo, anteriormente mencionada, já que ela estará presente, de modo igual, nas duas detecções.

Quando se realiza a subtração das duas contagens, o resultado é apenas a influência da área sob a blindagem auxiliar (naturalmente corrigida do fator de eficiência da blindagem frontal).

Suponhamos para efeito de raciocínio que a blindagem frontal tenha pequena espessura em relação ao diâmetro e esteja encostada no fundo.

Digamos que na contagem sem blindagem, o detector acuse uma taxa de contagem.

$$N_S = N_1 + N_2 \quad (8)$$

N_1 - é a taxa de contagem relativa à área que se quer me
dir.

N_2 - é a taxa de contagem relativa ao radioisótopo fora
da área de medida e à radiação de fundo ambiental.

N_S - é a taxa de contagem total sem a blindagem frontal.

A definição de N_2 pressupõe que a contribuição da
área externa ao círculo de detecção seja constante. Esta
hipótese será analisada na discussão dos resultados expe
rimentais.

Ao realizar a contagem utilizando a blindagem
frontal, somente uma fração $k N_1$ da radiação proveniente
da área sob a blindagem frontal chegará ao detector que
indicará uma taxa de contagem

$$N_C = k N_1 + N_2 \quad (9)$$

onde N_C é a taxa de contagem total com a blinda
gem frontal.

A constante k é determinada por meio de uma cali
bração da sonda, utilizando uma fonte, de área igual à da
blindagem frontal, com o mesmo radioisótopo a ser usado
no modelo.

Dois contagens, uma com blindagem, e outra sem
blindagem frontal, permitem calcular o fator k, o qual in
dicará a eficiência da blindagem frontal para o radioisó
topo e geometrias utilizadas.

As duas equações 8 e 9 nos darão o valor de N_1 :

$$N_1 = \frac{N_S - N_C}{1 - k} \quad (10)$$

e daí

$$A = \frac{V_{1/t}}{\epsilon} \quad (17)$$

atividade sob a área de detecção.

1.3.4. OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DETECÇÃO.

Usando a equação

$$\left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 = \sqrt{5 \times 10^{-4} + \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2}$$

pode-se examinar a questão do compromisso entre os parâmetros de colimação, em blindagem diferencial de forma a tornar mínimo o erro de detecção.

Observe-se que, no método diferencial N é a taxa de contagem devida ao traçador que se encontra na área de detecção. O que se obtém, da contagem diferencial, é

Se as taxas de contagem N_S e N_C forem aproximadamente iguais, ΔN comportará uma incerteza muito grande.

Das equações (13) e (14), obtêm-se

$N_1 = \frac{\Delta N}{T-k}$, onde se verifica que a incerteza relativa em N_1 é igual a de ΔN . Assim, convém examinar as condições em que a incerteza em N_1 é compatível com a precisão desejada na medida.

A incerteza em ΔN será:

$$\sigma_{\Delta N}^2 = \sigma_{N_S}^2 + \sigma_{N_C}^2 \quad (15)$$

$$e \left(\frac{\sigma_{\Delta N}}{\Delta N} \right)^2 = \frac{\sigma_{N_S}^2 + \sigma_{N_C}^2}{(N_S - N_C)^2} = \frac{\frac{N_S}{t} + \frac{N_C}{t}}{(N_S - N_C)^2}$$

Definindo-se a resolução da contagem diferencial por $\kappa = \frac{\Delta N}{N_S}$, obtêm-se

$$N_S - N_C = \kappa N_S$$

$$N_S + N_C = (2-\kappa) N_S$$

$$e \left(\frac{\sigma_{\Delta N}}{\Delta N} \right)^2 = \frac{N_S + N_C}{t\kappa^2 N_S^2} = \frac{(2-\kappa)N_S}{t\kappa^2 N_S^2} = \frac{(2-\kappa)}{t\kappa^2 N_S} \quad (16)$$

o que permite escrever

$$\left(\frac{\sigma_{N_1}}{N_1}\right)^2 = \frac{2^{-n}}{t n^2 N_S} . \quad (17)$$

O andamento de $\left(\frac{\sigma_{N_1}}{N_1}\right)^2$ com n será examinado para se verificar em que condições o erro é mínimo. No caso de o arranjo experimental não permitir a otimização, interessa calcular o desvio

$\left(\frac{\sigma_{N_1}}{N_1}\right)^2$ para as resoluções ensaia
das.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

2.1. MODO DE TRATAR O PROBLEMA.

Para comparar as resoluções das várias geometrias seria indicado o uso de uma fonte plana infinita, com distribuição uniforme de radioisótopo. Em primeira aproximação poder-se-ia usar uma fonte plana de dimensões finitas de modo que os pontos mais distantes não influíssem perceptivelmente, na contagem.

Porém, a confecção de uma fonte plana de grandes dimensões não é tão simples. Sendo o diâmetro mínimo da ordem de 40 cm, a solução que nos pareceu mais indicada foi a de usar uma solução com o radioisótopo e distribuí-la em uma camada uniforme no fundo de um recipiente, de modo a ficar isolada da água por uma fina camada de plástico (item sugestões).

Previendo dificuldades mecânicas para montar tal sistema adotou-se outro método para simular uma distribuição uniforme.

O método de simulação consiste em se usar uma fonte radioativa de área diminuta e deslocá-la ao longo do raio da área de detecção, desde o centro da área até uma distância onde não mais influa na contagem.

Registrando as taxas de contagem em cada ponto do raio, pode-se por uma integração simples, calcular a taxa de contagem equivalente a uma fonte plana.

Utilizando uma calculadora HP 9.100B estabeleceu-se um programa para o cálculo da contagem de uma fonte plana (contagem total) a partir dos dados obtidos com a

fonte descrita.

CÁLCULO DA CONTAGEM TOTAL.

Usa-se uma fonte de diâmetro d muito menor que o diâmetro de colimação.

Consideram-se coroas circulares a partir do centro da área sob o colimador, com larguras ΔR da ordem de grandeza do diâmetro da fonte radioativa.

Assim a influência da coroa com raio interno R e largura ΔR , no detector será igual ao produto da contagem N causada pela fonte (colocada sobre a faixa), pelo quociente da área da faixa pela área da fonte.

$$N_{R_i} = N_i \frac{\pi(R_i + \Delta R)^2 - \Delta R^2}{\frac{\pi d^2}{4}} = N_i \frac{4(2R_i \Delta R + \Delta R^2)}{d^2} \quad (18)$$

A contagem total é a soma dos N_{R_i} .

$$N_T = \sum_{i=0}^n N_{R_i} \quad (19)$$

onde i varia de zero a n , sendo n um número tal que a distância $n\Delta R$, a fonte radioativa não produza mais contagens no detector.

A fonte usada deve ser intensa o suficiente para se obter uma boa estatística de contagem. A fonte utilizada para montagem prática possuía atividade de cerca de

meio milicurie o que dava uma taxa de contagem da ordem de 10^5 cpm no centro da área de detecção.

Uma das vantagens deste método de contagem é a visualização da sensibilidade de detecção da sonda para o radioisótopo nas diversas posições, podendo-se perceber como os sedimentos marcados, que não estão sob a blindagem auxiliar influenciam na contagem total.

A principal desvantagem do método é a possibilidade de cometer erros no cálculo da contagem total durante a integração.

Para cada configuração geométrica obtêm-se duas curvas de resposta da sonda. São calculadas as contagens equivalentes às de uma fonte plana e finalmente a resolução de detecção.

Os valores são, então, sintetizados e comparados em gráficos de modo a permitir a escolha de um arranjo geométrico adequado ao trabalho que será realizado no modelo.

2.2. DESCRIÇÃO DA APARELHAGEM.

2.2.1. DETECTOR UTILIZADO.

Como sonda detectora utilizou-se um cintilador portátil de campo e um sistema de contagem e integração Modelo BASC, de origem dinamarquesa e um registrador HP modelo 7100BM.

2.2.2. O COLIMADOR.

O colimador foi construído em chumbo, de acordo com o desenho da fig. 5, de modo a ser possível a variação do diâmetro e da profundidade da colimação relacionados na tabela 1 (geometrias de detecção).

O sistema de colimação é fechado por uma placa de lucite (densidade próxima da água), para evitar que a água, entrando no espaço de colimação, cause maior absorção da radiação direta, proveniente da área que se quer medir.

2.2.3. A BLINDAGEM FRONTAL.

A blindagem frontal, também de chumbo, é fixada na parte externa do colimador e construída de modo a se poder fazer variar sua distância à face interior do colimador (fig. 4), mantendo constante a distância ao fundo. Um dispositivo simples permite deslocá-la para o lado do colimador.

Para que haja uma boa definição da área a ser medida sob a blindagem frontal, esta deve ser colocada o mais próximo possível do fundo. Na prática, não é possível colocá-la encostada ao fundo, pois causaria deslocamento dos sedimentos durante sua movimentação. Por isto decidiu-se deixar um espaço de 3 mm entre o fundo e a blindagem frontal.

2.2.4. A DISTÂNCIA AO FUNDO.

Na sonda projetada para trabalhar em modelos reduzidos foi adaptado um dispositivo "apalpador", que consiste em dois eletrodos, sem isolamento nas pontas, localizados na parte inferior da sonda, ao lado da blindagem frontal. São 3 mm mais longos que a blindagem frontal. Quando as pontas dos dois eletrodos tocam a camada de sedimentos, ocorre uma brusca mudança de resistência elétrica entre as pontas. Um circuito eletrônico indica, visualmente esta variação, o que permite fazer todas as medidas à distância constante do fundo, mesmo que haja regiões inclina

das.

Na sonda construída para os testes em laboratório, com diversos arranjos geométricos, adotou-se outra disposição das partes, equivalente entretanto, à anteriormente descrita, mas que facilitasse a variação da distância ao fundo, não usando os eletrodos apalpadores.

Passou-se a usar a blindagem frontal independente do colimador e ainda dois dispositivos para fixar e centrar o colimador e a blindagem frontal (figs. 5 e 6).

O nível de água da caixa de teste foi mantido a 20 cm do fundo.

As dimensões da caixa de testes foram tomadas de modo a representar, aproximadamente a região correspondente a um dos raios do círculo de influência de uma fonte plana (fig. 6).

A distância da sonda ao fundo foi tomada em relação à face inferior do colimador de chumbo.

2.2.5. A FONTE RADIOATIVA.

A fonte radioativa consistia em uma lâmina de ouro, com área aproximadamente equivalente à de um disco com 2 mm de diâmetro, colocada em um suporte móvel, e podia ser deslocada sob a caixa de ensaio, passando pelo eixo do detetor.

O suporte da fonte estava preso em uma régua graduada que permitia saber a distância da fonte ao centro do círculo.

A fonte podia ser colocada manualmente em qualquer posição.

Podia-se também fazer o deslocamento contínuo da fonte por meio de um motor com sistema de redução, o qual tracionava com velocidade constante, o suporte da sonda, por meio de um fio não elástico.

2.3. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA EXPERIMENTAL.

2.3.1. O DESLOCAMENTO DA FONTE RADIOATIVA.

A finalidade da montagem experimental era a de se obter a resposta da sonda detectora para uma fonte quase puntual, em vários pontos ao longo do raio do círculo de contagem.

Naturalmente, o método mais simples e seguro de se obter as taxas de contagem para cada ponto seria fixar a fonte em cada ponto e registrar as taxas de contagem correspondentes, construindo, então as curvas relativas aos vários arranjos geométricos.

Sendo, entretanto, um processo demorado e tedioso, preferiu-se adotar uma solução mais prática e rápida, e que não exigisse a constante intervenção do operador para modificar a posição da fonte.

Por meio de um motor com caixa de redução, a fonte radioativa era deslocada, lentamente, com velocidade constante, ao longo do raio do círculo de detecção.

A taxa de contagem correspondente aos pontos do raio do círculo de detecção ia sendo registrada à medida que a fonte se deslocava.

Isto, naturalmente, introduz um erro, já que a constante de tempo do integrador, que dá a taxa de contagem, causa um defasamento de tempo, de modo que, em um certo instante, a taxa de contagem que está sendo registrada como relativa a um determinado ponto do raio é realmente a taxa de contagem correspondente a outro ponto em um instante anterior, relacionado com a constante de tempo usada.

Usando velocidade reduzida para o deslocamento da fonte radioativa e uma constante de tempo pequena, por

exemplo 0,2 segundos, o erro é pequeno. Isto foi constatado na comparação de curvas levantadas ponto por ponto, com movimentação discreta da fonte, e curvas levantadas no registrador com velocidade constante da fonte.

A velocidade adotada para a fonte foi de 1,25 centímetros por minuto, valor inferior ao encontrado pelo cálculo descrito a seguir.

Verificou-se que a largura de penumbra em torno da blindagem frontal era da ordem de 2 milímetros. Pretendendo-se tomar, pelo menos quatro pontos da curva da taxa de contagem nesta região, onde a variação da taxa de contagem é mais acentuada, adotou-se como distância E entre dois pontos de leitura, 0,5 milímetros.

Supondo que o tempo de deslocamento entre dois pontos seja da ordem de 10 vezes a constante de tempo, obtêm-se

$$t = \frac{v}{E} = 10\tau$$

$$v = \frac{E}{10\tau} = \frac{0,5}{10 \times 0,2} = 0,25 \text{ mm/seg} = 1,5 \text{ cm/min}$$

O método adotado inicialmente foi o de efetuar o deslocamento da fonte radioativa a partir do centro do círculo de contagem, ou seja, do eixo do colimador.

A sonda sendo colocada em uma das geometrias em estudo, a fonte era movimentada, com velocidade constante ao longo do raio do círculo de contagem, até que a taxa líquida de contagem caísse a zero.

Após alguns testes percebeu-se que não era muito fácil iniciar a movimentação da fonte a partir do centro do círculo, o que causava erro apreciável na posição das curvas em relação à origem (centro do círculo) e consequentemente, erro no cálculo da contagem total.

Passou-se então a adotar outro método, mais simples e seguro, que consistia em se fazer o deslocamento da fonte, ao longo do diâmetro do círculo, isto é, de modo que a fonte fosse deslocada de um lado ao outro do círculo, passando pelo centro. Com este procedimento era obtida uma curva com simetria em relação ao centro do círculo (ou eixo do colimador), sendo fácil achar, na curva registrada, o ponto correspondente ao centro do círculo.

2.3.2. A DISCRIMINAÇÃO.

Levando em consideração que se deseja eliminar a influência da radiação proveniente do material radioativo que está nas regiões laterais e, que é em sua maioria produzida por efeito Compton, na água, areia ou chumbo do colimador, decidiu-se, realizar as contagens discriminando o espectro gama de modo a contar somente a radiação que produzisse efeito fotoelétrico (pico de $Au^{198} = 410 \text{ kev}$).

Realmente, a eficiência de colimação melhora, como podemos verificar na (fig. 1), onde se vê que a influência da fonte sobre o detector cai mais rapidamente nos pontos laterais quando se usa o discriminador.

Para a contagem foram usadas as seguintes condições

Tensão - 1.100 V

Discriminador - base 340 mV

janela 100mV

correspondentes a base: 357 kev

janela: 105 kev

constante de tempo 0,2 segundos

2.3.3. A VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA FONTE RADIOATIVA.

Como já foi mencionado, para reduzir o erro introduzido pela constante de tempo do integrador, procurou-se usar uma velocidade bastante reduzida para o deslocamento da fonte radioativa.

A velocidade escolhida foi a de 1,25 centímetros por minuto, bastante lenta em comparação com a constante de tempo de 1/5 de segundo usada.

Verificou-se ser suficiente um deslocamento de aproximadamente 10 centímetros, na condição mais desfavorável, para que a contagem caísse a zero. Neste caso, o tempo de deslocamento total era de 16 minutos.

A região crítica da curva, onde mais se faz sentir a influência da constante de tempo, é aquela correspondente à passagem da fonte radioativa sob a beirada do disco da blindagem frontal. A variação da taxa de contagem é bastante rápida, sendo o tempo de passagem nesta região da ordem de 20 segundos. Sendo o erro pequeno e sistemático, não teve grande influência na comparação das resoluções das várias disposições geométricas de colimação.

O dispositivo para obter velocidade de deslocamento constante consistia em um motor com redução para um giro por minuto. No eixo da caixa de redução foi adaptado um outro eixo com diâmetro calculado de tal modo que, ao enrolar um fio metálico fino, tracionava-se a fonte com a velocidade desejada.

2.3.4. A VELOCIDADE DO PAPEL NO REGISTRADOR.

O método de análise adotado utiliza os valores

das taxas de contagem, retiradas da curva registrada.

Escolheu-se uma velocidade tal que as dimensões da curva obtida permitissem uma leitura cômoda e precisa de um grande número de pontos (80 a 160).

Na prática isto corresponde à obtenção da curva no espaço de 40 a 80 cm. Usou-se a velocidade de 5 cm por minuto.

2.3.5. DISTÂNCIAS AO FUNDO DO MODELO.

Na montagem experimental realizada, a menor distância de trabalho era da ordem de 3 centímetros, e para se obter uma curva de resposta em função da distância ao fundo, foram realizadas medidas, com cada colimação, a distâncias maiores. Estas distâncias foram 31, 41, 51, 61 e 71 mm da fonte radioativa, valores estes que estão dentro de uma faixa de maior probabilidade de serem adotados nos estudos de modelo. (tabela 1).

2.3.6. A NORMALIZAÇÃO DOS RESULTADOS.

A taxa de contagem variando de uma geometria de detecção para outra, há necessidade de se fazer uma normalização das curvas obtidas para se poder comparar as resoluções de contagem.

A normalização foi feita de modo que, partindo da curva de taxa de contagem, originalmente obtida, construiu-se uma outra curva normalizada, cujos pontos têm valores iguais ao quociente dos valores dos pontos correspondentes da curva original pelo valor da maior contagem na curva original (o ponto central do círculo),

Na curva normalizada, assim obtida, o valor máximo é igual a 1 e os valores dos demais pontos estão

entre 1 e zero.

Como era de se esperar, a contagem absoluta é maior para as geometrias em que a profundidade de colimação é menor, não significando entretanto, que a resolução seja melhor que a obtida com uma geometria com colimação mais profunda.

Esta operação de normalização é equivalente à variação da atividade usada, de modo a sempre se obter o mesmo valor máximo para a taxa de contagem no ponto central do círculo de detecção.

Os valores usados na obtenção da curva já estão corrigidos do background.

A subtração automática do background foi conseguida por meio do deslocamento do zero do registrador, de modo que o valor da taxa de contagem do background coincidissem com o zero da escala do registrador.

A normalização automática foi conseguida com a variação da sensibilidade do registrador, de modo que a taxa de contagem correspondente ao ponto central coincidissem com o valor 1 do registrador, para todos os testes.

Assim os valores dos pontos das curvas podiam ser empregados diretamente nos cálculos.

2.4. TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.

2.4.1. CÁLCULO DAS CONTAGENS N_S , N_C E ΔN A PARTIR DA DISTRIBUIÇÃO DE TAXAS DE CONTAGEM.

Obtida a curva de distribuição de taxas de contagem $N(r)$, calcula-se a taxa de contagem simples por

$$N_S = \int_0^{\infty} \frac{N(r)}{s} \times 2\pi r \, dr \quad (20)$$

onde s é a área da fonte radioativa.

A distribuição $N(r)$ se obtém da distribuição registrada $y(r)$ por

$$N(r) = \frac{N_0}{y_0} y(r) \quad (21)$$

onde N_0 e y_0 são respectivamente a taxa de contagem e a ordenada da curva no ponto $r = 0$.

Daí

$$N_S = \frac{N_0}{y_0 s} \int_0^{\infty} y(r) \times 2\pi r dr \quad (22)$$

O cálculo das integrais foi feito com a calculadora HP 9100-B.

Da mesma forma calculou-se N_C , taxa de contagem obtida com a blindagem frontal e daí

$$\Delta N = N_S - N_C$$

obtidos ΔN e N_S , calculou-se a resolução

$$r = \frac{\Delta N}{N_S} = \frac{N_S - N_C}{N_S}$$

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Os dados experimentais estão apresentados na tabela nº 2.

3.1. ÁREA DE DETECÇÃO EM COLIMAÇÃO SIMPLES.

A figura 7 mostra a dependência da razão da área de detecção para a área de colimação com os parâmetros de colimação (diâmetro de colimação ϕ , profundidade de colimação h e distância ao fundo d).

Como se esperava, a área de detecção se aproxima da área de colimação ã medida que a sonda se aproxima do fundo. Entretanto, mesmo na melhor situação estudada, a razão dessas áreas é de cêrca de 6, o que mostra que o sistema de colimação simples define áreas de detecção muito grandes, dificultando a redução das áreas na escala do modêlo.

Observa-se ainda que diminuir o diâmetro de colimação afeta pouco a razão da área de detecção para a de colimação.

O aumento da profundidade de colimação reduz mais efetivamente esta razão.

Quanto ao desempenho da colimação diferencial, observa-se que a área de detecção é praticamente igual ã de colimação (fig. 3). Este modêlo de colimação permite reduzir cômodamente a área de detecção.

3.2. EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO.

A eficiência de detecção é definida por $\epsilon = \frac{N}{A}$,

sendo N a taxa de contagem registrada e A a atividade na área de detecção. Como, nos testes, simulou-se uma fonte plana e uniforme, pode-se escrever

$$\epsilon = \frac{N}{\frac{a}{s} S}, \text{ sendo } \frac{a}{s} \text{ a densidade}$$

de atividade da fonte.

O gráfico nº 8 mostra as eficiências de ambos os sistemas de colimação em função da área de detecção.

Observa-se que, para a mesma área de detecção, o sistema diferencial apresenta eficiência muito superior à do método de colimação simples. Isto significa menor tempo de contagem para se obter uma precisão pré-fixada. A tabela 3 resume êsses resultados.

3.3. RESOLUÇÃO EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE COLIMAÇÃO.

As figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam a variação de r com os parâmetros de colimação. Observa-se que a resolução cresce com a profundidade de colimação (d e ϕ constantes) e com o diâmetro (h e d constantes).

3.4. INCERTEZA RELATIVA NA ÁREA DE DETECÇÃO.

Realizou-se uma série de 10 medidas para se verificar a incerteza relativa na área de detecção (contribuição de 90%). Observou-se que a meia-largura $S_{1/2}$ apresenta uma reprodutibilidade de 0,5%. A área de detecção tem, pois, uma incerteza de 1%.

Os dados experimentais estão na tabela nº 4.

3.5. OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DETECÇÃO.

A figura nº 13 mostra o andamento da função $\frac{2-\kappa}{\kappa^2 N_S}$

com a profundidade de colimação. Em alguns casos ($\phi = 38\text{mm}$, $d = 31\text{mm}$) observa-se a ocorrência de mínimo, em outros ca sos ($\phi = 15\text{mm}$, $d = 31\text{mm}$) os dados não foram suficientes para configurar o mínimo.

Em outros ($\phi = 15\text{mm}$, $d = 41\text{mm}$) pode-se dizer que o mínimo não ocorreria nas condições experimentais.

3.6. ESTIMATIVA DA PRECISÃO DA MEDIDA EM MODELO.

Tomando para exemplo a configuração $\phi = 38\text{mm}$, $h = 30\text{mm}$ e $d = 31\text{mm}$, pode-se estimar a incerteza relativa na densidade de traçador com

$$\left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 = \sqrt{5 \times 10^{-4} + \frac{2 - \kappa}{t \kappa^2 N_S}}$$

para $t = 2 \text{ min.}$
 $N_S = 10.000 \text{ cpm}$
 $\kappa = 0,28$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 &= \sqrt{5 \times 10^{-4} + \frac{2 - 0,28}{2 \times 0,28^2 \times 10^4}} \\ &= \sqrt{(5 + 10) \times 10^{-4}} \end{aligned}$$

ou

$$\frac{\sigma_D}{D} = 4\%.$$

4. CONCLUSÕES.

O método diferencial proposto permite:

a) Trabalhar com colimadores menores e mais le
ves do que os utilizados no método de colimação simples.

b) Obter maior eficiência de contagem para a mesme
ma área de detecção, reduzindo a incerteza nas contagens
obtidas.

c) Conseguir uma boa definição da área de de
tecção e calcular com melhor aproximação a atividade por
unidade de área.

5. SUGESTÕES PARA MELHORAR E CONTINUAR O ESTUDO.

5.1. CONSTRUÇÃO DE UMA FONTE PLANA.

O motivo de escolher a fonte puntual para o cálculo das resoluções da sonda diferencial com várias geometrias de colimação, foi a dificuldade em obter uma fonte plana do radioisótopo usado, o Au^{198} .

A vantagem da fonte puntual era a facilidade de manuseio e de reativação no reator do IPR, Triga Mark I, com fluxo de 10^{11} n/cm² seg a 15 kw na mesa giratória.

5.1.1. A FONTE PUNTUAL.

Consistia de uma lâmina de ouro, com 25 mg, e com formato aproximadamente circular, com diâmetro da ordem de 2 mm.

Note-se que o valor da área do círculo da fonte utilizada não precisa ser conhecido com precisão. Como os resultados são todos normalizados e a reativação da fonte ou seu decaimento fazem com que em cada experiência a atividade seja diferente, não há sentido em se fixar com precisão a massa ou a área da fonte.

Naturalmente, deve-se adotar como área da fonte, para os cálculos um valor bem próximo do valor real.

A área real da fonte deve, ainda, ser pequena em relação à área da blindagem frontal, para que se consiga uma boa definição de área de detecção, ou seja, que haja uma rápida transição na passagem da fonte radioativa pela beirada da blindagem frontal.

A principal desvantagem do método de cálculo com

a fonte puntual, é o volume de trabalho necessário para se obter os gráficos, levantar os dados e calcular a contagem total.

Para se calcular a resolução da sonda, utilizando uma fonte plana, bastam apenas duas contagens, obtendo o contraste por simples subtração e conseqüentemente a resolução de detecção.

5.1.2. A FONTE PLANA.

A fonte plana imaginada para a continuação do presente trabalho, consistiria de um compartimento estanque, no fundo da caixa de calibração, com altura de poucos milímetros e construído de modo a resistir à pressão da água que tenderia a deformá-lo, e com entrada e saída para o radioisótopo em forma líquida.

No caso presente, onde o radioisótopo é o Au^{198} , após a irradiação do ouro metálico, este seria dissolvido em água régia e após, diluído para ocupar o volume todo do compartimento estanque. (fig. 14).

5.2. A VEDAÇÃO DO COLIMADOR.

Como já foi mencionado, a vedação de lucite, do colimador, tem a finalidade de evitar que a água penetre no orifício do colimador.

Este canal de ar, que aumenta a probabilidade de a radiação direta, proveniente da área de detecção, chegar ao detector, pode ser prolongado até perto da blindagem frontal.

Este artifício deverá ser adotado, após a escolha da geometria definitiva. Tem a vantagem de, tendo a lucite a mesma densidade da água, facilitar a detecção da ra

diacção gama proveniente da área de detecção e eliminar a produção de efeito Compton no "canal" de colimação. Em suma, aumenta ainda mais a eficiência da detecção. (fig.15).

Este modelo de sonda foi experimentado na segunda série de detecção no modelo de Mucuripe, proporcionando uma resolução de contagem da ordem de 20%.

Os eletrodos do apalpador podem ser mais facilmente adaptados, neste modelo.

O prolongador de lucite não foi usado, no presente trabalho, por causa da dificuldade de ter que mudar de vedação quando da variação da distância ao fundo.

5.3. A BLINDAGEM FRONTAL.

Neste estudo, a blindagem frontal móvel foi feita de chumbo, devido à facilidade de usinagem. Para uma espessura de 3 mm, o fator de transmissão foi $k=0,4$ para a radiação gama do Au^{198} .

Entretanto, a blindagem frontal poderá ser feita com materiais mais densos, tais como o ouro ou tungstênio, visando reduzir o fator k , e aumentar a resolução.

O sistema de deslocamento da blindagem frontal, adotado na sonda usada no estudo do modelo de Mucuripe e nas primeiras experiências do presente trabalho, foi bastante simples e fácil de ser montado (fig.4). Cuidado especial deve ser tomado para que a blindagem frontal fique centrada no eixo do colimador.

5.4. EMPREGO DO SISTEMA DIFERENCIAL PARA DETECÇÃO CONTÍNUA, A VELOCIDADE CONSTANTE.

O tipo de detecção até agora descrito foi o intermitente, ponto por ponto, que cobrindo toda a área de es

palhamento do radioisótopo permite obter-se as curvas de isodose.

O método do balanço de radioisótopo, desenvolvido pela equipe francesa (3), usa para o cálculo da quantidade de sedimentos que se movimenta, as curvas de contagem obtidas com os pontos de secções transversais à direção de transporte.

Com estes pontos pode-se calcular a contagem total relativa a esta secção transversal.

Ora, no estudo realizado com sedimentos marcados na natureza, procura-se fazer a detecção em linhas perpendiculares à direção de transporte, a velocidade constante, de modo a obter a contagem total de cada linha.

De modo semelhante, no estudo em modelos, poder-se-á fazer a detecção continuamente, a velocidade constante, em linhas perpendiculares à direção de transporte.

É certo que o mecanismo de sustentação será mais complicado. A distância da sonda ao fundo deverá ser maior, pois devido ao movimento, poderá causar distúrbios na camada de sedimentos.

O relevo do fundo deverá ser levado em consideração, já que será difícil trabalhar à distância constante.

Um sistema convencional de colimação, se usado, iria requerer uma só corrida em cada linha, apresentando, entretanto, os problemas já mencionados.

O sistema diferencial poderá ser empregado para a detecção contínua, de modo análogo ao já descrito. Bastará realizar dois percursos, o primeiro sem blindagem frontal e o segundo com blindagem frontal.

A diferença das duas contagens será a contribuição da faixa coberta pela blindagem frontal em seu percurso.

80.

Naturalmente, a blindagem frontal deverá traba
lhar à maior distância do fundo, importando em pior defi
nição da área de detecção, mas permitindo um levantamento
mais preciso do que o obtido com colimação simples.

6. APLICAÇÕES PRÁTICAS.

Um dos arranjos geométricos, o de nº 6 foi utilizado em um estudo realizado no modelo reduzido do ponto de Mucuripe (Ceará), construído nos laboratórios do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, no Rio de Janeiro, fig. 16. Este modelo ocupa uma área de aproximadamente 20m x 20m com a escala horizontal reduzida de 1 : 600 e a escala vertical reduzida de 1 : 100. O material do fundo era acetato de celulose.

O gerador de ondas funcionava por ciclos de 20 minutos. Não houve alimentação contínua do modelo como era de se desejar.

A marcação do acetato de celulose foi feita com Au^{198} fazendo-se correções na granulometria de modo a simular marcação mássica. Foram marcados 5 gramas de acetato de celulose com 3,5mg de Au^{198} em atividade específica de 15 curies/grama. No instante da injeção a atividade havia decaído para cerca de 25 mCi. A injeção foi feita em uma área circular com 3 cm de diâmetro, em um ponto situado a 20 cm do quebra-mar (ponto I na fig. 9). A delimitação da área de injeção foi feita por um tubo de vidro apoiado na camada de sedimentos, através do qual se fez a injeção. Após 30 minutos da injeção não se constatou alteração no fundo, causada pela injeção.

A detecção foi realizada ponto por ponto, na forma de malha de 10 cm de lado. Nas regiões de maior atividade a malha foi reduzida para 5 cm de lado. Em cada detecção foram levantados cerca de 200 pontos. Toda a área com radioisótopo foi coberta, e a sonda dispunha de dispe

6. APLICAÇÕES PRÁTICAS.

Um dos arranjos geométricos, o de nº 6 foi utilizado em um estudo realizado no modelo reduzido do ponto de Mucuripe (Ceará), construído nos laboratórios do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, no Rio de Janeiro, fig. 13. Este modelo ocupa uma área de aproximadamente 20m x 20m com a escala horizontal reduzida de 1 : 600 e a escala vertical reduzida de 1 : 100. O material do fundo era acetato de celulose.

O gerador de ondas funcionava por ciclos de 20 minutos. Não houve alimentação contínua do modelo como era de se desejar.

A marcação do acetato de celulose foi feita com Au^{198} fazendo-se correções na granulometria de modo a simular marcação mássica. Foram marcados 5 gramas de acetato de celulose com 3,5mg de Au^{198} com atividade específica de 15 curies/grama. No instante da injeção a atividade havia decaído para cerca de 25 mCi. A injeção foi feita em uma área circular com 3 cm de diâmetro, em um ponto situado a 20 cm do quebra-mar (ponto I na fig. 9). A delimitação da área de injeção foi feita por um tubo de vidro apoiado na camada de sedimentos, através do qual se fez a injeção. Após 30 minutos da injeção não se constatou alteração no fundo, causada pela injeção.

A detecção foi realizada ponto por ponto, na forma de malha de 10 cm de lado. Nas regiões de maior atividade a malha foi reduzida para 5 cm de lado. Em cada detecção foram levantados cerca de 200 pontos. Toda a área com radioisótopo foi coberta, e a sonda dispunha de dispo

sitivo apalpador para permitir medidas a distância cons
tante do fundo.

Foram feitas duas detecções, a primeira após 10
ciclos (200 minutos) de funcionamento do gerador de on
das, a segunda após mais 10 ciclos. Cada detecção durou
cêrca de 8 horas.

As figuras 17 e 18 apresentam as curvas de isodo
se obtidas na análise dos dados.

O exame destas curvas em detecções sucessivas per
mite deduzir informações tais como, direção de movimento,
área coberta pelo transporte, distância coberta pelos
grãos mais rápidos e mais lentos, velocidade máxima, mí
nima e média do movimento.

Devido ao fato de a experiência ter sido realiza
da quando o fundo do modelo já quase havia atingido o
equilíbrio de transporte, a movimentação dos sedimentos
não foi grande. A distância atingida pela frente da nu
vem dos sedimentos marcados foi de cêrca de 50 cm, o que
corresponde a 300 metros na natureza.

Verificou-se que a detecção foi eficiente regis
trando cêrca de 80% do material injetado.

Os cálculos mostraram que o deslocamento foi pe
queno, pois cêrca de 99% do material estava concentrado
em um círculo de raio 40 cm com centro no ponto da inje
ção.

Estudos em Canais: O método diferencial poderá ser uti
lizado para estudos sedimentológicos em canais de labora
tório. Alguns estudos onde foram utilizados colimadores
simples estão descritos em (1).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MIGNOT C. - Les applications des Radioelements aux Laboratoire de Sedimentologie. La Houille Blanche Nº 8. 1970. pg. 725.
- (2) TARODO, SE. - Utilizacion de Radioelementos como complemento a estudios en modelos a escala reduzida. Mejoramiento de las condiciones de navegacion en el rio Valdivia. Aplicacion de Radioisotopos en Hidrologia. junho 1970. Santiago, Chile.
- (3) SAUZAY, G. - Méthode du Bilan des Traux de Comptage d'Indicateurs Radioactifs pour la determination du Débit de Charriage des Lits Sableux. Rapport CEA-R-3431. 1968.
- (4) LANGHAAR, H.L. - Dimensional Analysis and Theory of Models. John Wilay & Sons, Inc. London. 1967.
- (5) J.L. PUTMAN, D.B. SMITH. - Radioactive Tracer Technique for Sand and Silt Movements under Water. Intern. J. Appl. Radiation and Isotopes 1. 1956. 24-32.
- (6) M.J. CRICKMORE, G.H. LEAN. - The Measurement of Sand Transport by means of Radioactive Tracers. Proc. Royal Soc. A 266. 1962. 402-21.
- (7) M.J. CRICKMORE, G.H. LEAN. - The Measurement of Sand Transport by the Time Integration Method with Radioactive Tracers. Proc. Royal Society A 270. 1962. 27.

- (8) G.H. LEAN, M.J. CRICKMORE. - Methods for Measuring Sand Transport using Radioactive Tracers. Radioisotopes in Hydrology. Vienna. 1963. 111-30.
- (9) R. HOURS, P. JAFFRY. - Application des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements des sédiments et des galets dans les cours d'eau et en mer. La Houille Blanche. 1959. 3:
- (10) G. COURTOIS, P. JAFFRY, M. HEUZEL. - Emploi des traceurs radioactifs pour l'étude du transport solide dans les cours d'eau. Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry, I. Vienna. 1962. 453-
- (11) M. KATO, M. HOMMA, S. SATO, S. SAKAGISHI. - Radiotracer Experiments on Littoral Drift in Japan. Radioisotopes in Hydrology. Vienna. 1963. 143-72.
- (12) G. COURTOIS. - Etude de mouvements de vases par traceurs radioactifs dans la Gironde. C.E.A. Internal Report DR/AR/64-6. May 1964. 14pp.
- (13) G. COURTOIS. - Possibilités d'emploi d'un nombre limité de grains radioactifs dans les études quantitatives de mouvements de sédiments. C.E.A. Internal Report DR/AR/63-36. December 1963. 17pp.
- (14) G. COURTOIS. - Une nouvelle méthode de mesure quantitative de débit de sédiment. C.E.A. Internal Report DR/AR/64-261. August 1964. 3pp.

- (15) D.W. HUBBELL and W.W. SAYRE. - Sand transport studies with radioactive tracers. A.S.C.E. Proc. Paper 3900. May 1964.
- (16) V. VUKMIROVIĆ, A. FILIP and P. TODOROVIC. - The Application of radioactive tracers in the study of sand movement in rivers. "Jaroslav Černi" Institute, Internal report. August 1964.
- (17) MAESTRINI et al. - Radioactive Tracers Applied to the studies of Sediment Transportation. ANS Topical Meeting, Radiation and Isotope Technology in Latin American Development. San Juan, Puerto Rico. maio 1969.
- (18) RADIOLOGICAL HEALTH HANDBOOK. - US Department of Health, Education, and Welfare.

8. FIGURAS E TABELAS.

- Fig. 1 - Distribuição de taxas de Contagem em função da distância da fonte ao eixo do detector.
- Fig. 2 - Aproximação da distribuição da contagem, com colimação simples, por uma distribuição de Gauss.
- Fig. 3. - Distribuição de contagens em função da distância da fonte ao eixo detector, com blindagem diferencial, para a geometria nº 28.
- Fig. 4 - Esquema da sonda para detecção diferencial.
- Fig. 5 - Colimador e blindagem frontal usados no trabalho.
- Fig. 6a - Pormenores do arranjo experimental.
- Fig. 6b - Diagrama da montagem experimental.
- Fig. 7 - Razão da área de detecção para a área de colimação.
- Fig. 8 - Eficiência de detecção em função da área de detecção.
- Fig. 9,
10,11,12- Valores da resolução r , para cada diâmetro de colimação ϕ , em função da profundidade de colimação.

mação h e da distância ao fundo d .

Fig.13 - Desvio relativo da taxa de contagem diferencial em função da profundidade de colimação.

Fig.14 - Sugestão para construção de uma fonte plana.

Fig.15 - Sonda com prolongamento do canal de colimação.

Fig.16 - Planta do modelo reduzido do pônto de Mucuripe.

Fig.17 - Curvas de isodose - 1^a detecção - modelo de Mucuripe.

Fig.18 - Curvas de isodose - 2^a detecção - modelo de Mucuripe.

Tab. 1 - Geometrias de detecção estudadas.

Tab. 2 - Dados experimentais, N_s , N_c , Δ e valores de r .

Tab. 3 - Eficiência de detecção para os sistemas de colimação simples e diferencial, em função da área de detecção.

Tab. 4 - Incerteza relativa na área de detecção para a geometria n^o 28.

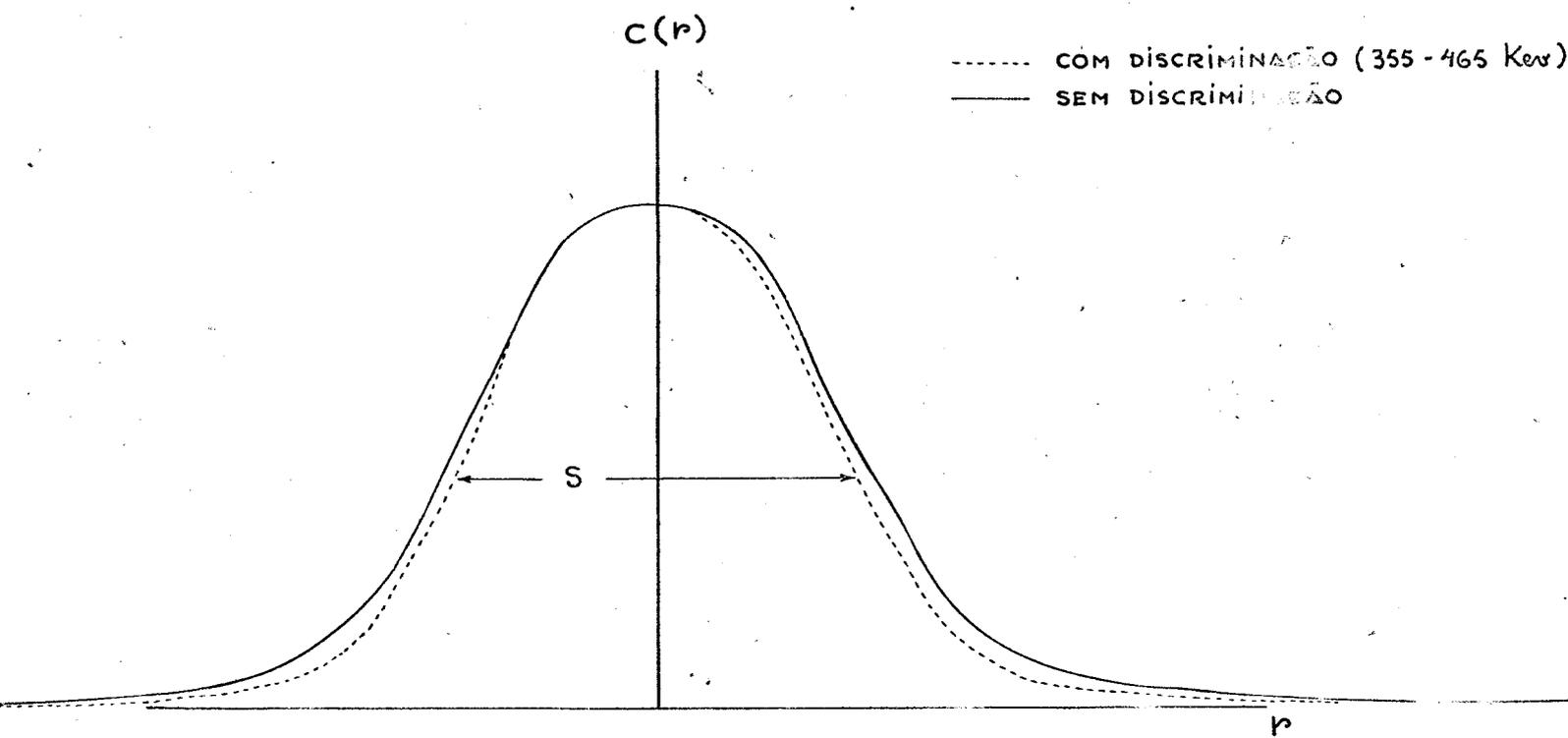


FIG. 1 - DISTRIBUIÇÃO DE TAXAS DE CONTAGEM EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DA FONTE AO EIXO DO DETETOR.

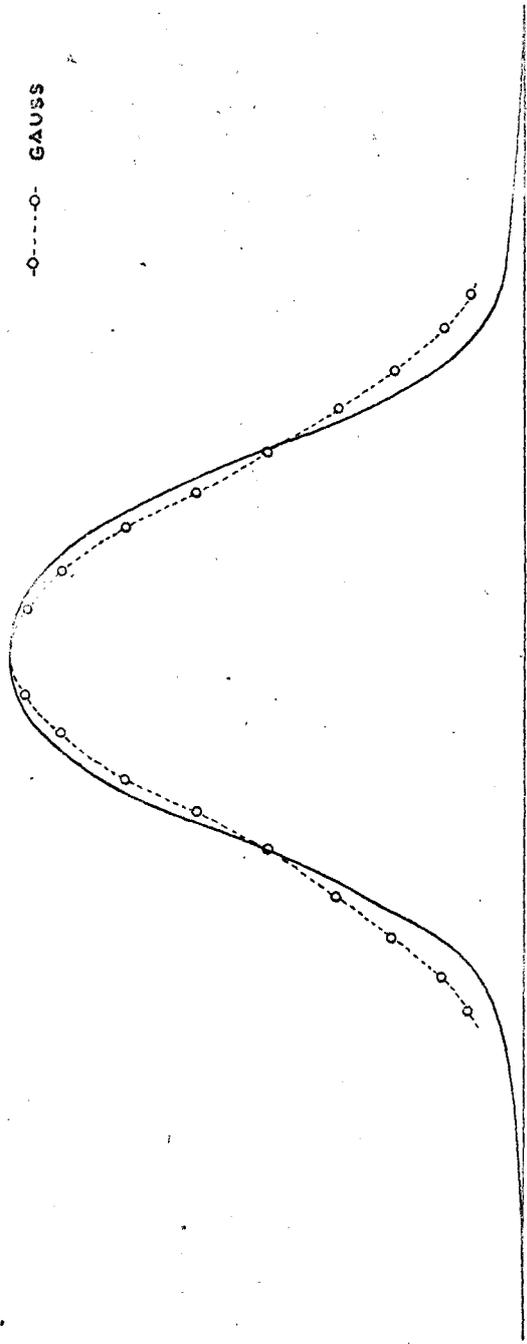


FIG. 2 - APROXIMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CONTAGENS COM COLIMAÇÃO SIMPLES POR UMA DISTRIBUIÇÃO DE GAUSS (GEOMETRIA Nº 70)

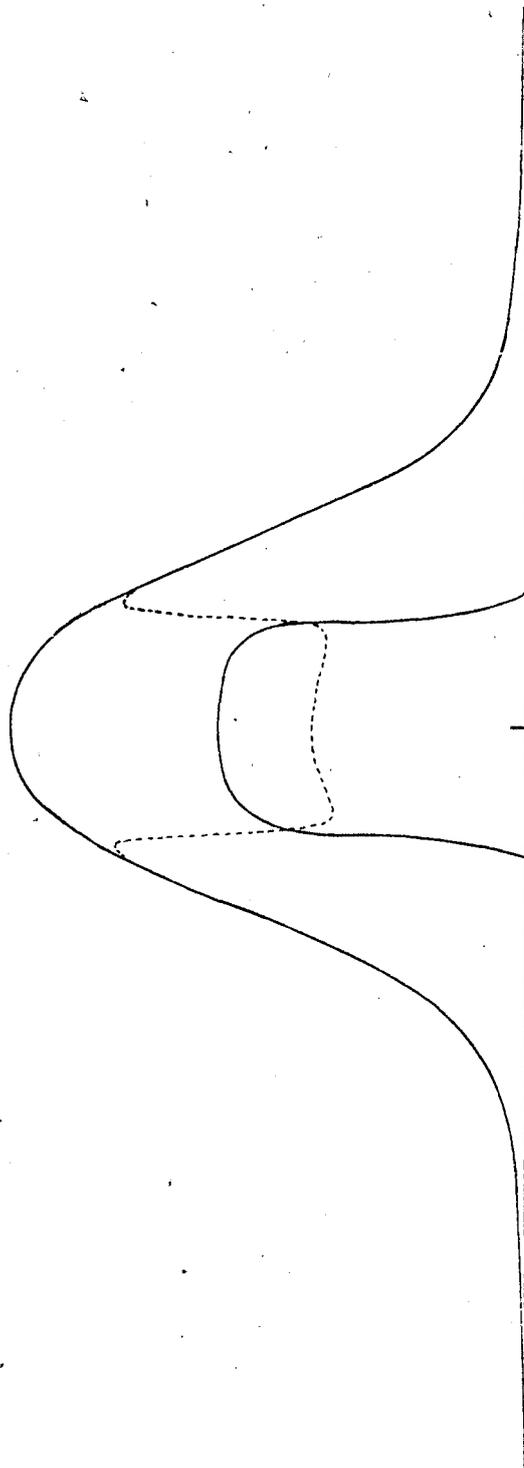


FIG. 3 - DISTRIBUIÇÃO DE CONTAGENS, EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DA FONTE AO EIXO DO DETETOR, COM BLINDAGEM DIFERENCIAL, PARA A GEOMETRIA 28

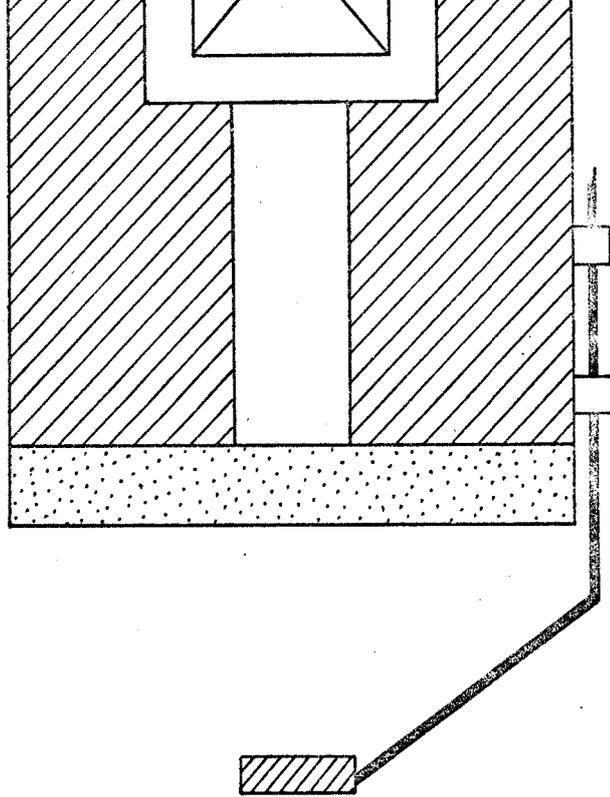


FIG. 4 - ESQUEMA DA SONDA PARA
DETEÇÃO DIFERENCIAL

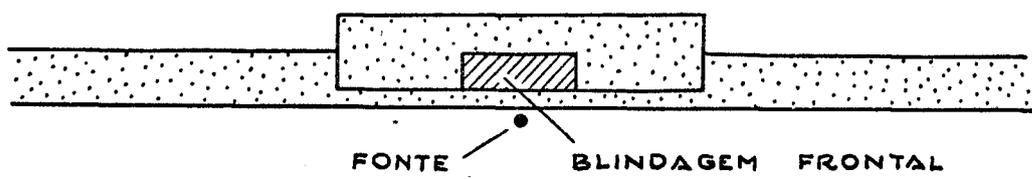
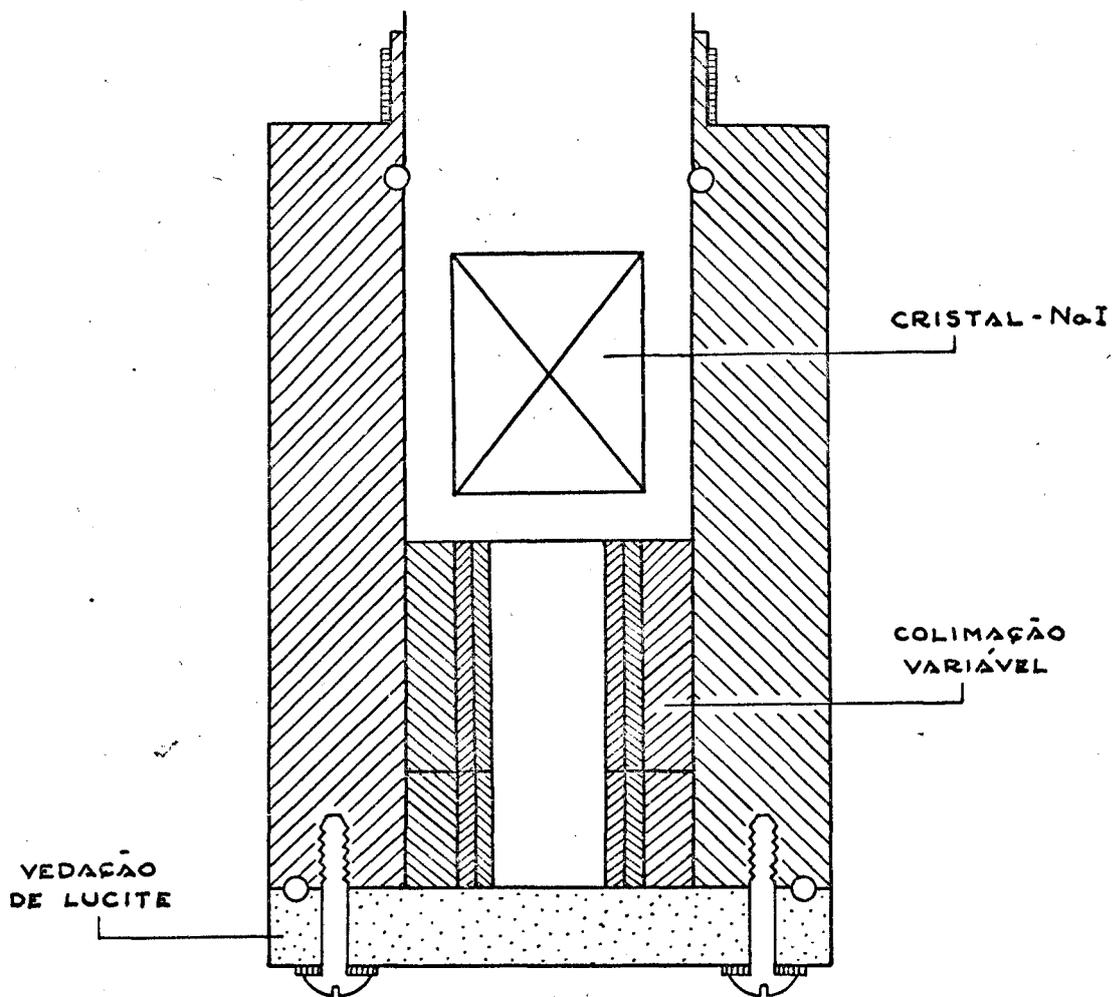


FIG. 5 - COLIMADOR E BLINDAGEM FRONTAL USADOS NO TRABALHO.

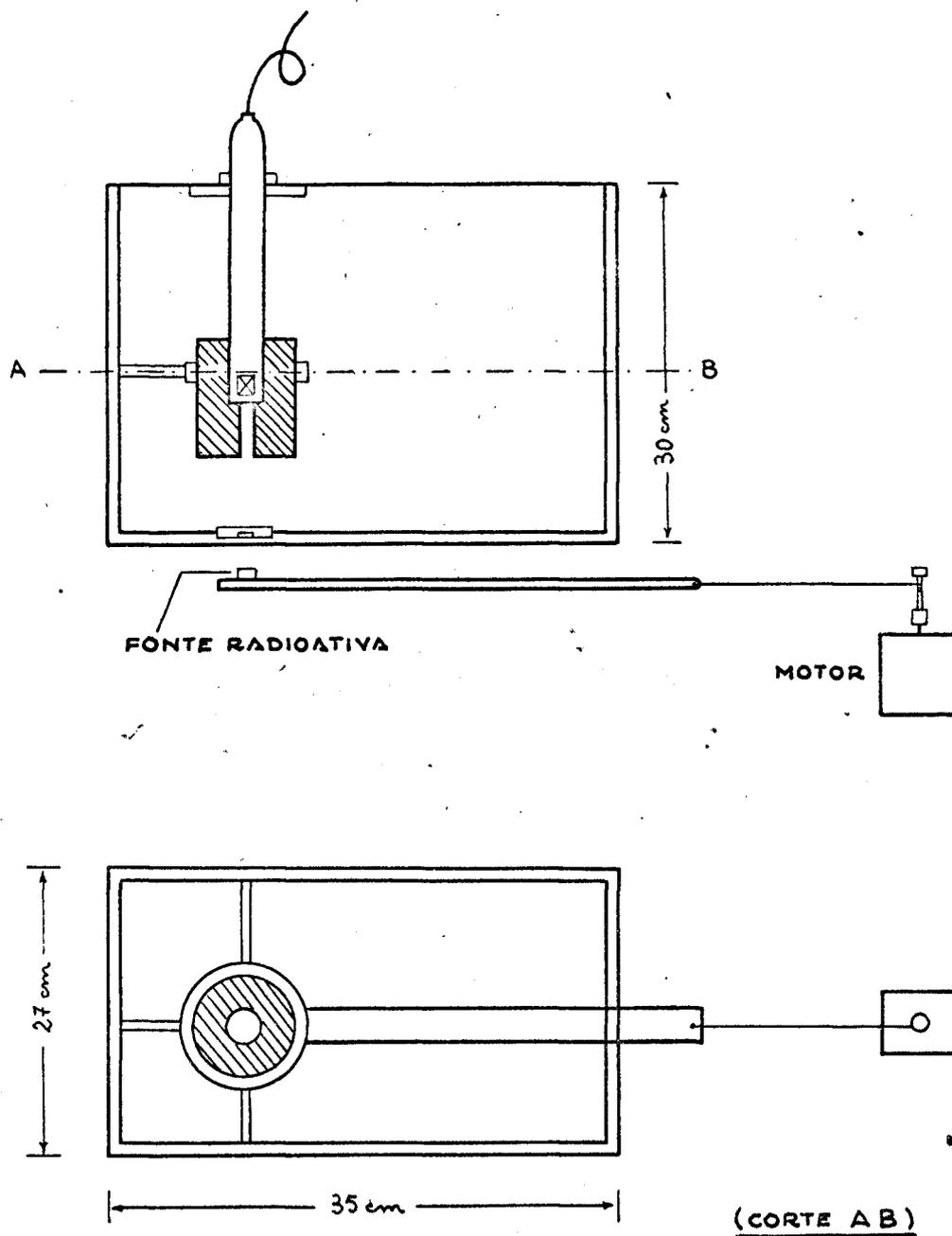


FIG. 6a- PORMENORES DO ARRANJO EXPERIMENTAL

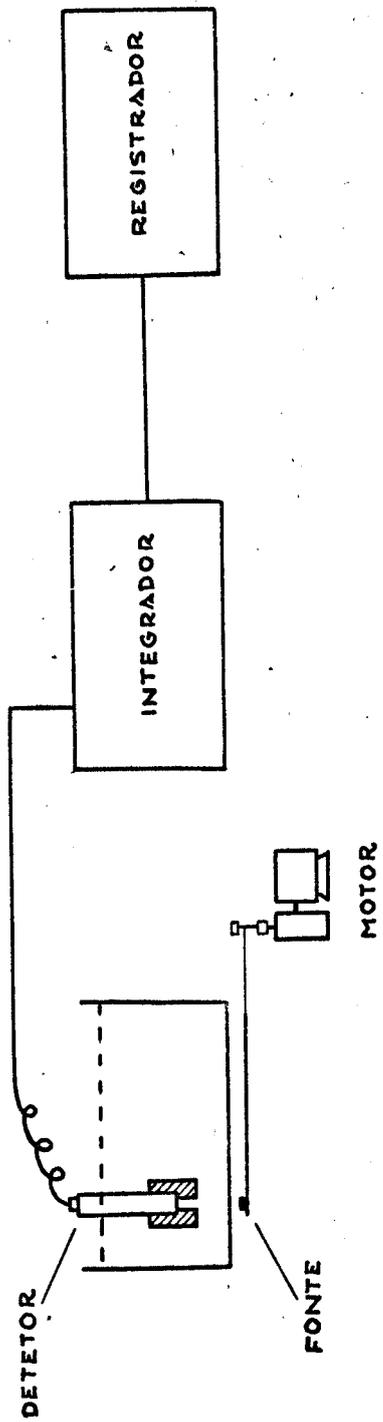
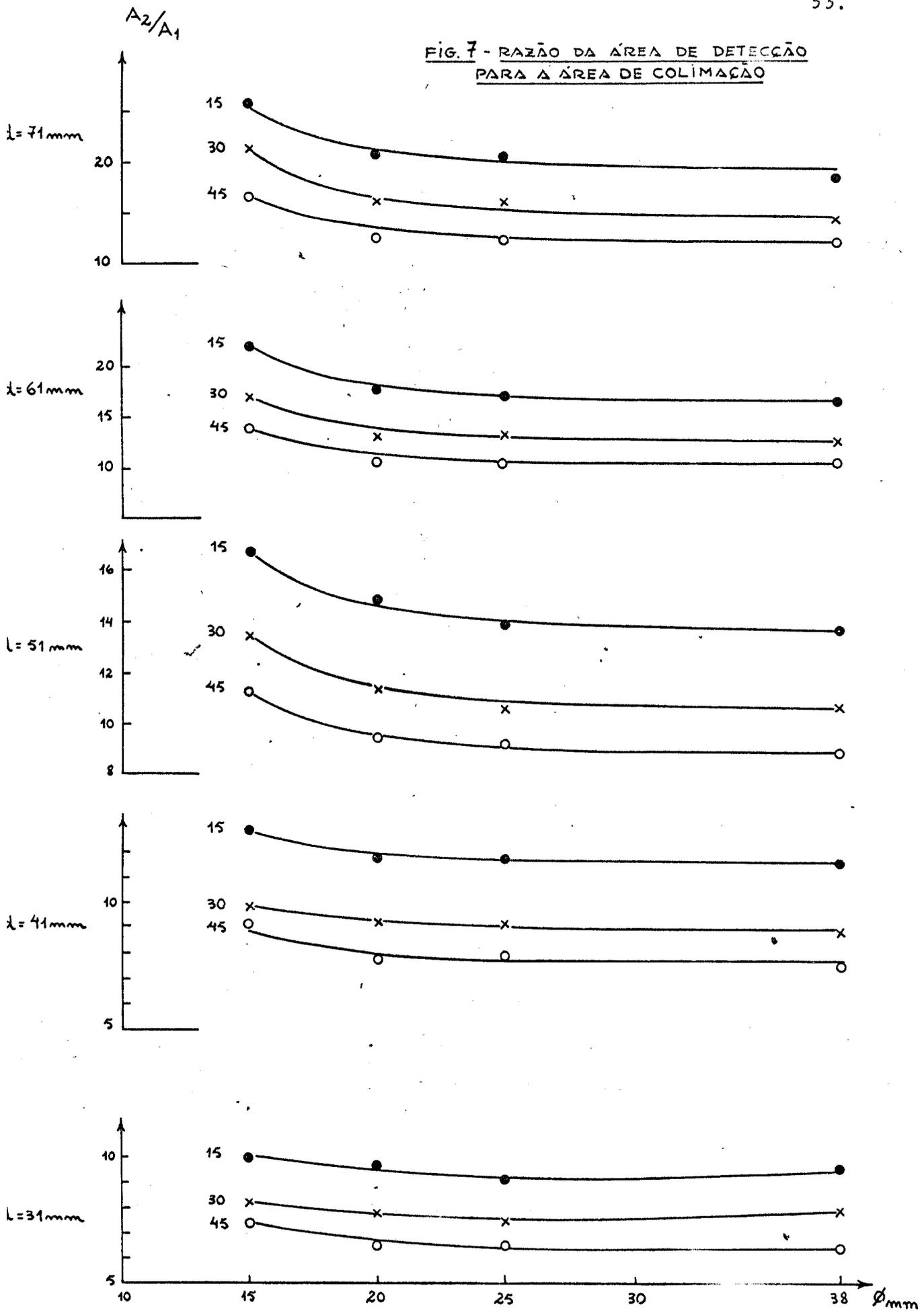
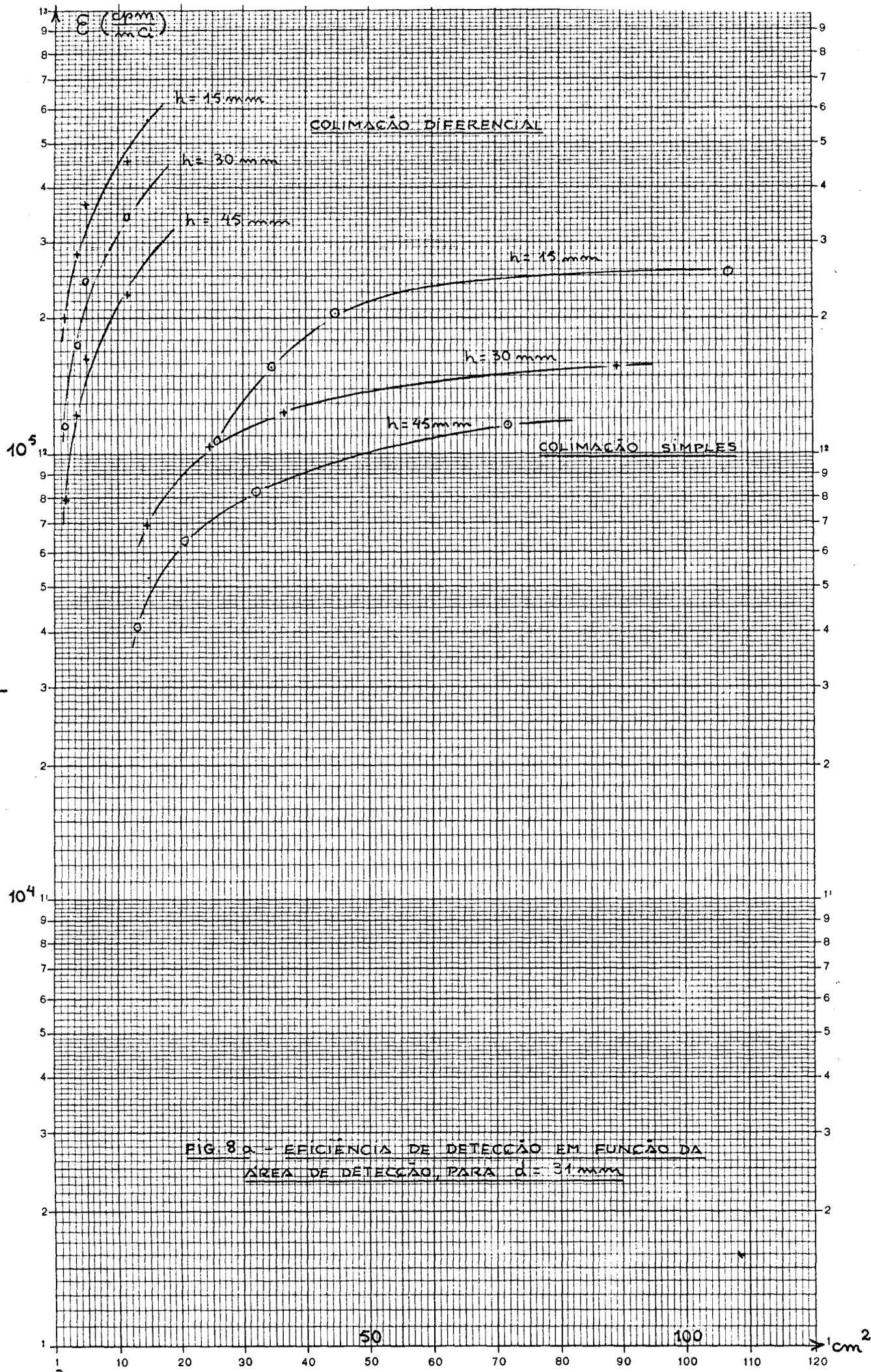


FIG. 6b - DIAGRAMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL.

FIG. 7 - RAZÃO DA ÁREA DE DETECÇÃO
PARA A ÁREA DE COLIMAÇÃO





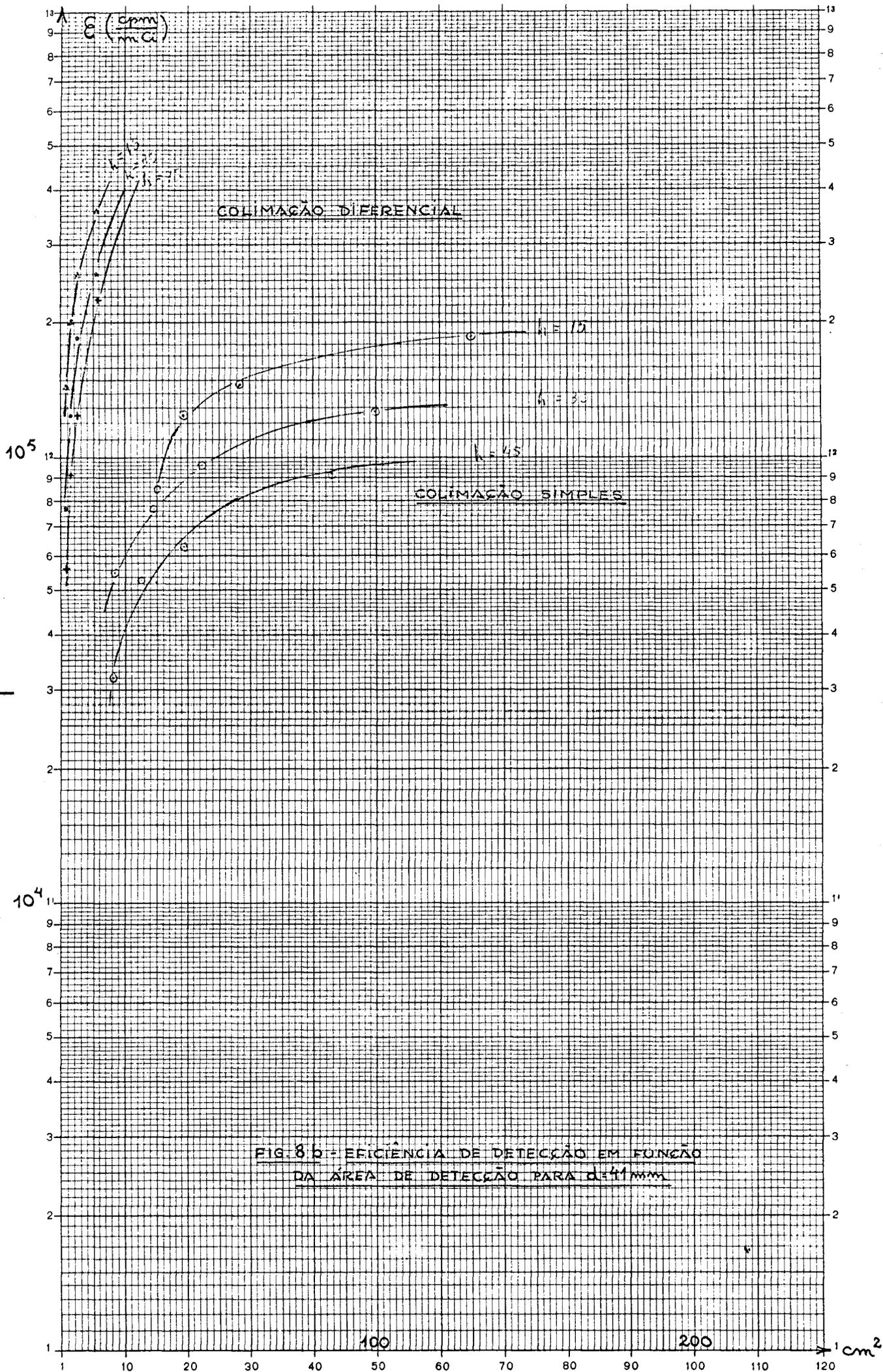
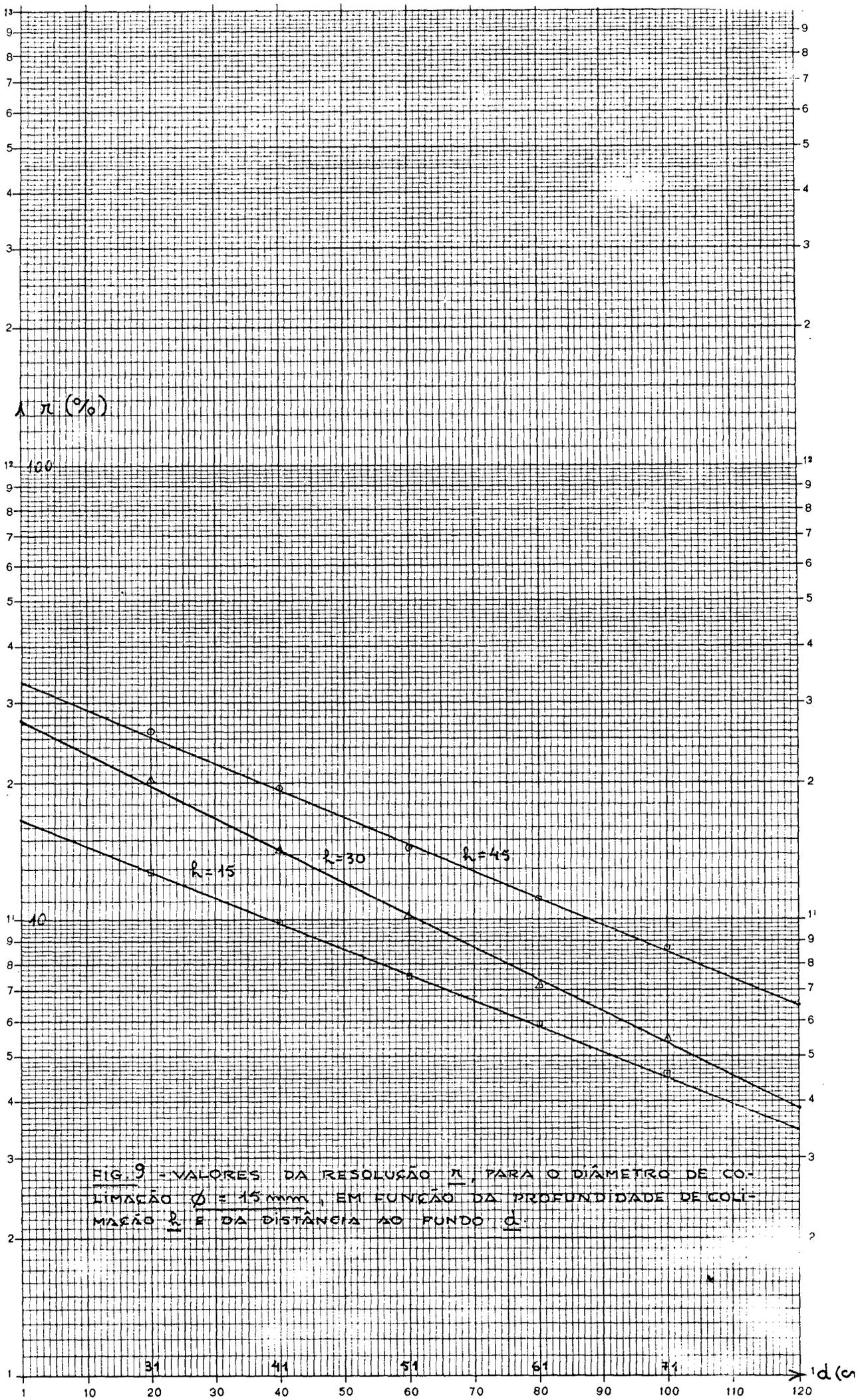


FIG. 8 b - EFICIÊNCIA DE DETECÇÃO EM FUNÇÃO DA ÁREA DE DETECÇÃO PARA $d=41$ mm



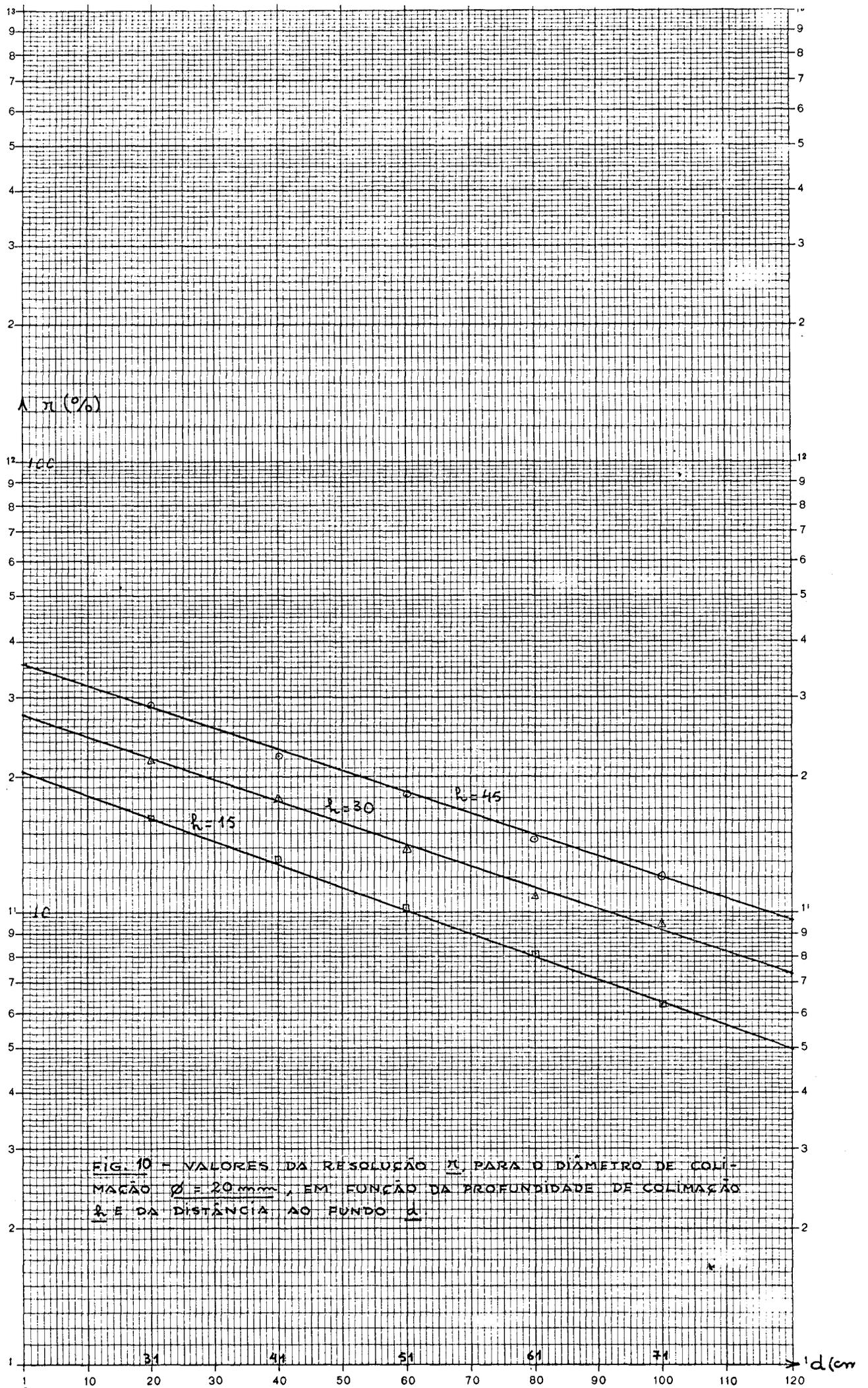
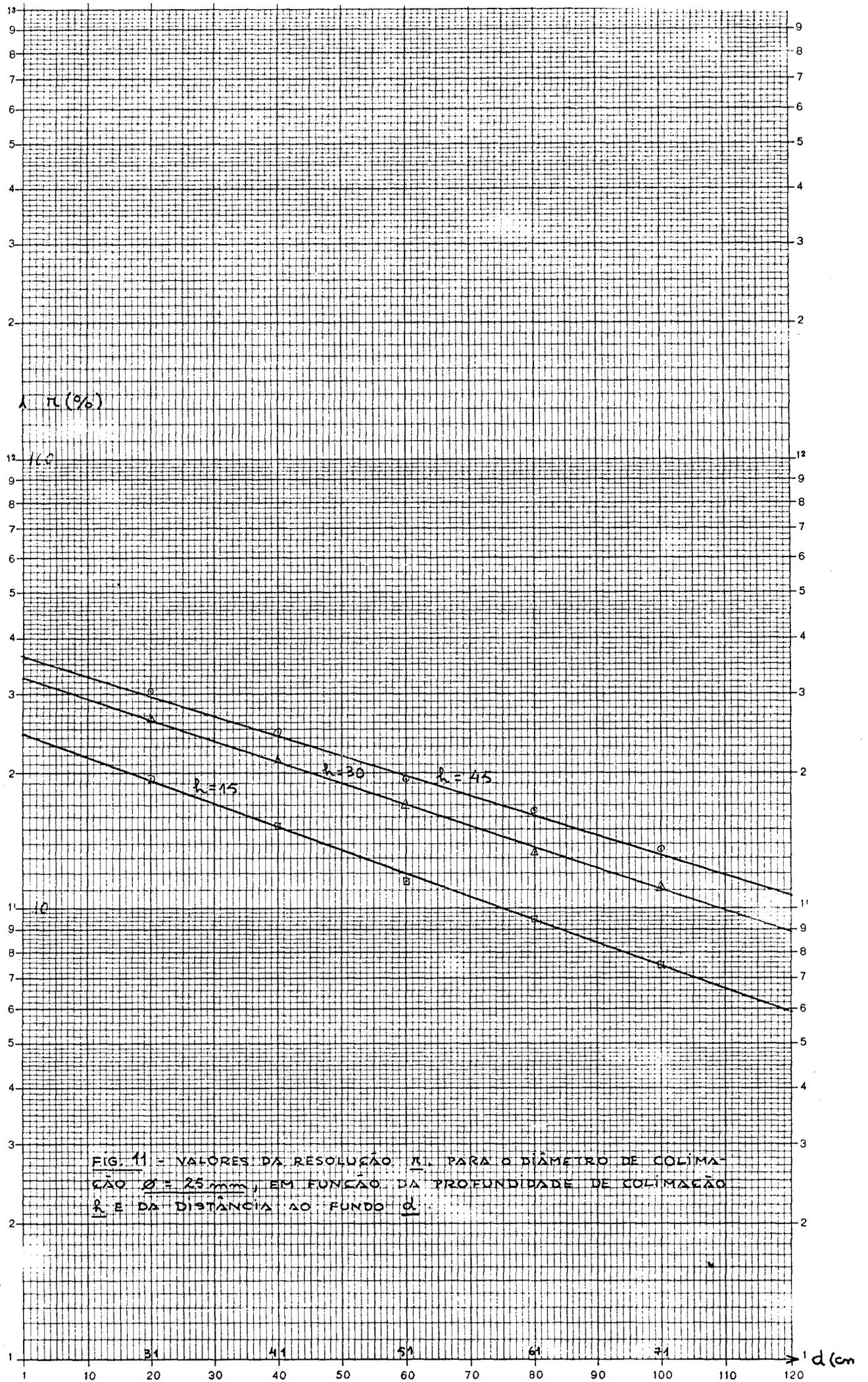


FIG. 10 - VALORES DA RESOLUÇÃO π , PARA O DIÂMETRO DE COLIMAÇÃO $\phi = 20 \text{ mm}$, EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE COLIMAÇÃO R E DA DISTÂNCIA AO FUNDO d



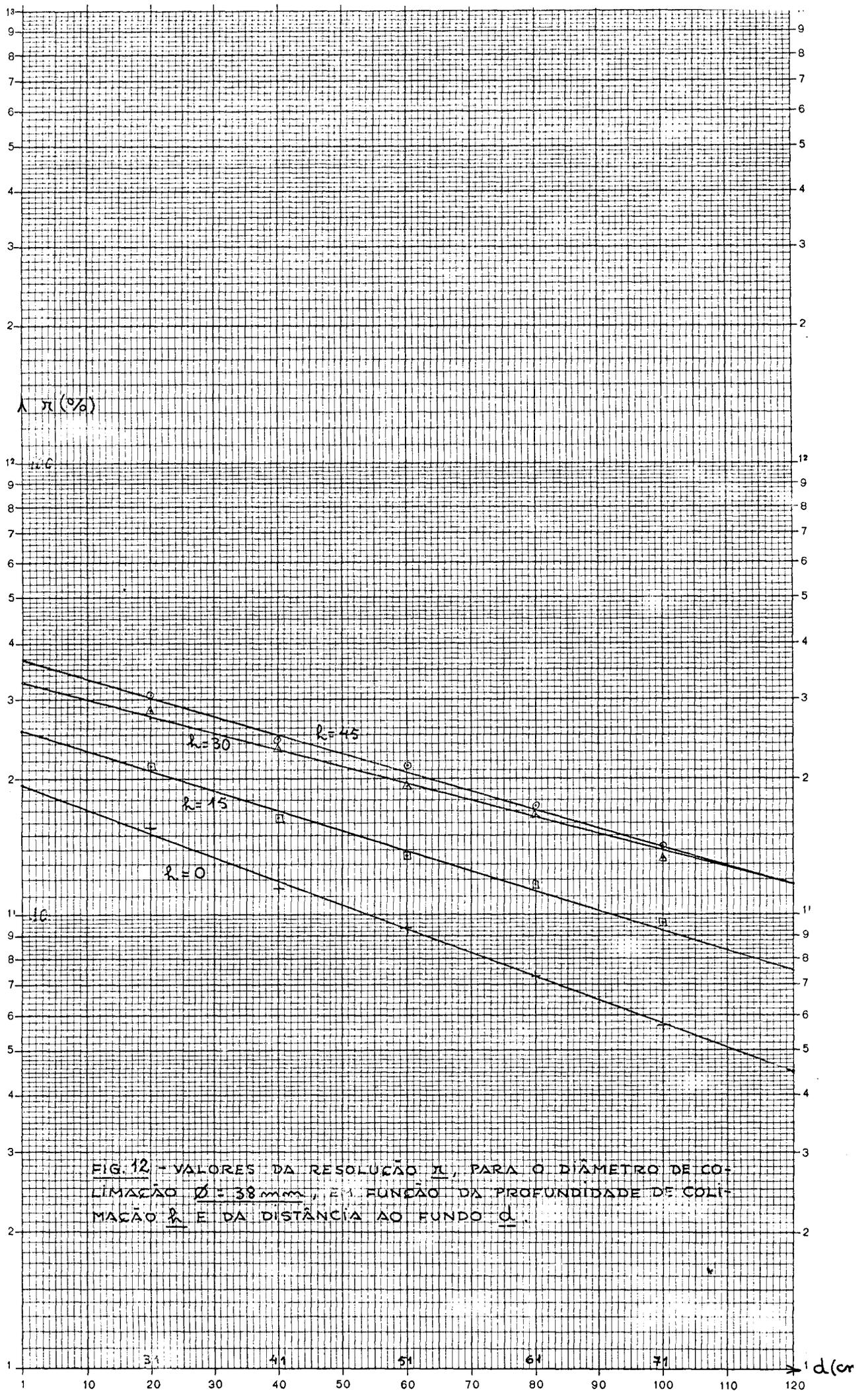


FIG. 12 - VALORES DA RESOLUÇÃO $\lambda \pi$, PARA O DIÂMETRO DE COLIMAÇÃO $\varnothing = 38 \text{ mm}$, EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE COLIMAÇÃO R E DA DISTÂNCIA AO FUNDO d .

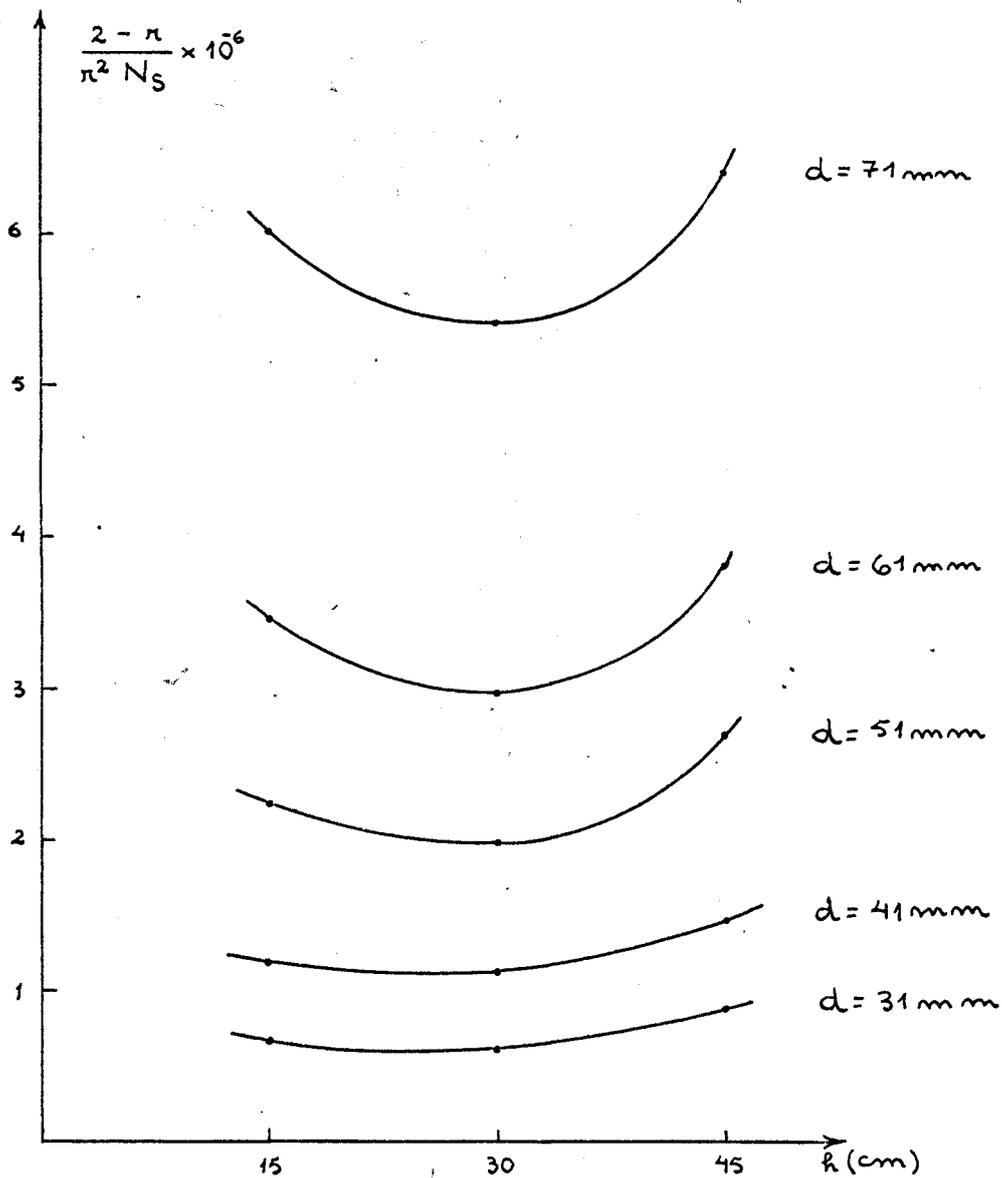


FIG. 13 - DESVIO RELATIVO DA TAXA DE CONTAGEM DIFERENCIAL
EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DA COLIMAÇÃO, PARA O DIÂME-
TRO $\phi = 25$ mm

TUBO FLEXÍVEL PARA ENCHER E ESGOTAR O DEPÓSITO.

TUBO DE RESPIRO

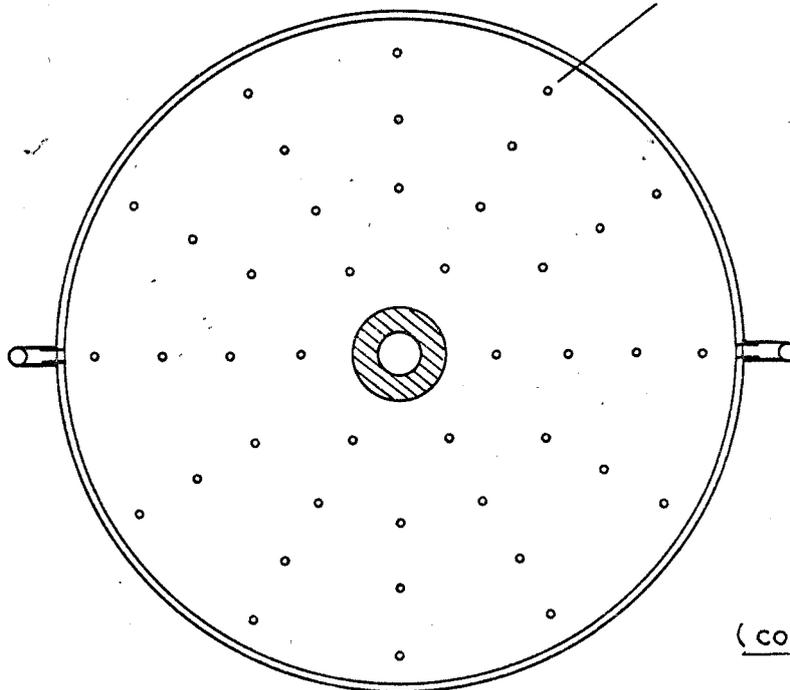
ÁGUA

A

B

FUNDO DUPLO DA CAIXA (DEPÓSITO DE LÍQUIDO RADIOATIVO)

PINOS DE LUCITE PARA SUSTENTAÇÃO



(CORTE AB)

FIGURA 14

SUGESTÃO PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA FONTE PLANA

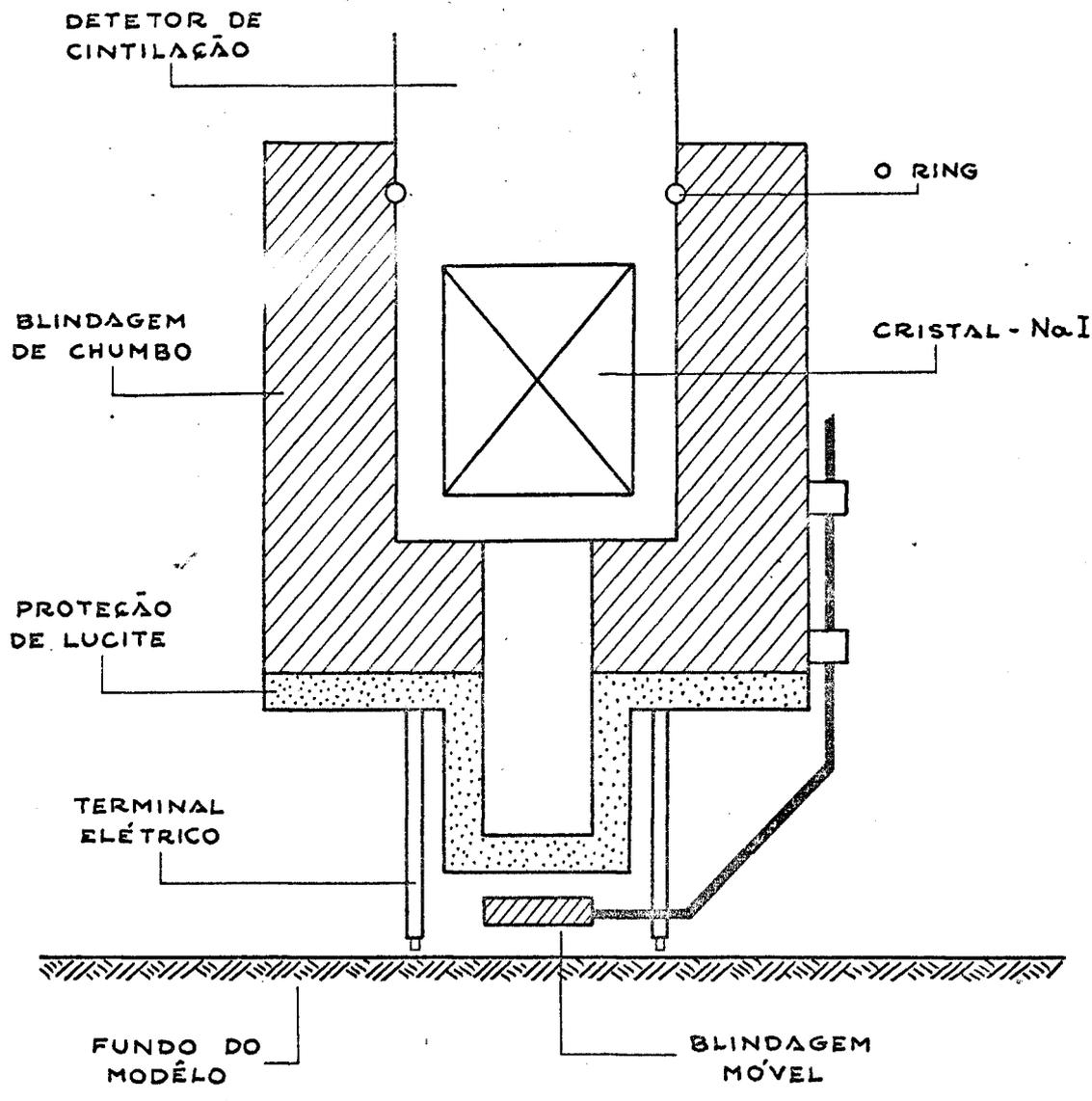


FIG.15 - Sonda com prolongador do canal de colimação.

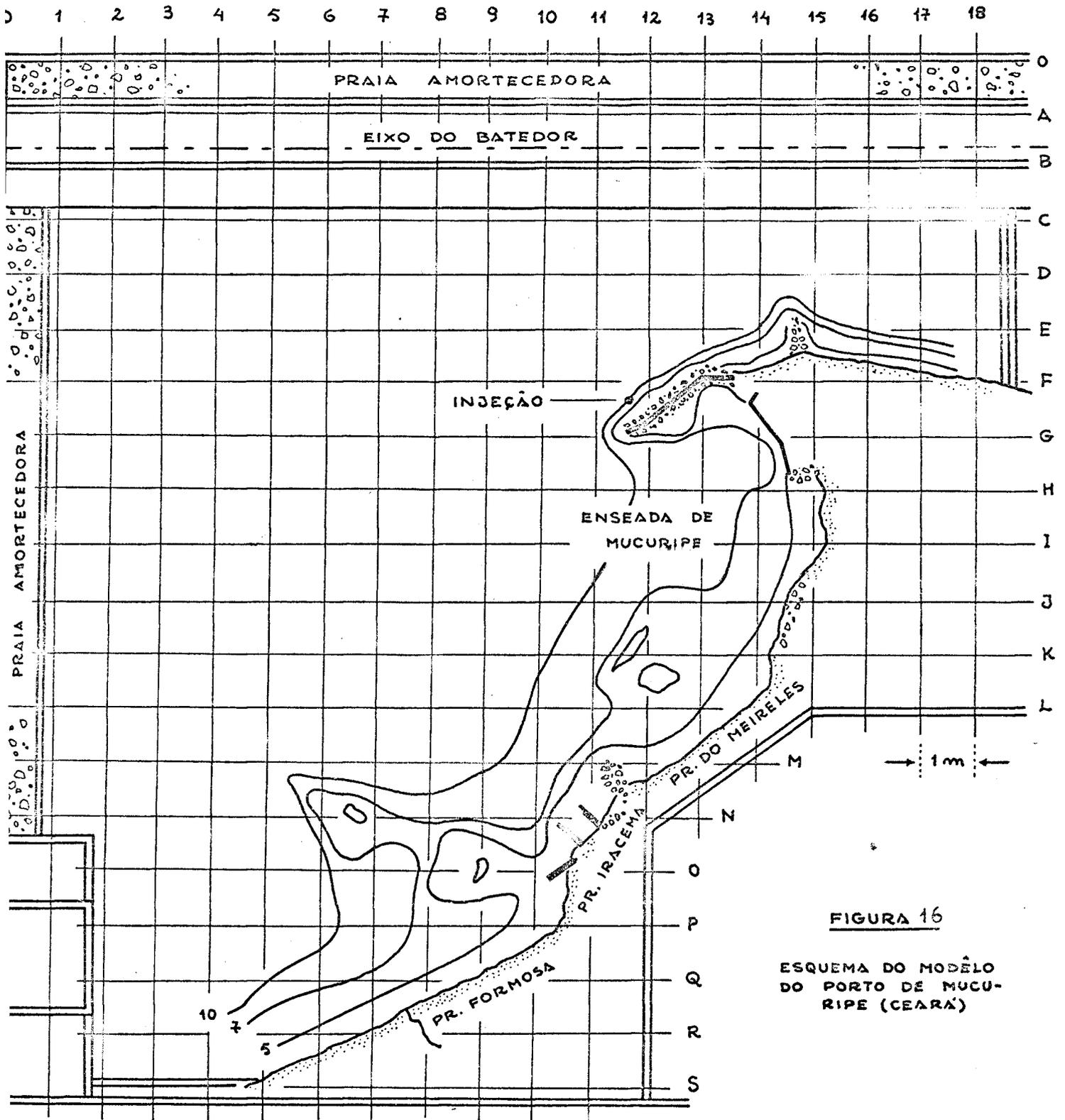
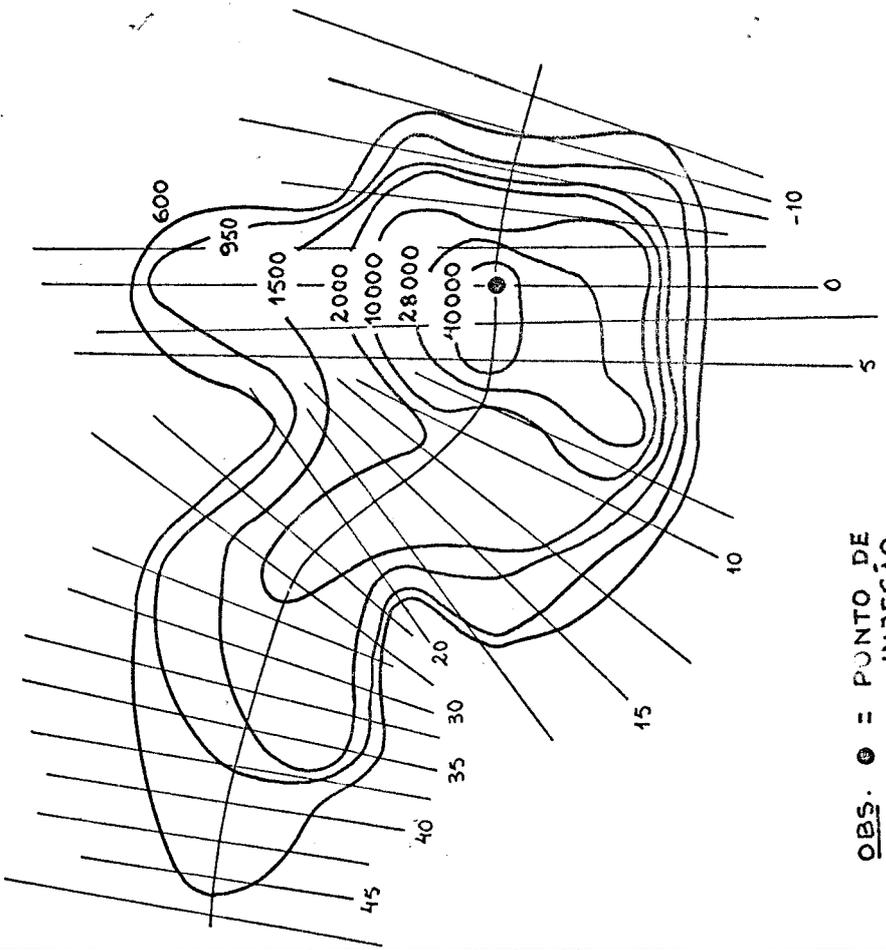
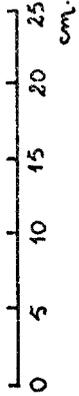


FIGURA 16

ESQUEMA DO MODELO
DO PORTO DE MUCU-
RIPE (CEARÁ)



o F 11 (50,0)



OBS. ● = PUNTO DE INJEÇÃO

o G 12 (0, 50)

FIG. 17 - 1ª DETEÇÃO (MODELO DE MERCURIO)

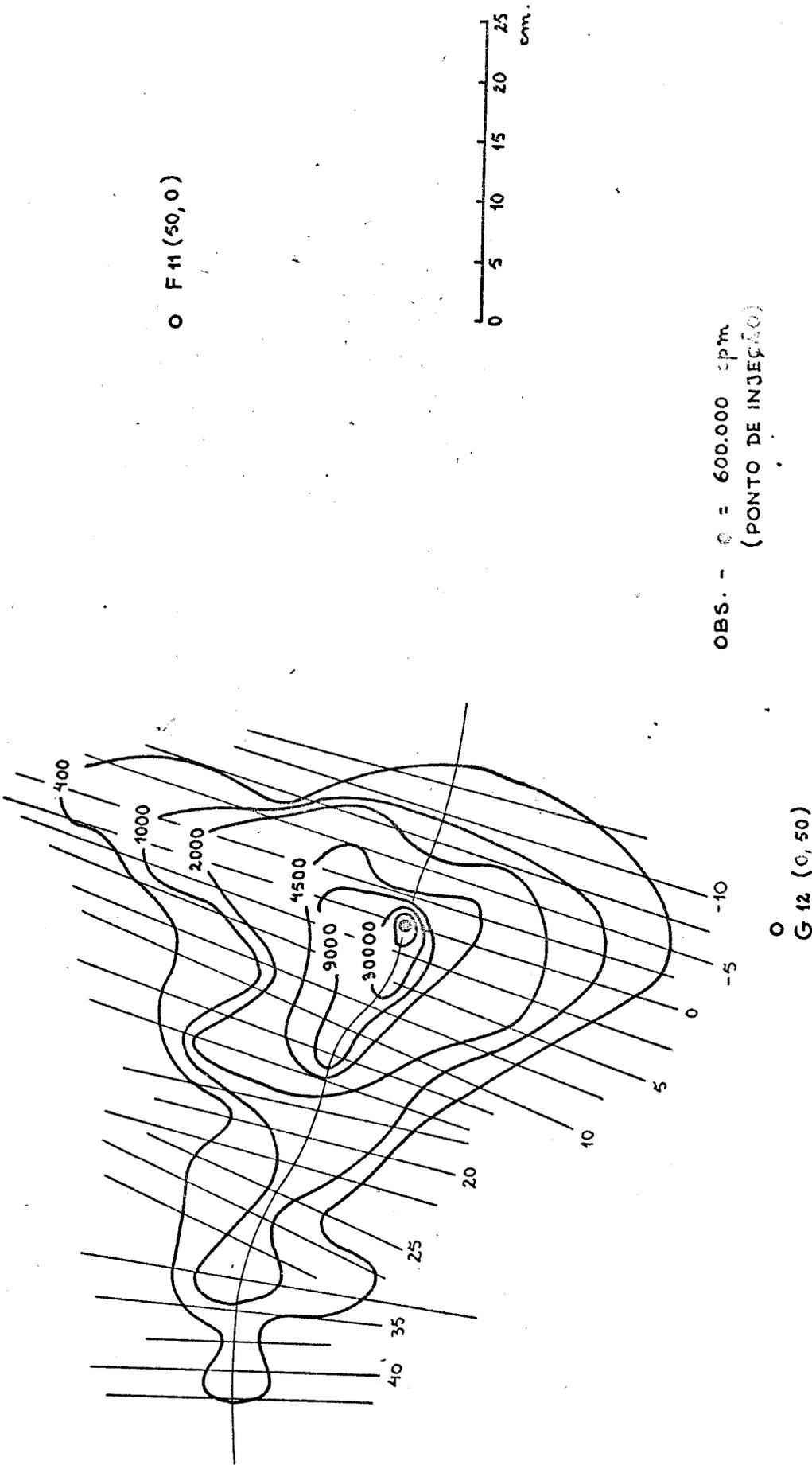


FIG. 18 - 2ª DETEÇÃO (MÓDELO DE MUCURIPE)

TABELA I

GEOMETRIA DE DETECÇÃO.

Nº			PROFUNDIDADE DE COLIMAÇÃO h (mm)	DIÂMETRO DE COLIMAÇÃO. ϕ (mm)	DISTÂNCIA AO FUNDO- d (mm)
1	a	5	45	15	31, 41, 51, 61, 71
6	a	10		20	
11	a	15		25	
16	a	20		38	
21	a	25	30	15	
26	a	30		20	
31	a	35		25	
36	a	40		38	
41	a	45	15	15	
46	a	50		20	
51	a	55		25	
56	a	60		38	
61	a	65	0		

TABELA Nº II

DADOS EXPERIMENTAIS

h = Profundidade de colimação em mm
 d = Distância do colimador ao fundo em mm
 ϕ = Diâmetro de colimação em mm
 N_S = Contagem sem blindagem frontal normalizada
 N_C = Contagem com blindagem frontal normalizada

$$\Delta N = N_S - N_C$$

$$\mu = \frac{N_S - N_C}{N_S} = \frac{\Delta N}{N_S}$$

Nº	h	ϕ	d	N_S	N_C	ΔN	$N_0 \times 10^3$	μ
1	45	15	31	143,85	106,64	37,21	29,56	0,260
2			41	187,42	150,60	36,82	21,61	0,196
3			51	239,37	204,61	34,75	16,10	0,145
4			61	299,15	266,14	33,01	12,22	0,110
5			71	365,17	333,19	31,97	9,67	0,085
6		20	31	223,18	158,47	64,71	47,17	0,290
7			41	293,34	228,63	64,71	35,40	0,221
8			51	354,80	287,95	66,85	27,67	0,188
9			61	425,36	363,19	62,17	22,21	0,146
0			71	511,52	450,20	61,31	17,52	0,120
1		25	31	348,70	242,63	106,07	60,00	0,305
2			41	428,23	321,63	106,60	45,37	0,248
3			51	516,16	415,31	100,85	35,18	0,194

CONTINUAÇÃO DA TABELA Nº II.

14				641,84	535,08	106,76	27,52	0,166
15				730,35	630,87	99,48	22,40	0,136
16	38			755,74	522,74	233,00	88,84	0,308
17				904,20	672,52	231,68	69,10	0,256
18				1132,17	887,59	244,58	54,64	0,216
19				1304,68	1076,88	227,80	44,13	0,175
20				1532,00	1316,77	215,23	36,17	0,140
21	15	30		174,11	138,31	35,80	45,99	0,206
22				236,73	203,08	33,65	32,11	0,142
23				327,36	292,38	34,98	23,50	0,107
24				436,81	405,36	31,45	17,44	0,072
25				537,88	508,28	29,60	13,45	0,055
26	20			300,65	234,63	66,02	67,70	0,220
27				367,79	302,10	65,69	48,89	0,179
28				451,94	389,31	62,63	36,60	0,139
29				544,25	485,05	59,20	28,85	0,109
30				699,13	633,11	66,02	22,33	0,094
31	25			409,60	300,06	109,54	87,72	0,267
32				525,90	412,33	113,57	64,96	0,216
33				646,32	536,50	109,82	48,91	0,170
34				795,18	681,69	113,49	38,20	0,143
35				991,93	882,72	109,21	29,91	0,110

CONTINUAÇÃO DA TABELA Nº II

36				903,00	648,30	254,70	124,36	0,282
37				1071,61	822,75	248,86	95,80	0,232
38				1332,44	1077,18	255,26	73,68	0,192
39				1569,88	1305,95	263,93	58,15	0,168
40				1869,98	1622,25	247,73	46,49	0,132
41	15			279,39	243,61	35,78	79,08	0,128
42				386,62	348,35	38,27	52,83	0,099
43				469,88	434,34	35,54	37,29	0,076
44				616,11	579,58	36,53	27,36	0,059
45				779,98	744,12	35,86	20,55	0,046
46		20		402,39	337,73	64,66	107,88	0,161
47				507,38	441,40	65,98	75,50	0,130
48				639,62	574,58	65,04	54,78	0,102
49				803,70	735,71	67,99	41,49	0,085
50				1003,13	940,38	62,75	32,45	0,063
51		25		538,30	433,69	104,61	135,51	0,194
52				706,03	599,01	107,02	94,99	0,152
53				915,98	810,67	105,31	70,01	0,115
54				1132,41	1025,48	106,93	53,00	0,094
55				1378,38	1274,93	103,45	41,39	0,075

CONTINUAÇÃO DA TABELA Nº II.

56				1199,05	941,43	257,62	180,87	0,215
57	38	31	1484,50	1239,27	245,23	133,55	0,165	
58		41	1752,04	1513,11	238,93	102,78	0,136	
59		51	2199,81	1959,37	240,44	79,80	0,109	
60		61	2560,85	2313,47	247,38	63,42	0,097	
61	0	71	1566,02	1323,66	242,36	272,24	0,155	
62	38	41	2171,22	1922,05	249,17	199,46	0,115	
63		51	2665,13	2412,96	252,17	149,90	0,095	
64		61	3293,65	3052,59	241,06	114,70	0,073	
65		71	4114,59	3877,26	237,33	90,24	0,058	

TABELA III - EFICIENCIA DE DETECÇÃO PARA OS SISTEMAS DE COLIMAÇÃO SIMPLES E DIFERENCIAL, EM FUNÇÃO DA ÁREA DE DETECÇÃO.

$h = 45 \text{ mm}$		COLIMAÇÃO SIMPLES			COLIMAÇÃO DIFERENCIAL			
Nº	ϕ	d	$N_S \times 10^6$	$A_2 \text{ (cm}^2\text{)}$	$N_S / \delta A_2$ $\frac{\text{cpm}}{\text{mCt.}}$	$\Delta N \times 10^5$	$A_1 \text{ (cm}^2\text{)}$	$\Delta N / \delta A_1$ $\frac{\text{cpm}}{\text{mCt.}}$
1	15	31	4,23	13,0	$4,08 \times 10^4$	11,0	1,76	$7,80 \times 10^4$
2		41	4,05	16,2	3,12	7,93		5,63
3		51	3,82	19,9	2,40	5,53		3,92
4		61	3,71	24,8	1,87	3,98		2,82
5		71	3,49	29,5	1,48	3,04		2,16
6	20	31	10,5	20,5	$6,4 \times 10^4$	30,5	3,14	$1,21 \times 10^5$
7		41	10,37	24,5	5,29	22,9		$9,10 \times 10^4$
8		51	9,79	30,0	4,08	18,4		7,30
9		61	9,43	33,3	3,54	13,8		5,50
10		71	8,95	39,5	2,84	10,7		4,30
11	25	31	20,9	31,9	$8,19 \times 10^4$	63,7	4,9	$1,63 \times 10^5$
12		41	19,4	38,7	6,26	48,1		1,23
13		51	18,1	44,9	5,03	35,2		$9,00 \times 10^4$
14		61	17,6	52,0	4,23	29,2		7,50
15		71	16,3	59,6	3,42	22,2		5,70
16	38	31	67,0	72,2	$1,16 \times 10^5$	207	11,4	$2,27 \times 10^5$
17		41	62,5	85,8	$9,12 \times 10^4$	154		1,65
18		51	61,8	101	7,64	134		1,47
19		61	57,6	115	6,26	100		1,10
20		71	55,3	136	5,09	77,5		$8,50 \times 10^4$

CONTINUAÇÃO DA TABELA III

$h = 30 \text{ mm}$									
21	15	31	7,98	14,4	$6,94 \times 10^4$	16,0	1,76	$1,14 \times 10^5$	
22		41	7,56	17,2	5,55	10,8		$7,70 \times 10^4$	
23		51	7,67	23,8	4,04	7,75		5,50	
24		61	7,58	30,1	3,15	5,46		3,90	
25		71	7,21	37,5	2,40	4,69		3,30	
26	20	31	20,3	24,5	$1,03 \times 10^5$	44,5	3,14	$1,77 \times 10^5$	
27		41	17,9	29,0	$7,70 \times 10^4$	32,0		1,27	
28		51	16,5	35,6	5,80	23,0		$9,10 \times 10^4$	
29		61	15,7	41,2	4,75	17,1		6,80	
30		71	15,6	49,2	3,96	15,3		6,10	
31	25	31	35,9	36,4	$1,23 \times 10^5$	96,2	4,9	$2,45 \times 10^5$	
32		41	34,1	44,5	$9,60 \times 10^4$	73,7		1,87	
33		51	31,6	51,5	7,70	53,7		1,37	
34		61	30,3	64,6	5,90	43,4		1,11	
35		71	29,6	78,0	4,75	32,9		$8,40 \times 10^4$	
36	38	31	112	89,2	$1,57 \times 10^5$	316	11,4	$3,46 \times 10^5$	
37		41	103	100	1,29	238		2,60	
38		51	98,5	120	1,03	188		2,06	
39		61	91,2	140	$8,10 \times 10^4$	153		1,68	
40		71	86,6	160	6,80	114		1,26	

CONTINUAÇÃO DA TABELA III

h = 15 mm									
41	15	31	22,1	26,2	1,06x10 ⁵	28,2	1,76	2,00x10 ⁵	
42		41	20,4	29,8	8,50x10 ⁴	20,2		1,43	
43		51	17,5	34,0	6,40	13,3		9,45x10 ⁴	
44		61	16,9	38,8	5,45	10,0		7,10	
45		71	16,0	45,0	4,45	7,35		5,20	
46	20	31	43,5	34,6	1,57x10 ⁵	70,0	3,14	2,80x10 ⁵	
47		41	38,3	38,2	1,25	50,1		2,00	
48		51	35,0	42,8	1,02	35,7		1,42	
49		61	33,3	46,8	8,90x10 ⁴	27,0		1,08	
50		71	32,5	50,8	8,00	20,5		8,20x10 ⁴	
51	25	31	72,5	44,5	2,04x10 ⁵	144	4,9	3,70x10 ⁵	
52		41	67,1	57,2	1,47	102		2,60	
53		51	64,0	68,0	1,18	73,6		1,90	
54		61	60,1	82,8	9,10x10 ⁴	56,5		1,45	
55		71	56,9	100	7,10	42,7		1,09	
56	38	31	217	107	2,54x10 ⁵	421	11,4	4,60x10 ⁵	
57		41	197	131	1,88	326		3,60	
58		51	181	155	1,46	246		2,70	
59		61	175	186	1,18	189		2,10	
60		71	162	208	9,70x10 ⁴	156		1,70	

$h = 0 \text{ mm}$									
61	38	31	426	122	4,37	660	11,4	7,25	
62		41	432	157	3,45	497		5,50	
63		51	397	194	2,55	373		4,10	
64		61	378	234	2,02	276		3,00	
65		71	371	279	1,66	216		2,40	

TABELA IV

INCERTEZA RELATIVA NA ÁREA DE DETECÇÃO
PARA A GEOMETRIA Nº 28

N_{Δ}	$ N_{\Delta} - \bar{N}_{\Delta} $	N_c	$ N_c - \bar{N}_c $	$S_{1/2}$	$ S_{1/2} - \bar{S}_{1/2} $
461	7	399	13	38,2	0,3
465	7	379	10	38,3	0,4
458	0	379	7	37,8	0,1
453	5	384	2	38,0	0,1
457	1	383	3	38,0	0,1
453	5	392	6	38,0	0,1
458	0	393	7	38,0	0,1
461	3	377	9	37,8	0,1
458	0	388	2	37,6	0,3
459	1	386	0	37,6	0,3
$\bar{N}_{\Delta} = 458$	$\sigma_{N_{\Delta}} = 3,6$	$\bar{N}_c = 386$	$\sigma_{N_c} = 7,5$	$\bar{S}_{1/2} = 37,9$	$\sigma_{S_{1/2}} = 0,2$

$$\bar{\Delta} = \bar{N}_{\Delta} - \bar{N}_c = 72$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_{N_{\Delta}}^2 + \sigma_{N_c}^2} = 8$$

$$\frac{\sigma_{S_{1/2}}}{S_{1/2}} = 0,5\%$$

Cópias adicionais podem ser solicitadas ao:

Requests for additional copies should be addressed to:

Demandes pour les rapports à:

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS
DIVISÃO DE COORDENAÇÃO CIENTÍFICA
Serviço de Publicações
Caixa Postal, 1941
Belo Horizonte-MG
BRASIL

CURSO DE CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS
U.F.M.G. - C.N.E.N.

MÉTODO DIFERENCIAL DE DETECÇÃO DE SEDIMENTOS
RADIOATIVOS EM MODELOS REDUZIDOS.

POR

ANGELO ALBERTO MAESTRINI

ORIENTADOR: OMAR CAMPOS FERREIRA

TESE APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES.

Belo Horizonte
Novembro de 1971.