

ESTUDO DE NOVOS LOCAIS DE DESPEJO DE  
DRAGAGEM NO PORTO DE RECIFE: MOVIMENT  
TAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO.

Divisão de Radioisótopos  
Novembro/1978

ESTUDO DE NOVOS LOCAIS DE DESPEJO DE DRAGAGEM NO PORTO  
DE RECIFE: MOVIMENTAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO.

AUTORES

Pedro Edmundo Aun  
Jefferson Vianna Bandeira  
Rubens Martins Moreira  
José Olympio N. M. de Castro

EQUIPE DE CAMPO

Pedro Edmundo Aun  
Jefferson Vianna Bandeira  
Rubens Martins Moreira  
José Olympio N. M. de Castro  
Rodrigo Otávio Penna Dolabela  
Virgilio Lopardi Bomtempo  
Luiz Fontoura Lorenzoni  
Ricardo da Silva Gomes  
Antonio Fioravante Neto  
Geraldo Godinho Pinto  
Duarte Augusto Costa  
Edgard Andrade Chagas  
José Joaquim Lima de Campos

EQUIPE DE ANÁLISE

Pedro Edmundo Aun  
Rubens Martins Moreira  
Jefferson Vianna Bandeira  
Amenônia Maria Ferreira Pinto  
José Joaquim Lima de Campos  
Vera Lúcia Mendes Dias da Costa  
Altair Drumond de Souza  
Luiz Raphael Aun  
Paulo Eduardo De Mingo

CONSULTORES: Aplicação de Traçadores - Alain Caillot (CEA, AIEA)  
Problemas Hidráulicos - Victor Freire Motta

Novembro de 1978

## ÍNDICE

	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS	
I. INTRODUÇÃO	1.
II. O EMPREGO DE TRAÇADORES	5.
III. RESUMO DA TEORIA DA INTERPRETAÇÃO DE ESTUDOS DE TRANSPORTE EM SUSPENSÃO	9.
III.1. Introdução.	9.
III.2. Estabelecimento de um modelo matemático.	10.
III.3. Determinação dos parâmetros do modelo.	17.
IV. ESTUDOS EM LABORATÓRIO DO MATERIAL	28.
IV.1. Estudo das condições de decantação dos sedimentos.	28.
IV.2. Estudo das propriedades mecânicas das suspensões.	33.
IV.3. Resultados das análises em laboratório.	36.
V. ESTUDO DA MARCAÇÃO	52.
V.1. A marcação.	54.
V.2. Rendimento de fixação.	56.
V.3. Influência das condições de marcação sobre a velocidade de queda das partículas.	58.

PÁGINA

V.4.	Repartição do traçador em função da dimensão das partículas.	62.
V.5.	Conclusões sobre os processos de marcação.	66.
VI.	REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS DE CAMPO	69.
VI.1.	Finalidade dos trabalhos de campo.	69.
VI.2.	Condições de operação.	70.
VII.	RESULTADOS DAS MEDIDAS DE CAMPO	75.
VII.1.	As medições em regime de verão.	75.
VII.2.	As medições em regime de inverno.	115.
VIII.	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	137.
VIII.1.	O campo próximo.	137.
VIII.2.	O campo afastado.	142.
VIII.3.	Modelo para rejeito contínuo.	145.
VIII.4.	Conclusões	147.

ANEXO 1

REFERENCIAS

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Carta da região de trabalho
- Figura 2 - Velocidade de queda de partículas elementares, em meio não flocculante. Concentração das partículas: 10g/l.
- Figura 3 - Velocidade de queda de vasa flocculada em água do mar. Salinidade 30g/l; concentração em partículas: 10g/l.
- Figura 4 - Influência da dimensão das partículas sobre a flocculação.
- Figura 5 - Variação da rigidez inicial da vasa em função da concentração.
- Figura 6 - Curva granulométrica da fase arenosa.
- Figura 7 - Velocidade de queda de partículas elementares em meio flocculante e não flocculante: determinação do fator de flocculação.
- Figura 8 - Influência da concentração sobre a velocidade de queda das partículas em água destilada.
- Figura 9 - Influência da concentração sobre a velocidade de queda das partículas em água destilada e em água do mar: comparação com sedimentos típicos.
- Figura 10 - Influência da concentração sobre a velocidade de queda das partículas em meio salino (30% de NaCl).
- Figura 11 - Influência da salinidade sobre a velocidade de queda das partículas. Concentração de sedimentos: 5g/l.

- Figura 12 - Influência da salinidade sobre a velocidade de queda das partículas, a uma concentração de sedimentos de 5g/l: comparação com sedimentos típicos.
- Figura 13 - Variação de  $U_*$  em função da concentração em vasa.
- Figura 14 - Marcação da vasa em diferentes condições de marcação e de sedimentação: vasas marcadas com 500mg ouro por kg de vasa, 100g/l de vasa.
- Figura 15 - Porcentagem de atividade fixada contra porcentagem de massa, para diferentes condições de marcação.
- Figura 16 - Porcentagem de atividade fixada contra porcentagem de massa, para diferentes condições de marcação.
- Figura 17 - Porcentagem de atividade fixada contra porcentagem de massa, para diferentes condições de marcação.
- Figura 18 - Campanha de verão: pontos de injeção.
- Figura 19 - Curvas de isoconcentração, a 2m de profundidade, para 02/04/77.
- Figura 20 - Curvas de isoconcentração, a 8m de profundidade, para 05/04/77.
- Figura 21 - Curvas de isoconcentração, a 2m de profundidade, para 05/04/77.
- Figura 22 - Curvas de isoconcentração, a 2m de profundidade, para 13/11/76.
- Figura 23 - Curvas de isoconcentração, a 8m de profundidade, para 13/11/76.

- Figura 24 - Curvas de isoconcentração, a 8m de profundidade, para 16/11/76.
- Figura 25 - Curvas de isoconcentração, a 2m de profundidade, para 16/11/76.
- Figura 26 - Curvas de isoconcentração, a 8m de profundidade, para 18/11/76.
- Figura 27 - Distância dos picos ao ponto de injeção, 8m, 18/11/76.
- Figura 28 - Curvas de isoconcentração, a 2m de profundidade, para 18/11/76.
- Figura 29 - Taxas de contagem máxima em função do tempo. 05/04/77 - Superfície.
- Figura 30 - Taxas de contagem máxima em função do tempo. 13/11/76 - Superfície.
- Figura 31 - Taxas de contagem máxima em função do tempo. 13/11/76 - Fundo.
- Figura 32 - Taxas de contagem máxima em função do tempo. 16/11/76 - Superfície.
- Figura 33 - Taxas de contagem máxima em função do tempo. 16/11/76 - Fundo.
- Figura 34 - Taxas de contagem máxima em função do tempo. 18/11/76 - Superfície.
- Figura 35 - Taxas de contagem máxima em função do tempo. 18/11/76 - Fundo.
- Figura 36 - Relação teórica entre  $m$  e  $\phi$ .
- Figura 37 - Movimentação do sedimento em regime de inverno.
- Figura 38 - Distância percorrida pelo traçador em função do tempo, 06/06/78.

- Figura 39 - Distância percorrida pelo traçador em função do tempo, 08/06/78.
- Figura 40 - Distância percorrida pelo traçador em função do tempo, 10/06/78.
- Figura 41 - Distância percorrida pelo traçador em função do tempo, 10/06/78.
- Figura 42 - Variação da velocidade de flutuadores em função da hora e da amplitude da maré, entre a costa e o quebramar do Banco Inglês.
- Figura 43 - Taxas de contagem máximas em função do tempo, para as sondas a 4m e 6m, em 06/06/78.
- Figura 44 - Taxas de contagem máximas em função do tempo, para as sondas a 2m, 4m e 6m, em 08/06/78.
- Figura 45 - Taxas de contagem máximas em função do tempo, para as sondas a 2m, 4m, 6m e 8m, em 10/06/78.
- Figura 46 - Modelo para rejeito contínuo, 06/06/78.
- Figura 47 - Modelo para rejeito contínuo, 08/06/78.



ESTUDO DE NOVOS LOCAIS DE DESPEJO DE DRAGAGEM NO PORTO  
DE RECIFE: MOVIMENTAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO.

I. INTRODUÇÃO

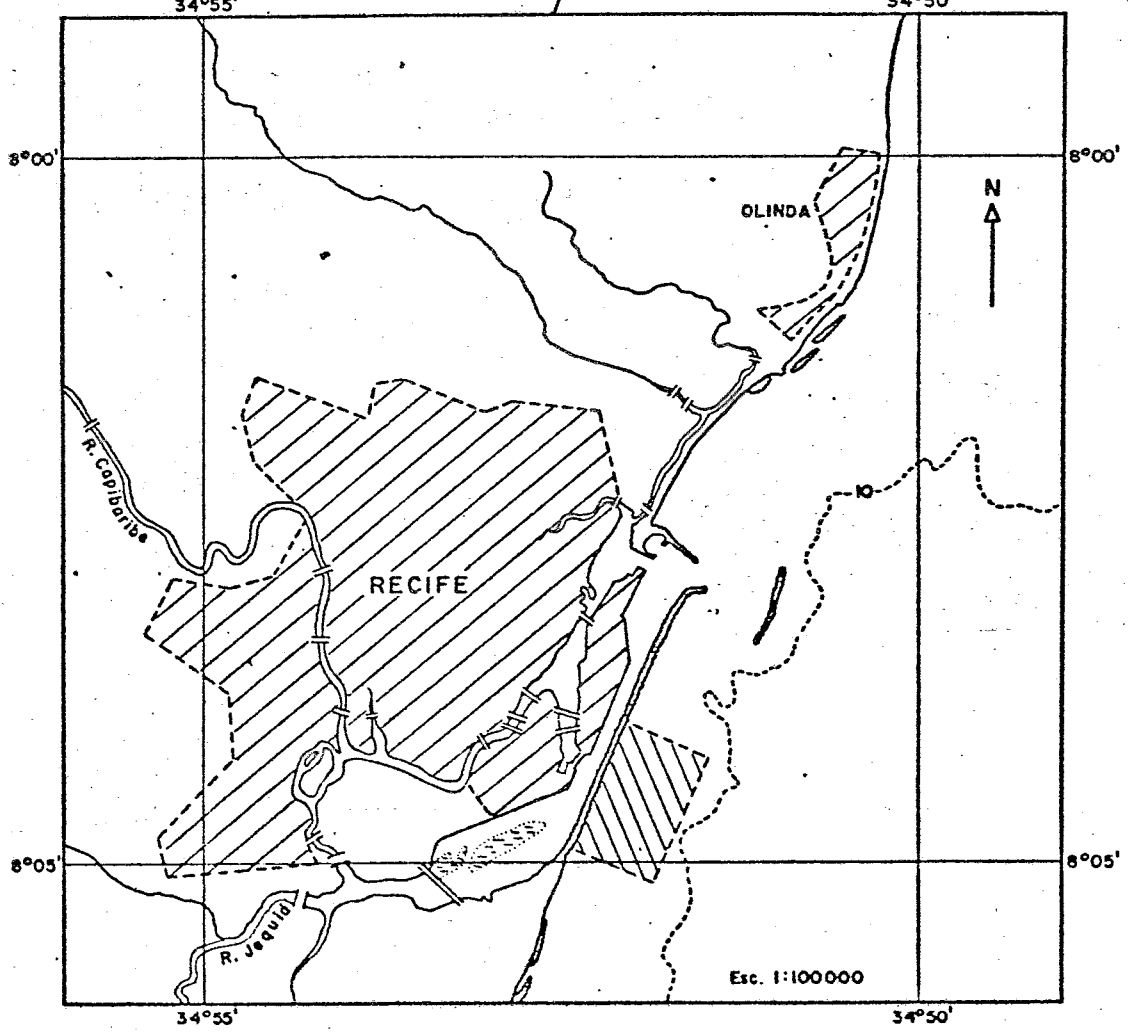
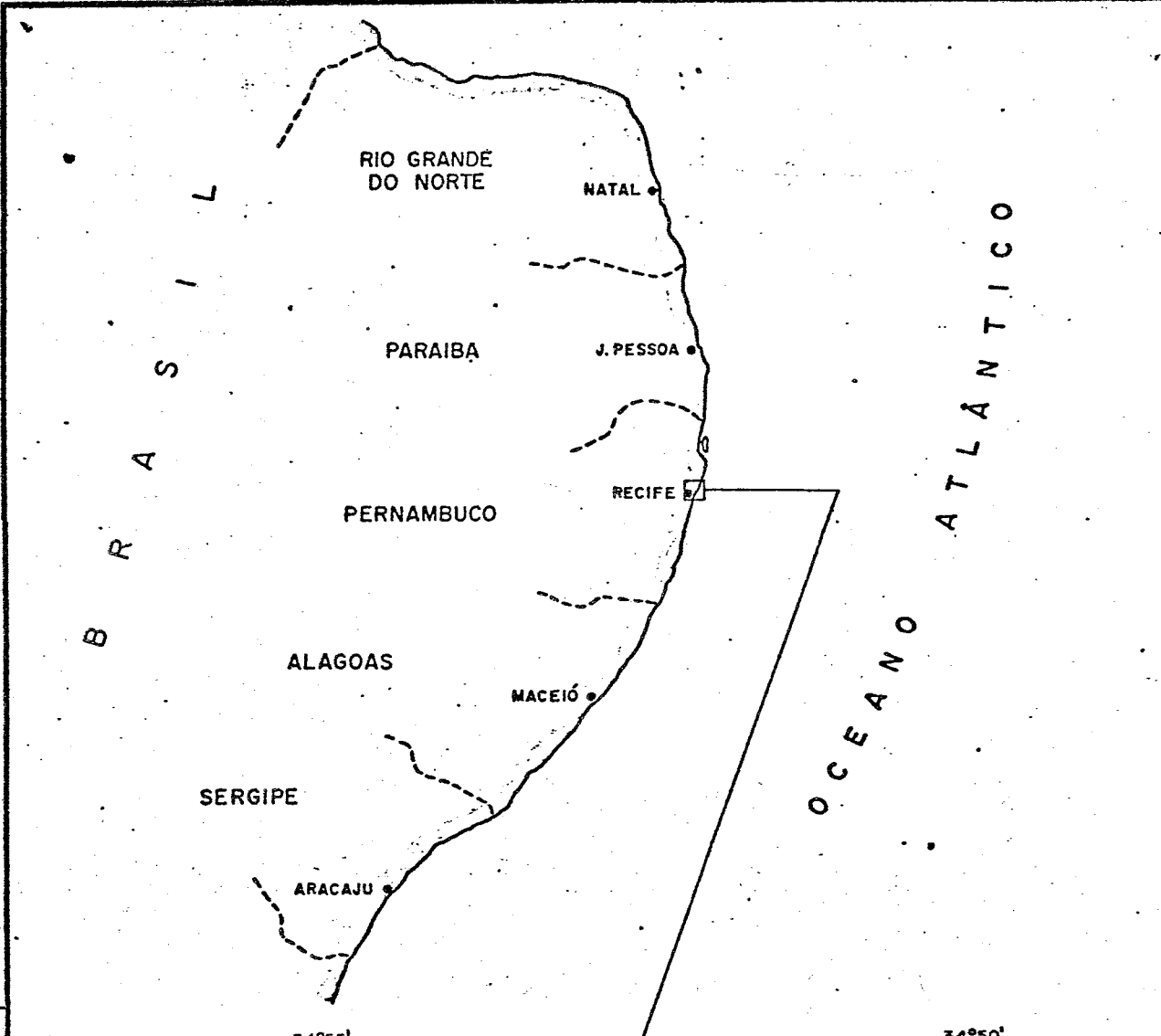
O trabalho apresentado neste relatório refere-se à execução dos itens - e - da Cláusula Segunda do Contrato estabelecido entre a Empresas de Portos do Brasil S.A. - PORTOBRÁS - e as Empresas Nucleares Brasileiras S.A. - NUCLEBRÁS - para a realização de estudos no Porto de Recife. São órgãos executores deste Contrato o Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH), de parte da PORTOBRÁS e o Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR), atualmente Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), por parte da NUCLEBRÁS. Como o trabalho trata da utilização de traçadores radioativos, o CDTN designou, para sua execução, a Divisão de Radioisótopos (DRAAT).

O Porto do Recife sofre um processo permanente de dragagem. O material retirado da região portuária, constituído basicamente de silte e argila, é transportado por batelões até a região de despejo. Este transporte constitui uma parcela não desprezível dos custos da dragagem. Para diminuí-lo ou eliminá-lo, foi sugerida a alternativa de estabelecer-se um "mud trap" na região em que o Rio Capibaribe entra na área portuária. A vasa acumulada neste depósito seria descarregada diretamente no mar,

por sobre a barreira de recifes que protege o Porto, através de um sistema de bombeamento. Uma possível vantagem adicional desta solução seria a diminuição do assoreamento da região portuária, pois parte do material transportado pelo Rio Capibaribe ficaria retido no "mud trap", deixando de atingir o Porto. Em reuniões havidas entre as partes interessadas no problema, ficou estabelecido o interesse de estudar-se as consequências desta solução, tentando-se determinar se o material, após sua descarga no mar, poderia ou não retornar ao Porto ou à região protegida pelo quebramar do Banco Inglês, Fig. 1. Se fosse demonstrada a possibilidade do retorno às regiões citadas, seria necessário tentar-se quantificar sua importância, através de uma combinação de estudos com traçadores com análises da distribuição estatística de direções e velocidades de correntes na região. Na parte de estudos com traçadores, duas fases deveriam ser realizadas:

- a) o estudo do comportamento do material após sua descarga no mar, ou seja, a movimentação do sedimento em suspensão.
- b) o estudo do comportamento do material que, após sua descarga, depositou-se no fundo.

Os estudos em suspensão, item a, devem ser realizados em diversas condições hidráulicas, principalmente naquelas em que haja maior probabilidade de retorno do sedimento a regiões indesejáveis. A resultante das correntes na região é de fundamental importância neste estudo,



CARTA DA REGIÃO EM ESTUDO

FIG 1

pois será ela que causará o transporte preferencial em uma dada direção. Essas duas considerações implicam na realização de um número considerável de experimentos com traçadores e no conhecimento detalhado do regime de correntes na região. Os estudos com traçadores sobre o comportamento do sedimento em suspensão são o objeto deste relatório. Eles foram realizados em Novembro de 1976 e em Maio de 1977. As medidas da movimentação de sedimento no fundo, divididas em dois períodos, verão e inverno, já foram executadas e analisadas. O estudo em regime de inverno, realizado em julho de 1976, foi objeto do relatório "Estudo de novos locais para despejo de dragagem no Porto de Recife: Movimentação de sedimento de fundo em regime de inverno", do Instituto de Pesquisas Radioativas [1]. O estudo em regime de verão foi realizado entre março e maio de 1977, sendo objeto do relatório "Estudo de novos locais de despejo de dragagem no Porto de Recife: Movimentação de sedimento de fundo em regime de verão".[2]. Neles se concluiu que o material que se depositar no fundo tem pequena tendência a permanecer no local de deposição, sendo retirado dela pelas ações hidráulicas reinantes na região, principalmente aquelas mais energéticas que caracterizam o regime de inverno.

## II. O EMPREGO DE TRAÇADORES

Um traçador é uma substância utilizada para marcar uma fração de uma população. O traçador deve também apresentar alguma propriedade que permita segui-lo durante os processos aos quais a população estiver sujeita. Medindo-se, então, a distribuição do traçador ao longo do processo, pode-se deduzir o comportamento da população que ele representa e medir parâmetros tais como concentrações, dispersões e velocidades de movimentação, em pontos de interesse. Como estas medidas são realizadas sobre o traçador, é necessário que ele seja representativo da população, isto é, que os fenômenos que com ele ocorrem sejam idênticos aos que ocorrem com a entidade por ele representada.

No caso que está sendo estudado, a população a ser marcada é constituída principalmente de sedimentos finos, com importante presença de silte e argila. O processo adotado para a marcação foi a adsorção, ao sedimento, de ouro radioativo, que é bastante simples e que já foi exaustivamente estudado. [3] Foi demonstrado que o simples contato de uma vasa com uma solução de  $\text{HAuCl}_4$  produz uma marcação estável, de alto rendimento (~98%) e que não altera as propriedades do material marcado. O ouro 198 é um emissor gama, com radiação principal de 411 keV e cuja meia vida (tempo para que uma dada quantidade de radioisótopo se reduza à metade do seu valor inicial) é de 2,7 dias. Devido à facilidade da marcação e ao valor adequado da meia vida para o tipo de estudo a ser executado, to

das as medidas de movimentação de sedimento em suspensão foram realizadas com ouro radioativo.

Outra característica do método de traçadores que deve ser citada é que ele é por natureza um método integrador. Em um dado instante, a configuração apresentada pelo traçador representa a resultante de todas as ações por ele sofridas desde o início do trabalho até o instante considerado.

No caso do estudo da movimentação de sedimentos, a distribuição do traçador é causada pela ação conjunta de todos os agentes hidráulicos que atuaram sobre ele, não sendo possível separar a priori o efeito produzido por uma dada causa. Para a compreensão do fenômeno, é, portanto, necessário conhecer e quantificar todos os possíveis agentes de movimentação, tais como ventos, correntes, ondas e marés, os quais devem ser medidos durante todo o período experimental. Quando o traçador é utilizado no estudo de fenômenos de transporte, como no caso presente, os objetivos gerais que se buscam são:

- a) descrever o transporte que ocorreu, determinando áreas atingidas pelo traçador e direções de movimentação;
- b) quantificar parâmetros relativos ao transporte, tais como velocidades de movimentação, parâmetros de dispersão e taxas de decantação.

- c) verificar hipóteses baseadas em informações hidráulicas prévias ou explicar os fenômenos ocorridos, em função dos dados hidráulicos coletados.

Estes objetivos mostram que os traçadores são especialmente úteis quando foi previamente estabelecido um modelo da região a estudar, para o qual se queiram determinar alguns parâmetros, em condições também anteriormente definidas. Nesse caso, o planejamento das épocas em que os experimentos devam ser realizados poderá ser feito com precisão, medindo-se os parâmetros que permitam a verificação da validade do modelo. O próprio modelo servirá então para fornecer resultados sobre outras condições, diferentes das que foram verificadas experimentalmente.

A parte do trabalho tratada neste relatório refere-se ao estudo da movimentação de sedimentos em suspensão, o qual deve ser concentrado nas condições hidráulicas que pareçam favorecer o movimento em direção ao porto, isto é, para o norte. Estas condições são, a priori, maré enchente, vento e ondas do quadrante sul. Existe um modelo para tal tipo de estudos, no qual se combina um modelo de dispersão do tipo gaussiano com um modelo de decantação [4, 5, 6]. Caso os seus parâmetros possam ser determinados, o modelo poderá ser aplicado à região entre o provável ponto de despejo e o quebra-mar do Banco Inglês, determinando-se as concentrações de vasa esperadas nos vários pontos da região, a partir de uma descarga

realizada por sobre o recife.

Outros estudos devem ser realizados na área entre o quebra-mar do Banco Inglês e o recife, pois se trata de um local hidraulicamente diferente da região anteriormente considerada.

A análise dos dados hidráulicos referentes à região deverá definir a importância da movimentação em direção ao porto, tanto no caso de suspensão, como de fundo. Esta análise definirá as porcentagens de ocorrência das condições hidráulicas que tendem a fazer com que o material se dirija para o porto e permitirá que se estabeleçam as condições para que o despejo de material dragado por sobre o recife seja executável.

A exposição acima refere-se a um caso ideal, que, infelizmente, nunca ocorre na prática, pois é impossível, seja por razões físicas ou econômicas, recolherem-se todas as informações necessárias. A interpretação dos resultados do trabalho dependerá sempre da experiência e do bom senso da equipe que o realizou.



### III. RESUMO DA TEORIA DA INTERPRETAÇÃO DE ESTUDOS DE TRANSPORTE EM SUSPENSÃO

#### III.1. Introdução

Em muitos portos de todo o mundo, enormes quantidades de material estão sendo dragadas permanentemente, com a finalidade de manter regiões portuárias ou canais de acesso nas profundidades desejadas. Este é também o caso do Porto do Recife. O custo destas operações de dragagem é fortemente influenciado pela distância entre o local no qual se realiza a operação e a região de deposição. É de todo o interesse reduzir a um mínimo não só a operação de dragagem, como também a distância a ser percorrida pelos barcos que transportam o material. Estes são os motivos pelos quais foi sugerido o estabelecimento de armadilhas para a vasa no Porto de Recife. A retirada da vasa deste "mud trap" poderia ser feita por bombeamento, por sobre o quebramar que protege a região portuária. Este bombeamento corresponde ao lançamento de material de fundo em uma região que, até agora, não foi utilizada como recipiente de rejeitos de dragagem. Torna-se, pois, necessário um estudo sobre o comportamento do material após sua descarga por sobre o quebramar, de modo a determinar-se se ele poderá retornar, após seu lançamento, à região portuária ou à região protegida pelo quebramar do Banco Inglês. Uma previsão do efeito de uma descarga tal como esta deve ser feita a partir de estudo que envolva os seguintes parâmetros:

- . as propriedades sedimentológicas do material descarregado;
- . o panorama geral das correntes no local de despejo;
- . a decantação do material despejado;
- . as propriedades dispersivas do meio no qual se realizou a descarga.

A decantação e a dispersão da nuvem de sedimentos produzida pela descarga pode ser feita pela marcação das partículas de sedimento por meio de um traçador radioativo. As concentrações e a forma da nuvem radioativa produzida após a descarga do sedimento marcado são seguidas por meio de detectores de radiação. A taxa de contagem registrada por estes detectores é proporcional à concentração do traçador e, portanto, à concentração em sedimento. A análise dos dados obtidos é feita a partir de um modelo matemático, estabelecido a partir da hipótese de que o sedimento sofre, ao mesmo tempo, fenômenos de dispersão e de decantação.

### III.2. Estabelecimento de um modelo matemático

A equação geral que expressa fenômenos de dispersão turbulenta é

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

onde

$C$  é a concentração do sedimento no ponto de coordenadas  $x, y, z, t$

$U$  é a velocidade média de transporte (convecção), suposta atuando segundo o eixo  $0x$ ;

$D_x, D_y, D_z$  são os coeficientes de dispersão na direção dos eixos de coordenadas.

Como as profundidades da região de despejo são, em geral, pequenas em relação às outras dimensões da nuvem, despreza-se o termo  $D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$ .

Como as partículas de vasa sofrem também decantação durante o processo de dispersão, é necessário introduzir, na equação (1), um termo do tipo  $V \frac{\partial C}{\partial z}$ , onde  $V$  é a velocidade de decantação das partículas de vasa. A expressão geral transforma-se em

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} - V \frac{\partial C}{\partial z} = -D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2)$$

Seja  $P$  uma variável que represente a quantidade total de sedimentos presente no ponto  $(x, y)$ , no instante  $t$ , ao longo de toda a profundidade  $H$ . Seja a uma distância ao fundo tal que toda a partícula que estiver a uma distância do fundo inferior a a deposite-se e deixe de fazer parte da suspensão. Então

$$P = \int_a^H C \, dz \quad (3)$$

Adotando-se para a concentração de sedimentos  $\bar{a}$  profundidade  $z$  a lei de Rouse, tem-se

$$\frac{C_z}{C_a} = \left( \frac{a}{H - a} \right)^m \cdot \left( \frac{H - z}{z} \right)^m \quad (4)$$

O parâmetro  $m$  é dado por

$$m = \frac{V}{kU_*} = \frac{V}{k\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}$$

onde

$U_*$  é a velocidade crítica de cisalhamento

$k$  é a constante de Von Karman

$\tau_0$  é a tensão tangencial crítica de cisalhamento

$\rho$  é a densidade do material.

Utilizando as expressões (3) e (4), é possível escrever-se a expressão (2) sob a forma:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x} + V C_a = - D_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (5)$$

Integrando-se (4) de  $\underline{a}$  até  $H$ , tem-se

$$\int_a^H C(z) dz = C_a \int_a^H \left( \frac{a}{H-a} \right)^m \left( \frac{H-z}{z} \right)^m dz$$

Fazendo-se

$$\int_a^H \left( \frac{a}{H-a} \right)^m \left( \frac{H-z}{z} \right)^m dz = H\phi \quad (6)$$

vem

$$P = \int_a^H C(z) dz = C_a H\phi \quad e$$

$$C_a = \frac{P}{H\phi}$$

Substituindo  $C_a$ , na equação (5), por este va  
lor, obtém-se

$$\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{VP}{H\phi} = -D_x \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - D_Y \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (7)$$

Esta equação diferencial em derivadas parciais

pode ser resolvida supondo-se que a dispersão e a deca<sub>ta</sub>ção do material são fenômenos independentes, isto é, fa<sub>z</sub>endo-se

$$P = Q(t)\Psi(x, y, t) \quad (8),$$

onde Q é a solução da equação

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{VQ}{H\phi} = 0 \quad (9)$$

Obtém-se, então, para o fenômeno da dispersão, a equação:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + U \frac{\partial \Psi}{\partial x} = - D_x \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} \quad (10)$$

cuja solução é

$$\Psi = \frac{\Psi_0}{4\pi\sqrt{D_x D_y} (t-t_0)} \exp - \left\{ \frac{[x - U(t-t_0)]^2}{4D_x(t-t_0)} + \frac{y^2}{4D_y(t-t_0)} \right\} \quad (11)$$

A equação (9) fornece o valor de  $Q$ :

$$Q = Q_0 e^{-\frac{V}{H\phi}(t-t_0)} \quad (12)$$

Como  $P = Q\Psi$ , a solução geral da equação (7) será:

$$P = \frac{P_0}{4\pi\sqrt{D_x D_y} (t-t_0)} \exp - \left\{ \frac{V}{H\phi} (t-t_0) + \frac{[x - U(t-t_0)]^2}{4D_x (t-t_0)} + \frac{y^2}{4D_y (t-t_0)} \right\} \quad (13)$$

que é a expressão que representa a massa de material presente em uma coluna de altura  $H$ , situada no ponto  $(x, y)$ , no instante  $t$ .

A taxa de contagem obtida em um determinado ponto é proporcional à concentração de sedimento naquele ponto. Entretanto, para utilizar-se a equação (13), seria necessário conhecer-se a integral da taxa de contagem em toda a profundidade.

Durante uma detecção obtém-se, entretanto, a taxa de contagem a uma determinada profundidade  $d$ , na qual está fixada a sonda de detecção. Sendo  $R_z$  a taxa de contagem obtida à profundidade  $z$  e sendo  $N$  a integral das

taxas de contagem ao longo da profundidade, tem-se

$$N = \int_a^H R_z dz \quad (14)$$

Pode-se demonstrar que

$$N = R_d \left( \frac{d}{H-d} \right)^m \left( \frac{H-a}{a} \right)^m H\phi \quad (15)$$

Fazendo-se

$$\left( \frac{d}{H-d} \right)^m \left( \frac{H-a}{a} \right)^m = K_d, \text{ tem-se}$$

$$N = R_d K_d H\phi \quad (16)$$

Este valor, substituído na expressão (13) escrita em função de  $N$ , permite obter-se, para uma atividade injetada  $A_0$  e para uma resposta  $E$  da sonda de detecção a uma atividade unitária, a seguinte expressão:

$$R_d = \frac{E A_0}{4\pi K_d H\phi \sqrt{D_x D_y} (t-t_0)} \exp - \left\{ \frac{V}{H\phi} (t-t_0) + \frac{[x-U(t-t_0)]^2}{4D_x (t-t_0)} + \frac{y^2}{4D_y (t-t_0)} \right\} \quad (17)$$



Esta expressão do modelo, dada em função das taxas de contagem obtidas durante uma detecção, permite calcular os seguintes parâmetros:

$m$ ,  $\phi$ ,  $D_x$ ,  $D_y$  e  $V$ , sendo  $V$  a velocidade real de decantação observada na natureza. Estes parâmetros, introduzidos na equação (13), permitem explicitar o modelo.

### III.3. Determinação dos parâmetros do modelo

#### III.3.1. Cálculo das taxas de decantação.

Um parâmetro importante que pode ser obtido a partir dos dados experimentais é a taxa de decantação do material, isto é, quantas gramas por segundo se depositam, em média, para cada tonelada de material descarregado. Para calculá-la, parte-se da massa total de sedimento em suspensão, dada por

$$M(t) = \iint_{x,y} P \, dx \, dy \quad (18)$$

Substituindo  $P$  por seu valor dado em (13) e integrando, obtém-se

$$M(t) = P_0 \exp - \left[ \frac{V}{H\phi} (t-t_0) \right] \quad (19)$$

A taxa de deposição é definida por

$$SR = - \frac{\frac{dM(t)}{dt}}{M} \quad (20)$$

Combinando-se as expressões (19) e (20), vem

$$SR = \frac{V}{H\phi} \quad (21)$$

É necessário agora calcular esta expressão, a partir dos dados experimentais.

A expressão das taxas de contagem obtidas nas detecções é dada por (17). Durante cada detecção, observam-se máximos de contagem, que correspondem ao centroide da nuvem radioativa, isto é, a um ponto de coordenadas

$$x - U (t-t_0) = 0$$

$$y = 0$$

Para as taxas máximas de contagem, a expressão (17) fica, portanto,

$$R_{d_{\max}} = \frac{E A_0}{4\pi K_d H\phi \sqrt{D_x D_y} (t-t_0)} \exp - \left[ \frac{V}{H\phi} (t-t_0) \right]$$

Desenvolvendo em s\u00e9rie o termo exponencial e fazendo

$$R_0 = \frac{E A_0}{4\pi K_d H \phi \sqrt{D_x D_y}} \quad (22)$$

$$- R_1 = \frac{V}{H \phi} \cdot \frac{E A_0}{4\pi K_d H \phi \sqrt{D_x D_y}} = \frac{V}{H \phi} R_0 \quad (23)$$

vem

$$R_{d_{\max}} = \frac{R_0}{t - t_0} + R_1 \quad (24)$$

Comparando as express\u00f5es (21) e (22), obt\u00eam-se

$$SR = - \frac{R_1}{R_0} \quad (25)$$

Para calcular-se a taxa de sedimenta\u00e7\u00e3o, \u00e9 necess\u00e1rio determinar-se  $R_1$  e  $R_0$ , a partir dos dados experimentais. Durante as detec\u00e7\u00f5es, obt\u00eam-se v\u00e1rias taxas m\u00e1ximas de contagem  $R_i$ , correspondentes a diversos instantes  $t_i$ .  $R_1$  e  $R_0$  s\u00e3o calculados ajustando-se, pelo m\u00e9todo dos m\u00ednimos quadrados, as taxas de contagem experimentais m\u00e1ximas \u00e0 express\u00e3o (24). Calcula-se, pois, o m\u00ednimo de

$$S = \sum \left[ R_i - \frac{R_0}{t_i - t_0} + R_1 \right]^2$$

Obtidos os valores de  $R_1$  e  $R_0$ , pode-se determinar a taxa de decantação pela expressão (25).

Obtém-se, simultaneamente, os valores de  $\frac{V}{H\phi}$ .

A taxa de deposição é uma das informações fundamentais que pode ser obtida dos dados experimentais. Ela vai permitir a estimativa da quantidade de material que vai depositar-se no fundo da região em estudo, durante o deslocamento da nuvem de sedimento marcado.

Como a massa de sedimento em suspensão no instante  $t$  é dada por (19), a massa que se depositou  $m(t)$  é a diferença entre a massa inicial  $P_0$  e a massa que se encontra em suspensão

$$m(t) = P_0 \left\{ 1 - \exp - \left[ \frac{V}{H\phi} (t - t_0) \right] \right\} \quad (26)$$

### III.3.2. Determinação dos coeficientes de dispersão $D_x$ e $D_y$

Há várias técnicas experimentais que permitem a determinação de  $D_x$  e de  $D_y$ . Em uma delas, a nuvem radioativa é coberta por dois barcos que transportam detectores de radiação. Um dos barcos executa trajetórias per

pendiculares à direção de deslocamento da nuvem radioativa e o outro segue trajetórias perpendiculares à anterior. Em ambos os casos, os barcos procuram passar pelo centro da nuvem, isto é, pelo ponto no qual é máxima a taxa de contagem. Desprezando-se a decantação durante a execução de uma destas trajetórias e lembrando que, em uma trajetória longitudinal tem-se  $y = 0$  e que, em uma trajetória transversal,  $[x - U(t - t_0)] = 0$ , a expressão 7 fornece:

$$R_{d_{\text{long}}} = \frac{E A_0}{4\pi K_d H \phi (t - t_0) \sqrt{D_x D_y}} \exp - \left\{ \frac{[x - U(t - t_0)]^2}{4D_x (t - t_0)} \right\} \quad (27)$$

$$R_{d_{\text{trans}}} = \frac{E A_0}{4\pi K_d H \phi (t - t_0) \sqrt{D_x D_y}} \exp - \left[ \frac{y^2}{4D_y (t - t_0)} \right] \quad (28)$$

A determinação de  $D_x$  e  $D_y$  é feita pelo ajuste dos dados experimentais de cada trajetória às expressões (27) ou (28), pelo método dos mínimos quadrados. Neste ajuste, são utilizados 3 parâmetros:

$$B = \frac{E A_0}{4\pi K_d H \phi (t - t_0) \sqrt{D_x D_y}}, D_x \text{ (ou } D_y) \text{ e } t_0.$$

Portanto, cada trajetória de um dos barcos fornece uma estimativa para os valores de  $D_x$  ou de  $D_y$ , adotando-se como resultado final os valores médios das estimativas conseguidas.

Um outro método, utilizado quando não é possível a utilização de 2 barcos, consiste na cobertura completa da nuvem radioativa, durante a sua evolução. O barco inicia a cobertura contra a direção de propagação da nuvem e executa trajetórias paralelas em seu interior até sair da região que apresenta radioatividade. Terminado este levantamento, o barco dirige-se novamente para o início da nuvem e repete a operação. O método de determinação dos coeficientes de dispersão neste caso já foi detalhadamente descrito no relatório final sobre o estabelecimento de novos pontos de rejeito de dragagem em Santos: "Determinação de coeficientes de difusão na área de Santos, utilizando traçadores radioativos" [7].

Se utilizarmos um modelo bidimensional, tipo Fick, a concentração no ponto  $(x,y)$ , no instante  $t$ , tem a expressão

$$C(x,y,t) = \frac{M}{4\pi H \sqrt{D_x D_y} t} \exp - \left[ \frac{x^2}{4D_x t} + \frac{y^2}{4D_y t} \right] \quad (29)$$

Façamos

$$C_0 = \frac{M}{4\pi H \sqrt{D_x D_y} t}$$

Levando este valor na expressão anterior e tomando os logaritmos dos 2 membros, vem

$$\ln \frac{C}{C_0} = \frac{x^2}{4D_x t} + \frac{y^2}{4D_y t} \quad \text{ou}$$

$$\frac{x^2}{4D_x t \ln \frac{C}{C_0}} + \frac{y^2}{4D_y t \ln \frac{C}{C_0}} = 1$$

o que é a equação de uma elipse. Os semi-eixos da elipse são

$$a_1 = (4D_x t \ln \frac{C}{C_0})^{1/2}$$

e

$$a_2 = (4D_y t \ln \frac{C}{C_0})^{1/2}$$

Dividindo estas expressões membro a membro, obtém-se

$$\frac{a_1}{a_2} = \left( \frac{D_x}{D_y} \right)^{1/2} \quad (30)$$

A área desta elipse é dada por

$$A = \pi a_1 a_2 = 4\pi t \ln \frac{C}{C_0} \sqrt{D_x D_y}$$

ou

$$\ln C = - \frac{1}{4\pi t \sqrt{D_x D_y}} A + \ln C_0$$

O coeficiente angular da reta representada por esta expressão é

$$m_1 = \frac{1}{4\pi t \sqrt{D_x D_y}} \quad (31)$$

O valor de  $a_1$  é obtido por medida direta nas curvas da isocontagem. A área da elipse fornece o valor de  $a_2$

$$a_2 = \frac{A}{\pi a_1}$$

Das expressões (30) e (31), obtêm-se

$$D_x = - \frac{1}{4\pi m_1 t} \frac{a_1}{a_2} \quad (32)$$

$$D_y = - \frac{1}{4\pi m_1 t} \frac{a_2}{a_1} \quad (33)$$

Estas últimas expressões fornecem os valores desejados de  $D_x$  e  $D_y$ .



### III.3.3. Cálculo dos parâmetros $m$ e $\phi$ .

O parâmetro  $m$  foi definido por

$$m = \frac{V}{K U_*}$$

onde  $V$  é a velocidade de decantação do material

$K$  é a constante de Von Karman

$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  é a velocidade crítica de cisalhamento no fundo

Como  $\tau_0 = \rho g H I$ ,

onde  $H$  é a profundidade e

$I$  é a declividade

vem 
$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g H I}$$

Tem-se também:  $U = C_c \sqrt{H I}$ , onde  $C_c$  é o coeficiente de Chézy.

Logo 
$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g} \frac{U}{C_c} \quad e$$

$$m = \frac{V C_c}{K \sqrt{g} U}$$

Das expressões (21) e (25) temos

$$\frac{R_1}{R_0} = - \frac{V}{H\phi} \quad \therefore \quad V = - \frac{R_1}{R_0} H\phi$$

e

$$m = - \frac{C_c}{K\sqrt{g}} \cdot H\phi \cdot \frac{R_1}{R_0} \quad (34)$$

Todos os valores de (34) são conhecidos, exceto  $m$  e  $\phi$ . A expressão (34) mostra que a relação entre eles é linear. A relação teórica entre estes 2 parâmetros foi determinada por Lane e Kalinske [8]. A interseção da reta dada pela equação (34) com a curva teórica permite determinar os parâmetros  $m$  e  $\phi$ .

Conhecidos os seus valores, torna-se simples determinar a velocidade real de decantação do sedimento, pela expressão

$$V = - \frac{R_1}{R_0} H\phi$$

Em geral, a velocidade real de decantação do material é diferente da velocidade de decantação  $V_{lab}$ , determinada em laboratório, em água calma:

$$V = \alpha V_{lab}$$

$$\text{logo} \quad \alpha = \frac{R_1}{R_0} \frac{H\phi}{V_{lab}} \quad (35)$$

O coeficiente  $\alpha$  representa a relação entre as velocidades de decantação do material, determinadas na natureza e em laboratório. Desta maneira, foram determinados todos os parâmetros necessários para o emprego do modelo, além de se ter calculado a taxa de decantação do material.

#### IV. ESTUDOS EM LABORATÓRIO DO MATERIAL

O objetivo dos estudos sobre os materiais dragados no Porto de Recife é medir, em laboratório, alguns parâmetros sedimentológicos ligados ao comportamento hidrodinâmico dos materiais e às propriedades mecânicas das suspensões de vasa.

##### IV.1. Estudo das condições de decantação dos sedimentos

Os processos de decantação dos sedimentos devem ser determinados para que se possa estudar a evolução dos rejeitos de material dragado. Os sedimentos grosseiros, tais como as areias, decantam-se com uma velocidade que lhes é própria e que não é perturbada pela presença de partículas vizinhas, salvo se as concentrações são muito grandes. Para as partículas inferiores a  $40\mu\text{m}$ , os fenômenos de decantação são diferentes. Quando em suspensão em água do mar, estes sedimentos sofrem o efeito da floculação, formando agregados cujas velocidades de decantação são muito superiores às das partículas elementares. Este efeito é tanto mais importante quanto são menores as dimensões das partículas, quanto a concentração da suspensão cresce e quanto a salinidade do meio é importante. Por isto, a diferença de velocidade de queda de partículas com dimensões muito diferentes pode ser grandemente reduzida por uma combinação dos fatores citados. Uma série de análises permite medir as características que regem o comportamento hidrodinâmico das partículas, baseadas na utilização

lização da técnica da pipeta de Andreasen.

#### IV.1.1. Medida da velocidade de queda das partículas.

##### A. Partículas elementares.

Para medir a velocidade de queda das partículas elementares, é necessário eliminar, da fração inferior a 40µm separada do material dragado, a matéria orgânica e os calcários. A matéria orgânica é eliminada por um ataque com água oxigenada, enquanto que os calcários são eliminados por ataque com ácido clorídrico. Após o término dos ataques, determina-se a velocidade de queda das partículas em meio defloculado (contendo 0,6g/l de ortometafosfato de sódio) e em meio floculado (contendo 30g/l de cloreto de sódio), para uma concentração de sedimento de 5g/l. Os resultados são apresentados nas Figs. 2, 3 e 4, nas quais também aparecem os resultados dos estudos sobre diferentes vasas, realizados pelo Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF), referência 9.

A partir destes resultados, determina-se o fator de floculação  $F$ , definido por

$$F = \frac{\text{velocidade de queda mediana (50\%) em meio floculado}}{\text{velocidade de queda mediana (50\%) em meio defloculado}}$$

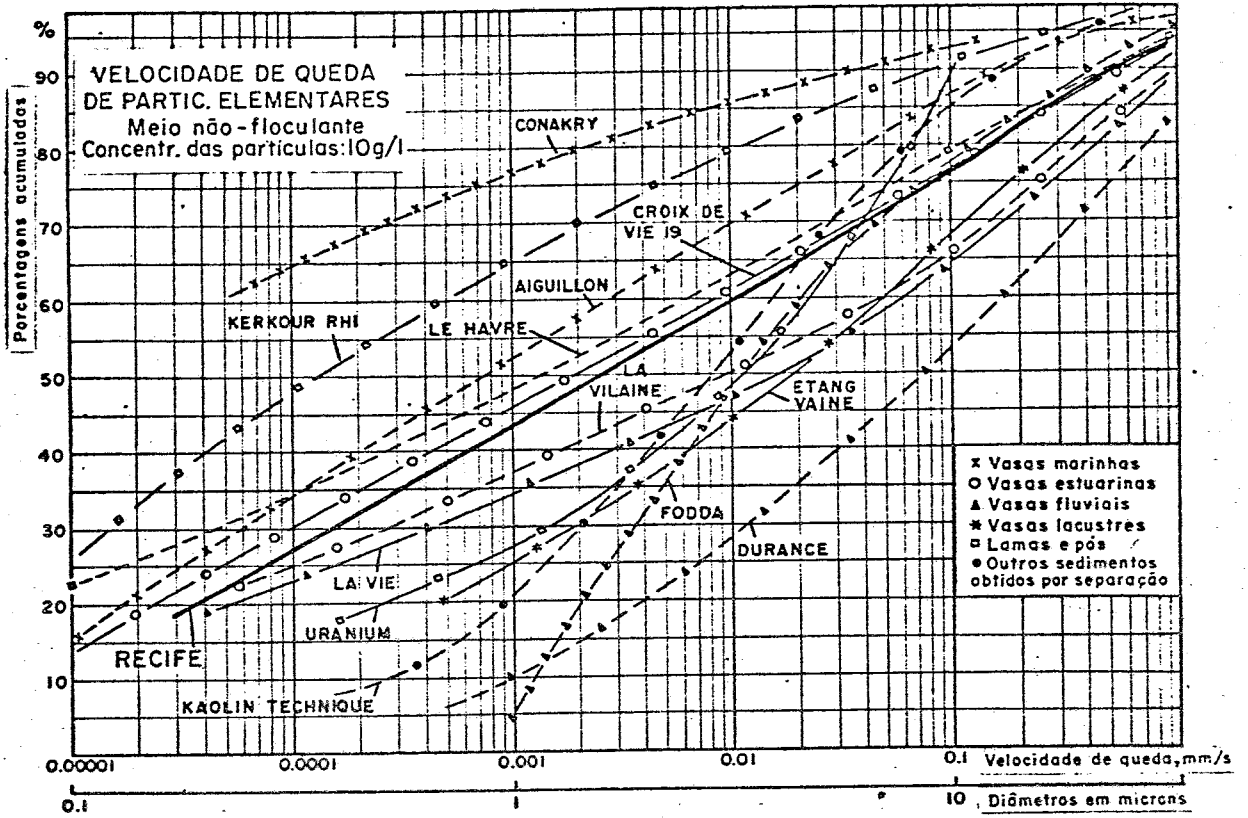


FIG. 2

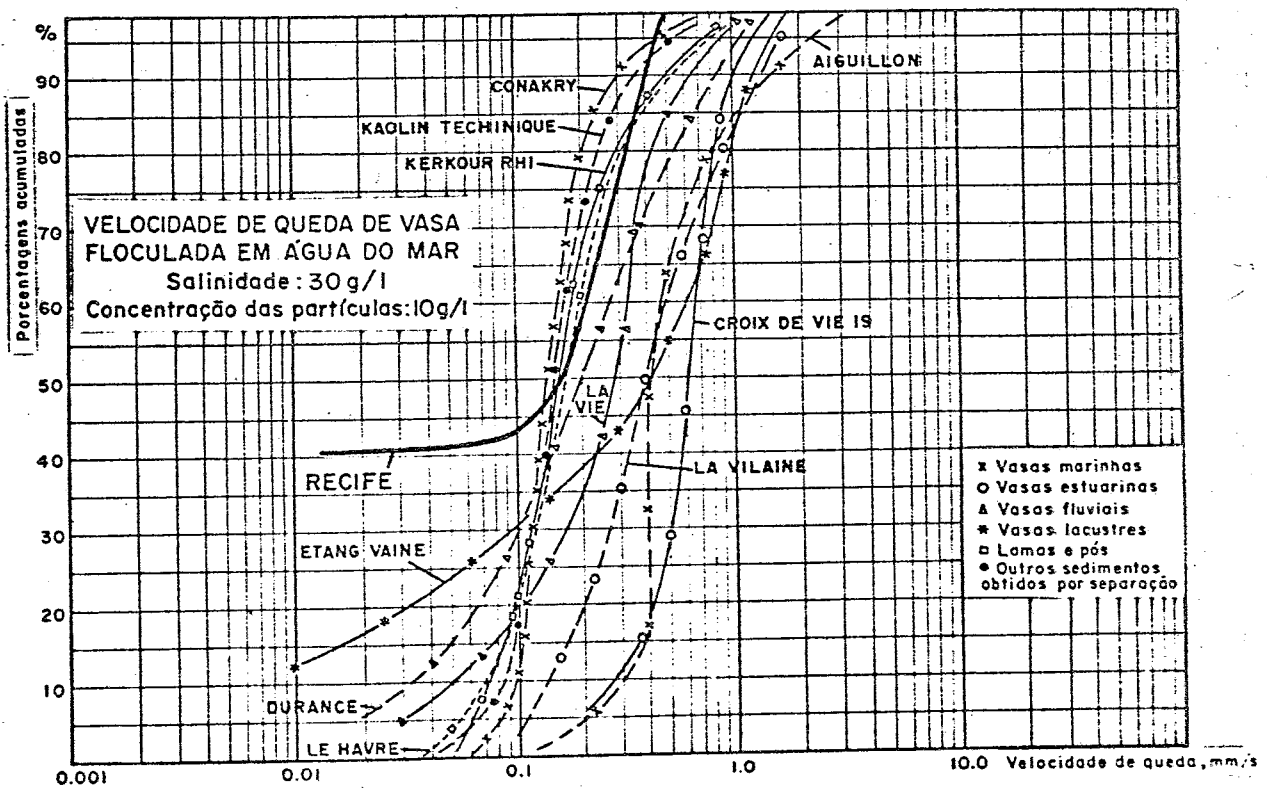
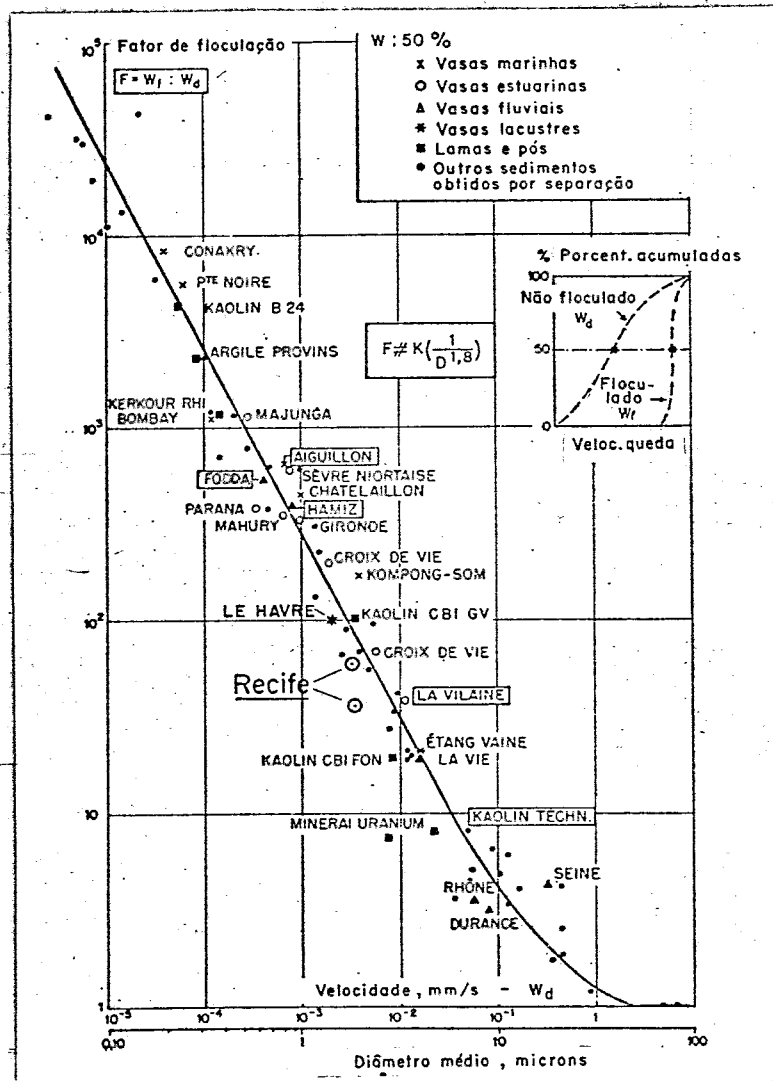


FIG. 3



**FIG. 4**  
**INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS SOBRE A FLOCULAÇÃO**

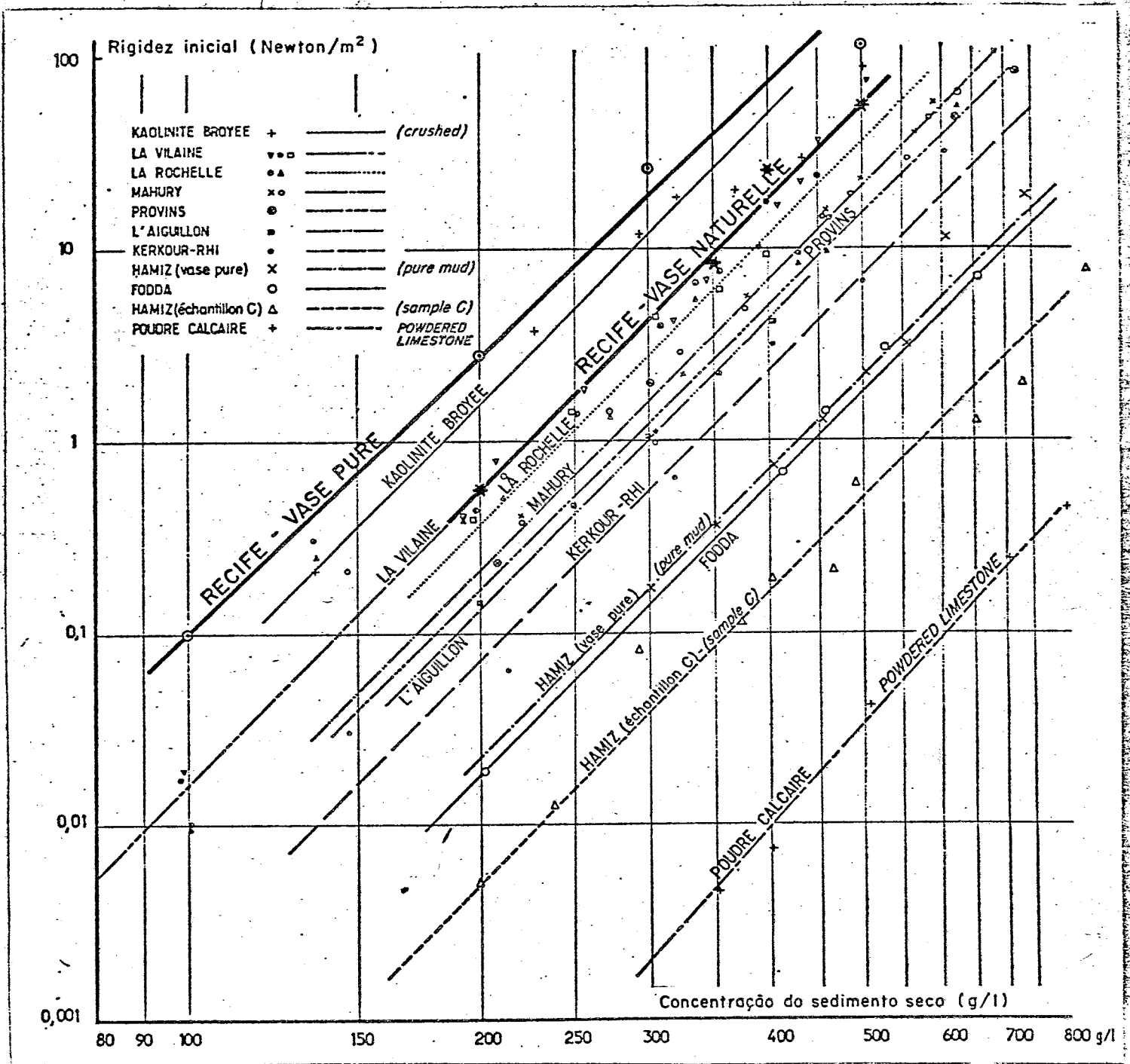


FIG. 5

VARIAÇÃO DA RIGIDEZ INICIAL DA VASA EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO



B. Influência da concentração em partículas sólidas sobre a velocidade de queda.

B.1. Em água destilada

Concentrações em sedimento de 2,5, 10 e 15g/l.

B.2. Em água salgada

Concentrações em sedimentos de 2,5, 10 e 15g/l.

C. Influência da salinidade.

Mantem-se constante a concentração em partículas sólidas (5g/l) e varia-se a salinidade: 0,5, 1, 2, 5, 10, 20 e 30% de NaCl. Estas velocidades de queda em água calma, em diferentes condições, serão comparadas às velocidades medidas in-situ, em meio turbulento e também comparadas às numerosas determinações feitas pelo LCHF para outros materiais.

IV.1.2. Medida da compactação dos sedimentos.

Decantados por gravidade sobre o fundo, os flocos formados pela vasa vão partir-se sob o seu próprio peso e perder uma parte de sua água. A rede formada pelos flocos vai se fechar e formar um material cujas características vão variar, pois sua concentração vai aumentar.

tar. Assim, quanto mais tempo se escoar, mais o material vai tender a permanecer no local em que se depositou, pois sua reentrada em suspensão será cada vez mais difícil de ser conseguida pela ação das correntes e das ondas.

Serão estudados:

A. A influência da altura inicial da suspensão, a uma concentração inicial constante e aproximadamente igual a  $200\text{g}/\ell$ , com alturas de 2, 1, 0,5 e 0,25m.

B. A influência da concentração inicial.

Neste caso, a altura é constante e igual a 1m. A concentração inicial é variável: 300, 200, 100 e  $50\text{g}/\ell$ .

Em ambos os casos mede-se a altura  $H$  do depósito produzido pela decantação da vasa, em função do tempo, até que se determine um valor assintótico. Quando este é determinado, mede-se a concentração sedimentar em diferentes pontos do depósito.

#### IV.2. Estudo das propriedades mecânicas das suspensões

As medidas de floculação e de velocidade de queda ou de decantação fornecem informações sobre o comportamento das partículas ou dos flocos que formam a suspensão. Em fortes concentrações, sob a ação da decantação, a suspensão transforma-se em um fluido plástico mais ou

menos coesivo. Estudos reológicos feitos pelo Laboratoire Central d'Hydraulique de France mostram que as suspensões seguem leis que ligam a rigidez inicial  $\tau_y$  à concentração de partículas  $T_s$ , Fig. 5

$$\tau_y = K T_s^n ,$$

com  $n$  entre 4 e 5 e  $K = 2 \times 10^{-13}$ , se  $\tau_y$  for dado em  $N/m^2$  e  $T_s$  em  $g/l$ . A rigidez inicial é determinada pela medida do torque necessário para provocar o início do arraste de um rotor imerso na vasa.

Esta rigidez inicial  $\tau_y$  é também ligada à velocidade crítica  $u_*$  pela expressão

$$u_* = K \tau_y^{1/2}$$

com  $K = 0,06$  se  $\tau_y$  é dado em  $N/m^2$  e  $u_*$  em  $m/s$ .

Assim, a um depósito de produto de dragagem em uma concentração conhecida, pode-se associar uma rigidez inicial  $\tau_y$  e, em seguida, calcular a velocidade crítica  $u_*$  necessária para recolocar em suspensão o material que se depositara. A medida da rigidez inicial foi feita com:

- uma vasa peneirada, inferior a  $40\mu m$ , em concentrações de 100, 200, 300, 400 e 500g/l.
- as mesmas amostras anteriores às quais foram

adicionadas 10, 20 e 30% de areia, na mesma granulometria daquela inicialmente presente na vasa.

- o sedimento bruto.

#### IV.3. Resultados das análises em laboratório

##### IV.3.1. Velocidade de queda das partículas.

###### A. Partículas elementares - Fator de floculação.

A amostra do material do porto de Recife apresentou-se como uma mistura de areia e de vasa (partículas inferiores a  $40\mu\text{m}$ ), contendo 30% de partículas de areia, cuja curva granulométrica é dada na Fig. 6. O diâmetro mediano desta areia é de  $210\mu\text{m}$ .

As partículas elementares inferiores a  $40\mu\text{m}$  (após a destruição da matéria orgânica e dos carbonatos) tem uma velocidade de queda mediana, em meio defloculado, de  $2,5 \times 10^{-3}\text{mm/s}$ . As partículas mais finas têm uma velocidade de queda, nas mesmas condições, da ordem de  $10^{-4}\text{mm/s}$ , Fig.7. Estes resultados situam a vasa de Recife como intermediária em relação às outras vasas estudadas pelo LCHF (Fig. 4), com uma tendência a sedimentar-se lentamente. Do ponto de vista da distribuição de velocidades de queda em meio defloculado, a vasa de Recife assemelha-se à do Porto do Havre ou de Croix de Vie (França).

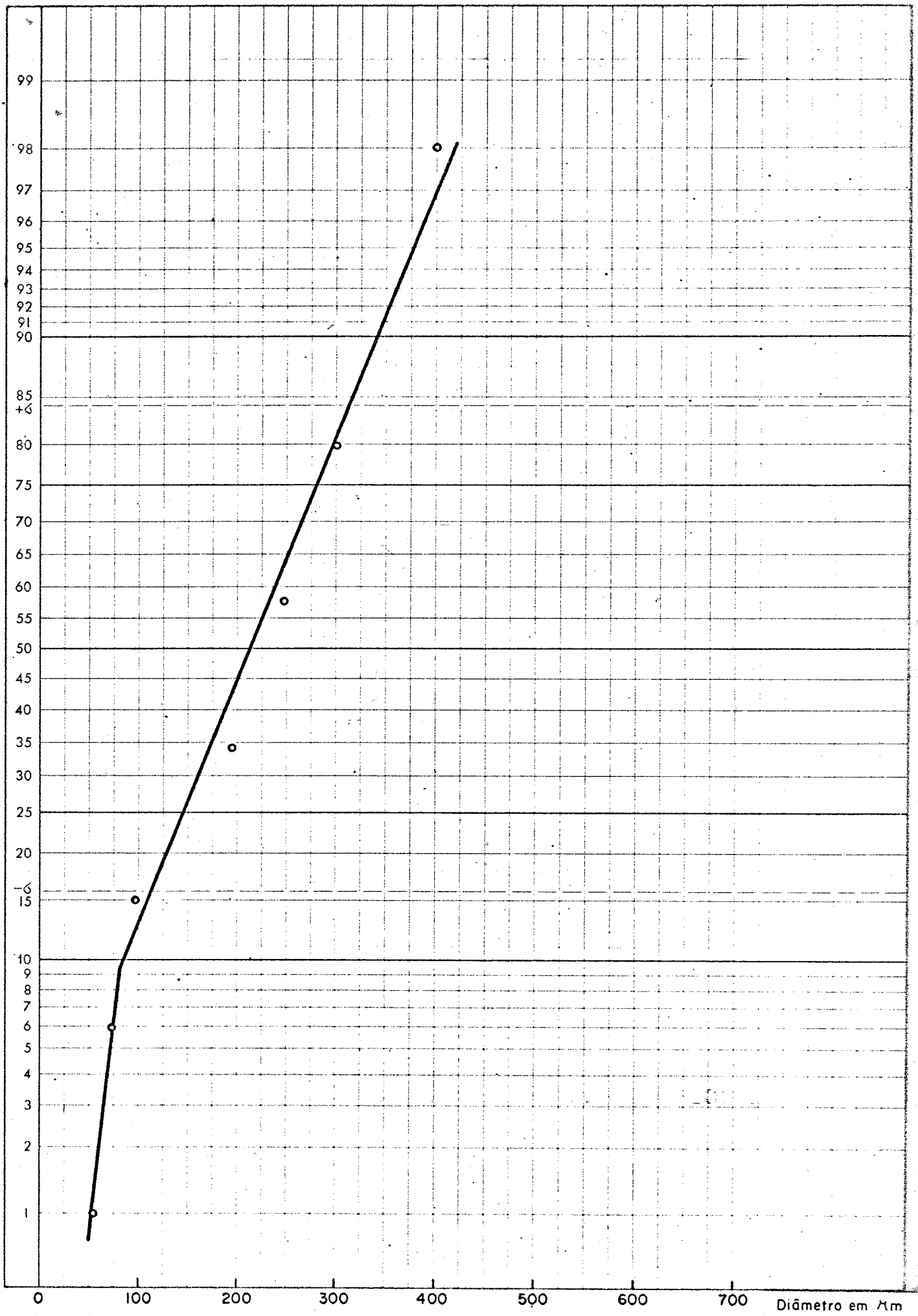


FIG. 6 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA FASE ARENOSA

Em meio flocculado, a 30% de NaCl, a vasa de Recife tem um comportamento muito diferente das outras amostras analisadas pelo LCHF, Fig. 7.

Em primeiro lugar, o fenômeno da flocculação - após o tempo de agitação necessário para preparar a amostra - só se produz 10 minutos após o término desta agitação.

Em segundo lugar, diferentemente das outras amostras estudadas, mais de 30% das partículas permanecem em suspensão. Tudo se passa como se o sal, adicionado como agente flocculante, tivesse uma ação deflocculante sobre as partículas finas. Veremos mais tarde que o sedimento tem, na realidade, um comportamento diferente segundo o teor em sal do meio.

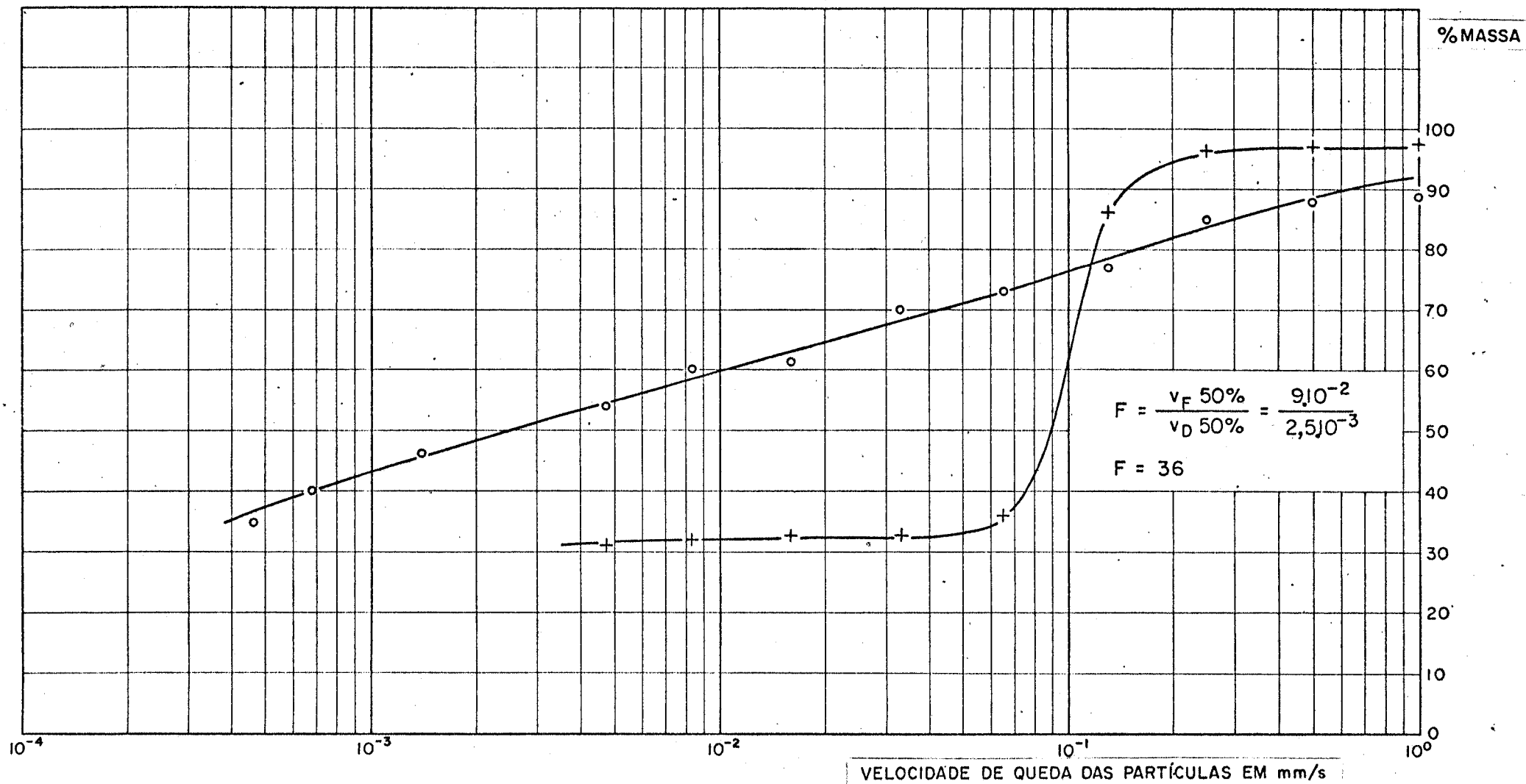
OBSERVAÇÃO: A concentração em partículas sólidas é calculada após a correção da salinidade.

Em meio flocculado, a velocidade média de queda é de  $9 \times 10^{-2}$  mm/s. Isto conduz a um fator de flocculação

$$F = \frac{9 \times 10^{-2}}{2,5 \times 10^{-3}} = 36$$

Se tomarmos, como termo de comparação, a velocidade de queda das partículas brutas (vasa não tratada por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e HCl) em meio flocculado contendo 30g/l de NaCl,  $v_F = 1,5 \times 10^{-1}$  mm/s.

FIG. 7 - VELOCIDADE DE QUEDA DE PARTÍCULAS ELEMENTARES EM MEIO FLOCULANTE E NÃO FLOCULANTE.  
 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE FLOCULAÇÃO



Portanto

$$F = \frac{1,5 \times 10^{-1}}{2,5 \times 10^{-3}} = 60$$

Este resultado evidencia a influência das matérias orgânicas contidas na vasa sobre o fenômeno da floculação. É conveniente notar também que este último resultado ( $F = 60$ ) integra-se melhor entre os estabelecidos pelo LCHF (Fig. 4). C. Migniot (Ref 9) estabeleceu que

$$F = 250 D^{-1,8}$$

A partir dela, obtem-se  $D = 2,3\mu\text{m}$ , o que corresponde a argilas relativamente grosseiras.

A vasa de Recife não parece ser particularmente sensível à floculação. É preciso lembrar-se que, para certas vasas,  $F$  pode atingir valores compreendidos entre 1000 e 10000.

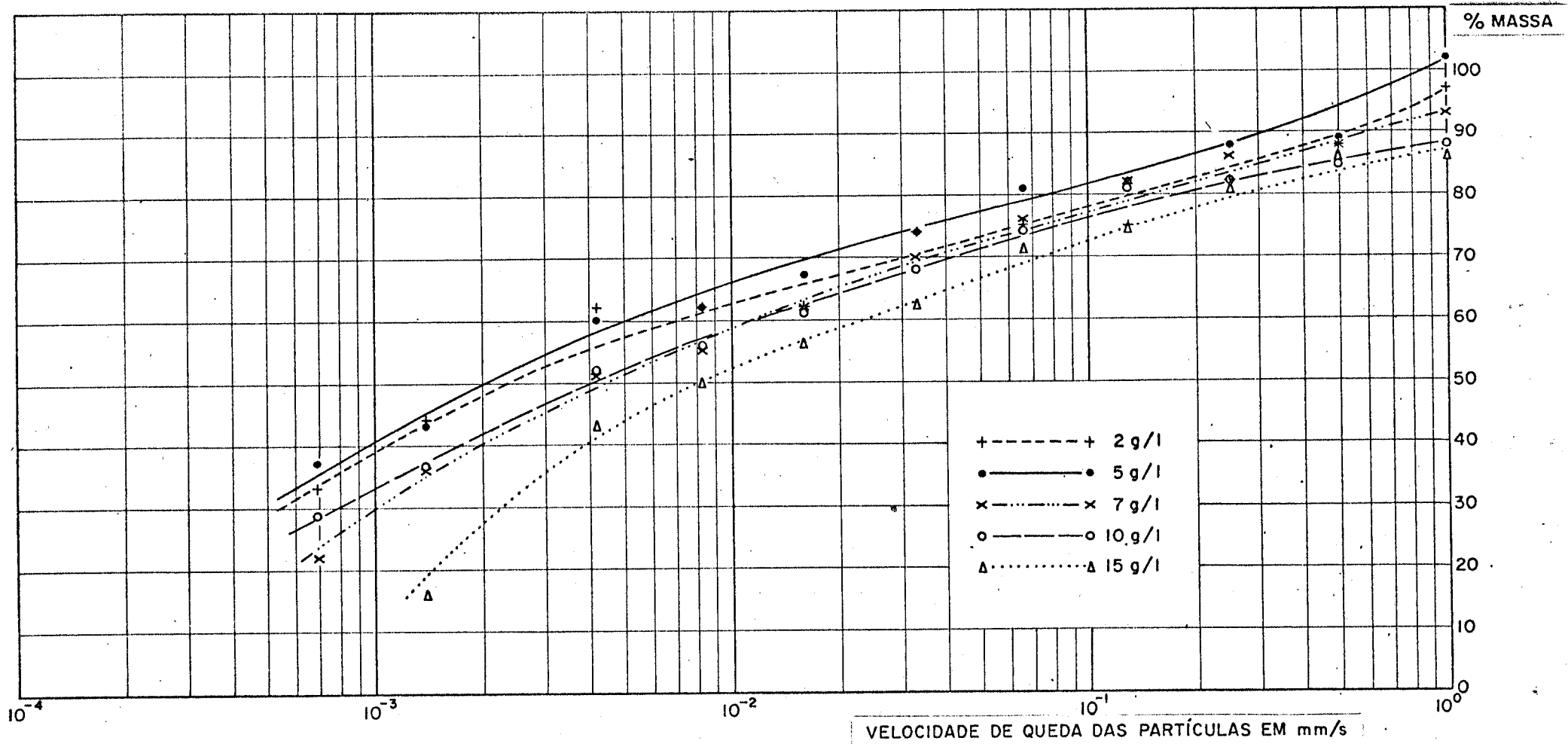
B. Influência da concentração em partículas sólidas.

B.1. Em água destilada (Fig. 8).

Ainda aqui, a vasa de Recife apresenta algumas particularidades. Geralmente, a velocidade mediana ( $V_{50\%}$ ) de queda atinge um valor assintótico desde que a concentração da suspensão ultrapasse 5 a 10g/l. Esta ve



FIG. 8 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO SOBRE A VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS EM AGUA DISTILADA



locidade de queda está geralmente compreendida entre  $10^{-2}$  e  $5 \times 10^{-2}$  mm/s (Fig. 9). Com a vasa de Recife, entretanto, a velocidade de sedimentação aumenta proporcionalmente à concentração em sedimento, para valores compreendidos entre 2 e 15g/l e é muito inferior aos valores habituais. Em fracas concentrações,  $V_{50\%}$  é da ordem de  $10^{-3}$  mm/s.

#### B.2. Em água do mar (Fig. 9 e 10).

O resultado obtido é análogo aos já encontrados para outras amostras. Com a vasa de Recife, a velocidade de queda é mais rápida que a dos outros sedimentos, desde que a concentração em sedimento ultrapasse 7g/l, mas é muito lenta (inferior a  $10^{-3}$  mm/s) desde que a concentração em partículas seja fraca (o que ocorre longe do ponto de rejeito dos produtos de dragagem).

#### C. Influência da salinidade (Fig. 11 e 12).

Com outras vasas, a velocidade de sedimentação varia pouco, desde que a salinidade ultrapasse 2 a 5g/l. Este resultado é idêntico ao obtido para a vasa de Recife, mas com a condição que a salinidade ultrapasse 10g/l. (Fig. 12).

É, aliás, importante observar que as fortes salinidades (Fig. 11), superiores a 20g/l, provocam a formação de partículas finas que têm velocidades de sedimentação extremamente lentas no meio floculado. Esta parti

FIG. 9 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO SOBRE A VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS EM AGUA DISTILADA E EM AGUA DO MAR. COMPARAÇÃO COM SEDIMENTOS TÍPICOS.

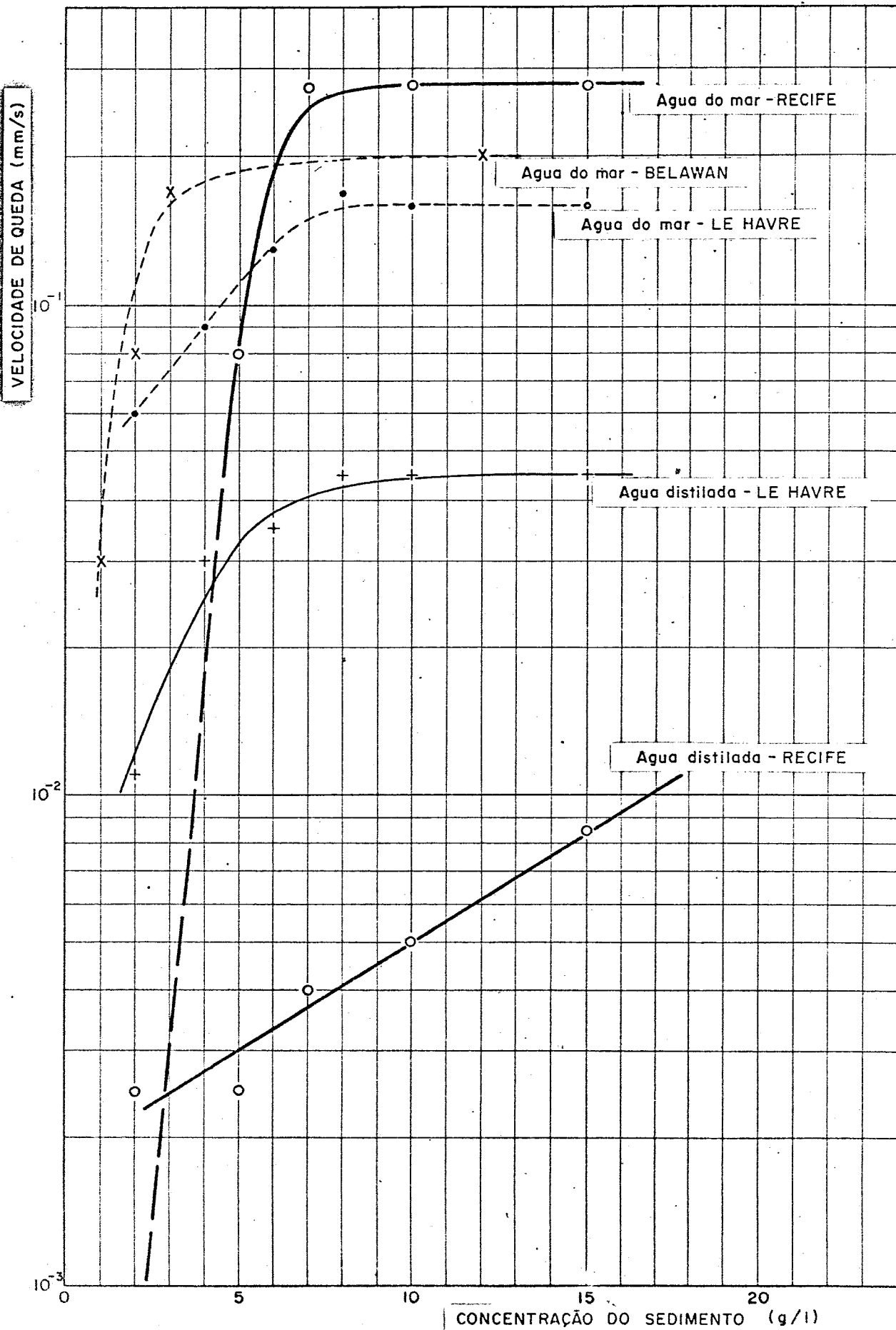


FIG. 10 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO SOBRE A VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS EM MEIO SALINO (30% DE NaCl)

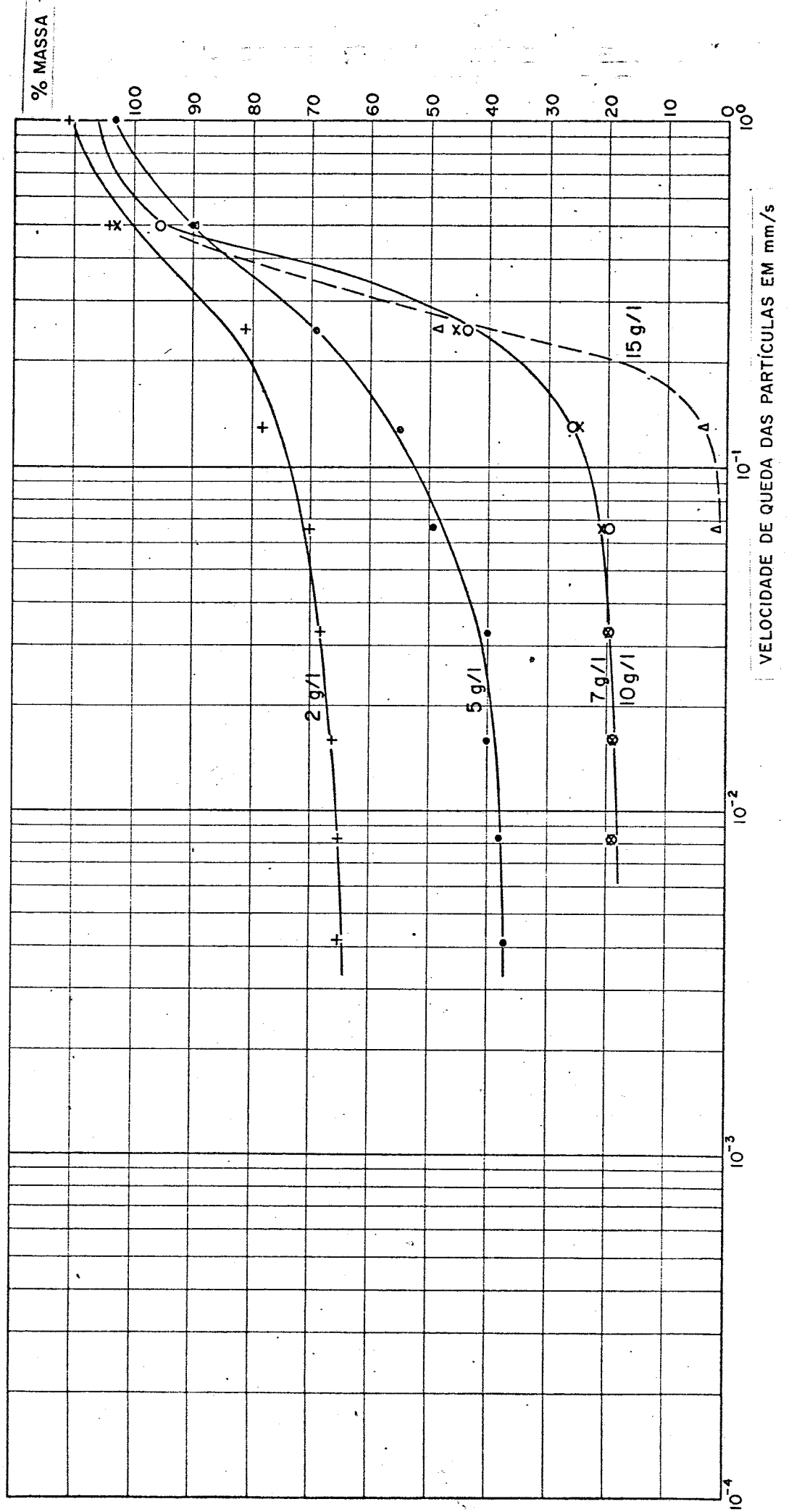


FIG. 11 - INFLUÊNCIA DA SALINIDADE SOBRE A VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS.

Concentração de sedimentos: 5 g/l

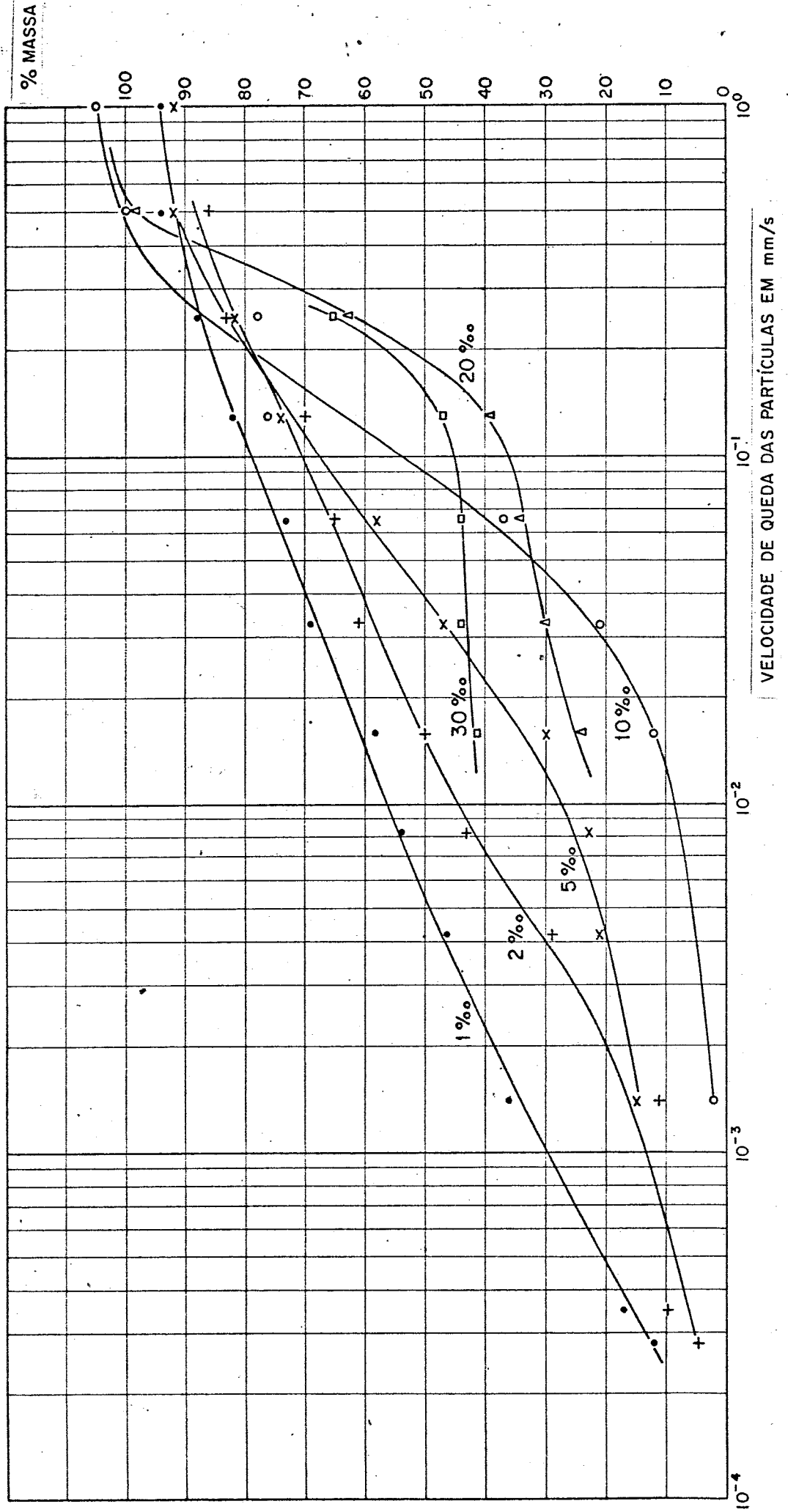
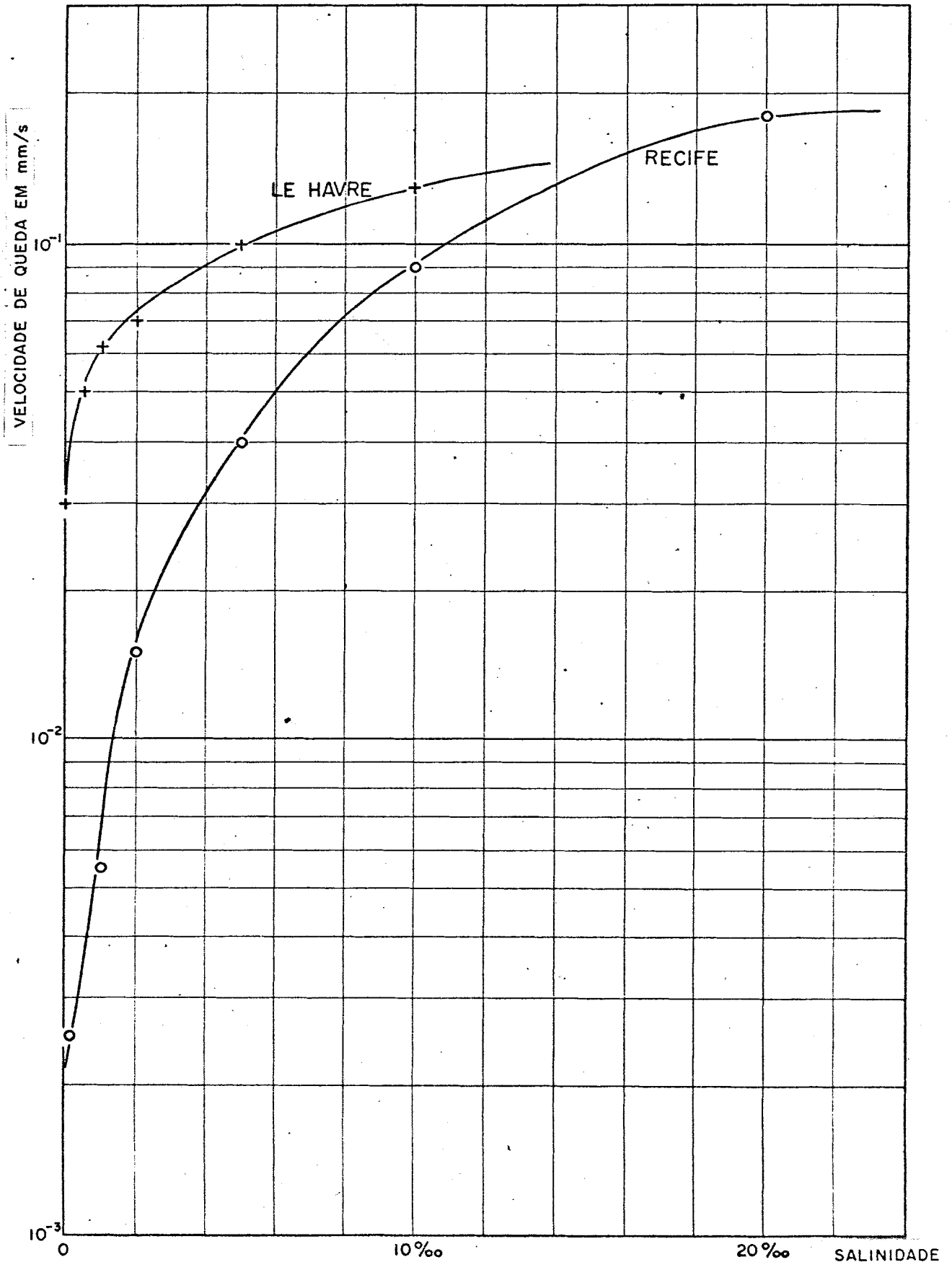


FIG. 12 - INFLUÊNCIA DA SALINIDADE SOBRE A VELOCIDADE DE QUEDA DAS PARTÍCULAS, A UMA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS DE 5g/l. COMPARAÇÃO COM SEDIMENTOS TÍPICOS



cularidade não foi explicada no momento em que este texto está sendo escrito.

Conclusões referentes à sedimentação de partículas finas em água calma.

Destas análises, os resultados mais importantes são:

- a velocidade de queda das partículas em água do mar (30g/l de NaCl) é da ordem de  $1,5 \times 10^{-1}$  mm/s, quando a concentração em partículas sólidas ultrapasse 5g/l (zona do rejeito). Mas, em fortes diluições, esta velocidade é muito baixa (da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  mm/s). Este é o caso das regiões situadas longe da zona de deposição.

- a forte influência sobre a velocidade de sedimentação da concentração em sedimento, tanto em água doce, como em água do mar, quando a concentração em partículas sólidas é inferior a 8g/l.

- a formação de partículas finas, que se sedimentam lentamente, mesmo em meio flocculado, desde que a salinidade ultrapasse 20g/l.

Apesar de apresentar numerosas analogias com outras vasas relacionadas pelo LCHF, a vasa de Recife apresenta numerosos aspectos originais. Alguns deles poderiam ser mais bem compreendidos após a realização de análises químicas e mineralógicas do material. O teor em ma

téria orgânica do material parece ter uma influência importante nestes aspectos.

#### IV.3.2. Estudo da decantação.

Estes estudos permitem o exame do que ocorre na passagem do estado fluido de uma suspensão para o estado plástico. A evolução da concentração é muito lenta, em função do tempo, seguindo uma lei logarítmica.

#### IV.3.3. Propriedades mecânicas das suspensões.

A medida da rigidez inicial das suspensões é efetuada determinando o torque necessário para obter o início do arraste de um corpo girante imerso em uma suspensão viscosa. O aparelho utilizado nestes estudos é um viscosímetro de corpo girante Brookfield.

As medidas foram feitas em função da concentração tanto para a vasa pura (inferior a  $40\mu\text{m}$ ), como para o sedimento bruto de Recife

Rigidez inicial  $\tau_y$  em  $\text{N/m}^2$

Concentração em g/l	166	200	300	400	50
Vasa pura	0,12	5	33	80	99
Sedimento bruto	0,2	1,3	8,3	26	66



Pode-se verificar (Fig. 5) que a rigidez inicial é comparável - mas mais elevada em mesma concentração - à de outras amostras analisadas pelo LCHF.

Estas amostras seguem uma lei da forma:

$$\tau_y = K T_s^n$$

com  $\tau_y$  em N/m, e  $T_s$ , a concentração, em g/l.

Vasa pura:  $\tau_y = 2,9 \times 10^{-13} T_s^{5,2}$

Sedimento bruto:  $\tau_y = 2,6 \times 10^{-12} T_s^{5,0}$

Em comparação, a vasa de Le Havre (sedimento bruto), amostra à qual já nos referimos, apresenta  $\tau_y = 1,2 \times 10^{-13} T_s^{5,1}$ . Estas determinações nos permitem calcular a velocidade crítica  $U_*$  que determina o início da reentrada em suspensão dos materiais brutos.

$$U_* = 0,016 \tau_y^{1/2}, \text{ com } \tau_y \text{ em N/m}^2 \text{ e } U_* \text{ em m/s.}$$

Concentração em g/l	50	100	166	200	300	400	500
$U_*$ em cm/s	0,04	0,25	0,9	1,45	4	8,2	14,4

Estes valores (Fig. 13), serão utilizados no capítulo no qual serão interpretados os resultados experimentais (Capítulo VIII).

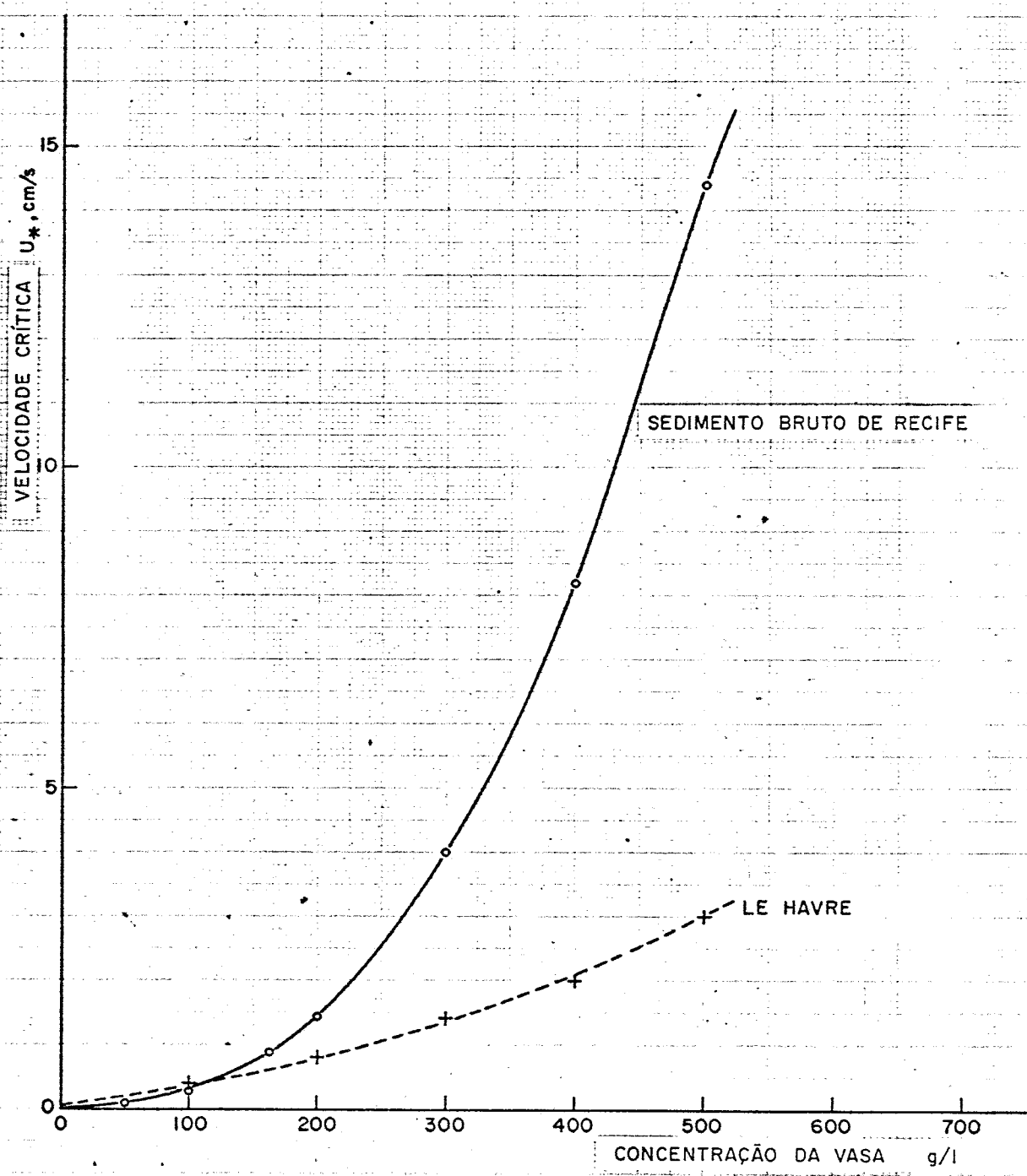


FIG.13  
 VARIAÇÃO DE  $U_*$  EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO EM VASA

## V. ESTUDO DA MARCAÇÃO

As vasas tem um caráter coloidal bem definido, devido à presença de argilas e de complexos argilo-húmicos. Alguns destes coloides são eletropositivos (hidróxidos de ferro e de alumínio), enquanto outros são eletro negativos (argilas, ácidos húmicos). As propriedades elétricas destes materiais são conhecidas. Pode-se observar, por exemplo, que a sua sedimentação é fortemente acelerada sob a ação de um campo elétrico, se o polo negativo está na superfície da suspensão e o polo positivo no fundo. O conjunto do material é, portanto, eletronegativo. Além disso, alguns destes coloides são hidrófobos (argilas), enquanto outros são hidrófilos (ácidos húmicos).

Disto resulta um equilíbrio entre as partículas carregadas da suspensão e os ions em solução. Em consequência, toda adição de produtos que modifiquem a concentração ionica do meio acarretará uma perturbação neste equilíbrio: haverá floculação ou defloculação. O material é, pois, muito suscetível a agentes exteriores. Destas considerações, podem ser retiradas algumas conclusões:

- uma vasa não pode ser perfeitamente simulada por partículas de vidro, como se faz para estudar o deslocamento de areia. Há, portanto, necessidade de marcar-se diretamente a vasa.

- devido à extrema delicadeza das propriedades do material, o tratamento químico de marcação deve ser

tão suave e limitado quanto possível.

- após a marcação, é necessário estudar a semelhança entre o sedimento marcado e o sedimento natural, colocados nas mesmas condições físico-químicas (composição do meio) e hidrodinâmicas.

O estudo completo da marcação e de suas consequências sobre o comportamento do material foi efetuada por H. Bougault (Ref. 3) e pelo Laboratoire Central d'Hydraulique de France, a pedido do Commissariat à l'Energie Atomique.

Os métodos de marcação de uma vasa que conduzem a um traçador convenientemente representativo, baseiam-se na utilização de uma das propriedades intrínsecas dos sedimentos finos em suspensão:

- propriedades reductoras
- pH compreendido entre 6 e 8.

Além disso, deve-se utilizar uma atividade especifica elevada para o traçador, de modo a fixar sobre a vasa uma quantidade tão pequena quanto possível do elemento por quilograma de vasa.

OBSERVAÇÃO: É sempre possível aumentar a massa de vasa a ser marcada. Na prática, entretanto, por razões tecnolôgicas evidentes, é difícil utilizar-se mais do que alguns quilos de vasa ou volumes de suspensão superiores a 50 li

tros.

Foi verificado que, por simples mistura íntima entre uma suspensão de sedimento e uma solução radioativa, é possível:

- reduzir o ouro, inicialmente sob forma iônica,  $\text{HAuCl}_4^+$ , em ouro metálico.

- precipitar um elemento metálico, inicialmente sob forma iônica ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Sc}^{3+}$ ,  $\text{Hf}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{3+}$ , etc) em hidróxido metálico. O traçador fica intimamente ligado às partículas finas e o sedimento marcado é pouco alterado por estes tratamentos, se forem adotadas as precauções já expostas.

Para a fase final deste trabalho, o método de marcação habitual (Ref 3) foi adaptado às condições particulares aqui existentes:

- Baixas atividades específicas do traçador disponível, irradiado em um pequeno reator de pesquisas.

- Necessidade de preparar a solução de traçador no local do trabalho e não em laboratório especializado, o que indica a utilização de uma tecnologia simples.

V.1. A marcação

O isótopo mais apropriado para estudar o trans

porte de partículas finas em suspensão é o ouro 198, que apresenta uma meia-vida de 2,7 dias, sendo um emissor  $\gamma$  cuja radiação principal é de 0,411 Mev. É um radioisótopo de fácil produção, devido à sua secção de choque da ordem de 100 barns, por irradiação (n,  $\gamma$ ) de ouro metálico. Quando atacado por uma solução de água régia, e posteriormente por HCl 0,1N, o ouro passa a se apresentar sob a forma de ácido auriclorídrico  $\text{HAuCl}_4$ , com um pH da ordem de 1. Quando se dispõe de altas atividades específicas (40Ci/g, por exemplo) é fácil marcar-se um ou dois quilogramas de vasa, em suspensão a 200g/l. Utilizando-se 9Ci, o que é a ordem da atividade máxima permitida por diversos países, inclusive a França, teremos a vasa marcada com 125 a 250mg de ouro por quilograma de sedimento. Este valor é recomendado nos estudos de marcação de vasa, para evitar alterações em suas propriedades. Entretanto, não dispusemos, para a realização deste trabalho, de atividades específicas superiores a 5Ci/g. Portanto, para se conseguir a atividade de cerca de 10Ci, teremos que utilizar 2g de ouro, para marcar uma massa de vasa necessariamente limitada, por razões de preparação e de técnica de injeção. É necessário também levar em conta que o tempo de injeção deve ser necessariamente curto, pois esta é a hipótese para a solução da equação da dispersão, apresentada na parte teórica deste trabalho. Por este conjunto de razões, procuramos o melhor compromisso que permitisse:

- a. utilizar a solução de ouro mais simples de fabricar fora de um laboratório. Isto envolve o estudo de tres alternativas
  - . simples ataque por água régia a quente

- . simples ataque por água régia a quente, seguido por uma neutralização parcial, a frio, do excesso de acidez.
  - . simples ataque por água régia a quente, seguida da evaporação e da redissolução por HCl 0,1N.
- b. empregar a menor quantidade possível de vasa inferior a  $40\mu\text{m}$ , que exige um tempo de separação longo, quando partimos da vasa natural. Nas primeiras experiências realizadas, a marcação foi efetuada sobre a vasa natural, passando-se a utilizar a fração inferior a  $40\mu\text{m}$  na parte final do trabalho.

## V.2. Rendimento de fixação

O rendimento da marcação é fácil de medir, utilizando-se ouro radioativo. Centrifuga-se uma amostra da solução marcada e mede-se a atividade  $A_s$  do sobrenadante. Compara-se este valor com a atividade  $A$  de uma amostra de mesmo volume da solução marcada. O rendimento de fixação é dado por

$$R = \left( 1 - \frac{A_s}{A} \right) 100.$$

Em todos os casos aqui estudados, resumidos nos quadros seguintes, este rendimento foi superior a 99%. É importante notar também que as curvas de sedimentação, realiza



das com a pipeta de Andreasen, mostraram que a radioatividade estava bem fixada às partículas em suspensão. Assim, quando a velocidade de queda das partículas aumenta, pela passagem de um meio defloculado para um meio floculado, a curva de distribuição da radioatividade em função da velocidade de queda modifica-se também da mesma maneira. Esta é uma prova da marcação.

Rendimento de Fixação para 500mg de  
ouro por kg de Sedimento

Concentração em vasa, g/l	Solução de ouro em água régia	HAuCl <sub>4</sub> em pH = 1	Au dissolvido em água régia, parcialmente neutralizado por NaOH
200		99.5	
100	99	99.5	99
50		99	

Rendimento de Fixação em Função da Concentração em ouro e da Concentração em Vasa

Concentração em vasa, g/l	250mg de ouro por kg de vasa	500mg ouro/kg vasa	1000mg ouro/kg vasa
200	99.5	99.5	
100		99.5	
50		99.5	99

V.3. Influência das condições de marcação sobre a velocidade de queda das partículas

O rendimento da marcação é alto, qualquer que seja o modo de preparar a solução de ouro. É, entretanto, necessário comparar as velocidades de queda das partículas marcadas com as da vasa natural. O método da pipeta de Andreasen permite comparar-se facilmente as velocidades de queda de vasas marcadas e não marcadas.

Esta comparação foi feita para vasas (marcadas e naturais) em meio floculado e defloculado e para as diversas condições de marcação utilizadas, ou seja, diferentes soluções de ouro, diferentes concentrações em ouro e diferentes concentrações em vasa, Fig. 14.

Para facilitar estas comparações, definimos um fator FC, igual à relação entre as velocidades de queda entre a vasa marcada e a vasa natural, para uma fração de sedimento definida, chamada fractil.

Os fractís utilizados foram:

Em meio floculado: 25%, 50%, 75%

em meio defloculado: 40%, 50%, 75%.

Donde se deduz, por exemplo:

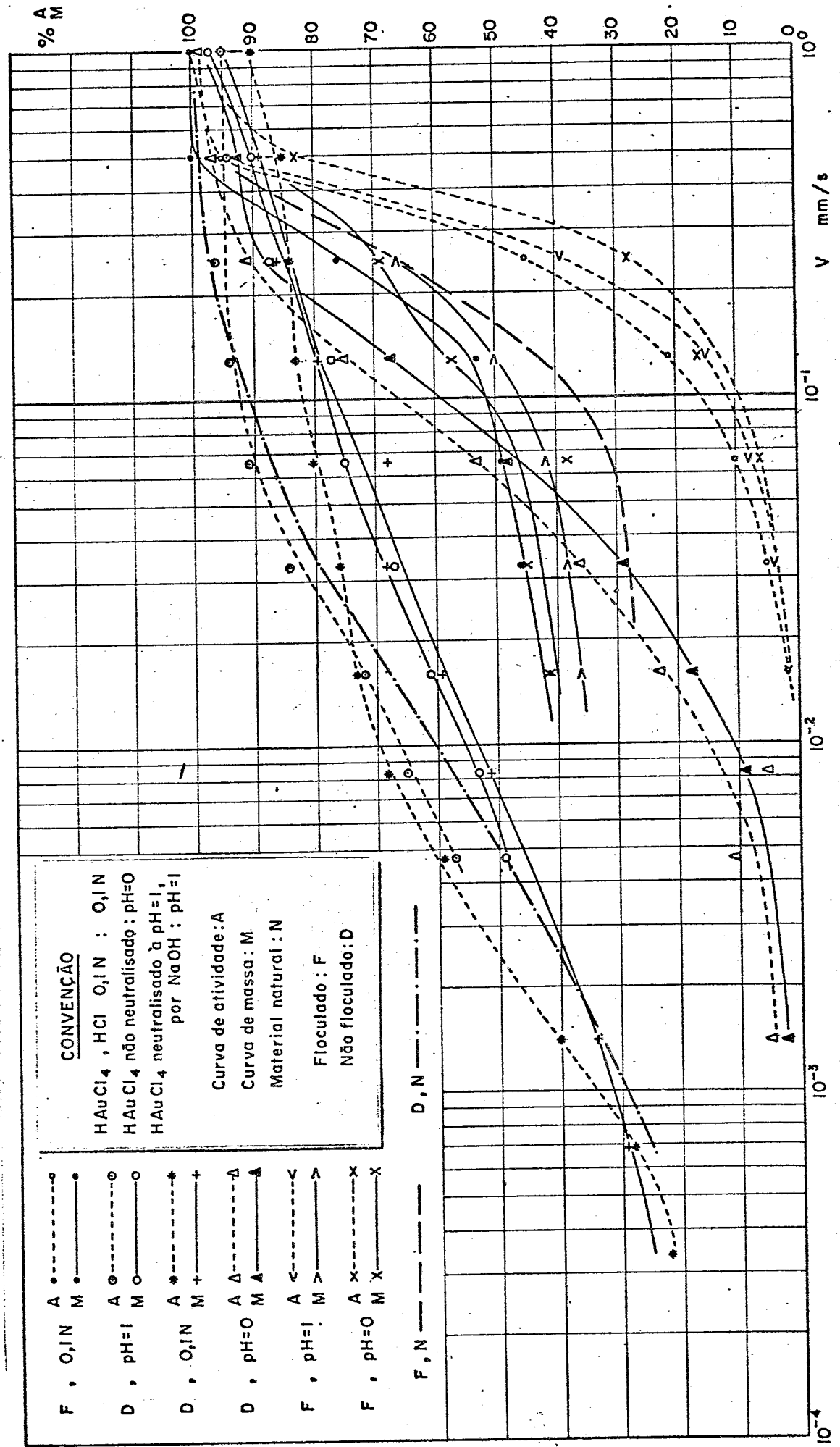
$FC_{50\%}$  = velocidade de queda de uma vasa marcada, correspondente a 50% da massa dividida pela velocidade de queda da vasa natural que corresponde a 50% da massa.

TABELA: Valores de FC em Função da Proporção de Ouro e da Concentração da Vasa

Condições de Marcação	Solução de Ouro HAuCl <sub>4</sub> , retomada com HCl 0,1N																		
	250mg ouro/kg vasa			500mg ouro/kg vasa			1000mg ouro/kg vasa			meio defloculado			meio floculado						
Condições de Comparação	meio defloculado		meio floculado		meio defloculado		meio floculado		meio defloculado		meio floculado		meio defloculado		meio floculado				
	Fractís	25 50 75	Fractís	40 50 75	Fractís	25 50 75	Fractís	40 50 75	Fractís	25 50 75	Fractís	40 50 75	Fractís	25 50 75	Fractís	40 50 75			
200g/l	0,66	1	1,6	0,5	0,7	0,8	0,4	1	2,6	1,3	1,9	1,2							
100g/l							0,9	1,2	3,3	0,1*0,6	0,9								
50g/l														0,7	1	1,7	0,2	0,7	1

Concentração em Vasa para a Marcação

**FIG. 14 - MARCAÇÃO DA VASA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE MARCAÇÃO E DE SEDIMENTAÇÃO**  
 Vasas marcadas com 500 mg Ouro por Kg de vasa, 100 g/l de vasa



Quando as partículas de vasa marcada têm a mesma velocidade de queda que as partículas de vasa natural, FC é igual a 1.

É muito importante notar que FC apresenta uma certa analogia com o fator de floculação F. Foi visto que este poderia estar compreendido entre 1 e 10000, conforme a origem da vasa. Para a vasa de Recife,  $F = 60$ . Em consequência, um valor de FC próximo de 1 é extremamente satisfatório. Os valores de FC obtidos são apresentados nas tabelas seguintes. As melhores condições parecem ser obtidas para 250mg de ouro por kg de vasa e para uma concentração em vasa de 200g/l.

Valores de FC em Função do Método de Solução do Ouro

Condições de Marcação		500mg de ouro/kg de vasa - vasa a 100g/l			
		Solução de ouro em água régia	Solução de ouro neutralizada para pH = 1 por NaOH	Solução de ouro retomada em HCl 0,1N	
Condições de Comparação	meio defloc.	Fractis 25	116	0,8	0,9
		Fractis 50	19	1,4	1,2
		Fractis 75	5	3,3	3,3
	meio floculado	Fractis 40	0,01	0,4*	0,1*
		Fractis 50	0,7	0,75	0,6
		Fractis 75	0,8	0,84	0,9

\* OBSERVAÇÃO: Deve-se observar que as partículas correspondentes a este fractil não são marcadas, como será visto no próximo parágrafo.

V.4. Repartição do traçador em função da dimensão das partículas

Quais são as partículas marcadas?

A marcação obtida é proporcional à massa das partículas?

Esta última característica é particularmente importante, pois, se esta característica for obtida, a atividade medida durante as experiências in situ será diretamente proporcional à quantidade de vasa em suspensão. Ainda neste caso, a pipeta de Andreasen é extremamente útil, pois ela permite determinar a distribuição da massa e da atividade em função da velocidade de decantação das partículas.

O exame da porcentagem de radioatividade em função da porcentagem de massa para as diferentes condições de marcação estudadas mostra (Fig. 15, 16 e 17) que:

- Nem todas as partículas são marcadas.
- Os diversos processos de marcação não conduzem à mesma repartição do traçador.
- Entretanto, quando as partículas são marcadas, a atividade e a massa são proporcionais.

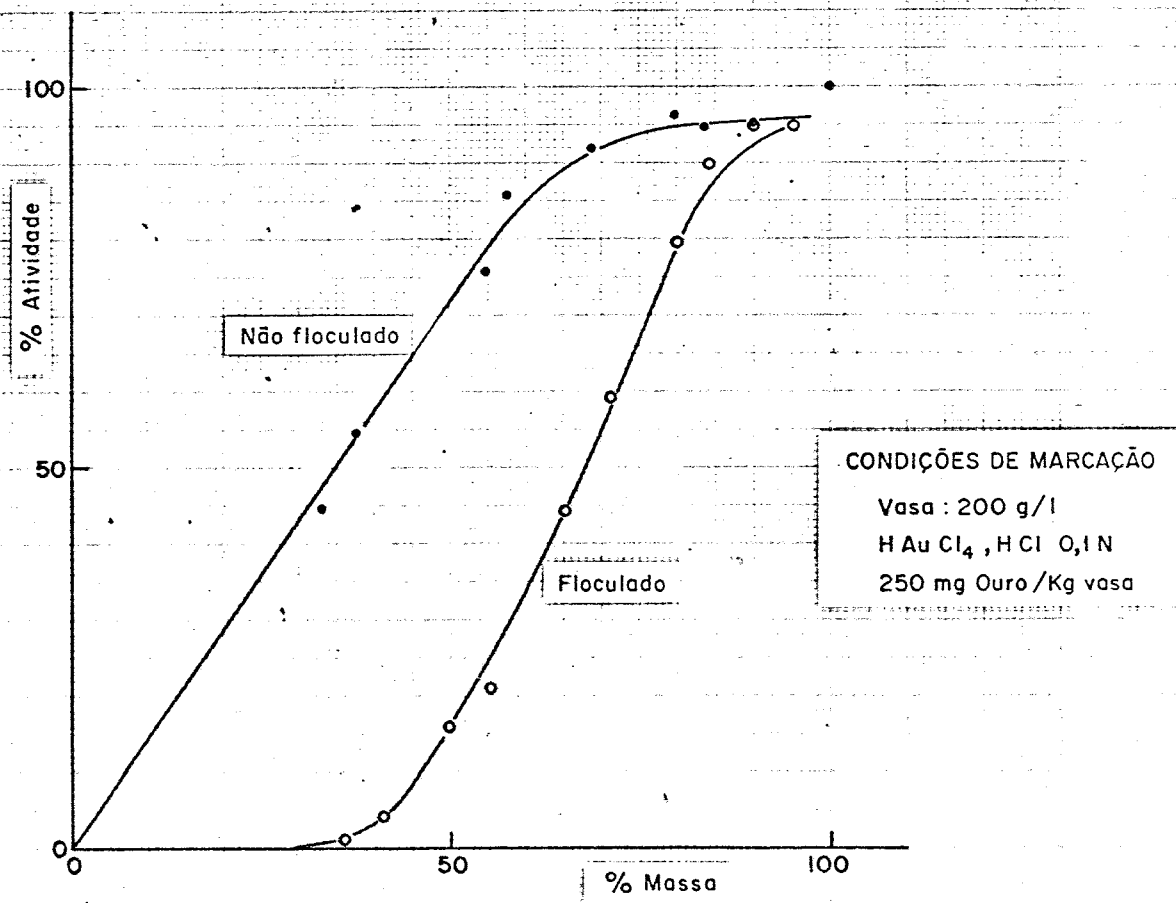
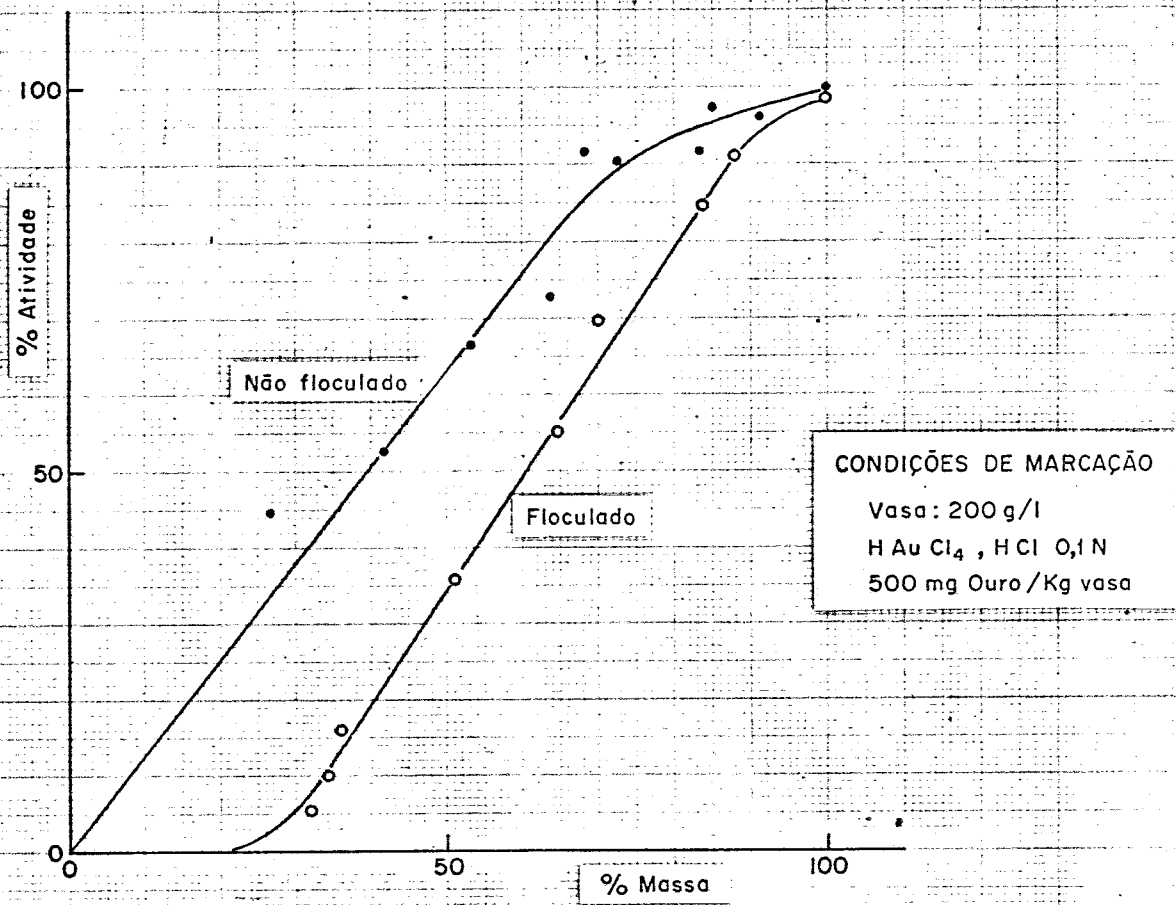


FIG.15 - PORCENTAGEM DE ATIVIDADE FIXADA CONTRA PORCENTAGEM DE MASSA , PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE MARCAÇÃO

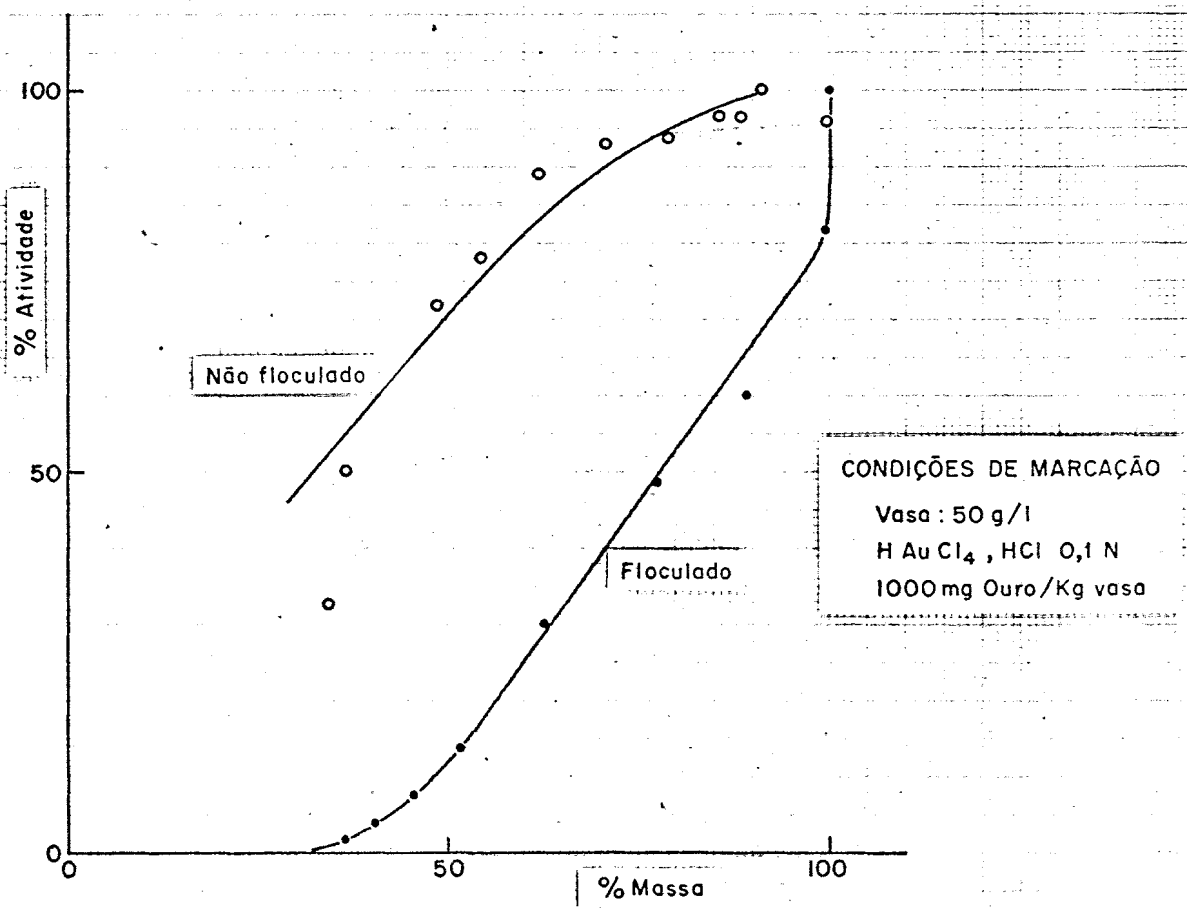
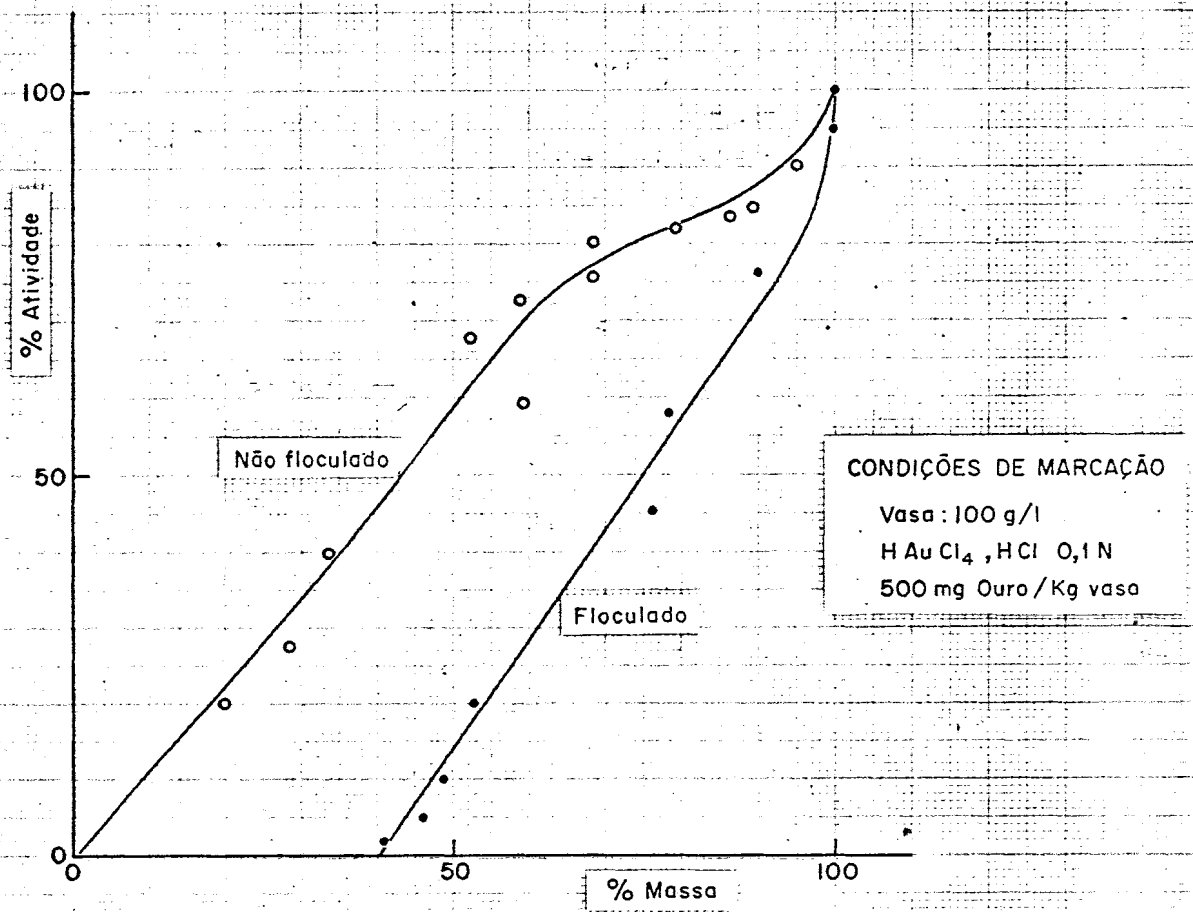


FIG.16 - PORCENTAGEM DE ATIVIDADE FIXADA CONTRA PORCENTAGEM DE MASSA, PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE MARCAÇÃO



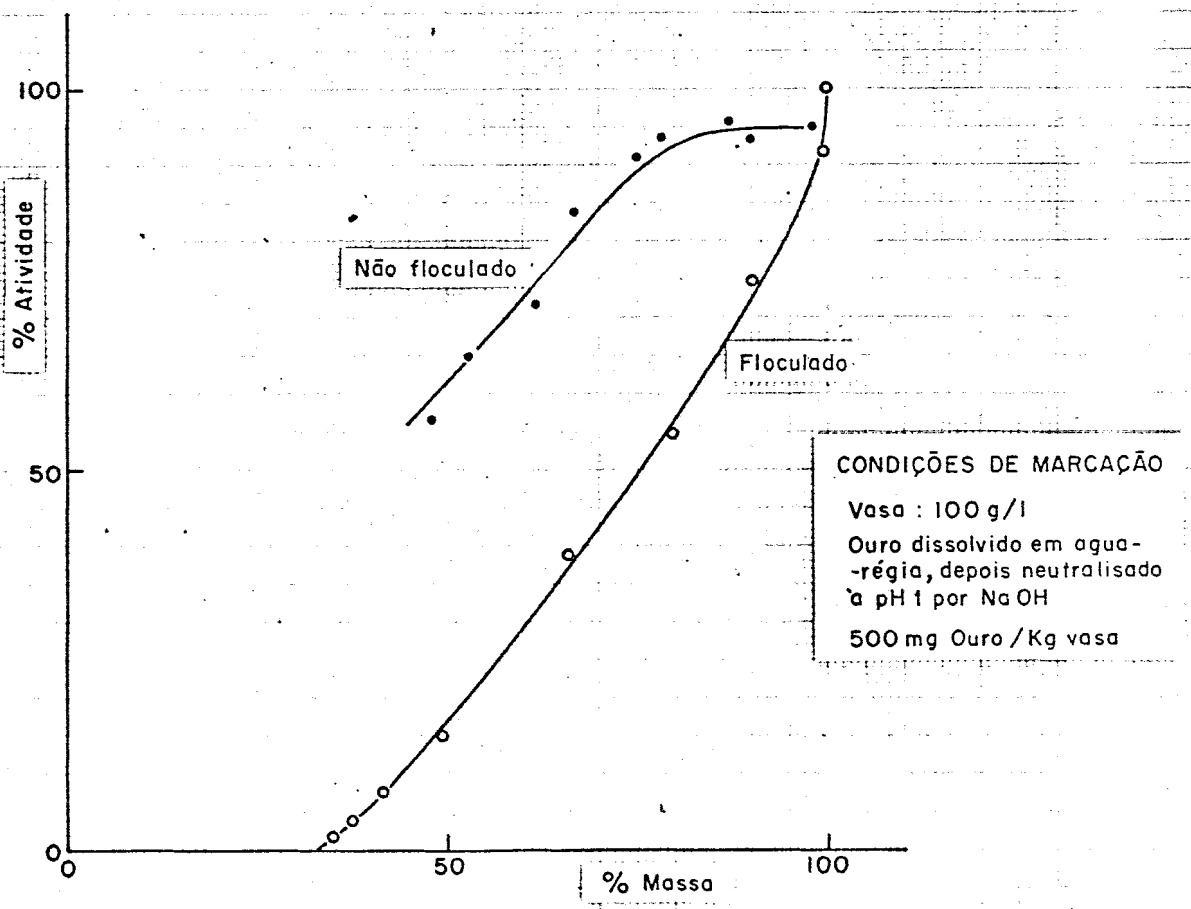
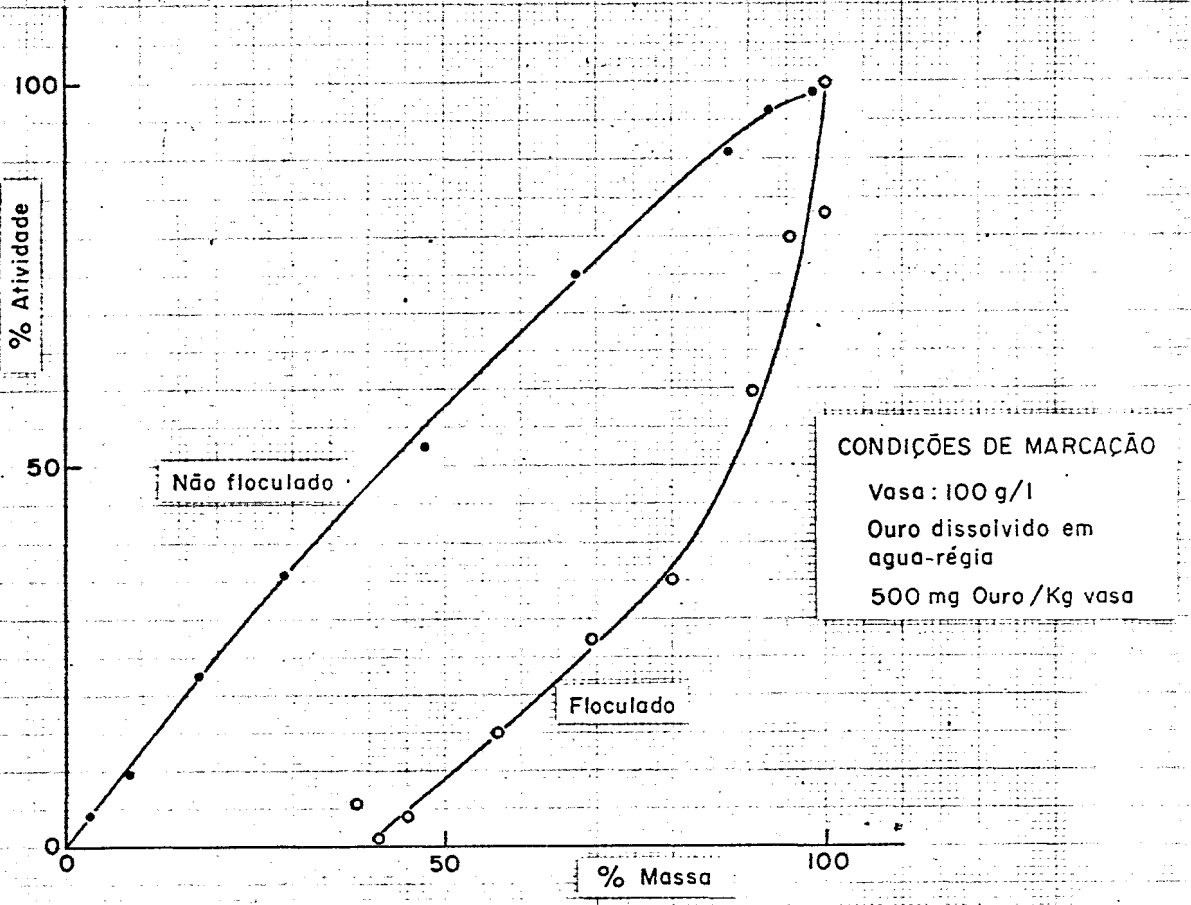


FIG.17 - PORCENTAGEM DE ATIVIDADE FIXADA CONTRA PORCENTAGEM DE MASSA, PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE MARCAÇÃO

É importante observar que, em meio floculado, cerca de 40% das partículas mais finas não são marcadas, enquanto elas o são em meio defloculado. Tudo se passa como se o cloreto de sódio adicionado à suspensão tivesse por efeito formar partículas que se sedimentam lentamente e que não são radioativas. Este fenômeno já havia sido observado anteriormente. Para ele, não há atualmente uma explicação, não tendo também sido observado nos trabalhos de Bougault sobre diferentes vasas de origem variadas. É evidente que as curvas de massa, obtidas com a pipeta de Andreasen, foram corrigidas da quantidade de sal dissolvida. É necessário observar também que as partículas mais grosseiras, com velocidades de queda entre 0,5 e 1mm/s, não são marcadas por estes métodos. Entretanto, em um meio altamente floculante - marcação por uma solução de ouro dissolvida em água régia não neutralizada - as partículas finas formadas reúnem-se em flocos muito ativos: a uma pequena quantidade (10%) estão associados 50% da radioatividade (Fig. 17).

#### V.5. Conclusões sobre os processos de marcação

Este exame das condições de marcação demonstra que as condições ideais de marcação, que não modifiquem em nada o comportamento da vasa, não existem na prática. É preciso então definir as condições de um compromisso aceitável entre o que é tecnologicamente possível em vista das condições experimentais e a repartição do traçador sobre as partículas, de modo a não modificar em demasia a sua velocidade de decantação.

As condições utilizadas nas experiências de Junho de 1978 foram as seguintes:

- Preparação do traçador: forma  $\text{HAuCl}_4$ ,  $\text{HCl}$  0,1N, o que quer dizer dissolução em água régia a quente e retomada por  $\text{HCl}$  0,1N, sendo esta última operação efetuada duas vezes.

- Concentração em vasa - 100g/l ou mais de partículas inferiores a 40 $\mu\text{m}$ , pois as partículas mais grosseiras não são marcadas.

- Proporção de ouro - 500mg de ouro por kg de vasa.

Nestas condições, em meio flocculante, 60% das partículas são marcadas proporcionalmente à sua massa e sua velocidade de sedimentação está compreendida entre  $1,5 \times 10^{-2}$  e  $5 \times 10^{-1}$  mm/s. A velocidade de 50% das partículas é igual a  $10^{-1}$  mm/s - Fig. 14.

Nas experiências anteriores (Novembro de 1976 e Março-Abril de 1977), a marcação foi realizada sobre a vasa natural, a concentrações superiores a 300g/l, utilizando-se ouro dissolvido em água régia e neutralizado com hidróxido de sódio. Neste caso, a marcação é também efetuada sobre as partículas finas, pois ela não atua sobre as partículas mais grosseiras. Os resultados experimentais são comparáveis a partir do momento em que a diluição da massa de traçador injetada torne-se grande, isto é, quando reinarem condições de campo afastado. Isto deve ocorrer

rer não muito tempo após o término da injeção e pode ser visto através dos valores dos parâmetros obtidos a partir dos resultados experimentais.

Após um rejeito de material, duas fases devem ser consideradas separadamente: o campo próximo e o campo afastado. O campo próximo é constituído pela zona na vizinhança imediata do rejeito. Nesta região, o comportamento do material é influenciado diretamente pelas próprias condições de rejeito, ou seja, pela velocidade do fato, pela orientação do fato em relação à direção das correntes e das ondas, pela altura da descarga em relação

em relação ao fundo.

iii. a dispersão longitudinal e transversal, mediante a distribuição das concentrações do material radioativo, em diferentes alturas

ii. a taxa de decantação e a velocidade de queda das partículas.

i. a trajetória e a velocidade de deslocamento da nuvem, o que corresponde à advecção.

As partículas em suspensão, após sua descarga no mar, são submetidas à advecção, à dispersão e à sedimentação. Se forem lançadas, no local do estudo, partículas marcadas com um traçador radioativo, poderemos determinar:

VI.1. Finalidade dos trabalhos de campo

VI. REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS DE CAMPO

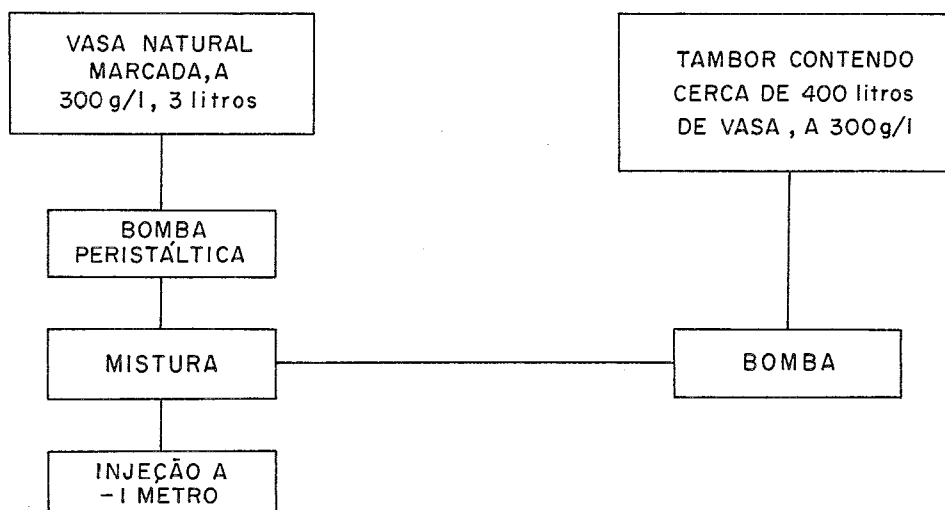
ao fundo, pela concentração do material despejado, etc.

Em condições de campo afastado, a influência hidrodinâmica do jato não é mais sensível. Nela, o material está submetido apenas às ações do meio (ventos, ondas, correntes) e ao efeito da sedimentação. Estas condições é que serão estudadas neste trabalho.

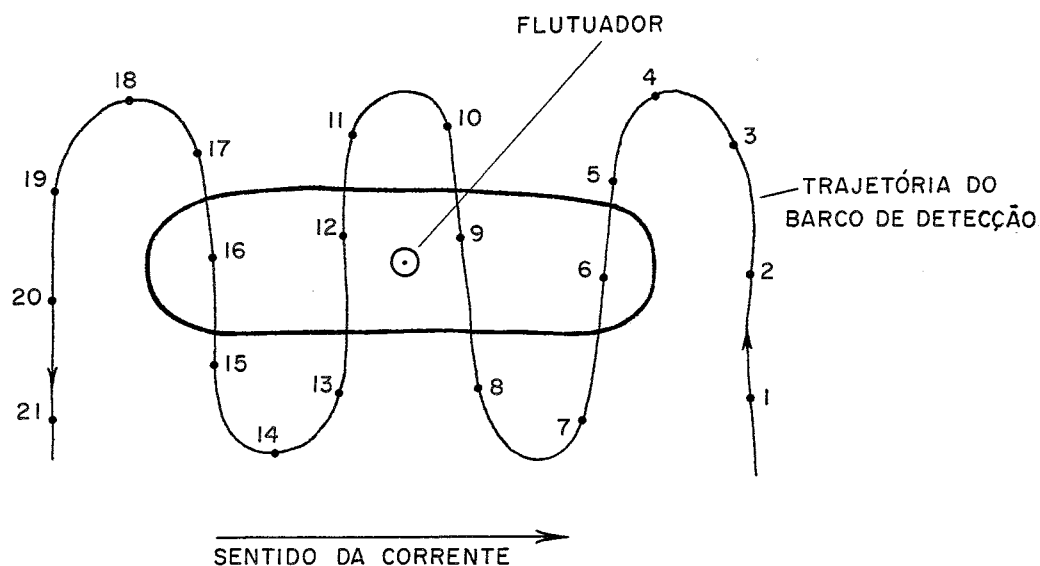
## VI.2. Condições de operação

### VI.2.1. Trabalho em condições de verão.

As medições em verão foram realizadas a partir da marcação da vasa natural do porto de Recife por ouro 198; na realidade, apesar da presença de várias frações granulométricas nesta vasa, sabe-se que apenas as frações finas são marcadas. A marcação era realizada sobre dois ou três litros de vasa, em um recipiente blindado com chumbo, que era transportado para o barco de injeção. O esquema era o seguinte:



A duração da injeção variava entre 2 e 4 minutos, o que é um tempo curto em relação ao período de trabalho envolvido, que varia entre 2 e 5 horas. Flutuadores eram lançados no meio da injeção, realizada a partir de um barco ancorado, o qual não participa das medidas posteriores. Imediatamente após a injeção, era iniciada a detecção, feita por um barco que transportava 2 sondas de cintilação, a -2m e -8m. Durante a detecção, procurou-se, nesta fase, cobrir completamente a nuvem radioativa formada pela injeção, navegando-se no sentido oposto ao seu deslocamento.



A posição do barco era registrada por uma rede de teodolitos, de 30 em 30 segundos. Esta posição era lançada em

uma carta de navegação.

Para este caso, a equipe básica é constituída de

Barco de injeção: 2 pessoas

Barco de detecção: 1 pessoa que orienta a navegação

1 pessoa para lançar as posições sucessivas do barco na carta de navegação

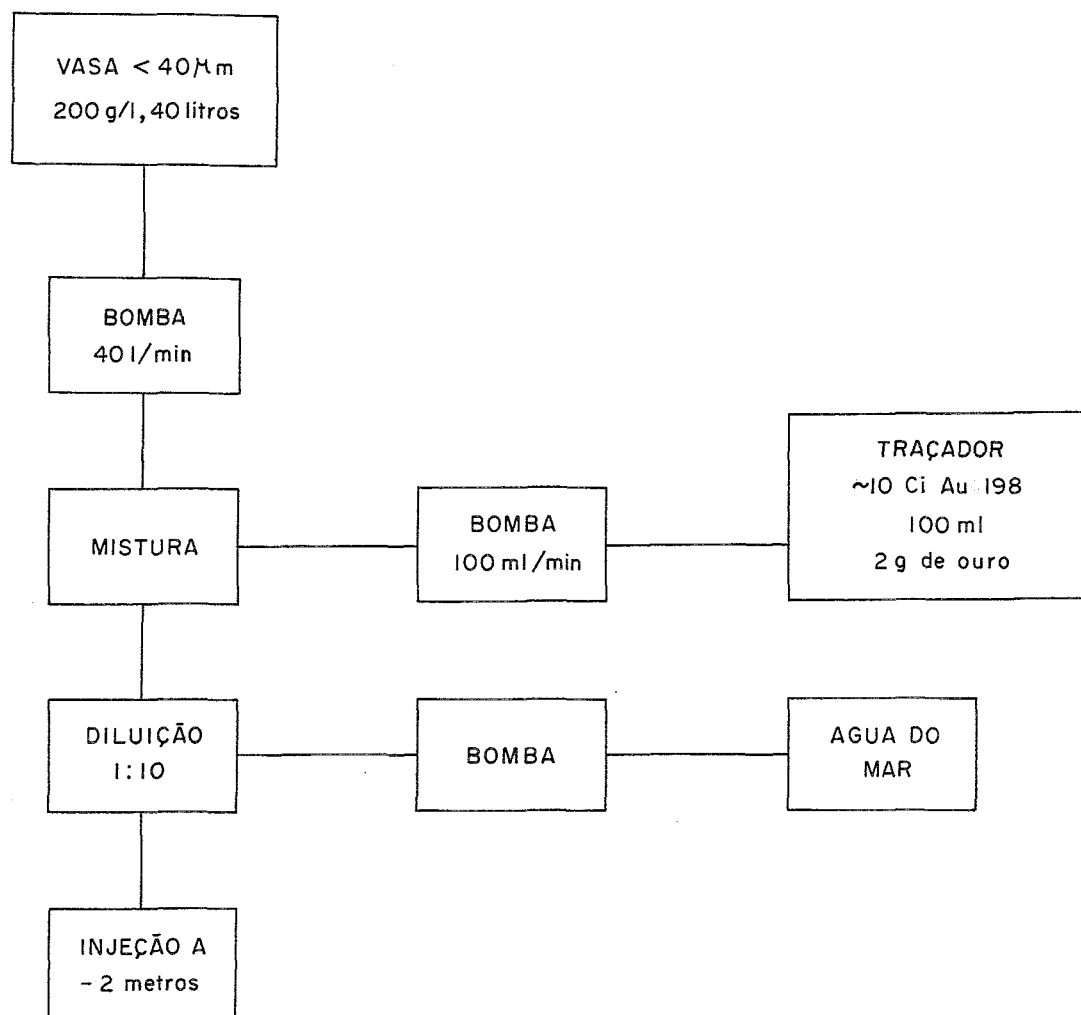
1 pessoa que se ocupa do equipamento eletrônico de contagem, constituído de 2 "rate-meters", 2 "scalers", um registrador de 2 canais e uma impressora.

1 pessoa para se ocupar do comportamento dos detectores e dos cabos e disponível para o lançamento de flutuadores ou corantes.

#### VI.2.2. Trabalho em condições de inverno.

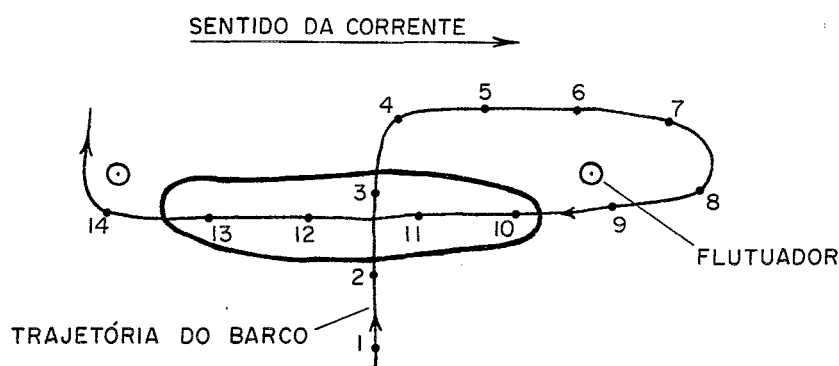
Nesta fase, foram introduzidas algumas modificações no sistema de marcação, de injeção e de rastreio. O material a ser marcado era constituído pela fração finado material dragado, inferior a  $40\mu\text{m}$ . A duração da injeção tornou-se mais curta, da ordem de 1 minuto. O esquema de injeção foi:





Procurou-se, pois, conseguir que o material injetado estivesse em baixas concentrações, para evitar a ocorrência de correntes de densidade no início do trabalho. Estas condições assemelham-se às reinantes em um ponto afastado da região de um eventual rejeito de material dragado.

O esquema de detecção é apresentado abaixo:



Neste caso, procura-se conseguir apenas as contagens máximas das nuvens e, simultaneamente, cruzar a nuvem, sucessivamente, no sentido transversal e longitudinal. A posição do barco, nesta campanha, foi obtida por radio-localização (Motorola) e lançada sobre uma carta de navegação, como anteriormente. O equipamento de detecção e o pessoal envolvido são os mesmos já detalhados para o caso dos trabalhos em regime de verão, exceto que o barco transportava 4 sondas, a -2, -4, -6 e -8m de profundidade aproximadamente, em relação à superfície.

## VII. RESULTADOS DAS MEDIDAS DE CAMPO

Os trabalhos realizados em Recife constaram de 2 campanhas distintas, uma realizada em regime de verão e outra em regime de inverno. As medições em verão foram executadas nos meses de novembro de 1976 e abril de 1977, enquanto a campanha de inverno foi realizada em junho de 1978. Neste tipo de trabalho, a diferença de condições hidráulicas reinantes nos dois períodos é mais importante em relação ao deslocamento do material que, após seu rejeito, tenha se depositado no fundo. Em relação ao trabalho em suspensão, os parâmetros mais importantes, que definem as direções e velocidades de deslocamento são o estágio da maré, a onda e o vento, sendo que apenas os 2 últimos dependem do regime hidráulico reinante. Entretanto, para maior clareza do trabalho, apresentaremos sucessivamente os resultados obtidos em regime de verão e de inverno.

### VII.1. As medições em regime de verão

#### VII.1.1. Condições experimentais em regime de verão.

São apresentados aqui os resultados de 5 campanhas de medição, realizadas nos dias 13, 16 e 18 de novembro de 1976 e 2 e 5 de abril de 1977. Essas medidas foram realizadas em diferentes estágios de maré e em diferentes condições hidrometeorológicas, com a finalidade de cobrir diversas configurações dos parâmetros que podem in

fluir na movimentação dos sedimentos em suspensão. É necessário dizer que, nesta primeira fase, a marcação foi realizada sobre uma amostra natural da vasa, em concentrações altas, entre 200g/l e 300g/l. A injeção foi realizada misturando-se o material marcado com cerca de 400l de vasa inativa, contida em 2 tambores, por meio de uma bomba. A finalidade deste método experimental era tentar reproduzir, tanto quanto possível, as condições reais de rejeito de um eventual despejo de vasa, por bombeamento, por sobre o recife. Já em regime de inverno, apenas foi marcada a fração fina, inferior a 40 microns, do sedimento. Além disso, a técnica de detecção adotada nesta campanha foi a de realizar-se coberturas completas da nuvem radioativa produzida após a injeção, em lugar de se seguir simplesmente o ponto de maior taxa de contagem, como no trabalho realizado em regime de inverno.

Os resultados encontrados utilizando técnicas distintas, em verão e no inverno foram, como se verá, concordantes.

As condições hidrometeorológicas e experimentais das medições realizadas em regime de verão são resumidas no quadro apresentado a seguir.

Observa-se que a maior parte das medições foi realizada a partir da meia maré enchente, para a qual devem ser encontrados os valores mais importantes das correntes de maré, dirigidas, além disso, do ponto de injeção para a região portuária. Os pontos de injeção da campanha de verão são apresentados na Fig. 18.

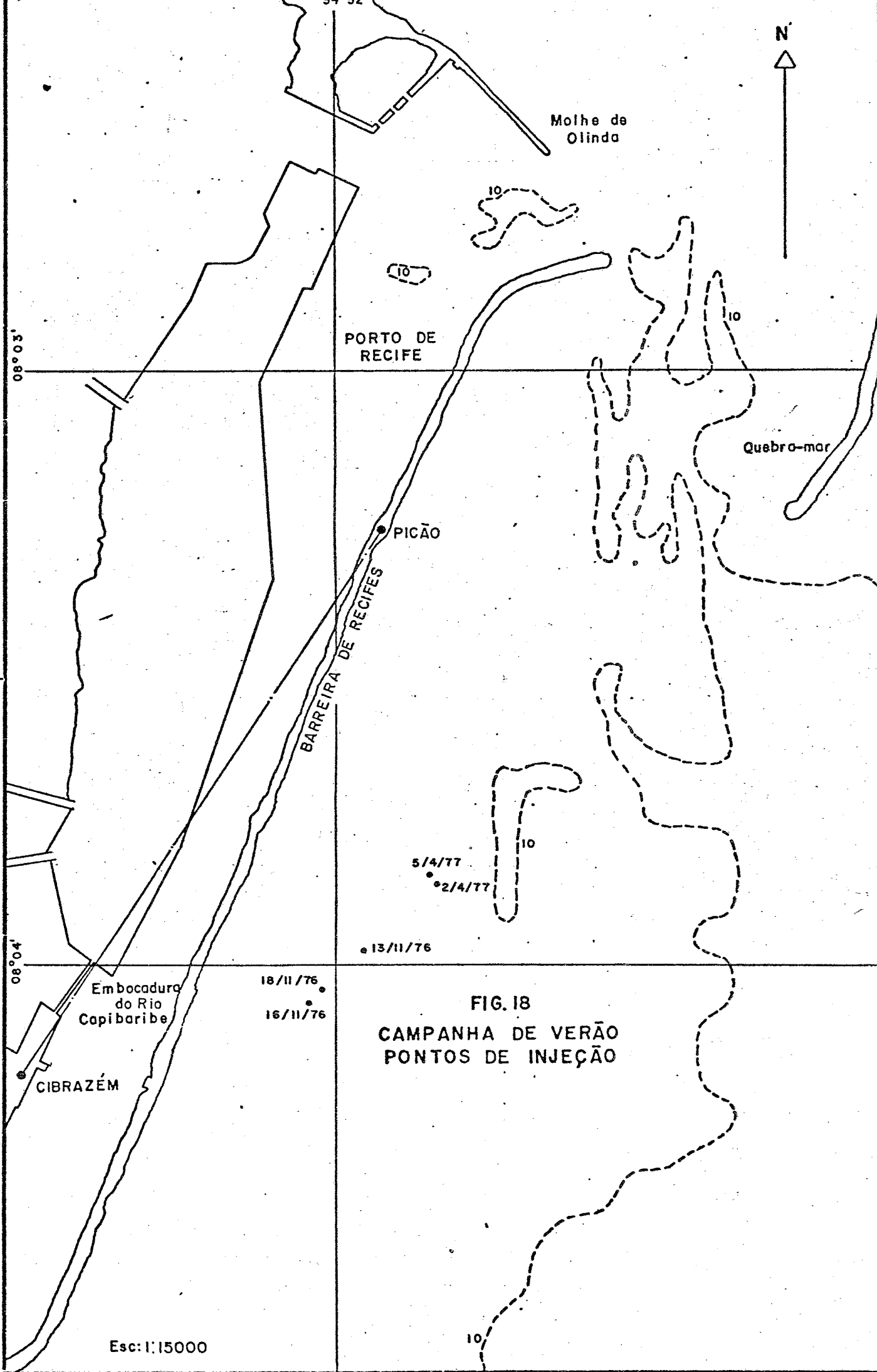


FIG. 18  
CAMPANHA DE VERÃO  
PONTOS DE INJEÇÃO

DATAS	02.04.77	05.04.77	13.11.76	16.11.76	18.11.76
Hora da Baixa Mar	08:30	10:38	13:44	17:22	06:55
Hora da Preamar	14:45	16:53	20:05	11:08	13:03
Hora da Injeção	11:06 MME	12:12 MME	13:55 B.M.	14:55 MMV	10:56 MME
Mar	Onda Leste	Onda a 150°	Agitado	Onda a 110/120°	Onda a 110/120° H = 1,5 a 2m T = 6 a 7s
Vento	NE	NE	NE Forte	NE	NE
Amplitude da Maré	2,2m	2,5m	1,10m	1,20m	1,9m

Os resultados destes trabalhos serão examinados em termos de advecção, decantação e dispersão.

### VII.1.2. Estudo da advecção em regime de verão.

Todas as detecções realizadas nesta campanha foram executadas por um barco que transportava 2 sondas de detecção, às profundidades de 2m e 8m.

Os traçadores seguiram percursos diversos em cada uma das medidas, em função da maré e do vento, principalmente. As velocidades de movimentação foram calculadas ora a partir das posições dos centros de gravidade das nuvens formadas, ora a partir das posições de todos os máximos de contagem observados lançados em função da distância. Os valores de velocidade encontrados foram, em geral, menores que os observados nas medições realizadas em regime de inverno.

#### VII.1.2.1. Injeção de 02/04/77.

Neste dia, a injeção foi realizada em meia-maré enchente, em maré de sizigia. O final da detecção deu-se praticamente na preamar. Após a injeção observou-se a formação de 2 nuvens distintas,  $A_1$  e  $A_2$ , Fig. 19, na sonda a 2m de profundidade. A nuvem  $A_2$ , que estava a SE do ponto de injeção, foi perdida nas medidas posteriores e, com ela, a maior parte da atividade presente. As nuvens seguintes mostram um alongamento pronunciado, na direção NE-SW, dirigindo-se o conjunto lentamente para E.

Trata-se de um caso, portanto, no qual o vento

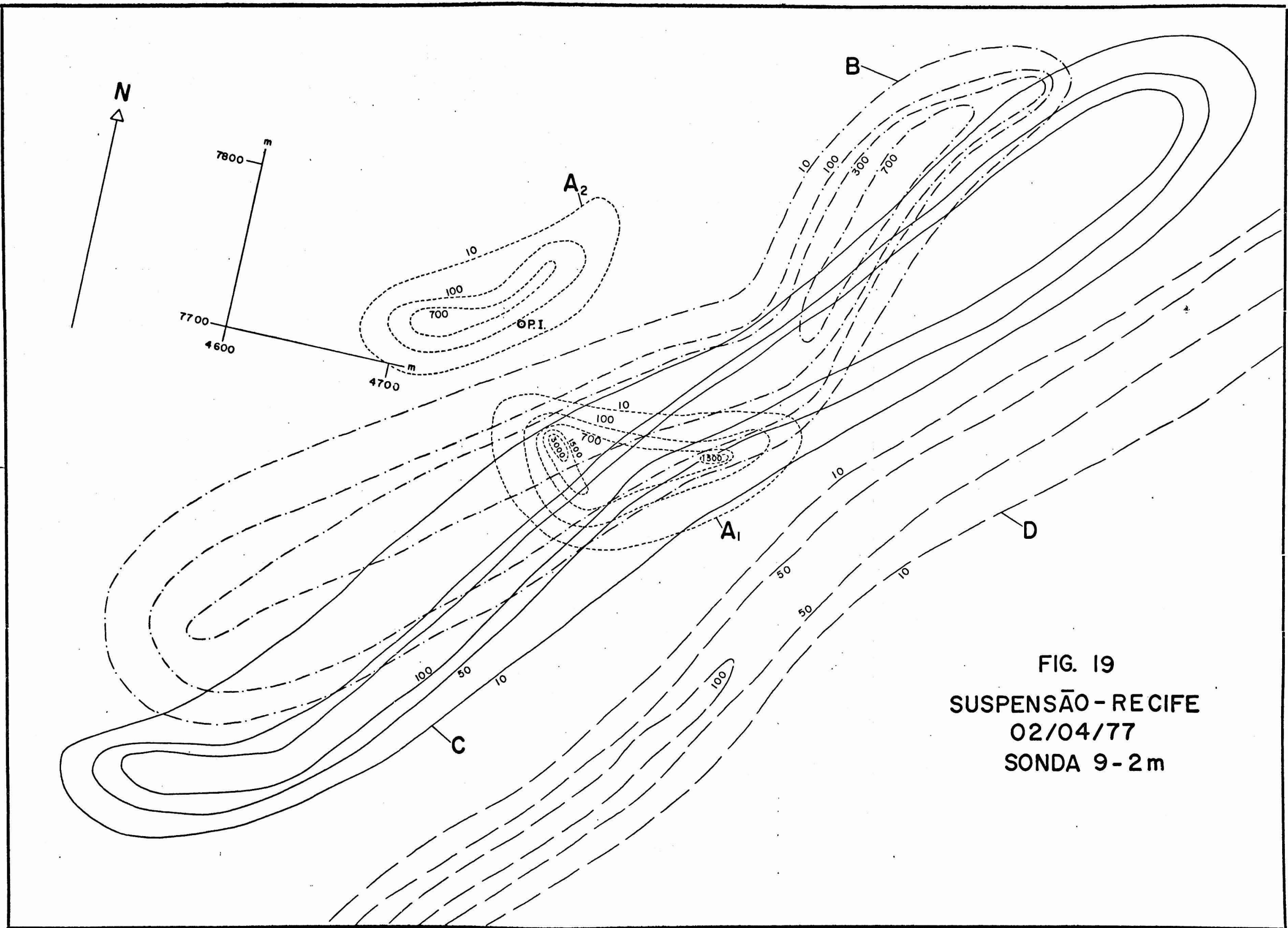


FIG. 19  
SUSPENSÃO-RECIFE  
02/04/77  
SONDA 9-2m



NE tem o papel mais importante na dispersão do sedimento próximo à superfície, apesar de se estar em meia maré enchente de sizígia.

Não se conseguiu detectar o material próximo ao fundo, que acompanhou provavelmente a corrente de maré, dirigindo-se para o N.

As posições sucessivas dos centros de gravidade da nuvem mostram um movimento inicial para o leste, que sofre modificação pronunciada ao se aproximar a preamar, dirigindo-se para SE.

As velocidades de movimentação da nuvem são muito baixas. Parece, portanto, que, neste dia, foi acompanhada apenas a evolução do material mais fino contido no sedimento injetado, o qual, por se manter próximo à superfície, foi fortemente influenciado pelo vento.

#### VII.1.2.2. Injeção de 05/04/77.

Trata-se de uma injeção realizada, como no caso anterior, em meia maré enchente de sizígia.

Neste caso, foi possível acompanhar as nuvens formadas a -2m e a -8m. Houve, mais uma vez, uma nítida separação entre o material da superfície, que se dirigiu para S e o material de fundo, que tomou a direção N, Fig. 20 e 21. As velocidades foram calculadas, para a nuvem

FIG. 20  
SUSPENSÃO - RECIFE  
05/04/77  
SONDA 10 - 8 m

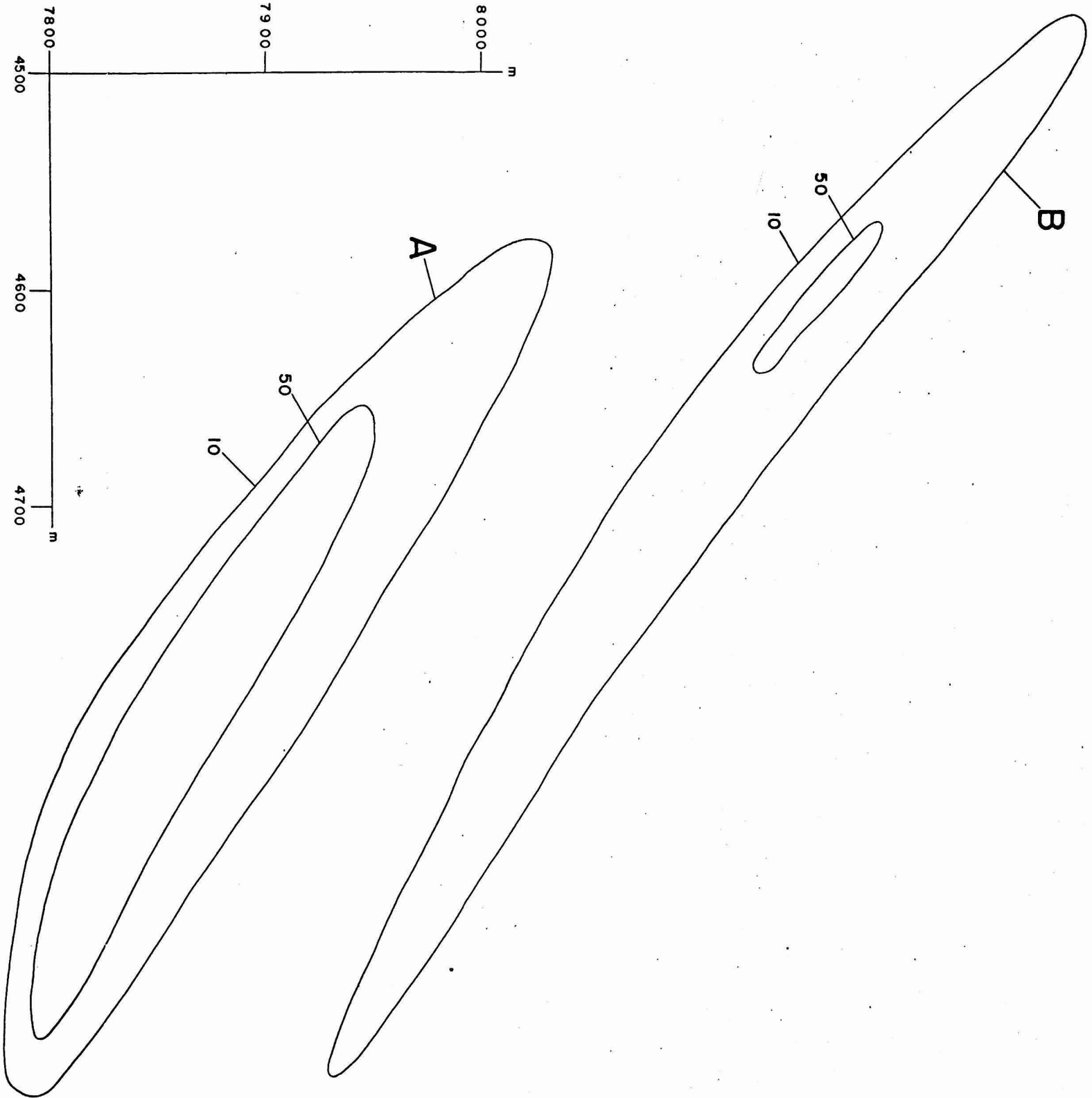
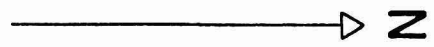
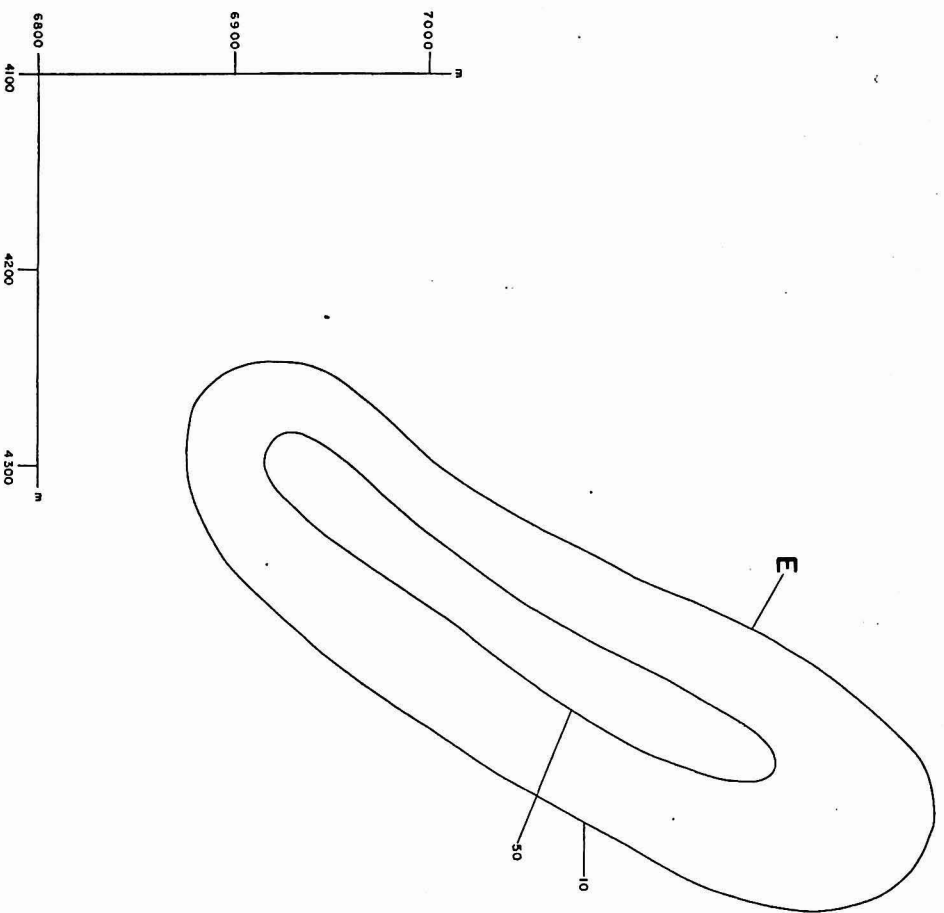
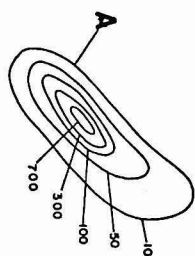
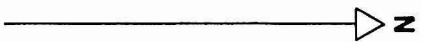


FIG. 21  
SUSPENSÃO - RECIFE  
05/04/77  
SONDA 9 - 2m

ORL.



de fundo, a partir das posições sucessivas dos centros de gravidade, sendo da ordem de 0,10m/s.

Também neste caso, o material da superfície sofreu a influência do vento, que vinha de NE, enquanto o material de fundo deslocou-se em direção ao porto, por influência das correntes de maré.

#### VII.1.2.3. Injeção de 13/11/76.

A injeção foi realizada na baixamar, em maré de quadratura. O vento, que era NE fraco no início do trabalho, passou a NE forte no final das detecções, com mar bastante agitado. Neste caso, tanto na superfície, como no fundo, o movimento foi para SSE, apesar de se estar em maré enchente. O alongamento sofrido pelas nuvens, Fig. 22 e 23, tem a direção SW, o que corresponde ao efeito do vento reinante. Foram detectadas ao todo 7 nuvens completas.

As velocidades, para a nuvem de superfície, foram calculadas a partir das posições sucessivas dos centros de gravidade das nuvens registradas, estando a sua mêdia em torno de 6cm/s. Ainda neste caso, o vento predominou sobre as correntes de maré, tanto na superfície, como no fundo. A detecção foi encerrada aproximadamente em meia maré enchente, quando deveriam prevalecer correntes de maré mais intensas. Mesmo assim, não foi observada nenhuma tendência de modificação na direção do movimento das nuvens finais da detecção.

FIG. 22  
SUSPENSÃO - RECIFE  
13/11/76-2m

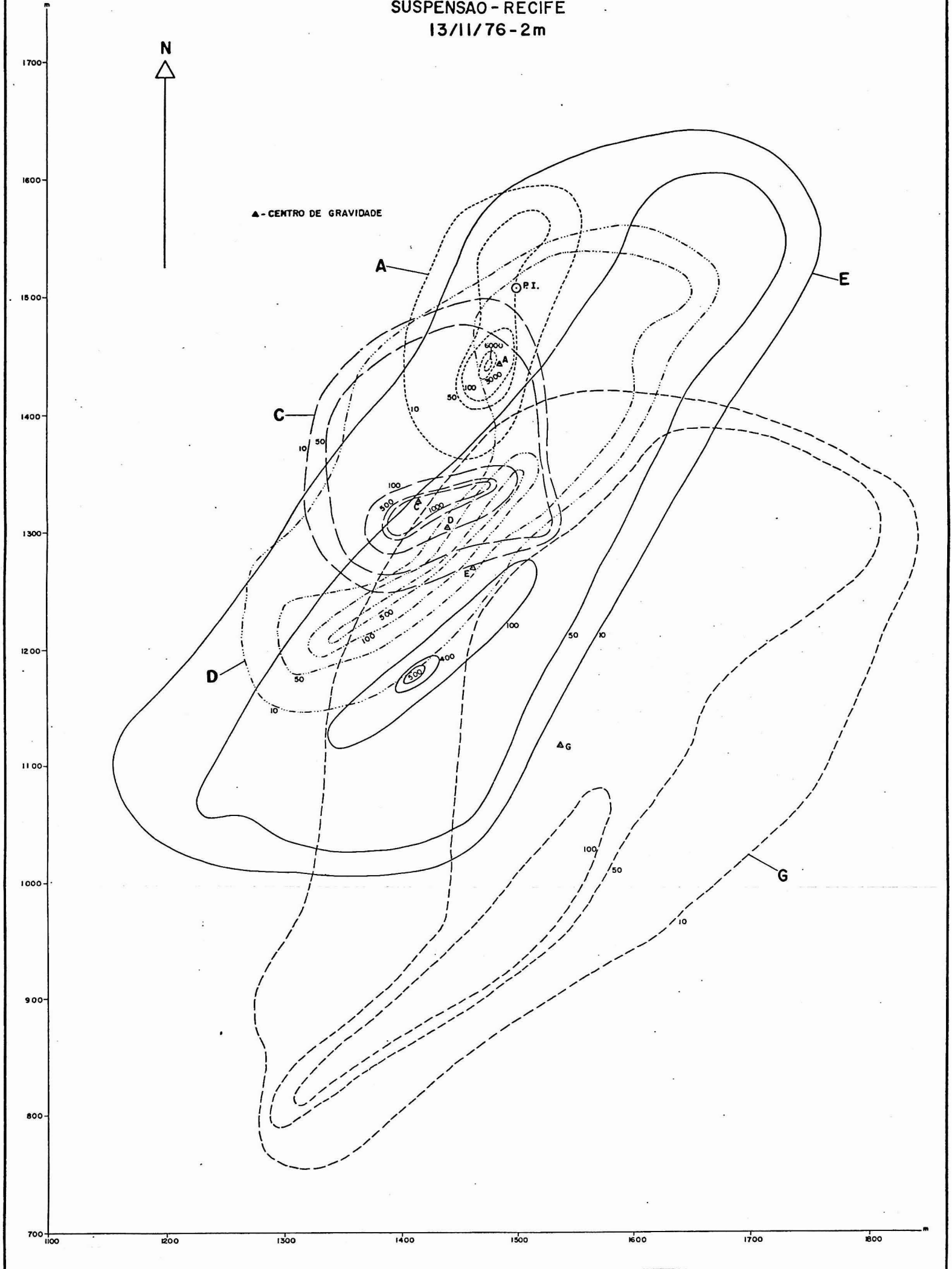
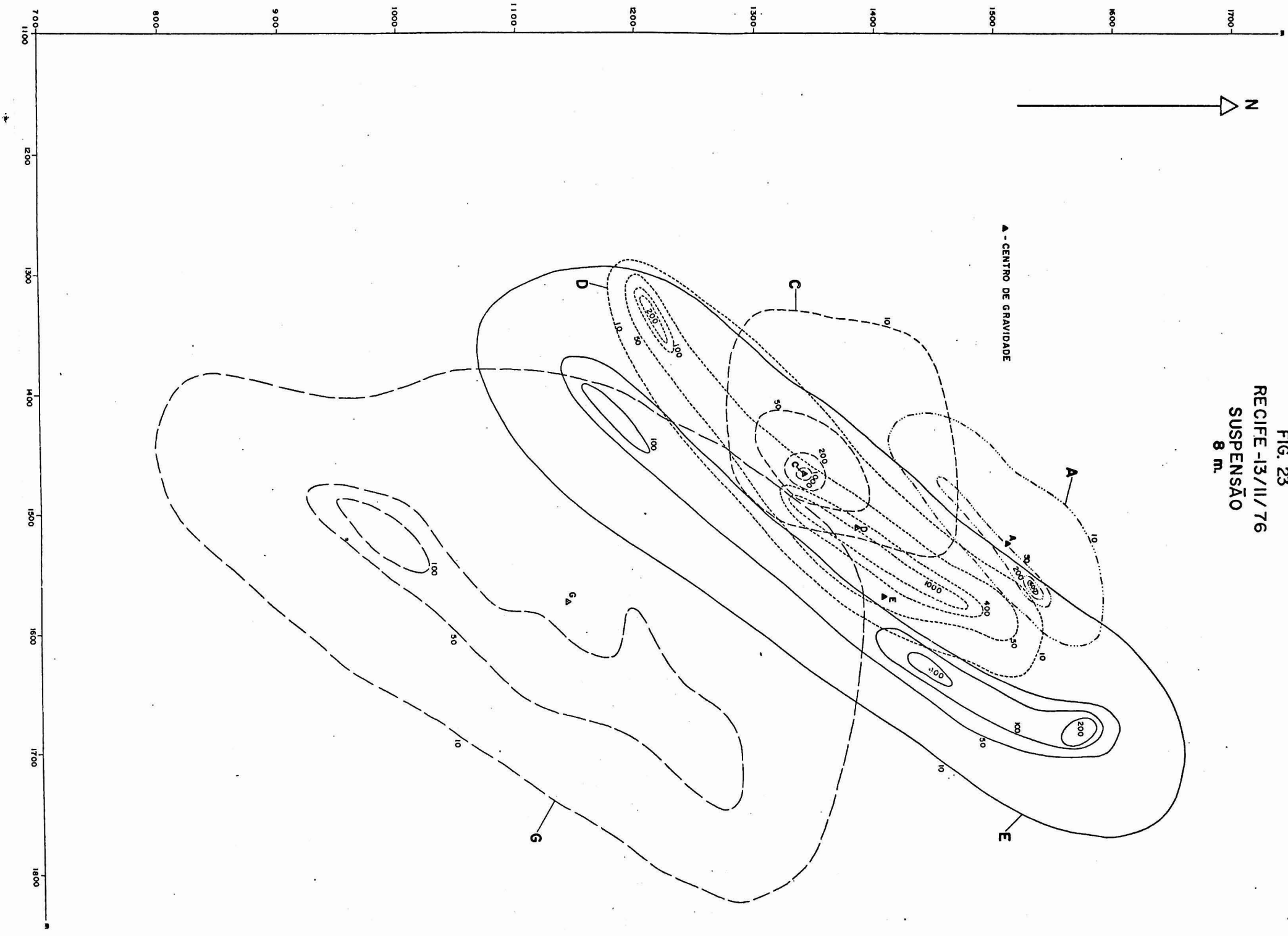


FIG. 23  
RECIFE -13/11/76  
SUSPENSÃO  
8 m.



## VII.1.2.4. Injeção de 16/11/76.

A injeção foi realizada em meia maré vazante, terminando-se os trabalhos nas proximidades da estofa de baixamar. O vento NE era fraco.

O movimento global das nuvens de fundo tem a direção SSW, o que concorda com o vento e o estágio da maré, Fig. 24. As últimas nuvens da detecção apresentam também uma componente para o largo, o que se deve à aproximação da inversão da maré. A velocidade, calculada a partir das posições dos centros de gravidade das três primeiras nuvens é de 0,13m/s; nas nuvens seguintes este valor decresce para 0,06m/s, o que deve também resultar da aproximação da baixamar.

Para a nuvem da superfície, a direção geral de movimentação é também SSW, coincidindo com o fundo, Fig. 25.

Um cálculo de velocidades realizado a partir da distribuição das taxas de contagem máximas em função do espaço produziu valores entre 0,19m/s e 0,25m/s. A partir das posições sucessivas dos centros de gravidade, obteve-se uma velocidade média da ordem de 0,15m/s. Pode-se, então, adotar um valor de  $\underline{U}$  da ordem de 0,20m/s.

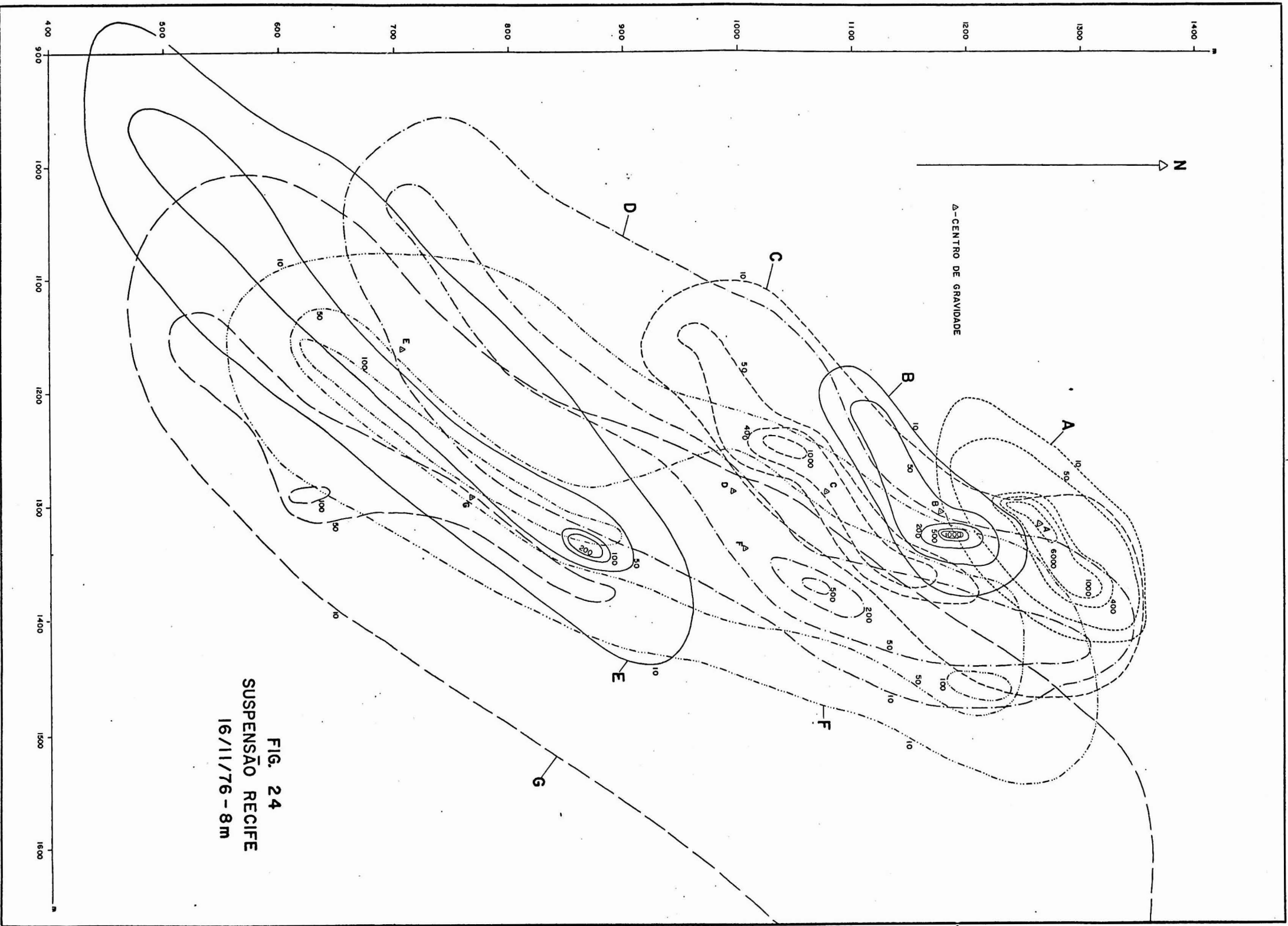


FIG. 24  
 SUSPENSÃO RECIFE  
 16/11/76 - 8m



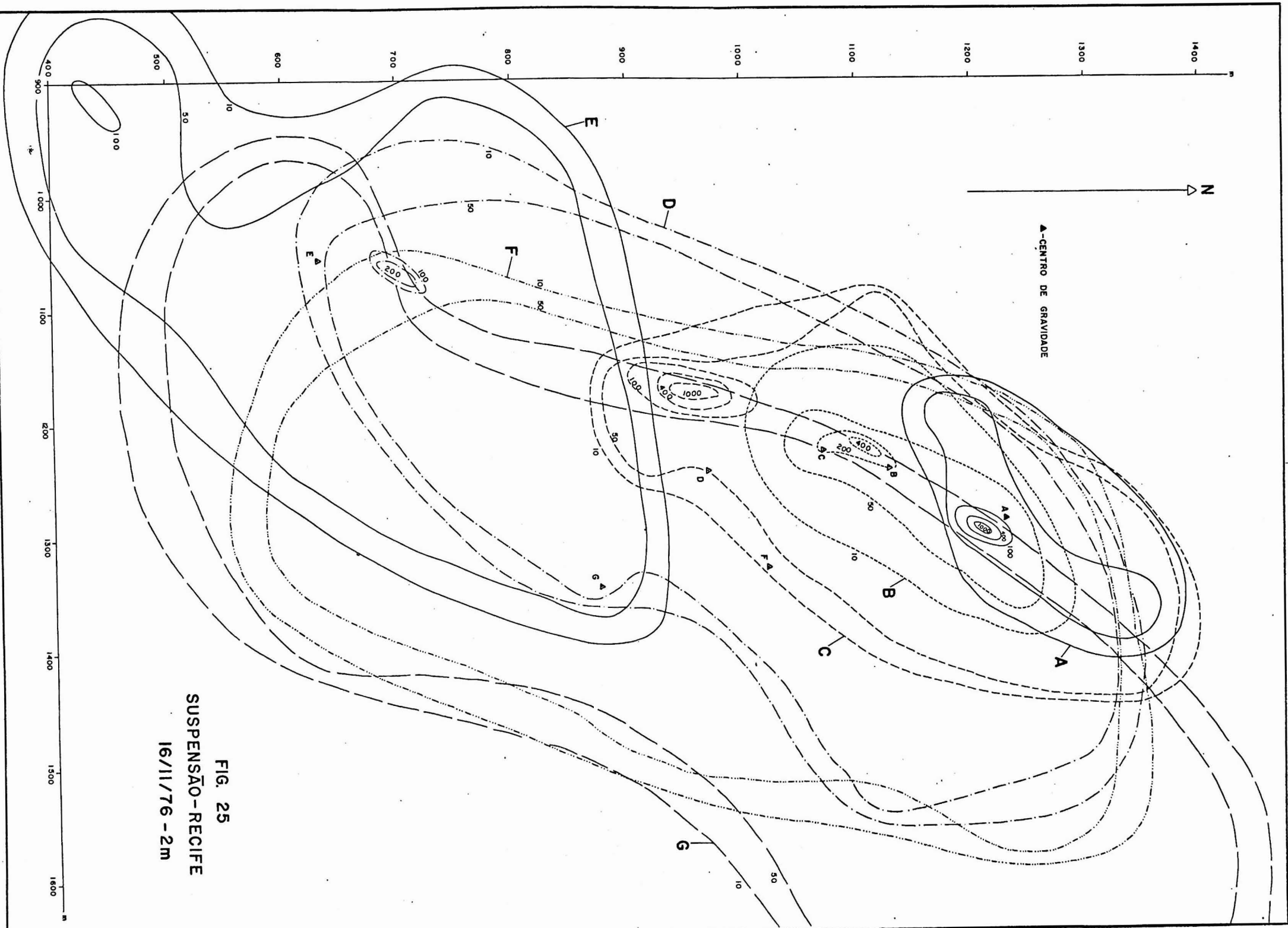


FIG. 25  
 SUSPENSÃO - RECIFE  
 16/11/76 - 2m

## VII.1.2.5.A injeção de 18/11/76.

A injeção foi realizada em meia maré enchente e encerrada no início da vazante.

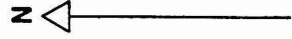
A onda tinha uma direção entre E e SE, com amplitudes entre 1,5m e 2m e um período entre 6 e 7 segundos. O vento era NE.

Para o material do fundo, o movimento observado até cerca de 2 horas após a injeção mostra um movimento para o N, Fig. 26, o que está de acordo com o estágio da maré. A partir daí, o material tem tendência a se deslocar para o E, o que corresponde ao início da inversão da maré. As velocidades de deslocamento também são baixas. O cálculo da média das velocidades entre as contagens máximas de 2 nuvens consecutivas fornece  $U = 0,08\text{m/s}$ . O cálculo do valor médio da velocidade entre posições consecutivas dos centros de gravidade de cada uma das nuvens fornece  $U = 0,06\text{m/s}$ . O mesmo valor é obtido a partir de um gráfico da distância de todos os picos em relação ao ponto de injeção em função do tempo (Fig. 27):

$$U = 0,06\text{m/s}.$$

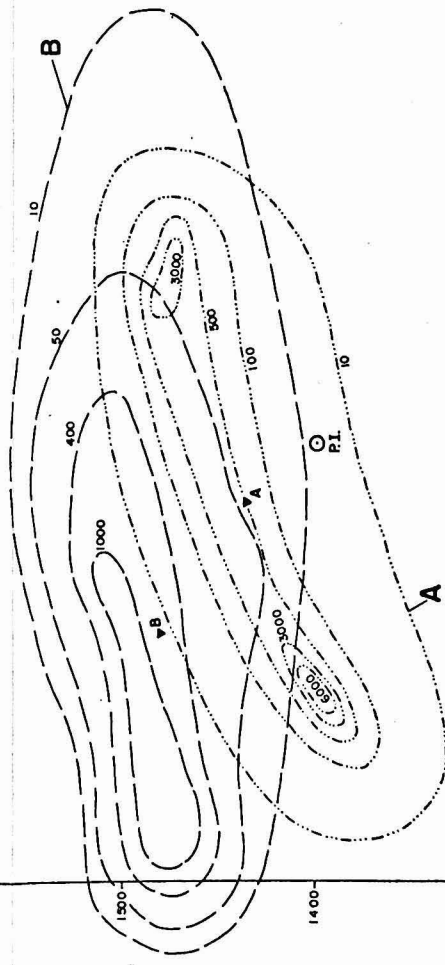
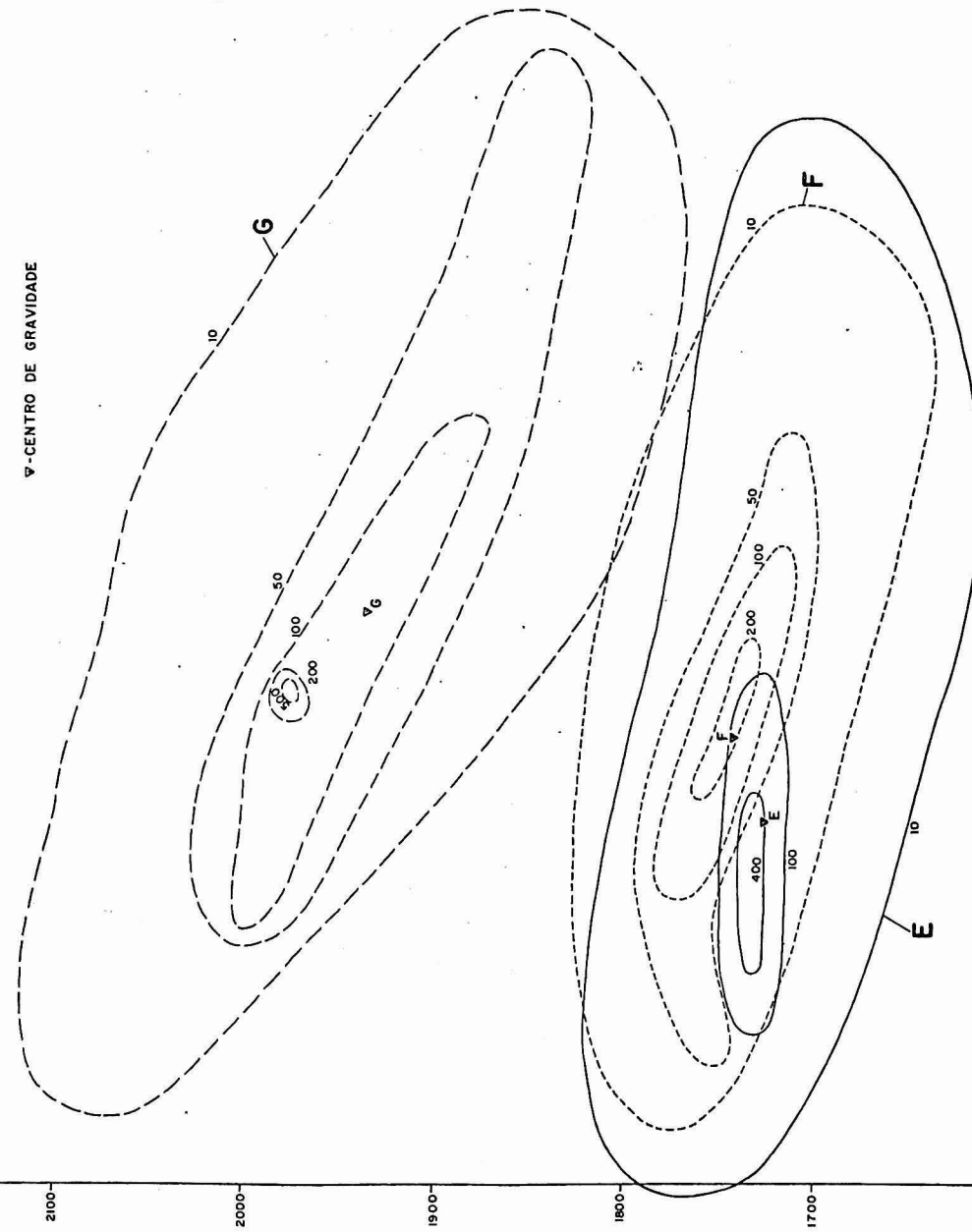
Para o material da superfície, parece ter havido a formação de 2 nuvens, separadas por uma região com baixa atividade, Fig. 28. Isto foi observado nas nuvens A, B, C e D. Nas nuvens posteriores, a parte situada mais a oeste foi

FIG. 26  
SUSPENSÃO - RECIFE  
18/11/76  
SONDA 9 - 8m



2200  
2100  
2000  
1900  
1800  
1700  
1600  
1500  
1400  
1300

∇ - CENTRO DE GRAVIDADE



1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 m

FIG. 27

DISTÂNCIA DOS PICOS AO PONTO DE INJEÇÃO  
8 m, 18/II/76

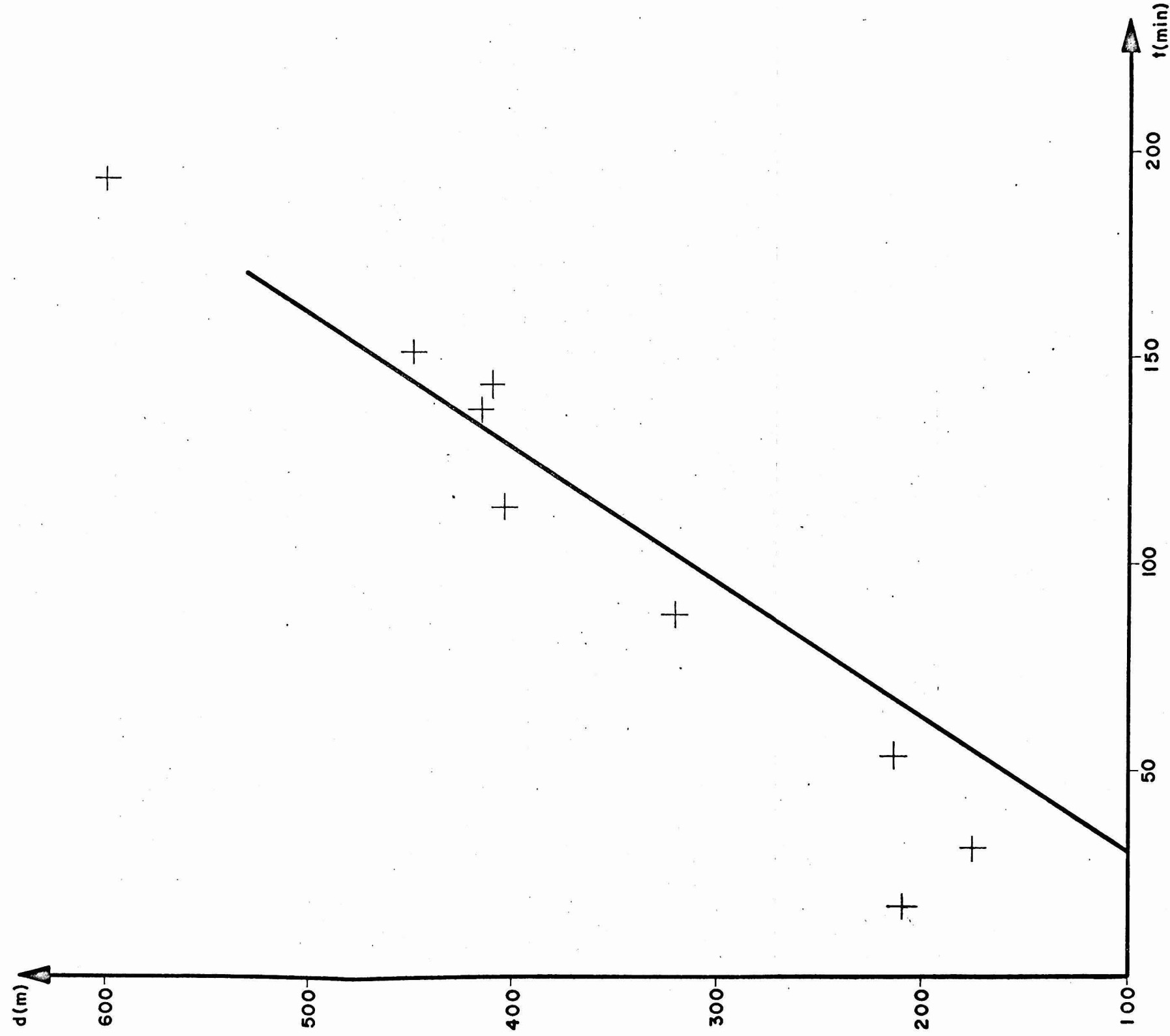
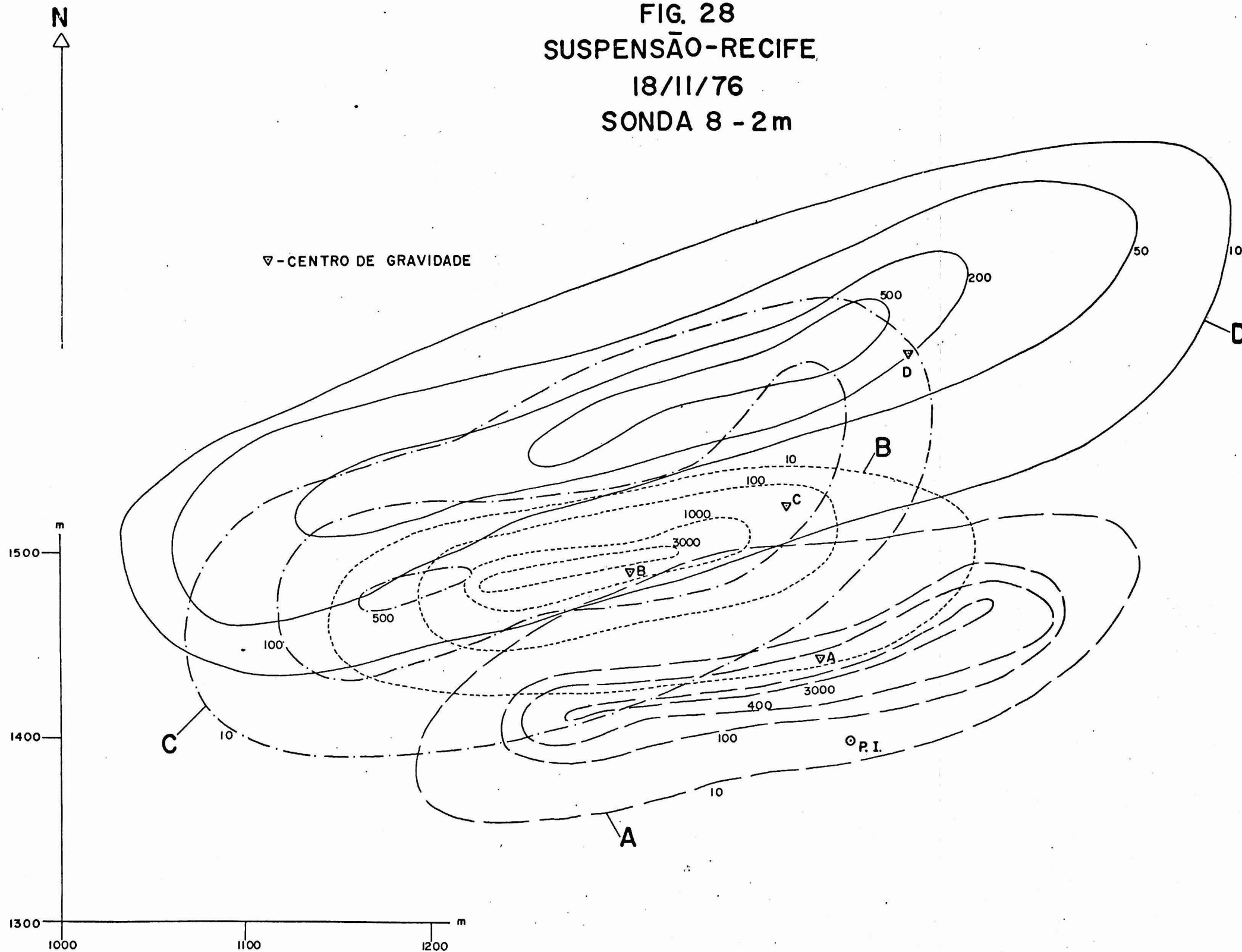


FIG. 28  
SUSPENSÃO-RECIFE,  
18/11/76  
SONDA 8 - 2m



abandonada, por impossibilidade de se cobrirem as 2 re  
giões simultaneamente. Portanto, há 2 direções de movi  
mento: NNW (abandonada nas nuvens finais) e NNE. A velo  
cidade média correspondente a esta última direção, calcu  
lada a partir das posições dos centros de gravidade, é  
muito pequena, da ordem de 0,05m/s.

#### VII.1.2.6. Conclusões sobre a advecção em regime de verão.

Os resultados obtidos são resumidos na tabela a  
nexa. Pode-se observar que os 2 agentes principais de  
transporte são o vento e a maré, sendo que o primeiro in  
flui principalmente sobre o material da superfície, como  
era de se esperar. Houve um caso, inclusive, em que a nu  
vem da superfície seguiu o vento e a nuvem de fundo se  
guiu a maré. Entretanto, no dia 13/11, o vento predomi  
nou sobre a maré, no fundo e na superfície: foi um caso de  
ventos fortes, combinados com maré de quadratura. As ve  
locidades encontradas são baixas, exceto para o dia 16/11.

Em regime de verão, pode-se concluir que uma  
descarga de material realizada em maré vazante irá diri  
gir-se na direção geral do sul. O vento NE pode influen  
ciar grandemente na movimentação do sedimento em suspen  
são, mesmo no caso de marés enchentes de sizígia, ajudan  
do a manter o material afastado da região portuária. En  
tretanto, em marés enchentes e com vento pouco intenso, a  
direção de movimentação do material tenderá a ser da re  
gião de despejo para a zona portuária.

A ADVECCÃO EM REGIME DE VERÃO

DATA		02/04	05/04	13/11	16/11	18/11
DIREÇÃO DE MOVIMENTO	FUNDO	---	N	SSE	SSW	N
	SUPERF.	SW	S	SSE	SSW	NNW e NNE
VELOCIDADE U (m/s)	FUNDO	---	0,10	---	0,13	0,06
	SUPERF.	~0,05	---	0,06	0,20	0,06
CAUSA PRINCIPAL DO MOVIM.	FUNDO	---	Maré	Vento	Maré, Vento	Maré
	SUPERF.	Vento	Vento	Vento	Maré, Vento	Maré

### VII.1.3. Estudo da decantação em condições de verão.

O valor das taxas de decantação é determinado a partir das curvas envoltórias das taxas de atividade máximas em função do tempo. No presente caso, em vista da técnica de detecção adotada (cobertura completa da nuvem), o número de máximos obtidos é muito inferior aos obtidos nas detecções de inverno. Seria de se esperar, portanto, que os resultados obtidos para as taxas de decantação fossem menos precisos do que os conseguidos na campanha de inverno. Na realidade, os valores obtidos não são essencialmente diferentes nos dois períodos.

Os resultados obtidos a partir das envoltórias das curvas de taxas de contagem máxima em função do tempo, Fig. 29 a 35, são resumidos na tabela anexa.

Observa-se de um modo geral, que os valores obtidos para SR, a taxa de decantação, são da ordem de 100 gramas por tonelada e por segundo. Estes valores são, como será visto posteriormente, maiores que os encontrados para as medições de inverno. Isto parece razoável, em vista da maior concentração e granulometria do material injetado na campanha de verão.

O cálculo dos parâmetros do escoamento,  $m$  e  $\phi$ , é realizada a partir da expressão 34, já vista no desenvolvimento teórico,

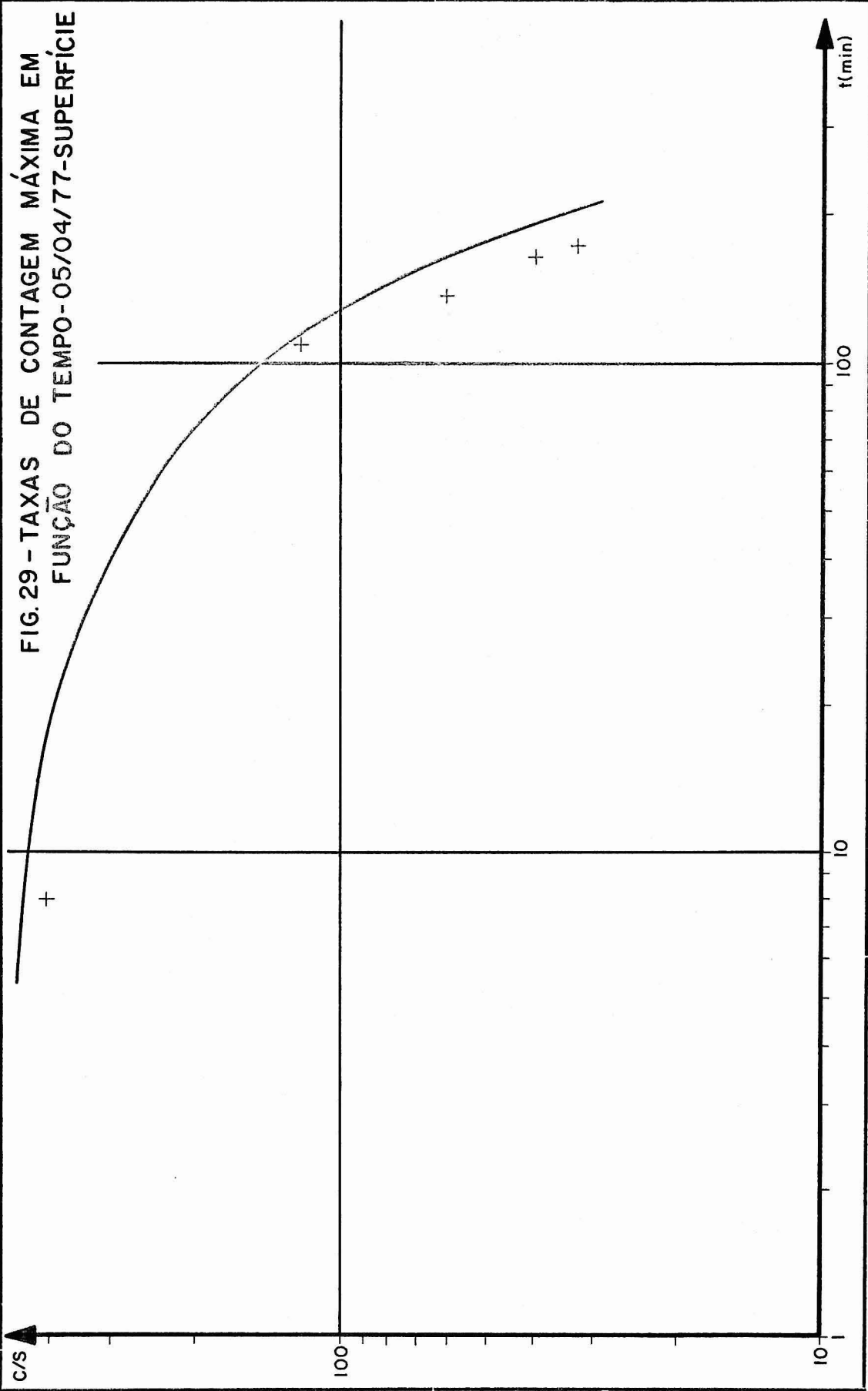
$$m = - 70 \frac{H\phi}{U} \frac{R_1}{R_0}$$



## VALORES DAS TAXAS DE DECANTAÇÃO

DATA	FIGURA	$R_0$ (c)	$R_1$ (c/s)	$t_0$ (min)	SR (g/T.s)
05/04/77 Fundo	29	$1,14 \times 10^5$	-140	+ 5	120
13/11/76 Sup	30	$1,62 \times 10^6$	-135	- 2	80
13/11/76 Fundo	31	$7,35 \times 10^6$	-594	-57	80
16/11/76 Sup	32	$4,27 \times 10^5$	- 45	-12	110
16/11/76 Fundo	33	$1,74 \times 10^6$	-166	- 2	100
18/11/76 Sup	34	$3,48 \times 10^6$	-286	-27	80
18/11/76 Fundo	35	$2,76 \times 10^6$	- 99	-10	40

FIG. 29 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMA EM  
FUNÇÃO DO TEMPO-05/04/77-SUPERFÍCIE



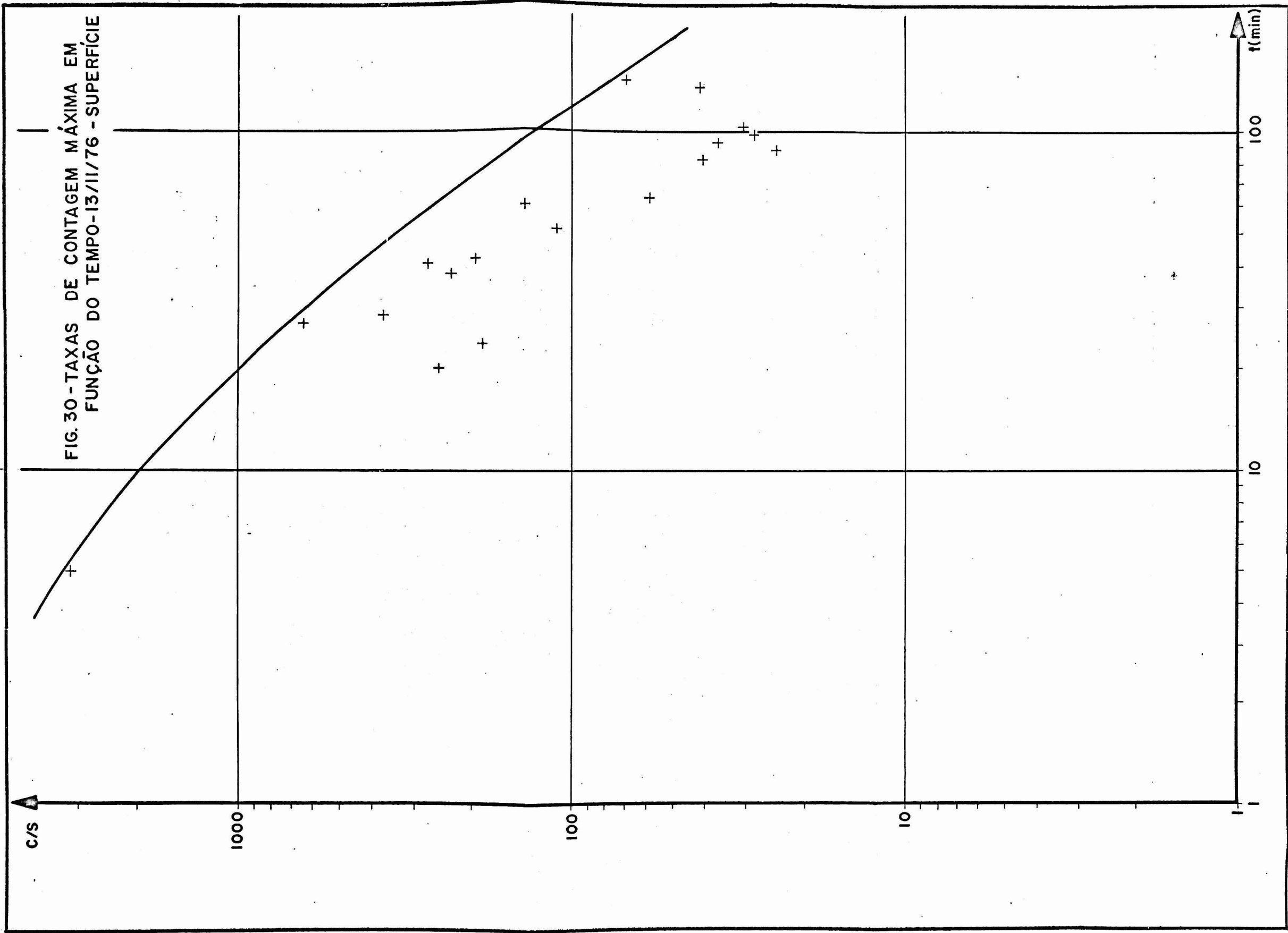


FIG. 30 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMA EM  
FUNÇÃO DO TEMPO-13/11/76 - SUPERFÍCIE

FIG. 31 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMA EM  
FUNÇÃO DO TEMPO - 13/II/76 - FUNDO

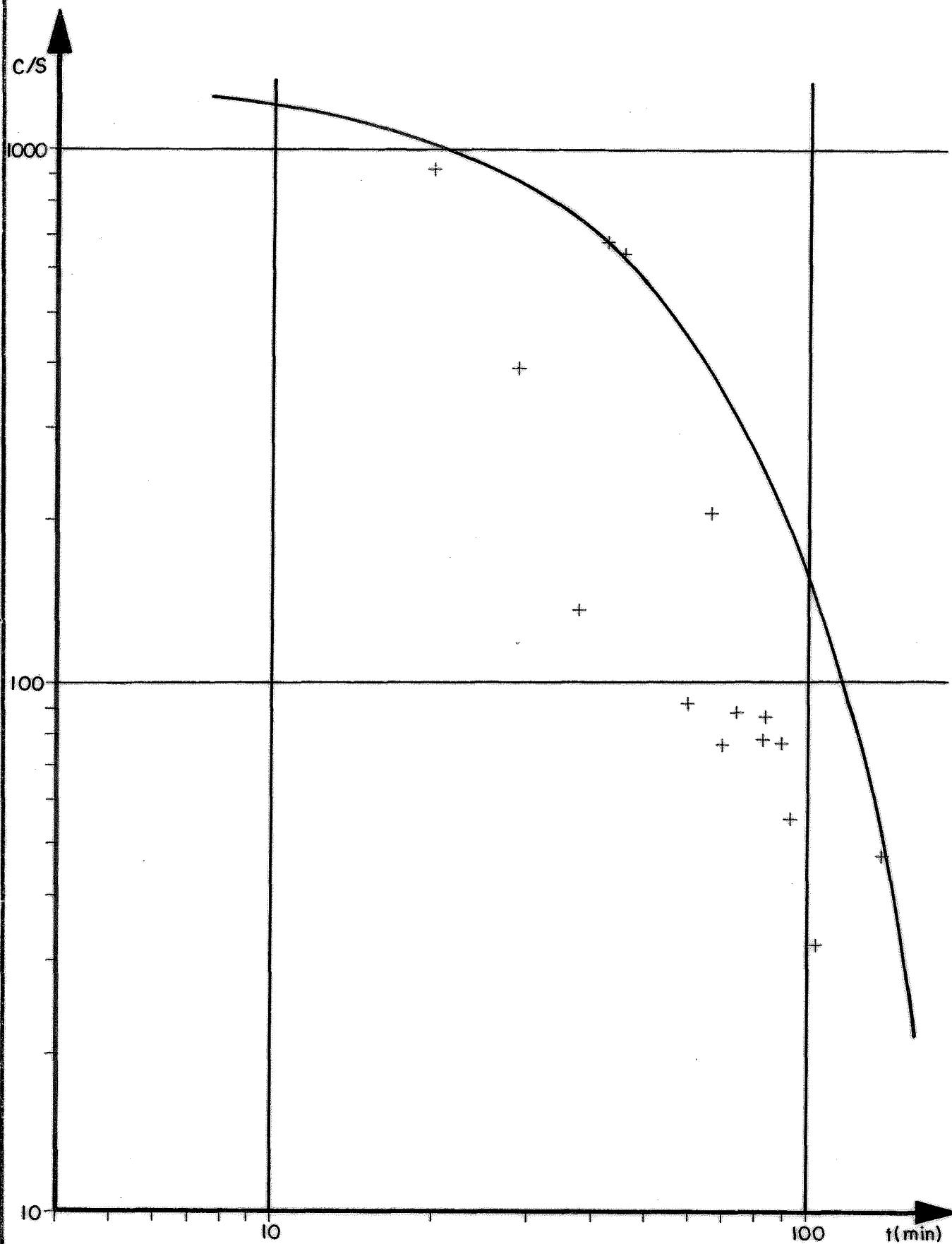


FIG.32 -TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMA EM  
FUNÇÃO DO TEMPO-16/II/76- SUPERFÍCIE

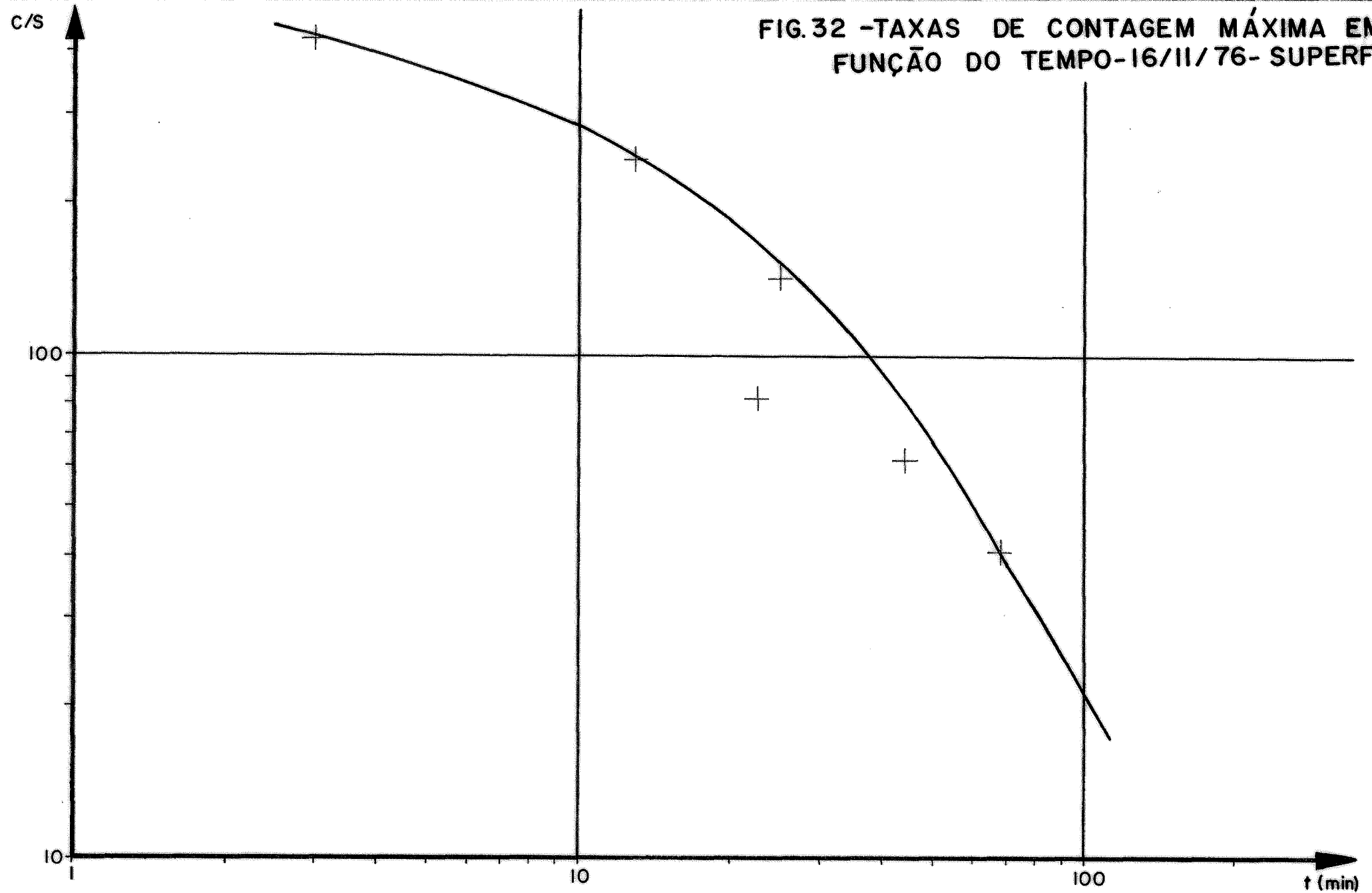


FIG. 33 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO - 16/11/76 - FUNDO

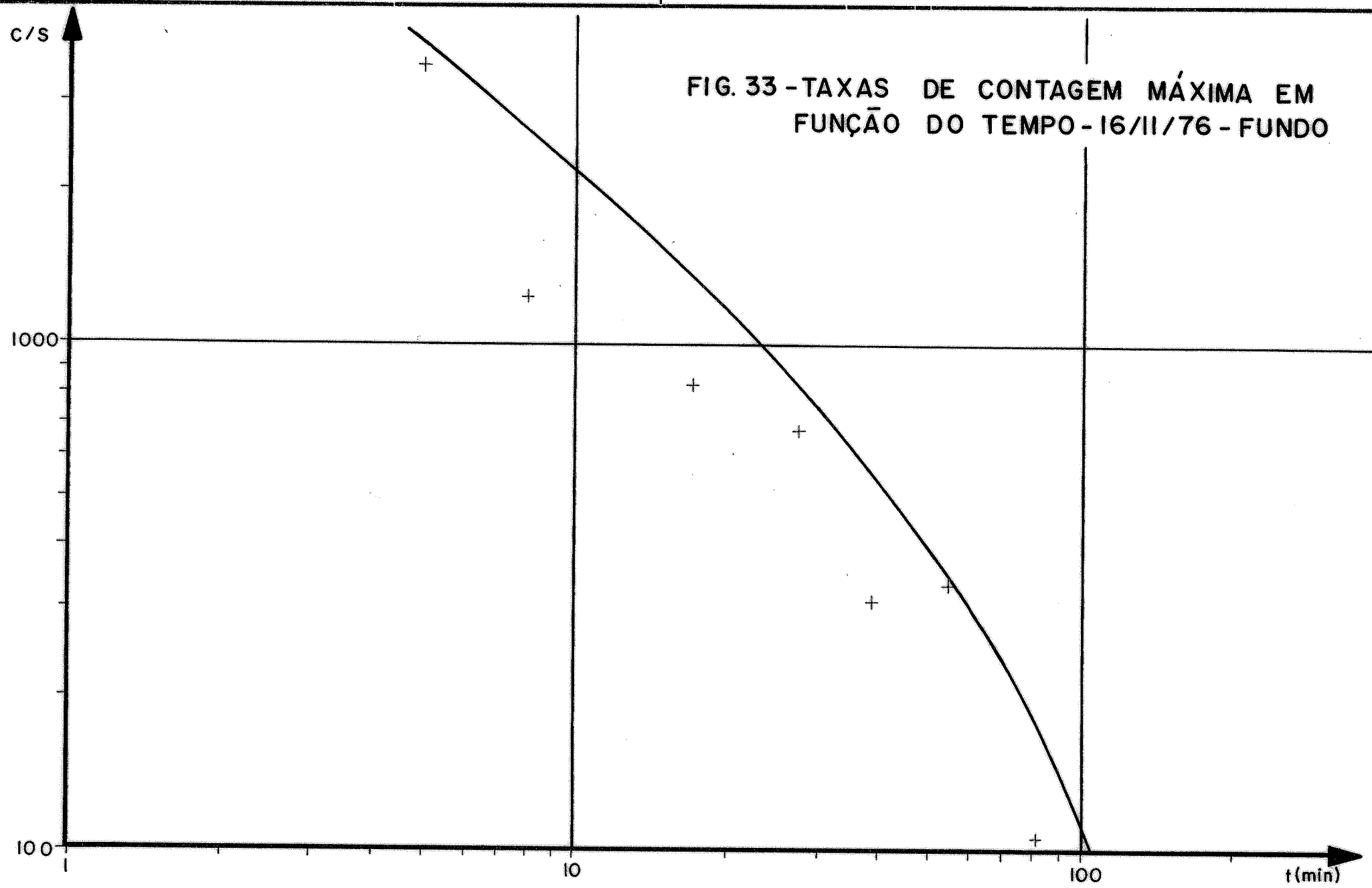


FIG.34 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO - 18/II/76 - SUPERFÍCIE

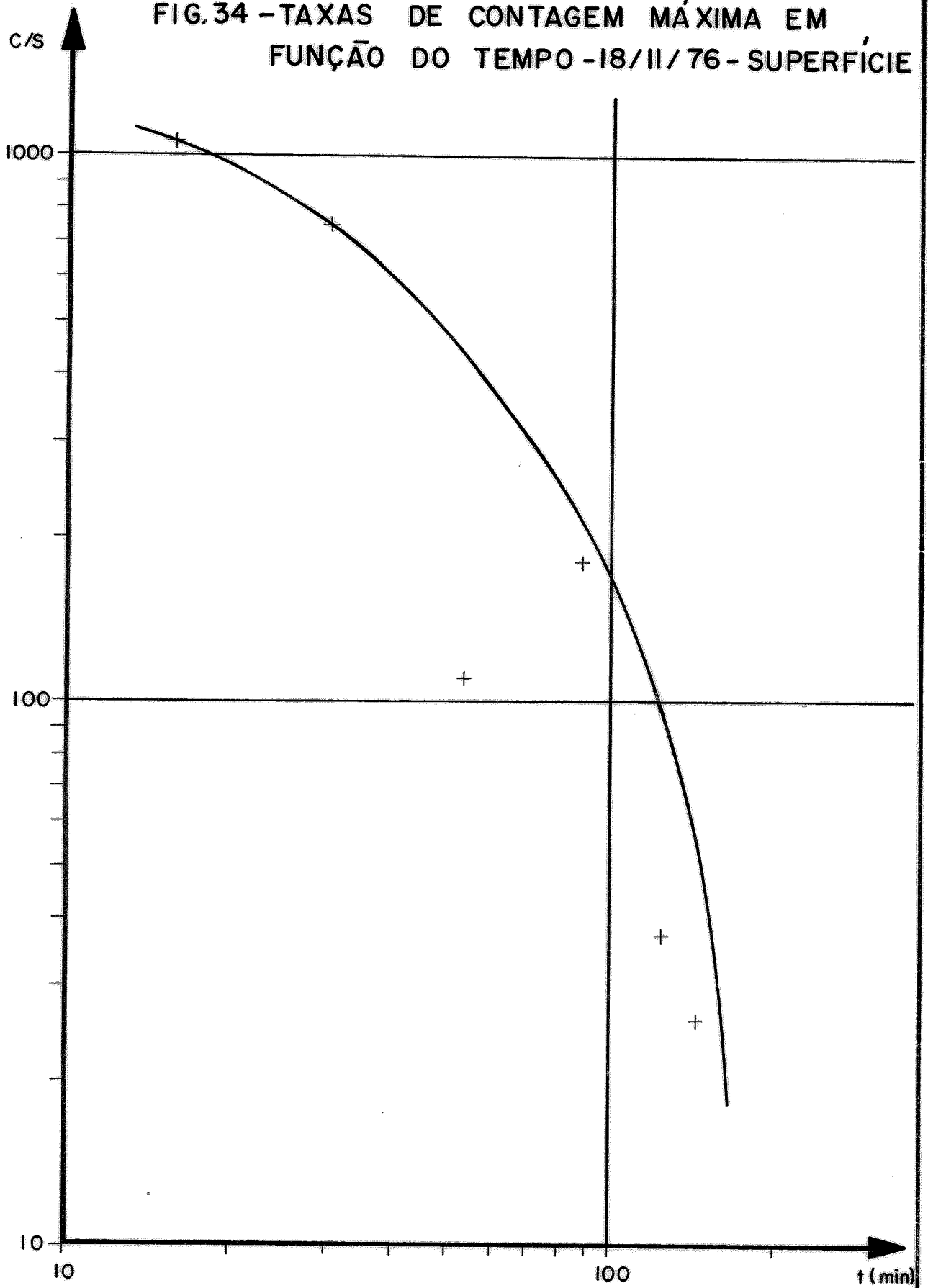
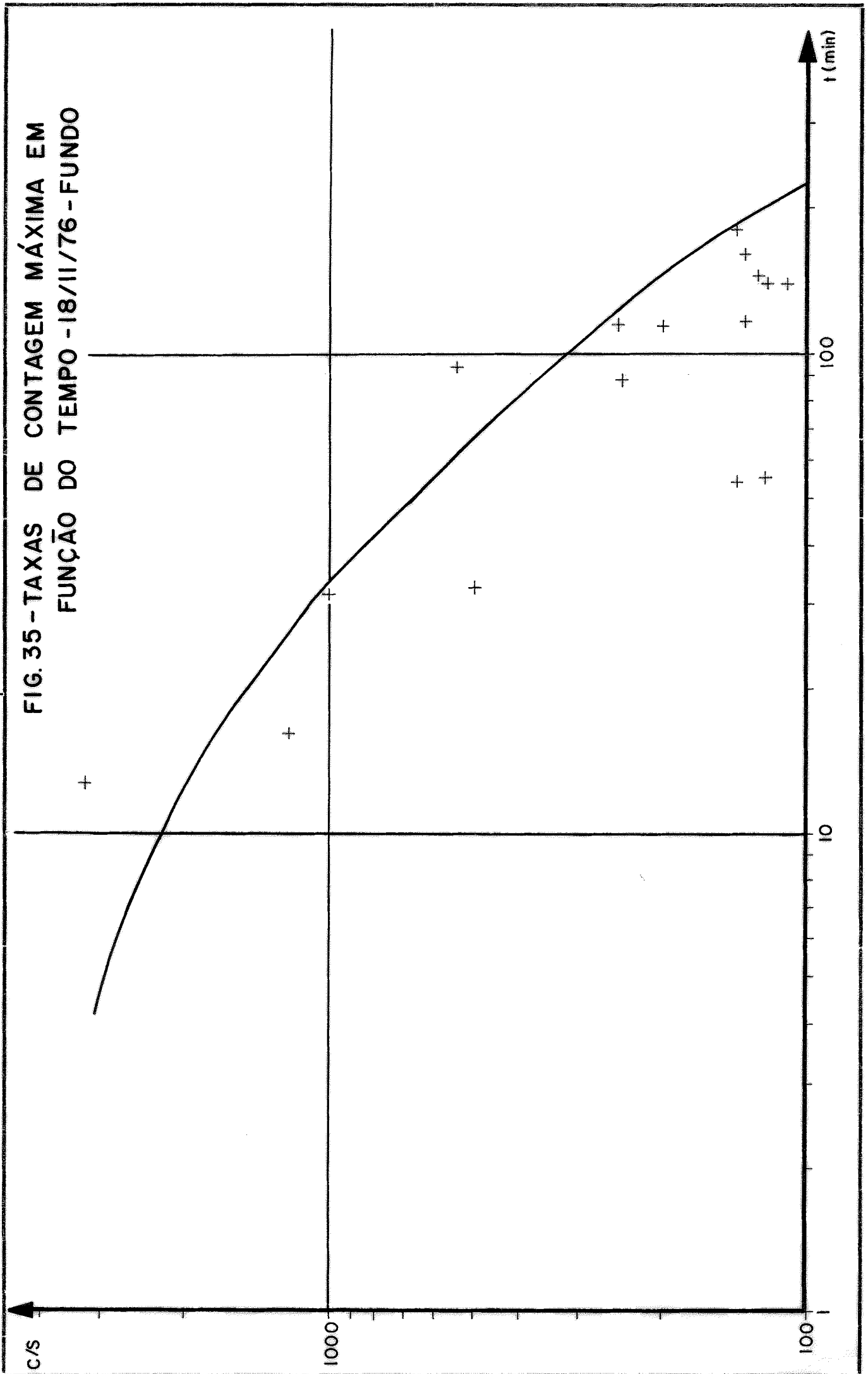


FIG. 35 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMA EM FUNÇÃO DO TEMPO - 18/11/76 - FUNDO





A partir desta expressão, obtêm-se uma relação entre  $m$  e  $\phi$ , que, introduzida na Fig. 36, permite calcular-se estes dois parâmetros. A Fig. 36 representa a relação teórica entre  $m$  e  $\phi$ , ref. 8. Determinados  $m$  e  $\phi$ , pode-se calcular  $V$ , a velocidade real de decantação das partículas marcadas em meio turbulento, pela expressão

$$V = - H\phi \frac{R_1}{R_0}$$

Os resultados obtidos são apresentados em tabela anexa.

De um modo geral, as velocidades de decantação obtidas são da mesma ordem que a medida em laboratório e em água calma, que era 0,18mm/s. Apenas na detecção de 16/11/76, observam-se valores de  $v$  2 ou 3 vezes maiores do que os encontrados nas outras medições.

Os valores de  $m$  obtidos indicam que o meio é mal misturado; um valor de  $m$  pequeno é uma indicação de bom misturamento no nível observado.

Pode-se concluir, portanto, que as taxas de decantação observadas em regime de verão eram da ordem de 100g/T.s. Além disso, os valores da velocidade de sedimentação, nesta mesma época, são da ordem de 0,16mm/s, comparáveis às obtidas em laboratório, em água calma.

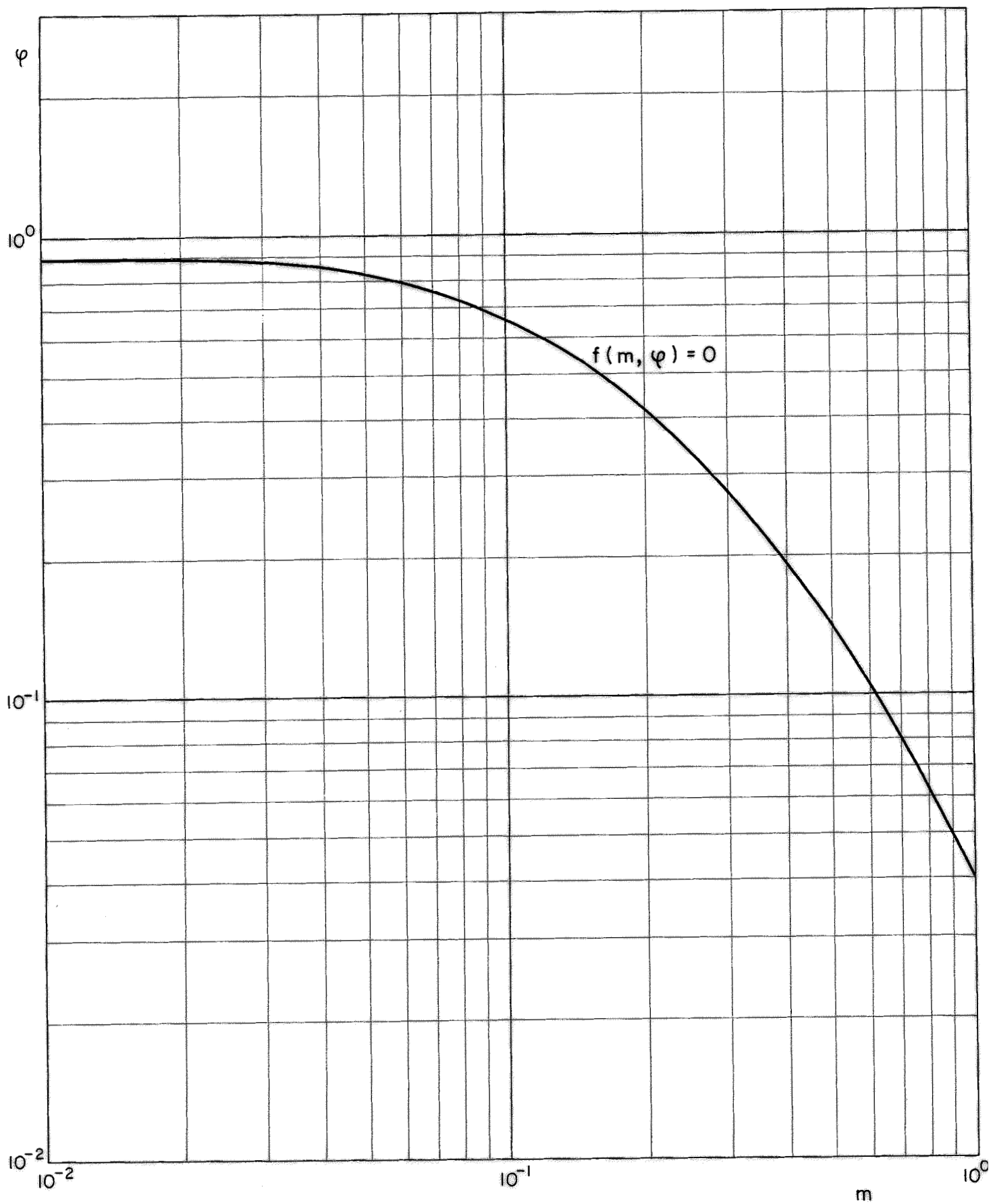


FIG. 36 - RELAÇÃO TEÓRICA ENTRE  $m$  E  $\varphi$

VALORES DOS PARÂMETROS  $\underline{m}$  e  $\underline{\phi}$  E DA VELOCIDADE  
REAL DE DECANTAÇÃO DO SEDIMENTO

DATA	PROF.	$\underline{m}$	$\underline{\phi}$	v (mm/s)
13/11	- 2m	0,34	0,25	0,17
	- 8m	0,34	0,25	0,16
16/11	- 2m	0,16	0,52	0,44
	- 8m	0,23	0,45	0,34
18/11	- 2m	0,34	0,25	0,16
	- 8m	0,17	0,50	0,14

#### VII.1.4. Estudo da dispersão em condições de verão.

A diluição das partículas no mar é representada pelos coeficientes de dispersão longitudinais,  $D_x$ , e transversais,  $D_y$ , determinados a partir de medições efetuadas durante a evolução da nuvem radioativa produzida pelo rejeito do material marcado. Como, em condição de verão, a detecção foi feita pela cobertura completa das nuvens radioativas, o método de cálculo baseou-se na medição dos semi-eixos das elipses que são assimiladas às curvas de isoconcentração obtidas. O método de cálculo é apresentado no parágrafo III.3.2.; neste caso, as expressões utilizadas para a determinação de  $D_x$  e  $D_y$  são as de número 32 e 33.

Descreveremos a seguir os resultados obtidos para cada uma das injeções que estamos considerando.

##### VII.1.4.1.A injeção de 02/04/77.

Nesta data, apenas foram bem determinadas as nuvens de superfície, para a sonda a 2m de profundidade. Os resultados são apresentados na tabela:

Coeficientes de Dispersão para as Nuvens  
de Superfície, em 02/04/77

Nuvem	$D_x$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_y$ (m <sup>2</sup> /s)
A	0,42	0,03
B	0,43	0,01
C	0,33	0,01
D	2,8	0,0005

Valores médios (para as nuvens A, B e C):

$$D_x = 0,39\text{m}^2/\text{s}$$

$$D_y = 0,02\text{m}^2/\text{s}$$

Os valores para as 3 primeiras nuvens apresentam a mesma ordem de grandeza. Para a nuvem D, o valor de  $D_x$  cresce bastante e o de  $D_y$  decresce; a ela, correspondem condições hidráulicas diferentes das anteriores, pois ela foi detectada já nas proximidades da preamar.

VII.1.4.2.A injeção de 05/04/77.

As nuvens de fundo tiveram direção de movimentação diferente das nuvens de superfície e foram, em geral, mal detectadas. Baseando-nos na melhor nuvem obtida, a nuvem C, encontra-se para os coeficientes de dispersão os

valores  $D_x = 1,01\text{m}^2/\text{s}$  e  $D_y = 0,02\text{m}^2/\text{s}$ .

#### VII.1.4.3.A injeção de 13/11/76.

Para esta data, os resultados obtidos foram:

Coeficientes de Dispersão para 13/11/76

Nuvens a 8m de profundidade

Nuvem	$D_x$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_y$ (m <sup>2</sup> /s)
A	0,22	0,03
C	0,10	0,06
D	1,01	0,03
E	1,16	0,05

Valores médios:  $D_x = 0,62\text{m}^2/\text{s}$

$D_y = 0,04\text{m}^2/\text{s}$

Nuvem a 2m de profundidade

Nuvem	$D_x$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_y$ (m <sup>2</sup> /s)
A	0,32	0,07
C	0,29	0,02
D	0,92	0,01
F	0,46	0,04

Valores médios:  $D_x = 0,46\text{m}^2/\text{s}$

$D_y = 0,04\text{m}^2/\text{s}$

## VII.1.4.4.A injeção de 16/11/76.

Neste caso, a detecção das nuvens finais foi realizada nas proximidades da estufa. Em vista disso, é de se esperar que os coeficientes de dispersão para as últimas nuvens detectadas cresçam, o que de fato ocorreu.

Para a detecção a 8m de profundidade, as médias dos coeficientes de dispersão para as nuvens A, B, C e D foram  $D_x = 1,06\text{m}^2/\text{s}$  e  $D_y = 0,04\text{m}^2/\text{s}$ . Para as nuvens E e F, obtém-se  $D_x = 6,25\text{m}^2/\text{s}$  e  $D_y = 0,10\text{m}^2/\text{s}$ .

Para a detecção a 2m de profundidade, utilizando-se os resultados das nuvens iniciais, encontram-se valores médios mais altos do que os obtidos para as nuvens de fundo. Assim,  $D_x = 4,2\text{m}^2/\text{s}$ , e  $D_y = 0,60\text{m}^2/\text{s}$ .

Nesta data, as velocidades de movimentação da nuvem também foram maiores que os encontrados em todas as outras detecções.

## VII.1.4.5.A injeção de 16/11/76.

Para a nuvem a 8m de profundidade, foram usadas, no cálculo dos coeficientes de dispersão, as nuvens A, B, E, F e G. Os resultados encontrados foram:

$$D_x = 2,2\text{m}^2/\text{s} \quad \text{e} \quad D_y = 0,08\text{m}^2/\text{s}$$

Para as nuvens a 2m de profundidade, foram utilizadas apenas as 3 primeiras nuvens; entretanto, obtivemos os mesmos resultados para os coeficientes de dispersão:

$$D_x = 2,2\text{m}^2/\text{s} \quad \text{e} \quad D_y = 0,08\text{m}^2/\text{s}.$$

#### VII.1.4.5. Conclusões sobre a dispersão em condições de verão.

A tabela resume os dados obtidos.

Data		$D_x$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_y$ (m <sup>2</sup> /s)
02/04/77	SUPERFÍCIE	0,39	0,02
	FUNDO	----	----
05/04/77	SUPERFÍCIE	----	----
	FUNDO	1,01	0,02
13/11/76	SUPERFÍCIE	0,46	0,04
	FUNDO	0,62	0,04
16/11/76	SUPERFÍCIE	4,2	0,60
	FUNDO	1,06	0,04
18/11/76	SUPERFÍCIE	2,2	0,08
	FUNDO	2,2	0,08



Os resultados obtidos são, de modo geral, mais elevados do que os encontrados nas medições realizadas no período de inverno. Eles se basearam em coberturas completas da nuvem, enquanto que os resultados de inverno baseiam-se em uma simples travessia da mancha radioativa, que se supõe passar pela região de mais alta atividade existente. Parece-nos, portanto, que os resultados obtidos na campanha de verão para os coeficientes de dispersão sejam ligeiramente mais precisos do que os conseguidos nos meses de inverno. Isto indica que os valores de  $D_x$  devem estar compreendidos entre 1 e 2  $m^2/s$  e os valores de  $D_y$  devem ser da ordem de  $0,10m^2/s$ , em condições de maré afastadas das estofas. São valores relativamente grandes, mas que correspondem aos já encontrados pela Divisão de Radioisótopos para estudos em mar, em outros locais do Brasil. Os resultados globais do estudo em regime de verão são apresentados na tabela seguinte.

RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS, EM REGIME DE VERÃO

Datas e Características da Injeção	Advecção		Taxa (g/T.s)	Sedimentação		Dispersão	
	Direção	U (m/s)		t <sub>0</sub> (min)	R <sub>0</sub> (c)	v (mm/s)	D <sub>x</sub> (m <sup>2</sup> /s)
02/04/77 Hora da Injeção: 11:06, MME Maré de Sizígia, 2,2m Vento NE, Onda E	Fundo	-	-	-	-	-	-
	Sup SW	0,05	-	-	-	0,39	0,02
05/04/77 Hora da Injeção: 12:12, MME Maré de Sizígia, 2,5m Vento NE, Onda 150°	Fundo N	0,10	120	+ 5	1,1x10 <sup>5</sup>	1,01	0,02
	Sup S	-	-	-	-	-	-
13/11/76 Hora da Injeção: 13:55, BM Maré de Quadratura, 1,1m Vento NE Forte, Mar agitado	Fundo SSE	-	80	-57	7,4x10 <sup>6</sup>	0,62	0,04
	Sup SSE	0,06	80	- 2	1,6x10 <sup>6</sup>	0,46	0,04
16/11/76 Hora da Injeção: 14:55, MMV Maré de Quadratura, 1,2m Vento NE, Onda 110°/120°	Fundo SSW	0,13	100	- 2	1,7x10 <sup>6</sup>	1,1	0,04
	Sup SSW	0,20	110	-12	4,3x10 <sup>5</sup>	4,2	0,6
18/11/76 Hora da Injeção: 10:56, MME Maré Intermediária, 1,9m Vento NE, Onda E	Fundo N	0,06	40	-10	2,8x10 <sup>6</sup>	2,2	0,08
	Sup NNW NNE	0,06	80	-27	3,5x10 <sup>6</sup>	2,2	0,08

## VII.2. As medições em regime de inverno

### VII.2.1. Condições experimentais.

Durante o regime de inverno, caracterizado pela presença de onda e vento do quadrante sul, foram realizadas 3 experiências, com 48 horas de intervalo, em junho de 1978. Neste período, a coordenação do trabalho esteve a cargo do Dr. Alain Caillot, do Commissariat à l'Énergie Atomique da França, em missão da Agência Internacional de Energia Atômica de Viena. As experiências tiveram algumas características diferentes das realizadas em regime de verão. Assim, foi marcada apenas a fração da vasa inferior a  $40\mu\text{m}$ , por meio de Au-198 dissolvido em água régia e retomado com ácido clorídrico. O sistema de injeção também foi modificado, sendo apresentado no parágrafo VI.2.2. A técnica de detecção também sofreu modificações: foram usadas 4 sondas, a 2, 4, 6 e 8m de profundidade e a detecção foi realizada procurando-se determinar os locais de máxima taxa de contagem da nuvem radioativa. Apesar dessas modificações, os resultados encontrados foram equivalentes aos obtidos durante o verão. A única diferença apreciável apareceu nos valores encontrados para os coeficientes de dispersão, que, durante o verão, foram um pouco maiores que durante o inverno.

Tres experiências foram realizadas com 48 horas de intervalo, nas mesmas condições de injeção e de amplitude de maré (1,7 a 1,9m) e com a mesma técnica de detecção. Elas foram, entretanto, realizadas em condições diferentes no que se refere aos pontos de injeção e às ho

ras de injeção em relação à preamar. As condições experimentais são apresentadas no quadro abaixo.

DATAS	1	2	3
	06/06/78	08/06/78	10/06/78
FINALIDADE	Estudar o final da maré enchente próximo à costa.	Estudar o conjunto da maré enchente, ao largo.	Estudar o final da maré vazante e a inversão de maré.
HORA DA BAIXAMAR			12:40
HORA DA PREAMAR	16:30	17:40	
HORA DA INJEÇÃO	13:30	12:20	10:40
ESTADO DO MAR	Agitado	Agitado	Pouco Agitado
VENTO	SE	SE	SE
AMPLITUDE DA MARÉ	1,9m	1,9m	1,7m

Os resultados dessas medições são examinados em termos de advecção, decantação e dispersão.

## VII.2.2. A advecção em regime de inverno.

De um modo geral, o traçador imerso a -2m e que aparece rapidamente nos níveis de -4m, -6m e -8m, toma uma direção paralela à costa, ou pouco diferente desta, Fig. 37. Lançando em um gráfico a distância dos máximos de atividade ao ponto de injeção em função do tempo, Fig. 38, 39, 40 e 41, é fácil calcular a velocidade de advecção. Esta velocidade depende da hora da maré e do local da injeção, sendo mais importante em final de enchente. Ela é também maior perto da costa do que ao largo, efeito este que é reforçado entre a costa e o quebramar do Banco Inglês. Os resultados são resumidos na tabela seguinte

	FIM DE VAZANTE 2h antes BM→BM	INÍCIO DE ENCHENTE BM → 2,5h antes PM	FIM DE ENCHENTE 2,5h antes PM→ → 1h antes PM
Ao largo (Ponto 2)		7,8cm/s	16,1cm/s
Próximo à costa (Pontos 1 e 3)	7,9cm/s	7,9cm/s	29,7cm/s 35,4cm/s (entre a costa e o quebramar)

A advecção das partículas em suspensão está pois associada às correntes de maré, cujas direções são pouco diferen

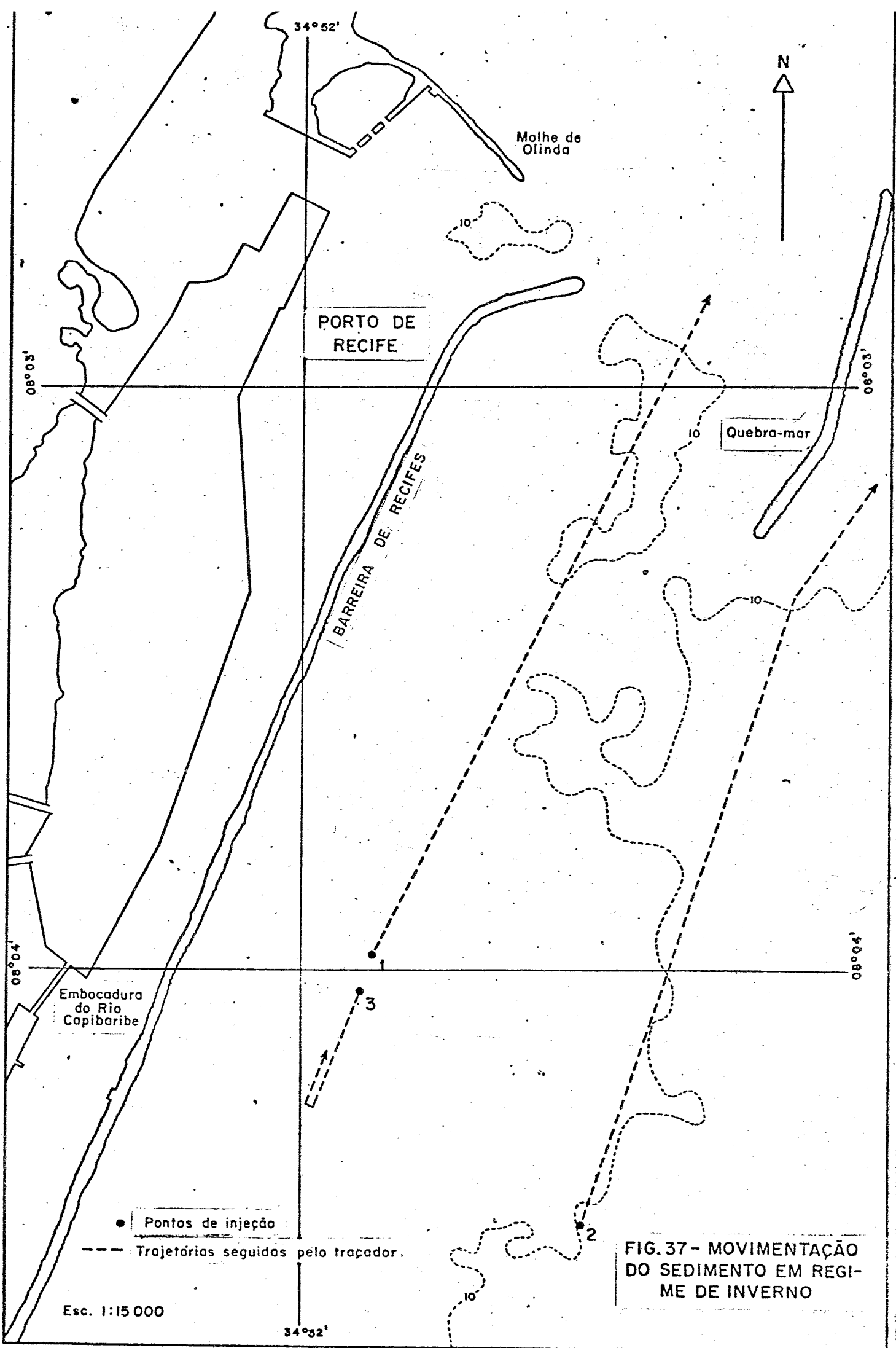


FIG. 37 - MOVIMENTAÇÃO DO SEDIMENTO EM REGIME DE INVERNO

Esc. 1:15 000

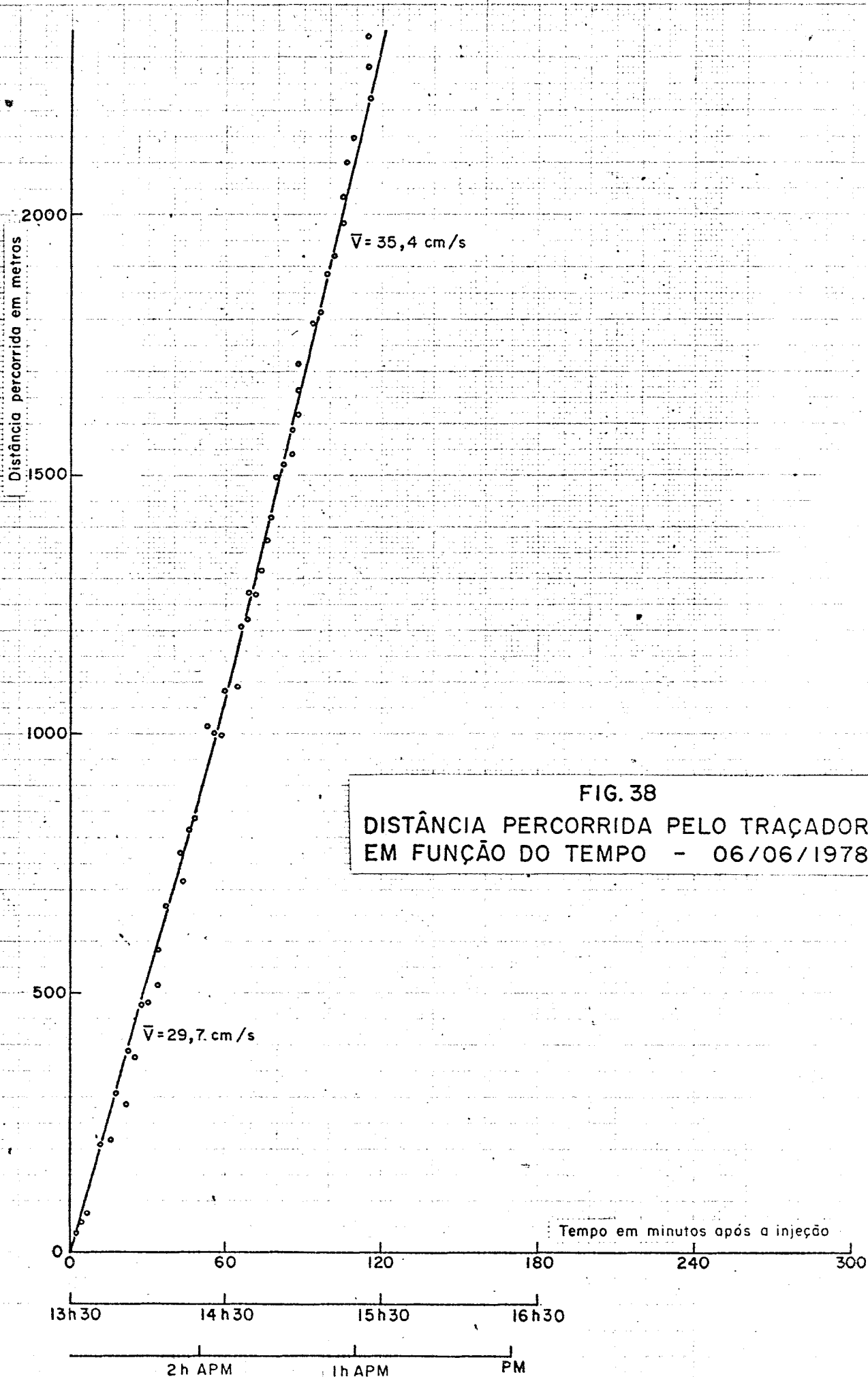
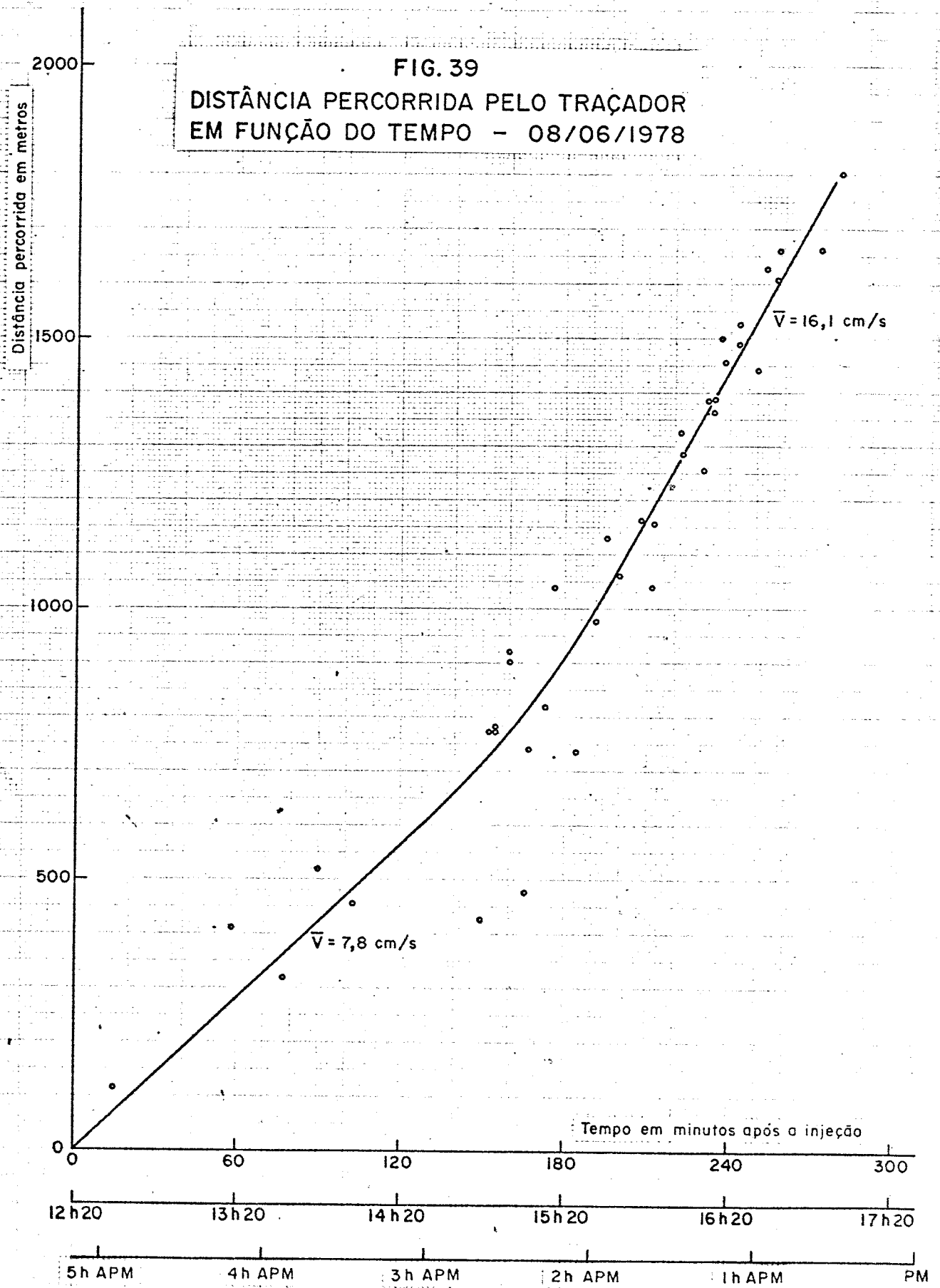


FIG. 38  
 DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO TRAÇADOR  
 EM FUNÇÃO DO TEMPO - 06/06/1978

FIG. 39  
DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO TRAÇADOR  
EM FUNÇÃO DO TEMPO - 08/06/1978





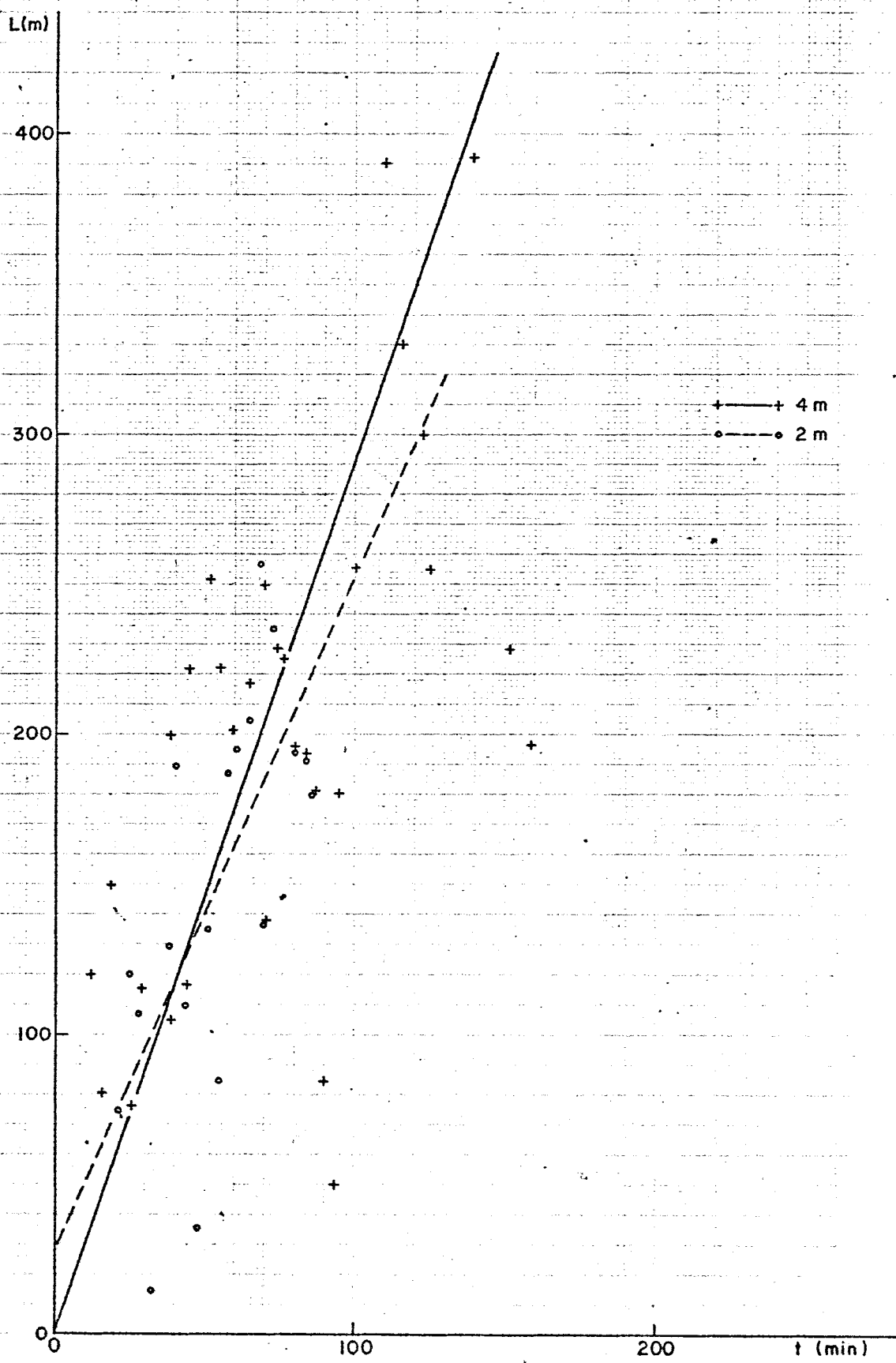


FIG. 40  
 DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO TRAÇADOR  
 EM FUNÇÃO DO TEMPO - 10/06/1978

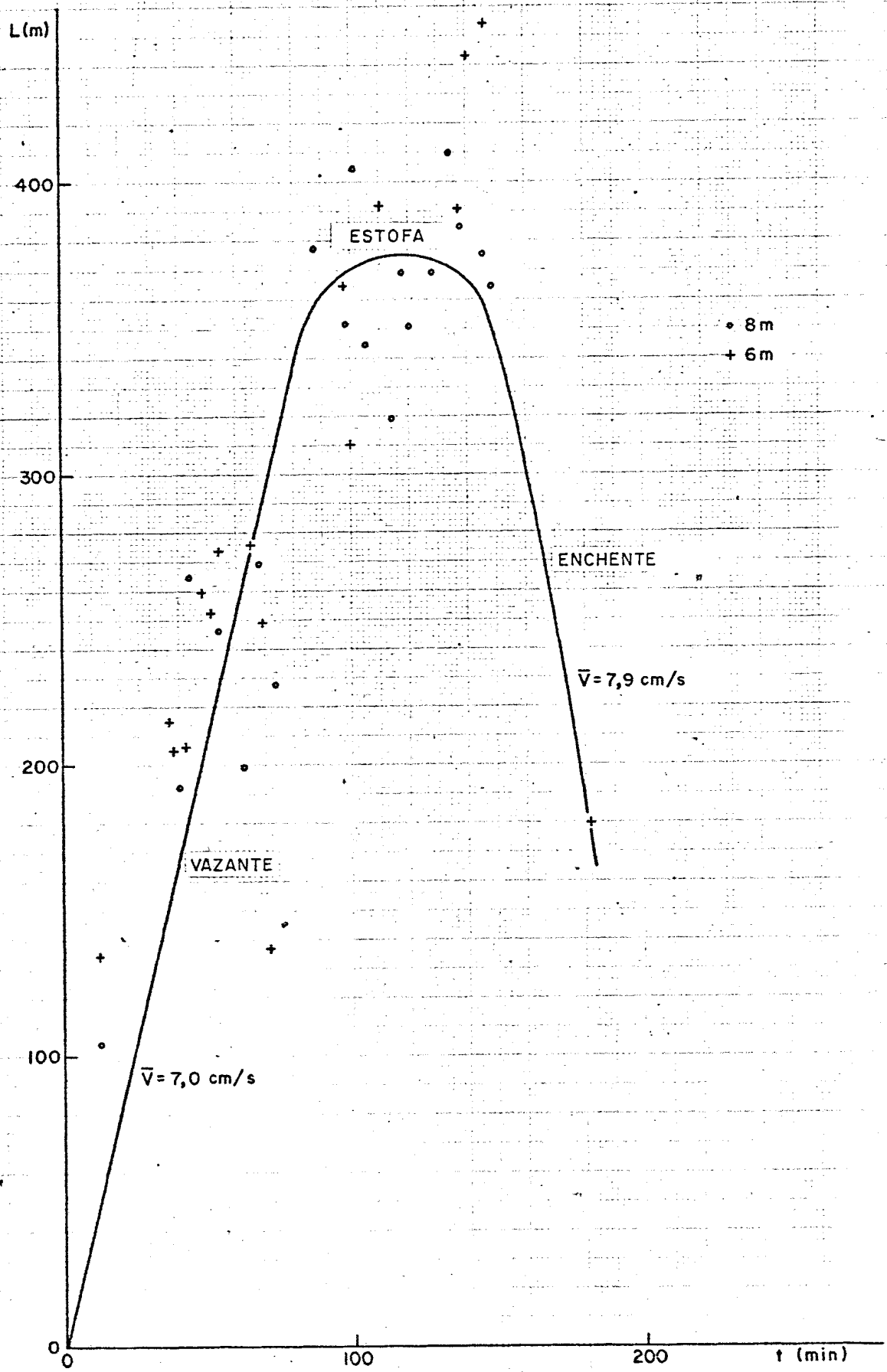


FIG. 41  
 DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO TRAÇADOR  
 EM FUNÇÃO DO TEMPO - 10/06/1978

tes de uma paralela à costa e cujas velocidades dependem da distância ao recife e do estágio da maré. Estes resultados são diferentes das medidas eulerianas dos correntógrafos. Eles são, entretanto, comparáveis aos obtidos com flutuadores, em 1976. Em mesma condição de maré, os flutuadores lançados próximos ao quebramar, Fig. 42, mostram que as correntes variam com a maré, sendo as velocidades obtidas da mesma ordem de grandeza que as determinadas com traçadores. Quando a amplitude da maré aumenta, a velocidade também cresce, atingindo cerca de 40cm/s.

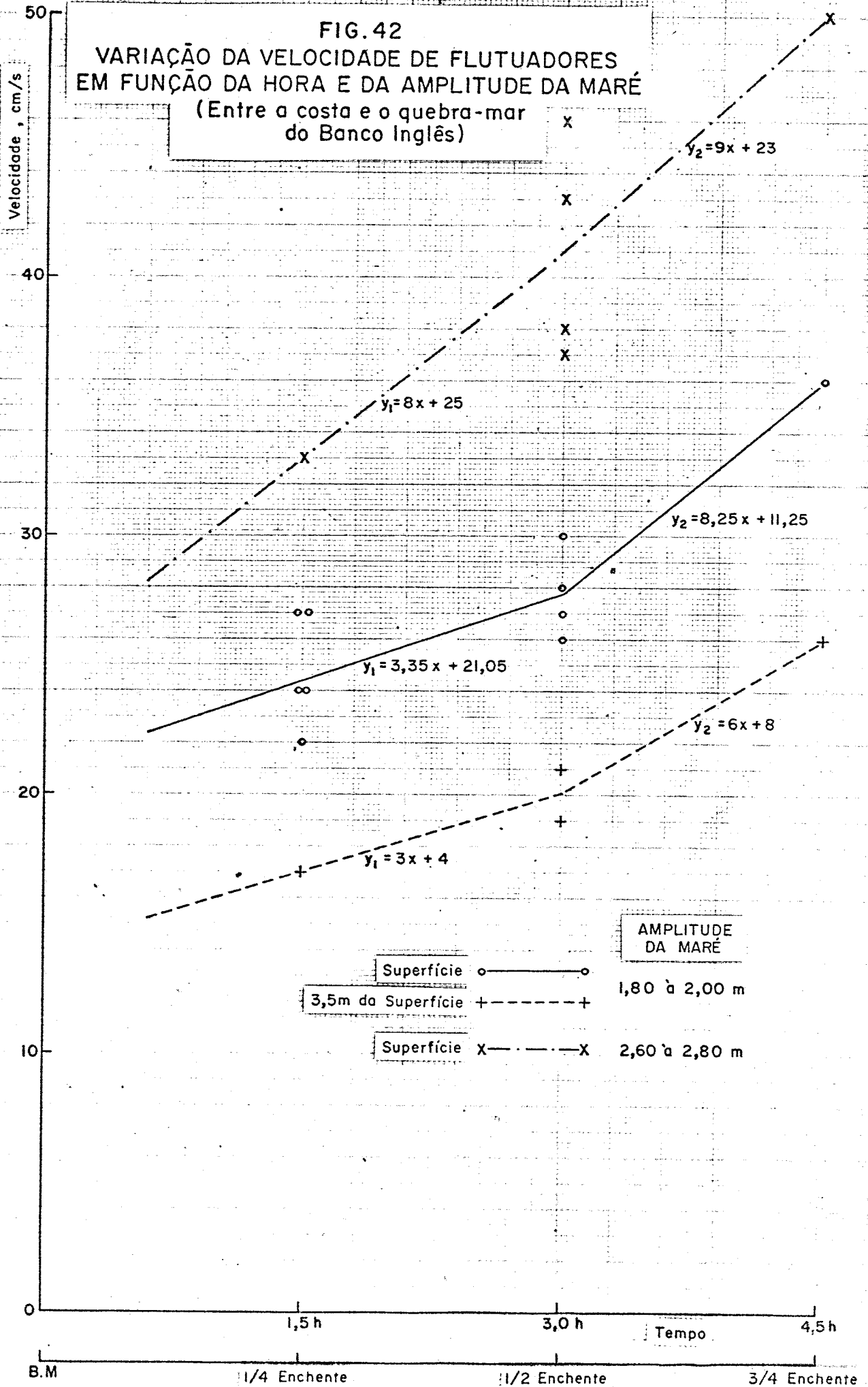
### VII.2.3. Estudo da decantação em regime de inverno.

As curvas envoltórias das taxas de contagem máximas lançadas em função do tempo - Fig. 43, 44 e 45 - permitem o cálculo da taxa de decantação SR, de  $t_0$  e de  $R_0$  e  $R_1$ . Para a primeira experiência, os resultados obtidos a -4m e -6m podem ser tratados em conjunto, obtendo-se

$$SR = 130g/T.s ; t_0 = 2,5min ; R_0 = 5,3 \times 10^6C$$

Na 2a. e na 3a. experiência, aparecem gradientes de concentração em função da profundidade. No dia 8 de junho, a atividade aparece a -6m cerca de 25 minutos após a injeção; a partir daí, ela cresce rapidamente. É neste nível que são encontradas as maiores concentrações, 2 a 3 vezes maiores do que as determinadas a -2m. Neste caso, foram feitas duas determinações independentes dos parâmetros:

FIG. 42  
 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE FLUTUADORES  
 EM FUNÇÃO DA HORA E DA AMPLITUDE DA MARÉ  
 (Entre a costa e o quebra-mar  
 do Banco Inglês)



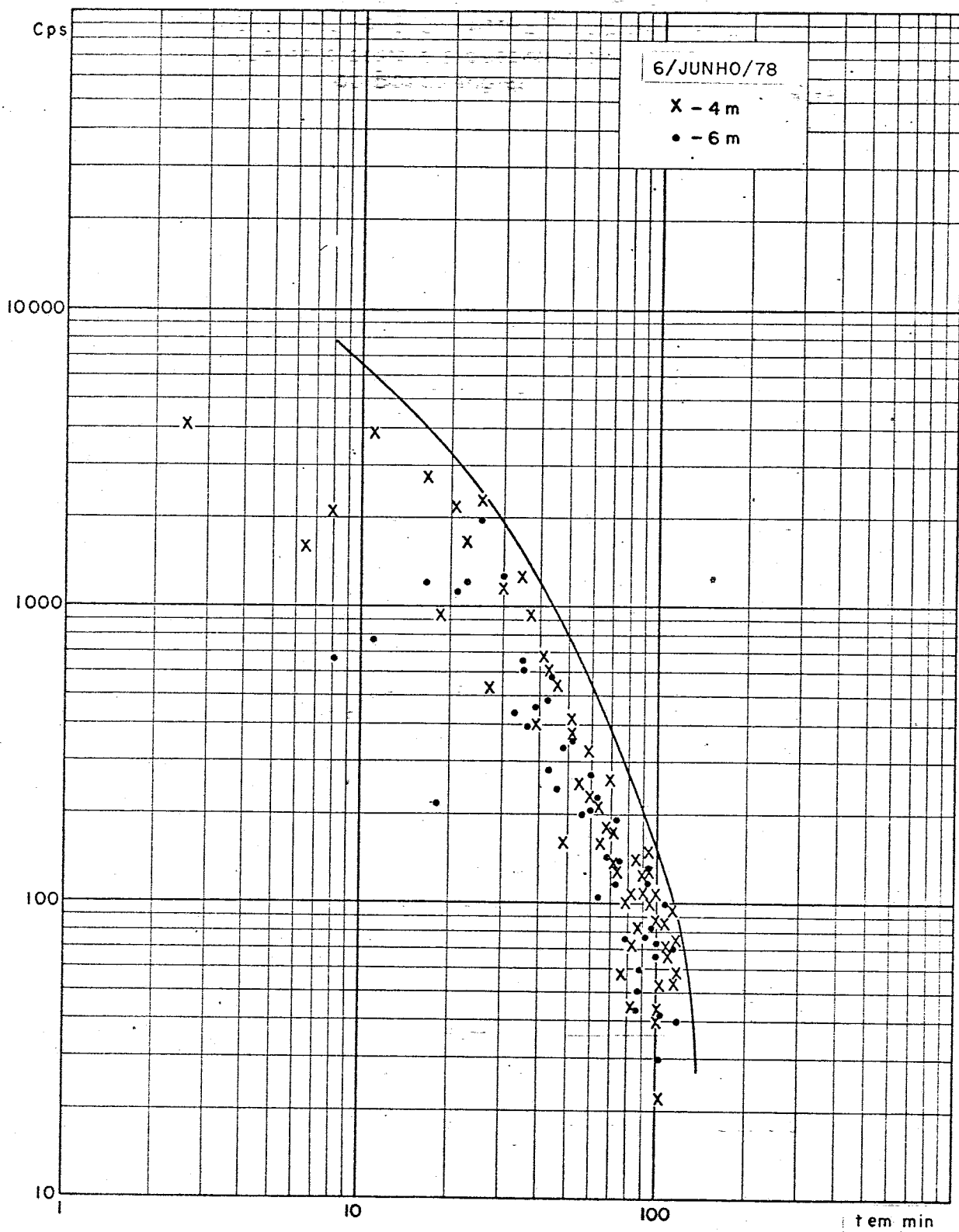


FIG. 43 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMAS EM FUNÇÃO DO TEMPO

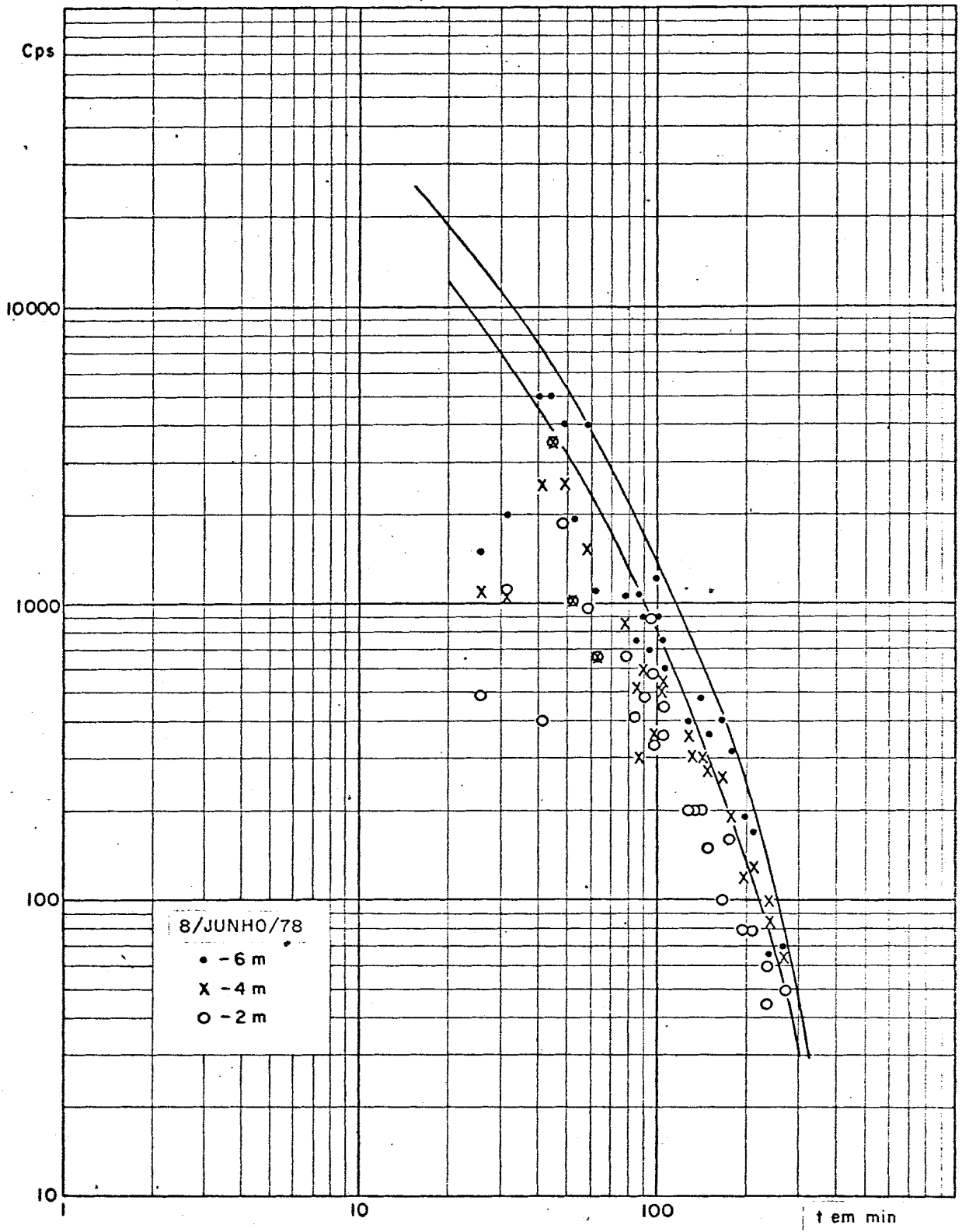


FIG.44 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMAS EM FUNÇÃO DO TEMPO

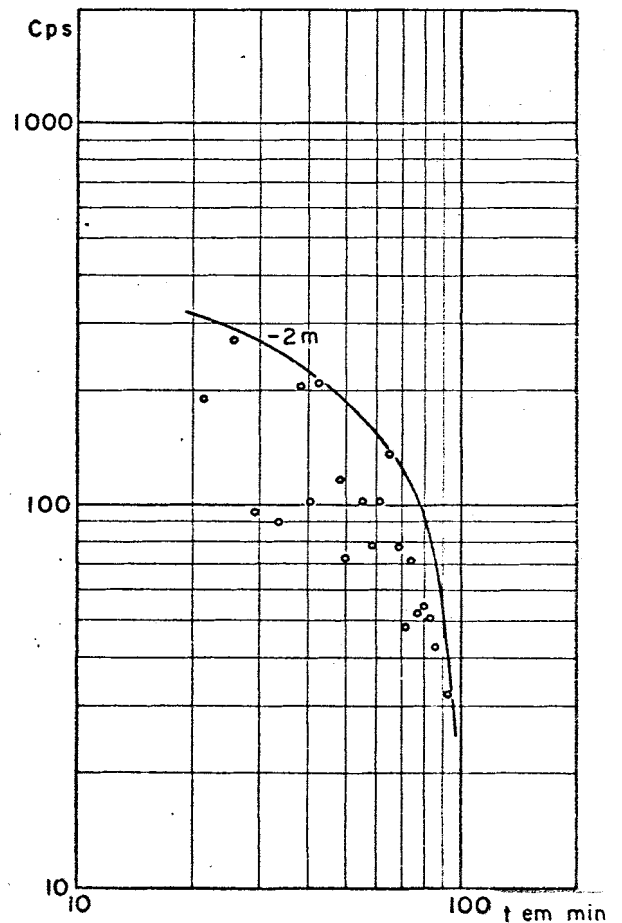
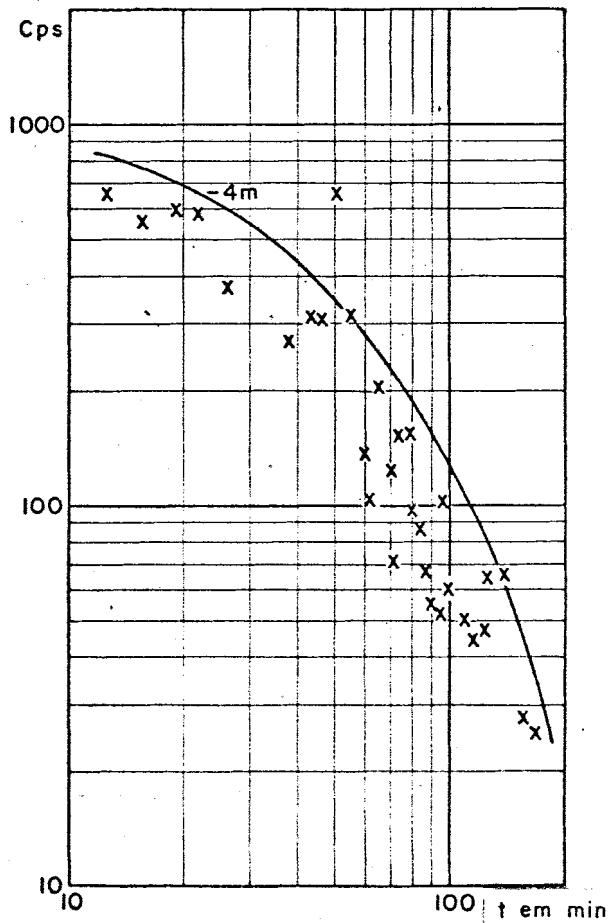
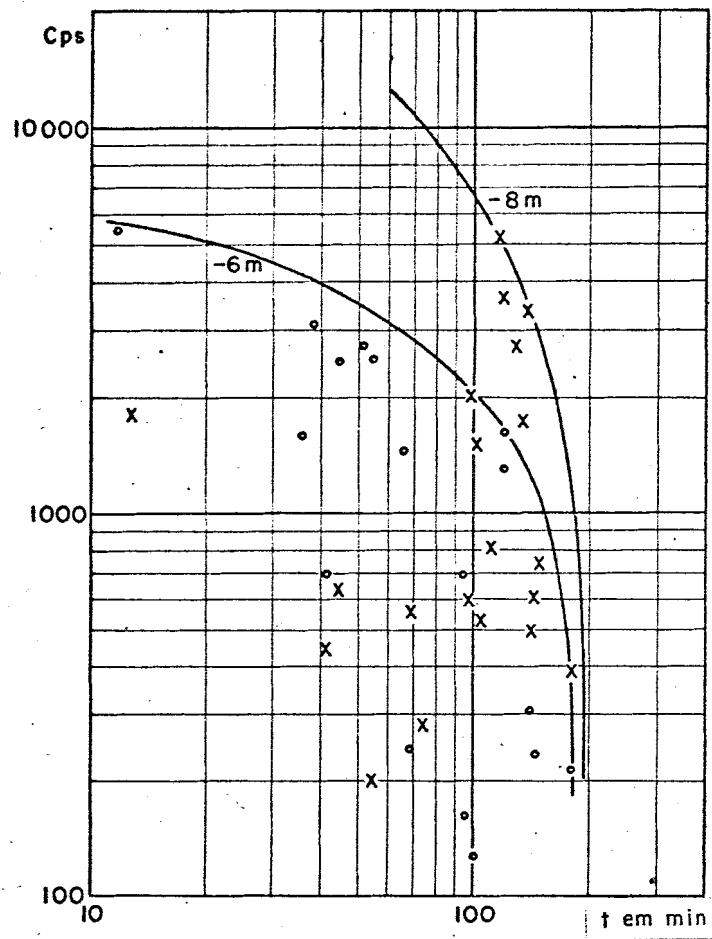


FIG.45 - TAXAS DE CONTAGEM MÁXIMAS EM FUNÇÃO DO TEMPO (10/06/78)

a -2m SR = 100g/T.s;  $t_0 = 3\text{min}$  ;  $R_0 = 1,2 \times 10^7\text{c}$

a -6m SR = 80g/T.s;  $t_0 = 7\text{min}$  ;  $R_0 = 1,7 \times 10^7\text{c}$

Em 10 de junho, a concentração é muito pequena nos níveis superiores (-2m e -4m) e bem maior próximo ao fundo. Assim, 30 minutos após a injeção, a atividade é 20 vezes maior a -6m (10 vezes a -4m) do que a -2m.

As taxas de decantação serão, portanto, diferentes para cada um desses níveis.

a -2m SR = 44g/T.s;  $t_0 = -10\text{min}$ ;  $R_0 = 1,1 \times 10^6\text{c}$

a -4m SR = 70g/T.s;  $t_0 = -20\text{min}$ ;  $R_0 = 1,9 \times 10^6\text{c}$

a -6m SR = 35g/T.s;  $t_0 = -35\text{min}$ ;  $R_0 = 1,6 \times 10^7\text{c}$

As taxas de decantação são, no caso desta 3a. medida, menores que as obtidas nos outros trabalhos. Parece, portanto, que SR é tanto menor quanto maior a turbulência: injeção próxima à costa, no período de inversão de maré. Durante este período, as variações de velocidade, em intensidade e direção, produzem uma agitação no meio que tende a diminuir a sedimentação.

A taxa de decantação representa o ritmo no qual as partículas em suspensão desaparecem, caindo na camada limite próxima ao fundo. Estes resultados podem também ser apresentados como o tempo necessário para que a metade das partículas em suspensão atinja a camada limite.



DATAS	06/06	08/06	10/06
$t_{1/2}$ em min.	90	145	233

A determinação de SR permite também o cálculo da velocidade média de sedimentação em meio natural.

As expressões utilizadas são

$$v = - H\phi \frac{R_1}{R_0} \quad \text{e} \quad m = -70 \frac{H\phi}{U} \frac{R_1}{R_0} ,$$

sendo  $-\frac{R_1}{R_0} = SR \times 10^{-6}$ .

H: a profundidade, compreendida entre 8 e 10m

U: a velocidade de advecção, em m/s.

DATAS	06/06	08/06	10/06
v em mm/s	0,5	0,3	0,17
m	0,15	0,21	0,18

Os cálculos foram efetuados para  $SR = 50\text{g/T.s.}$  A velocidade real de decantação é ligeiramente superior à determinada em laboratório, em água calma (0,18mm/s). Os valores do parâmetro  $\underline{m}$  indicam que o meio é mal misturado,

o que foi verificado experimentalmente. Valores de  $\underline{m}$  muito pequenos (por exemplo, 0,05) significam que há um bom misturamento no nível considerado.

#### VII.2.4. Estudo da dispersão em regime de inverno.

A diluição das partículas no meio marinho é representada por coeficientes de difusão transversais,  $D_y$ , e longitudinais,  $D_x$ , medidos durante o trânsito da nuvem, em várias alturas de uma mesma vertical. Com a técnica de detecção adotada, a medida da dispersão transversal, mais fácil do ponto de vista prático, é mais frequente do que as da dispersão longitudinal. Os resultados obtidos são resumidos nas tabelas seguintes

#### 1a. Experiência 06.06.78

$D_x$  e  $D_y$  em  $m^2/s$

Tempo em minutos após a injeção.	20	25	44	46	66	73	75	84	100	103	110
$D_x$ -4m											0,6
$D_x$ -6m											
$D_y$ -4m			0,11	0,10		0,15	0,15	0,10	0,06		
$D_y$ -6m	0,09	0,16	0,07	0,20		0,05		0,06	0,05	0,05	

## 2a. Experiência 08/06/78

 $D_x$  e  $D_y$  em  $m^2/s$ 

Tempo em minutos após a injeção.	58	145	160	175	180	195	210	221	257	273	280
$D_x$											
-6m											
-4m		0,25		0,35	0,35						
-2m					0,45						
$D_y$											
-6m			0,01			0,06	0,09		0,01	0,04	0,01
-4m	0,06		0,09			0,05		0,01	0,04	0,07	0,05
-2m			0,05			0,01		0,09	0,03	0,08	0,05

## 3a. Experiência 10/06/78

 $D_x$  e  $D_y$  em  $m^2/s$ 

Tempo em minutos após a injeção.	44	52	55	69	111	114	118	128	145
$D_x$									
-8m	0,6							0,35	0,9
-6m	0,44	0,85	0,44						
-4m	1,7								
-2m	2,6								
$D_y$									
-8m						0,32	0,27		
-6m	0,19			0,18	0,19		0,18		
-4m				0,10	0,07				
-2m				0,10	0,06				

Desses resultados, resultam as seguintes observações:

- Não há uma correlação evidente na evolução dos coe  
ficientes de dispersão, seja em função do tempo, seja em  
função da profundidade

- As flutuações dos valores obtidos são, algumas ve  
zes, grandes. Com esta técnica de detecção, é preciso lem  
brar que estas medidas são de difícil realização prática.  
Por exemplo, quando da determinação de  $D_y$ , o barco deve  
ria ter um trajeto bem perpendicular ao eixo da nuvem, re  
tilíneo e com velocidade perfeitamente constante, o que  
não ocorre na prática: são, entretanto, hipóteses da teo  
ria.

Portanto, devemos considerar como de importância os  
valores médios desses coeficientes, dando ordens de gran  
deza para os coeficientes de dispersão na região, em ca  
da estudo.

Valores Médios de  $D_x$  e  $D_y$ , em  $m^2/s$

DATA	06/06	08/06	10/06
$D_x$	0,6	0,35	$1 \pm 0,7$
$D_y$	$0,09 \pm 0,05$	$0,05 \pm 0,03$	$0,17 \pm 0,09$

Os valores médios são dados com uma precisão de  $\pm 1\sigma$ . É evidente que as medidas de  $D_x$  são em número insuficiente. Por isto, foram realizadas estimativas de seu valor, a partir da atividade detectada em suspensão.

$$A_s = \frac{4\pi H R_0 \sqrt{D_x D_y}}{E}$$

Todos os termos desta expressão são conhecidos, se admitirmos que  $A_s$ , a atividade em suspensão, é igual à atividade injetada, da ordem de  $10^7 \mu\text{Ci}$ . Isto pode ser feito, pois os valores de  $R_0$  são muito elevados (da ordem de  $10^6$  a  $1,7 \times 10^7$ ), o que mostra que quase toda a atividade injetada encontra-se em suspensão.

Valores Médios Calculados de  $D_x$ , em  $\text{m}^2/\text{s}$

DATA	06/06	08/06	10/06
$D_x$	0,4	0,3	1,6*

\* Calculado para o nível de -4m.

Os resultados correspondentes ao dia 10 de junho merecem alguns comentários. Esta experiência caracterizou-se por uma advecção pequena, em presença de uma dispersão mais importante do que a calculada para os outros traba

lhos. Em vasante, a corrente no período entre 2 horas antes da baixamar e a baixamar, é fraca (cerca de 8cm/s) , pois há um antagonismo entre a corrente de maré, dirigida para o sul, e o efeito das ondas e do vento, provenientes de sudeste. Esta oposição gera turbulência, o que causa a maior dispersão e a menor sedimentação observadas neste dia. Além disso, esta situação produz um comportamento complexo na circulação do material em suspensão. Foi observado que as trajetórias do traçador não eram idênticas entre os vários planos horizontais e que as mudanças de direção, nos diversos planos, não se produziam no mesmo instante.

#### VII.2.5. Conclusões referentes às medições em inverno.

As experiências realizadas mostraram que as partículas em suspensão são transportadas por correntes de maré, cujas velocidades variam com a distância à barreira de recifes e com o estágio da maré. Estas velocidades , compreendidas entre 10cm/s e 40cm/s, tem direção paralela à costa e são maiores que as encontradas em regime de verão.

No caso de maré enchente, esta direção corresponde a um movimento que, partindo da possível zona de despejo, se dirija para a região portuária. As partículas em suspensão sedimentam-se lentamente, principalmente durante os períodos de inversão de maré. Segundo o local, a metade das partículas tombará na camada limite pró

xima do fundo em tempos compreendidos entre 90 e 320 minutos após sua entrada em suspensão.

A dispersão, nas condições experimentais, é muito pequena, principalmente a dispersão transversal, cujo coeficiente não ultrapassa  $0,1\text{m}^2/\text{s}$  em maré estabelecida, chegando a  $0,7\text{m}^2/\text{s}$  nas proximidades das estofas. Estes valores são, em geral, inferiores aos determinados em condições de verão, mas a partir de outra técnica de detecção.

Os resultados em regime de inverno são resumidos na tabela seguinte.

RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM REGIME DE INVERNO

Datas e Características das Experimentações.	Advecção		Sedimentação		R <sub>0</sub> (c)	v (mm/s)	Dispersão	
	U (m/s)	Observ	Taxa (g/T.s)	t <sub>0</sub> (min)			D <sub>x</sub> (m <sup>2</sup> /s)	D <sub>y</sub> (m <sup>2</sup> /s)
06/06/78 Injeção: 13:30 PM: 16:30 Amplitude: 1,9m	0,29 0,35	De 3H antes PM a 2H antes PM De 2H antes PM até final	130	-2,5	5,3x10 <sup>6</sup>	0,5	0,6	0,09
08/06/78 Injeção: 12:20 PM: 17:40 Amplitude: 1,9m	0,08 0,16	De 8m até 2,5H antes PM De 2,5H antes PM até final	80 a -6m 100 a -2m	7 3	1,7x10 <sup>7</sup> 1,2x10 <sup>7</sup>	0,3	0,35	0,05
10/06/78 Injeção: 10:40 BM: 12:41 Amplitude: 1,7m	0,08 0 0,08	Da injeção até BM BM Início da Enchente	44 a -2m 70 a -4m 35 a -6m Média: 50	-10 -20 -35	1,1x10 <sup>6</sup> 1,9x10 <sup>6</sup> 1,5x10 <sup>7</sup>	0,17	1	0,17



## VIII. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como finalidade estimar, a partir das análises feitas em laboratório e das experiências in situ, o comportamento do material dragado e lançado ao mar. A partir dos dados aqui obtidos será possível, aos engenheiros que se ocupam do problema do rejeito de materiais no Porto do Recife, calcular em quais condições econômicas e ecológicas estes lançamentos possam ser de interesse.

Há 2 fases a examinar, após uma descarga de material, contínua ou descontínua: o campo próximo e o campo afastado.

### VIII.1. O campo próximo

O material dragado, que vai se constituir no rejeito, é formado por uma fração de areia (30% de material entre 100 e 400 $\mu$ m) e de materiais finos (argila e silte).

Logo após o despejo as partículas de areia que não estejam agregadas à vasa terão velocidades de queda próprias. Sabe-se que a velocidade de queda dos grãos de areia é proporcional ao diâmetro  $d$  das partículas. Para uma areia de densidade 2,6, a velocidade de queda é igual, em primeira aproximação, a

$$W = 125d,$$

com  $W$  em mm/s e  $d$  em milímetros.

Em nosso caso, para a fração silte e areia

$$0,04\text{mm} < d < 0,4\text{mm}$$

A velocidade de queda em água calma estará, portanto, compreendida entre

$$5\text{mm/s} < W < 50\text{mm/s}$$

Para uma profundidade de 10m e uma corrente horizontal de 30cm/s, as partículas irão atingir o fundo entre 3 e 30 minutos após o rejeito. Elas estarão, pois, distribuídas em uma região cuja maior dimensão é da ordem de 500m.

As partículas de areia que estiverem retidas na vasa concentrada irão se depositar, juntamente com ela, no fundo.

Os elementos finos, após a injeção, vão produzir uma mistura com a água. Esta mistura, para evitar uma diluição intensa - o que produzirá grandes distâncias percorridas em suspensão - deverá apresentar concentrações altas. Esta concentração pode ser estimada em cerca de 250g/l, produzindo uma suspensão com rigidez inicial da ordem de 1 ou 2 N/m<sup>2</sup>, o que deverá ser suficiente para evitar os riscos de diluição. Esta suspensão, logo após a descarga, vai formar um fluido plástico, capaz de criar uma corrente de turbidez, que poderá percorrer uma certa distância, em função principalmente da energia adquirida

pelo rejeito e da densidade da suspensão.

Esta movimentação vai depender de vários fatores: para estudá-la deverão ser consideradas diferentes formas do equipamento de rejeito, do jato, a velocidade de saída e a altura do rejeito em relação ao fundo. Este problema escapa aos objetivos deste trabalho.

A vasa não diluída deposita-se nas proximidades da região de despejo. Após depositar-se, ela passará a sofrer um fenômeno de compactação, causado pela perda da água intersticial. A concentração do depósito vai crescer, aparecendo um gradiente de densidade. Entretanto, a concentração deverá permanecer baixa na superfície do depósito. Isso quer dizer que uma parte do material depositado poderá ser erodida facilmente, sob a ação de ondas e correntes. Examinaremos a seguir quais são as condições necessárias para que a vasa depositada seja recolocada em suspensão.

As correntes geradas pela maré são fracas. Seus valores máximos variam entre 10cm/s e 25cm/s, conforme a amplitude da maré. A velocidade de atrito  $U_*$  produzida sobre o fundo será, portanto, pequena. A fórmula clássica para calcular  $U_*$  e partir de medições da velocidade da corrente  $U$ , realizadas a uma altura  $y$  acima do fundo é

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{y}{0,108 \frac{v}{U_*}} + 0,033k_s$$

sendo  $\nu$  a viscosidade da água e

$k_s$  o coeficiente de rugosidade de Nikuradse

Por simplificação, admitiremos um fundo liso. Então

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log 800 \nu U_*$$

Assim, para  $U = 22,5 \text{ cm/s}$  a  $10 \text{ cm}$  do fundo, corresponde  $U_* = 1 \text{ cm/s}$ , o que pode ser considerado como um valor máximo. Portanto, as correntes de maré não serão capazes de recolocar em suspensão os depósitos de vasa que tenham uma concentração superior a  $175 \text{ g/l}$  (Fig. 13).

As velocidades críticas de cisalhamento geradas pelas ondas variarão com a profundidade do local e com a amplitude das ondas. As ondas criam correntes alternativas no fundo, capazes de provocar a oscilação das partículas. A velocidade orbital máxima é dada por

$$U_{\max} = \frac{\pi h}{T \operatorname{sh} 2\pi \frac{H}{L}},$$

$h$  sendo a amplitude,  $T$  o período,  $L$  o comprimento de onda e  $H$  a profundidade.

A velocidade crítica de atrito é dada por

$$U_* = \left( \frac{8 \nu U_{\max}^2}{\pi T} \right)^{1/4},$$

sendo  $\underline{\nu}$  a viscosidade da água, igual a  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, a 20°C.

Portanto,

$$U_* = 0,07 \left( \frac{h^2}{T^3 \operatorname{sh}^2 2\pi \frac{H}{L}} \right)^{1/4}$$

Desta fórmula, deduz-se a seguinte tabela, para ondas cujo período médio é da ordem de 6 a 7 segundos.

Velocidade Crítica  $U_*$  (cm/s)

Amplitude H em m	1	2	3	4	5
Profundidade H em m					
3	2,2	3,1			
4	2,0	2,8	3,5		
5	1,8	2,4	3,2		
6	1,6	2,2	3,0	3,4	
7	1,4	2,0	2,6	3,2	3,7
8	1,3	1,8	2,5	2,9	3,6
9	1,1	1,5	2,4	2,7	3,4
10	1,0	1,1	2,2	2,6	3,1
12	0,8	1,0	2,0	2,4	2,7
15	0,5	0,8	1,5	2,0	2,3

150 g/l      200 g/l      250 g/l

Comparando estes valores com os da Figura 13, que fornece  $U_*$  em função da concentração da vasa, é fácil determinar, para uma dada concentração, em quais condições (profundidade e amplitude da onda) haverá reentrada em suspensão.

Por exemplo, os depósitos de vasa que tenham uma concentração inferior a 200g/l serão recolocados em suspensão, desde que a onda ultrapasse a amplitude de 2m, em uma profundidade de 9m. Portanto, a ação da onda é de importância fundamental sobre o comportamento dos depósitos formados a partir dos rejeitos do material dragado. Durante o verão, com mar calmo, haverá acumulação de material na região de rejeito, se este for realizado com altas concentrações. Durante o inverno, as ondas recolocarão os sedimentos finos em suspensão, apesar de sua coesão relativamente elevada.

O que irá acontecer ao material recolocado em suspensão? Esta pergunta poderá ser respondida examinando-se o comportamento dos materiais em condições de campo afastado.

#### VIII.2. O campo afastado

Antes de apresentar as informações obtidas neste domínio, é necessário lembrar os resultados obtidos anteriormente pela Divisão de Radioisótopos, em trabalhos precedentes [1, 2], com sedimento não coesivos muito finos. O traçador utilizado nestes trabalhos foi o vidro

marcado com irídio - portanto, um traçador de meia-vida longa - finamente moído, intimamente misturado com a vasa e depositado no fundo.

A idéia básica destes estudos era determinar o comportamento do material rejeitado que se depositasse no fundo, para o que a injeção foi feita de modo que, durante algum tempo, o traçador permanecesse protegido da ação das ondas e correntes. Estas medidas mostraram que:

- o transporte é pequeno em regime de verão; portanto, as ondas e correntes deste período são insuficientes para produzir um transporte importante

- as ondas de inverno recolocam o material em suspensão, espalhando-o, em manchas irregulares e pouco ativas, por uma vasta região. Isto confirma os cálculos realizados no parágrafo precedente.

- os movimentos resultantes fazem-se paralelamente à barreira de recifes, em uma direção pouco diferente do norte. Isto prova a predominância das ações de enchente, reforçadas pelas ondas e pelo vento, sobre as ações de jusante.

Esta mesma observação foi também verificada nos estudos realizados na região de Suape, 30km ao sul de Recife, com a utilização de traçadores com a mesma granulometria da areia que constitui o fundo.

As medições realizadas sobre sedimento em sus

pensão, e que são apresentadas neste relatório, mostraram que:

- os sedimentos em suspensão são transportados pelas correntes de maré paralelamente ao litoral, com um sentido que depende do estágio da maré e do vento reinante

- estes sedimentos decantam-se lentamente, a uma taxa da ordem de 100 gramas por tonelada e por segundo.

- os sedimentos em suspensão não sofrem dispersão importante durante a maré enchente ou vazante; esta dispersão cresce nos períodos de inversão de maré, com as mudanças na velocidade e na direção das correntes.

As partículas transportadas em suspensão e que caem - no ritmo dados pelas taxas de decantação determinadas - em estado diluído e sem coesão, na camada limite perto do fundo, parecem apresentar um transporte resultante em direção ao Norte, ou seja, em direção à entrada do porto de Recife.

Os parâmetros determinados por esta série de experiências podem ser utilizados na construção de modelos, que permitam imaginar as consequências de um rejeito contínuo ou descontínuo de material dragado.



## VIII.3. Modelo para rejeito contínuo

O cálculo da distribuição das concentrações resultantes de um rejeito contínuo e em vazão constante, de uma massa total  $M_0$  e de duração  $D$ , pode ser feito pela equação

$$PD = \int_0^D x(\tau) \rho(t - t_0 - \tau) d\tau \quad (36)$$

com

$$x(t - t_0) = \begin{cases} M_0/D & \text{para } 0 \leq t - t_0 \leq D \\ 0 & \text{para } 0 > t - t_0 > D \end{cases}$$

$PD$  e  $P$  são a massa de material contida em uma coluna vertical de secção  $d_x d_y$ , para rejeito contínuo e para rejeito instantâneo, respectivamente. Além disso, as concentrações em diferentes níveis,  $C_d$ , são relacionadas a  $PD$  pela equação:

$$C_d = \frac{PD}{H\phi K_d} \quad (37)$$

Introduzindo a expressão para  $P$ , deduzida anteriormente, na equação (36) e utilizando também (37), obtêm-se

$$C_d(x, y, t) = \frac{M_0}{4\pi K_d H \phi \sqrt{D_x D_y}} \int_0^D \frac{1}{t - t_0 - \tau} \cdot \exp \left[ \frac{V}{H \phi} (t - t_0 - \tau) - \frac{[x - U(t - t_0 - \tau)]^2}{4D_x(t - t_0 - \tau)} - \frac{y^2}{4D_y(t - t_0 - \tau)} \right] d\tau \quad (38)$$

A concentração máxima obtida após um intervalo de tempo  $t$  após o início do rejeito, é obtida pelo cálculo do máximo da função precedente:

$$\frac{\partial C_d(x, 0, t)}{\partial t} = 0 \quad (39)$$

Ora, o cálculo das concentrações pela equação 38 requer a resolução de uma integral da forma

$$C = \int_a^b \frac{1}{u} \exp \left( \alpha + \beta u + \frac{\gamma}{u} \right) du \quad (40)$$

que é de solução extremamente complexa. A solução da forma explícita da equação (39) apresenta o mesmo problema.

Foi decidido, então, realizar-se a integração por um método numérico (método de Simpson), utilizando-se

um computador. Neste caso, o cálculo poderá ser facilmente repetido para vários valores das variáveis  $x$ ,  $y$  e  $t$ , o que permitirá o desenho das formas de nuvens resultantes. Para resolver a equação (39), o máximo de  $C_d$ , dado em (38), foi determinado pelo uso de um método numérico de otimização, o método de Fibonacci, que é utilizável para funções unimodais de uma única variável. Utilizando estes processos, foi realizada a previsão da distribuição das concentrações, no espaço e no tempo, a partir da hipótese de um rejeito de duração  $D = 2h$ , com uma vazão de  $500\ell/s$  e a uma concentração de  $20g/\ell$  em matéria sólida, o que representa uma massa total de  $M_0 = 72$  toneladas de partículas finas. Os cálculos foram efetuados para velocidades de advecção de  $30cm/s$  e de  $10cm/s$ , que correspondem a valores médios e baixos para as correntes que ocorrem em Recife. Os resultados para as condições de 6 de junho e de 8 de junho são apresentadas nas figuras 46 e 47. Deve-se notar que estes resultados referem-se a condições fictícias de rejeito e que será necessário refazerem-se os cálculos após a fixação definitiva dos parâmetros envolvidos.

#### VIII.4. Conclusões

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos realizados com sedimento em suspensão na região do porto de Recife, entre o final de 1976 e esta data. Durante este período, foram desenvolvidas técnicas de estudo do comportamento de material fino, em laboratório, sob

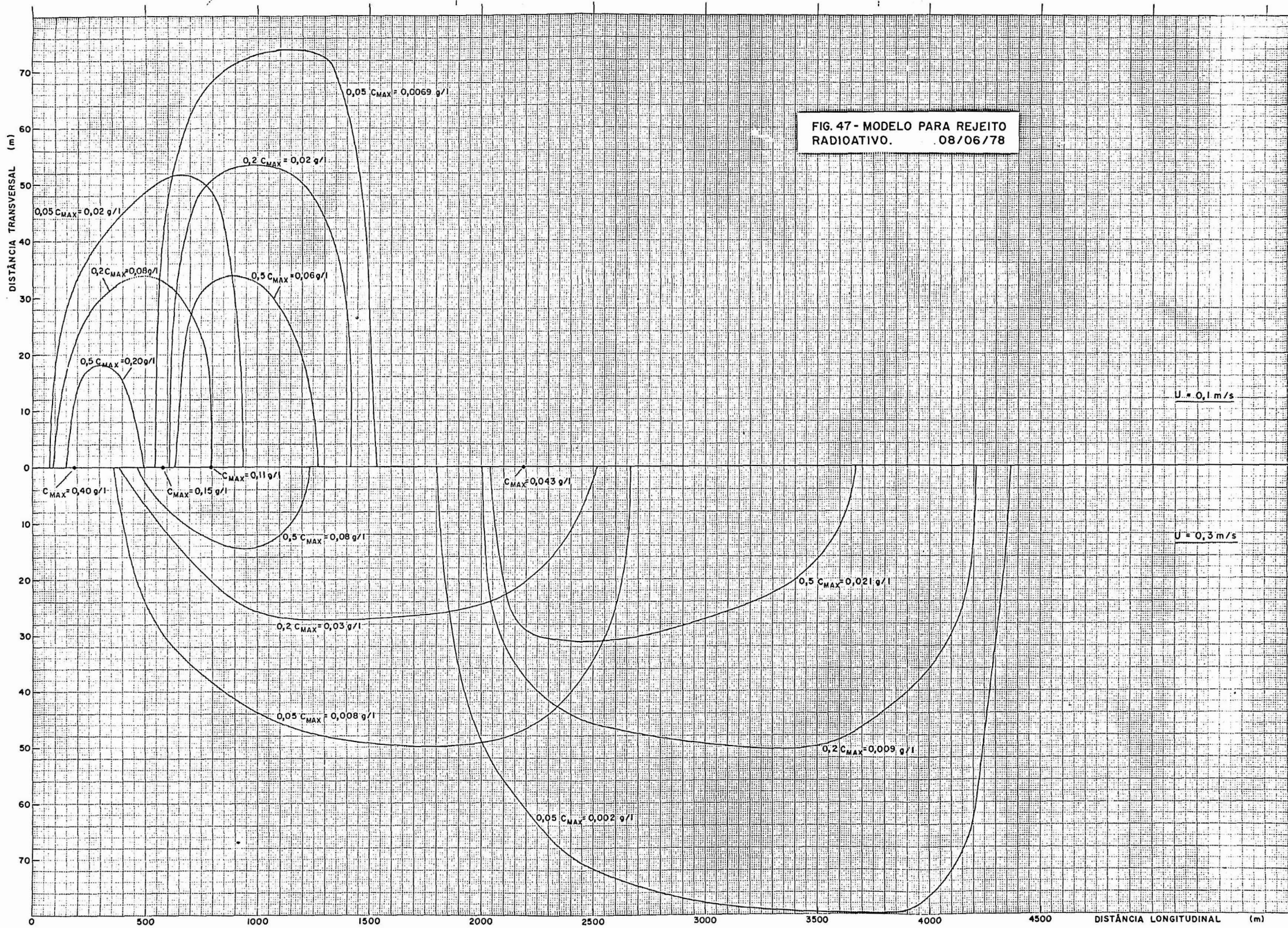


FIG. 47 - MODELO PARA REJEITO  
 RADIOATIVO. 08/06/78

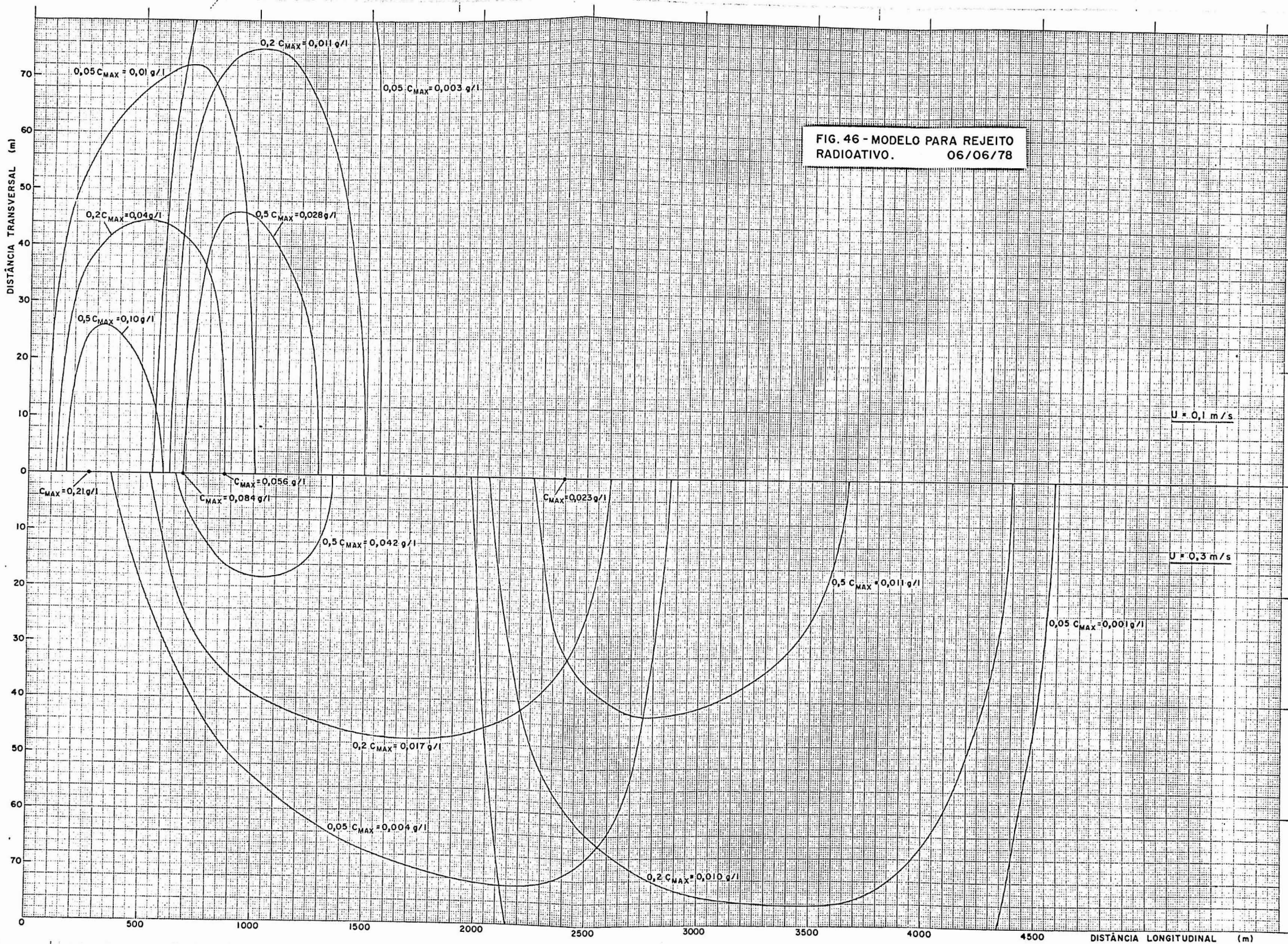


FIG. 46 - MODELO PARA REJEITO RADIOATIVO. 06/06/78

$U = 0.1 \text{ m/s}$

$U = 0.3 \text{ m/s}$

DISTÂNCIA LONGITUDINAL (m)

a orientação do Dr. Alain Caillot, em missão da Agência Internacional de Energia Atômica. Foram, além disso realizadas as seguintes medições em suspensão:

Em regime de verão: 13/11/76  
16/11/76  
18/11/76  
02/04/77  
05/04/77

Em regime de inverno: 06/06/78  
08/06/78  
10/06/78

Os resultados obtidos nestes estudos mostram que, de um modo geral, o transporte de material depende principalmente das correntes de maré, fazendo-se, pelo menos em parte, paralelamente ao recife. Houve casos, entretanto, em que o vento teve grande influência na direção de movimento, dominando a maré, e casos em que ocorreram outras direções de movimentação.

A sedimentação do material fino é lenta, com taxas de decantação da ordem de 100g/T.s. Além disso, os coeficientes de dispersão encontrados não são muito grandes. O efeito combinado destes 2 parâmetros vai favorecer o transporte de finos por distâncias longas, sob ação das correntes. Este fenômeno poderá causar deposição em zonas calmas, interiores ou exteriores ao porto. Foi também verificado, em trabalhos anteriores, que, durante o verão, o sedimento que era depositado no fundo permanecia

no local de lançamento. Este estudo partiu de uma injeção realizada em 24/03/77, com detecções em 25/03, 26/03, 29/03, 27/05 e 28/05 de 1977. Durante o regime de inverno, foi realizado um estudo de movimento no fundo, iniciado em 22/07/76 e com detecções em 25/07, 26/07 e 27/07 de 1976. Este estudo mostrou que, em regime de inverno, o material não permanece no local de deposição, reentrando em suspensão. O sentido de movimentação mais importante deste material se faz para o norte, ou seja, em direção à região portuária. Existe, portanto, uma probabilidade de que os materiais rejeitados por sobre o recife retornem à região portuária. É preciso lembrar, contudo, que as correntes de maré no interior do porto são bastante intensas e que, por isso, não permitirão que o sedimento que penetrar no porto lá se deposite. A sua permanência no interior da região portuária poderá ser assegurada, entretanto, por mecanismos ligados à propagação da cunha salina no porto, o que está inteiramente fora dos objetivos deste trabalho.

Os dados aqui obtidos e a sua utilização em modelos de rejeito permitirão que os engenheiros encarregados da solução do problema de dragagem do porto de Recife determinem quais as condições que tornam a implantação de uma "mud-trap" e sua subsequente dragagem, viável e interessante, tanto do ponto de vista técnico, como econômico.

ANEXO 1



## NOTA SOBRE AS CONCLUSÕES DE ENGENHARIA

### A TIRAR DAS EXPERIÊNCIAS EM RECIFE

1. A conclusão de Engenharia, a tirar das experiências em Recife pelo CDTN, de julho de 76 a junho de 78, consiste simplesmente em que não se deve efetuar o despejo dos materiais dragados no porto, bombeando-os por cima do cordão de recifes e lançando-os a curta distância daquele cordão. Com efeito, o material despejado nestas condições é transportado para o Norte, entra na zona obrigada pelo quebra-mar e se subdivide em duas parcelas:
  - a. uma que penetra no porto e, portanto, no estuário do Capibaribe;
  - b. outra que prossegue para o Norte.
  
2. Ficam assim respondidas as duas perguntas feitas ao CDTN pela PORTOBRÁS. O material, despejado nas condições mencionadas no parágrafo anterior, permanece no local? Esta pergunta é respondida pela negativa. No caso de o material dragado não permanecer no local de despejo, é transportado para algum local onde possa acarretar inconvenientes? A esta outra pergunta se deve responder positivamente pois constatou-se que uma parcela do material despejado por cima do molhe, que alteia o cordão de recifes, acaba penetrando no estuário.
  
3. Por sua vez, a fração da quantidade de materiais dragados, que regressa ao estuário, deve estar em sua maior parte em suspensão perto do fundo, ao entrar no porto, porque é no fundo que ocorrem as maiores concentrações de material em suspensão. É também no fundo que, em consequên

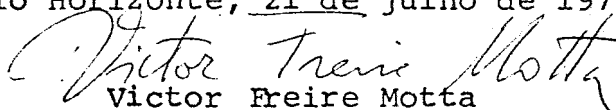
cia da circulação estuarina, certamente existente no estuário do Capibaribe, o escoamento de maré e os sólidos por ele transportados em suspensão têm resultante dirigida para dentro do estuário, ao longo do ciclo completo de maré. Em outras palavras, uma vez que o material dragado tenha voltado ao estuário, deslocar-se-á dentro dele até achar local propício à deposição ou até atingir um ponto nodal ("null-drift point"). Este é o ponto em que se anula a velocidade média, ao longo do ciclo de maré, para um ponto situado no fundo do estuário. O material, que penetrar no estuário, só terá possibilidade de ser levado de volta para o mar se permanecer na camada superficial do escoamento, na qual as velocidades médias, ao longo do ciclo de maré, são dirigidas para fora do estuário. Evidentemente, não está demonstrado nem é de esperar que o material, que penetra no estuário, cumpra a condição expressa na frase anterior.

4. Não se pode determinar, à luz das experiências já efetuadas em Recife pelo CDTN, qual é a parcela que penetra no estuário e qual é a que prossegue para o Norte. É discutível e duvidoso que se consiga fazer tal determinação com novas experiências que teriam de ser também executadas em condições de verão e inverno.
5. Em uma das experiências da série efetuada em junho de 78, com injeção a muito maior distância do cordão de recifes, sobre a isóbata de -10m, o material deslocou-se para o Norte mas passou ao largo do quebra-mar que se situa em frente à entrada do porto. Na ocasião a agitação do mar era pequena e não se acompanhou pormenorizadamente a trajetória dos traçadores quando já estavam ao Norte do quebramar. É de temer que ondas maiores tragam para mais perto da costa o material despejado sobre a isóbata de -10m e não se sabe o que pode acontecer ao Norte do quebra

mar, quando o material entra na zona de influência da embocadura, ainda que tenha passado ao largo dos molhes.

6. Seria interessante que a PORTOBRÁS ou a CBD desse a estudo econômico visando a esclarecer se o despejo a grande distância do cordão de recifes, sobre a isóbata de -10m, é competitivo com a dragagem e o despejo tradicionais. No caso de o ser, poder-se-ia estudar com mais pormenor o que acontece com o material lançado àquela distância da costa. Assinala-se, desde logo, que seria difícil prever a influência de agitação mais forte do que a que reinasse durante a injeção e as deteções.
7. Quanto ao destino do material, que penetra de volta no estuário, só se poderia determiná-lo por estudo geral da circulação no estuário, o que constituiria trabalho de grande porte e dificilmente seria justificável à luz de uma decisão quanto ao modo e local de despejo de materiais dragados.
8. Em consequência recomenda-se que o CDTN aconselhe a PORTOBRÁS a não efetuar o despejo da maneira e no local que constituíram objeto das experiências efetuadas em Recife.

Belo Horizonte, 21 de julho de 1978

  
Victor Freire Motta

## REFERENCIAS

1. BANDEIRA, J.V.; MONTEIRO DE CASTRO, J.O.N.; AUN, P.E.  
"Estudo de novos locais para despejo de dragagem no porto de Recife: movimentação de sedimento de fundo em regime de inverno". Relatório do Instituto de Pesquisas Radioativas, 1976.
2. AUN, P.E.; BANDEIRA, J.V.; MONTEIRO DE CASTRO, J.O.N.; MOREIRA, R.M. - "Estudo de novos locais de despejo de dragagem no porto de Recife: movimentação de sedimento de fundo, em regime de verão". Relatório do Instituto de Pesquisas Radioativas, 1978.
3. BOUGAULT, H. - "Étude de la sorption de quelques radioéléments artificiels par les sédiments péliques en vue de son application au marquage radioactif de ces matériaux". Thèse - Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 1970.
4. CAILLOT, A.; QUESNEY, M.; SAUZAY, G.; BELLESSORT, B.  
"Tracer sedimentology in Belawan Harbor: characterization of dumping sites". Contract UNDP-AIEA; INS/72/014/A/01/18, 1974.
5. CAILLOT, A.; AUN, P.E.; MOREIRA, R.M.; BANDEIRA, J.V.  
"Étude au laboratoire et in situ du comportement hydrodynamique des fines particules en suspension, à l'aide de traceurs radioactifs. Application au cas particulier du rejet des produits de dragage du port de Recife". Relatório do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1978.

6. SAUZAY, G. - "Appraisal of radioactive tracer techniques in dredging operations". Terra et Acqua, Nr 10; Tenth Anniversary Issue, 1975.
7. AUN, P.E.; BANDEIRA, J.V. - "Determinação de coeficientes de difusão na área de Santos, utilizando traçadores radioativos". Relatório do Instituto de Pesquisas Radioativas, 1974.
8. LANE, E.W.; KALINSKE, A.A. - "Engineering Calculations of suspended sediment". Trans. Am. Geophys. Union, 20, 603, 1941.
9. MIGNIOT, C. - "Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques". La Houille Blanche, 7, 591, 1968.