

ANÁLISE REOLÓGICA DE AMOSTRAS DE MATERIAL  
DE FUNDO DA BAÍA DE SANTOS, SP.

Divisão de Radioisótopos/DERL.PD

- DERL.PD-051/80 -

ANÁLISE REOLÓGICA DE AMOSTRAS DE MATERIAL  
DE FUNDO DA BAÍA DE SANTOS, SP.

AUTORES

Pedro Edmundo Aun  
Jefferson Vianna Bandeira  
Amenônia Maria Ferreira Pinto

TRABALHO DE CAMPO

Jefferson Vianna Bandeira  
Ricardo da Silva Gomes

ANÁLISE

Pedro Edmundo Aun  
Amenônia Maria Ferreira Pinto  
Jefferson Vianna Bandeira  
Altair Drumond de Sousa  
Duarte Augusto Costa  
Luiz Raphael Aun

DIVISÃO DE RADIOISÓTOPOS/DERL - CDTN/NUCLEBRÁS

- Outubro/1980 -

## ÍNDICE

	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS	
1.	INTRODUÇÃO 1.
2.	CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS 2.
2.1	Posição dos Pontos de Coleta das Amostras 2.
2.2	Composição Granulométrica 4.
2.3	Composição Mineralógica 10.
3.	ESTUDO DAS VELOCIDADES DE QUEDA 15.
3.1	Propriedades dos Sedimentos 15.
3.2	Velocidades de Queda das Partículas Elementares 16.
3.3	Velocidades de Queda de Partículas Finas em Meio Floculante 18.
3.3.1	Floculação 18.
3.3.2	Influência do diâmetro das partículas elementares sobre a floculação 20.

3.3.3	Influência da concentração de partículas sólidas na suspensão	23.
3.3.4	Velocidades de queda em meio floculante	23.
4.	PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS SEDIMENTOS	29.
4.1	Considerações Gerais	29.
4.2	Condições Experimentais	32.
4.3	Influência da Concentração sobre a Rigidez Inicial	33.
4.4	Influência da Concentração em Areia sobre a Rigidez Inicial	37.
5.	COMPORTAMENTO DOS SEDIMENTOS SOB AÇÕES HIDRODINAMICAS	44.
5.1	Considerações Gerais	44.
5.2	Reentrada em Suspensão de Sedimentos sob a Ação de Correntes	45.
5.3	Condições de Reentrada em Suspensão de Materiais Coesivos sob a Ação de Ondas	52.
5.3.1	Dados gerais	52.

5.3.2	Propagação de ondas sobre fun dos em vasa	54.
5.4	Movimento de Translação das Partícu las de Vasa no Sentido de Propagação da Onda	58.
5.5	Reentrada em Suspensão dos Sedimentos	60.
6.	CONCLUSÕES	68.

## REFERÊNCIAS

## LISTA DE FIGURAS

NÚMERO		PÁGINA
1.	Localização das Amostras	3.
2.	Análise Granulométrica da <u>Amos</u> tra 120	6.
3.	Análise Granulométrica da <u>Amos</u> tra 130	7.
4.	Análise Granulométrica da <u>Amos</u> tra 134	8.
5.	Velocidade de Queda de Partículas em Meio não Floculante	19.
6.	Influência da Dimensão das <u>Partí</u> las sobre a Floculação	22.
7.	Influência da Concentração em <u>Par</u> tículas Sólidas sobre a <u>Velocida</u> de de Queda	24.
8.	Curvas de Velocidade de Queda em Meio Floculante e não Floculante	26.
9.	Curvas de Velocidade de Queda em Função da Concentração, em Meio Floculante	27.
10.	Velocidade de Queda da Vasa <u>Flocu</u>	

NÚMERO		PÁGINA
	lada em Água do Mar	28.
11.	Propriedades Reológicas dos Fluidos	31.
12.	Relação entre $\tau_y$ e $T_s$ - Amostra 120	34.
13.	Relação entre $\tau_y$ e $T_s$ - Amostra 130	35.
14.	Relação entre $\tau_y$ e $T_s$ - Amostra 134	36.
15.	Comparação das Curvas $\tau_y \times T_s$ para vasas brutas	38.
16.	Influência dos Teores de Areia <u>so</u> bre a Rigidez Inicial	40.
17.	Relação entre K e o Teor em Areia $T^1$	42.
18.	Relação entre $u_{*crit}$ e $T_s$ - Amostra 120	49.
19.	Relação entre $u_{*crit}$ e $T_s$ - Amostra 130	50.
20.	Relação entre $u_{*crit}$ e $T_s$ - Amostra 134	51.
21.	Abacos para o Cálculo de $U_0$ e $u_*$	55.
22.	Deslocamento de Vasa Fluida ou Plás tica sob a Ação de Ondas	59.

ANÁLISE REOLÓGICA DE AMOSTRAS DE MATERIAL  
DE FUNDO DA BAÍA DE SANTOS, SP.

1. INTRODUÇÃO

A região portuária de Santos, devido à sua importância econômica e estratégica, tem sido objeto de estudos detalhados, realizados pela Empresa de Portos do Brasil - PORTOBRÁS, buscando-se um conhecimento adequado dos mecanismos de transporte de sedimentos na área. Como parte destes estudos, foi estabelecido um Contrato (Nº 80/038/00) entre a PORTOBRÁS e as Empresas Nucleares Brasileiras S.A. - NUCLEBRÁS - com a finalidade de determinar as características do transporte sólido na baía de Santos. O estudo está sendo executado pela Divisão de Radioisótopos, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte. Ele consiste na amostragem e análise de sedimentos de fundo na baía, na determinação das características reológicas de sedimentos finos presentes na região e na realização de estudos sobre a movimentação de material de fundo com a utilização de traçadores radioativos. Durante esta última etapa, serão realizadas também medições de altura e direção de ondas e medidas de velocidade e direção de correntes, além do registro de ventos e marés. O presente relatório refere-se aos estudos reológicos realizados sobre três amostras coletadas na baía, constituídas por uma mistura de areia fina e finos (silte e argila). Ele engloba a caracterização dos sedimentos, a determinação de suas velocidades de queda em condições diversas e o estudo das propriedades reológicas propriamente ditas.



## 2. CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS

### 2.1 Posição dos Pontos de Coleta das Amostras

Foram coletadas, para análise reológica, três amostras, cujas posições são indicadas na figura 1. Como elas pertencem a uma rede de amostragens mais extensa, a qual cobre toda a baía, receberam os números 120, 130 e 134.

Elas foram coletadas na região central da baía de Santos, na qual as porcentagens de finos são altas. Esta região está situada entre locais com predominância de areia, os quais se localizam nos extremos leste e oeste da baía.

Em primeira aproximação, na região com predominância de finos, é de se esperar que as ações hidrodinâmicas reinantes sejam menos intensas do que nas áreas com predominância de areia, de modo a permitirem a sedimentação de materiais finos.

As posições das amostras, em coordenadas UTM, são aproximadamente as seguintes:

Amostra 120 7344160 N e 363890 E

Amostra 130 7343220 N e 363890 E

Amostra 134 7342090 N e 363900 E

Análise ecológica de acúmulos de  
material de fundo na baía de  
Santos, S.P.

autores Pedro G. Serrão  
Jefferson V. Bauduina  
Aureunice M.F. Pinto

trabalhos de campo  
Jefferson V. Bauduina  
Miguel S. Gomes

Análise:  
Pedro G.  
Aureunice  
Jefferson  
Albir  
Draete  
Luiz Rapparel.

As coletas foram realizadas em 4 e 5 de junho de 1980, sendo utilizado um sistema de posicionamento por radiolocalização (Motorola Mini-Ranger). Como pode ser visto pelos valores das coordenadas leste, a posição relativa das amostras define uma linha na direção N.S.

## 2.2 Composição Granulométrica

A análise granulométrica das amostras foi feita por:

- peneiramento mecânico, para a fração superior a 40 microns;
- decantação em meio aquoso, para a fração inferior a 40 microns, chamada fração fina.

A separação inicial do material fino do mais grosseiro foi feita a úmido, utilizando-se uma peneira com malha de 40  $\mu\text{m}$ . A análise granulométrica da fração fina foi feita a partir da decantação, em uma proveta, de uma suspensão inicialmente homogênea, mantida à temperatura de 20°C.

A fração fina já sofrera lavagens sucessivas com água destilada, para evitar o fenômeno da floculação durante a análise granulométrica. Na proveta, pode-se coletar amostras de volume  $V$ , por meio de uma pipeta imersa de  $h$  na suspensão. Em um instante  $t$ , todas as partículas cujas velocidades limites de queda  $\bar{W}$  são tais que  $Wt > h$  já atingiram uma profundidade igual ou superior a  $h$ .

A amostra conterá, pois, na mesma proporção da suspensão inicial, apenas partículas de dimensões menores ou iguais àquelas cuja velocidade limite é dada por  $W = \frac{h}{t}$ .

Determina-se, por evaporação, as massas  $P_i$  das amostras coletadas nos instantes  $t_i$ . Sendo  $P_0$  a massa inicial da suspensão,  $\frac{P_i}{P_0}$  fornecerá as porcentagens de partículas cuja velocidade de queda é  $W_i < ht_i$ .

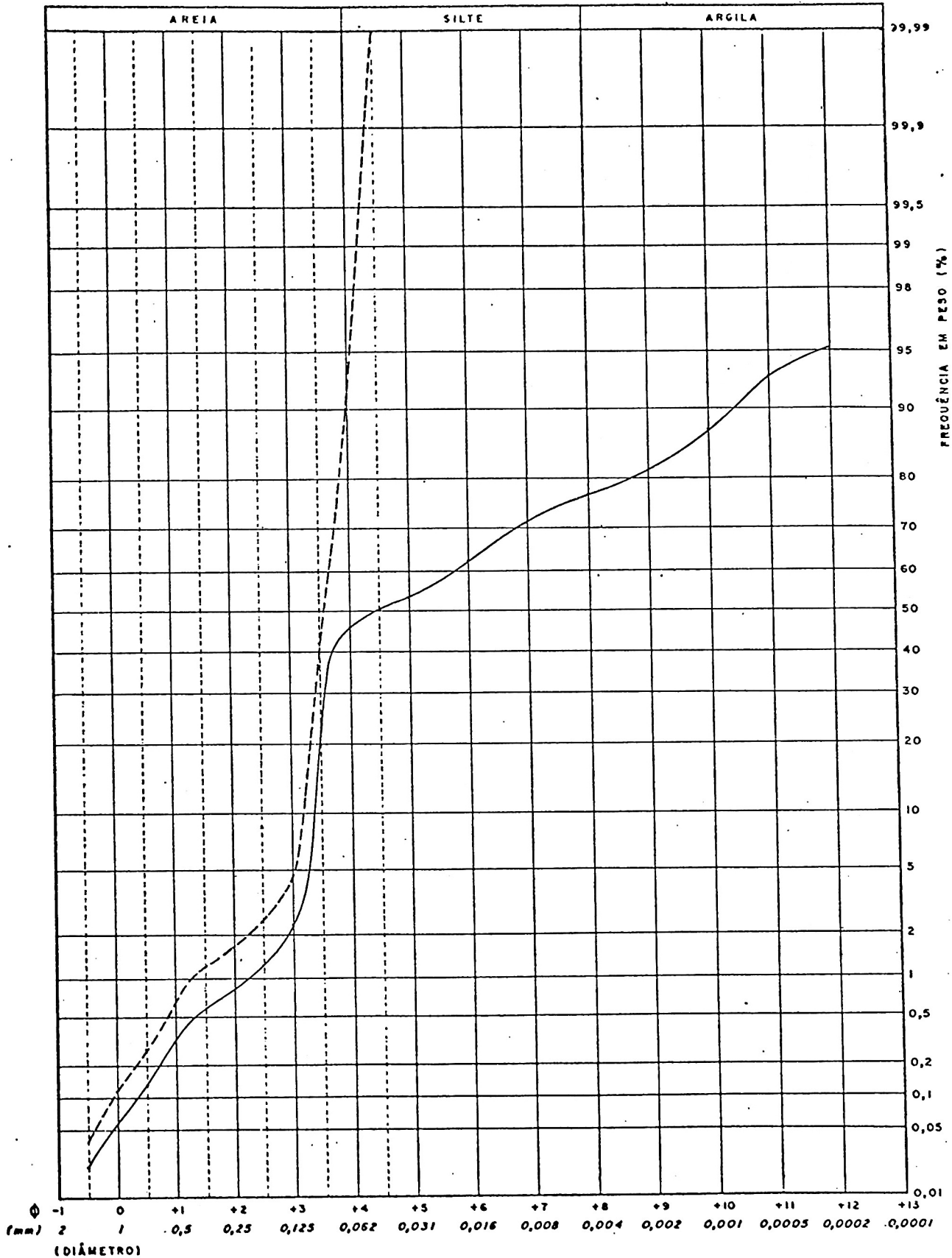
Pela lei de Stokes, à velocidade  $W$  corresponde um grão de diâmetro  $D$ , tal que

$$W = \frac{gD^2}{18\nu} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)$$

sendo  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido e  $\rho_s$  e  $\rho$  as massas específicas do sólido e do fluido, respectivamente.

Os resultados obtidos permitem a construção de curvas que representam as porcentagens acumuladas de material, em função das velocidades de queda ou dos diâmetros. Eles são apresentados nas figuras 2 (amostra 120), 3 (amostra 130) e 4 (amostra 137). Em cada uma delas, estão representadas as curvas granulométricas da amostra total e as referentes à fração arenosa.

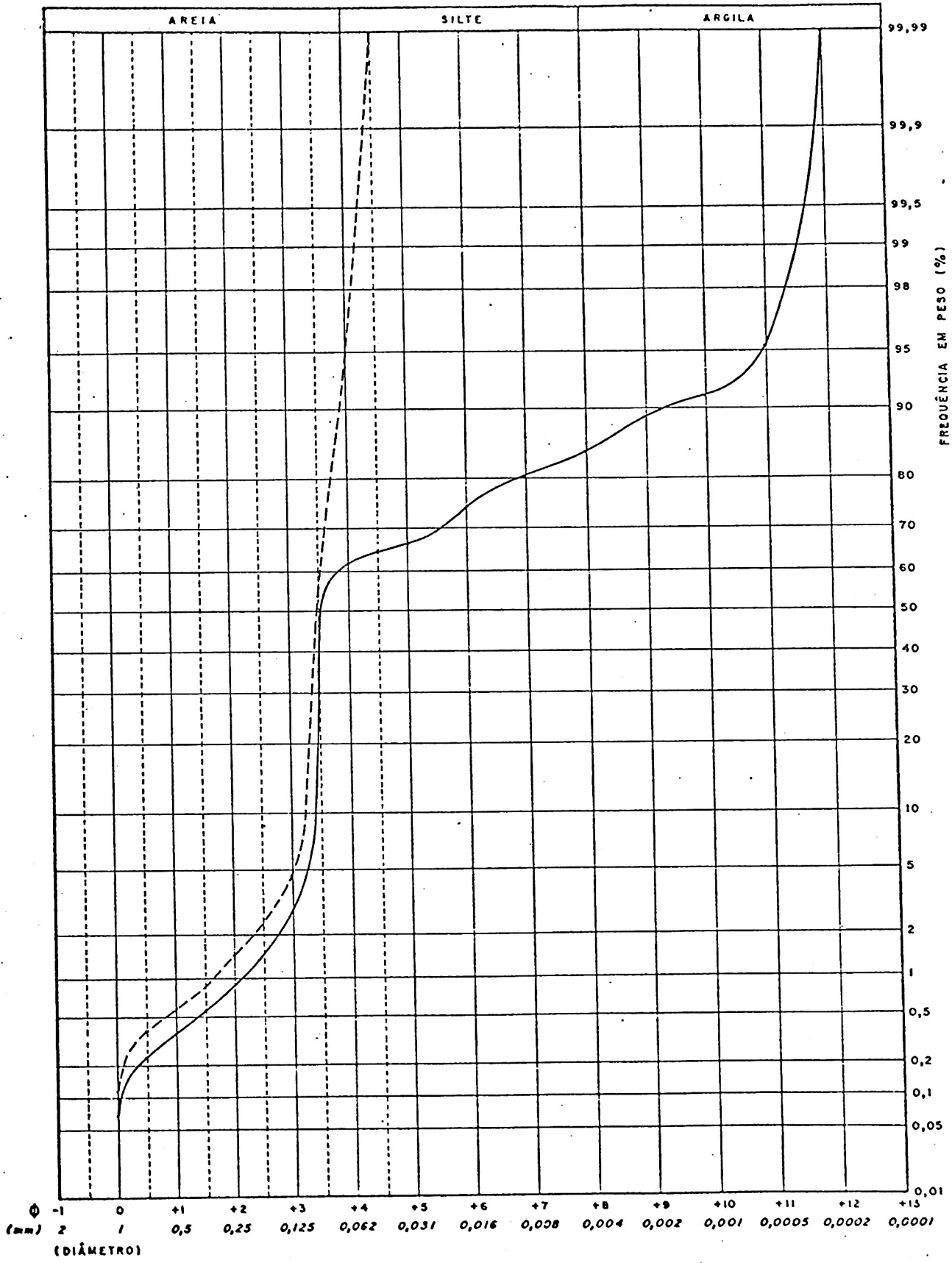
O quadro abaixo resume algumas das características das distribuições granulométricas.



CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS : 120

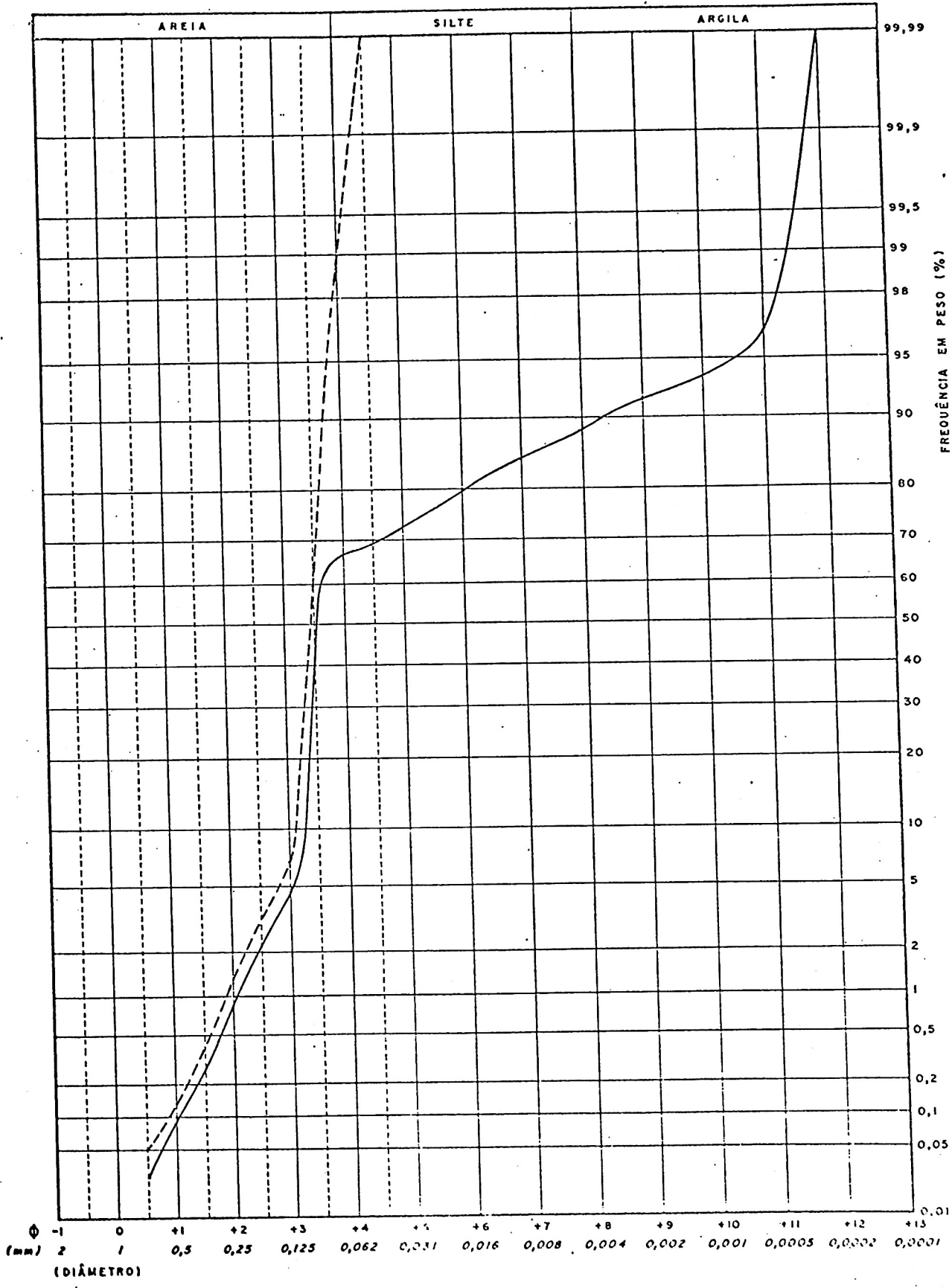
----- FRAÇÃO AREIA  
 ————— AMOSTRA TOTAL

FIG. 2



CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS : 130 | --- FRAÇÃO AREIA  
 — AMOSTRA TOTAL

FIG. 3



CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS : 134 | --- FRAÇÃO AREIA  
 --- AMOSTRA TOTAL

FIG. 4

Amostra	% < 40 $\mu\text{m}$ (em peso de sólidos)	Mediana, Amostra total (mm)	Mediana, Fração > 40 $\mu\text{m}$ (mm)	Mediana, Fração < 40 $\mu\text{m}$ (mm)
120	49,8	0,047	0,090	0,010
130	35,5	0,090	0,092	0,012
134	30,9	0,090	0,092	0,016

Pode-se observar que:

- a. O teor em fração fina da qualquer das três amostras é suficientemente alto para que e las apresentem a propriedade de coesão. Es ta propriedade aparece desde que os teores de fração fina sejam da ordem de 5% a 10%.
- b. As curvas granulométricas da fração arenosa são bastante semelhantes entre si, indican do a presença, nos 3 pontos de amostragem, do mesmo material. O material presente po de ser classificado como areia fina.
- c. As amostras 130 e 134 apresentam uma proporção de finos bastante inferior à da amostra 120. As curvas granulométricas das três a mostras, relativas à fração fina, também são bastante semelhantes.



### 2.3 Composição Mineralógica

Nas páginas seguintes, são apresentados os resultados das análises mineralógicas efetuadas sobre as amostras 120, 130 e 134 por difratometria de raios X. Estas análises foram realizadas pela Divisão de Mineralogia e Petrografia do CDTN. Elas identificam o quartzo como material predominante nas amostras, ocorrendo também a presença de feldspato, calcita, muscovita, caolinita e hornblenda.

NUCLEBRÁS

BOLETIM ANALÍTICO  
PETROGRÁFICO E MINERALÓGICO

Boletim.  
134/E  
Data:  
18.09.80

Nome do Projeto / Fase:

DIRAD/PD

Nº De Campo:

120

Cod. do Projeto / Fase:

Lote:

Centro do Custo ou Projeto / Fase:

Identificador Único:

ROTIMA DE IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRATO-METRIA DE RAIOS-X

1 - AMOSTRA TOTAL: ( 19,39 g ) Quartzo, traços de feldspato, calcita, muscovita, caolinita.

2 - LAMA (- 325 #) ( 8,29 g ) Quartzo, traços de calcita caolinita, feldspato, muscovita.

3 - PENEIRAMENTO

+ 60	*	:	_____	g
- 60 #	100 #	:	<u>11,10</u>	g
-100 #	+325 #	:	_____	g

4 - SEPARAÇÃO NO BROMOFÓRMIO ( - 60 # + 100 # )

4.1 LEVE ( 11,07 g ) Quartzo, traços de calcita, feldspato, caolinita, muscovita

4.2 PESADO ( 0,01 g ) Muscovita, traços de hornblenda e caolinita

5 - SEPARAÇÃO DA FRAÇÃO PESADA:

5.1 LMA ( \_\_\_\_\_ g )

5.2 SEPARADOR ELETROMAGNÉTICO (TIPO FRANTZ)

0,1 A ( \_\_\_\_\_ g )

0,25 A ( \_\_\_\_\_ g )

0,5 A ( \_\_\_\_\_ g )

0,75 A ( \_\_\_\_\_ g )

1,00 A ( \_\_\_\_\_ g )

1,25 A ( \_\_\_\_\_ g )

1,50 A ( \_\_\_\_\_ g )

1,75 A ( \_\_\_\_\_ g )

1,75 P:1 ( \_\_\_\_\_ g )

ROBERTO LUCIANO LESIE MURTA  
Chefe de LIM/PD

Cont....

PS: Ver observação na folha anexa.

NUCLEBRÁS

BOLETIM ANALÍTICO  
PETROGRÁFICO E MINERALÓGICO

Boletim:  
134/E  
Data:  
18.09.80

Nome do Projeto / Fase:

DIRAD/PD

Nº Do Campo:

134

Cod. do Projeto / Fase:

Lote:

Centro de Custo ou Projeto / Fase:

Identificador Único:

134

ROTIMA DE IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

1 - AMOSTRA TOTAL: ( 23,46 g ) Quartzo, traços de feldspato, muscovita, caolinita, calcita

2 - LAMA (- 325 #) ( 7,66 g ) Quartzo, traços de calcita, caolinita, muscovita, feldspato

3 - PENEIRAMENTO

+ 60 \* : -

- 60 # 100 # : 15,80

-100 # +325 # : -

4 - SEPARAÇÃO NO BROMOFÓRMIO ( - 60 # + 100 # )

4.1 LEVE ( 15,78 g ) Quartzo, traços de feldspato, caolinita, calcita

4.2 PESADO ( 0,01 g ) Muscovita, hornblenda, traços de caolinita.

5 - SEPARAÇÃO DA FRAÇÃO PESADA:

5.1 IMA ( - g )

5.2 SEPARADOR ELETROMAGNÉTICO (TIPO FRITZ)

0,1 A ( - g )

0,25 A ( - g )

0,5 A ( - g )

0,75 A ( - g )

1,00 A ( - g )

1,25 A ( - g )

1,50 A ( - g )

1,75 A ( - g )

1,75 P:1 ( - g )

ROBERTO LUCIANO LESTER MURTA  
Chefe da Unidade

Cont...

NUCLEBRÁS

BOLETIM ANALÍTICO  
PETROGRÁFICO E MINERALÓGICO

Boletim.  
134/E

Data:  
18.09.80

Nome do Projeto / Fase:

DIRAD/PD

Nº Do Comp.

130

Cod. do Projeto / Fase:

Lote:

Centro de Custo ou Projeto / Fase:

Identificador Único

ROBERTO

LUCIANO LESTE MURTA

ROTIMA DE IDENTIFICAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

1 - AMOSTRA TOTAL: ( 25,18 g ) Quartzo, feldspato, traços de calcita, muscovita, caolinita.

2 - LAMA (- 325 #) ( 7,35 g ) Quartzo, traços de calcita, caolinita, muscovita, feldspato

3 - PENEIRAMENTO

+ 60 # : - g

- 60 # 100 # : 17,83 g

-100 # +325 # : - g

4 - SEPARAÇÃO NO BROMOFÓRMIO ( - 60 # + 100 # )

4.1 LEVE ( 17,80 g ) Quartzo, feldspato, traços de calcita e caolinita, muscovita

4.2 PESADO ( 0,01 g ) Muscovita, hornblenda

5 - SEPARAÇÃO DA FRAÇÃO PESADA:

5.1 LMA ( - g )

5.2 SEPARADOR ELETROMAGNÉTICO (TIPO FRANTZ)

0,1 A ( - g )

0,25 A ( - g )

0,5 A ( - g )

0,75 A ( - g )

1,00 A ( - g )

1,25 A ( - g )

1,50 A ( - g )

1,75 A ( - g )

1,75 P:1 ( - g )

Cont...

NOME DO INTERESSADO:

NÚMERO DA AMOSTRA:

COMPLEMENTAÇÃO AO BOLETIM DE ANÁLISE MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS Nº 120, 130 e 134

## A) CARACTERÍSTICAS DOS MINERAIS PRESENTES:


- 1) QUARTZO - Fino, em fragmentos angulosos, em geral com diâmetros inferiores a 0,1825 mm. É o mineral predominante em todas as amostras, onde deve ocorrer, em proporções nunca inferiores a 90-95%.
- 2) FELDSPATO - Em fragmentos também angulosos, ocorre sempre como mineral traço exceto na amostra nº 130, onde constitui entre 5% e 10% da amostra. o feldspato pode ser calco-sódico (Plagioclásio) e o potássio (Microclina). Sua alteração em caolim é discreta.
- 3) CALCITA - Fragmentos de clivagem, aparentemente muito puros, sem inclusões e que dão forte efervescência quando atacados a frio pelo HCl.
- 4) MUSCOVITA - Em escamas finas e angulosas, sem indícios de alteração.
- 5) HORNBLENDA - Fragmentos com formas irregulares ou ainda finos prismas amarronzados ou esverdeados, devido a alteração em clorita.
- 6) CAOLINITA - Finíssima, as vezes originária da alteração do feldspato.

## OBSERVAÇÃO:

Junto com os minerais identificados por raios x, foram identificados ainda, em todas amostras, por métodos óticos, biotita, havendo ainda a possibilidade de existir HALITA, ambos sob a forma de traços.

Além das fases cristalinas, geralmente encontradas sob a forma de fragmentos com diâmetros inferiores a 0,26 mm, foram detectados restos de microorganismos (Radiolários (?), Globigerinas(?), Diatomeas, etc.

Rec' 23/09/80



ROBERTO LUCIANO LESTE MURTA  
Chefe da DIMIP.PD

### 3. ESTUDO DAS VELOCIDADES DE QUEDA

#### 3.1 Propriedades dos Sedimentos

Do ponto de vista sedimentológico, os parâmetros que influem no comportamento dinâmico dos sedimentos não coesivos (areias e materiais de granulometria superior) são relativamente pouco complexos. Um determinado grão pode ser caracterizado por sua densidade, sua dimensão e sua forma. Estes tres fatores condicionam as suas velocidades de queda e, portanto, suas condições de sedimentação. A erosão dos sedimentos não coesivos depende, do mesmo modo, das características dimensionais dos grãos, de sua densidade, de seu arranjo e de suas distribuições granulométricas.

No caso de sedimentos coesivos, os fenômenos envolvidos são muito mais complexos. A presença de partículas finas favorece a adsorção ou a absorção de diversos compostos químicos à superfície das partículas. Daí resulta a formação de um complexo solo-água, cujas propriedades físico-químicas (velocidade de queda, floculação, consolidação, reologia) e cujo comportamento sob ações hidrodinâmicas dependem:

- da natureza dos componentes do sedimento.
- da natureza do meio líquido.
- da concentração do sedimento.
- do pH, da temperatura, etc.

As velocidades de queda das partículas elementares que constituem o sedimento ou de associações destas partículas (os flocos) devem ser conhecidas, do ponto de vista da dinâmica de sedimentação. Elas definem as possibilidades de deposição dos materiais em função dos fatores hidrodinâmicos e das profundidades da água.

Dois casos devem ser considerados: a velocidade de queda das partículas elementares e a velocidade de queda em condições de floculação.

### 3.2 Velocidades de Queda das Partículas Elementares

Quando uma partícula isolada cai em um líquido em repouso, ela atinge sua velocidade limite de queda  $W$  quando a resistência  $F$  que lhe é oposta pelo líquido torna-se igual a seu peso aparente no líquido.

Para uma partícula esférica de pequeno diâmetro, caindo em regime laminar, a velocidade  $W$  é dada pela lei de Stokes

$$W = \frac{gD^2}{18\nu} \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) ,$$

onde

$D$  é o diâmetro da partícula

$g$  é a aceleração da gravidade

$\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido

$\rho_s$  e  $\rho$  são os pesos específicos da partícula e do fluido.

Para regimes diferentes do laminar, há expressões propostas por BUDRYCK e por RITTINGER, cujas faixas de aplicação são definidas em função do Número de Reynolds. O quadro abaixo indica os valores desta velocidade para areia de diversos diâmetros

Diâmetro (cm)	Velocidade de queda (cm/s)
1	50
0,1	10
0,01	1
0,004	0,16

Para partículas de diâmetro inferior a 40  $\mu\text{m}$ , as velocidades de queda, em meio defloculante, são utilizadas para definir a distribuição granulométrica do material.

O Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF) de Maisons Alfort <sup>[1, 2]</sup> estabeleceu um programa de estudos de vários anos sobre materiais finos, com o obje



tivo de determinar os parâmetros mais importantes envolvidos em um estudo sedimentológico de regiões com predominância de finos. Este laboratório, além de coletar e analisar uma grande quantidade de informações, estabeleceu uma metodologia para tal tipo de estudos, a qual está sendo seguida neste trabalho. Dos trabalhos do LCHF, resultou a figura 5, apresentando os resultados obtidos com diversas vasas, no qual as porcentagens acumuladas de material, em meio defloculante, são representadas em função da velocidade de queda das partículas. Nela foi também incluído o resultado obtido para a amostra 134, de Santos. O gráfico mostra uma decantação bastante intensa, comparável à obtida para a amostra da Durance. Posteriormente, ela se torna mais lenta, sendo que, após 24 horas de decantação em meio calmo, cerca de 20% do material ainda permanecem em suspensão. A velocidade de queda correspondente a 50% do material é da ordem de  $8 \times 10^{-2}$  mm/s.

Para percorrer um metro, são necessárias, portanto, cerca de 3,5 horas, em meio sem agitação e sem agentes flocculantes.

### 3.3 Velocidades de Queda de Partículas Finas em Meio Flocculante

#### 3.3.1 Flocculação

Uma das características de uma suspensão de partículas muito finas é que as partículas transportam uma carga elétrica, variável segundo a composição do material em suspensão e segundo o meio aquoso.

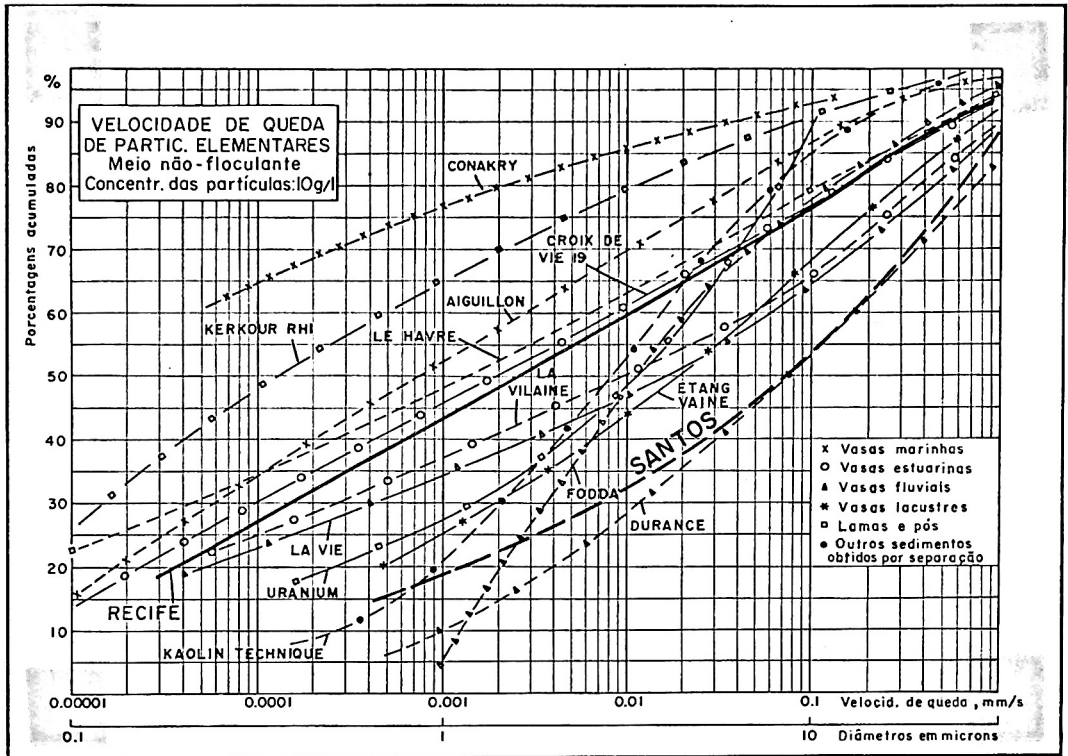


FIGURA 5

Esta carga pode ser positiva ou negativa; a maior parte das partículas argilosas tem cargas negativas. Se o potencial elétrico é suficientemente grande, as partículas se repelem umas às outras. Se ele for pequeno, haverá tendência à aproximação das partículas, que poderão se aglomerar em consequência de colisões, formando flocos.

Modificações deste potencial estão relacionadas a trocas iônicas. Assim, a adição de um íon  $H^+$  a uma suspensão estável induz à floculação, já que as argilas são, em sua maioria, carregadas negativamente. Inversamente, a adição de um íon  $OH^-$  favorece a dispersão.

Os íons citados não são, entretanto, os únicos que influenciam o equilíbrio iônico. Os diversos cations que se encontram na água e, particularmente, na água do mar, tais como  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ , favorecem a floculação.

Destes dados gerais, pode-se deduzir que o processo de floculação, com o aumento correspondente das velocidades de queda, irá variar, em uma suspensão, com a concentração do sedimento (da qual depende a superfície disponível para as trocas iônicas) e com a salinidade.

### 3.3.2 Influência do diâmetro das partículas elementares sobre a floculação.

Em concentrações iguais de material sólido, a superfície oferecida pelos grãos é tanto maior quanto me

nores forem os seus diâmetros. Deve-se esperar que a flocculação cresça com a superfície oferecida pelos grãos. Para quantificar este fenômeno, utiliza-se o fator de flocculação  $F$ , definido por

$$F = \frac{W_{f50\%}}{W_{d50\%}}$$

onde  $W_{f50\%}$  é a velocidade de queda em meio flocculante (água do mar a 30‰), correspondente a 50% do material, a uma determinada concentração e  $W_{d50\%}$  é a velocidade de queda das partículas, na mesma concentração, em meio não flocculante e corresponde à queda de 50% das partículas.

A partir de dados experimentais, foram definidas as relações

$$F \approx 250 D^{-1,8} \quad (D \text{ em microns})$$

ou

$$F \approx 250 W_d^{-0,9} \quad (W_d \text{ em mm/s}).$$

A curva resultante é apresentada na figura 6, na qual foi incluído também o ponto relativo à amostra 134 de Santos. O valor de  $F$  para esta amostra é da ordem de 5, o que corresponde a um valor pequeno, já que é frequente observar-se, experimentalmente, a ocorrência de valores de  $F$  entre 1000 e 10000. A vasa do porto de Recife, também estudada pela DIRAD para a PORTOBRÁS, apresentava

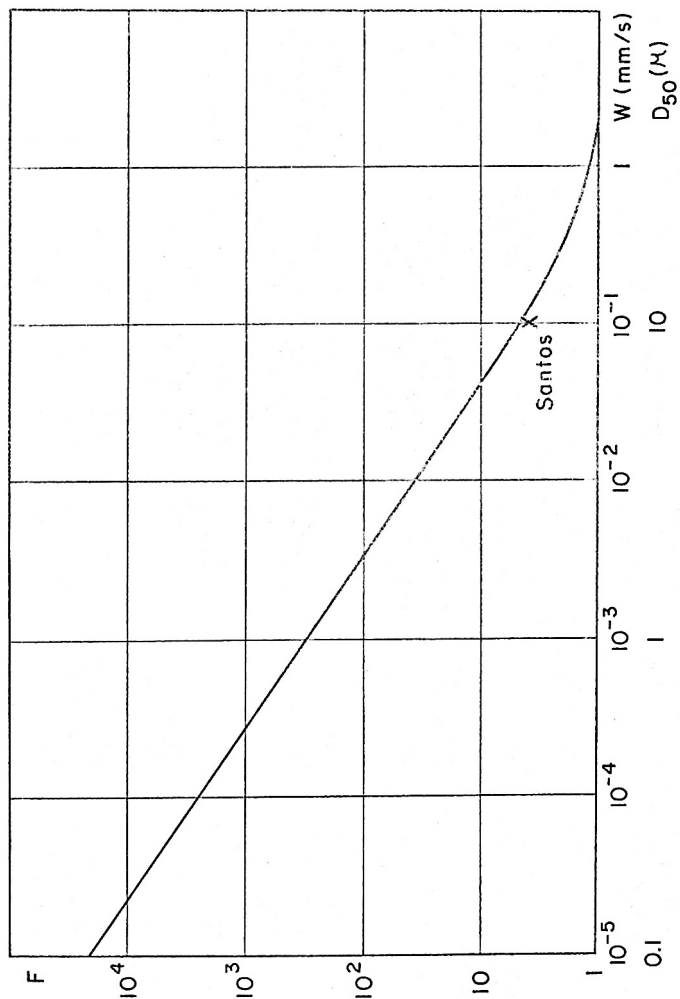


FIG. 6 - INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DAS PARTÍCULAS SOBRE A FLOCULAÇÃO

um valor de  $F = 60^{[3]}$ . Conclui-se, pois, que a vasa de Santos é particularmente pouco sensível ao fenômeno de floculação.

### 3.3.3 Influência da concentração de partículas sólidas na suspensão.

Na figura 7 as velocidades medianas de queda  $W_{f50\%}$  são representadas em função da concentração, em meio salino. Observa-se que a velocidade de queda aumenta buscamente até uma concentração da ordem de 10 g/l. Ela é, para 10 g/l, quase dez vezes maior que a velocidade de queda correspondente a 2 g/l. Para concentrações superiores a 10 g/l, a velocidade começa a decrescer. Este fenômeno é usual em vasas e é devido à presença, em fortes concentrações, de um número tão grande de flocos que a queda de um deles é perturbada pela presença dos outros. Desta maneira, o conjunto de flocos cai a uma velocidade homogênea, inferior à dos flocos individuais. O mesmo fenômeno explica porque, após 10 g/l, o gradiente da curva decresce.

Na figura 7 é também apresentada, para fins de comparação, a curva obtida para a vasa de Recife.

### 3.3.4 Velocidades de queda em meio floculante.

A determinação das velocidades de queda para diferentes concentrações de vasa em suspensão foi realizada pelo método da pipeta. Como o ambiente estudado, a baía

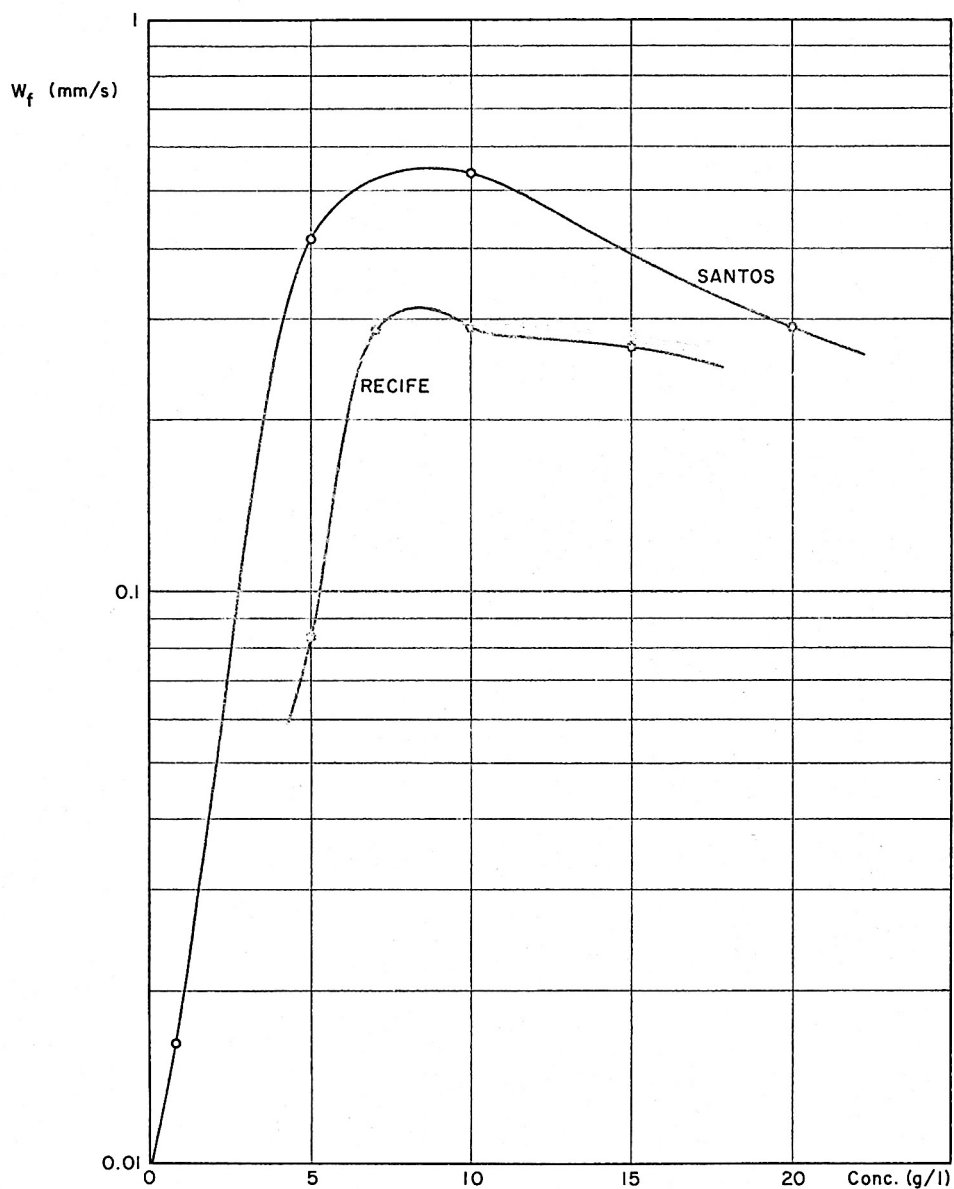


FIG. 7 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO EM PARTÍCULAS SÓLIDAS  
 SOBRE A VELOCIDADE DE QUEDA  
 (SALINIDADE : 30‰)

de Santos, apresenta constantemente salinidade oceânica, não se tornou necessário estudar a influência de diferentes teores de sal sobre o fenômeno da floculação: todos os ensaios foram realizados a uma salinidade de 30‰.

A figura 8 apresenta o comportamento da vasa de Santos (amostra 134), em meio floculante e não floculante, dentro do quadro geral de resultados obtidos pelo LCHF. Em ambos os casos, ela está quase no limite superior de velocidades de decantação. Trata-se de uma vasa relativamente grosseira, que se decanta rapidamente.

A figura 9 mostra os resultados obtidos para diversas concentrações (1 g/l, 5 g/l, 10 g/l e 20 g/l), em meio salino a 30‰. Como já foi anteriormente ressaltado, a velocidade de queda cresceu até a concentração de 10 g/l, decrescendo posteriormente para concentrações mais altas.

Finalmente, a figura 10 mostra a curva de velocidade de queda da vasa de Santos em água do mar, para uma concentração de 10 g/l, em comparação com os resultados obtidos para outras vasas.



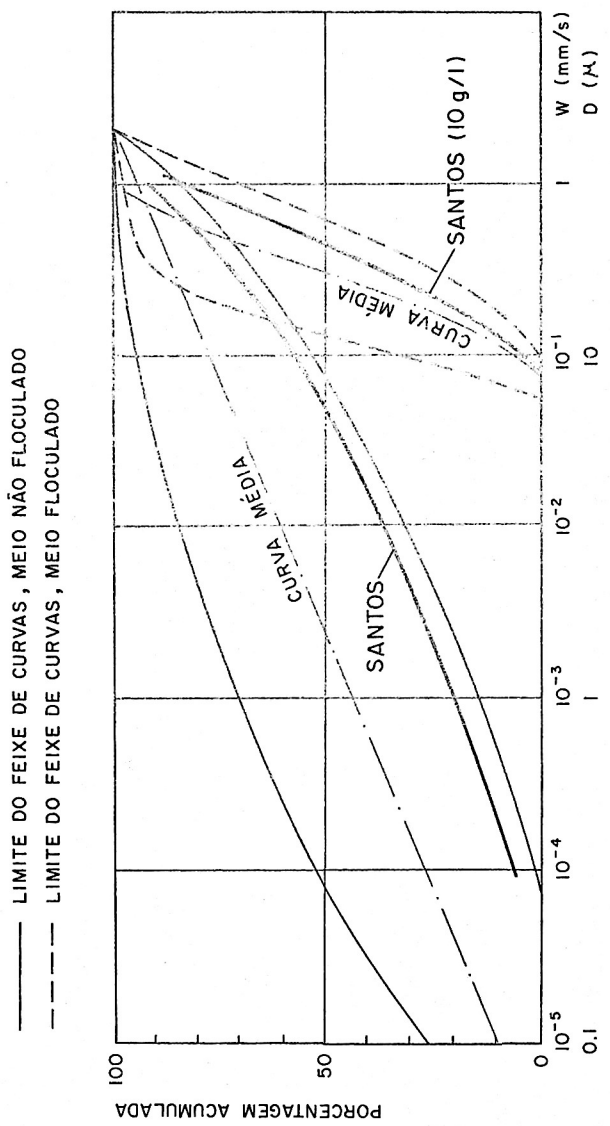


FIG. 8 - CURVAS DE VELOCIDADE DE QUEDA EM MEIO FLOCULANTE E NÃO FLOCULANTE

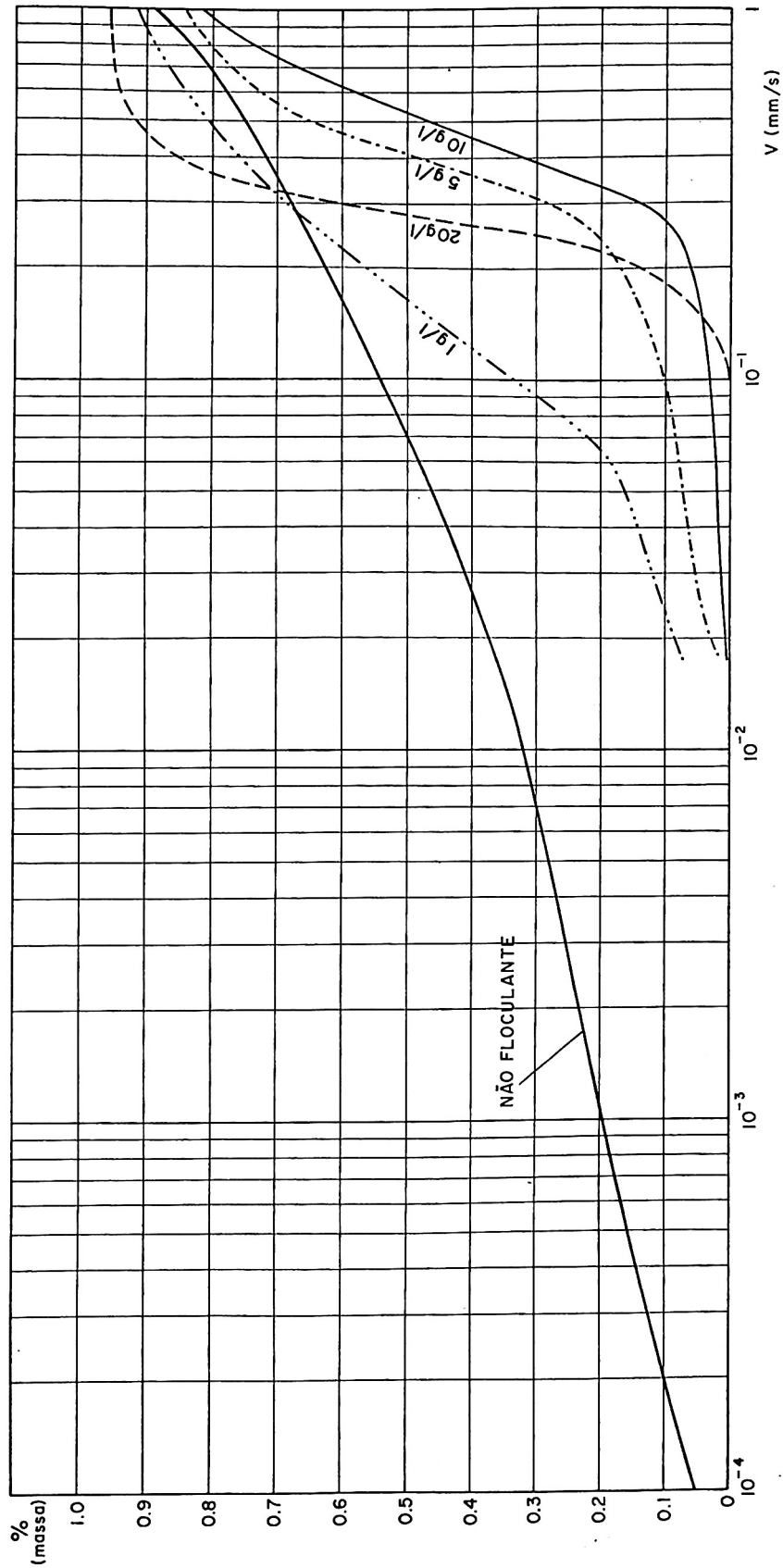


FIG. 9 - CURVAS DE VELOCIDADE DE QUEDA EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO, EM MEIO FLOCULANTE

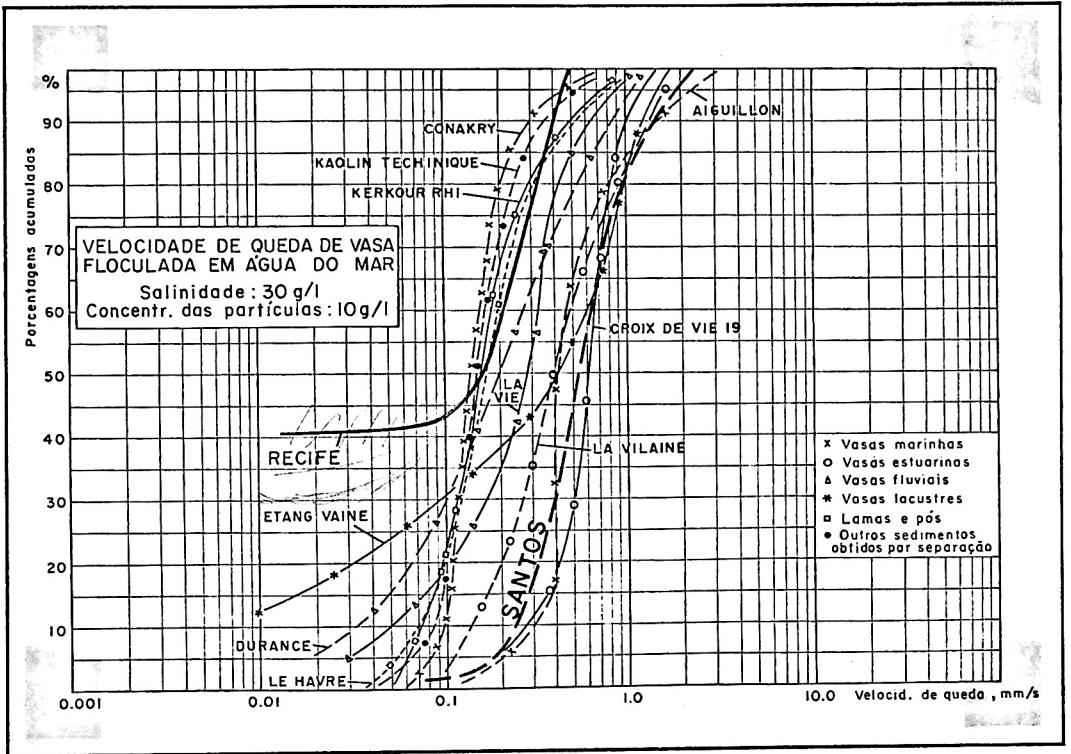


FIGURA 10

#### 4. PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS SEDIMENTOS

##### 4.1 Considerações Gerais

A viscosidade é uma medida do atrito interno em um fluido, resultante do deslizamento de uma camada do fluido sobre outra. Se dois planos paralelos do fluido, de mesma área  $A$  e distantes de  $dx$  se deslocam na mesma direção com velocidades diferentes  $V_1$  e  $V_2$ , a força  $F$  necessária para manter este deslocamento é, para um fluido newtoniano,

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx}$$

$\eta$  é uma constante, para um dado material, denominada viscosidade.

O gradiente de velocidades  $\frac{dv}{dx} = S$  é uma medida da velocidade à qual as diferentes camadas se deslocam umas em relação às outras. Ele representa o cisalhamento ao qual o líquido é submetido.

O termo  $\frac{F}{A} = F^1$  indica a força por unidade de superfície necessária para produzir o cisalhamento. Portanto

$$\frac{F^1}{S} = \eta$$

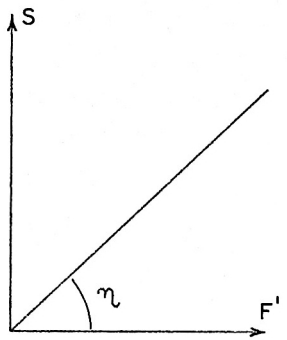
Para um fluido newtoniano, esta relação é cons

tante. Se representarmos, em um gráfico, a relação entre  $F^1$  e  $S$  obteremos uma linha reta (figura 11). Esta relação nem sempre é constante; este é o caso dos fluidos não newtonianos, aos quais pertencem as vasas. Entre os fluidos não newtonianos, tem-se os fluidos pseudoplásticos, os fluidos dilatantes e os fluidos plásticos ou de Bingham, cujos diagramas também aparecem na figura 11.

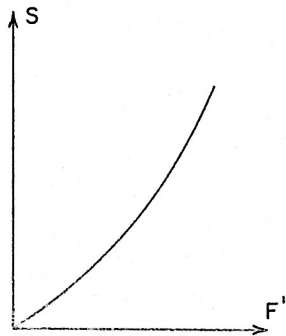
A maior parte dos depósitos de vasa tem o comportamento de um fluido plástico. Neles, a viscosidade  $\frac{F^1}{S}$  decresce quando a taxa de cisalhamento  $S$  decresce, já que os termos  $\frac{F^1}{S}$  são medidos a partir da origem do sistema de coordenadas. Neste tipo de fluidos, é necessária a aplicação de uma certa força a ele antes que o deslocamento das camadas de fluido ocorra. Esta força é chamada "yield value" ou rigidez inicial e representada por  $\tau_y$ .

Devem ser citados, ainda, os fluidos tixotrópicos, nos quais a viscosidade  $\frac{F^1}{S}$  depende, para um dado valor de  $S$ , dos cisalhamentos anteriormente sofridos. Frequentemente as vasas apresentam propriedades tixotrópicas. No caso mostrado na figura 11, por exemplo, a parte ascendente e a parte descendente da curva são diferentes.

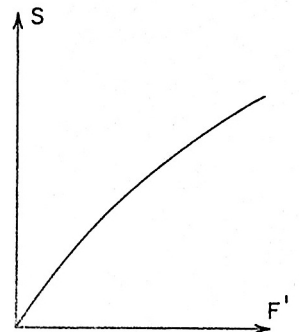
A viscosidade e a rigidez inicial constituem parâmetros físicos fundamentais na caracterização de uma dada vasa e na avaliação de seu comportamento sob ações hidrodinâmicas. Estudos realizados no LCHF demonstraram que a rigidez inicial  $\tau_y$  e a viscosidade  $\eta$  variam com a concentração  $T_s$  de um dado sedimento segundo relações da forma:



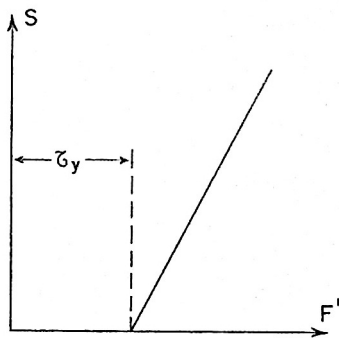
a. Newtoniano



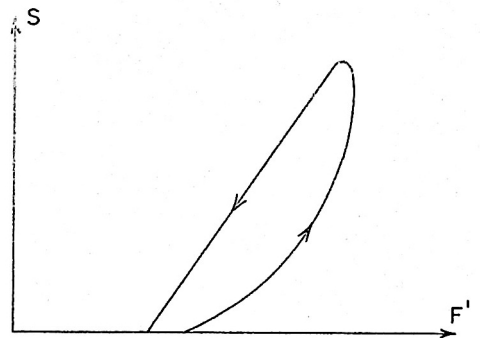
b. Pseudoplástico



c. Dilatante



d. Plástico ou de Bingham



e. Tixotrópico

FIG. II - PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS FLUIDOS

$$\tau_y = K_1 T_s^{n_1}$$

$$\eta = K_2 T_s^{n_2}$$

Os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$  e os expoentes  $n_1$  e  $n_2$  variam com a natureza da vasa estudada.

#### 4.2 Condições Experimentais

Os estudos reológicos foram feitos utilizando-se um viscosímetro de corpo girante Brookfield. As medições foram feitas sobre a vasa bruta (amostra em condições naturais) e sobre a vasa pura, variando-se as suas concentrações e medindo-se, para cada concentração, o valor de  $\tau_y$  correspondente.

A vasa pura foi obtida separando-a da fração a renosa por meio de uma peneira com malha de 40  $\mu\text{m}$ . Em seguida, ela foi deixada decantar, para eliminar-se o excesso de água, obtendo-se então uma amostra de vasa pura concentrada. A partir desta, por diluições sucessivas, foram obtidas as diferentes concentrações utilizadas. De cada uma das 3 amostras colhidas na baía de Santos, foram preparadas, para a análise reológica, 5 concentrações diferentes.

Um método semelhante foi empregado para a preparação das cinco amostras de vasa bruta, em diferentes concentrações.

#### 4.3 Influência da Concentração sobre a Rigidez Inicial

As figuras 12, 13 e 14 apresentam os resultados obtidos para as amostras 120, 130 e 134, relacionando rigidez inicial  $\tau_y$  e concentração  $T_s$ . Os resultados apresentados para cada amostra incluem o estudo da vasa pura e da vasa bruta. A vasa bruta é a vasa natural amostrada da baía de Santos, constituída por uma mistura da fração fina com a fração arenosa. A vasa pura contém apenas a fração fina presente na amostra, ou seja, o material de diâmetro inferior a 40 microns.

Os resultados para a vasa pura mostram uma quase coincidência, o que demonstra que o comportamento reológico da vasa presente nas três amostras é aproximadamente o mesmo.

As curvas apresentadas nas figuras 12, 13 e 14 podem ser representadas pela expressão:

$$\tau_y = K_1 T_s^{n_1} ,$$

sendo os valores dos parâmetros  $K_1$  e  $n_1$  apresentados no quadro seguinte.



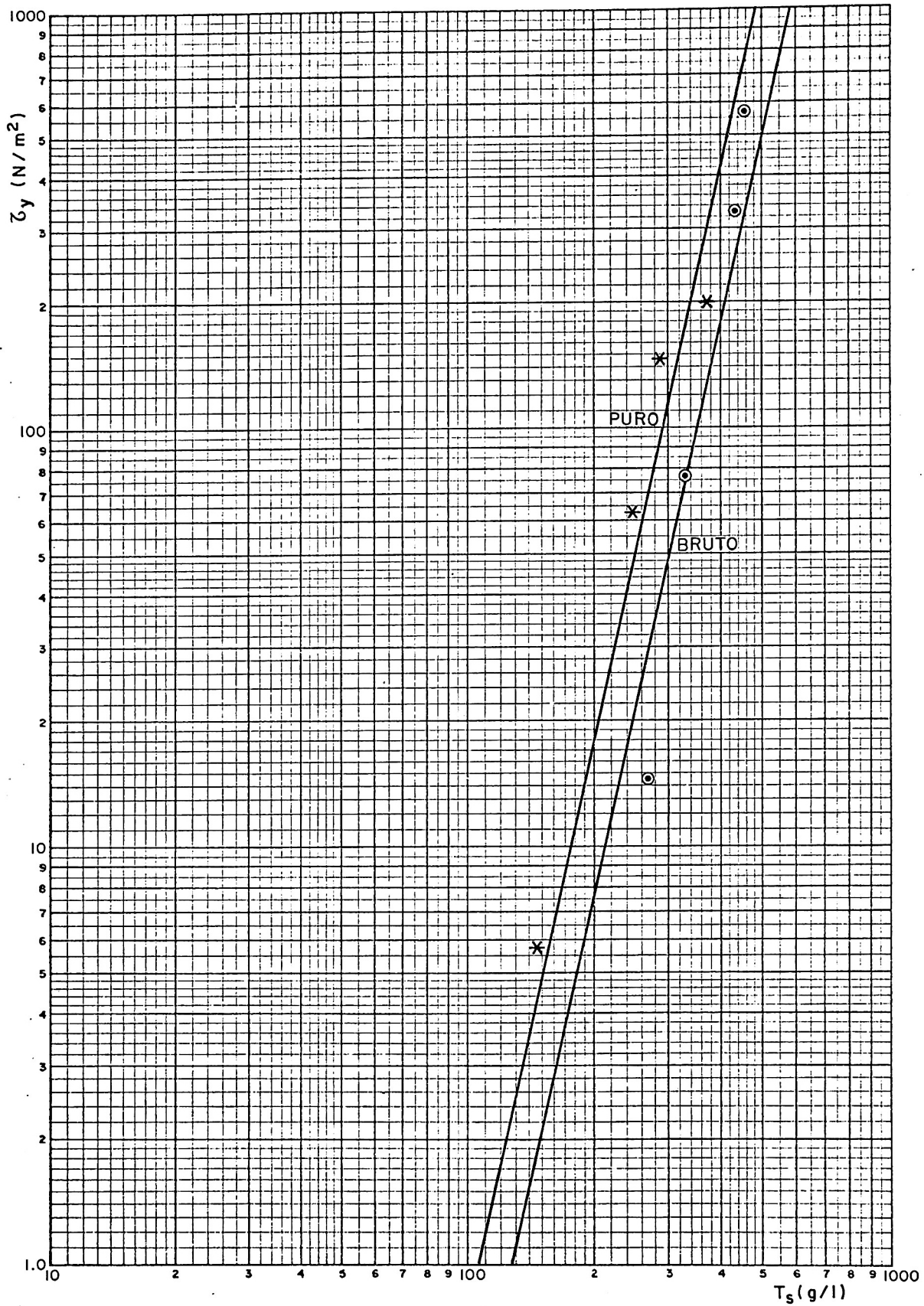


FIG.12 - RELAÇÃO ENTRE O TORQUE ( $\zeta_y$ ) E A CONCENTRAÇÃO ( $T_s$ ) PARA O SEDIMENTO PURO E BRUTO - AMOSTRA 120

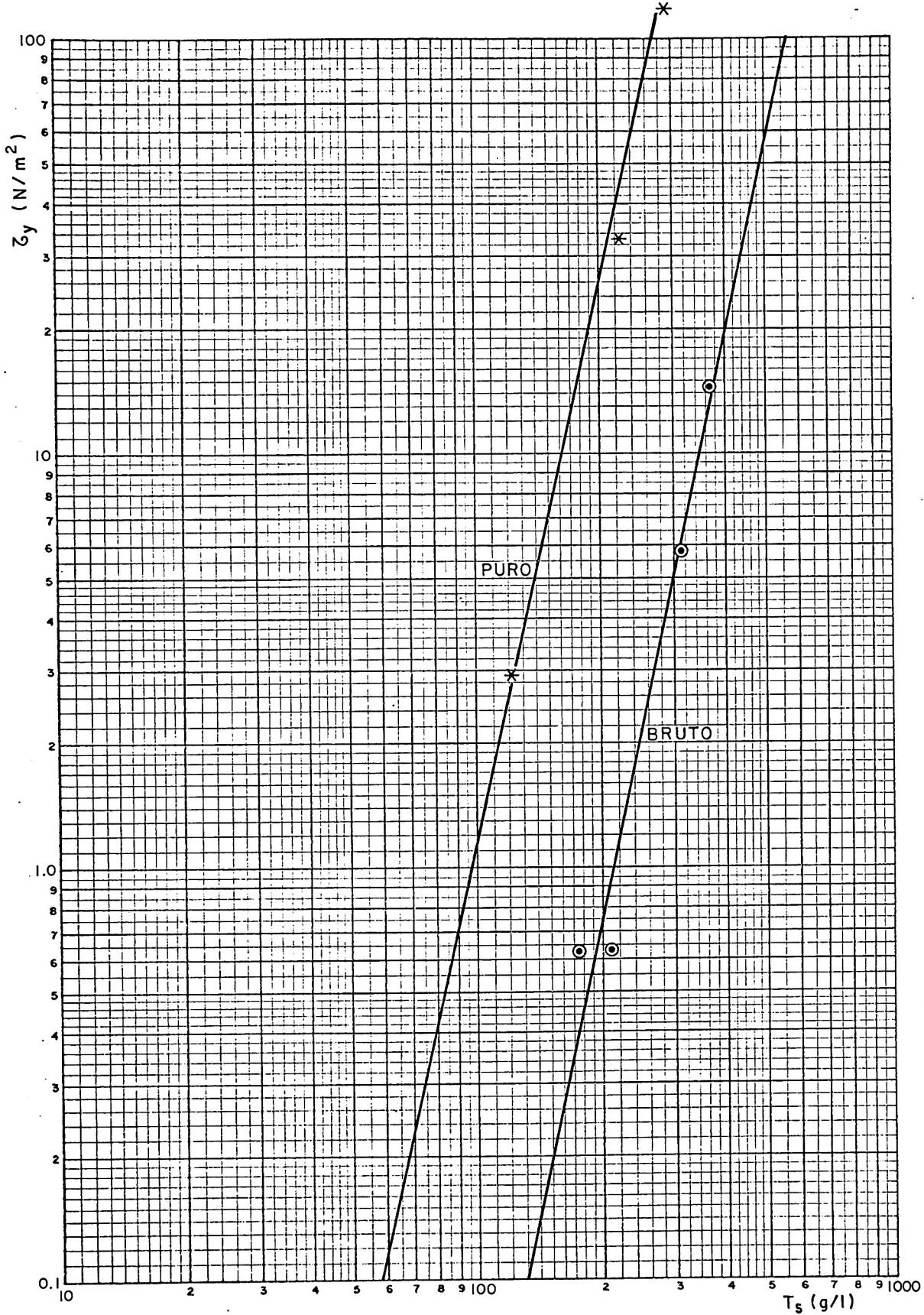


FIG. 13 - RELAÇÃO ENTRE O TORQUE ( $\zeta_y$ ) E A CONCENTRAÇÃO ( $T_s$ ) PARA O SEDIMENTO PURO E BRUTO - AMOSTRA 130

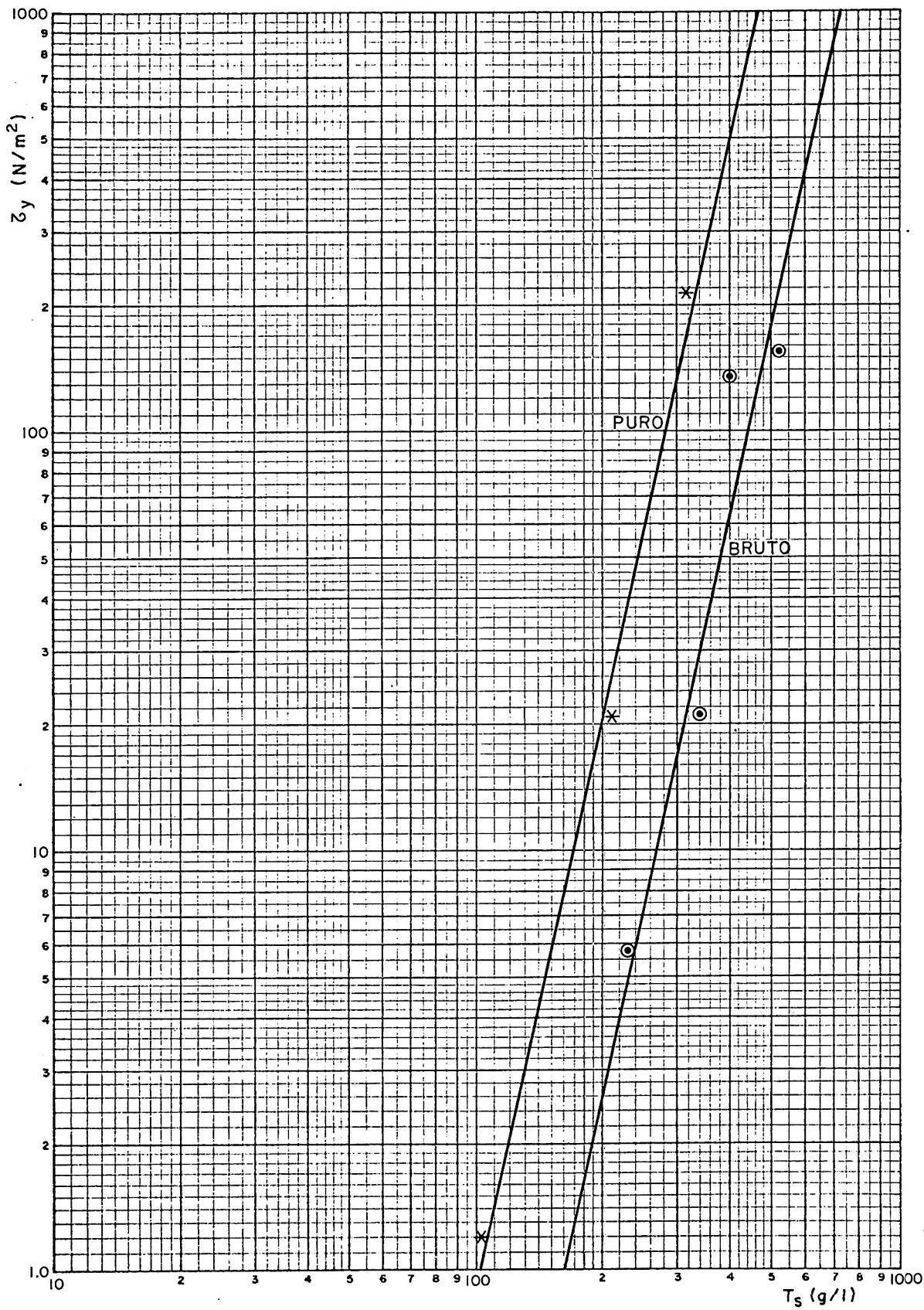


FIG. 14 - RELAÇÃO ENTRE O TORQUE ( $\zeta_y$ ) E A CONCENTRAÇÃO ( $T_s$ ) PARA O SEDIMENTO PURO E BRUTO - AMOSTRA 134

Número da Amostra		K	n
A 120	Bruta	$2,05 \times 10^{-10}$	4,59
	Pura	$4,08 \times 10^{-10}$	4,62
A 130	Bruta	$2,35 \times 10^{-11}$	4,58
	Pura	$7,82 \times 10^{-10}$	4,58
A 134	Bruta	$7,85 \times 10^{-11}$	4,58
	Pura	$3,43 \times 10^{-10}$	4,69

Os valores de  $n_1$  e  $K_1$  foram obtidos pela aplicação do método dos mínimos quadrados aos dados experimentais. A figura 15 apresenta os resultados obtidos para a vasa bruta.

#### 4.4 Influência da Concentração em Areia sobre a Rigidez Inicial

Foi também estudada a influência do teor em areia de uma das amostras de vasa sobre o valor da rigidez inicial. Nesta parte do trabalho preparou-se inicialmente uma amostra de vasa pura, a uma dada concentração, à qual foi adicionada areia, em porcentagens variáveis, cal

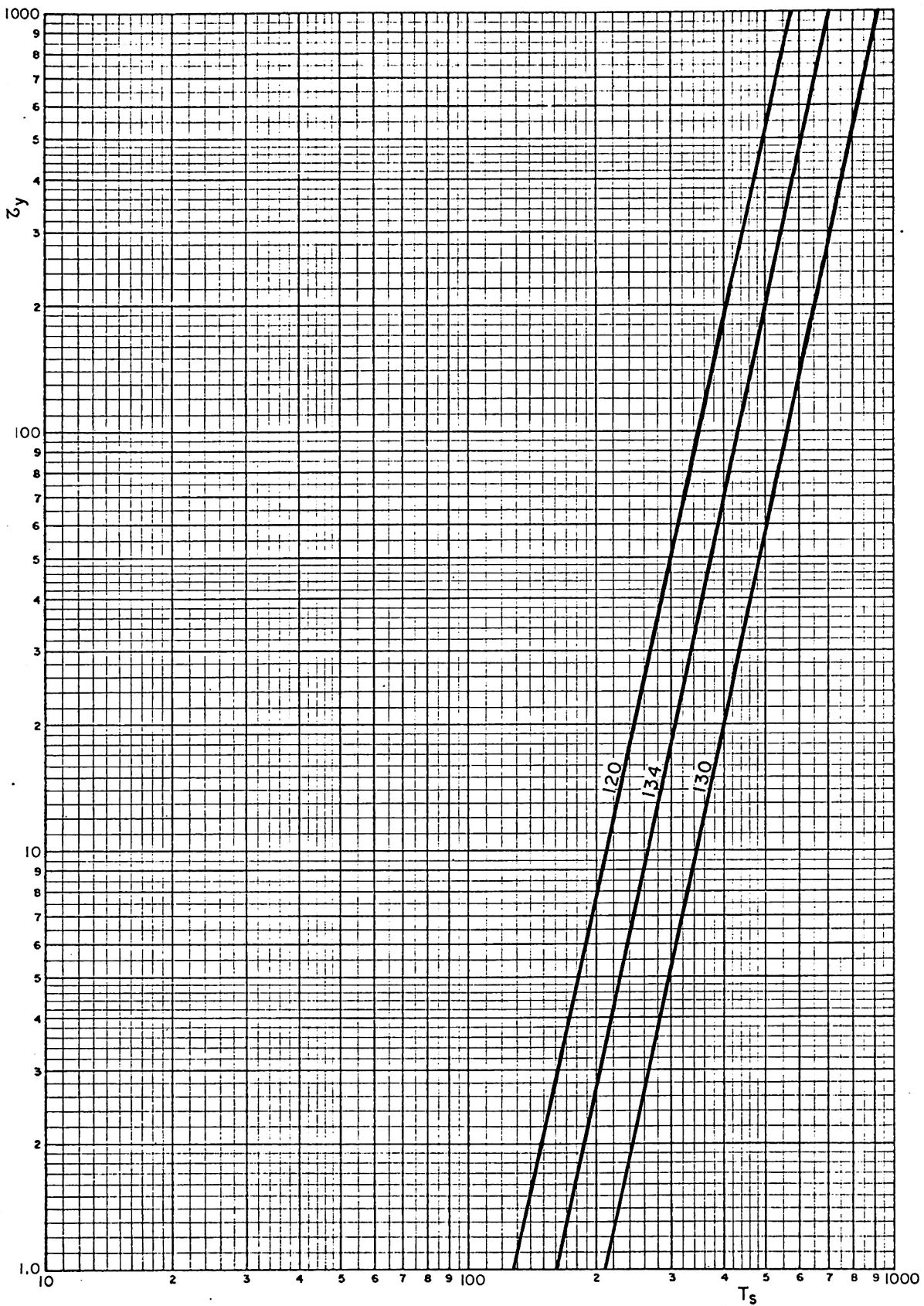


FIG. 15 - COMPARAÇÃO DAS CURVAS  $\zeta_y \times T_s$  PARA AS VASAS BRUTAS

culadas em relação à quantidade de finos presente na amostra. Um exemplo é apresentado a seguir. Seja uma amostra de vasa pura, à concentração de 369 g/l, contida em um volume de 450 cm<sup>3</sup>. Esta amostra contém, portanto, 166,05 g de vasa.

A quantidade de areia a ser acrescentada é obtida em função desta quantidade de vasa. Assim, 10% de areia corresponderão a  $T^1 = 0,10 \times 166,05 = 16,6$  gramas de areia a serem adicionadas à vasa. As quantidades de areia adicionadas variaram entre 10% e 75% da quantidade de finos presente na amostra.

O processo foi repetido, a partir de outras concentrações iniciais. Utilizando-se o viscosímetro para a determinação de  $\tau_y$ , foram obtidas as curvas apresentadas na figura 16, mostrando a variação de  $\tau_y$  em função da concentração da mistura vasa-areia.

Observa-se que, para uma dada concentração, a rigidez inicial decresce com o crescimento do teor de areia  $T^1$ . O fenômeno observado pode ser explicado pelo fato da coesão dever-se basicamente aos elementos finos presentes na amostra; a adição de sedimentos grosseiros diminui a quantidade de sedimentos finos, para uma dada concentração e, portanto, faz decrescer a rigidez inicial.

Observando-se a figura 16, nota-se o quase paralelismo das retas nela apresentadas, as quais correspondem a uma inclinação média  $n = 4,59$ . Isto sugere que, ao variar o teor de areia  $T^1$  presente na amostra, variará também, para uma dada concentração, o valor de K na expressão:

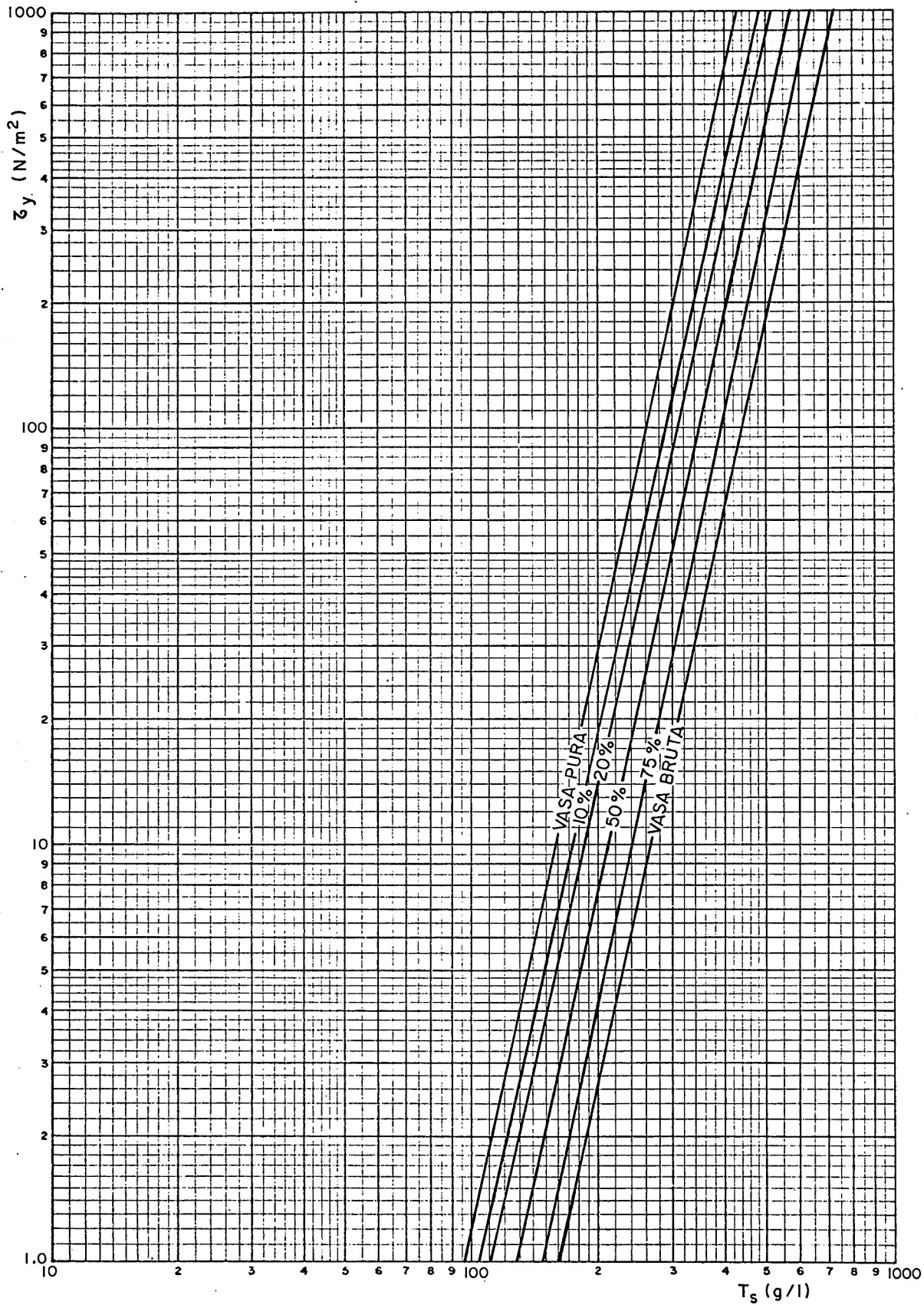


FIG. 16 - INFLUÊNCIA DOS TEORES DE AREIA SOBRE A RIGIDEZ INICIAL

$$\tau_y = K T_s^n$$

Procurou-se, então, determinar esta relação funcional, obtendo-se a curva apresentada na figura 17, a qual corresponde à expressão

$$K = (e^{1,83 - 0,024 T^1}) 10^{-10}$$

É, portanto, possível obter-se, para o caso da vasa de Santos, uma expressão geral que liga a rigidez inicial  $\tau_y$ , ao teor em areia  $T^1$  e à concentração da vasa:

$$\tau_y = e^{(1,83 - 0,024 T^1)} T_s^{4,59} \cdot 10^{-10}$$

É útil lembrar que o teor de areia, dado em porcentagem, é definido a partir da quantidade de vasa presente. Como exemplo, para uma vasa com  $T^1 = 46\%$  de areia, a uma concentração de 200 g/l, teremos

$$\tau_y = e^{(1,83 - 0,024 \times 46)} 200^{4,59} \cdot 10^{-10} = 7,5 \text{ N/m}^2$$

Esta fórmula pode ser utilizada com segurança apenas para teores de areia até cerca de 150%, que foi o limite superior das amostras utilizadas em sua obtenção.



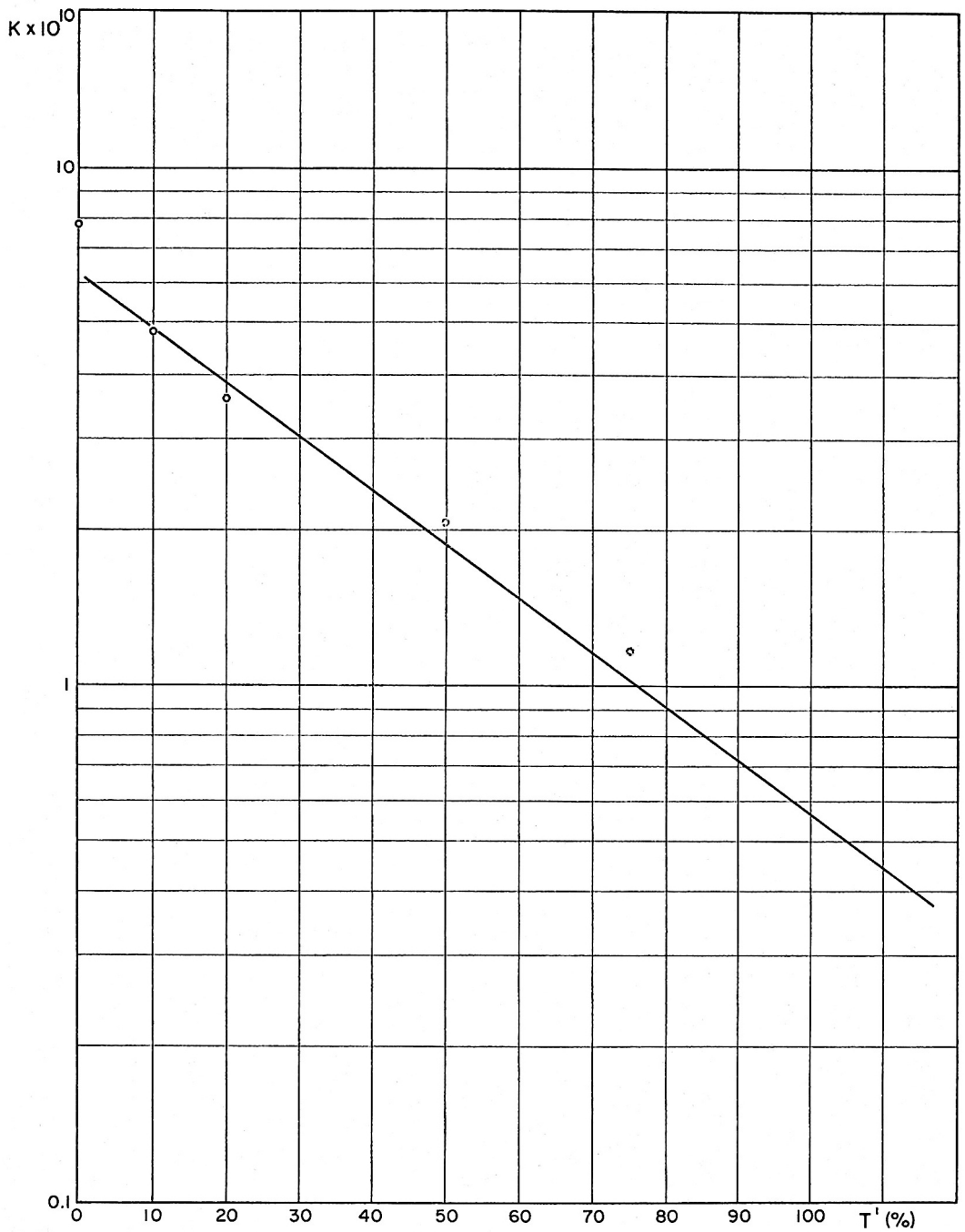


FIG. 17 - RELAÇÃO ENTRE K E O TEOR EM AREIA T'

Utilizando-se o gráfico da figura 17, verifica-se que o teor de areia das amostras utilizadas nos estudos reológicos (figura 12, 13 e 14) são, respectivamente

Amostra	Teor de Areia (T <sup>1</sup> ) (%)
120	46
130	135
134	85

Estas concentrações diferem das determinadas para as mesmas amostras, durante a realização da análise granulométrica. Isso se deve, provavelmente, ao fato de ter sido coletado um volume bastante grande de cada amostra, devido às necessidades da análise reológica. As amostras tendem, portanto, a serem pouco homogêneas, devido à decantação que a areia apresenta no decorrer do tempo. Apesar do misturamento prévio que era realizado antes do início de cada medição em laboratório, os resultados sobre teores em areia tendiam a diferir entre medições sucessivas. Entretanto, na amostragem geral realizada na baía (cerca de 50 amostras coletadas), estas diferenças não devem existir, já que se trabalhou sobre amostras muito menores, cada uma com cerca de 2 kg de material. Isto facilita a homogeneização feita antes das determinações em laboratório.

## 5. COMPORTAMENTO DOS SEDIMENTOS SOB AÇÕES HIDRODINÂMICAS

### 5.1 Considerações Gerais

Quando a energia dos agentes de transporte (ondas e correntes) não é suficiente para causar o deslocamento, por arraste e/ou em suspensão, dos sedimentos, eles tendem a se depositar. Conforme a sua natureza, os depósitos poderão ter evoluções diferentes. Assim, os materiais não coesivos, tais como as areias, podem ser considerados como inertes na escala de tempo em que os fenômenos são analisados: pequena ou nenhuma consolidação, processos geoquímicos praticamente nulos, etc. Com materiais finos, isto não ocorre. Observa-se, logo após a deposição, processos rápidos de consolidação, que são também acompanhados por modificações geoquímicas (trocas iônicas, modificações no pH, no teor de oxigênio, etc.).

Finalmente, podemos considerar, no caso de sedimentos grosseiros, que suas condições de início de movimento são pouco variáveis no tempo e dependem essencialmente do diâmetro dos grãos. Já para sedimentos finos coesivos estas condições vão depender das características gerais de cada sedimento e, especificamente, de sua rigidez inicial, a qual, por sua vez, tem estreita relação com o estado de consolidação do material.

No caso atual, aparecem na baía de Santos tanto amostras contendo apenas areia, como amostras constituídas de finos, normalmente em mistura com areia. Como es

te relatório trata especificamente do estudo de amostras com porcentagens altas de finos, este capítulo tratará a penas do comportamento deste tipo de sedimento sob ações hidrodinâmicas. O estudo do comportamento da fração arenosa está sendo objeto de medidas diretas com a utilização de traçadores radioativos. Durante este trabalho, estão sendo também registrados vários parâmetros hidráulicos, tais como ondas, correntes, ventos e marés. Espera-se, pois, poder estabelecer, no final do estudo com traçadores, uma boa correlação entre as medições diretas de transporte sólido e as causas que as produziram.

## 5.2 Reentrada em Suspensão de Sedimentos sob a Ação de Correntes

Um fluido que se escoar sobre um fundo exerce sobre ele uma tensão tangencial  $\tau_0$ . Este esforço tangencial é dado por

$$\tau_0 = \rho g R_H I,$$

onde  $R_H$  e  $I$  são o raio hidráulico e a inclinação da linha d'água.

Pode-se mostrar também que

$$\tau_0 = C_f \frac{\rho}{2} \bar{U}^2$$

onde  $C_f$  é o coeficiente de atrito e  $\bar{U}$  a velocidade média do escoamento. Resolvendo em relação à velocidade média, obtêm-se

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \sqrt{\frac{2}{C_f}}$$

A expressão  $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  tem a dimensão de uma velocidade e é denominada velocidade de cisalhamento  $u_*$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Portanto 
$$\bar{U} = u_* \sqrt{\frac{2}{C_f}}$$

É possível demonstrar ainda que, introduzindo o coeficiente de Chezy  $C$ , obtem-se

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}}$$

A tensão tangencial  $\tau_0$  sobre o fundo e, portanto, a velocidade de cisalhamento  $u_*$  estão diretamente ligadas à repartição das velocidades da corrente nas proximidades do fundo.

Esta repartição de velocidades é frequentemente obtida a partir de expressões propostas por Karman:

$$\frac{U}{u_*} = 5,5 + 5,75 \log \frac{y u_*}{\nu} , \quad \text{para fundos}$$

lisos e

$$\frac{U}{u_*} = 5,75 \log \frac{y}{0,108 \frac{\nu}{u_*} + 0,033 ks} ,$$

para fundos rugosos.

$y$  é a distância ao fundo,  $\nu$  a viscosidade cinemática e  $ks$  é o coeficiente de rugosidade do fundo.

No sistema CGS esta última equação, para o caso de fundo liso ou pouco rugoso, se torna

$$\frac{U}{u_*} = 5,75 \log 800 y u_*$$

Estas expressões são a base para o estabelecimento de critérios de início de movimento, tanto para material não coesivo, como para material coesivo, sob a ação de correntes. Trataremos, a seguir, do critério para materiais coesivos.

A velocidade crítica de erosão de uma vasa sob a ação de correntes depende de suas propriedades físico-químicas e, em particular, de sua coesão, a qual pode ser

caracterizada pelo valor da rigidez inicial  $\tau_y$ . Para uma dada vasa,  $\tau_y$  depende essencialmente do estado de consolidação, ou ainda, do teor em água, isto no caso de sedimentos pouco consolidados, do tipo encontrado na superfície dos fundos marinhos.

A relação entre  $u_*$  e  $\tau_y$  foi determinada empiricamente pelo LCHF, a partir de numerosos dados experimentais. Estes experimentos mostraram que a relação entre a velocidade crítica  $u_*$  e  $\tau_y$  tem a forma

$$u_{*crit} = 0,023 \tau_y^{0,25}$$

sendo  $\tau_y$  dado em  $N/m^2$  e  $u_*$  em  $m/s$ .

Como ordem de grandeza, pode-se indicar que, para erodir a maior parte das vasas observadas, em condições naturais, isto é, nas concentrações em que ocorrem em fundos, são necessários valores de  $u_{*crit}$  da ordem de 2 a 3  $cm/s$ . Isto corresponde a velocidades médias de corrente  $\bar{U}$  a um metro do fundo da ordem de 50 a 60  $cm/s$ . As curvas de  $u_{*crit}$  em função da concentração, baseadas na expressão anterior, são apresentadas, para a vasa pura e a vasa bruta, nas figuras 18, 19 e 20.

Os dados sobre correntes coletados na área da baía de Santos não indicam a existência de altas velocidades. Dados obtidos na presente campanha, em um ponto situado a 1m do fundo, numa região de profundidade total de cerca de 8m, indicam que os valores máximos de velocidade de corrente não deverão ultrapassar 40  $cm/s$ . A esta velo

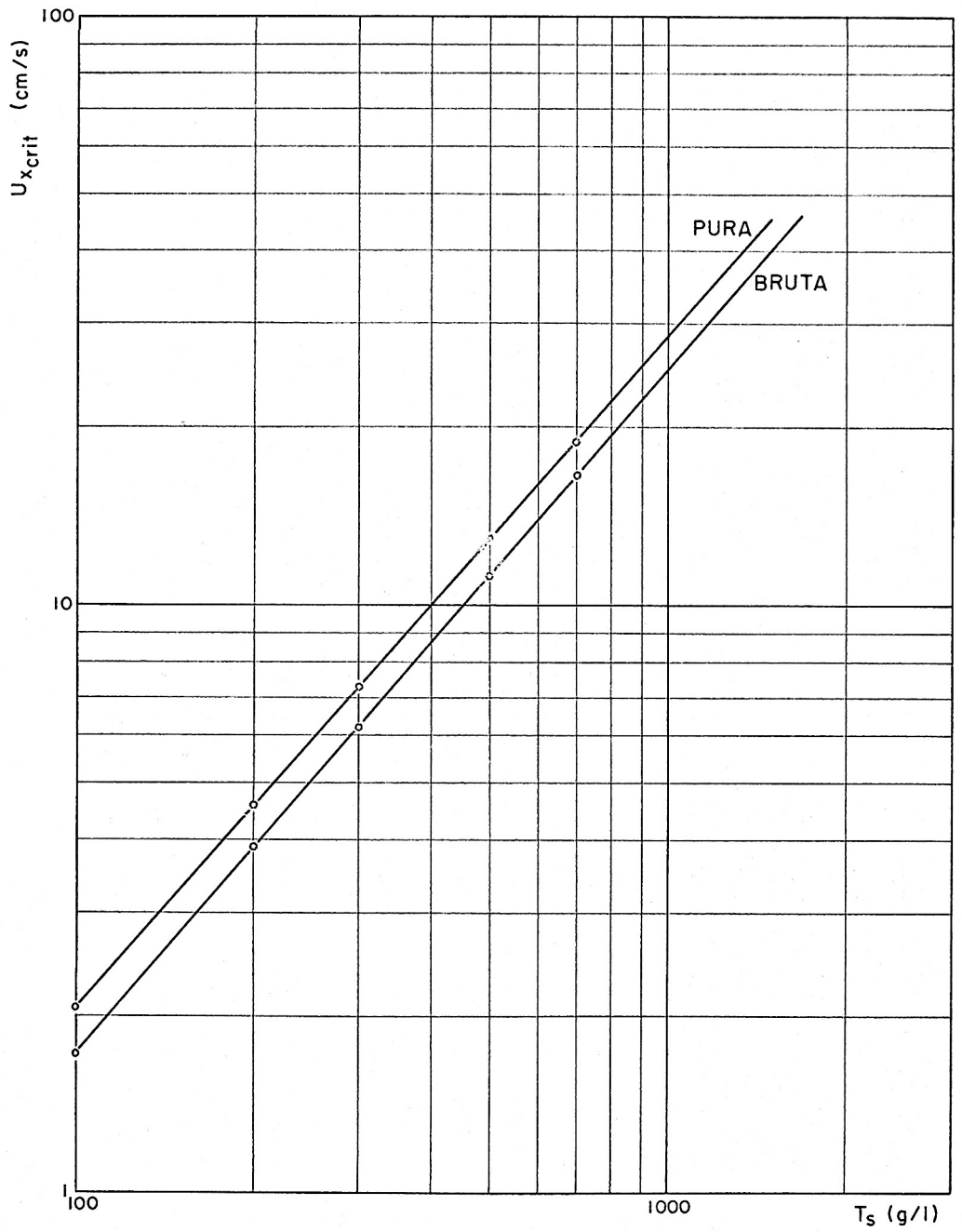


FIG. 18 - RELAÇÃO ENTRE  $U_{x_{crit}}$  E  $T_s$  - AMOSTRA 120



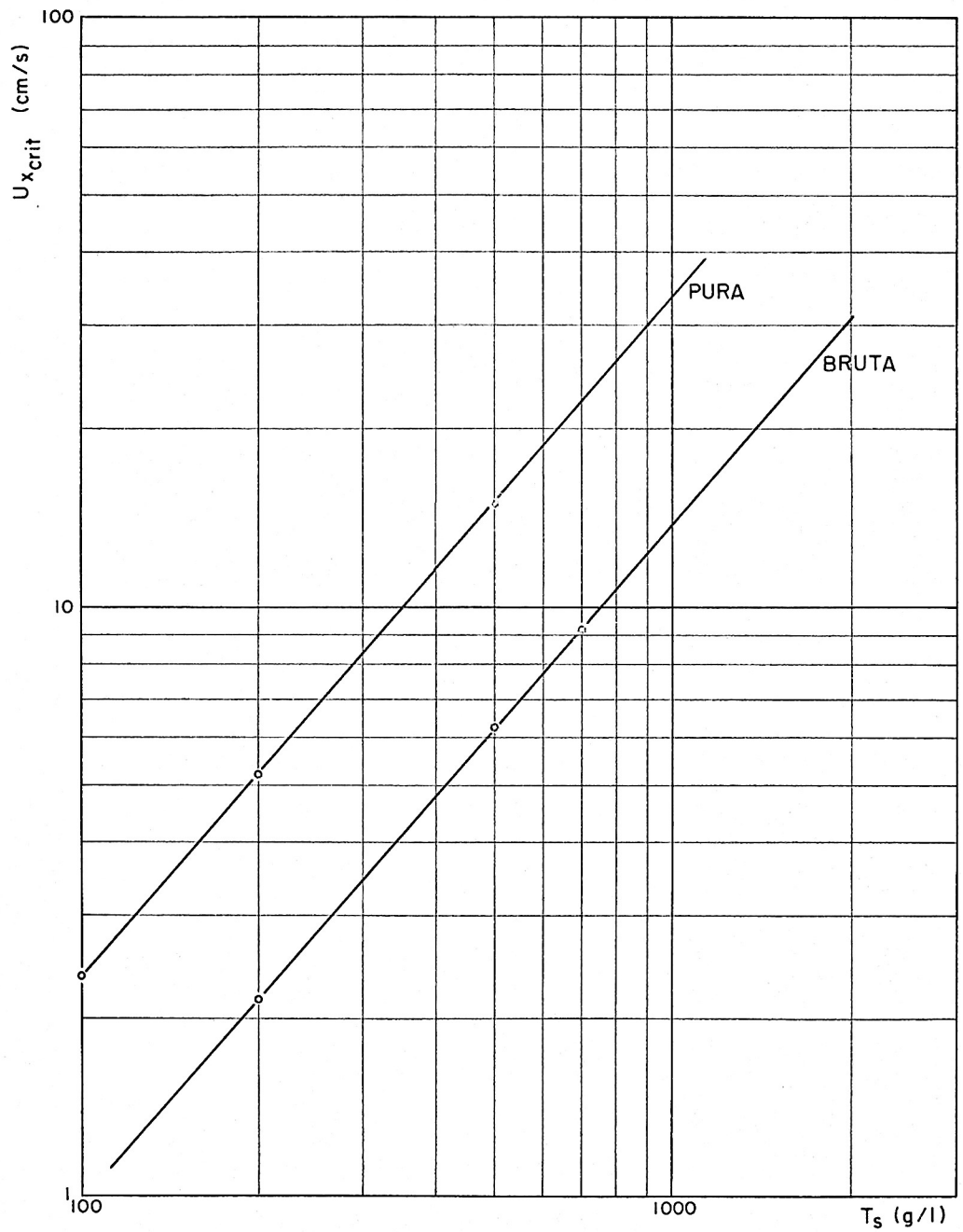


FIG. 19 - RELAÇÃO ENTRE  $U_{xcrit}$  E  $T_s$  - AMOSTRA 130

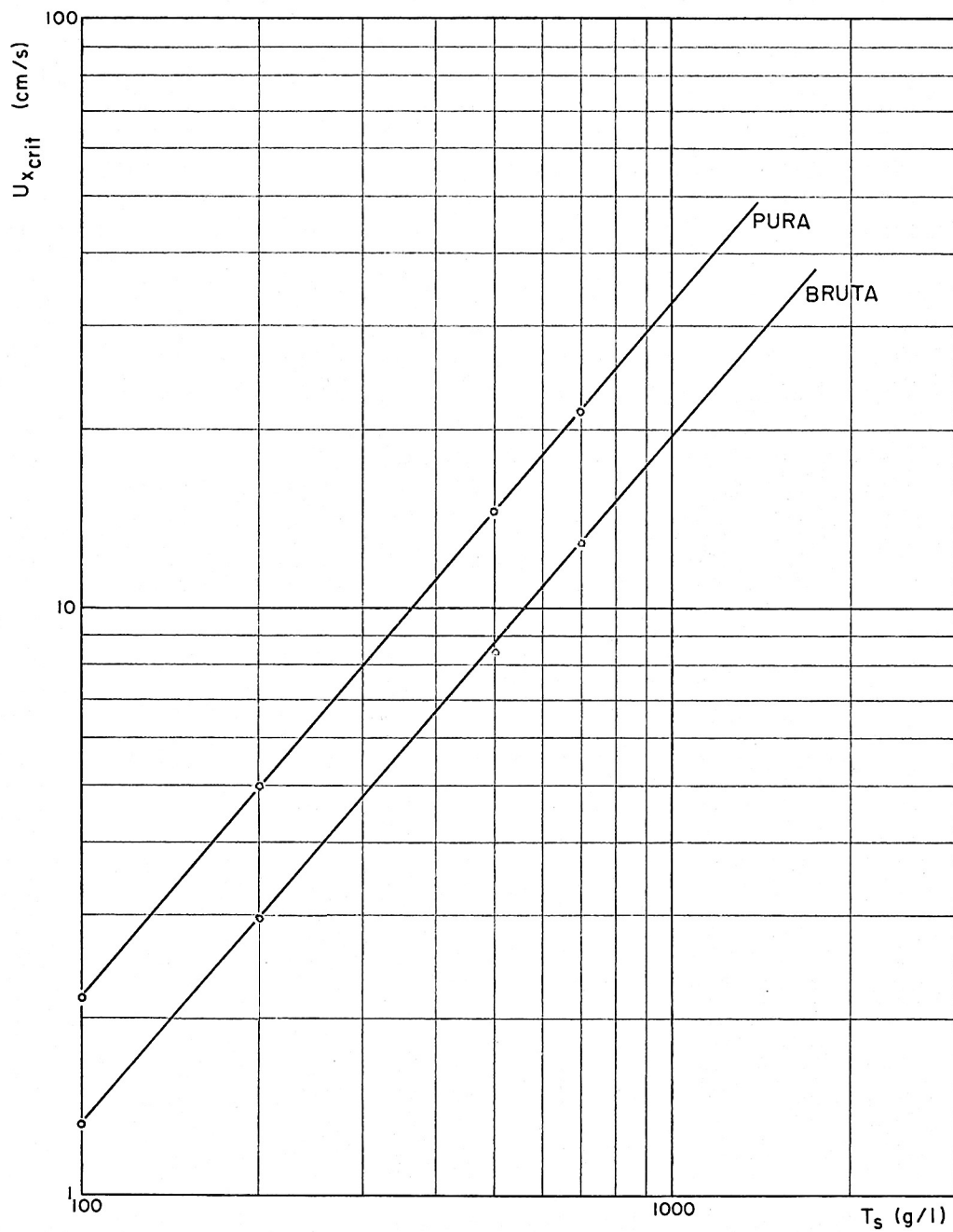


FIG. 20 - RELAÇÃO ENTRE  $U_{x_{crit}}$  E  $T_s$  - AMOSTRA 134

cidade, a 1m do fundo, corresponde uma velocidade crítica  $u_{*crit} = 1,4$  cm/s.

Portanto, a ação isolada das correntes poderá causar apenas a movimentação de sedimentos em concentrações tais que correspondam a uma velocidade crítica de 1,4 cm/s.

Isto corresponde, no caso das amostras 120, 130 e 134 a concentrações entre 80 g/l e 150 g/l. Estas concentrações são observadas em material não consolidado, de deposição recente. Para material nas concentrações habitualmente observadas em fundos (300 g/l a 500 g/l), a ação isolada das correntes não poderá produzir reentrada do sedimento em suspensão.

É importante observar que as correntes poderão, no entanto, transportar material que tenha sido colocado em suspensão por ação das ondas.

### 5.3 Condições de Reentrada em Suspensão de Materiais Coesivos sob a Ação de Ondas

#### 5.3.1 Dados gerais.

Para uma onda irrotacional, as partículas de água descrevem, na superfície, elipses fechadas que são descritas em um período. À medida que se aproximam do fundo, estas elipses tornam-se mais achatadas. No fundo, o movimento torna-se um deslocamento horizontal, caracterizado por uma distância de movimentação  $A$  dada por:

$$A = \frac{H}{\text{sh } 2\pi \frac{d}{L}}$$

e por uma velocidade  $U_0$  expressa por

$$U_0 = \frac{\pi H}{T \text{ sh } 2\pi \frac{d}{L}}$$

onde

$H$ ,  $L$  e  $T$  são a amplitude, o comprimento de onda e o período da onda

$d$  é a profundidade da água

A tensão tangencial que se exerce no fundo é

$$\tau_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_0 \rho v}{\delta}$$

onde  $\delta$  é um comprimento característico proporcional à espessura da camada limite:

$$\delta = \sqrt{\frac{vT}{\pi}}$$

A velocidade de cisalhamento  $u_*$  é então

$$u_* = 2,2 \left( \frac{v H^2}{T^3 \text{ sh}^2 2\pi \frac{d}{L}} \right)^{1/4}$$

ou

$$u_*^4 = \frac{8 \nu U_0^2}{\Pi T}$$

A figura 21 apresenta os ábacos para o cálculo de  $U_0$  e  $u_*$

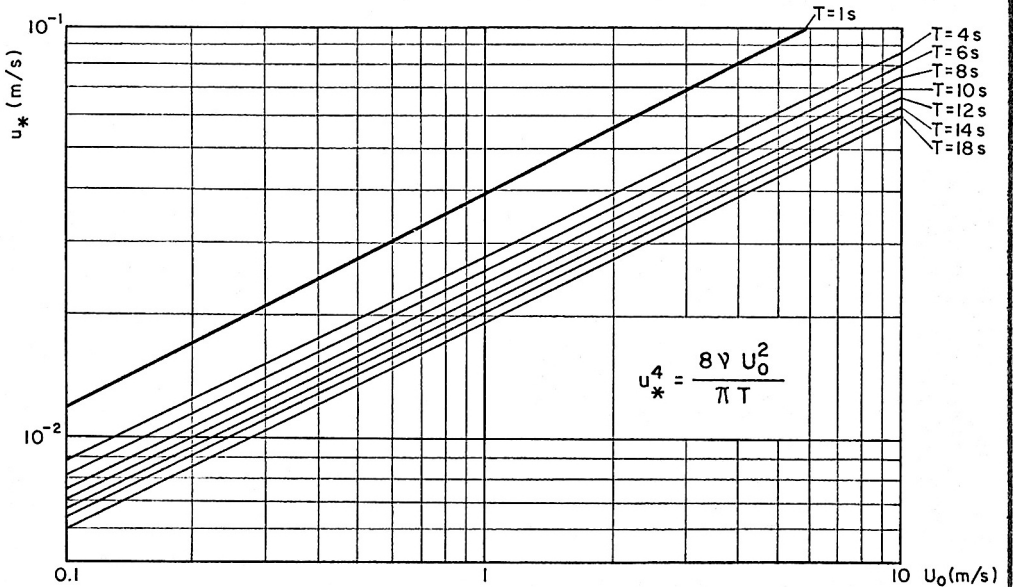
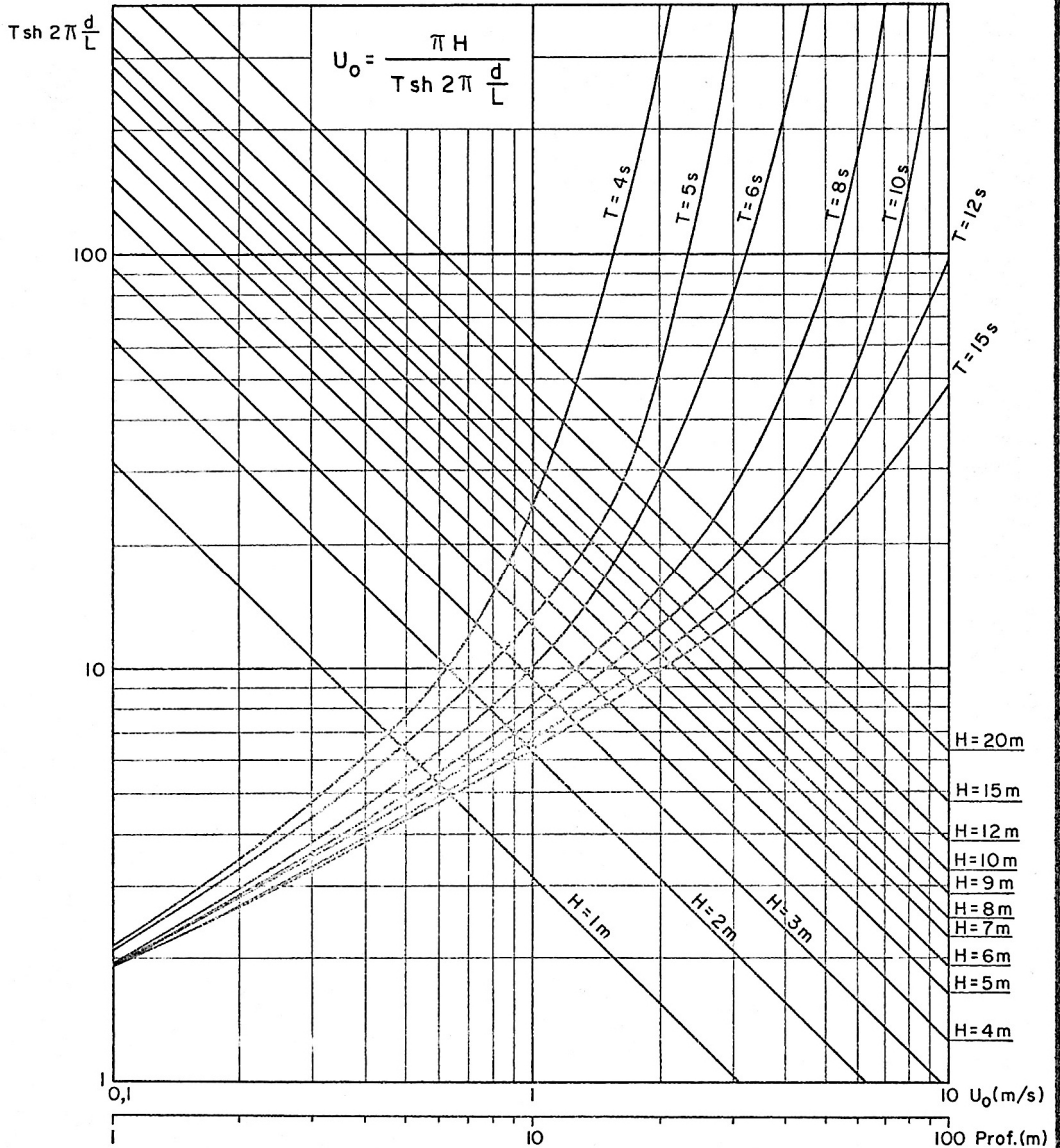
Do mesmo modo que para as correntes, a passagem dos sedimentos do estado de repouso para o de movimento (oscilatório, no caso de ondas) depende das tensões que agem sobre o fundo. Deve-se distinguir, como para as correntes, o caso dos materiais coesivos e não-coesivos.

### 5.3.2 Propagação de ondas sobre fundos em vasa.

Os materiais finos constituem fundos que apresentam coesão. A onda irá propagar-se sobre eles de um modo diferente daquele que se efetua sobre fundos compostos de grãos isolados, tais como os arenosos. A propagação da onda e o seu efeito sobre o fundo devem ser tratados de modo diferente, conforme haja ou não a presença de material coesivo no fundo. Para o caso de fundos em vasa, há dois casos a distinguir:

- ação da onda sobre um fundo em vasa que já sofreu uma consolidação relativamente longa.
- propagação de uma onda em uma vasa fluida, de viscosidade inicialmente homogênea e que está sofrendo o efeito de uma consolidação ao longo do tempo.

FIG. 21 - ÁBACOS PARA O CÁLCULO DE  $U_0$  E  $u_*$



No primeiro caso, uma vasa consolidada apresenta uma certa rigidez inicial. Enquanto a onda não tiver uma energia suficiente para romper esta rigidez inicial, a sua propagação sobre o fundo efetua-se sensivelmente da mesma maneira que no caso de um fundo rígido. Quando as forças devidas à ação das ondas tornam-se suficientes para vencer a rigidez inicial, as propriedades reológicas e tixotrópicas da vasa sofrem modificações importantes, caracterizadas, em particular, por um decréscimo da viscosidade. As partículas de vasa na superfície do fundo não tem mais como trajetória uma elipse muito achatada, mas sim uma elipse cuja dimensão do eixo vertical não é desprezível. A espessura da vasa que intervém no movimento depende, simultaneamente, das características das ondas e das características da vasa. Se a rigidez inicial não era muito alta, é possível constatar, ao longo do tempo, uma fluidificação da vasa.

Já para uma vasa em compactação, a propagação da onda varia com o estado de consolidação da vasa. Esta propriedade ficou aparente em ensaios realizados sobre uma vasa em consolidação pelo LCHF. Para uma vasa muito fluida, com viscosidade menor que 10 cp, os comprimentos de onda do movimento são sensivelmente iguais aos que ocorrem em água clara, para uma dada profundidade de água entre a superfície e o fundo rígido. Se as características da onda não são suficientes para intervir na consolidação, a viscosidade da camada de vasa vai crescendo, enquanto sua espessura diminui. Este fenômeno altera o comprimento de onda médio da onda, diminuindo-o em relação ao comprimento de onda teórico.

Em uma vasa com viscosidade inferior a 100 cp, vão se desenvolver, sob a ação da onda, movimentos oscilatórios que não mais correspondem às equações clássicas para um fluido perfeito. Torna-se indispensável introduzir termos de viscosidade nas equações de Navier-Stokes. Em trabalhos experimentais foi constatado que a influência do termo de viscosidade reflete-se, na proximidade da interface líquido-vasa, por um decréscimo muito rápido na amplitude do movimento oscilatório. No caso de um fluido não viscoso, o amortecimento é, pelo contrário, progressivo. Em ambos os casos, observa-se um movimento elíptico das partículas, que se propaga a uma profundidade tanto menor quanto maior for a viscosidade da vasa e menor a amplitude da onda. Em resumo:

- a amplitude dos movimentos orbitais decresce brutalmente na interface fluido-vasa e, depois, de modo progressivo no interior da vasa.
- o decréscimo dos movimentos orbitais é tanto mais rápido quanto maior for a viscosidade da vasa.
- para uma dada vasa, a amplitude dos movimentos é tanto maior quanto maior for a amplitude da onda.



#### 5.4 Movimento de Translação das Partículas de Vasa no Sentido de Propagação da Onda

O desenvolvimento de um movimento laminar no fluido viscoso que constitui a vasa, sob a ação de uma onda, traduz-se por um movimento de translação médio das partículas de vasa no sentido de propagação da onda, apresentando alguma analogia com o que se observa em fundos rígidos. Esta ação traduz-se na evolução de um fundo horizontal para um perfil de equilíbrio, com a inclinação no sentido montante-jusante (sentido de propagação da onda).

A repartição das velocidades de translação média no fluido e na vasa é apresentada na figura 22. Pode-se verificar nela que:

- a velocidade de deslocamento decresce muito rapidamente em função da profundidade de vasa.
- nas condições experimentais ( $d = 25\text{cm}$ ,  $H$  entre 0 e 5cm; vasa com viscosidade entre 30 e 70 cp) dos estudos em laboratório, verificou-se que a velocidade de deslocamento  $U_v$  da vasa na superfície estava ligada à velocidade teórica na camada limite sobre um fundo rígido pela expressão

$$U_v = 0,25 U_{cl}.$$

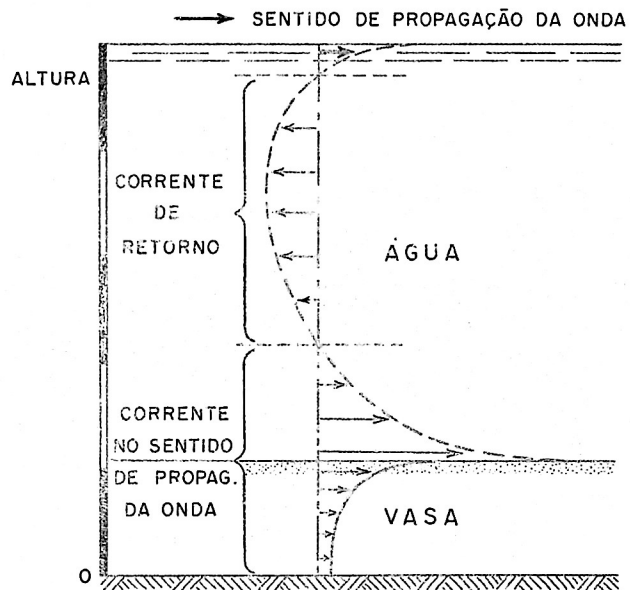


FIG. 22 - DESLOCAMENTO DE VASA FLUIDA OU PLÁSTICA SOB A AÇÃO DE ONDAS

Observou-se, também, no decorrer do trabalho experimental que:

- a vazão sólida da vasa arrastada para a costa por este movimento de translação causado pela ação de ondas é inversamente proporcional à viscosidade da vasa.
- a velocidade de deslocamento cresce com a amplitude da onda.

Na prática, o movimento da camada limite no sentido de propagação da onda provoca um transporte de material na direção da costa, até uma região na qual a turbulência é suficientemente elevada para que apareça a reentrada em suspensão.

#### 5.5 Reentrada em Suspensão dos Sedimentos

A determinação do comportamento de sedimentos finos sob a ação de ondas não é ainda tão desenvolvido como o resultante da ação de correntes. Para determinar, com precisão, o comportamento da vasa de Santos, relacionando-o com o regime ondulatório reinante na região, seria necessário um estudo em modelo reduzido, no qual fossem variadas a amplitude e a frequência das ondas, as concentrações de sedimento e os seus teores em areia.

Neste estudo, poderia ser determinado o valor  $u_{*crit}$  para a reentrada em suspensão do sedimento estudado

do, valor esse que poderia ser relacionado com o valor da rigidez inicial  $\tau_y$  que caracterizasse a vasa.

Resultados experimentais obtidos sobre outras vasas pelo LCHF indicam que:

- para uma dada concentração em sedimento  $t_o$  tal,  $u_{*crit}$  é tanto menor quando maior for o teor em areia.
- existe, como no caso de correntes, uma relação entre a rigidez inicial  $\tau_y$  e a velocidade crítica  $u_{*crit}$ . Para o caso de ondas, entretanto, este valor de  $u_{*crit}$  é cerca de duas vezes menor do que o observado para as correntes.

Esta última observação pode ser explicada por:

- no caso de uma corrente permanente e bem estabelecida, o valor de  $u_*$  é constante. No caso de ondas, o valor de  $u_*$  varia, sendo que, em critérios de início de movimento, o valor utilizado para  $u_*$  não é seu valor máximo, mas um valor médio.
- as velocidades geradas sobre o fundo pelas ondas são variáveis e pode-se considerar que o fator aceleração tenha importância sobre as condições de reentrada em suspensão.

- as flutuações de pressão existentes no fundo podem ter também um papel que favoreça a reentrada da vasa em suspensão.

Por este conjunto de razões, é razoável que o valor de  $u_{*crit}$  para a ação de ondas seja inferior ao correspondente para correntes, para uma vasa de mesma rigidez inicial. Os estudos já citados apresentam uma relação entre  $u_{*crit}$  e  $\tau_y$  da seguinte forma:

$$u_{*crit} = 0,009 \tau_y^{1/3} ,$$

para  $u_{*crit}$  em m/s e  $\tau_y$  em  $N/m^2$ .

Apliquemos esta expressão para as 3 amostras cuja reologia foi estudada, para concentrações entre 200 g/l e 500 g/l, sendo  $\tau_y$  em  $N/m^2$  e  $u_{*crit}$  em m/s

		200 g/l	300 g/l	500 g/l
120	$\tau_y$	7,5	46	500
	$u_{*crit}$	0,018	0,032	0,071
130	$\tau_y$	0,7	5	55
	$u_{*crit}$	0,008	0,015	0,034
134	$\tau_y$	2,5	16	180
	$u_{*crit}$	0,012	0,023	0,051

As concentrações foram escolhidas como sendo as habitualmente encontradas para material de fundo estável, isto é, para material já depositado por tempo suficiente para atingir aquelas concentrações.

Pode-se agora calcular o valor de  $u_*$  resultante da ação de ondas pelas expressões:

$$U_0 = \frac{\Pi H}{T \sinh 2\Pi \frac{d}{L}}$$

e

$$u_*^4 = \frac{8 \nu U_0^2}{\Pi T}$$

anteriormente citadas. Para utilizar a primeira expressão, é necessário calcular-se o comprimento de onda  $L$ , o que foi feito utilizando-se

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\Pi}$$

e

$$L = L_0 \operatorname{tgh} \frac{2\Pi d}{L},$$

sendo  $L_0$  o comprimento de onda em profundidade infinita e  $L$  o comprimento de onda à profundidade  $d$ .

Para a amostra 120, a profundidade  $\underline{d}$  foi de 11m, considerando-se ondas de períodos 5s, 6s e 7s e de amplitudes 2m, 3m, 4m e 5m. Os resultados obtidos para  $u_*$  são apresentados na tabela seguinte.

	$\underline{d} = 11\text{m}$ $L = 37\text{m}$ $T = 5\text{s}$	$\underline{d} = 11\text{m}$ $L = 56\text{m}$ $T = 6\text{s}$	$\underline{d} = 11\text{m}$ $L = 61\text{m}$ $T = 7\text{s}$
	$u_*$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	$u_*$ (m/s)
H = 2m	0,016	0,017	0,018
H = 3m	0,020	0,022	0,022
H = 4m	0,023	0,025	0,025
H = 5m	0,026	0,028	0,028

Para a amostra 120, comparando-se estes resultados com a tabela anterior, que apresenta os valores de  $u_{*crit}$  para a ação de ondas, pode-se afirmar:

- Para uma concentração de 200 g/l, todas as ondas consideradas induzem no fundo uma velocidade de cisalhamento suficiente para recolocar o material em suspensão.

- O material de concentração igual ou superior a 300 g/l não será recolocado em suspensão pela ação de ondas.

Repetiremos a seguir os cálculos para a amostra 130, adotando-se  $d = 12m$ .

AMOSTRA 130

	$d = 12m$ $L = 37m$ $T = 5s$	$d = 12m$ $L = 50m$ $T = 6s$	$d = 12m$ $L = 63,5m$ $T = 7s$
	$u_*$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	$u_*$ (m/s)
H = 2m	0,015	0,017	0,017
H = 3m	0,018	0,020	0,021
H = 4m	0,021	0,024	0,024
H = 5m	0,024	0,026	0,027

Verifica-se que, para a amostra 130,

- Ondas de altura superior a 2m e períodos da ordem de 5s são capazes de recolocar em suspensão material em concentrações até 300 g/l.



- O material de 500 g/l não será recolocado em suspensão por nenhuma das ondas estudadas.

Finalmente, iremos repetir os cálculos para a amostra 134, para a qual adotou-se  $d = 13\text{m}$

AMOSTRA 134

	$d = 13\text{m}$ $L = 38\text{m}$ $T = 5\text{s}$	$d = 13\text{m}$ $L = 52\text{m}$ $T = 6\text{s}$	$d = 13\text{m}$ $L = 65\text{m}$ $T = 7\text{s}$
	$u_*$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	$u_*$ (m/s)
H = 2m	0,014	0,016	0,017
H = 3m	0,017	0,020	0,020
H = 4m	0,020	0,023	0,024
H = 5m	0,022	0,026	0,026

Se comparados com os valores de  $u_{*crit}$  anteriormente calculados, estes resultados permitem concluir que:

- Ondas de amplitude da ordem de 2m e período de 5s são capazes de recolocar em suspensão material com concentração de 200 g/l.

- O material de concentração igual a 300 g/l só será recolocado em suspensão por ondas com 4m de amplitude.
- O material com concentração de 500 g/l não será recolocado em suspensão.

É necessário observar, entretanto, que a análise acima apresentada indica ordens de grandeza, já que os dados até agora acumulados sobre a ressuspensão de vasa por ação de ondas ainda são insuficientes para conclusões absolutamente seguras.

Eles parecem confirmar, entretanto, que material de deposição recente pode ser recolocado em suspensão, a profundidades da ordem de 10m, por ondas de amplitude da ordem de 2m, que são bastante comuns. Isto fora observado anteriormente na baía de Santos, em relação ao material que era dragado na região portuária e rejeitado na área próxima à Ponta de Itaipú.

Os resultados parecem indicar também que o assoreamento na baía resulta da movimentação de material ainda não consolidado, em fase de compactação, pois materiais com concentrações da ordem de 500 g/l não devem ser movimentados por ação de ondas, nas profundidades estudadas.

Para se obter uma segurança maior nestes resultados, seria necessário um estudo em modelo reduzido de fundo móvel, com as dificuldades inerentes a este tipo de estudo.

## 6. CONCLUSÕES

Os estudos realizados sobre os sedimentos amostrados na baía de Santos permitiram caracterizar suas propriedades físico-químicas e reológicas e forneceram dados sobre o comportamento destes sedimentos sob ações hidrodinâmicas.

Os pontos mais importantes deste estudo são:

### 1. Composição

As tres amostras estudadas (n<sup>o</sup>s 120, 130 e 134) pertencem à classe dos sedimentos coesivos. Elas são compostas de uma fração arenosa ( $> 40 \mu\text{m}$ ), cujo diâmetro mediano é da ordem de 0,090 mm e de uma fração fina ( $< 40 \mu\text{m}$ ), com diâmetro mediano da ordem de 0,012 mm.

As curvas granulométricas das frações arenosas das 3 amostras são bastante semelhantes; o mesmo ocorre com as frações finas. A diferença básica entre elas reside nos diferentes teores de areias e finos. A composição mineralógica mostra uma clara predominância do quartzo, ocorrendo também feldspato, calcita, muscovita, hornblenda e caolinita.

### 2. Velocidades de queda e floculação

A velocidade de queda das partículas em meio não floculante mostra uma decantação inicial relativamente rápida, seguida por um período no qual ela decresce.

Após 24 horas, cerca de 20% do material ainda permanecem em suspensão. Em meio não flocculante, a velocidade de queda correspondente a 50% do material foi da ordem de  $8 \times 10^{-2}$  mm/s. Em meio flocculante, verificou-se que a vasa de Santos é pouco sensível ao fenômeno, já que para ela foi obtido um fator de flocculação (relação entre as velocidades de queda para 50% das partículas, em meios flocculante e não flocculante) da ordem de 5.

Variando-se as concentrações das amostras, em meio flocculante, observa-se um crescimento rápido das velocidades de queda até uma concentração de 10 g/l. A partir desta concentração, as velocidades começam a decrecer.

Por se tratar a baía de Santos de um meio francamente flocculante, não foi necessário estudar a variação das velocidades de decantação em função da salinidade.

### 3. Propriedades reológicas

As propriedades reológicas dos sedimentos, das quais depende fortemente o comportamento do material sob a ação de ondas e correntes, é função do estado de consolidação do depósito (concentração em sedimento) e da sua composição granulométrica (em nosso caso, do teor em areia).

A rigidez inicial  $\tau_y$  do sedimento é ligada à sua concentração  $T_s$  por uma expressão da forma:

$$\tau_y = K_1 T_s^{n_1}$$

Para diferentes teores de areia, observou-se que o valor de  $n_1$  era constante e da ordem de 4,59. Para as amostras originais o valor de  $K_1$  variou entre  $2,05 \times 10^{-10}$  e  $2,35 \times 10^{-11}$ , sendo tanto maior quanto menor era o teor em areia.

Estudando-se a influência da concentração em areia  $T^1$  (definida como uma porcentagem da massa de vasa presente) sobre a rigidez inicial, obteve-se a expressão:

$$\tau_y = e^{(1,83 - 0,024T^1)} T_s^{4,59} \cdot 10^{-10}$$

Ela permite calcular-se a rigidez inicial de u ma amostra qualquer, desde que conheça a sua concentração e o seu teor em areia, o que é de grande importância para a generalização dos resultados obtidos.

#### 4. Comportamento dos sedimentos sob ações hi drodinâmicas.

O comportamento dos sedimentos sob ações hidro dinâmicas depende principalmente:

- para materiais arenosos, da granulometria do material. Como está sendo realizado um estudo sobre a movimentação de material arenoso na baía de Santos, com traçadores radioati vos, este caso não foi incluído no presente relatório.

- para materiais coesivos, de suas propriedades físico-químicas e, especialmente, de sua coesão, caracterizada pelo valor de sua rigidez inicial  $\tau_y$ . A própria coesão depende fortemente do estado de consolidação do material.

#### 4.1 Ação de correntes

Para erodir um depósito de material coesivo de rigidez inicial  $\tau_y$ , é necessária uma velocidade crítica de cisalhamento tal que

$$u_{*crit} = 0,023 \tau_y^{1/4}$$

Levando-se em conta as correntes observadas em Santos e admitindo que elas apresentem, a 1m do fundo, um valor máximo de 40 cm/s, delas resultaria uma velocidade de cisalhamento da ordem de 1,4 cm/s.

No caso das amostras estudadas, isto corresponde a concentrações entre 80 g/l e 150 g/l, que são observadas no caso de material de consolidação recente. Para as concentrações habitualmente observadas em fundos, a ação isolada das correntes não será capaz de produzir reentrada em suspensão.

#### 4.2 Ação de ondas

O estudo da ação de ondas sobre os materiais coesivos é delicado de abordar, já que a disponibilidade de resultados experimentais ou de medições "in situ" é menor do que no caso de materiais arenosos. Os valores obtidos no presente relatório servem como ordens de grandeza. É justificável, do ponto de vista hidrodinâmico, que as velocidades críticas para as ações de ondas sejam inferiores às resultantes do efeito de correntes. Admitindo-se a relação

$$u_{*crit} = 0,009 \tau_y^{1/3}$$

foram calculados os valores de  $u_{*crit}$  para as 3 vasas aqui estudadas. Os maiores valores são referentes à amostra 120, que contém maior quantidade de finos. Para ela, os valores de  $\tau_y$  são de 0,018 m/s, para uma concentração de 200 g/l; de 0,032 m/s para uma concentração de 300 g/l; e de 0,071 m/s para uma concentração de 500 g/l.

O cálculo do valor de  $u_*$  por ação de ondas foi feito pelas expressões:

$$U_0 = \frac{\Pi H}{T \operatorname{sen} h \frac{2\Pi d}{L}}$$

e

$$u_*^4 = \frac{8 \nu U_0^2}{\Pi T}$$

As conclusões obtidas indicam que o material de concentração até 200 g/l poderá ser recolocado em suspensão pelas ondas que se observam na baía de Santos, às profundidades em que foram colhidas as amostras. Entretanto, o material com concentrações da ordem de 500 g/l não será recolocado em suspensão, mesmo por ondas de amplitude da ordem de 4m. Isto parece sugerir que o processo de assoreamento na baía de Santos se faça a partir de material ainda pouco consolidado, de deposição recente.

As observações anteriores confirmam os dados referentes ao material dragado que era lançado na região da ponta de Itaipu. Como se tratava de material em baixas concentrações, recentemente depositado, o efeito combinado de ondas e correntes era capaz de transportá-lo novamente para o interior da baía de Santos.

./jms.



## REFERÊNCIAS

1. BELLESSORT, B.; MIGNIOT, C. - Étude Rheologique des vases de Zeebrugge - Laboratoire Central d'Hydraulique de France - 1978.
2. MIGNIOT, C. - Action des courants, de la houle et du vent sur les sediments - Houille Blanche, 1, 1977.
3. CAILLOT, A.; AUN, P.E.; BANDEIRA, J.V.; MOREIRA, R.M. "Étude au laboratoire et in situ du comportement hydrodynamique des fines particules en suspension à l'aide de traceurs radioactifs" - Relatório técnico - CDTN - 1978.