

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS

LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

TRANSPORTE SÓLIDO LITORAL

Claudino António Dias Martins Vicente

Tese apresentada a concurso para especialista  
do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Lisboa, Novembro de 1972



MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS  
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

SERVIÇO DE HIDRÁULICA  
DIVISÃO DE ESTUÁRIOS

Proc.64/13/3616

TRANSPORTE SÓLIDO LITORAL

Claudino António Dias Martins Vicente

Tese apresentada a concurso para especialista  
do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Lisboa, Novembro de 1972

1  
2

3  
4

5  
6

## AGRADECIMENTOS

Sem esquecer as numerosas pessoas que de um modo ou de outro colaboraram na realização deste trabalho, desejo endereçar um agradecimento especial:

- aos Engenheiros Pires Castanho e Reis de Carvalho, pelas suas críticas, sugestões e estímulo;
- ao Ajudante de Experimentador Victor Pisco, pelo interesse e eficiência postos na realização do trabalho experimental;
- ao Encarregado Geral de Modelos Ildemundo Martins e operários sob sua direcção, pela colaboração constante e sempre pronta, quer na montagem das instalações experimentais, quer posteriormente, na preparação e execução dos ensaios e manutenção do equipamento;
- ao Desenhador-Chefe do S.H. Rafael Carróggio e seus colaboradores, pelo esforço e espírito de colaboração demonstrados na finalização do trabalho de desenho, efectuada em condições de urgência de prazo;
- à Dactilógrafa sr<sup>a</sup>. D. Joaquina Robalo, pelo cuidado e interesse postos na dactilografia do manuscrito.

1

2

3

## TRANSPORTE SÓLIDO LITORAL

### SUMÁRIO

O caminhamento das areias ao longo das costas marítimas é regulado por leis ainda incompletamente apreendidas, mas cujo conhecimento cada vez mais perfeito se torna indispensável no projecto e ensaio em modelo reduzido de grande parte das obras destinadas a solucionar problemas de hidráulica marítima.

Começa-se neste trabalho por caracterizar, sob os pontos de vista hidrodinâmico e de movimentação aluvionar, a orla costeira, zona em que o transporte litoral se processa, abordando-se a seguir o aspecto prático mais importante do fenómeno, ou seja, a previsão dos caudais sólidos a partir das características das ondas e do material móvel que forma a praia.

Com este último objectivo analisa-se o conjunto dos dados experimentais disponíveis, segundo uma perspectiva baseada na análise dimensional do fenómeno, para a seguir se proceder a um estudo experimental focado sobre a influência do peso específico e do diâmetro do material móvel.

Apresentam-se ainda, em anexo, os conceitos básicos respeitantes às correntes longitudinais, fenómeno que teve também de ser objecto de um estudo aprofundado, por estar intimamente relacionado com o transporte sólido litoral.



## LITTORAL TRANSPORT OF BEACH MATERIALS

### SYNOPSIS

The littoral transport of sand along sea coasts is governed by laws still not entirely understood, of which however a fuller knowledge is indispensable in the design and model testing of the majority of measures intended to solve coastal engineering problems.

The author presents first a characterization of the shore - the zone where littoral transport takes place - from hydrodynamic and sediment movement standpoints, and then approaches the major practical problem in connexion with this phenomenon, i.e. how to calculate the rates of littoral transport from the characteristics of the waves and the beach material.

For this purpose the experimental data available are processed from the viewpoint of the dimensional analysis of the phenomenon. An experimental study with a view to investigating, in particular, the influence of the unit weight and the diameter of the beach material is then described.

An appendix contains the basic concepts concerning longshore currents, which must also be thoroughly studied owing to their close connexions with littoral transport.





## ÍNDICE DO TEXTO

	Pág.
CAP. I - OBJECTIVO DO TRABALHO. SEU ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO ..	1
CAP. II - CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS E DE MOVIMENTAÇÃO ALUVIONAR DA ORLA COSTEIRA .....	9
1 - MATERIAIS MÓVEIS .....	9
1.1 - Introdução .....	9
1.2 - Aquisição e perdas de materiais móveis pelas praias .....	10
1.3 - Características dos materiais móveis. Classificação e granulometria .....	13
1.4 - Variação de granulometria em perfil transversal .....	19
2 - MORFOLOGIA DAS PRAIAS .....	20
2.1 - Generalidades .....	20
2.2 - Perfil transversal .....	20
2.3 - Movimentos transversais. Perfis de verão e de inverno .....	21
3 - ENERGIA DISSIPADA NA COSTA .....	23
3.1 - Onda real .....	23
3.2 - Onda monocromática .....	24
3.3 - Cálculo da componente segundo a linha de costa, e por unidade de comprimento desta, da energia transmitida na rebentação ..	26
3.4 - Cálculo das características das ondas na rebentação a partir dos valores em grandes profundidades .....	29
3.5 - Influência do ângulo de incidência das ondas no valor de $P_1$ .	32
4 - CORRENTES GERADAS PELA ONDA .....	33
4.1 - Introdução .....	33
4.2 - Correntes geradas por ondas incidindo frontalmente na praia .	35
4.3 - Correntes geradas na incidência oblíqua .....	39
4.4 - Correntes de difracção .....	42

5 - MOVIMENTAÇÃO ALUVIONAR NA ZONA COSTEIRA .....	42
5.1 - Início de movimento .....	42
5.2 - Movimento estabelecido .....	44
CAP. III - REVISÃO DOS CONHECIMENTOS RELACIONADOS COM A PREVISÃO DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL .....	49
1 - INTRODUÇÃO .....	49
2 - ANÁLISE DIMENSIONAL .....	49
3 - ANÁLISE DO CONJUNTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	53
4 - ANÁLISE INDIVIDUAL DOS ESTUDOS DE LABORATÓRIO RELACIONADOS COM A PREVISÃO DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL .....	62
4.1 - Estudo experimental de Krumbein .....	62
4.2 - Estudo experimental de Shay e Johnson .....	64
4.3 - Estudo experimental de Sauvage e Vincent .....	69
4.4 - Estudo experimental de Larras e Bonnefille .....	73
4.5 - Ensaio de Lepetit .....	77
5 - ESTUDOS EFECTUADOS EM PRAIAS NATURAIS .....	77
6 - FÓRMULAS DE PREVISÃO DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL .....	80
CAP. IV - ESTUDO EXPERIMENTAL .....	85
1 - INTRODUÇÃO .....	85
2 - DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE ENSAIO E RESPECTIVO EQUIPAMENTO ...	86
3 - CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS E DOS MATERIAIS MÓVEIS ENSAIADOS .....	92
4 - ENSAIO-TIPO. MÉTODOS UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS .....	95
5 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	103
5.1 - Ensaio destinado à avaliação da influência da altura das on- das no valor do caudal sólido .....	103
5.2 - Ensaio destinado a avaliar a influência do período das ondas no valor do caudal sólido .....	104
5.3 - Ensaio destinado a avaliar a influência do peso específico do material móvel no valor do caudal sólido .....	105

5.4 - Ensaio destinado a avaliar a influência do diâmetro do material móvel .....	109
CAP. V - CONCLUSÕES .....	111
ANEXO I - ELEMENTOS PERTENCENTES A REVISÃO DOS CONHECIMENTOS RELACIONADOS COM A PREVISÃO DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL (CAP. III).	
ANEXO II - ELEMENTOS PERTENCENTES AO ESTUDO EXPERIMENTAL (CAP. IV).	
ANEXO III - CORRENTES LONGITUDINAIS.	

2

3

4

5

6

7

## ÍNDICE DE FIGURAS

- FIG. 1 - Ria de Aveiro. Interferência, com o caminhamento litoral, das obras realizadas numa embocadura. (A linha a tracejado representa, aproximadamente, a linha de costa antes da construção dos molhes).
- " 2 - Restinga do Lobito. Campo de esporões destinado a controlar o crescimento da restinga pela retenção do transporte litoral.
- " 3 - Curva de distribuição logarítmica-normal, com  $\Phi_M = 1,5$  e  $\sigma_\Phi = 0,8$ .
- " 4 - Distribuição cumulativa logarítmica-normal, com  $\Phi_M = 1,5$  e  $\sigma_\Phi = 0,8$ .
- " 5 - Variação da granulometria ao longo do perfil transversal de praias. (Nota: Os valores indicados na legenda são os diâmetros medianos da amostra de referência).
- " 6 - Perfil transversal duma praia.
- " 7 - Perfis de inverno e de verão.
- " 8 - Representação esquemática duma onda solitária.
- " 9 - Trajectórias das partículas de água na passagem de uma onda solitária, segundo [6].
- " 10 - Esquema da refacção de uma onda sobre fundos com batimétricas paralelas.
- " 11 - Ábaco para determinação das características das ondas na rebentação.
- " 12 - Produto  $\text{sen}\alpha_p \text{cos}\alpha_o$  em função de  $\delta_o$  e  $\alpha_o$ .
- " 13 - Esquema de propagação duma onda sobre fundo horizontal.
- " 14 - Comparação de perfis, teóricos e experimentais, de distribuição de velocidades de deslocamento de massa. Segundo Russell e Osorio [8].

FIG. 15 - Esquema das correntes geradas pela onda ao incidir frontalmente numa praia.

- " 16 - Correntes geradas pela onda. Esquema tridimensional.
- " 17 - Diagrama esquemático duma corrente de retorno concentrado. Os comprimentos das setas representam as velocidades relativas. Sheppard [9].
- " 18 - Condições de início de movimento segundo Bonnefille e Pernecker [10].
- " 19 - Esquema do caminhamento da areia nas diversas zonas duma praia sujeita a ataque oblíquo da ondulação.
- " 20 - Esquema de transporte de areia por uma corrente de retorno concentrado, obtido por Ingle [11] com areias marcadas.
- " 21 - Esquema de movimentação das areias na rebentação, segundo Ingle [11].
- " 22 - Critérios para a geração de sistemas barra-fossa, segundo Noda [13].
- " 23 -  $Q'_S$  em função de  $P_1$ . Resultados de medições na natureza e em laboratório.
- " 24 -  $Q'_S/P_1$  em função de  $\delta_o$ . Resultados de ensaios em laboratório, com areia.
- " 25 -  $R = Q'_S/P_1$  em função de  $\delta_o = H_o/L_o$ , para diversas gamas de  $D = H_o/d(\gamma'_S/\gamma'_{sa})$ .
- " 25-A-  $R = Q'_S/P_1$  em função de  $\delta_o = H_o/L_o$ , para diversas gamas de  $D = H_o/d(\gamma'_S/\gamma'_{sa})$ . Curvas resultantes.
- " 26 - Comparação dos valores experimentais de  $Q'_S$  com os previstos pelas curvas da figura 25-A.
- " 27 - Curvas de Shay e Johnson, agrupando os resultados experimentais do seu estudo.  
( $Q'_S$  em libras por hora;  $H_o$  em pés).

- FIG. 28 - Ensaio de Shay e Johnson.  $Q'_S/P_1$  em função de  $\alpha_0$  e  $\delta_0$ .
- " 29 - Caudal sólido litoral em função das características das ondas, segundo Johnson.
- " 30 - Relação entre as alturas e as declividades das ondas nos ensaios de Shay e Johnson.
- " 31 - Influência da obliquidade das cristas junto da costa sobre o caudal sólido litoral, segundo Sauvage e Vincent [20].
- " 32 -  $Q'_S/P_t$  e  $Q'_S/P_1$  em função de  $\alpha_0$ . Valores obtidos dos ensaios de Sauvage e Vincent em que era feito variar o ângulo de ataque.
- " 33 - Variação de K com  $\delta$  e d, segundo Bonnefille e Pernecker [22].
- " 34 -  $\frac{Q'_S}{P_1}$  em função de  $\delta_0$  e d. Ensaio de Larras e Bonnefille.
- " 35 - Relação existente entre os diâmetros e o parâmetro D, nos ensaios de Larras e Bonnefille.
- " 36 - Esquema da instalação provisória de ensaios.
- " 37 - Esquema da instalação definitiva de ensaios.
- " 38 - Aspecto geral das instalações definitivas de ensaio.
- " 39 - Gerador de ondas tipo "serpente" provido de filtros de fibra vegetal.
- " 40 - Transportadores utilizados na recolha dos materiais móveis e seu transporte até à zona B, de lançamento.
- " 41 - Aspectos da passagem de materiais móveis do transportador menor para o maior.
- " 42 - Aspecto ampliado dos materiais móveis.
- " 43 - Medição da altura das ondas à saída do gerador.
- " 44 - Aparelhos utilizados na medição das alturas das ondas à saída do gerador: sonda de capacidade; transportador de sondas; comando do transportador de sondas; registador "Moseley".
- " 45 - Medição da altura das ondas na rebentação.



- FIG. 46 - Hidrómetros ligados a um "olho catódico", usados na definição da obliquidade da onda na rebentação.
- " 47 - Esquema de determinação do ângulo na rebentação.
- " 48 - Acumulação de material móvel na extremidade B da praia e operação manual de alimentação.
- " 49 - Volumes de alimentação acumulados ao longo do ensaio. Ensaios A13; A14 e A15.
- " 50 -  $Q'_s$  em função de  $H_o$ . Ensaios P1 a P6.
- " 51 - Caudal sólido em peso submerso,  $Q'_s$ , em função do período, T. Ensaios P<sub>2</sub>; P10; P12; P13 e P14.
- " 52 - R em função de  $\delta_o$  para diversos materiais móveis.
- " 53 -  $Q'_s$  em função de  $P_1$  para o conjunto dos resultados de ensaios realizados com materiais móveis diferentes da areia.
- " 54 - Comparação dos resultados de ensaios experimentais efectuados com materiais móveis diferentes da areia, com as curvas  $R = f(\delta_o, D)$ , apresentadas na figura 25-A.
- " 55 - Comparação dos resultados experimentais dos ensaios A7 a A16 com a curva  $R = f(D)$  com  $\delta_o = 0,02$  (deduzida das curvas da figura 25-A).
- " 56 - Comparação dos resultados dos ensaios efectuados com areia com as curvas da figura 25-A.

## ANEXO II

- " 1 - Comprimentos de onda ao largo ( $L_o$ ) e à saída do gerador (L) em função do período.
- " 2 - Ângulo à saída do gerador ( $\alpha$ ) em função do ângulo em grandes profundidades ( $\alpha_o$ ) e do período (T).
- " 3 - Quociente ( $H/H_o$ ) da amplitude da onda à saída do gerador pela amplitude em grandes profundidades.

FIG. 4 - Curvas granulométricas dos materiais móveis, diferentes da areia, utilizados nos ensaios.

" 5 - Curvas granulométricas das três areias utilizadas nos ensaios.

" 6 - Comparação de valores de altura de onda na rebentação ( $H_b$ ) medidos, com os calculados segundo a teoria da onda de pequena amplitude (o.p.a.).

" 7 - Comparação dos valores da obliquidade da onda na rebentação ( $\alpha_b$ ) medidos, com os valores calculados segundo a teoria da onda solitária (o.s.) e segundo a teoria da onda de pequena amplitude (o.p.a.).

" 8 - Perfis transversais levantados no fim de cada ensaio.

#### ANEXO III

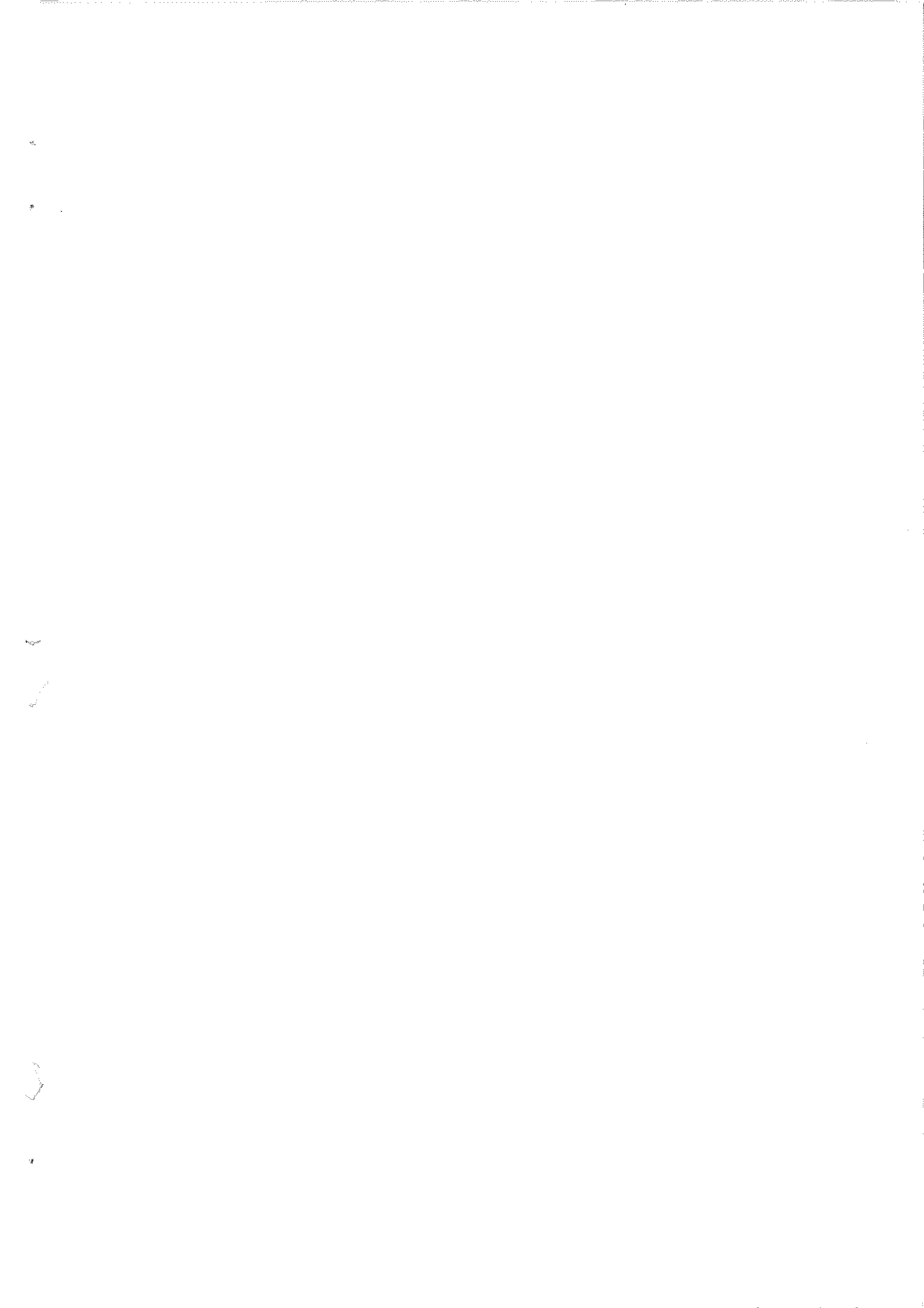
" 1 - Esquema de ataque oblíquo.

" 2 - Comparação de  $\text{sen}\alpha_b \text{sen}2\alpha_b$  com  $\alpha_b^2$  (radianos).

" 3 - Esquema do crescimento da corrente longitudinal a partir de uma barreira impermeável, segundo Eagleson [32].

" 4 - Crescimento da corrente longitudinal a partir duma barreira impermeável existente na costa, calculado segundo a fórmula de Eagleson, com  $\alpha_b = 10^\circ$ .

" 5 - Esquema dum tubo de fluxo de energia.



## TRANSPORTE SÓLIDO LITORAL

### CAP. I - OBJECTIVO DO TRABALHO. SEU ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO

A actuação do vento numa bacia oceânica gera ondas capazes de se propagar a grandes distâncias, com pequena dissipação de energia. A frequência com que os ventos ocorrem e a dispersão angular e de períodos sofrida pelas ondas ao propagarem-se fora da zona de geração, originam uma chegada quase permanente de enormes quantidades de energia à orla costeira, onde acabam por se dissipar.

A dissipação de energia, que se inicia significativamente quando a onda abandona as grandes profundidades, acentua-se bruscamente na rebentação, sendo acompanhada da formação de correntes e da movimentação das areias ou outros materiais incoerentes que se encontrem a revestir o fundo.

No caso de as ondas na rebentação se apresentarem oblíquas relativamente à linha de costa, a energia transmitida terá uma componente segundo esta e formar-se-á uma corrente longitudinal (longshore current)<sup>(1)</sup> à qual aparece associado um caminhamento de areias ao longo da costa, designado por transporte litoral (littoral transport)<sup>(1)</sup>.

Este caminhamento não se torna evidente quando, como acontece geralmente, o trecho de praia que se considera se encontra em equilíbrio dinâmico, situação caracterizada por um balanço médio anual nulo, entre os volumes de areia que entram e saem da zona em questão.

Já no caso de desequilíbrio, com diferenças apreciáveis entre esses volumes, ocorrem assoreamentos ou erosões directamente observáveis. As acumulações fazem avançar a linha de costa e não apresentam geralmente inconve-

---

(1) - Designação na terminologia anglo-saxónica.

nientes. Outro tanto não acontece com as erosões que, dada a actual tendência para a utilização das praias e ocupação da orla marítima, levantam sérios problemas, pois o recuo da linha de costa que as acompanha, limita ou anula a largura de praia utilizável e vai fazer perigar as construções existentes nas proximidades.

Uma situação de erosão deste tipo não é, como poderia parecer à primeira vista, o resultado do aumento verificado, a partir de determinado momento, dos volumes de areia que abandonam na unidade de tempo, a zona considerada. De facto o clima de ondulação, num dado local, apresenta-se praticamente constante quanto a características médias no caso de se tomar um período de tempo suficientemente longo, da ordem de uma dezena de anos, por exemplo. Sendo assim, a capacidade de transporte das ondas será também constante e a existência de um saldo negativo, nas quantidades de areia, deve-se normalmente a um decréscimo do caudal de alimentação, motivado por intervenção humana. Esta, ou toma a forma de impedimento da chegada das areias ao mar, devido principalmente à florestação das bacias fluviais, à correcção torrencial e à construção de barragens, ou se apresenta como uma intercepção total ou parcial da corrente aluvionar, já na orla marítima, por acção de obras ou de dragagens (Fig. 1).

A erosão da costa apresenta-se como um processo de restabelecimento do equilíbrio dinâmico para as novas condições de alimentação. Origina uma modificação progressiva da orientação da praia que conduz à diminuição do ângulo de ataque das ondas e, conseqüentemente, ao enfraquecimento da capacidade de transporte. Este ajustamento da orientação da linha de costa terminará quando a capacidade de transporte seja apenas suficiente para promover o deslocamento, ao longo da praia, do novo caudal de alimentação.

No seu deslocamento ao longo das costas marítimas, os caudais de areia, que podem atingir valores superiores a um milhão de metros cúbicos por ano, encontram por vezes obras portuárias ou embocaduras que vão consti-

tuir obstáculos ao seu caminhamento. A existência, nesses pontos da costa, de zonas em que as profundidades se mantêm com valores tais que não permitem a rebentação da onda, origina uma diminuição local da capacidade de transporte - máxima entre a linha de rebentação e a linha de costa - com os consequentes assoreamentos dos canais de navegação e das próprias zonas interiores.

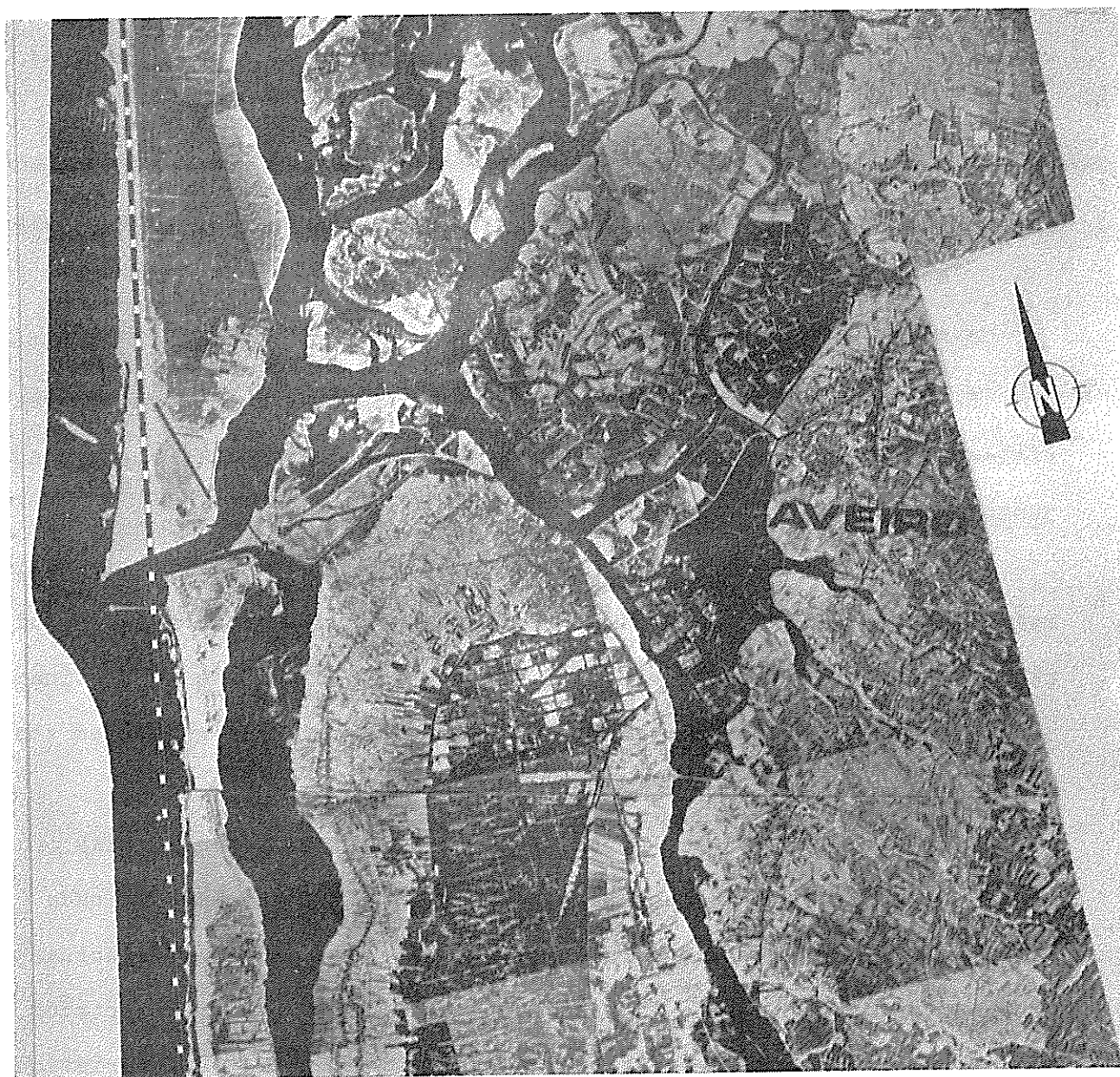


FIG. 1 - Ria de Aveiro. Interferência, com o caminhamento litoral, das obras realizadas numa embocadura. (A linha a tracejado representa, aproximadamente, a linha de costa antes da construção dos molhes.)

Em determinadas condições ainda, as areias transportadas destacam-se da costa dando origem à formação de cordões litorais ou de restingas que, quando de dimensões apreciáveis, tendem a ser ocupadas e urbanizadas e a servir de abrigo a zonas portuárias, mas cuja evolução e existência dependem da manutenção do equilíbrio que acima se focou.

Deste modo, torna-se indispensável o conhecimento das características do transporte litoral quando se pretende solucionar problemas ligados às situações indicadas. É este o caso do projecto de obras destinada a:

- eliminar a erosão de praias;
- alargar ou criar novas praias;
- atenuar ou impedir o assoreamento dos portos e dos seus canais de acesso;
- estabilizar cordões litorais ou restingas.

É ainda, de um modo geral, o caso do projecto de quaisquer obras marítimas impermeáveis ou semi-permeáveis ao transporte litoral, a construir junto duma praia ou enraizadas nesta.

Só com o conhecimento das características do transporte litoral, as mais importantes das quais são o sentido e o caudal médio anual resultante, se poderão projectar obras que satisfaçam o fim a que se destinam, e não originem, como tantas vezes tem acontecido, erosões graves em zonas vizinhas.

Em face dos encargos, morosidade e dificuldades apresentadas pelas medições directas, tem-se procurado, para além dum conhecimento cada vez mais perfeito do fenómeno geral do transporte das aluviões, efectuar uma previsão do caudal sólido litoral, isto é, dos volumes transportados na unidade de tempo. Uma previsão deste tipo, baseada nas características das ondas, dos materiais móveis e das praias, apresenta-se extraordinariamente desejável, por serem as novas grandezas em jogo, de medição bastante mais fácil que o caudal sólido litoral e se encontrarem muitas vezes já de

finidas, como é o caso do clima de agitação.

É neste sentido que têm sido concentrados os esforços de investigação tendo a maior parte dos estudos sido efectuada com base em ensaios de laboratório, em que se reproduzia o fenómeno a uma escala reduzida e se faziam variar os parâmetros considerados fundamentais.

A duração de cada ensaio, da ordem de algumas dezenas de horas, explica que não exista ainda, apesar dos estudos efectuados por diversos investigadores, uma massa de dados experimentais suficiente, para o teste em boas condições de todos os parâmetros intervenientes.

Podem, no entanto, considerar-se como bem estabelecida uma relação, muito aproximadamente linear, entre os volumes transportados e a componente segundo a direcção da linha de costa da energia transmitida pela onda ao atingir a rebentação, no caso de permanecerem invariáveis os parâmetros restantes. Destes, a declividade das ondas tem sido o mais focado, subsistindo, no entanto, algumas dúvidas sobre o modo como se processa a sua influência. As influências do peso específico e do diâmetro do material são ainda mal conhecidas, havendo mesmo, no caso desta última grandeza, opiniões contraditórias sobre o seu efeito.

É principalmente sobre a influência destas duas grandezas, peso específico e diâmetro das areias, que incide o presente trabalho, baseando-se num programa experimental, forçosamente incompleto, pela razão já apontada da morosidade dos ensaios. Procura-se suprir esta deficiência pelo recurso aos resultados dos diversos experimentadores, tentando-se, pela sua análise conjunta, confirmar as hipóteses que previamente se estabelecem com base na análise dimensional do fenómeno.

O conhecimento das leis que regulam o transporte sólido litoral apresenta-se ainda como indispensável, para além da previsão do valor do caudal sólido litoral, para uma correcta utilização dos modelos físicos, que continuam a ser o único recurso para a abordagem de grande parte dos pro



blemas de hidráulica marítima em que intervêm movimentos aluvionares. A necessidade de reproduzir os perfis transversais de praias ou de equilibrar a acção das ondas com a das correntes de maré ou fluviais, obriga a recorrer a materiais móveis de peso específico muito inferior ao das areias naturais e a utilizar uma gama larga de diâmetros o que torna desejável um conhecimento perfeito da influência dessas grandezas.

O LNEC, através das divisões de hidráulica marítima, tem sido chamado a efectuar numerosos estudos em que intervém o transporte sólido litoral, tendo deparado com apreciáveis dificuldades nomeadamente no aspecto da conciliação da capacidade de transporte da onda com a das correntes de maré e fluviais. Destes estudos, citam-se seguidamente alguns, já realizados ou em curso, em que o transporte sólido litoral era factor preponderante:

- estudo do melhoramento do acesso ao porto da Figueira da Foz, no estuário do Mondego, que é um exemplo de interferência sobre o transporte litoral, num troço de costa com caudal sólido intenso, das correntes de maré e fluviais, na saída de uma embocadura. Tratava-se de escolher entre as variantes de um esquema de obras, a que permitiria uma passagem das areias em frente da embocadura com melhores profundidades no passê e sem ocorrência de assoreamento do interior do porto.

- a previsão das alterações de fundos na embocadura da Ria de Aveiro, resultantes da correcção dos canais interiores de acesso ao porto que selo caliza no interior da laguna. Trata-se de um problema muito semelhante ao anterior, em que existe uma interferência das correntes de maré, aqui bastante mais potentes, com o trânsito em frente da embocadura de um caudal sólido litoral da mesma ordem de grandeza do existente no caso anterior, ou seja, aproximadamente um milhão de metros cúbicos por ano.

- o estudo em modelo reduzido da restinga do Lobito (Fig. 2), na costa angolana, que visava a previsão da evolução da restinga e o ensaio dum campo de esporões destinado ao controle do seu crescimento, por forma a

evitar que viesse a ser colmatado o acesso ao porto situado na baía protegida pela restinga.

- o estudo do melhoramento do acesso ao porto de Huelva, situado na costa SW da Espanha em que se está, idênticamente, em presença de uma interferência das correntes de maré geradas por um estuário, com um caminhamen-  
to litoral de valor não excedendo  $200\ 000\ m^3/ano$ . Procura-se com o estudo

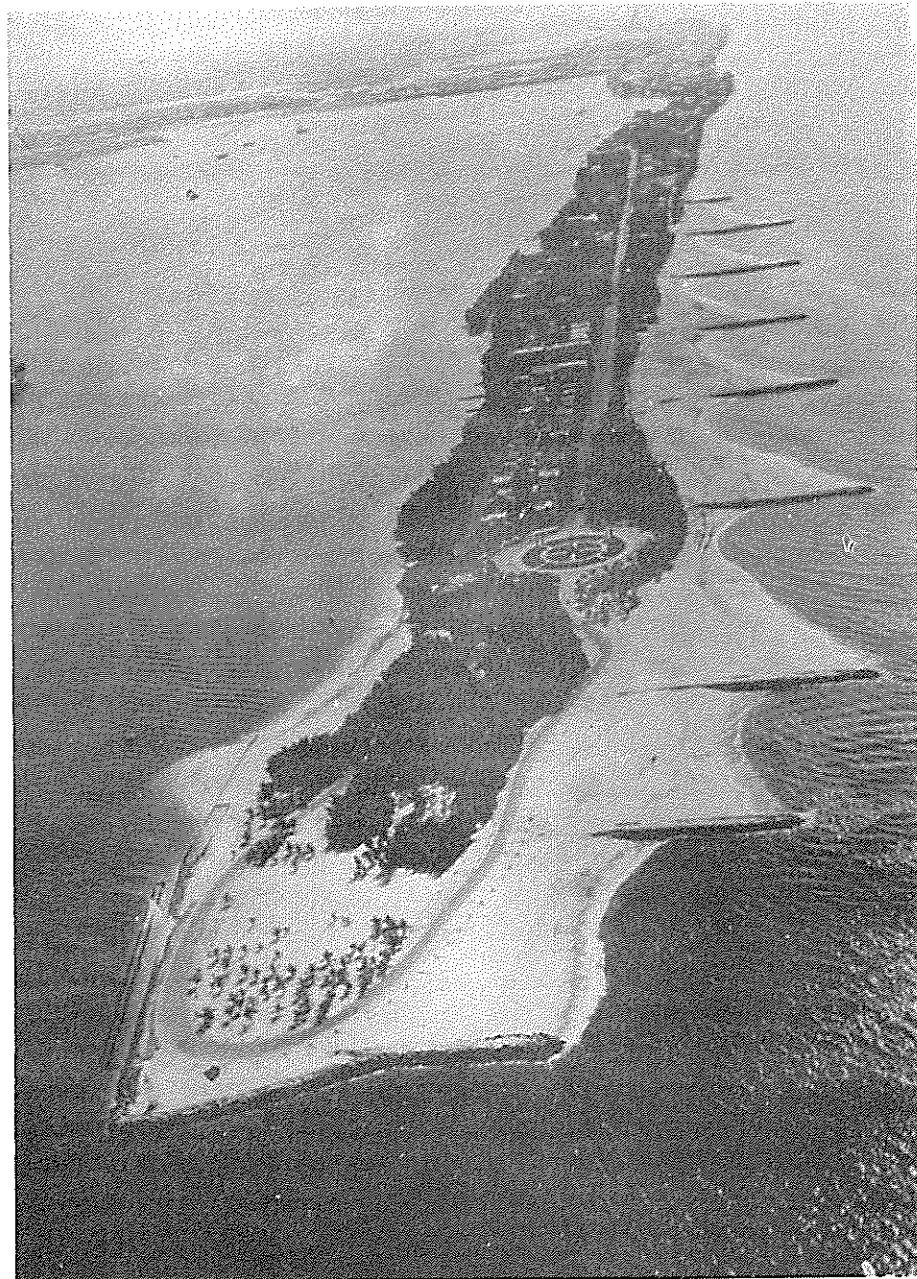


FIG. 2 - Restinga do Lobito. Campo de esporões destinado a controlar o crescimento da restinga pela retenção do transporte litoral.

a solução mais adequada à manutenção de um canal de acesso à cota -10 m (Z.H.);

- Finalmente, o estudo da defesa da cidade e praias da Beira, em que a existência de um caudal sólido litoral apreciável, permitiu aconselhar uma solução de defesa contra a erosão costeira baseada num campo de esporões e prever para estes um rápido enchimento natural.

CAP. II - CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS E DE MOVIMENTAÇÃO ALUVIONAR DA ORLA COSTEIRA

1 - MATERIAIS MÓVEIS

1.1 - Introdução

Ao estudar uma costa marítima sob o aspecto de movimentação aluvionar, é vantajoso encarar separadamente cada uma das unidades fisiográficas que a formam.

Entende-se por unidade fisiográfica uma zona de costa limitada de tal forma que não seja afectada pelas condições físicas existentes nas áreas adjacentes. Deste modo, a energia e as aluviões nela disponíveis não estão condicionadas pelos fenómenos que se processam nas unidades confinantes.

A separação entre unidades fisiográficas é constituída por formações tais como cabos ou fossas marinhas ou ainda por barreiras artificiais, que impeçam por completo a passagem dos sedimentos. A definição dos limites de uma unidade fisiográfica nem sempre é fácil tornando-se muitas vezes necessário, para se adquirir a certeza de que uma determinada barreira litoral funciona de maneira completa, efectuar um estudo profundo baseado na observação do caminhamento de areias marcadas ou na análise das características petrográficas ou granulométricas dos sedimentos.

Uma observação superficial pode conduzir a conclusões erradas. Por exemplo, o caso usual de limitação duma praia por uma zona rochosa, em frente da qual as areias se não acumulam, não permite concluir que esta constitua o limite duma unidade fisiográfica. Pode continuar a haver transporte sobre o fundo rochoso, sem que a areia chegue a acumular-se de forma a emergir. Este comportamento tem possibilidade de ocorrer sempre que a orientação desse trecho rochoso de costa ou a concentração de energia das ondas por efeito da convexidade das batimétricas, originem uma capacidade

local de transporte excessiva, face ao caudal litoral de alimentação.

De notar ainda que uma barreira litoral pode obstruir totalmente a passagem dos sedimentos, em condições normais, mas ser esporadicamente contornada, em certos casos limites de características da onda actuante. Mesmo nestes casos, pode ainda a passagem das areias estar condicionada por um tempo mínimo de actuação da onda, por ser necessária a acumulação de um certo volume junto da barreira antes de se iniciar o transbordo para a zona adjacente.

## 1.2 - Aquisição e perdas de materiais móveis pelas praias

A área total das planícies formadas nas orlas costeiras, pela acumulação de materiais movimentados pelas ondas, é de cerca de um sétimo da área dos continentes [1]. Pode assim ter-se uma ideia da magnitude dos volumes de sedimentos que, ao longo dos tempos, têm sido movimentados nas zonas costeiras.

Esses materiais incoerentes são o produto da desagregação de rochas, processada quer no interior dos continentes quer na própria costa. De notar que destas parcelas a primeira é de importância muito superior, devendo a orla litoral ser considerada não como produtora mas fundamentalmente como consumidora de grandes volumes de sedimentos [2].

As principais fontes de alimentação natural de uma unidade fisiográfica variam de caso para caso, situando-se no entanto salvo casos excepcionais, entre as que a seguir se mencionam:

- rios, cursos de água menores e torrentes;
- erosão de falésias e outras formações costeiras;
- vento;
- movimentação em direcção à costa, por acção das ondas, de depósitos de sedimentos localizados ao largo da rebentação.

Os sedimentos debitados pelos CURSOS DE ÁGUA são originários do conti

nente, sendo provenientes da desagregação de rochas por acção dos agentes atmosféricos, através de processos químicos, efeitos de temperatura e forças exercidas pela chuva e vento.

Os fragmentos resultantes desta acção erosiva são drenados até ao rio pelos afluentes, acabando por ser lançados na zona costeira, depois de um percurso que pode atingir milhares de quilómetros.

Os caudais sólidos anuais debitados por um rio dependem de diversas características da bacia, como a área, a topografia, a geologia, a precipitação, a cobertura vegetal e a existência nela de albufeiras ou de obras de correcção torrencial. Por outro lado, a granulometria dos sedimentos que atingem a zona costeira encontra-se relacionada com os gradientes hidráulicos. Deste modo, cursos de água curtos e declivosos possuirão potência suficiente para transportar areias grossas ou mesmo elementos de maiores dimensões. Se o rio é longo, construirá normalmente a sua planície sedimentar e a meandrizará, diminuindo a potência hidráulica e restringindo-se a capacidade de transporte aos elementos mais finos, dos tipos areia fina, silte e argila.

Em qualquer dos casos, haverá geralmente, ou pelo menos em períodos de cheias, transporte segundo duas formas distintas. Os materiais mais finos serão transportados em suspensão e os restantes por arrastamento.

Os materiais que atingem o mar sob a forma de transporte em suspensão não têm em geral interesse para os fenómenos em estudo na medida em que, devido ao elevado grau de turbulência da zona mais próxima da costa, permanecem aí em suspensão, acabando por encaminhar-se para o largo, para zonas mais calmas e profundas, onde se depositam. Só no caso de zonas excepcionalmente abrigadas da ondulação se depositam junto da costa, sofrendo posterior aglutinação e endurecimento. O caso normal é, no entanto, ser o material móvel da orla costeira constituído por areias ou mais raramente por seixos ou elementos de maiores dimensões.

A EROSIÃO DE FALÉSIAS ou de outras formações costeiras é uma fonte de alimentação que embora dominante nalguns casos, é em geral de pequena importância, quando comparada com a contribuição dos cursos de água. Este facto é fácil de compreender se pensarmos que estes últimos drenam os sedimentos de toda a superfície dos continentes, ao passo que a acção erosiva das ondas sobre as falésias se limita a uma fracção das linhas de costa marítimas.

A erosão da costa processa-se através de acções mecânicas, físico-químicas e biológicas exercidas sobre as rochas em contacto com o mar. A acção mecânica deve-se ao choque da onda, ou do jacto de rebentação que se pode acompanhar de turbilhões capazes de deslocarem blocos de grandes dimensões, verificando-se por vezes simultâneamente, projecção de seixos ou outros elementos grosseiros contra a base da formação costeira ou, ainda, a ocorrência de subpressões no interior da rocha, caso esta se encontre fissurada.

O VENTO pode ser um factor de alimentação a considerar, muito embora, de um modo geral, essa alimentação consista na devolução de areia que anteriormente esse mesmo agente transportara para a costa. Poderá ter interesse quando a areia das dunas não seja de origem marítima, mas sim continental, o que pode acontecer em praias situadas na orla de desertos.

O último tipo de alimentação mencionado consiste no transporte de areia para a costa, efectuado pela onda a partir de DEPÓSITOS SITUADOS AO LARGO DA REBENTAÇÃO, devido às variações a longo prazo do nível médio do mar, na zona considerada. Estes movimentos são portanto distintos dos transportes em direcção à costa, de carácter sazonal, ligados à adaptação do perfil transversal da praia às variações das características da ondulação.

Quanto às perdas de areia sofridas por uma unidade fisiográfica podem dever-se aos seguintes factores:

- queda, ao ser transportada ao longo da costa, em fossas marinhas,

de grande capacidade de armazenamento, de onde a agitação marítima já não a consegue recuperar;

- movimentos transversais não totalmente reversíveis, em que os grandes volumes de areia deslocados para o largo, durante a formação dos perfis de tempestade, não sofrem um retorno completo quando o perfil se adapta de novo à ondulação de bom tempo;

- movimentos em direcção ao largo, quer em suspensão quer por arrastamento devido às correntes transversais de compensação;

- transporte pelo vento para o interior, a partir da berma e do espraçado, originando a formação de dunas ao longo da costa. Segundo Ottman [2], Larras cita a ocorrência em Tescherling, na Alemanha Ocidental, de perdas por esta via, da ordem de 20 000 m<sup>3</sup>/ano em cada quilómetro de praia.

A abrasão dos materiais da praia, por efeitos do constante atrito entre os seus elementos, não constitui um factor a ter em consideração, pois ocorre em taxas tão diminutas, que só apresenta importância sob o ponto de vista geológico.

### 1.3 - Características dos materiais móveis. Classificação e granulometria

Pode utilizar-se o Vocabulário de Estradas e Aeródromos, tal como é definido em [3], para classificar com base nas suas dimensões, os materiais móveis das costas marítimas (Quadro 1).

Verifica-se que os diâmetros dos grãos de amostras de areia colhidos em praias naturais apresentam uma distribuição próxima da logarítmica-normal, o que equivale a dizer que os logaritmos desses diâmetros têm aproximadamente a distribuição normal.

É usual substituir nesta distribuição logarítmica-normal a escala aritmética dos diâmetros por uma escala logarítmica de base 2, definida do modo seguinte:

$$\phi = - \log_2 d$$

em que  $d$  representa o diâmetro dos grãos.



No quadro 2, apresentam-se as dimensões das malhas dos peneiros A.S.T.M. expressas em unidades  $\Phi$ .

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS MÓVEIS

CLASSES		LIMITES DO DIÂMETRO EQUIVALENTE (mm)
Pedra		> 150
Calhau		150 - 60
Seixo	Grosso	60 - 20
	Médio	20 - 6
	Fino	6 - 2
Areia	Grossa	2,0 - 0,6
	Média	0,6 - 0,2
	Fina	0,2 - 0,06
Silte	Grosso	0,06 - 0,02
	Médio	0,02 - 0,006
	Fino	0,006 - 0,002
Argila		< 0,002

Substituindo na expressão da frequência relativa da distribuição normal, os valores da variável independente, que é neste caso o diâmetro  $d$  dos grãos, pelos correspondentes valores de  $\Phi$  vem, [4]:

$$y = \frac{1}{\sigma_{\Phi} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Phi - \Phi_M)^2}{2 \sigma_{\Phi}^2}} \quad (1)$$

QUADRO 2 - DIMENSÕES DAS MALHAS DOS PENEIROS DA  
SÉRIE ASTM, EXPRESSAS EM VALORES DE  $\phi$

Nº.DO PENEIRO A.S.T.M.	DIMENSÃO D' LADO DA MALHA (mm)	VALOR DE $\phi$
5	4.00	-2.00
6	3.36	-1.75
7	2.83	-1.50
8	2.38	-1.25
10	2.00	-1.00
12	1.68	-0.75
14	1.41	-0.50
16	1.19	-0.25
18	1.00	0.00
20	0.84	0.25
25	0.71	0.50
30	0.59	0.75
35	0.50	1.00
40	0.42	1.25
45	0.35	1.50
50	0.297	1.75
60	0.250	2.00
70	0.210	2.25
80	0.177	2.50
100	0.149	2.75
120	0.125	3.00
140	0.105	3.25
170	0.088	3.50
200	0.074	3.75
230	0.062	4.00
270	0.053	4.25
325	0.044	4.50

em que:

y é a frequência relativa. É este valor, expresso em percentagem, que se encontra representado em ordenadas na curva de distribuição logarítmica-normal da figura 3. Esta função permite calcular a frequência de ocorrência de diâmetros com valores inferiores a um dado  $\Phi$ , pela expressão:

$$F(\Phi) = \int_{-\infty}^{\Phi} y \, d\Phi \quad (2)$$

$\Phi_M$  e  $\sigma_\Phi$  são a média e o desvio padrão da variável independente  $\Phi$ .

A representação dos resultados de uma análise granulométrica por um histograma ou por uma curva contínua de distribuição, do tipo da representada na figura 3, não é o mais usual. Recorre-se, geralmente, à curva cumulativa equivalente que permite, com mais facilidade, definir os parâmetros característicos da distribuição, como se verá adiante. Na figura 4 é apresentada a curva cumulativa correspondente à distribuição normal da figura 3, que pode ser elaborada a partir de valores tabelados ou calculada pela expressão (2). A curva cumulativa degenerou neste caso numa recta em virtude da transformação introduzida, com essa finalidade, no eixo das ordenadas. A vantagem desta última apresentação da distribuição granulométrica consiste em evidenciar os desvios da curva cumulativa duma amostra, relativamente à distribuição logarítmica normal.

A distribuição granulométrica duma amostra pode ser caracterizada pelos seguintes parâmetros principais:

- O DIÂMETRO MÉDIO que se calcula da seguinte forma:

$$\Phi_M = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^h \Phi_i P_i \quad (3)$$

FIG. 3 - Curva de distribuição logarítmica-normal, com  $\phi_M = 1,5$  e  $\sigma_\phi = 0,8$ .

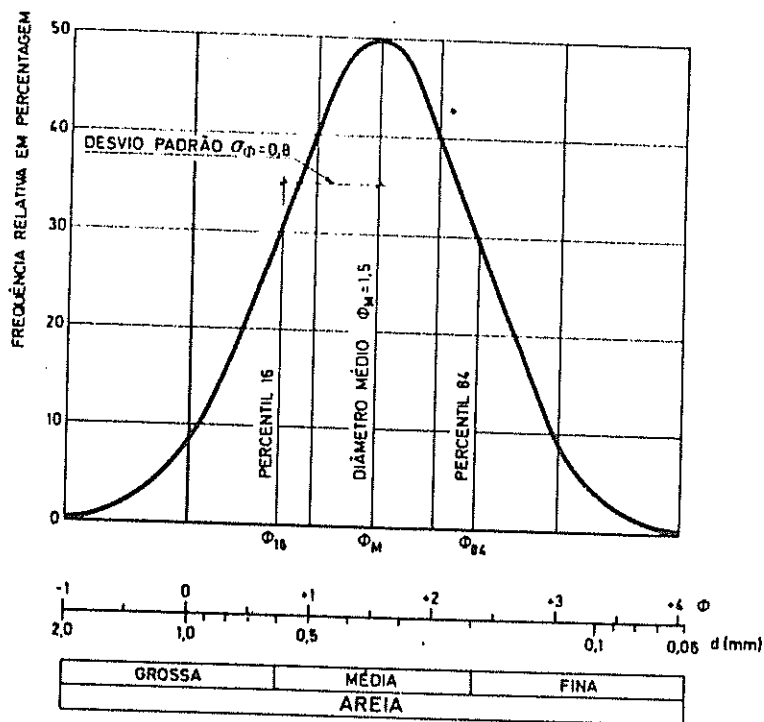
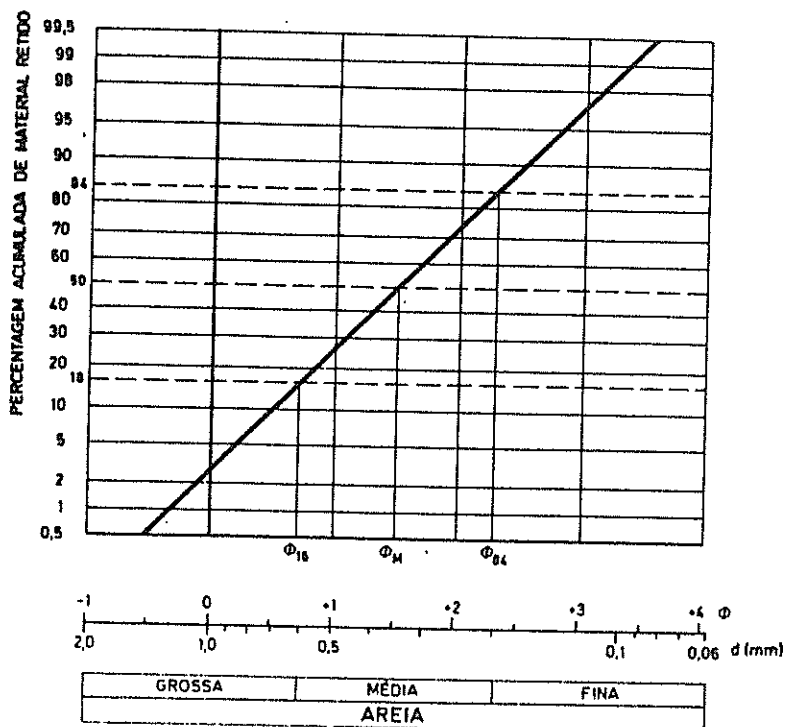


FIG. 4 - Distribuição cumulativa logarítmica-normal, com  $\phi_M = 1,5$  e  $\sigma_\phi = 0,8$ .



em que:

$h$  é o nº. de classes em que se dividiu a gama de diâmetros da amostra;

$\Phi_{\underline{i}}$  é o ponto médio do intervalo da classe genérica de ordem  $\underline{i}$ ;

$p_{\underline{i}}$  o peso da classe  $\underline{i}$  e

$p$  o peso total da amostra.

Utiliza-se normalmente no seu cálculo expedito a expressão:

$$\Phi_M = \frac{1}{2} (\Phi_{84} + \Phi_{16}) \quad (4)$$

- o DIÂMETRO MEDIANO que é o correspondente à percentagem 50 da curva cumulativa:

$$\Phi_{Md} = \Phi_{50}$$

- a DISPERSÃO que é expressa pelo desvio padrão da amostra

$$\sigma_{\Phi} = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{i=1}^h (\Phi_i - \Phi_M)^2 \cdot p_i} \quad (5)$$

e se calcula de maneira aproximada segundo:

$$\sigma_{\Phi} = \frac{1}{2} (\Phi_{84} - \Phi_{16}) \quad (6)$$

A dispersão é tanto maior quanto menos inclinada for a curva cumulativa e traduz o grau de calibração da amostra. Um valor de 0,4 a 0,5 corresponde a uma boa calibração da areia de uma praia [4].

- a ASSIMETRIA (SKEWNESS)<sup>(1)</sup> que se pode calcular por:

$$\alpha_{\Phi} = \frac{\Phi_M - \Phi_{Md}}{\sigma_{\Phi}} \quad (7)$$

e traduz, como o seu nome indica, o grau de assimetria da distribuição dos diâmetros da amostra.

(1) - Designação na terminologia anglo-saxónica.

#### 1.4 - Variações de granulometria em perfil transversal

A figura 5, apresentada por Bascom, dá uma ideia das variações acentuadas que sofre a granulometria das areias ao longo do perfil transversal das praias. Verifica-se que os maiores diâmetros se localizam na zona de rebentação, o que é explicado pelo facto de a turbulência acentuada que se gera nessa zona não permitir a deposição dos elementos mais finos, que são deste modo expulsos para zonas mais calmas.

O topo da berma é outro local de concentração de elementos grossos, originários da rebentação, de onde são projectados pelo jacto de rebentação. Na parte submersa da praia os diâmetros decrescem gradualmente com o aumento de profundidade.

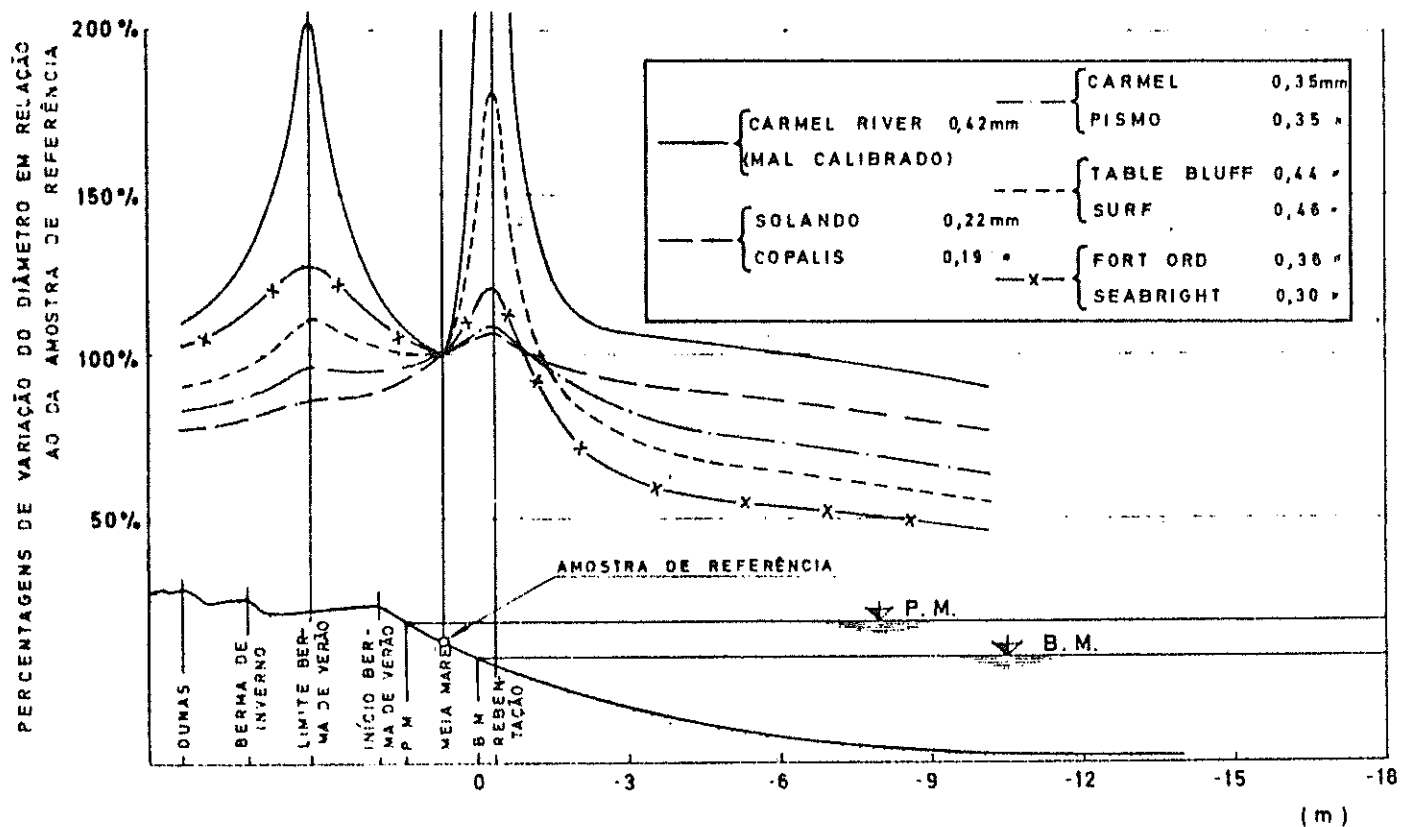


FIG. 5 - Variação da granulometria ao longo do perfil transversal de praias.  
(Nota: Os valores indicados na legenda são os diâmetros medianos da amostra de referência).

## 2 - MORFOLOGIA DAS PRAIAS

### 2.1 - Generalidades

O presente trabalho focará o caso de praias rectilíneas e com batimétricas aproximadamente paralelas, deixando de lado outros casos mais complexos de praias em arco ou encaixadas em reentrâncias profundas da costa. Considerar-se-á ainda que os fundos estão completamente recobertos por sedimentos móveis, não havendo afloramentos rochosos que contribuam para a dissipação da energia da onda. A esta última condição corresponde um transporte litoral saturado, isto é, em que a onda movimenta o volume máximo de sedimentos, que a sua energia e demais características lhe permitem.

### 2.2 - Perfil transversal

Quando as ondas actuam sobre uma praia processa-se uma movimentação do material do fundo, tendendo a configuração batimétrica deste a tornar-se constante no tempo, situação que será atingida se a ondulação persistir, sem alteração das suas características durante um período suficientemente longo.

Esta configuração batimétrica final, correspondente a uma situação de equilíbrio dinâmico do material de fundo para as condições de agitação, é dificilmente atingível na natureza, em virtude das constantes modificações das características das ondas e flutuações de níveis por efeito da maré.

Num perfil transversal duma praia (Fig. 6), podem distinguir-se as seguintes zonas [5]:

- Berma (backshore; haute plage) (1) que é a zona elevada da praia e fica limitada superiormente pela linha atingida, em maré viva, pelas ondas de tempestade e inferiormente pela linha média de espraiamento em preia-mar.

---

(1) - Designação nas terminologias anglo-saxónica e francesa.

A primeira destas linhas pode detectar-se, por vezes, pela diferença entre a vegetação de tipo continental da base da duna e a da berma que, quando existe, é de tipo especial para poder resistir a imersões ocasionais em água salgada. A linha limite inferior da berma aparece geralmente visualizada pelas "deixas" de algas ou de restos de conchas;

- Espraiado (foreshore; estran)<sup>(1)</sup> que é a zona que cobre e descobre com a maré. É limitada pelas linhas médias de preia-mar e baixa-mar;

- Ante-praia ou plataforma de rebentação (inshore; avant-plage)<sup>(1)</sup> que fica compreendida entre a linha exterior de rebentação e a linha de baixa-mar média. Pode apresentar um ou mais sistemas barra-fossa, relacionados com a existência de igual número de linhas de rebentação;

- Largo (offshore; large)<sup>(1)</sup> que se estende desde a linha exterior de rebentação até às profundidades em que se inicia o movimento das areias.

### 2.3 - Movimentos transversais. Perfis de verão e de inverno

O perfil transversal das praias encontra-se, como se apontou, em per

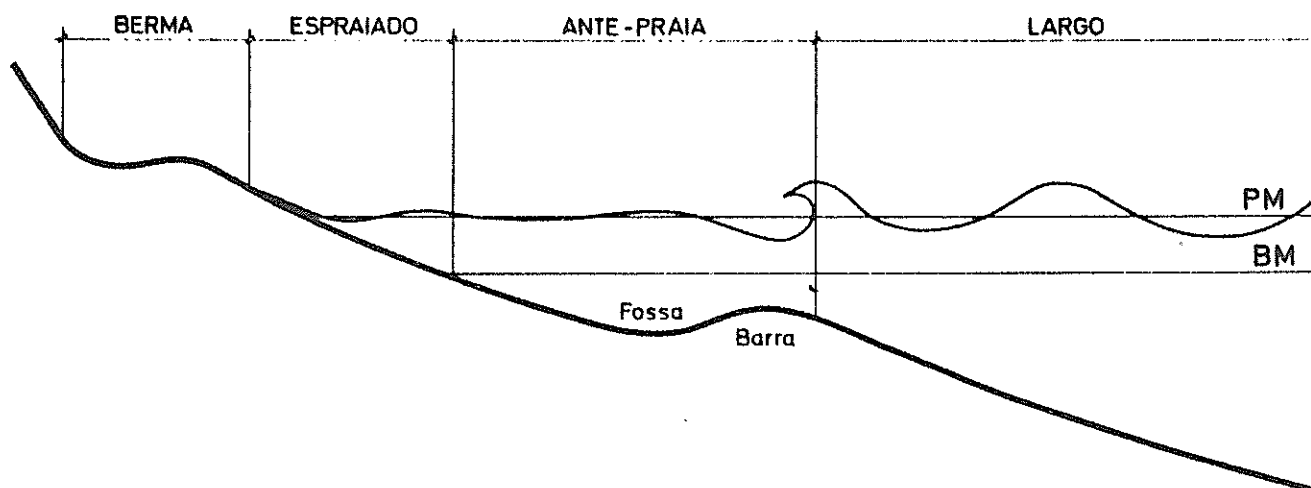


FIG. 6 - Perfil transversal duma praia.

(1) - Designação nas terminologias anglo-saxónica e francesa.



manente adaptação às condições da agitação. Estas apresentam na maioria das costas variações sazonais marcadas, correspondendo às condições climáticas de bom tempo e de tempestade. Deste modo, vão encontrar-se nos perfis transversais de uma praia configurações diferentes, conforme a época do ano em que se procedeu ao seu levantamento. Temos assim (Fig. 7) um perfil de verão correspondente à actuação de agitação regular, do tipo ondulação (swell; houle)<sup>(1)</sup> caracterizada, de um modo geral, por menores alturas e declividades e maior comprimento das cristas. Na mesma figura, encontra-se representado um perfil de inverno que corresponde à actuação de agitação local, do tipo vaga (sea; vague)<sup>(1)</sup>, que se caracteriza por alturas e de

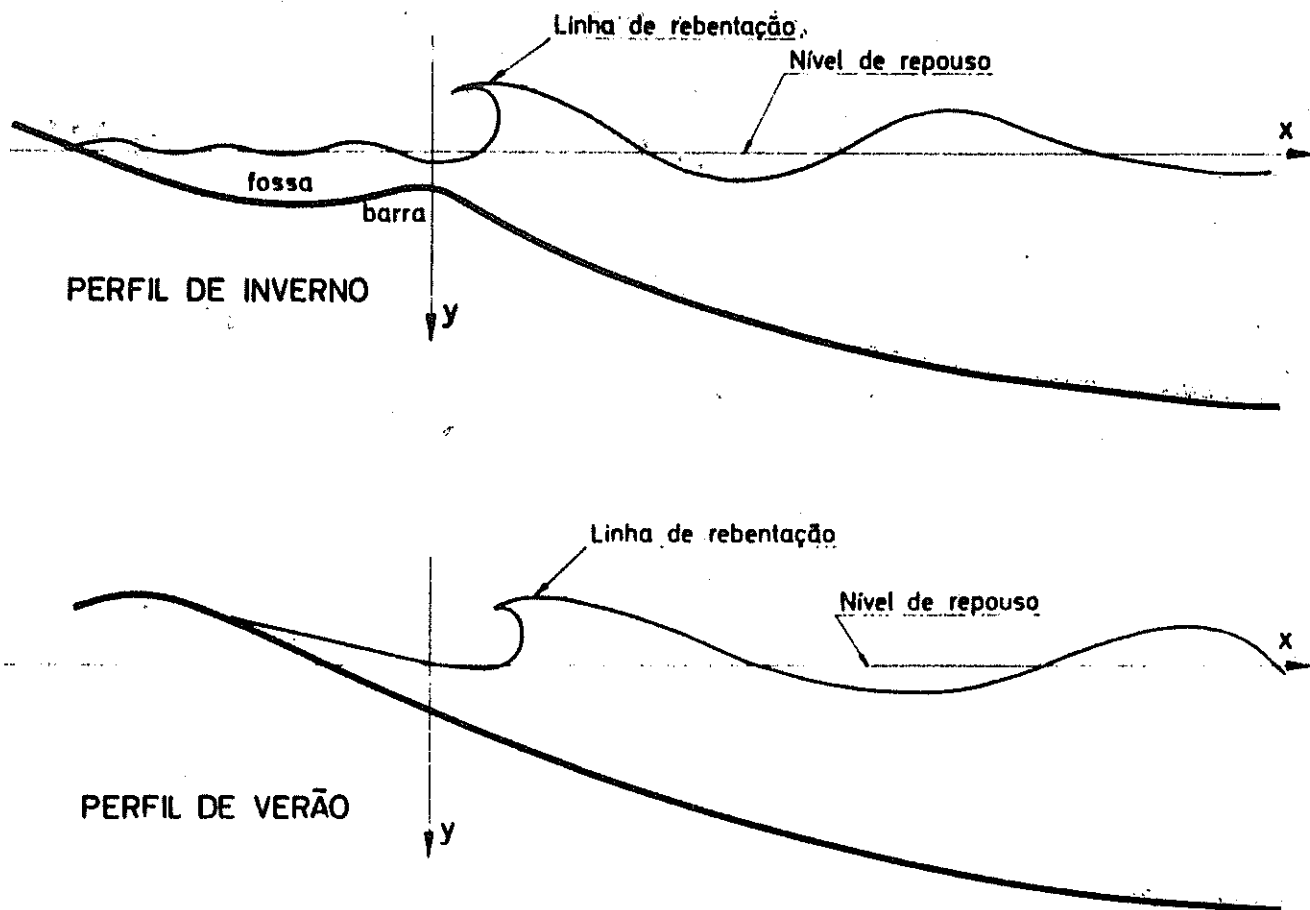


FIG. 7 - Perfis de inverno e de verão

(1) - Designação nas terminologias anglo-saxónica e francesa.

clividades mais acentuadas e menores comprimentos das cristas.

Qualquer dos dois tipos de perfil apresenta, esquematicamente, uma forma parabólica na zona do largo.

As maiores diferenças entre os dois perfis verificam-se na zona da ante-praia ou plataforma de rebentação, que no perfil típico de inverno se alarga e apresenta um ou mais sistemas barra-fossa, paralelos à costa. Este alargamento é devido em parte a erosão do espraiado, cujo declive diminui.

### 3 - ENERGIA DISSIPADA NA COSTA

#### 3.1 - Onda real

Consideremos a agitação marítima a propagar-se em direcção à costa. Tratando-se de ondas reais, na natureza, a agitação pode supor-se constituída pela sobreposição de um número infinito de comboios de ondas sinusoidais, de diferentes períodos, de cuja composição resulta a agitação em causa. Designa-se por espectro da agitação num dado ponto a distribuição, pelas frequências, da sua energia potencial (média no tempo) por unidade de superfície horizontal.

O espectro abrange teòricamente as frequências de zero a infinito. Na prática, porém, a quase totalidade da energia concentra-se numa gama relativamente estreita de frequências, designada por gama significativa.

O integral do espectro é igual à elevação média quadrática,  $\overline{\eta^2}$  da superfície da água e mede no ponto considerado, a menos duma constante, a energia potencial (média no tempo) por unidade de superfície, segundo a expressão:

$$E_p = \frac{1}{2} \rho g \overline{\eta^2} \quad (8)$$

em que  $\rho$  é a massa específica da água e  $g$  a aceleração da gravidade.

A elevação média quadrática da superfície livre  $\overline{\eta^2}$  relaciona-se com

a altura significativa por:

$$H_s = 4\sqrt{\eta^2} \quad (9)$$

relação válida quando as alturas de onda seguem a distribuição de Rayleigh, que é o caso da agitação marítima, quando apresente um espectro com gama significativa estreita, o que acontece frequentemente.

Substituindo este valor na expressão (8), vem:

$$W_p = \frac{1}{32} \rho g H_s^2 \quad (10)$$

valor que, em grandes profundidades, coincide com o da energia transmitida em direcção à costa.

### 3.2 - Onda monocromática

Até à presente data todos os ensaios de investigação em laboratório, sobre transporte litoral, foram efectuados com ondas monocromáticas.

O esquema de tratamento da ondulação que se utilizará neste trabalho consistirá, em virtude de se poder abstrair do que se passa em zonas de profundidades relativas intermédias, em considerar as ondas como sendo de pequena amplitude em profundidades relativas elevadas e solitárias junto da rebentação.

A teoria da onda de pequena amplitude descreve bem as características de ondas de altura reduzida. Nesta teoria a celeridade, à profundidade  $h$ , exprime-se por:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \operatorname{tgh} \frac{2\pi h}{L}} \quad (11)$$

em que  $L$  é o comprimento de onda a essa mesma profundidade. A expressão (11) toma, em profundidades relativas superiores a 0,5, o valor aproxi-

mado:

$$C_o = \sqrt{\frac{gL_o}{2\pi}} \quad (12)$$

A energia,  $W_t$ , transmitida durante um período e por unidade de comprimento de crista, relaciona-se com a correspondente energia total da onda,  $W$ , por:

$$W_t = nW \quad (13)$$

em que:

$$W = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (14)$$

e:

$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\operatorname{sh} \frac{4\pi h}{L}} \right] \quad (15)$$

Esta última grandeza toma o valor 0,5 em grandes profundidades e tende para a unidade quando a profundidade relativa tende para zero.

Quando a onda ao propagar-se atinge profundidades relativas inferiores 1/30 a teoria da onda solitária permite determinar com bastante aproximação as suas características.

Uma onda solitária é uma intumescência situada totalmente acima do nível de repouso da água, cujas características dependem apenas da sua altura e da profundidade a que se propaga.

O perfil duma onda solitária de altura  $H$ , propagando-se à profundidade  $h$ , é descrito segundo Boussinesq, pela expressão:

$$\eta = H \left[ \operatorname{sech} \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x-Ct) \right]^2 \quad (16)$$

em que a origem do eixo dos  $xx$  coincide com a crista da onda (Fig. 8). A sua celeridade é dada por:

$$C = \sqrt{g(H+h)} \quad (17)$$

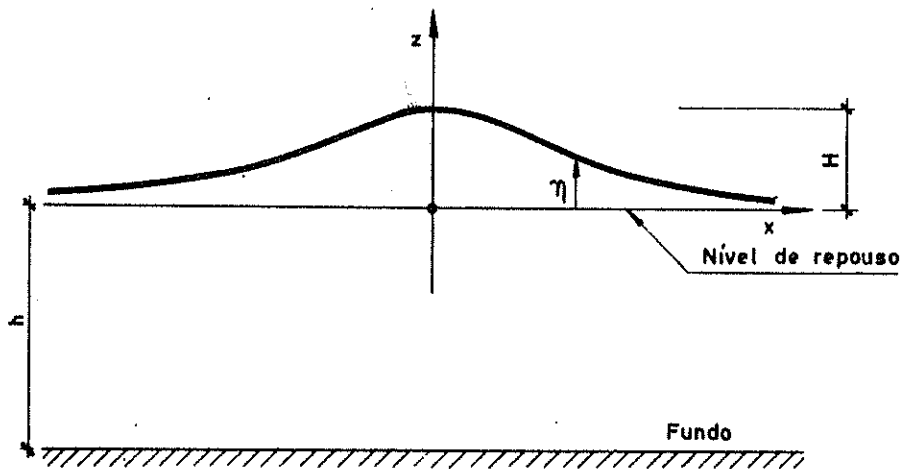


FIG. 8 - Representação esquemática duma onda solitária.

o volume da intumescência é:

$$V = 2 \int_0^{\infty} \eta \, dx = \left[ \frac{16}{3} h^3 H \right]^{1/2} \quad (18)$$

e a energia total

$$W = \frac{8}{3\sqrt{3}} H^{3/2} h^{3/2} \quad (19)$$

A trajectória das partículas de água na passagem da onda solitária tem o aspecto representado na figura 9.

Mc Cowan, admitindo como critério de rebentação a igualdade entre a velocidade das partículas da superfície na passagem da crista e a de deslocamento da forma da onda, deduziu para condição de rebentação da onda solitária:

$$\frac{H}{h} = 0,78 \quad (20)$$

### 3.3 - Cálculo da componente segundo a linha de costa, e por unidade de comprimento desta, da energia transmitida na rebentação

Consideremos o esquema da figura 10, que representa a propagação de

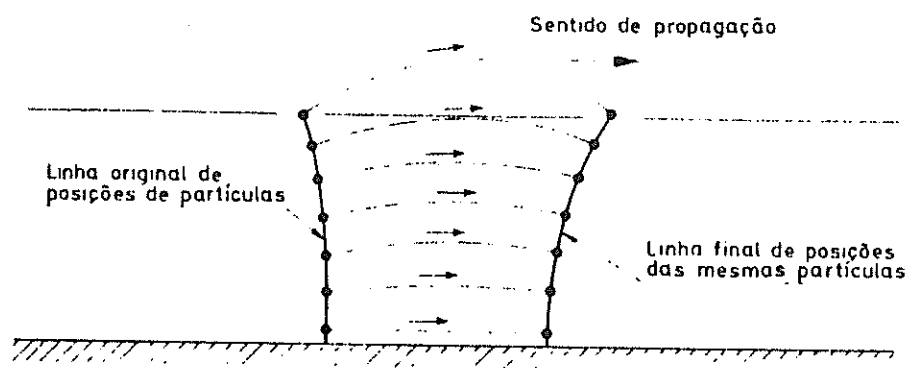


FIG. 9 - Trajectórias das partículas de água na passagem de uma onda solitária, segundo [6].

uma onda que ataca a costa obliquamente, refractando-se sobre fundos com batimétricas paralelas.

As ortogonais representadas, podendo sobrepor-se por translação, determinam por razões geométricas, a igualdade dos segmentos das batimétricas compreendidas entre elas. Assim, na figura, consideram-se duas ortogonais que intersectam as batimétricas segundo segmentos de comprimento unitário.

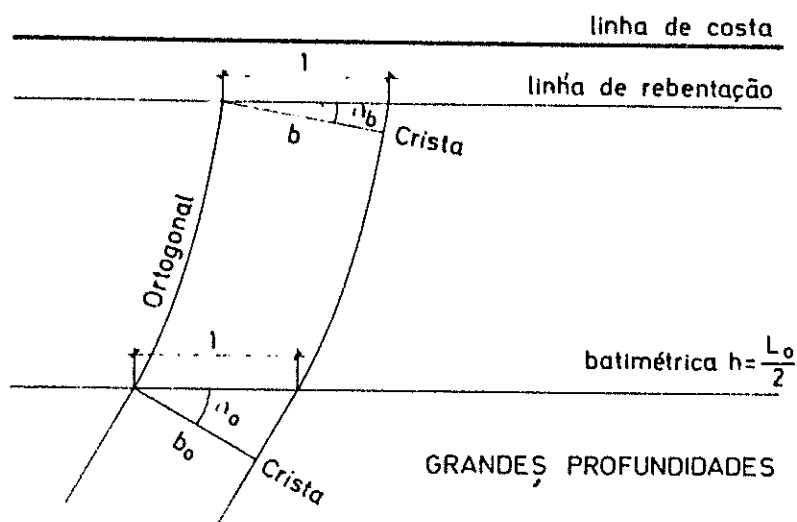


FIG. 10 - Esquema da refração de uma onda sobre fundos com batimétricas paralelas.

Os comprimentos de crista da onda compreendidos entre as duas ortogonais serão:

- em grandes profundidades  $b_0 = \cos \alpha_0$
- na rebentação  $b = \cos \alpha_b$

A energia transmitida durante um período entre as duas ortogonais representadas, corresponde a uma unidade de comprimento da linha de costa e tem por valor:

$$W_{to} b_0 = W_{tb} b$$

em que  $W_{to}$  e  $W_{tb}$  são as energias transmitidas, durante um período e por unidade de comprimento de crista, em grandes profundidades e na rebentação, respectivamente. Considera-se que não há perdas na transmissão da energia pelo que o valor da energia transmitida entre duas ortogonais será o mesmo em qualquer ponto do percurso.

O ângulo que a direcção de propagação da energia faz com a linha de costa é, na rebentação, complementar de  $\alpha_b$ , pelo que a componente segundo a linha de costa e por unidade de comprimento desta, da energia transmitida na rebentação, é:

$$W_1 = W_{to} b_0 \operatorname{sen} \alpha_b$$

ou

$$W_1 = W_{to} \cos \alpha_0 \operatorname{sen} \alpha_b \quad (21)$$

A energia transmitida em cada período por unidade de comprimento de crista é dada pela expressão (13) sendo o valor correspondente para as grandes profundidades:

$$W_{to} = \frac{1}{2} W_0 = \frac{1}{16} \rho g H_0^2 L_0 \quad (22)$$

em que  $W_0$ ,  $H_0$  e  $L_0$  são a energia total, a altura e o comprimento da onda em grandes profundidades.

Substituindo este valor em (21) vem:

$$W_1 = \frac{1}{16} \rho g H_o^2 L_o \cos \alpha_o \operatorname{sen} \alpha_b \quad (23)$$

e o valor correspondente da potência será:

$$P_1 = \frac{1}{16} \rho g \frac{H_o^2 L_o}{T} \cos \alpha_o \operatorname{sen} \alpha_b \quad (24)$$

ou ainda, por ser

$$L_o = \frac{g}{2\pi} T^2$$

$$P_1 = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_o^2 T \operatorname{sen} \alpha_b \cos \alpha_o \quad (25)$$

Temos assim a componente, segundo a linha de costa e por unidade de comprimento desta, da potência transmitida pela onda na rebentação, em função das características da onda em grandes profundidades e do ângulo na rebentação.

Torna-se necessário o conhecimento deste ângulo, para a definição completa da componente da potência, grandeza que vai ser utilizada constantemente, no esquema de tratamento do transporte sólido litoral que se definirá mais à frente.

### 3.4 - Cálculo das características das ondas na rebentação a partir dos valores em grandes profundidades

Este cálculo foi efectuado com base nas hipóteses seguintes:

- as batimétricas são paralelas;
- as ondas em grandes profundidades e na rebentação apresentam características de ondas de pequena amplitude e solitária, respectivamente;
- a onda solitária inicia a rebentação quando  $H_b/h_b = 0,78$ ;
- não há dissipação de energia na propagação das ondas entre o largo e a rebentação.



Postas estas hipóteses, considerou-se o esquema de ataque oblíquo da figura 10 e igualaram-se as expressões da energia transmitida, entre as duas ortogonais, em grandes profundidades e na rebentação:

$$\frac{1}{16} \rho g H_o^2 L_o b_o = \frac{8}{3 \sqrt{3}} g H_b^{3/2} H_b^{3/2} b$$

Atendendo a que, devido à refração sobre batimétricas paralelas:

$$\frac{b_o}{b} = \frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha_b}$$

e a que, segundo a lei de Snell:

$$\frac{\text{sen} \alpha_b}{\text{sen} \alpha_o} = \frac{C_b}{C_o} = \frac{\sqrt{2,28 g H_b}}{\sqrt{\frac{g}{2\pi} L_o}}$$

pois, atendendo a (17) e (20),  $C_b = \sqrt{g(H_b + h_b)} = \sqrt{2,28 g H_b}$

e designando  $H_b/L_o$  por  $\delta_{bo}$ , obtêm-se as relações:

$$\delta_{bo}^3 = 0,028 \delta_o^2 \frac{\cos \alpha_o}{\sqrt{1-4,56 \cdot \text{sen}^2 \alpha_o \delta_{bo}}} \quad (26)$$

$$\text{sen} \alpha_b = \sqrt{4,56 \pi} \delta_{bo}^{1/2} \text{sen} \alpha_o \quad (27)$$

Estas duas equações permitem, entrando com valores de  $\alpha_o$  e  $\delta_o$ , determinar os valores correspondentes  $\delta_{bo}$  e  $\alpha_b$ . Por este processo se construiu o ábaco da figura 11, do qual se tiram facilmente os valores de  $H_b/H_o$  e  $\alpha_b$  em função de  $\delta_o$  e  $\alpha_o$ .

No esquema que se vai usar ao longo deste estudo, vão utilizar-

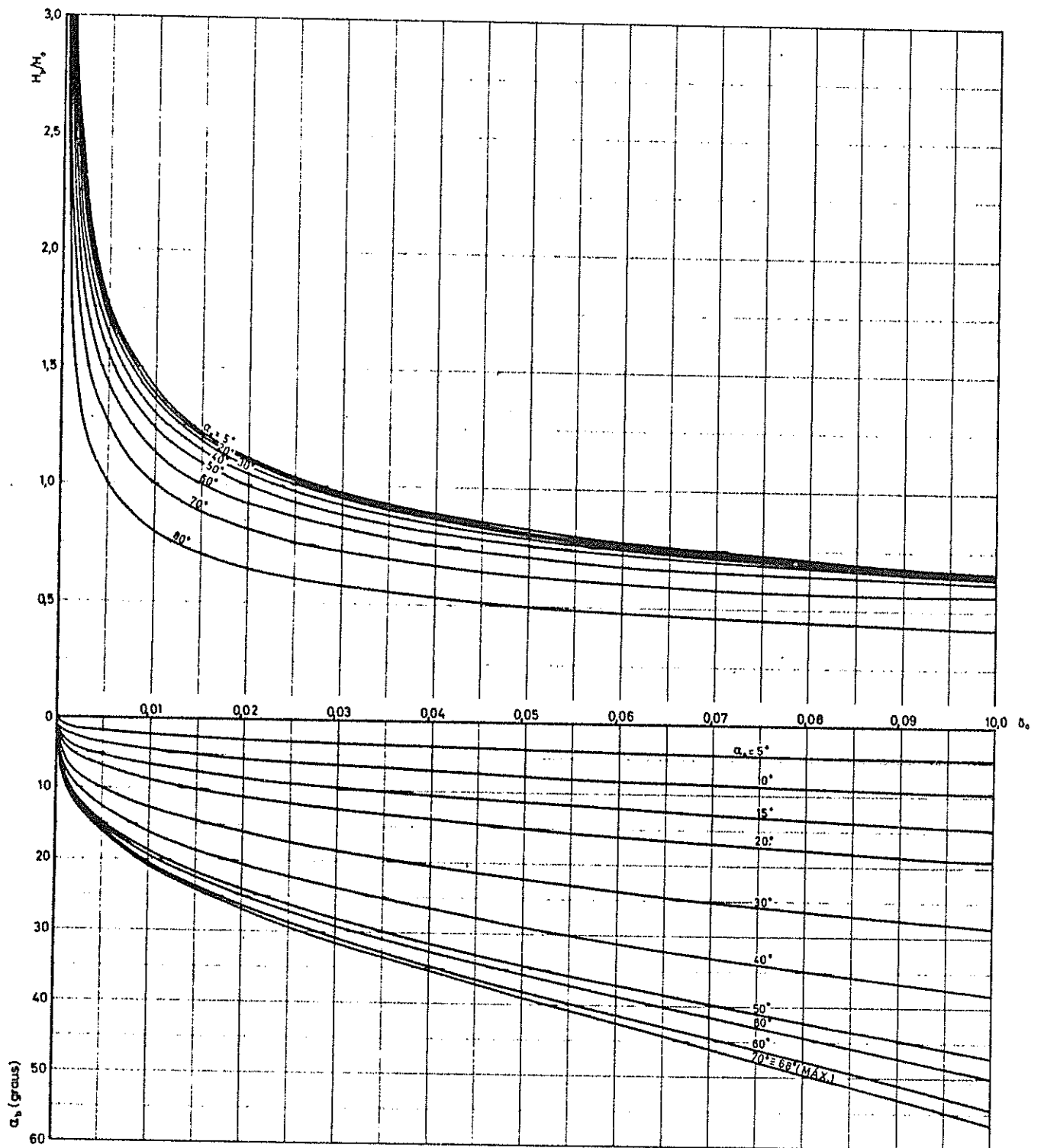


FIG. 11 - Ábaco para determinação das características das ondas na rebentação.

-se as características das ondas em grandes profundidades e admitir sempre que as batimétricas são paralelas entre essas profundidades relativas e a zona de rebentação.

Esta última hipótese raramente se verifica na natureza onde apenas haverá tendência para o paralelismo das batimétricas em zonas já pouco profundas, próximo da rebentação.

O esquema pode, no entanto, continuar ainda válido neste caso utilizando o artifício apresentado por Carvalho em [7]. Consiste este em:

- conhecidos os valores  $H_0$  e  $\alpha_0$  das ondas em grandes profundidades, calcular com base em planos de ondulação os valores  $H_1$  e  $\alpha_1$  das mesmas grandezas à profundidade  $h_1$  a partir da qual, e em direcção à costa, as batimétricas sejam paralelas;

- deduzir as características em grandes profundidades,  $H_0^*$  e  $\alpha_0^*$ , da onda que propagando-se sobre uma batimetria fictícia, formada por batimétricas paralelas à linha de costa, apresenta à profundidade  $h_1$  as mesmas características  $H_1$  e  $\alpha_1$ .

- ao aplicar a casos práticos qualquer das conclusões do presente trabalho, utilizar os valores fictícios  $H_0^*$  e  $\alpha_0^*$  em vez dos reais  $H_0$  e  $\alpha_0$ .

### 3.5 - Influência do ângulo de incidência das ondas no valor de $P_1$

A expressão da componente  $P_1$  segundo a linha de costa, e por unidade de comprimento desta, da potência transmitida na rebentação é (25):

$$P_1 = \frac{\rho g^2}{32\pi} H_0^2 T \operatorname{sen}\alpha_b \operatorname{cos}\alpha_0$$

Para ondas de altura  $H_0$  ao largo e período  $T$  constantes,  $P_1$  é apenas função do produto  $\operatorname{sen}\alpha_b \operatorname{cos}\alpha_0$ . Os valores do ângulo na rebentação são, na hipótese enunciada, função do ângulo de declividade em grandes

profundidades. O ábaco da figura 12 apresenta os valores do produto  $\text{sen}\alpha_0 \cos\alpha_0$  em função daquelas grandezas,  $\delta_0$  e  $\alpha_0$ . Verifica-se que o produto  $\text{sen}\alpha_0 \cos\alpha_0$  cresce com a declividade para cada valor do ângulo de ataque ao largo e apresenta, para uma mesma declividade, um máximo para valores de  $\alpha_0$  da ordem dos  $43^\circ$ .

#### 4 - CORRENTES GERADAS PELA ONDA

##### 4.1 - Introdução

As correntes oceânicas podem enquadrar-se num dos seguintes grupos principais:

- correntes de densidade
- correntes de maré
- correntes geradas pelo vento
- correntes geradas pelas ondas de gravidade.

São correntes de densidade as grandes correntes oceânicas como a corrente do Golfo e as correntes Equatoriais. Embora desloquem enormes caudais, não influenciam os fenómenos aluvionares que se processam nas costas marítimas, excepto nos casos em que a existência de ilhas ou a configuração especial da costa as obriga a aproximar-se desta.

Quanto às correntes de maré, muitas vezes fortemente condicionantes dos fenómenos aluvionares como no caso de estuários, lagunas e deltas, não têm, de um modo geral, importância nos fenómenos de transporte e deposição de aluviões que se processam em costa aberta.

As correntes devidas à acção directa do vento sobre a superfície da água do mar são geralmente de muito pequena intensidade.

Deste modo, as correntes geradas pelas ondas são as únicas que interessam normalmente ter em conta, ao abordar problemas de transporte litoral em costa aberta.

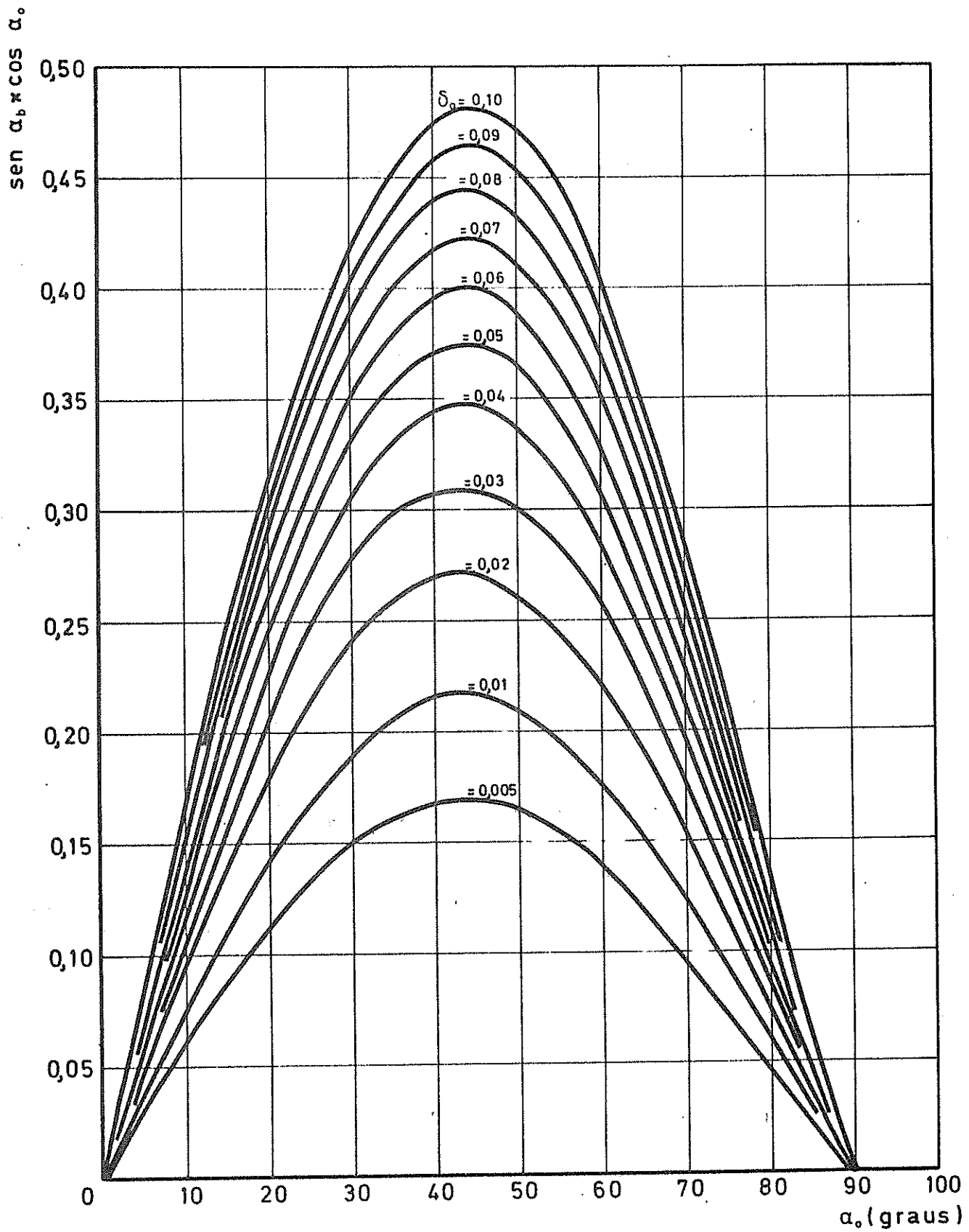


FIG. 12 - Produto  $\text{sen } \alpha_b \text{cos } \alpha_0$  em função de  $\alpha_0$  e  $\delta_0$ .

#### 4.2 - Correntes geradas por ondas incidindo frontalmente na praia

Considere-se, em primeiro lugar, que as ondas atacam a costa frontalmente, isto é, que é nulo o ângulo das cristas com a linha de água. Sabe-se, por observação e medições na natureza e em laboratório, que as trajetórias das partículas de água movimentadas pela onda não são completamente fechadas. Como resultado, ocorre, sobreposta à oscilação na passagem da onda, um deslocamento da massa líquida.

Este fenómeno é previsto pela teoria da onda de Stokes de 2ª. ordem. Assim, (Fig. 13), a equação da coordenada na direcção do eixo dos xx da posição duma partícula de água à profundidade  $(h + z)$ , na passagem de uma onda de amplitude finita é [6]:

$$\begin{aligned} \xi = & - \frac{H}{2} \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi(h+z)}{L}}{\operatorname{sh} \frac{2\pi h}{L}} \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) - \\ & - \frac{\pi H^2}{4L} \cdot \frac{1}{\left(\operatorname{sh} \frac{2\pi h}{L}\right)^2} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{\operatorname{ch} \frac{4\pi(h+z)}{L}}{\left(\operatorname{sh} \frac{2\pi h}{L}\right)^2} \right] \operatorname{sen} 2 \left( \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) \\ & + \left( \frac{\pi H}{L} \right)^2 \frac{C}{2} \cdot \frac{\operatorname{ch} \frac{4\pi(h+z)}{L}}{\left(\operatorname{sh} \frac{2\pi h}{L}\right)^2} \cdot t \end{aligned} \quad (28)$$

cujo último termo, não sendo periódico, traduz um deslocamento contínuo da partícula no sentido de propagação da onda.

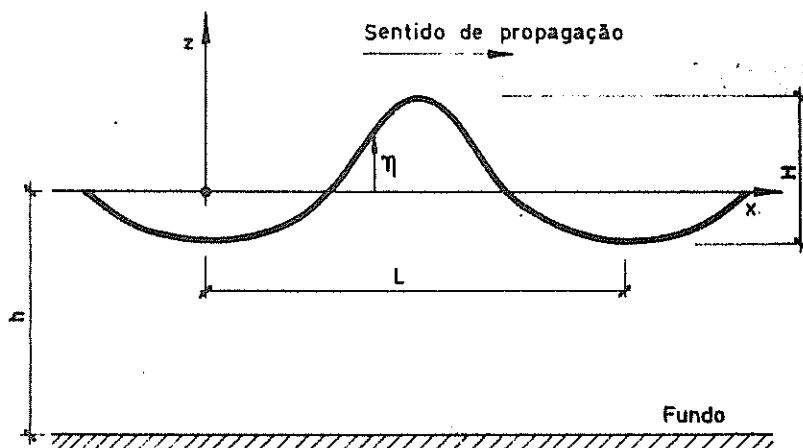
A velocidade média de deslocamento nesse mesmo sentido será [6]:

$$\bar{U}(z) = \frac{\Delta x}{T} = \frac{\xi_{t=T} - \xi_{t=0}}{T} = \frac{\pi^2 H^2}{2TL} \cdot \frac{\operatorname{ch} \frac{4\pi(h+z)}{L}}{\operatorname{ch}^2 \frac{2\pi h}{L}} \quad (29)$$

ou, chamando  $\bar{U}_0$  à velocidade média de propagação junto do fundo;

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_0 \operatorname{ch} \frac{4\pi(h+z)}{L} \quad (30)$$

FIG. 13 - Esquema de propagação duma onda sobre fundo horizontal



Esta expressão, denominada expressão de Stokes para o transporte de massa, considera o canal como possuindo um comprimento infinito e o líquido como perfeito.

Longuet-Higgins deduziu a expressão correspondente, tendo agora em conta o efeito da viscosidade e considerando o canal como de comprimento finito, hipótese esta que obriga a respeitar a continuidade. Obteve a expressão:

$$2 \frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}_0} = 2 \operatorname{ch} \frac{4\pi h}{L} (h+z) + 3 + \frac{2\pi h}{L} \left[ 3 \left(\frac{z}{h}\right)^2 + 4 \left(\frac{z}{h}\right) + 1 \right].$$

$$\cdot \operatorname{sh} \frac{4\pi h}{L} + 3 \left[ \frac{\operatorname{sh} \frac{4\pi h}{L}}{\frac{4\pi h}{L}} + \frac{3}{2} \right] \cdot \left[ \left(\frac{z}{h}\right)^2 - 1 \right] \quad (31)$$

válida na superfície e interior do líquido. Para a velocidade média junto do fundo, mas exterior à camada limite, obteve:

$$\bar{U} = \frac{5}{4} \cdot \frac{\pi^2 H^2}{TL} \cdot \frac{1}{\operatorname{sh}^2 \frac{2\pi h}{L}} \quad (32)$$

Russel e Osorio [8] verificaram, a partir de ensaios de laboratório, que para valores de profundidades relativa superiores a 0,34, a equação de Stokes (30), após o deslocamento do eixo das velocidades por forma a ser sa

tisfeita a continuidade, era aquela a que os resultados experimentais melhor se adaptavam<sup>(1)</sup>.

Nas profundidades relativas compreendidas entre 0,11 e 0,24 a expressão (31) de Longuet-Higgins representava bem o fenómeno. Para valores de  $d/L < 0,048$  os perfis de velocidade variavam de maneira não sistemática.

Na figura 14, apresentam-se exemplos das comparações de valores teóricos e experimentais efectuados por Russel e Osorio.

Parece verificar-se que em profundidades relativas elevadas se tende a anular o transporte no interior do líquido, junto do fundo, havendo um retorno na parte média da secção e velocidades no sentido de propagação da onda à superfície. Para valores menores de  $h/L$  haveria deslocamentos à superfície e em profundidade e retorno a meia altura da secção. Finalmente, para profundidades relativas muito pequenas, haveria avanço da massa de água na parte inferior e retorno na superior, embora com a velocidade máxima de retorno situada abaixo da superfície.

Os mesmos autores verificaram ainda que junto do fundo, mas já fora da camada limite, os valores de velocidade de deslocamento de massa previstos por Longuet-Higgins pela expressão (32) estavam de acordo com os experimentais em toda a gama de ensaios. Esta abrangia valores de profundidade relativa entre 0,03 e 0,30 e casos da camada limite laminar e turbulenta. Verificaram, por último, que os valores experimentais da velocidade de deslocamento junto do fundo não diferiam sensivelmente de fundos horizontais para declives suaves.

De acordo com estas distribuições de velocidades, as correntes geradas, no caso de ataque frontal, poderão ser representadas pelo esquema bidimen-

---

(1) - O deslocamento do eixo das velocidades equivale a sobrepor à distribuição inicial de velocidades de Stokes, totalmente dirigidas no sentido de propagação da onda, um retorno de sentido contrário uniformemente distribuído, com intensidade tal que satisfaça a continuidade.



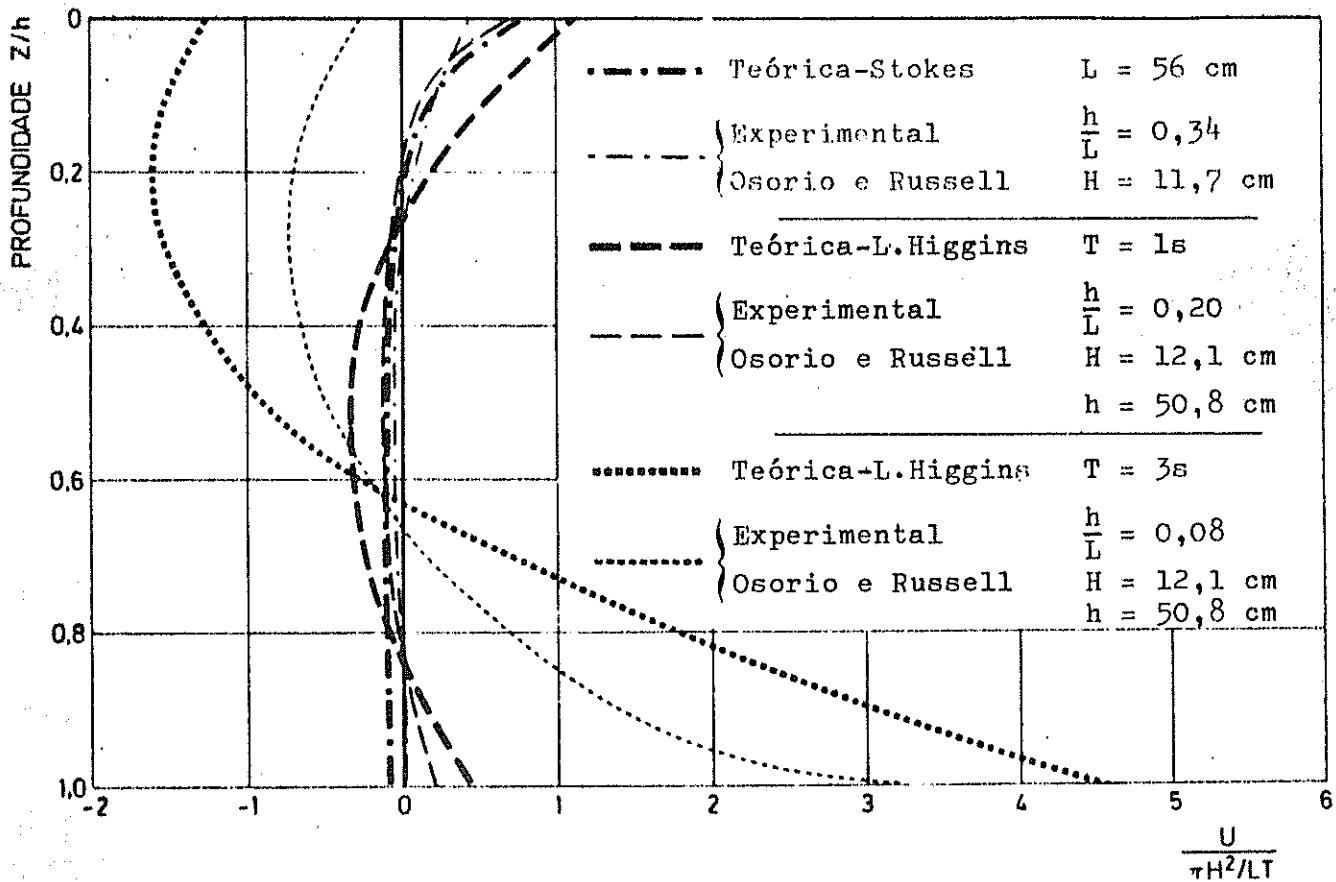


FIG. 14 - Comparação de perfis, teóricos e experimentais, de distribuição de velocidades de deslocamento de massa. Segundo Russel e Osorio [8].

sional da figura 15.

Verifica-se, além disso, existirem duas zonas de circulação distintas, uma para o largo da rebentação e a outra entre esta e a linha de costa. Esta última é gerada pelos movimentos das massas de água lançadas, entre a linha de rebentação e a costa, pela onda ao rebentar.

O volume de trocas existentes entre as duas zonas dependem da defasagem entre o momento em que ocorre a rebentação e aquele em que o retorno atinge a maior intensidade. Quanto maior for essa defasagem maior será a troca de massa de água entre as duas zonas.

É de notar que este tipo de esquema não ocorre normalmente na natureza mas apenas em laboratório, em canal de ondas. Na natureza o ataque frontal origina esquemas de correntes do tipo tridimensional que se tratam a seguir.

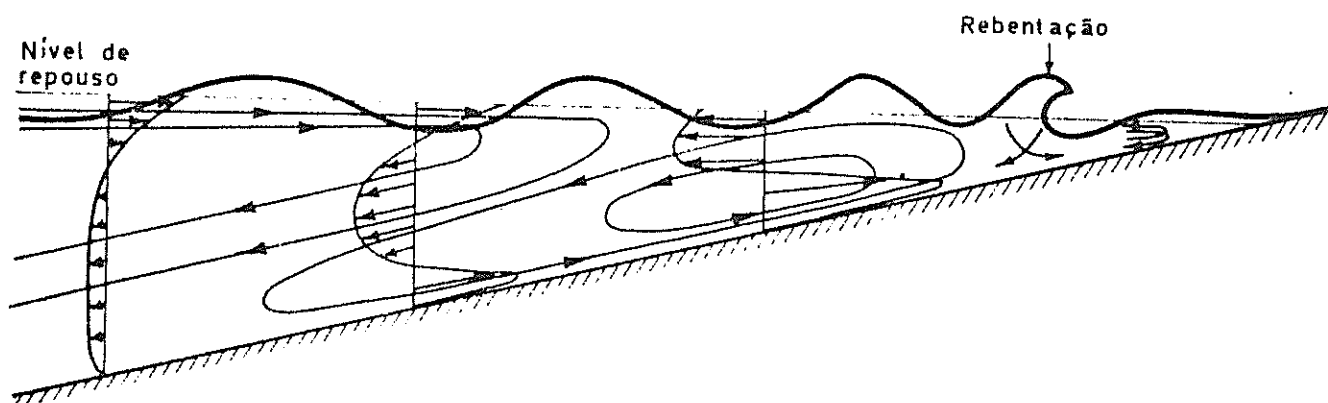


FIG. 15 - Esquema das correntes geradas pela onda ao incidir frontalmente numa praia.

#### 4.3 - Correntes geradas na incidência oblíqua

O ataque oblíquo das ondas a uma praia origina, tanto no laboratório como na natureza esquemas de correntes com o aspecto do apresentado por Sheppard e Inman (Fig. 16).

A corrente exterior paralela à costa, será uma corrente de maré, vento ou densidade e pode não estar presente. A corrente de transporte de massa das ondas dá origem à introdução, entre a rebentação e a costa, duma massa de água possuidora duma componente de energia segundo a direcção da costa. É uma fracção dessa energia que vai originar um escoamento entre a linha de rebentação e a costa, paralelamente a esta, escoamento designado por corrente longitudinal (longshore current; courant longitudinal)<sup>(1)</sup>. Estas correntes serão mais à frente, no anexo III, objecto de um tratamento mais pormenorizado, em virtude de estarem intimamente ligadas ao transporte litoral e terem sido objecto de observação e medições em modelo, na parte experimental do presente trabalho.

A rebentação oblíqua gera ainda, sobre o espriado, as correntes de

(1) - Designação nas terminologias anglo-saxónica e francesa.

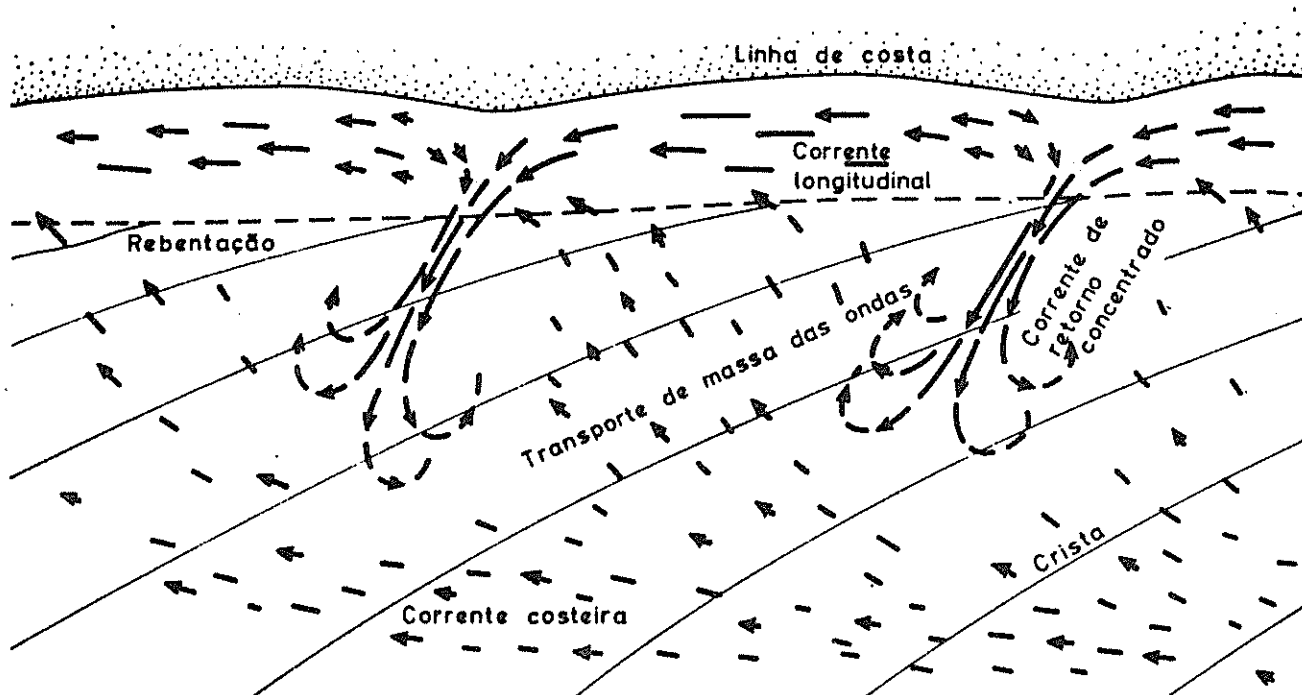


FIG. 16 - Correntes geradas pela onda. Esquema tridimensional.

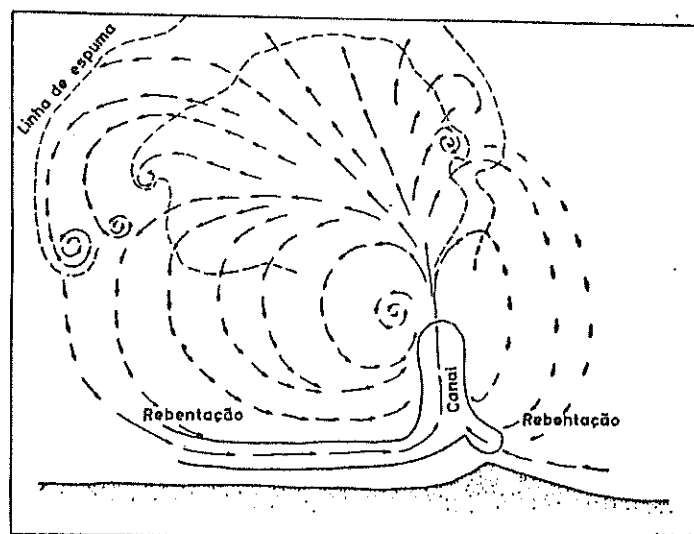
jacto de rebentação, em dente de serra, que não se encontram representadas no esquema da figura 16. São constituídas por um jacto que sobe o espraiaido segundo a direcção de propagação da onda na rebentação, ao qual se segue um refluxo segundo a linha de maior declive da praia.

A massa de água introduzida pelas ondas entre a linha de rebentação e a costa é compensada por um retorno em direcção ao mar. Este retorno pode ser distribuído duma maneira aproximadamente uniforme ao longo da linha de rebentação, com intensidade variável durante o período da onda, por forma a apresentar um valor máximo no intervalo de tempo que decorre entre a chegada de duas cristas sucessivas.

Designaremos as correntes que aparecem associadas a este regresso das massas de água em direcção ao largo, por correntes de retorno distribuído.

Muito mais frequente, porém, é ser o retorno da massa de água concentrado em faixas estreitas sob a forma de correntes que designaremos por

FIG. 17 - Diagrama esquemático duma corrente de retorno concentrado. Os comprimentos das setas representam as velocidades relativas. Sheppard [9].



correntes de retorno concentrado (rip-currents)<sup>(1)</sup>, onde as velocidades chegam a exceder um metro por segundo (Fig. 17). Estas por sua vez acabam por sofrer um movimento de expansão, após atravessarem a linha da rebentação, com formação de turbilhões, diminuindo de velocidade e acabando por ser integradas no movimento de transporte de massa, dirigido para terra. Um flutuador lançado na origem de uma corrente de retorno concentrado acabará normalmente por voltar à linha de rebentação. Parece ser condição desfavorável à formação destas correntes um ângulo elevado de ataque da onda, sendo comum a sua ocorrência para ataque frontal ou quase frontal. Neste último caso continuam a ser alimentadas pelas correntes longitudinais, geradas agora pelos gradientes de sobre-elevação do nível médio junto à costa, que existem sempre na natureza, ao longo de uma praia atacada por ondulação frontal, em virtude do aparecimento de zonas de concentração e de divergência de ortogonais provocadas pela irregularidade das batimétricas.

O espaçamento entre as correntes de retorno concentrado é geralmente irregular, podendo os intervalos atingir vários quilómetros. Em pontos duma praia, aproximadamente rectilínea, em que uma corrente longitudinal, de sentido bem definido, é interceptada por um obstáculo natural ou artifici-

(1) - Designação em terminologia anglo-saxónica.

al, aparece geralmente uma corrente de retorno concentrado bem desenvolvida.

Estas correntes quando intensas podem escavar canais através das barras que porventura existam, tal como se representa no esquema da figura 17.

#### 4.4 - Correntes de difracção

Ocorrem em casos especiais como no de praias em enseadas, isto é, situadas em reentrâncias pronunciadas ou no caso da existência de obras que abriguem de forma desigual, da ondulação, um troço de costa. Estas correntes, com importância na distribuição dos sedimentos, fluem das zonas onde, na rebentação, a altura das ondas e consequentemente os caudais por estas lançados em direcção à costa são maiores, para as mais protegidas, em que são inferiores.

### 5 - MOVIMENTAÇÃO\*ALUVIONAR NA ZONA\*COSTEIRA

#### 5.1 - Início de movimento

Quando as ondas se aproximam da costa não fazem sentir a sua influência nos fundos enquanto não alcançam zonas de profundidade menor do que metade do seu comprimento. Só a partir dessas profundidades começam a ocorrer movimentos sensíveis das partículas do fluido situadas próximo do fundo, movimentos que geram nos sedimentos forças de arrastamento. As partículas do líquido apresentam junto do fundo um movimento de vai-vém, cuja componente horizontal de velocidade pode ser calculada, à profundidade relativa  $h/L$ , admitindo que a onda se propaga com as características da onda de Stokes de 2ª. ordem, pela expressão:

$$V = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\text{sh} \frac{2\pi h}{L}} \cdot \cos \frac{2\pi t}{T} + \frac{3}{4} \cdot \frac{\pi^2 H^2}{TL} \cdot \frac{1}{\text{sh}^4 \frac{2\pi h}{L}} \cdot \cos \frac{4\pi t}{T} \quad (55)$$

em que V apresenta valores positivos no sentido de propagação da onda, quan

do se toma, para origem dos tempos  $t$  o instante de passagem de uma crista.

Imaginando a mesma onda a progredir em fundos sucessivamente decrescentes, haverá uma diminuição gradual de  $sh \frac{2\pi h}{L}$  e um aumento conseqüente da velocidade máxima junto do fundo, verificando-se em certa profundidade relativa o início de movimento dos grãos de areia.

Esta profundidade de início de movimento, dependerá das características da onda e da areia de que os fundos sejam formados, influenciando na sua ocorrência o tipo de camada limite e o grau de imersão do grão nessa camada. Bonnefille e Pernecker [10] apresentaram a condição de início de arrastamento com base numa relação de dois parâmetros adimensionais (Fig. 18) que agrupa os resultados de diversos autores. A expressão é:

$$D_* = f(R_*)$$

em que:

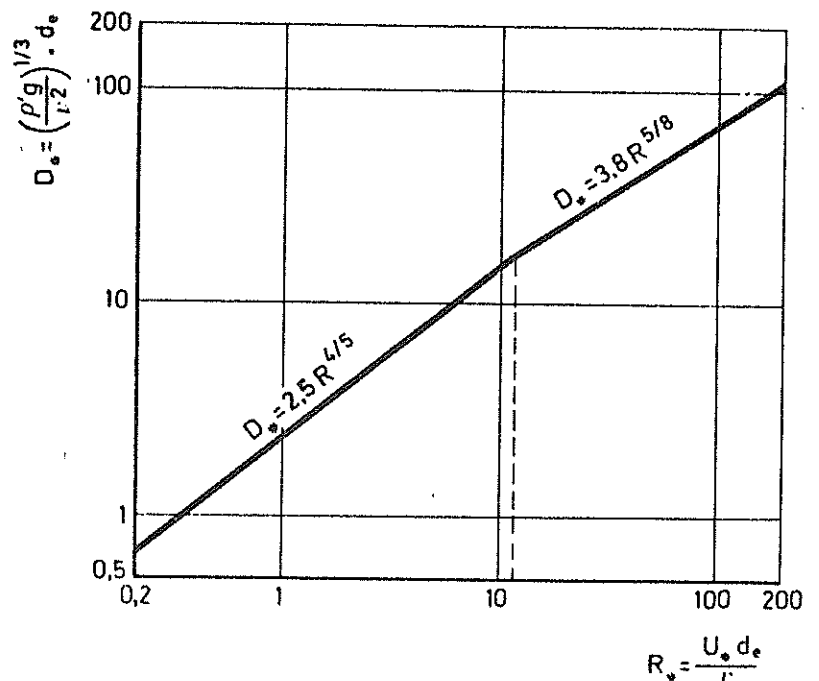
$$D_* = \left( \frac{\rho' g}{\nu^2} \right)^{1/3} d_e$$

é designado por diâmetro sedimentológico do grão e

$$R_* = \frac{U_* d_e}{\nu}$$

por número de Reynolds referido à velocidade de atrito,  $U_*$ .

FIG. 18 - Condições de início de movimento segundo Bonnefille e Pernecker [10].



$d_e$  é o diâmetro equivalente do grão,  $g$  a aceleração da gravidade,  $v$  a viscosidade cinemática da água e  $\rho'$  a massa específica aparente do sedimento.

A lei que se exprime na figura 18, é aplicável tanto a ondas como a correntes, o que traz vantagem, quando se procuram as condições de semelhança em modelos em que ambos os agentes se encontrem presentes.

No caso das ondas, o valor de  $U_*$  pode ser calculado pela expressão de Eagleson:

$$U_* = \left( \frac{8\pi v^2 H^2}{T^3 \operatorname{sh}^2 \frac{2\pi h}{L}} \right) \quad (34)$$

A aplicação das fórmulas de início de arrastamento parece mostrar, que para alturas e períodos elevados, se podem verificar movimentos de areia em profundidade superior à centena de metros.

## 5.2 - Movimento estabelecido

Após o início de movimento, a trajectória do grão de areia fica condicionada pelo peso próprio do grão e pela acção hidrodinâmica, resultante da movimentação das partículas de água junto do fundo.

A acção hidrodinâmica é variável no tempo, apresentando valores máximos, no sentido de terra e do mar nos instantes de passagem da crista e da cava, respectivamente. A sua resultante, no intervalo de tempo dum período, é dirigida para a costa, em virtude da já focada assimetria das órbitas das partículas situadas junto do fundo. Tenderá, deste modo, a fazer o grão subir o talude da praia, no que é contrariada pela acção do peso, acção esta que é rapidamente variável ao longo do perfil transversal da praia, devido à forma parabólica da zona do largo.

Conforme predomina a acção da força hidrodinâmica ou do peso, assim o grão subirá ou descera o talude da praia, para se fixar num ponto do perfil transversal em que as duas se equilibram.

O grão no caso da incidência oblíqua, após ter atingido a sua posição de equilíbrio no perfil transversal, fica a oscilar num movimento em dente de serra de resultante nula no sentido da costa o que origina um deslocamento paralelo a esta (Fig. 19).

Durante a adaptação dum praia às ondas de tempestade, o deslocamento de areias no sentido do mar pode ser reforçado, na zona do largo, por um transporte em suspensão no seio da corrente de massa. Deve-se este facto ao incremento da turbulência, originado pelas ondas de tempestade, contribuir para que maiores quantidades de areia sejam postas em suspensão, pela rebentação e permaneçam mais tempo nessa situação antes de sofrerem assentamento, havendo uma fracção predominante que é arrastada para o ex

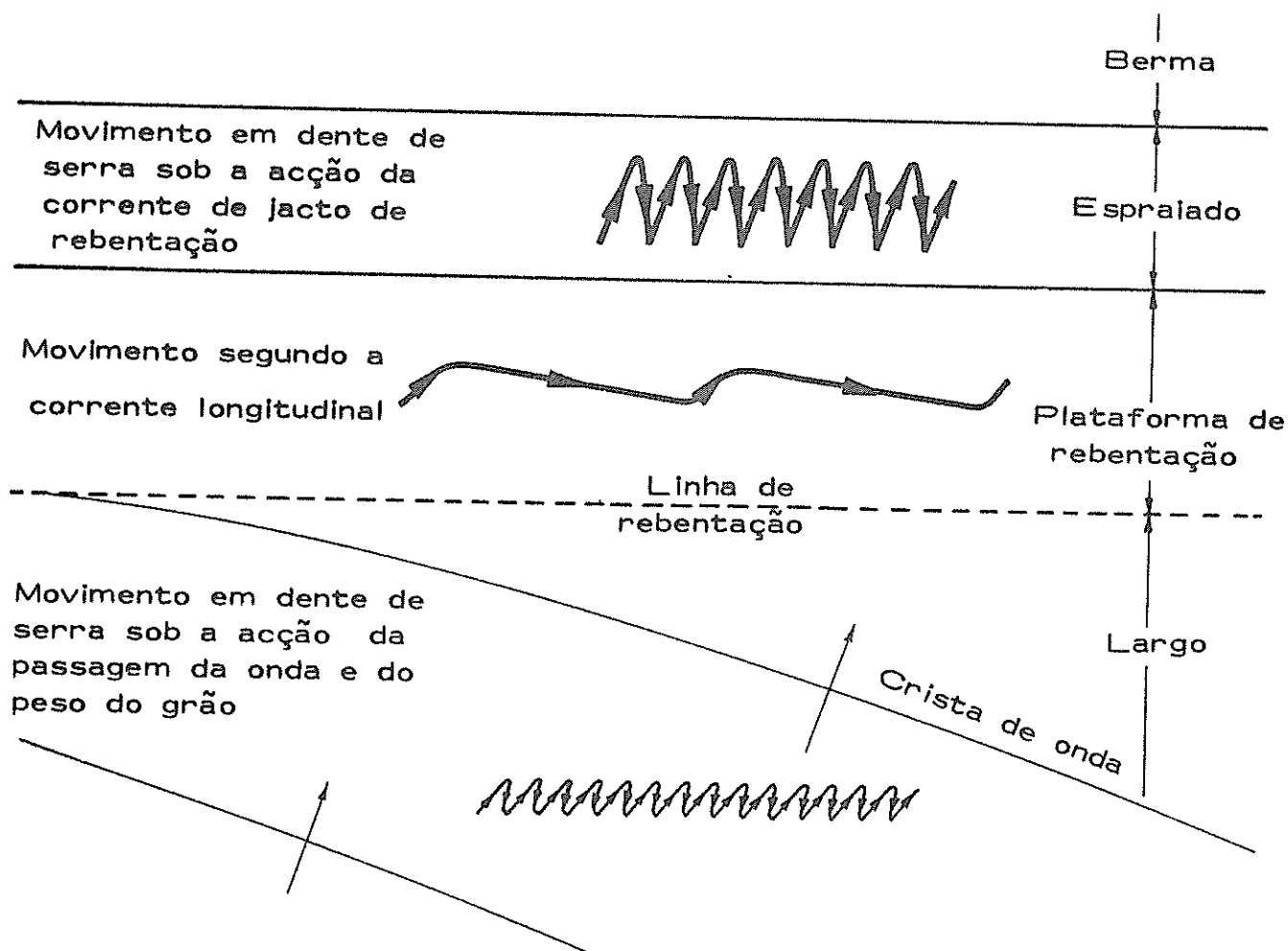


FIG. 19 - Esquema do caminhamento da areia nas diversas zonas dum praia sujeita a ataque oblíquo da ondulação.

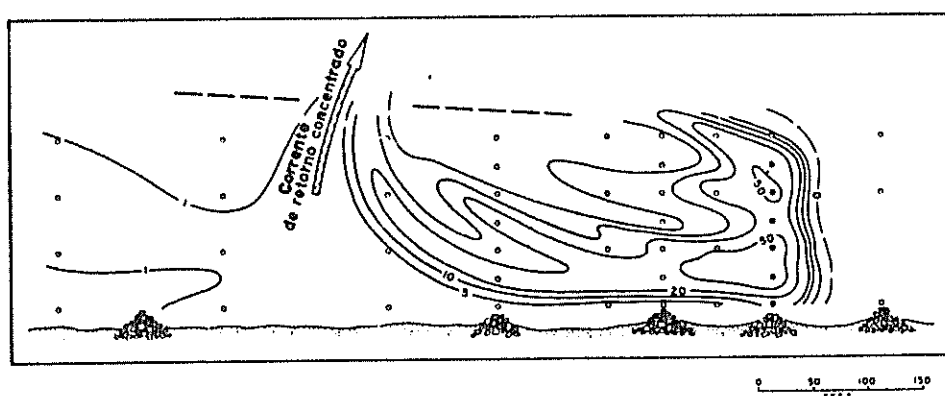


terior pela camada intermédia da corrente de massa que, como vimos anteriormente, apresenta esse sentido (Fig. 15).

As correntes de retorno concentrado são ainda um outro elemento a originar transporte na zona do largo, dirigido para o mar, quer em suspensão quer por arrastamento. Ingle [11] apresenta esquemas de movimentação por correntes de retorno concentrado, obtidos com lançamento de areias marcadas, que evidenciam bem o caminhamento (Fig. 20).

É na zona compreendida entre o início da rebentação e a parte superior do espraiado que se processam os transportes mais intensos em direcção longitudinal. Na faixa ou faixas em que ocorre a rebentação haverá geralmente um acentuado transporte de areia em suspensão em virtude de se tratar duma zona altamente turbulenta. Coexiste, no entanto, um movimento por arrastamento e saltação, tal como se apresenta no esquema da figura 21. Os grãos arrastados caminham sobre o fundo num movimento de vaivém com componente longitudinal enquanto que os restantes, que se movimentam em suspensão ou saltação apresentam trajectórias helicoidais.

É na plataforma de rebentação que normalmente se dá na natureza o transporte mais intenso. O macaréu gerado pela rebentação põe a areia em



- Pontos de lançamento das areias marcadas.
- Linhas de igual concentração, 40 min. após o lançamento.
- Linha de rebentação.

FIG. 20 - Esquema de transporte de areia por uma corrente de retorno concentrado, obtido por Ingle [11] com areias marcadas.

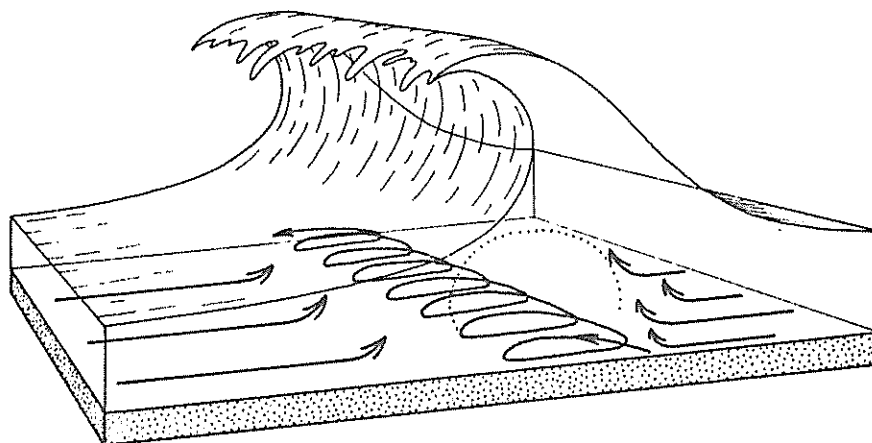


FIG. 21 - Esquema de movimentação das areias na rebentação, segundo Ingle [11].

movimento sobre o fundo ou mesmo em suspensão e a corrente longitudinal transporta-a consigo, segundo um tipo de trajectória que se indica na fi gura 19.

Sobre o espreado o fluxo e refluxo do jacto de rebentação, já ante riormente referido, origina um transporte em dente de serra cujo valor es tá ligado à intensidade do espriamento. Este tipo de transporte pode to mar um valor apreciável ou mesmo predominante em relação ao total, quando o perfil transversal é do tipo perfil de verão. Quando aparece agitação de maior altura sobre um ou mais sistemas de barra-fossa predominará o trans porte pela corrente longitudinal.

Segundo Sitarz [12] o sistema barra-fossa forma-se para valores de

$$H < 0,06 \gamma'^{1/2} d^{1/2} T \quad (35)$$

em que H, altura da onda, se exprime em metros, o diâmetro d em milímetros e o período T em segundos. É ainda:

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

sendo  $\gamma_s$  e  $\gamma$  os pesos específicos do material móvel e da água.

Existem no entanto outros critérios, dos quais se apresentam na figura 22 os de: Johnson; Nayak; Iwagaki e Noda [13]. Estes dois últimos, mais recentes, dão resultados mais concordantes, embora continuem a divergir apreciavelmente na zona das pequenas declividades.

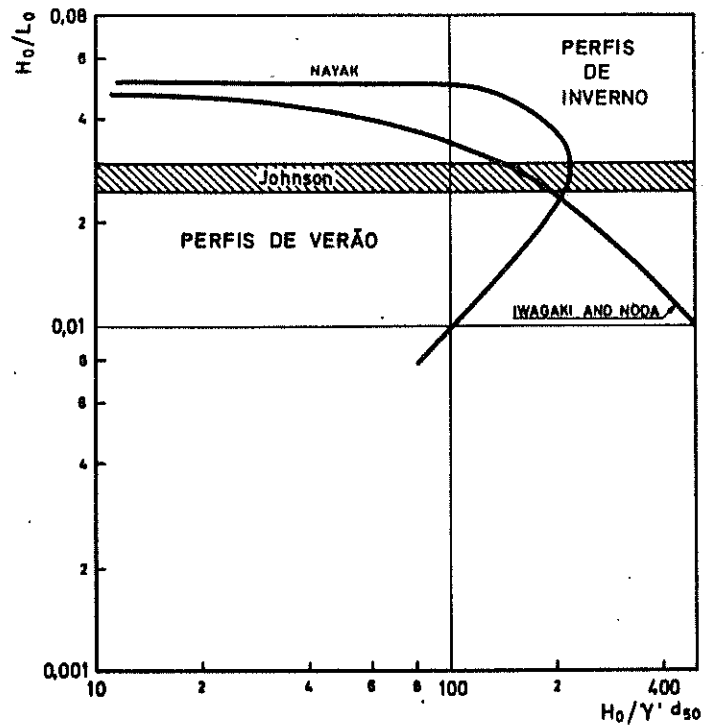


FIG. 22 - Critérios para a geração de sistemas barra-fossa, segundo Noda [13].

## CAP. III - REVISÃO DOS CONHECIMENTOS RELACIONADOS COM A PREVISÃO DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL

### 1 - INTRODUÇÃO

A revisão dos conhecimentos relacionados com a previsão do caudal sólido litoral é efectuada, neste capítulo, com base no estudo da influência de parâmetros adimensionais. Começa-se por escolher os parâmetros, recorrendo à análise dimensional do fenómeno do transporte sólido litoral. Abordam-se a seguir os diversos estudos referidos na bibliografia, começando-se por tomar em conjunto os resultados das medições em que o material móvel utilizado era areia e testar com eles os parâmetros que as considerações de análise dimensional permitiram estabelecer. Analisam-se seguidamente os resultados de cada um dos autores, em separado, para verificar em que medida se afastam das conclusões obtidas a partir do conjunto. Procura-se nesta fase explicar e integrar conclusões díspares ou aparentemente contraditórias de alguns autores, pelo recurso ao esquema global que se apresenta no início deste capítulo. Por último, analisam-se as principais fórmulas de previsão do transporte sólido litoral.

Deixa-se para o capítulo seguinte o tratamento dos resultados dos ensaios efectuados com materiais móveis diferentes da areia pois, por serem em pequeno número, há interesse em juntá-los com os da parte experimental do presente trabalho, com vista a tentar detectar a influência do peso específico do material móvel.

### 2 - ANÁLISE DIMENSIONAL

Desprezem-se, dentre as grandezas físicas susceptíveis de influenciar o transporte sólido litoral, os efeitos de:

a) viscosidade cinemática da água, como fez Eagleson [14] ao estudar as correntes longitudinais, o que equivale a considerar, que o escoamento

que se processa entre a linha de rebentação e a costa, apresenta características de turbulento rugoso. Admitindo que o escoamento é desse tipo, a espessura do filme laminar e, por seu intermédio, a viscosidade, deixam de ter influência no valor das forças exercidas sobre os grãos que revestem o fundo.

A viscosidade da água não tem sido considerada pelos diversos investigadores cujos ensaios se analisarão. Já na movimentação dos materiais ao largo da rebentação, onde a turbulência e as velocidades de deslocamento das partículas são menores, a sua consideração é indispensável para a interpretação dos resultados experimentais. A movimentação dos materiais de fundo nessa zona não tem, no entanto, uma contribuição significativa para o valor do caudal sólido litoral;

b) temperatura da água, por a sua influência se exercer através de modificações da viscosidade;

c) forma dos grãos e distribuição granulométrica, por parecerem ser grandezas pouco variáveis, em virtude da forma arredondada dos grãos e das distribuições próximas da normal que os materiais móveis apresentam, quer sejam os da natureza quer os artificiais utilizados em laboratório.

Postas estas hipóteses simplificativas, poderá escrever-se:

$$Q'_S = X(\rho, \rho_s, d, H_o, L_o, \alpha_o, g) \quad (36)$$

O peso  $Q'_S$ , avaliado sob a água, do material móvel transportado na unidade de tempo considerar-se-á, deste modo, função das grandezas seguintes:

-características do fluido: toma-se unicamente a massa específica  $\rho$ , visto ter-se desprezado a viscosidade;

-características do material móvel: considera-se a massa específica  $\rho_s$  e uma dimensão característica  $d$ , dos grãos;

-características cinemáticas da massa líquida em que o fenómeno se processa: consideram-se apenas  $H_o$ ,  $L_o$  e  $\alpha_o$ , que definem completamente as on

das em grandes profundidades, pois estas grandezas, juntamente com as que caracterizam o material móvel, condicionam o perfil transversal de equilíbrio da praia e, por sua vez, a refração e as características das ondas na rebentação e após esta;

d) a aceleração da gravidade,  $g$ .

Tomando como grandezas fundamentais  $H_0$ ,  $g$  e  $\rho_s$  e aplicando o teorema de Buckingham, encontra-se [15]:

$$\frac{Q'_S}{\rho_s^{3/2} H_0^{5/2}} = \phi \left( \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{d}{H_0}, \frac{L_0}{H_0}, \alpha_0 \right) \quad (37)$$

Torna-se vantajoso alterar o parâmetro do primeiro membro desta expressão transformando-o em  $Q'_S/P_1$ , cujo significado físico e interesse na interpretação dos dados experimentais foi evidenciado por Inman [30]. Para esse efeito, multiplique-se  $Q'_S/\rho_s^{3/2} H_0^{5/2}$  pelo factor adimensional  $(16 \sqrt{2\pi} \delta_0 / \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_0)$ , o que a análise dimensional permite em virtude de se não terem introduzido novos parâmetros, pois  $\alpha_b$  é segundo o esquema elaborado, função apenas de  $\alpha_0$  e  $\delta_0$ .

Resulta:

$$\frac{Q'_S}{\frac{\rho_s g^2}{32\pi} H_0^2 T \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_0}$$

ou seja  $Q'_S/P_1$  em que  $P_1$  é, como vimos no capítulo anterior, a componente segundo a linha de costa e por unidade de comprimento desta, da potência transmitida pela onda na rebentação.

Análise-se o significado físico este parâmetro. Pode escrever-se

$$Q'_S = p \cdot v_m$$

em que  $p$  é o peso aparente dos sedimentos que, em dado momento, se movem na unidade de comprimento da costa, e  $v_m$  a velocidade média do seu deslocamento longitudinal. Sendo a força tangencial de atrito proporcional ao peso aparente  $p$ ,  $Q'_S$  estará directamente relacionado com a potência

consumida no transporte de material móvel paralelamente à costa, por arrastamento.

O parâmetro  $Q'_s/P_1$  é, portanto, proporcional ao quociente das componentes segundo a linha de costa das potências consumida no transporte sólido e transmitida pela onda na rebentação.

Como a primeira destas é uma fracção da potência total disponível na rebentação,  $P_1$ , sendo a potência restante dissipada na manutenção da corrente longitudinal, valores elevados de  $Q'_s/P_1$  traduzirão um melhor aproveitamento da potência disponível no transporte dos sedimentos. A designação de rendimento de transporte justifica-se, deste modo, para este parâmetro.

Por ser (25):

$$P_1 = \frac{\rho g^2}{32 \pi} H_o^2 T \text{ sen } \alpha_b \cdot \text{cos } \alpha_o$$

teremos, no caso de se manterem invariáveis os parâmetros do segundo membro da equação (37), um valor de caudal sólido, em peso aparente, directamente proporcional ao quadrado da altura das ondas em grandes profundidades, ao período e ao produto  $\text{sen } \alpha_b \cdot \text{cos } \alpha_o$ . Este último é crescente com  $\delta_o = H_o/L_o$  e apresenta, como já se focou, para um mesmo valor  $\delta_o$ , uma variação em função de  $\alpha_o$ , com valores crescentes entre  $0$  e  $43^\circ$  e decrescentes de  $43$  a  $90^\circ$  (Fig. 12).

Convém, igualmente, modificar o parâmetro  $H_o/d$  multiplicando-o por  $\rho g / (\rho_s - \rho)g$ , do que resulta  $H_o/d (\gamma'_s / \gamma)$ , em que  $\gamma'_s$  é o peso específico aparente do material móvel e  $\gamma$  o peso específico da água.

Este parâmetro não foi ainda utilizado na análise de medições de caudal sólido litoral. É no entanto um parâmetro de interesse reconhecido nos estudos de perfis transversais de praias, nomeadamente como condicionante, juntamente com a declividade, do aparecimento dos sistemas barra-fossa, tal como considera Noda [13] ao tratar os dados experimentais, pró-

prios e de outros autores, (Fig. 22). Tem interesse notar que este parâmetro, posto sob a forma:

$$\frac{\gamma H_o}{\gamma_s d}$$

apresenta em denominador, a menos dum factor constante, a tensão tangencial de início de arrastamento dos grãos, num escoamento uniforme com características de turbulento rugoso.

Com as modificações introduzidas nos parâmetros iniciais e admitindo como hipótese que a influência da obliquidade das ondas fica suficientemente bem definida pelo factor  $\sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_o$ , que intervém no parâmetro de rendimento de transporte, a expressão (37) toma a forma:

$$\frac{Q'_s}{P_l} = f\left(\frac{H_o}{L_o}, \frac{H_o}{d(\gamma'_s/\gamma)}, \frac{\rho_s}{\rho}\right)$$

ou utilizando os símbolos  $R$ ,  $\delta_o$  e  $D'$  para designar, respectivamente, o rendimento de transporte  $Q'_s/P_l$ , a declividade em grandes profundidades  $H_o/L_o$  e o parâmetro  $H_o/d(\gamma'_s/\gamma)$ :

$$R = f\left(\delta_o, D', \frac{\rho_s}{\rho}\right) \quad (38)$$

### 3 - ANÁLISE DO CONJUNTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Veremos seguidamente, na análise dos resultados de diversos autores, em que medida o esquema de tratamento elaborado permite sintetizar os resultados dos seus estudos experimentais.

Para utilizar esses resultados, torna-se necessários uniformizá-los quanto a grandezas consideradas e respectivas dimensões.

Segundo o esquema elaborado, as grandezas que interessa ter em conta são:

- características da onda:

- período,  $T(s)$ ,



- altura da onda em grandes profundidades,  $H_0$  (m),
- ângulo formado pela onda em grandes profundidades, com a orientação da praia,  $\alpha_0$  ( $^\circ$ );
- características do material móvel:
  - diâmetro característico,  $d$  (m): utiliza-se indistintamente o diâmetro médio ou o diâmetro mediano por se admitir que as distribuições dos diâmetros dos grãos são próximas da normal;
  - peso específico aparente,  $\gamma'_s$  ( $\text{kg/m}^3$ ): é o peso aparente, da unidade de volume da substância de que é formado o material móvel e tem por valor

$$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma$$

- caudal sólido transportado, em peso aparente por unidade de tempo,  $Q'_s$  (kg/s).

A altura da onda e a sua obliquidade são geralmente, nestes estudos baseados em experiências de laboratório, medidas à saída do gerador pelo que se torna necessário calcular os valores correspondentes em grandes profundidades. Este cálculo foi efectuado pela teoria de onda de pequena amplitude, admitindo a existência de batimétricas paralelas entre a zona de medição e as grandes profundidades.

O caudal sólido é vulgarmente apresentado pelos autores em volume ou em peso de material móvel transportado na unidade de tempo,  $Q$  ou  $Q_s$ , respectivamente. A passagem para caudal sólido em peso aparente transportado na unidade de tempo,  $Q'_s$ , é efectuada pelas expressões seguintes:

$$Q'_s = Q_s \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma'_s}\right) \quad \text{que equivale a } Q'_s = Q_s \frac{\gamma'_s}{\gamma_s} \quad (39)$$

ou

$$Q'_s = Q (1 - N) \gamma'_s \quad (40)$$

sendo N a porosidade, que se tomou igual a 0,4, o que corresponde a uma areia não compactada e pouco calibrada.

No anexo I, nos quadros 1 a 8, que dizem respeito a ensaios em laboratório, encontram-se compiladas essas grandezas e os valores correspondentes de  $P_1$  e dos parâmetros  $R = Q'_S/P_1$ ,  $\delta_o = H_o/L_o$  e  $D = H_o/d(\gamma'_S/\gamma'_{sa})$ , em que  $\gamma'_S$  é o peso específico aparente do material móvel utilizado no ensaio e  $\gamma'_{sa}$  o valor correspondente da areia. Substituiu-se deste modo no parâmetro D, para facilitar a elaboração dos resultados dos ensaios,  $\gamma'_S/\gamma$  pelo seu valor relativamente à areia:

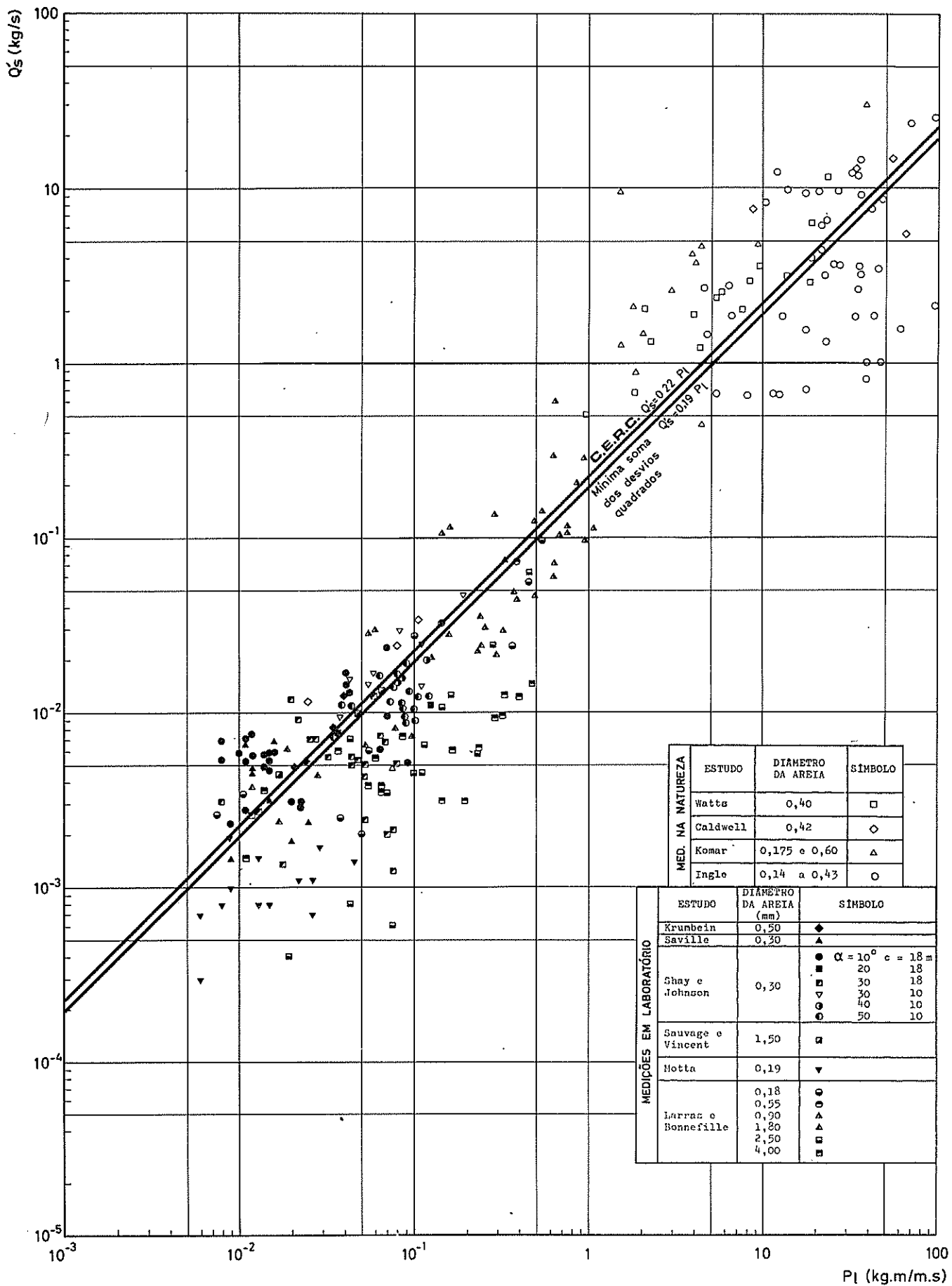
$$\frac{\gamma'_S/\gamma}{\gamma'_{sa}/\gamma} = \gamma'_S/\gamma'_{sa}$$

que toma um valor igual à unidade no caso mais frequente de o material móvel ser areia.

Nos quadros 9 a 12 encontram-se compilados os valores de  $P_1$ ,  $Q'_S$  e R para medições na natureza. Não havia elementos, neste caso, para definir  $\delta_o$  e D.

Ignorem-se, de momento, os parâmetros do segundo membro da expressão (38) o que equivale a considerar a sua influência como secundária, e represente-se  $Q'_S$  em função apenas de  $P_1$ . Dispondo em eixos de coordenadas de escala logarítmica os pontos dos diversos autores que figuram nos quadros 1 a 12, referentes a medições em laboratório e na natureza, obtem-se a mancha de pontos da fig. 23.

Nesta mesma figura encontra-se marcada a recta do Coastal Engineering Research Center (C.E.R.C.). A relação indicada por esta recta, que tem constituído até ao presente a forma mais corrente de previsão do transporte sólido litoral, será apresentada com maior pormenor no fim deste capítulo. Interessa, no entanto, mencioná-la desde já, pois equivale à constância do parâmetro de rendimento de transporte, R.



MED. NA NATUREZA	ESTUDO	DIÂMETRO DA AREIA	SÍMBOLO
	Watts	0,40	□
	Caldwell	0,42	◇
	Komar	0,175 e 0,60	△
	Ingle	0,14 a 0,43	○

MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO	ESTUDO	DIÂMETRO DA AREIA (mm)	SÍMBOLO
	Krunbein	0,50	◆
Saville	0,30	▲	
Shay e Johnson	0,30	● $\alpha = 10^\circ$ c = 18 m	
		■ 20 18	
		□ 30 18	
		▽ 30 10	
		○ 40 10	
Sauvage e Vincent	1,50	◻	
Hotta	0,19	▼	
Larras e Bonnefille		○ 0,18	
		○ 0,55	
		△ 0,90	
		△ 1,80	
		□ 2,50	
□ 4,00			

FIG. 23 -  $Q'_s$  em função de  $P_1$ . Resultados de medições na natureza e em laboratório

A sua expressão é, em unidades inglesas:

$$\frac{Q(\text{jardas cúbicas/dia})}{P_1 (\text{pés} \times \text{libra/dia} \times \text{pé de praia})} = 1,34 \times 10^{-4}$$

Em unidades do Sistema Métrico Gravitório e admitindo para a areia, na substituição de  $Q$  por  $Q'_S$ , um valor de porosidade de 0,4 e um peso específico aparente de  $1650 \text{ kg/m}^3$ , a expressão anterior toma a forma:

$$\frac{Q'_S (\text{kg/s})}{P_1 (\text{kg} \times \text{m/m} \times \text{s})} = 0,22 \quad (41)$$

Verifica-se na figura 23, que embora a recta do C.E.R.C., não seja a que origina a mínima soma dos quadrados dos desvios, apresenta uma razoável adaptação à distribuição geral dos pontos. É notável, no entanto, a dispersão dos resultados, com desvios máximos da ordem de 1 para 10 tanto nas medições de laboratório como nas realizadas em protótipo. Estes desvios que ocorrem no mais usado método de previsão, mostram os progressos que há ainda a esperar neste campo.

Analisa-se em seguida em que medida a variação da declividade pode, só por si, contribuir para explicar a dispersão mencionada. Para este efeito, marca-se em eixos com escalas logarítmicas  $Q'_S/P_1$  em função de  $\delta_0$  (Fig. 24), utilizando os resultados dos ensaios de laboratório, únicos em que se conhecia o valor da declividade.

Nota-se uma tendência para os valores de  $Q'_S/P_1$  decrescerem com o aumento da declividade, não sendo porém possível definir a lei de variação, devido à enorme dispersão dos pontos experimentais.

Tomou-se em conta, seguidamente, além dos parâmetros já considerados  $R$  e  $\delta_0$ , o parâmetro  $D = H_0/d (\gamma'_S / \gamma'_{sa})$ . Por ser a areia o único material móvel utilizado, eliminou-se o parâmetro restante  $\rho_s/\rho$ , em virtude de ter um valor constante no conjunto dos ensaios.

Nas figuras 25 e 25-A representa-se  $R$  em função de  $\delta_0$  para diversas gamas de  $D$ . Verifica-se com a introdução deste novo parâmetro  $D$ , o apare-

cimento de uma certa ordem na distribuição dos valores de R. Esse ordenamento apenas se esboça, dada a falta de resultados experimentais em número suficiente e também, possivelmente, pelo facto de permanecer ainda uma dispersão elevada.

As indicações obtidas da análise da figura 25-A são mais de índole qualitativa do que quantitativa, permitindo apesar disso concluir que:

- para uma mesma declividade o rendimento de transporte R cresce inicialmente com D, atingindo o seu máximo para valores de D compreendidos entre 25 e 115, para decrescer depois e tender para um valor aproximadamente constante e diferente de zero. O valor de D a que corresponde um rendimento de transporte nulo estará, de acordo com a figura, compreendido entre zero e quinze. (Ver-se-á, na apresentação da parte experimental do estudo presente que num ensaio em que  $\delta_0 = 0,02$  e  $D = 12$  o rendimento de transporte era nulo, isto é, não chegava a haver deslocamento do material móvel ao longo da praia.)

- o valor máximo do rendimento varia com a declividade atingindo o seu valor mais elevado, aproximadamente 0,6, para declividades da ordem de 1,5% e na gama de D de 65 a 114.

- para cada gama de D existe um máximo de rendimento de transporte R, cuja localização depende do valor de D. Assim, situa-se em  $\delta_0 \approx 0,01$  para  $25 \leq D \leq 64$ , em  $\delta_0 \approx 0,015$  para  $65 \leq D \leq 114$ , deslocando-se progressivamente para valores mais elevados de  $\delta_0$  à medida que D aumenta.

Consideremos de novo o conjunto de resultados de experiências de laboratório e determine-se para cada um deles, a partir  $\delta_0$  e D, o valor de  $Q'_S/P_1$  indicado pelas curvas da figura 25-A. Multiplique-se este valor por  $P_1$ , obtendo-se assim uma previsão do caudal sólido  $Q'_S$  baseada nesta análise do conjunto dos resultados experimentais.

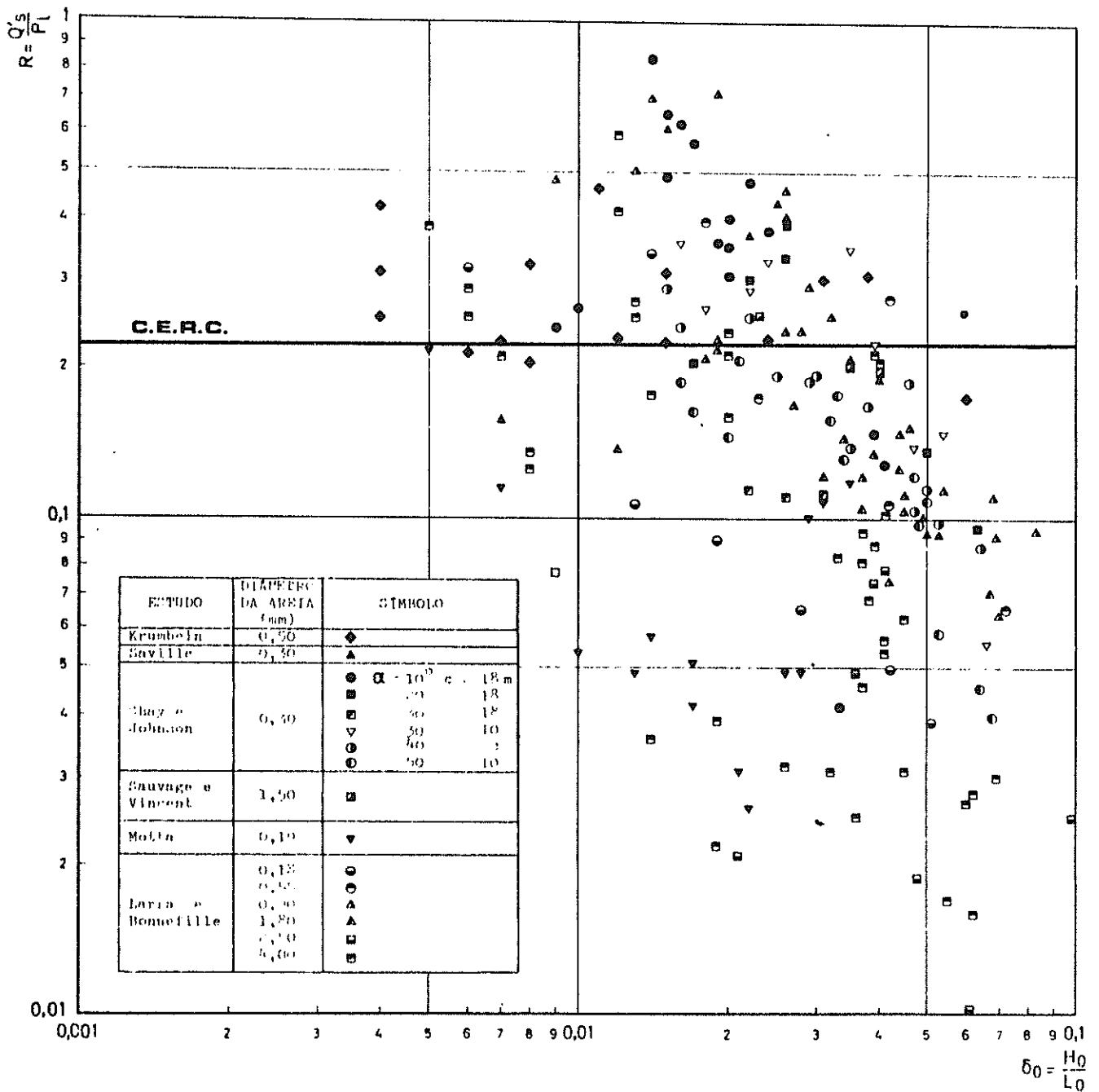
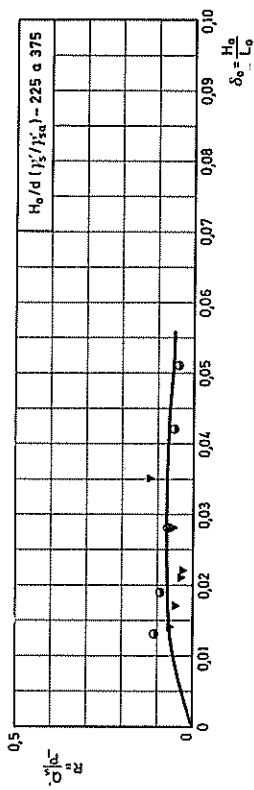
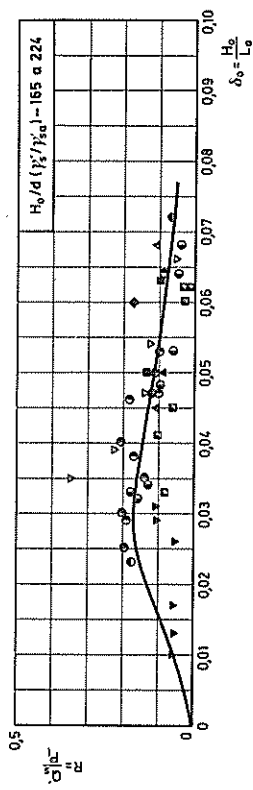
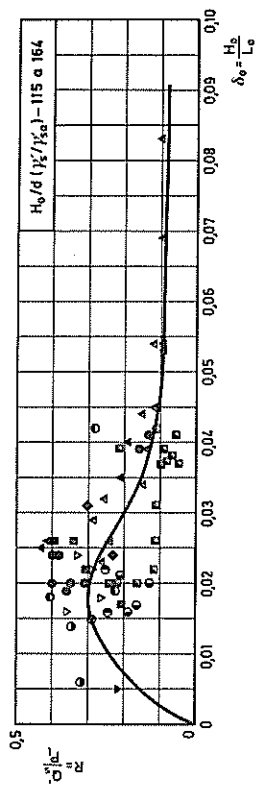
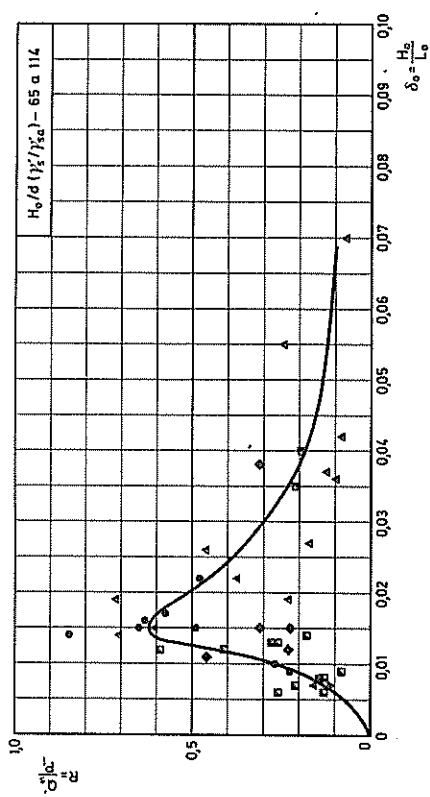
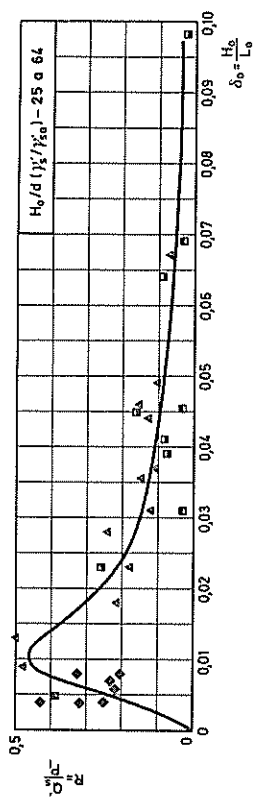
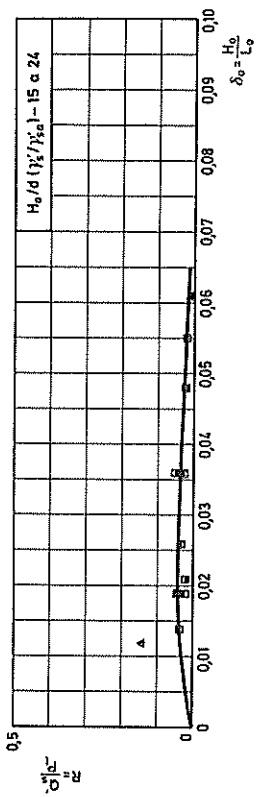


FIG. 24 -  $Q'_s/P_1$  em função de  $\delta_0$ . Resultados de ensaios em laboratório, com areia.



ESTUDO	DIÂMETRO DA AREIA (mm)	SINHOLO
Kruehlein Saville	0,30 0,50 0,70	▲
Shay e Johnson	0,30	● □ ▽ △
Sauvage e Vincent	1,50	■
Motta	0,19	▼
Larraz e Benneville	0,18 0,55 0,90 1,60 4,50 4,00	○ ● ▲ △ ■ □

$\alpha = 10^\circ$   $c = 18 =$

20    30    18  
 30    30    10  
 40    40    10  
 50    50    10

FIG. 25 - R =  $Q'_S/P_1$  em função de  $\delta_0 = H_0/L_0$ , para diversas gamas de  $D = H_0/d (\gamma'_S / \gamma'_{sa})$ .

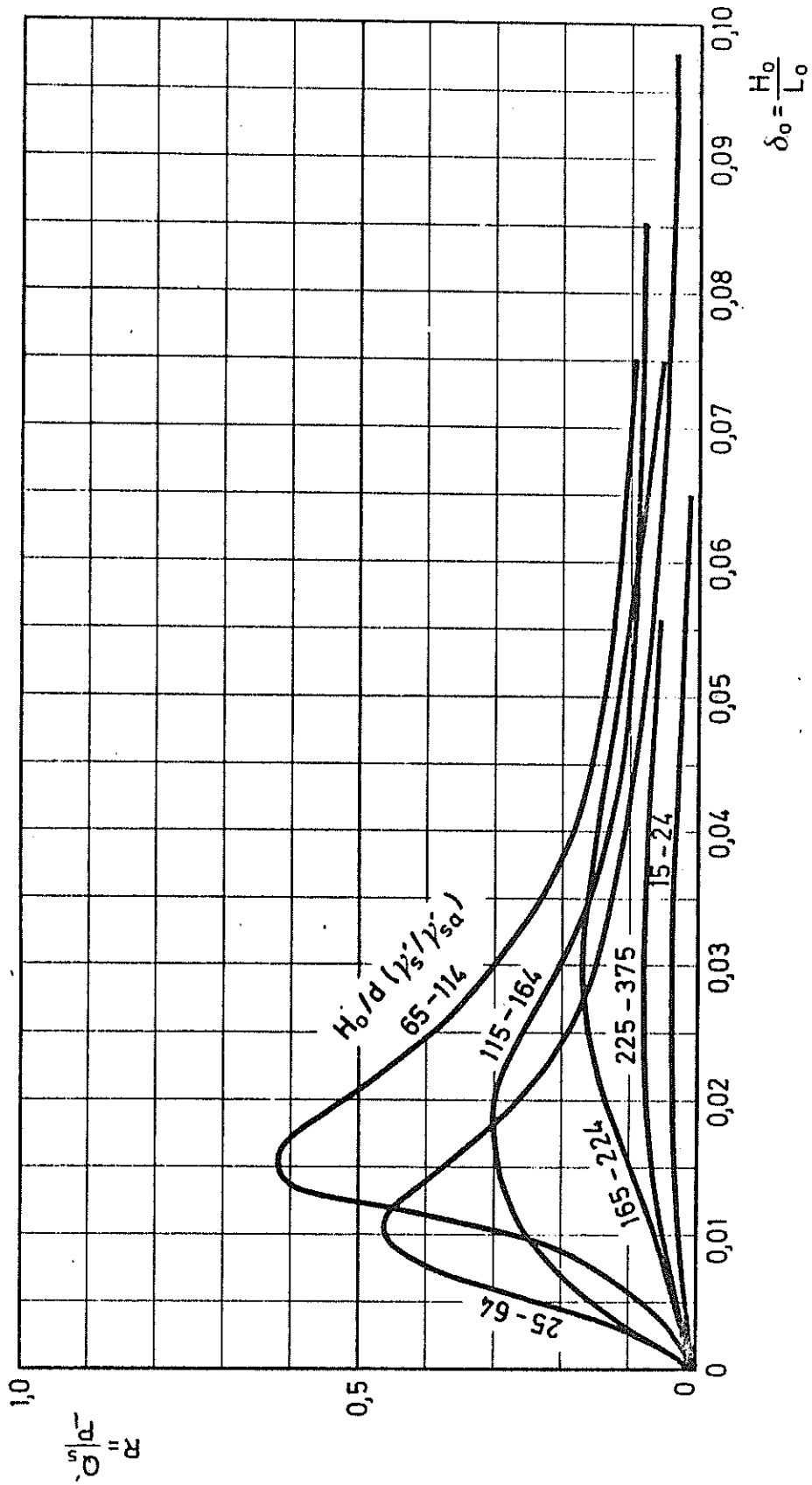


FIG. 25-A -  $R = Q'_s / P_1$  em função de  $\delta_0 = H_0 / L_0$ , para diversas gamas de  $D = H_0 / d (\gamma'_s / \gamma'_{sa})$

Curvas resultantes.



Comparando agora cada valor previsto com o valor medido no respectivo ensaio (Fig. 26), pode avaliar-se a diminuição da dispersão, que esta previsão apresenta, relativamente à efectuada pela recta do C.E.R.C. (fig.23).

#### 4 - ANÁLISE INDIVIDUAL DOS ESTUDOS DE LABORATÓRIO RELACIONADOS COM A PREVISÃO DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL

##### 4.1 - Estudo experimental de Krumbein, [16], [17], [18].

As características das ondas, da praia e da areia ensaiada, encontram-se inscritas no quadro 1 do anexo I. A alimentação era ajustada por tentativas até que a praia se mantivesse com direcção constante e igual à inicial, sendo o valor correspondente a esta última situação tomado para definição do caudal sólido.

Krumbein concluiu que o parâmetro  $QT/L_o^2 H_o$  crescia linearmente com  $H_o/L_o$ , isto é:

$$\frac{Q T}{L_o^2 H_o} = K_1 \frac{H_o}{L_o}$$

sendo  $Q$  o caudal sólido em volume. Esta igualdade pode escrever-se sob a forma  $(QT/L_o^2 H_o^2) = K_1$  ou, por ser  $Q'_s = K_2 Q$ ,

$$\frac{Q'_s}{L_o H_o^2 / T} = K_3$$

em que  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são constantes.

$L_o H_o^2 / T$  é, a menos do factor  $\gamma/16$ , igual à potência transmitida em grandes profundidades e por unidade de comprimento de crista da onda, como se vê consultando a expressão (22). A relação encontrada por Krumbein exprime deste modo a proporcionalidade entre o caudal sólido e a potência transmitida por unidade de comprimento de crista. Não se afasta fundamentalmente do esquema elaborado, embora ignore a influência da declividade e do parâmetro  $D$ , tal como acontece com a fórmula do C.E.R.C.. Difere desta por considerar a potência transmitida,

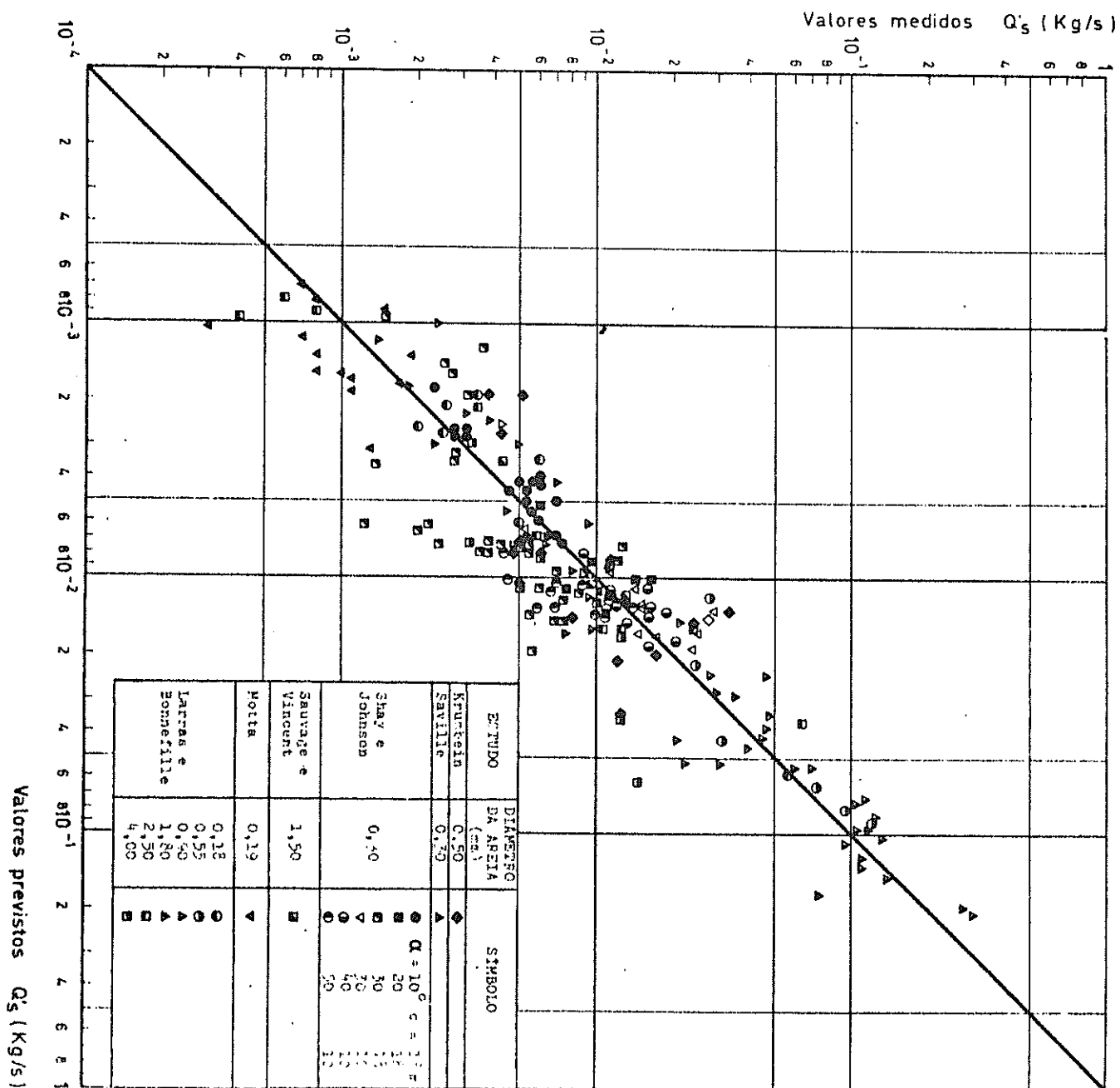


FIG. 26 - Comparação dos valores experimentais de  $Q'_S$  com os previstos pelas curvas da figura 25 - A

$$P_t = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{H_o^2 L_o}{T} \quad (42)$$

em vez da componente segundo a linha de costa

$$P_l = P_t \cdot \text{sen } \alpha_b \cdot \text{cos } \alpha_o$$

Esta diferença não tem grande significado porque no conjunto dos ensaios de Krumbein, as variações de  $\text{sen } \alpha_b \cdot \text{cos } \alpha_o$  são cerca de sete vezes inferiores às de  $P_t$  como se pode ver no quadro do anexo I. Verifica-se, realmente, que é razoável o alinhamento dos pontos experimentais com as curvas da figura 25-A e com a recta do C.E.R.C. (fig. 23), embora em ambos os casos o parâmetro considerado tenha sido  $Q'_s/P_l$  e não  $Q'_s/P_t$ .

#### 4.2 - Estudo experimental de Shay e Johnson, [17], [18], [19] .

Estes ensaios foram efectuados com areia de 0,3 mm de diâmetro médio, variando as ondas em altura, período e ângulo de incidência, dentro de uma gama de valores que ia de 10 a 50° à saída do gerador. A amplitude das ondas era medida por hidrómetro, pela diferença entre os níveis da crista e da cava, sendo os ângulos na rebentação determinados a partir de fotografias.

As características e resultados dos ensaios encontram-se inscritos no quadro 3 do anexo I, assim como os valores dos parâmetros R,  $\delta_o$  e D.

Shay e Johnson analisaram a variação do parâmetro  $Q_s/T^5$  com  $H_o/T^2$ . Consideraram  $Q_s/T^5$  como correspondendo a um parâmetro adimensional, visto poder ser tomado como o resultado da simplificação de

$$\frac{Q_s/\gamma_{s,cr}}{L_o^3/T}$$

atendendo a que  $L_o^3 = \left(\frac{g}{2\pi}\right)^3 T^6$  e eliminando  $\gamma_s$ , em virtude de todos os ensaios terem sido efectuados com areia.

O parâmetro  $Q_s/T^5$  não é essencialmente diferente de  $Q'_s/P_l$ , pois divi

dindo  $Q_s/T^5$  pelo quadrado da declividade, vem:

$$\frac{Q_s}{T^5} \times \frac{L_o^2}{H_o^2} = \frac{Q_s C_1 T^4}{T^5 H_o^2} = C_1 \cdot \frac{Q_s}{H_o^2 T} = C_2 \cdot \frac{Q'_s}{P_t}$$

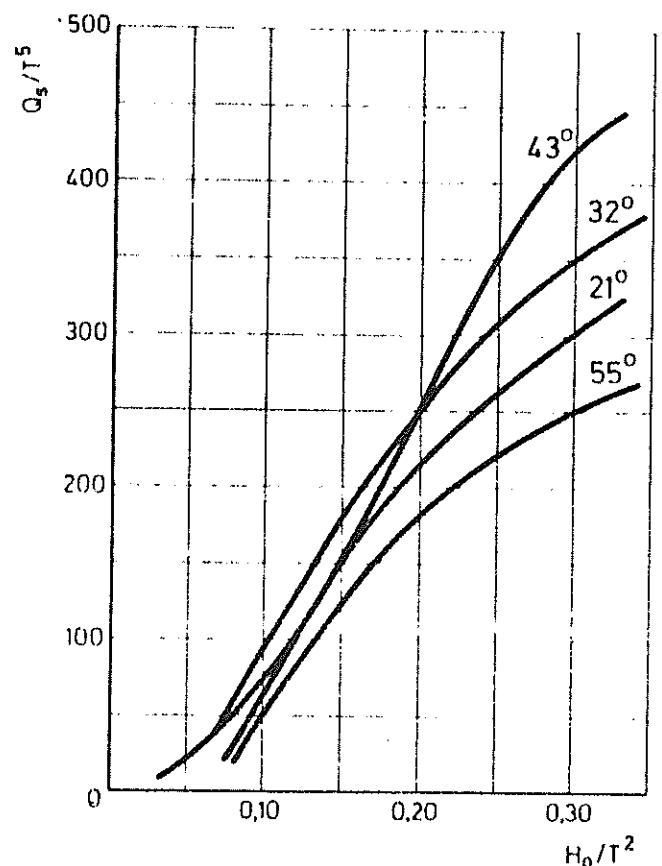
em que  $C_1$  e  $C_2$  são constantes.

Deste modo, para valores iguais do ângulo de incidência, os dois parâmetros  $Q_s/T^5$  e  $Q'_s/P_t$  diferem apenas por um factor proporcional ao quadrado da declividade.

Shay e Johnson agrupando os ensaios por gamas de ângulos de incidência obtêm as curvas da figura 27. O parâmetro  $Q/T^5$  cresce com a declividade e é apontado um ângulo de ataque de  $43^\circ$  como correspondendo ao máximo transporte. No entanto, como se vê na figura citada, para declividades inferiores a  $0,04$  ( $\frac{H_o}{T^2} < 0,20 \text{ ft/s}^2$ ) já o máximo ocorreria para ângulos da ordem dos  $30^\circ$ .

FIG. 27 - Curvas de Shay e Johnson, agrupando os resultados experimentais do seu estudo.

( $Q_s$  em libras por hora;  
 $H_o$  em pés.)



Na figura 28 confirmam-se as considerações anteriores, pois verifi-

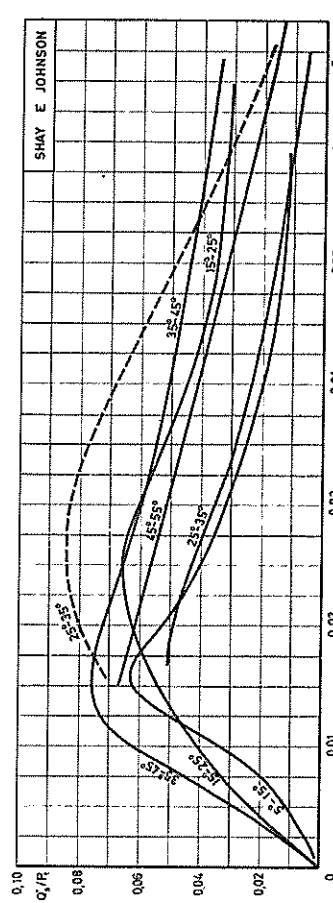
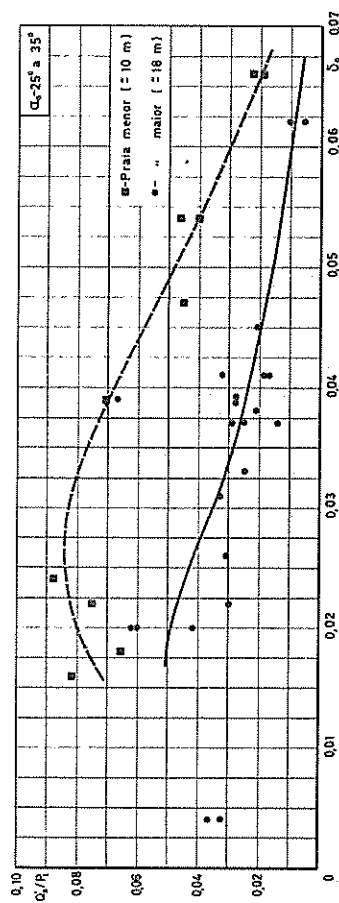
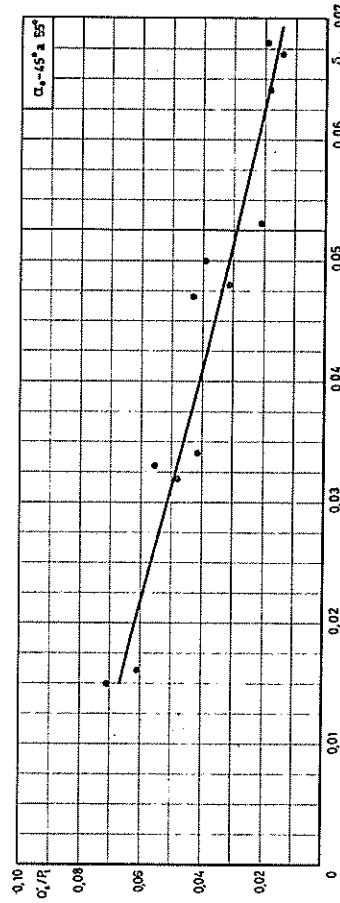
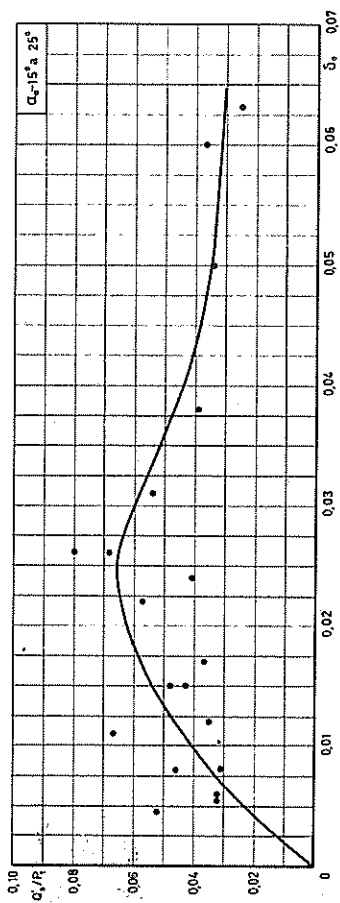
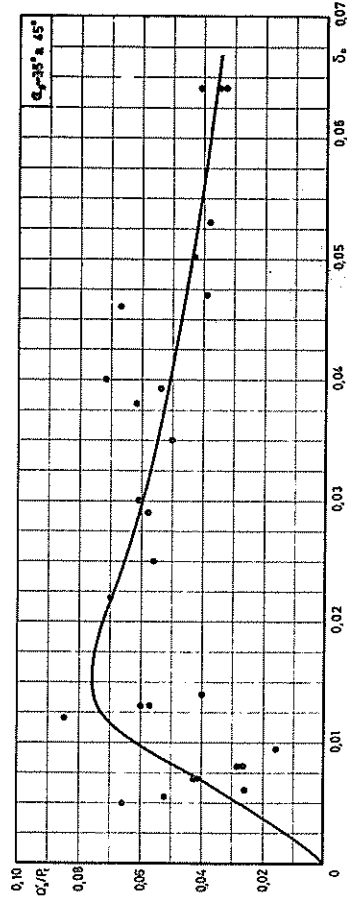
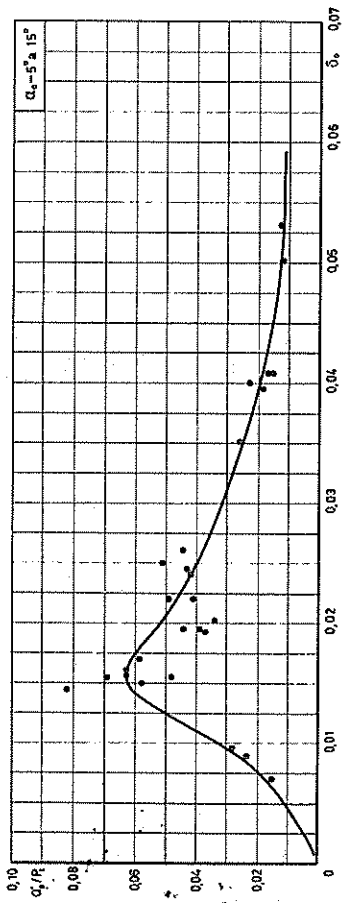


FIG. 28 - Ensaios de Shay e Johnson.  $Q'_S/P_t$  em função de  $\delta_0$  e  $\alpha_0$ .

ca-se que o alinhamento dos resultados experimentais continua a ser mantido no sistema de eixos ( $Q'_s/P_t; H_o/L_o$ ).

No último elemento da figura estão reunidas as curvas correspondentes aos diversos ângulos de incidência ensaiados. Traçaram-se duas curvas distintas para os ensaios com valores  $\alpha_o$  compreendidos entre 25 e 35°. Essas curvas correspondem a instalações de ensaio e a praias com comprimentos diferentes (18 e 10 m) e evidenciam a grande influência que factores aparentemente secundários podem introduzir nos resultados.

Embora as conclusões venham dificultadas pela existência das duas curvas citadas é possível detectar, na zona de declividades superiores a 0,02, a existência de um crescimento de  $Q'_s/P_t$  com  $\alpha_o$  até valores de 30 a 40° e um decrescimento posterior.

Uma elaboração deste tipo já tinha, aliás, sido efectuada por Johnson [19] em 1953, utilizando parte dos resultados destes ensaios. Aquele autor apresentou então curvas  $Q_s/\gamma H_o^2 T$ , ou seja  $Q_s/\frac{32\pi}{g} P_t$ , em função de  $\delta_o$ , constituindo famílias para diversos valores de  $H_o/L_o$  (fig. 29). Encontra-se para todas as declividades um máximo de  $Q_s/\gamma H_o^2 T$  para  $\alpha_o = 30^\circ$ .

Da figura 28 parece poder deduzir-se que é desprezável a influência do parâmetro  $D = H_o/d(\gamma'_s/\gamma'_{sa})$  pois é conseguido um alinhamento razoável dos resultados apesar desse parâmetro não ter sido considerado.

Na realidade, a sua influência existe, mas encontra-se encoberta, devido ao modo regular como se relacionam nestes ensaios as alturas de onda, e consequentemente o parâmetro D, com as declividades (fig. 30). Sòmente nas declividades inferiores a 0,02 essa influência se faz ainda sentir provocando um aumento da dispersão. De facto, correspondem a essas declividades, pela relação evidenciada na fig. 30, alturas de onda inferiores a 4 cm e consequentemente valores de D compreendidos entre 120 e 0, gama em que a influência de D é máxima, como vimos anteriormente.

Torna-se conveniente explicar a razão de ser da correlação existente

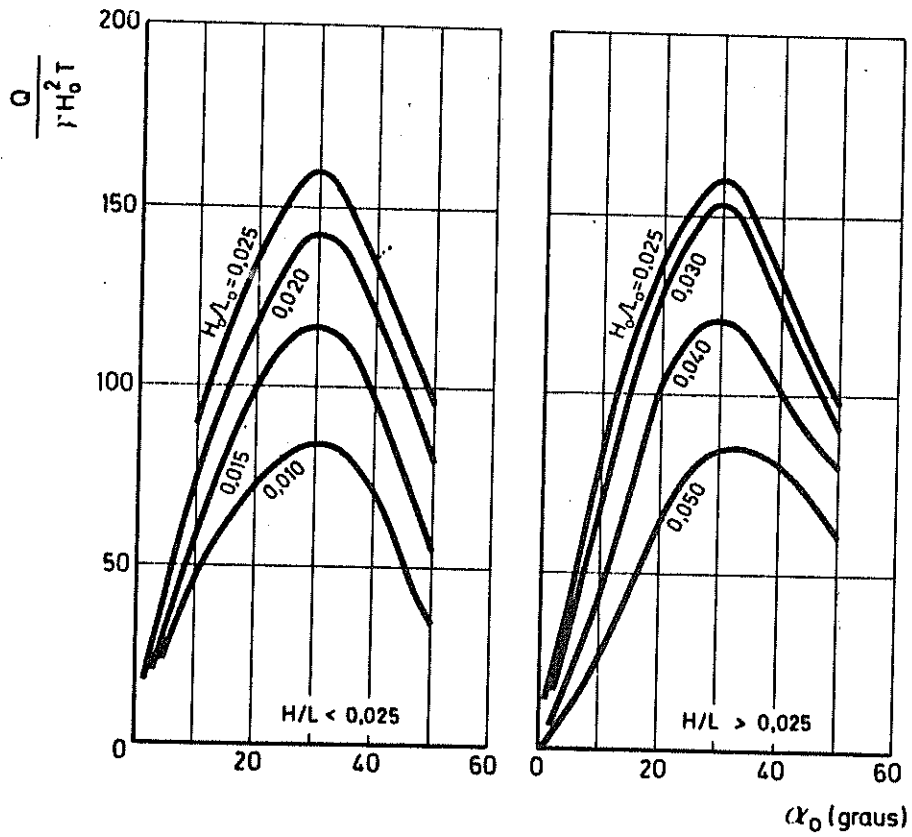
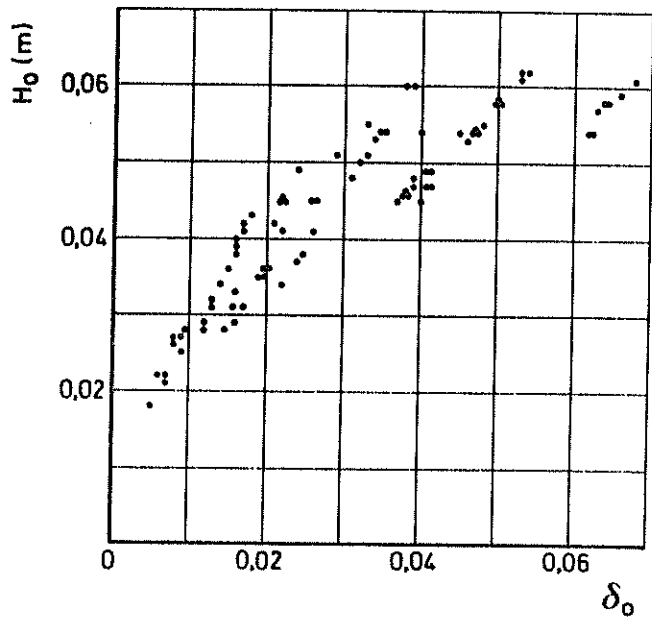


FIG. 29 - Caudal sólido litoral em função das características das ondas, segundo Johnson.

FIG. 30 - Relação entre as alturas e as declividades das ondas nos ensaios de Shay e Johnson.



entre  $H_o$  e  $\alpha_o$ , correlação que, em princípio, deveria ser nula. Para o fazer considere-se a potência transmitida pela onda. A sua expressão é:

$$P_t = C_1 \frac{H_o^2 L_o}{T}$$

ou atendendo a que  $L_o = (g/2\pi)T^2$  vem:

$$P_t = C_2 \sqrt{\frac{H_o^5}{\delta_o}}$$

em que  $C_1$  e  $C_2$  são constantes.

Como existe um limite máximo de  $P_t$  para as ondas que um gerador pode produzir, as grandes alturas virão naturalmente associadas às maiores declividades. Quanto à associação das pequenas declividades às pequenas alturas, dever-se-á a não serem os geradores construídos de forma a permitir produzir ondas de comprimentos muito pequenos.

Os resultados dos ensaios de Shay e Johnson situam-se sobre a recta do C.E.R.C., mas atingem dispersões apreciáveis (Fig. 23). Os pontos que se afastam mais por excesso e por defeito, apresentam valores 3 vezes superiores e 10 vezes inferiores aos indicados pela recta.

A fig. 26 permite avaliar em que medida a consideração dos 3 parâmetros  $R$ ,  $\delta_o$  e  $D$  contribui para diminuir a dispersão.

#### 4.3 - Estudo experimental de Sauvage e Vincent, [20].

Foram efectuadas duas séries de ensaios. A primeira com uma obliquidade de  $15^\circ$  à saída do gerador e em que foram utilizados três tipos diferentes de material móvel: pedra-pomes, areia e poliestireno. A segunda, em que foi usada unicamente pedra-pomes, e era estudada a influência do ângulo de ataque, que era feito variar entre  $5^\circ$  e  $70^\circ$ .

Os resultados destes ensaios são apresentados no quadro 4 do anexo I.

Na primeira série de ensaios, a maior parte foi efectuado com pedra-pomes, tendo sido focadas as influências da amplitude da onda e do período. Os autores encontraram uma variação do caudal sólido com  $H_o^2 L_o$ . Con-



cluíram ainda, que com energia da onda constante, o caudal sólido aumenta com a diminuição da declividade.

Na figura 23 pode apreciar-se a posição dos 3 pontos correspondentes aos ensaios com areia, relativamente à recta do C.E.R.C.. A análise dos restantes ensaios, com materiais móveis diferentes da areia, será efectuada mais à frente, quando se abordar a influência do peso específico.

A segunda série de ensaios, destinada a estudar a influência do ângulo de ataque, mostrou a existência dum máximo para a obliquidade, à saída do gerador, de  $53^\circ$  (fig. 31).

Interessa analisar este resultado, no sentido de verificar em que medida ele contraria a hipótese de poder ser a influência do ângulo de incidência das ondas expressa satisfatoriamente através do factor  $\sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_o$  que figura na componente da potência,  $P_1$ .

Um dos problemas que surge ao analisar os resultados destes autores é a dificuldade em caracterizar os ângulos de incidência pois, por não se encontrarem especificados, levantam-se dúvidas sobre o ponto onde eram medidos, se na rebentação se à profundidade de 0,15 m. Os autores ao referirem os ângulos considerados designam-nos umas vezes por ângulos com a linha de costa das ondas ao rebentar e outras por obliquidade das ondas junto da costa.

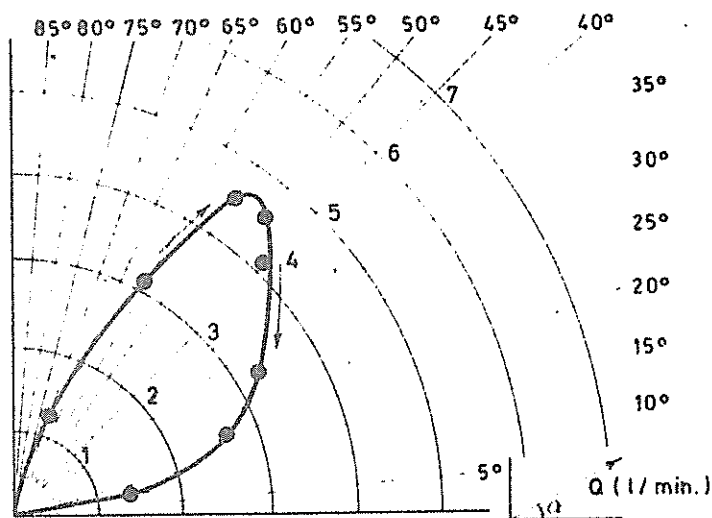


FIG.31 - Influência da obliquidade das cristas junto da costa sobre o caudal sólido litoral, segundo Sauvage e Vincent [20].

Optou-se, na análise dos ensaios, por esta última versão pelas duas razões que se consideram a seguir:

- a primeira é a afirmação que é feita por Sauvage e Vincent, ao referirem os resultados dos ensaios com variação do ângulo de ataque, e que se transcreve a seguir:

"O facto de os autores citados terem indicado para valor da obliquidade a que corresponde um máximo de caudal sólido litoral um valor ligeiramente diferente daquele que é encontrado nos nossos ensaios é facilmente explicável: a diferença provém, provavelmente, da direcção fixada para as cristas das ondas, geralmente variável do largo para a costa em virtude da refacção, se o fundo não é horizontal, o que não era o caso dos nossos ensaios".

Parece portanto que a direcção é fixada por Sauvage e Vincent sobre o fundo horizontal, à profundidade de 0,15 m;

- a segunda razão é a ocorrência de ângulos com valores que atingem os 70°. Verifica-se pela aplicação da lei de Snell, com valores de celeridade calculados pela teoria das ondas de pequena amplitude, que para o período utilizado nos ensaios de variação de ângulo de ataque, uma onda com obliquidade de 90° à profundidade de 15cm apresentaria a 5 cm de profundidade um ângulo com a linha de água já inferior a 40°. Parece ser assim impossível tratar-se de ângulos na rebentação.

Quanto às alturas apresentadas, são alturas ao largo. Sauvage e Vincent estabelecem a relação com as alturas correspondentes junto da costa,  $H_o$  por:

$$\frac{H_o^2}{H^2} = \text{th} \frac{2\pi d}{L} \left( 1 + \frac{4\pi d/L}{\text{Sh} 4\pi d/L} \right)$$

o que equivale a considerar, em primeira ordem, a influência da diminuição de profundidade sem tomar em conta o efeito da divergência das ortogonais, devida à refacção das ondas.

Este último efeito, pouco acentuado nos ensaios em que é estudada a influência da altura e comprimento da onda, em virtude do pequeno ângulo de incidência utilizado, torna-se muito importante nos ensaios da segunda série, em que é estudada a influência do ângulo, devido às acentuadas obliquidades atingidas.

Tendo em conta esta interpretação das condições de ensaio no que respeita ao ângulo de incidência interessava verificar, para esta série de ensaios, se o parâmetro  $Q/P_1$  se mantinha aproximadamente constante como fazia prever o facto de os demais parâmetros,  $\delta_0$ ,  $D$  e  $\rho_s/\rho$  serem constantes ou apresentarem apenas variações diminutas.

Para esse efeito tornava-se necessário calcular as características das ondas ao largo, o que se efectuou para os valores apresentados por Sauvage e Vincent. Apenas foi possível elaborar o cálculo para os dados de ensaio em que  $\alpha$  era inferior a  $47^\circ$ , pois a valores superiores a este correspondiam ângulos em grandes profundidades, maiores que  $90^\circ$ .

No quadro 8 do anexo I encontram-se inscritos os resultados desses cálculos e na figura 32 apresenta-se o valor dos parâmetros  $Q'_s/P_1$  e  $Q'_s/P_t$  em função de  $\alpha_0$ .

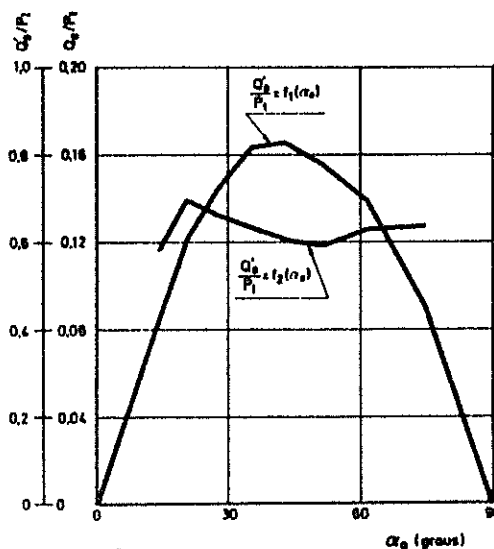


FIG. 32 -  $Q'_s/P_t$  e  $Q'_s/P_1$  em função de  $\alpha_0$ . Valores obtidos dos ensaios de Sauvage e Vincent em que era feito variar o ângulo de ataque.

Como se vê nesta figura, o segundo dos parâmetros indicados atinge um valor máximo quando o ângulo ao largo está compreendido entre 40 e 50° o que está de acordo com a hipótese, enunciada no início deste capítulo, sobre a influência da obliquidade das ondas.

#### 4.4 - Estudo experimental de Larras e Bonnefille, [21], [22].

Nestes ensaios, são feitos variar o período e a altura da onda, sendo mantida constante a obliquidade à saída do gerador. Foi utilizada areia como material móvel, com diâmetros médios diferentes, cobrindo uma gama de 0,18 a 4,0 mm.

Os resultados dos ensaios mostraram ser o caudal sólido função de  $H^3/T$ , da declividade e do diâmetro médio do material móvel, segundo a expressão:

$$Q = K(\delta, d) \frac{H^3}{T} f(\alpha)$$

em que

- H e  $\alpha$  são a altura da onda e a sua obliquidade à saída do gerador<sup>(1)</sup>
- f( $\alpha$ ) é uma função da obliquidade da onda sobre a qual os autores se não debruçaram nestes ensaios, que são todos efectuados com  $\alpha = 20^\circ$ ;
- K( $\delta$ , d) é uma função definida pelas curvas da figura 33. Estas curvas foram traçadas a partir dos resultados experimentais deste estudo.

O caudal sólido aparece crescente com  $H^3/T$  e decrescente com a declividade, dentro da gama ensaiada de 0,01 a 0,07, e apresenta um máximo para o diâmetro 0,8 mm. Nota-se como habitualmente uma grande dispersão nos resultados experimentais, [21].

A variação do caudal sólido com  $H^3/T$  parece estar em contradição, como

---

(1) - A leitura das publicações [21] e [22] deixa dúvidas sobre o significado de H e  $\alpha$ . Elementos sobre os ensaios, cedidos pelo L.N.H. (Chatou) e informações de R. Bonnefille, permitiram caracterizar H e  $\alpha$  como sendo valores à saída do gerador.

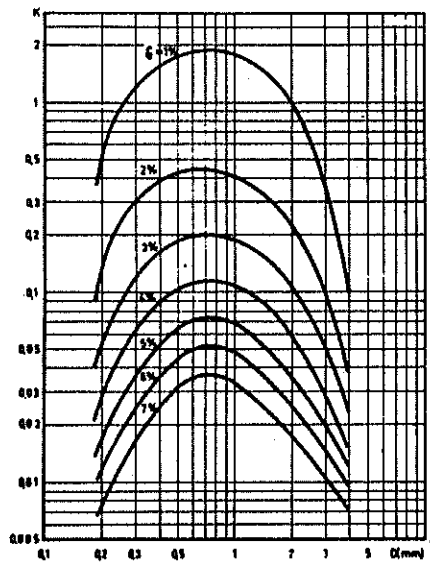


FIG. 33 - Variação de K com  $\delta$  e d, segundo Bonnefille e Pernecker [22].

foi apontado pelos autores em [21], com a proporcionalidade relativamente à potência transmitida pela onda. Esta contradição é apenas aparente, como se torna evidente multiplicando o parâmetro  $QT/H^3$ , utilizado pelos autores, por  $\delta_o$ . Vem:

$$\frac{QT}{H^3} \cdot \frac{H_o}{(g/2\pi)T^2}$$

Atendendo a que são diminutas as diferenças entre H e  $H_o$ , por  $\alpha$  ser pequena e substituindo o caudal sólido em volume pelo caudal sólido em peso aparente, de acordo com a expressão (40), vem:

$$\frac{QT}{H^3} \cdot \delta_o \approx \frac{Q'_S}{H_o^2 T} \cdot \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{1}{(1-N) \gamma_S}$$

que mostra ser  $\delta_o \cdot QT/H_o^3$  proporcional a  $Q'_S / ((g/2\pi)H_o^2 T)$  ou seja a  $Q'_S / P_t$ .

Pela razão já apontada, quando da análise dos resultados de Krumbein, pode igualmente admitir-se que se mantém a proporcionalidade relativamente a  $Q'_S / P_t$ , pois aqui as variações de  $P_t$  relativamente a  $\sin \alpha_b \cos \alpha_o$  são mais acentuadas.

Na realidade, como se mostra na figura 34, o parâmetro  $Q'_S / P_t$  permite alinhar os pontos experimentais em função de  $\alpha_o$ , com dispersões não superiores à que os autores apresentam em [21].

A localização da mancha dos pontos correspondentes aos ensaios de Larras e Bonnefille, se exceptuarmos os que foram efectuados com as duas areias de maior diâmetro, 4,0 e 2,5 mm, verifica-se sobre a recta do C. E.R.C. (Fig. 23). É também razoável o alinhamento dos pontos com as curvas da figura 25.

Verifica-se assim que os ensaios destes autores são concordantes com os anteriores, dentro da grande dispersão existente, na medida em que apresentam caudais sólidos dependentes, em primeiro lugar, da potência transmitida pela onda.

As curvas da figura 33 traduzem a influência da declividade e do diâmetro sobre  $K = QT/H^3$ , parâmetro assimilável, como vimos, a  $Q'_S/P_1$ . A influência da declividade difere daquela a que se chegou ao analisar o conjunto dos dados experimentais. Não apresenta decrescimento de R para as pequenas declividades, facto que se pode explicar pelo pequeno número de pontos experimentais correspondendo a declividades inferiores a 2%, gama em que, como se verificou anteriormente, a não consideração do parâmetro D introduz maiores dispersões.

Mais discordante é a influência do diâmetro com a existência de um máximo para  $d = 0,8$  mm. A figura que sintetiza o conjunto dos resultados experimentais de laboratório (fig. 25-A), mostra que para cada declividade, o máximo de rendimento de transporte dependerá de  $H_0/d(\gamma'_S/\gamma'_{sa})$ . Deste modo parece não haver um diâmetro fixo a corresponder ao máximo de rendimento de transporte como concluem Larras e Bonnefille. A figura 35 permite explicar tal conclusão. Esta figura mostra que aos diversos diâmetros utilizados por estes autores correspondem diferentes gamas do parâmetro D, e que o diâmetro 0,9 mm coincide com a zona de valores de D compreendida entre 40 e 160, que é exactamente aquela em que ocorrem os maiores rendimentos de transporte.

Um melhor esclarecimento deste ponto será tentado na parte experimental deste trabalho, por meio da realização de ensaios em que se mantêm constantes o diâmetro do material e a declividade e se faz variar o parâmetro D.

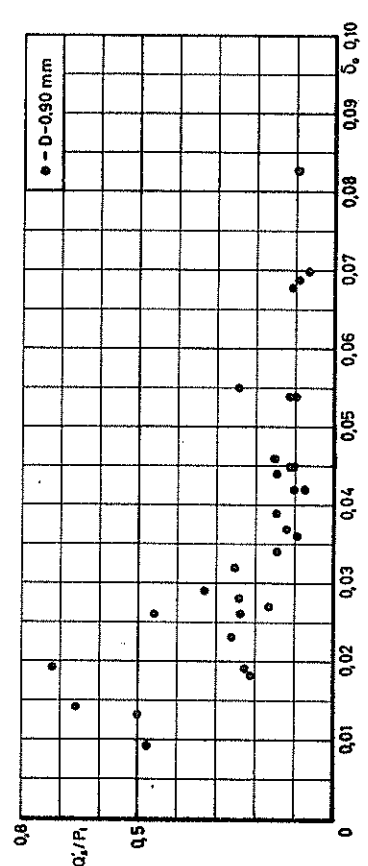
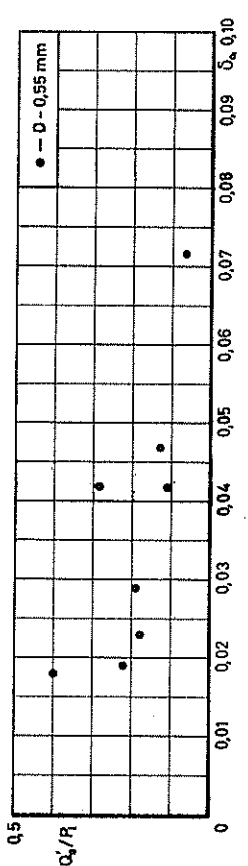
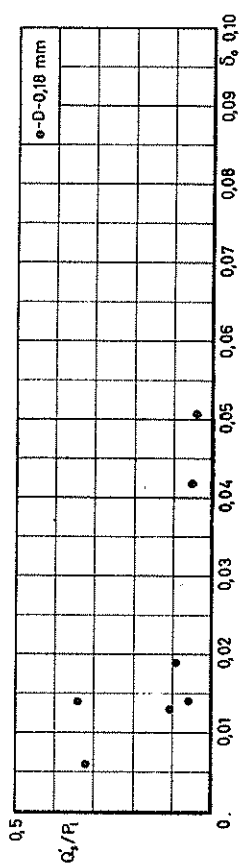
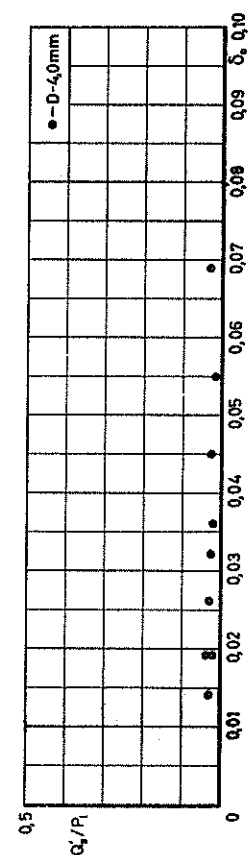
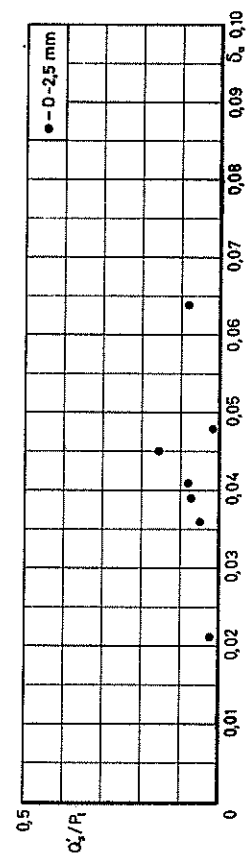
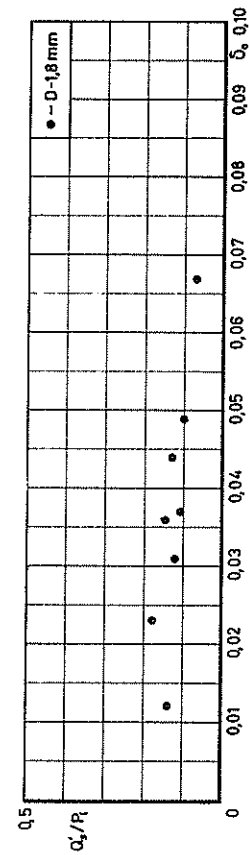
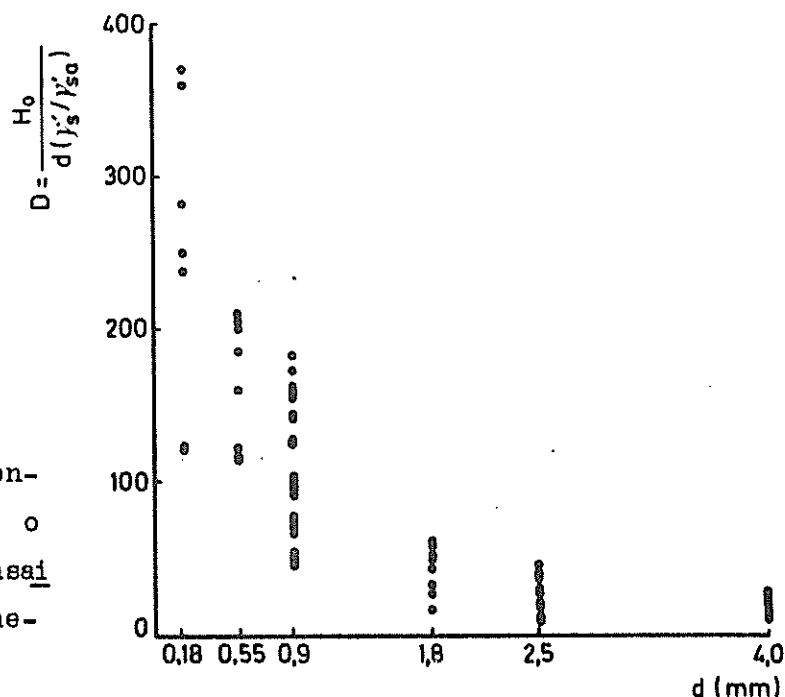


FIG. 34 -  $\frac{Q'_s}{P_1}$  em função de  $\delta_0$ , e d. Ensaios de Larras e Bonnefille.

FIG. 35 - Relação existente entre os diâmetros e o parâmetro D, nos ensaios de Larras e Bonnefille.



#### 4.5 - Ensaio de Lepetit

Estes ensaios realizados de 1970 a 1972 fazem parte dum estudo ainda não publicado. As suas características e resultados obtidos, cedidos directamente pelo Laboratoire National d'Hydraulique (L.N.H.), encontram-se inscritos no quadro 7 do anexo I.

Por se tratar de ensaios com baquelite, a sua análise será feita conjuntamente com a dos restantes ensaios em que foram utilizados materiais móveis diferentes da areia.

#### 5 - ESTUDOS EFECTUADOS EM PRAIAS NATURAIS

O primeiro destes estudos foi o de WATTS [23] apresentado em 1953, que se baseava em medições realizadas em South Lake, na Flórida, e em que foi utilizado o sistema de transposição artificial de areia por bombagem, existente numa embocadura lagunar.

A areia bombada acumulava-se numa bacia de recolha, a sotamar da embocadura, onde era periodicamente medida, sendo deste modo definido o cau-



dal sólido em dado período de tempo. Esse período era de 0,3 dias a um mês, conforme os casos, o que levou a uma separação dos dados em diários ou mensais, quando se baseavam em períodos de 0,3 a 4 dias ou de 9 a 30 dias, respectivamente.

O diâmetro mediano da areia na zona de transporte era de 0,4 mm.

As características das ondas eram medidas, no que se refere a amplitude e período, por um ondógrafo de pressão, sendo a obliquidade avaliada por acerto visual, com as características das ondas, de uma barra montada sobre uma escala angular. Watts define a componente segundo a direcção da costa da potência transmitida, utilizando a altura e o período significativo das ondas.

Os resultados das suas medições encontram-se inscritos, após passagem para unidades métricas, no quadro 9 do anexo I e indicam a existência de proporcionalidade entre  $Q'_s$  e  $P_1$ , como se pode observar na figura 23.

O segundo estudo relativo a dados da natureza foi apresentado por CALDWELL em 1956 e é referido com pormenor por Savage [24] e Das [18]. Foi calculada, a partir de levantamentos hidrográficos realizados nos anos de 1948 e 1949, a variação do volume de areia previamente acumulada por bombagem junto do dique sul duma embocadura existente na costa da Califórnia, junto de Anaheim Bay. Durante o mesmo período foram efectuados registos das características das ondas, tendo sido algumas lacunas preenchidas por recurso a dados meteorológicos. A partir destes elementos foram calculadas as componentes da potência segundo a direcção da costa.

O diâmetro médio da areia era de 0,42 mm.

Os valores  $Q'_s$  e  $P_1$  encontram-se inscritos no quadro 10 do anexo I e na figura 23.

Do mesmo modo que os dois últimos autores citados, também Komar [25] procurou relacionar o caudal sólido litoral com o fluxo de energia da onda. A

medição dos caudais sólidos era efectuada, em períodos curtos, com o auxílio de areias marcadas com luminóforos. Eram determinados simultâneamente, por meio dum conjunto de sondas colocadas entre a linha de rebentação e a costa, os espectros de energia e de direcção, necessários para o cálculo da componente longitudinal do fluxo de energia.

A raiz quadrada da média dos quadrados das alturas de onda, obtidas a partir da distribuição da densidade de energia, era tomada como altura da onda. O período era reduzido do espectro de frequências e o ângulo a partir da desfasagem de registos simultâneos.

As medições de Komar foram efectuadas em duas praias diferentes:

- El Moreno Beach, situada no México, no golfo da Califórnia, em que as areias apresentavam 0,60 mm de diâmetro médio e

- Silver Strand Beach, na Califórnia, onde esse diâmetro era 0,18mm.

Os resultados obtidos mostram haver proporcionalidade entre o fluxo de energia na rebentação e o transporte sólido litoral (Fig. 23 e quadro 11 do anexo I).

Não se torna aparente nestes resultados qualquer influência do diâmetro, na gama 0,18 - 0,60 mm, o que levou o autor a considerar o transporte por arrastamento como predominante, em virtude de no transporte em suspensão a velocidade de queda, e consequentemente o diâmetro, ser uma grandeza não desprezável e forçosamente interveniente no fenómeno.

O autor explica o facto de os seus resultados serem cerca de uma vez e meia inferiores aos das anteriores medições na natureza, por terem nestes casos os fluxos de energia sido calculados com base em alturas significativas enquanto que ele usou a raiz quadrada da média dos quadrados das alturas do espectro, valor que é  $\sqrt{2}$  vezes inferior à altura significativa.

O estudo mais recente foi o que Ingle[11] realizou em cinco praias da costa da Califórnia. Os caudais sólidos eram medidos utilizando areias mar

cadras com traçadores fluorescentes, sendo o diâmetro médio das areias determinado em cada medição.

No quadro 12 do anexo I encontram-se os valores de caudal sólido e fluxo de energia que correspondem a estas medições. A figura 23 permite ver a sua concordância com a previsão da recta do C.E.R.C., embora com dispersões muito elevadas.

## 6 - FÓRMULAS DE PREVISÃO DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL

A mais antiga é a FÓRMULA DE MUNCH-PETERSEN [26] datando a sua apresentação de 1914. Embora já não seja aplicada actualmente, tem interesse a sua referência pois parece ter sido através dela que é estabelecida pela primeira vez a relação entre o caudal sólido e a potência das ondas, quando até então o fenómeno do transporte litoral era atribuído à acção das correntes oceânicas.

A Fórmula do C.E.R.C. foi estabelecida em 1959 por Savage com base nos ensaios laboratoriais e medições de campo existentes até à data. Foi apresentada sob a forma:

$$\frac{Q(\text{jardas cúbicas/dia})}{E_a(\text{milhões de libras} \times \text{pé/dia} \times \text{pé de praia})} = 1,34 \times 10^{-2} \quad (42)$$

em que  $E_a$ , componente segundo a linha de costa da potência transmitida pela onda na rebentação, era calculada pela expressão:

$$E_a = \frac{W_o}{L} (\text{n.º de ondas por dia}) K_r^2 \cdot \text{sen } \alpha_b \cos \alpha_b \quad (43)$$

sendo  $W_o$ , como se referiu (22), a energia total da onda em grandes profundidades e  $K_r$  o coeficiente de refacção entre o largo e a rebentação.

Substituindo na expressão anterior o número de ondas por dia e o coeficiente de refacção pelos seus valores, que são respectivamente:

$$\frac{86\ 400}{T(s)} \quad e \quad \sqrt{\frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha_b}}$$

tem-se:

$$E_a = 86\ 400 \frac{W_o}{2T} \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_o$$

ou introduzindo o valor de  $P_1$ , tal como é apresentado em (24):

$$E_a = 86\ 400 P_1$$

Substituindo  $Q$  por  $Q'_s$  e utilizando unidades do sistema métrico vem:

$$\frac{Q'_s}{P_1} = 0,22 \quad (44)$$

A fórmula do C.E.R.C. considera constante, como se vê, o rendimento de transporte, abstraindo de qualquer influência da declividade e do diâmetro da areia.

Apesar de simplista, é talvez a expressão mais utilizada, apresentando, relativamente às restantes a vantagem de se apoiar em maior número de medições na natureza.

As previsões efectuadas por esta fórmula, a avaliar pela figura 23, apresentam desvios máximos da mesma ordem de grandeza, quer o fenómeno se processe no laboratório quer na natureza, quando seria de esperar uma dispersão muito mais elevada neste último caso, dada a maior incerteza na medição dos valores  $Q'_s$  e  $P_1$ .

Uma explicação para este facto poderá provir duma menor influência dos parâmetros adimensionais  $\delta_o$  e  $D$ , nas medições efectuadas até ao presente na natureza.

A variação de  $\delta_o$  era certamente muito menor nas medições na natureza enquanto que os valores de  $D$  se situavam, dadas as características das ondas e o pequeno diâmetro das areias, numa gama elevada em que a sua influência parece ser diminuta.

Seria interessante conhecer medições de caudal sólido e rendimento de

transporte na natureza, para o caso de o material móvel ser constituído por seixos ou outros elementos com dimensões elevadas. De acordo com o que acontece em modelo, deverá verificar-se logo que os valores de D se tornem inferiores a 150, um apreciável aumento da dispersão, relativamente à recta do C.E.R.C.

A FÓRMULA DE BONNEFILLE E PERNECKER [22] que se baseia nos dados experimentais que se apresentaram ao analisar o estudo de Larras e Bonnefille, apresenta a forma:

$$Q = K \left( \frac{\delta}{2,75}, d \right) \frac{H^3}{T} \cdot \frac{f(\alpha)}{f(20^\circ)} \quad (45)$$

em que:

Q é o caudal em metros cúbicos por dia

d o diâmetro da areia;

$\delta$ , H e  $\alpha$  parecem ser os valores da declividade, altura e obliquidade das ondas em grandes profundidades.

$f(\alpha)$  é uma função de  $\alpha$ , do tipo  $\sin 2\alpha$  ou  $\sin \frac{7\alpha}{4}$ , traduzindo a influência do ângulo de ataque.

Como já se mostrou ao discutir os resultados de Larras e Bonnefille esta expressão continua a traduzir uma interdependência entre o caudal sólido e a componente  $P_1$  da potência da onda. Igualmente se focaram as influências da declividade e do diâmetro, traduzidas pelo coeficiente K, apresentado na figura 33.

Por último, apresenta-se a FÓRMULA DE CASTANHO [27], que se apoia numa abordagem teórica do fenómeno do transporte litoral e cuja expressão é:

$$Q' = \frac{E_b \cdot \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b}{T} \cdot \frac{b}{\gamma_s'' \cdot \text{tg} \theta} \quad (46)$$

em que:

- $Q'$  é o caudal sólido em unidades de massa por segundo;
- $E_b$  é a energia transmitida na rebentação, por unidade de comprimento de crista;
- $\gamma_s''$  é o peso aparente da unidade de massa do material móvel:

- s é um coeficiente adimensional dependente da rugosidade do fundo e da inclinação e obliquidade da onda na rebentação;
- $\theta$  é o ângulo de talude natural do material submerso.

Sendo  $E_b \cdot \text{sen} \alpha_b \cdot \text{cos} \alpha_b / T$ , como o autor indica, a componente segundo a linha de costa e por unidade de comprimento desta, da potência  $P_1$  transmitida pela onda na rebentação, pode escrever-se a expressão anterior sob a forma:

$$\frac{Q'_s}{P_1} = C^{te} \frac{s}{\text{tg} \theta} \quad (47)$$

O valor de s obtem-se a partir de  $s' = s / \text{sen} \alpha_b$  cuja variação com  $m \delta_b / K \text{tg} \alpha_b$  é apresentada graficamente pelo autor em [27]. A letra m representa a inclinação do fundo entre a linha de rebentação e a costa e K o coeficiente de rugosidade do fundo nessa zona. A análise deste gráfico permitiu ao autor deduzir uma variação do rendimento de transporte com a declividade, do tipo das que aparecem na figura 25. No que respeita à obliquidade, concluiu que os valores do coeficiente s são nulos para  $\alpha_b = 0^\circ$  e  $90^\circ$ , existindo um máximo entre estes dois valores. A localização deste máximo dependeria do valor do parâmetro  $m \delta_b / K$ , caindo entre  $50$  e  $60^\circ$ , para a gama de valores mais frequentes desse parâmetro.



## 1 - INTRODUÇÃO

Visou-se com a parte experimental deste trabalho, o estudo da influência, no valor do caudal sólido litoral, das seguintes grandezas:

- altura da onda;
- período;
- peso específico do material móvel;
- diâmetro.

A perspectiva que serviu de base ao estudo experimental variou apreciavelmente no seu decurso. Deste modo, ao focar os dois primeiros objectivos que se citaram, eram efectuados ensaios em que se fazia variar apenas a grandeza cuja influência se pretendia estudar. Somente nas séries de ensaios em que se procurou detectar as influências do peso específico e do diâmetro do material móvel se actuou segundo o esquema baseado na análise dimensional, que se elaborou no capítulo anterior, e se estudaram parâmetros adimensionais em vez de grandezas isoladas.

As características dos ensaios realizados no decurso da parte experimental deste trabalho, os resultados a que se chegou e os parâmetros  $R$ ,  $\delta_0$  e  $D$  que lhes correspondem, encontram-se inscritos nos quadros 1 a 3 do anexo II.

As séries de ensaios em que se abordavam as influências da altura e do período da onda são o resultado de um primeiro nível de apreensão do fenómeno e destinavam-se a esclarecer um aspecto em que as opiniões de diversos autores se apresentavam contraditórias. São exemplos dessas opiniões divergentes os dois pontos de vista de proporcionalidade do caudal sólido relativamente a  $H^2T$  ou a  $H^3/T$ . Verificou-se posteriormente, o que ficou patente no capítulo anterior, ser essa contradição apenas aparente e resultar de diferentes combinações dos parâmetros  $Q/H^2T$  e  $Q/(H^3/T)$  com a



declividade da onda.

O objectivo inicial destas duas primeiras séries de ensaios ficou deste modo ultrapassada, mantendo-se no entanto a sua utilidade, pois tendo sido realizados com pedra-pomes puderam ser aproveitados no estudo da influência do peso específico, campo em que existe uma grande carência de ensaios com materiais móveis diferentes da areia.

Em virtude de haver uma relação estreita entre o transporte litoral e as correntes longitudinais mediram-se também estas e as grandezas com elas relacionadas, tais como a largura ( $l_b$ ), o declive ( $m$ ) e a rugosidade ( $K$ ) da zona compreendida entre a linha de rebentação e a linha de costa, sendo esta última grandeza ( $K$ ) traduzida pelo diâmetro característico do material móvel,  $d_{90}$ .

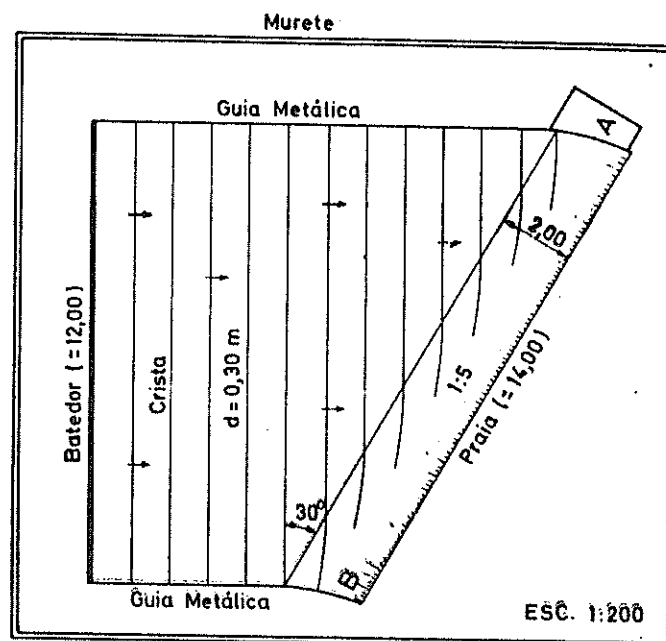
A colheita destes elementos foi baseada no estudo prévio do fenómeno, a partir da bibliografia, cuja síntese se apresenta no anexo III.

## 2 - DESCRIÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE ENSAIO E RESPECTIVO EQUIPAMENTO

Foram utilizadas duas instalações experimentais diferentes, tendo os sete primeiros ensaios sido realizados numa instalação provisória e os restantes, cerca de três dezenas, numa instalação definitiva.

A instalação provisória de ensaio era constituída por um tanque de fundo horizontal provido de um gerador de ondas com um único batedor de 12 m de comprimento (Fig. 36). As duas ortogonais passando pelos extremos do batedor eram materializadas por duas guias metálicas que limitavam lateralmente as ondas na sua propagação até à praia. O cálculo destas ortogonais sobre a praia, zona em que encurvavam por efeito da refacção devida à diminuição gradual de profundidade, foi efectuado pela teoria da onda de pequena amplitude para a onda de período igual a 0,8s, comum a todos os ensaios realizados nesta instalação com excepção do último dessa série (ensaio P7).

FIG. 36 - Esquema da instalação provisória de ensaios.



A-CAIXA DE RECOLHA DO MATERIAL MÓVEL TRANSPORTADO

B-ZONA DE ALIMENTAÇÃO DA PRAIA

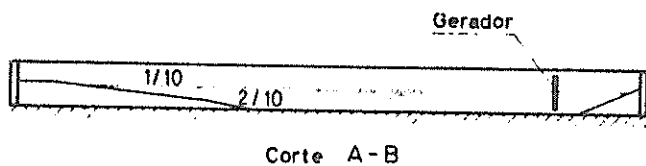
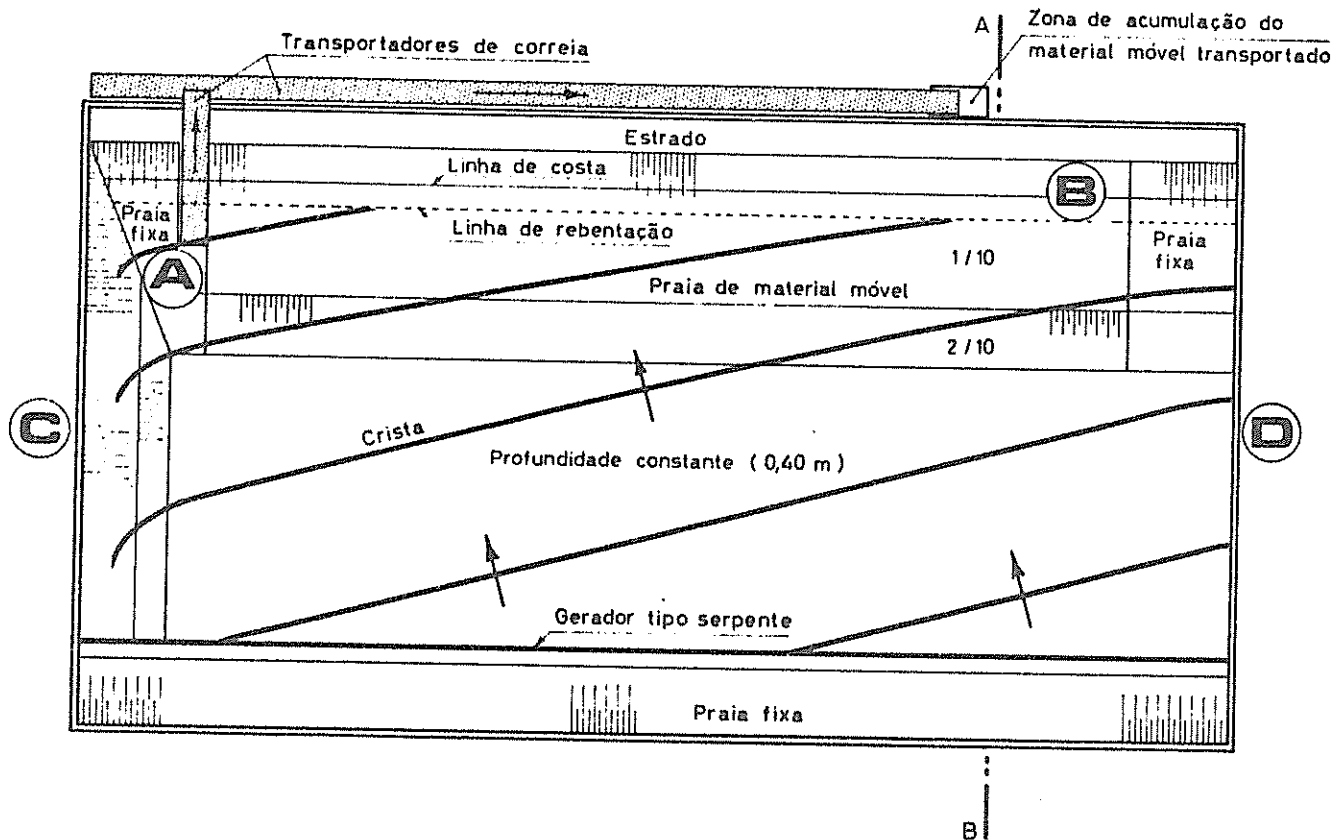
Devido ao ângulo de cerca de  $30^{\circ}$ , existente entre o gerador e a orientada praia, o comprimento desta era superior ao do batedor, atingindo cerca de 14 m.

O talude da praia com que se iniciavam os ensaios era uniforme em toda a sua superfície e de inclinação igual a 1:5. Apesar de ser um valor bastante elevado, e susceptível portanto de perturbar a refração, os ângulos na rebentação medidos nos ensaios efectuados neste tanque (P1 a P7), não diferiam sensivelmente dos calculados pela teoria da onda solitária (ver Quadro 2 do anexo II).

A alimentação da praia e a recolha do material móvel eram manuais, sendo a aparelhagem de medida a mesma que se usou nas instalações definitivas e que se referirá quando se descreverem os métodos de medição usados.

O gerador apresentava possibilidade de regulação do período e altura da onda.

As instalações definitivas de ensaio (Figs. 37 a 39) eram constituí



- (A)** - Zona de recolha do material móvel transportado
- (B)** - Zona de alimentação

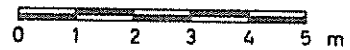


FIG. 37 - Esquema da instalação definitiva de ensaios.

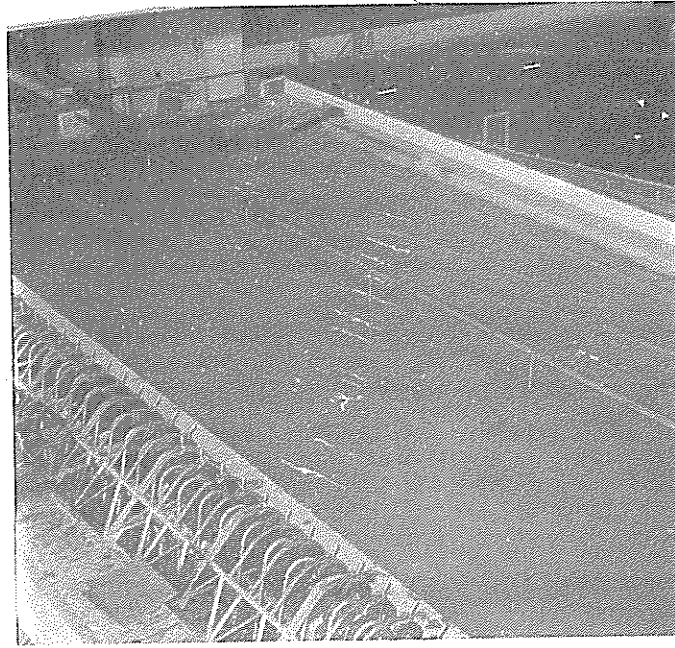


FIG. 38 - Aspecto geral das instalações definitivas de ensaio.

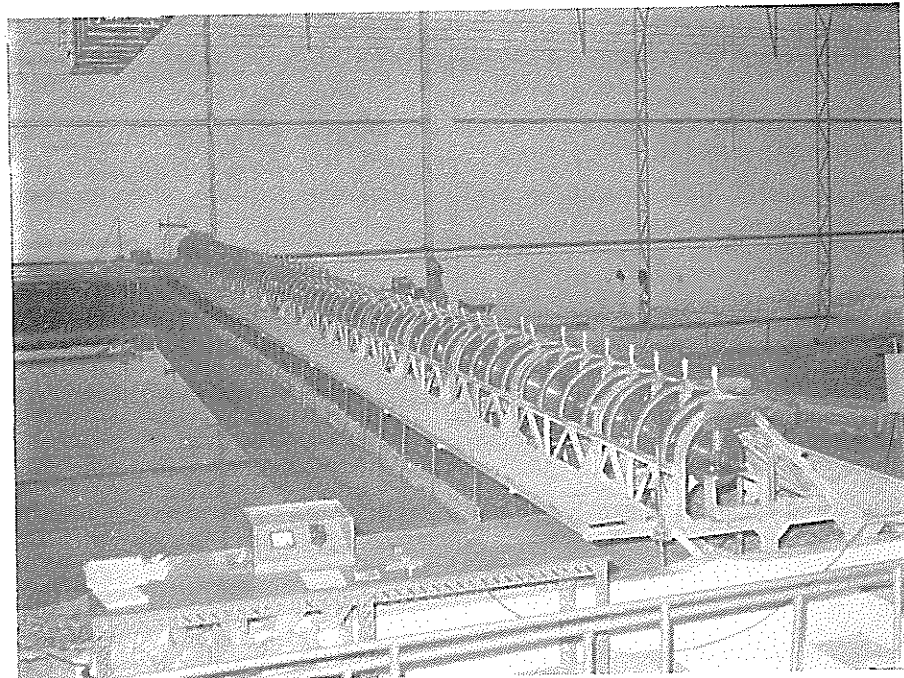


FIG. 39 - Gerador de ondas tipo "serpente" provido de filtros de fibra vegetal.

das por um tanque rectangular de fundo horizontal, com  $20 \times 9$  m de dimensões úteis, sendo um dos seus lados maiores ocupado por um gerador de ondas do tipo "serpente" com 66 batedores de 30 cm de largura. Este gerador apresentava possibilidade de produzir ondas monocromáticas com diferentes períodos, alturas e obliquidades. A regulação do período era efectuada pela alteração do número de rotações de um variador acoplado ao motor de accionamento. A altura da onda comandava-se pela excentricidade da articulação, a um disco móvel, do eixo que acciona o batedor e o ângulo à saída do gerador era obtido pela desfasagem de pás sucessivas.

A face C do tanque foi revestida com uma praia fixa, de declive muito suave na zona de níveis próximos do nível de repouso, destinada a dissipar por rebentação quer a onda difractada que se forma nessa zona, quer as ondas reflectidas pela praia (Fig. 37). Para evitar que estas últimas fossem reenviadas para a praia móvel, após reflexão nos batedores do gerador, protegeram-se estes colocando na sua frente um filtro constituído por uma fiada de placas porosas de fibra vegetal.

Não se usaram guias a limitar lateralmente a expansão das ondas, por se ter verificado, nos ensaios efectuados na instalação provisória, que a guia do lado da recolha do material móvel originava perturbações acentuadas ao provocar uma segunda reflexão das ondas provenientes da praia.

A instalação era provida dum sistema de recolha de material móvel constituído por um transportador de correia parcialmente submerso que recebia em (A) o material móvel transportado pelas ondas e o lançava sobre um segundo transportador, de maior comprimento, que o fazia acumular no outro extremo da praia em ensaio junto da zona (B) de alimentação (Fig. 40 e 41).

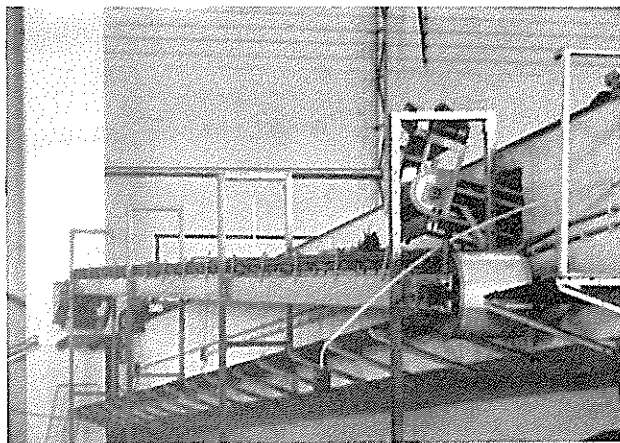
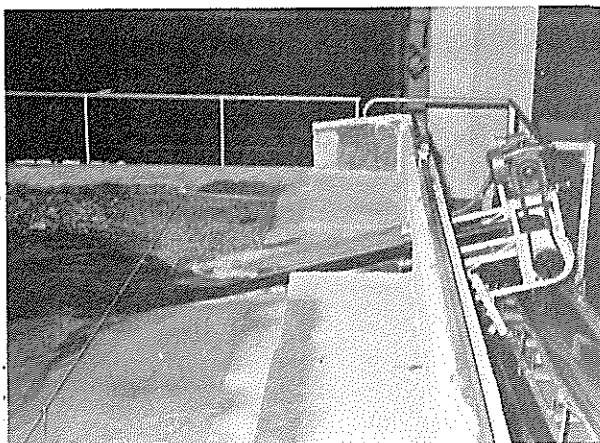


FIG. 40 - Transportadores utilizados na recolha dos materiais móveis e seu transporte até à zona B, de lançamento.

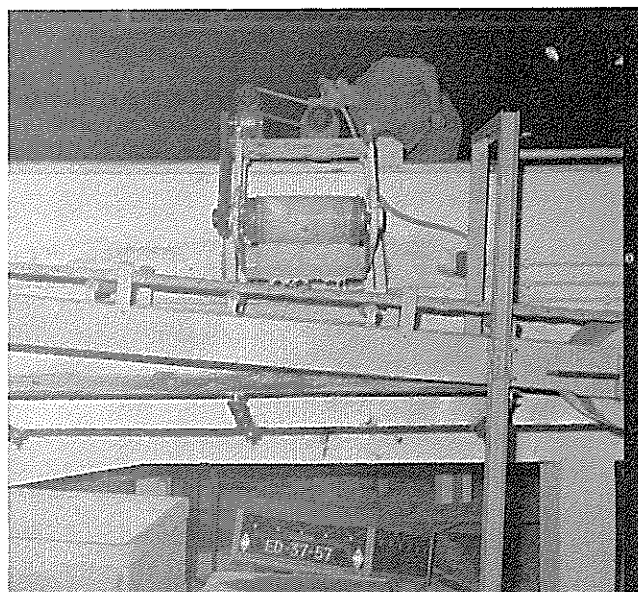
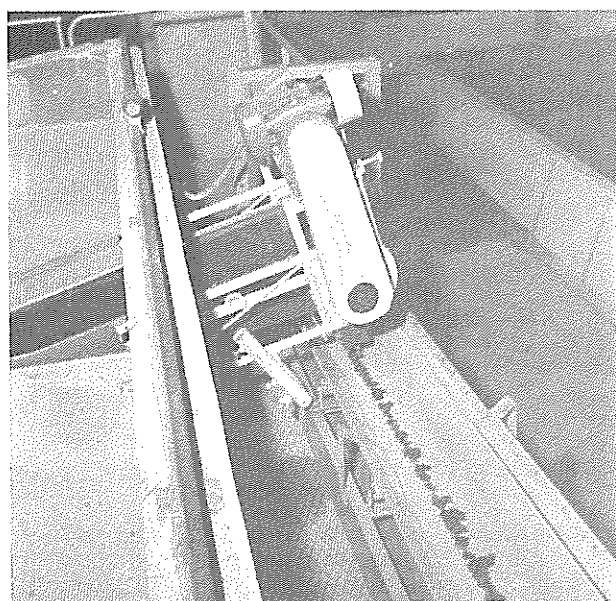


FIG. 41 - Aspectos da passagem de materiais móveis do transportador menor para o maior.

### 3 - CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS E DOS MATERIAIS MÓVEIS ENSAIADOS

Foram realizados ensaios com ondas cujas alturas, períodos e obliquidades à saída do gerador estavam contidas nas gamas seguintes:

- T ... 0,7 a 1,6 s
- H ... 0,9 a 5,0 cm
- $\alpha$  ... 12,9 a 29,1°

Os valores à saída do gerador, à profundidade de 0,40 m, eram determinados por meio de ábacos, a partir dos valores correspondentes em grandes profundidades. Na elaboração desses ábacos foi considerada a hipótese da existência de batimétricas paralelas entre o gerador e as profundidades superiores a meio comprimento de onda e aplicada a teoria das ondas de pequena amplitude. O cálculo dos ábacos foi efectuado para uma gama de períodos de 0,6 a 2,0 s, tendo sido consideradas as direcções ao largo:  $\alpha_0 = 5; 15; 30; 50^\circ$  e uma única profundidade,  $d = 0,40$  m.

No quadro 4 do anexo II está registado o cálculo de  $L_0$ ,  $L$ ,  $H/H_0$  e  $\alpha$ .

Nas figuras 1 a 3 do mesmo anexo são apresentados:

- os comprimentos de onda ao largo ( $L_0$ ) e à saída do gerador ( $L$ ) em função do período;
- o ângulo à saída do gerador ( $\alpha$ ) em função do ângulo em grandes profundidades ( $\alpha_0$ ) e do período ( $T$ );
- o quociente ( $H/H_0$ ) da amplitude da onda à saída do gerador pela amplitude ao largo, em função do período e do ângulo de incidência em grandes profundidades.

Os valores de  $H/H_0$  foram obtidos pelo produto dos dois coeficientes  $H/H_0'$  e  $H_0'/H_0$  que a seguir se caracterizam e cujo cálculo foi efectuado segundo [28].  $H/H_0'$ , designado por coeficiente de diminuição de profundidade, traduz a influência da variação da profundidade da água na amplitude da onda que se propaga em fundos decrescentes, independentemente do efeito da refacção;  $H_0'/H$  traduz a variação de amplitude devida à refacção.

No caso de batimétricas paralelas, este factor é sempre inferior à unidade, por ser a propagação da onda acompanhada de afastamento das ortogonais.

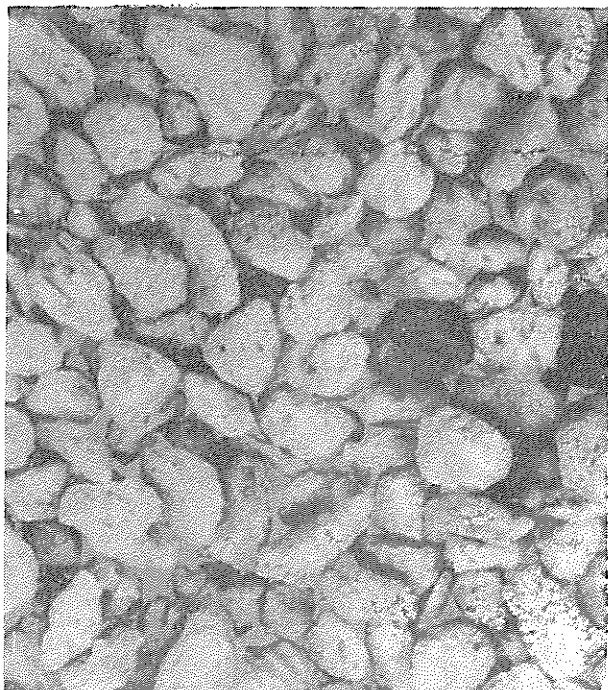
Usaram-se nos ensaios quatro tipos de materiais móveis cujas características se discriminam no quadro 3, que se apresenta a seguir:

QUADRO 3 - MATERIAIS MÓVEIS USADOS NOS ENSAIOS

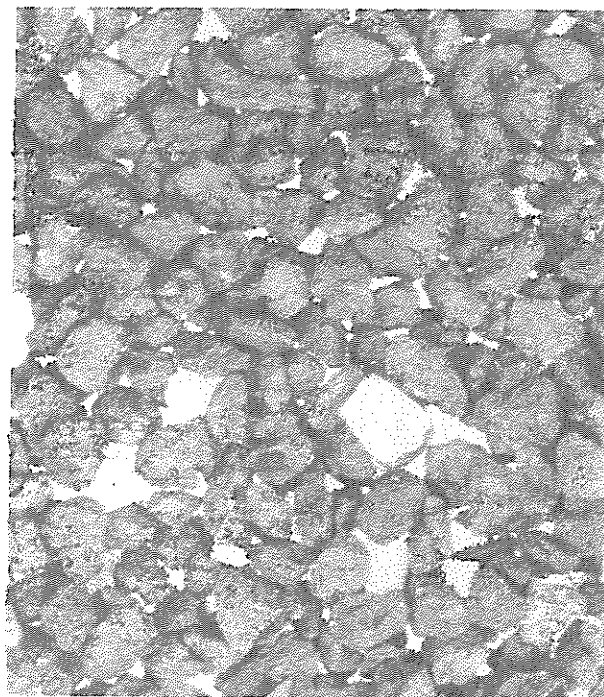
Tipo de material móvel	Peso específico aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro mediano (mm)	Ensaios em que foi utilizado
Pedra-pomes	450	1,62	P1 a P17
Baque-lite	350	0,94	B1 a B3
Casca de noz	270	1,65	C1 a C3
Areia	1650	1,26	A1 a A9
		0,69	A10 a A13
		0,33	A14 a A16

Nas figuras 4 e 5 do anexo II são apresentadas as curvas granulométricas dos diversos materiais, podendo nas fotografias ampliadas da figura 42, que se apresenta a seguir, apreciar-se o aspecto dos grãos.

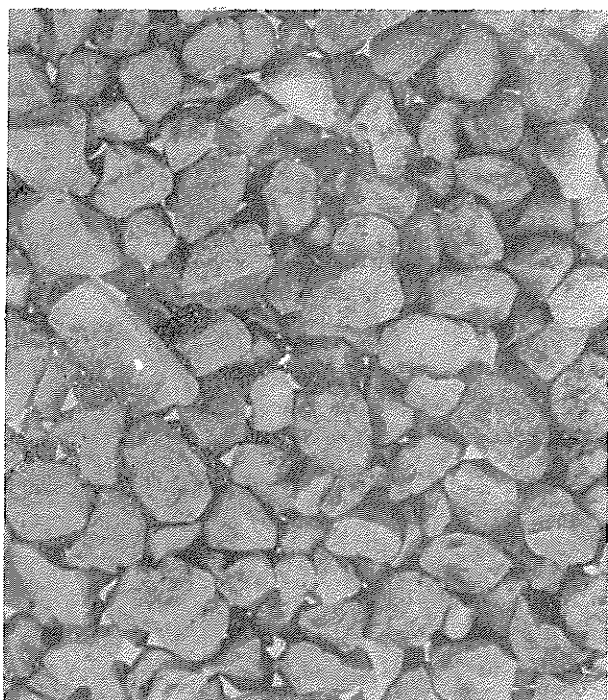




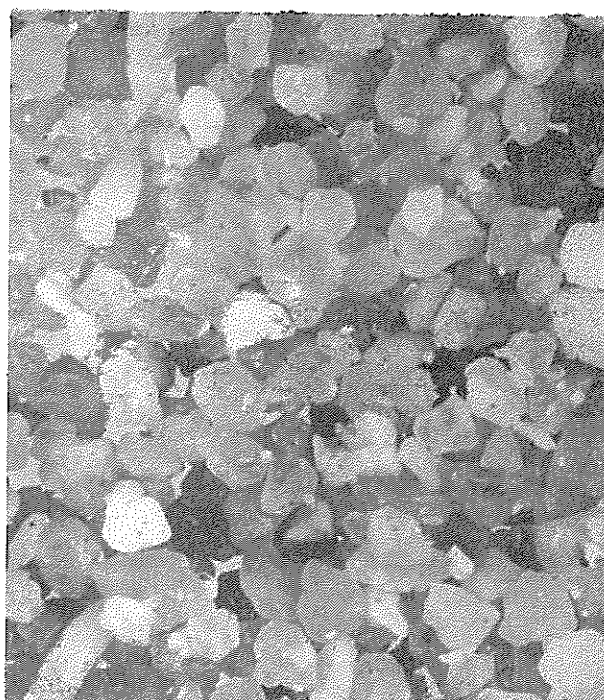
PEDRA-POMES  $\gamma'_s = 450 \text{ kg/m}^3$   
 $d_{50} = 1,62 \text{ mm}$



BAQUELITE  $\gamma'_s = 350 \text{ kg/m}^3$   
 $d_{50} = 0,94 \text{ mm}$



CASCA DE NOZ  $\gamma'_s = 270 \text{ kg/m}^3$   
 $d_{50} = 1,65 \text{ mm}$



AREIA  $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$   
 $d_{50} = 1,20 \text{ mm}$



FIG. 42 - Aspecto ampliado dos materiais móveis.

#### 4 - ENSAIO-TIPO. MÉTODOS UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS

Pretendia-se, em cada ensaio, submeter uma praia de material móvel de determinados peso específico e granulometria, com um talude inicial de inclinação 1:10 e um comprimento de 16 m, à incidência oblíqua de ondas de período  $T$  e características  $H_0$  e  $\alpha_0$  em grandes profundidades.

A estas características correspondiam, à saída do gerador, a altura de onda  $H$  e a obliquidade  $\alpha$ , que se obtinham por recurso aos ábacos já referidos e que constituem as figuras 1 a 3 do anexo II.

O ângulo da onda à saída do gerador, era obtido pelo desfasamento de batedores sucessivos. O cálculo deste desfasamento era efectuado tendo em conta que a distância, medida ao longo do gerador, entre dois batedores dos quais saem simultaneamente duas cristas consecutivas deverá ser, por razões de ordem geométrica,  $L/\sin \alpha$  em que  $L$  e  $\alpha$  são o comprimento da onda e o ângulo da crista com o gerador. Os desfasamentos elementares, isto é, a diferença de fase entre duas pás sucessivas, apresentados sob a forma de valores lidos numa escala de comprimentos que correspondem às diferenças angulares de fase, encontram-se registados no quadro 5 do anexo II. A acuidade deste método fora anteriormente comprovada por Covas [29], para este mesmo gerador com a mesma altura de água de 0,40 m, por comparação entre os ângulos assim calculados e os correspondentes valores medidos, após prévia definição das cristas das ondas, efectuada por meio de hidrómetros ligados a "olhos catódicos".

O período era fixado pelo método habitual de contagem, com cronómetro, do tempo necessário para o disco móvel que acciona o batedor efectuar determinado número de rotações. O seu acerto era efectuado por tentativas, modificando o número de rotações do variador acoplado ao motor.

A altura da onda ( $H$ ) era obtida regulando-se a excentricidade de acordo com as indicações da curva de calibração do gerador. Esta fora elaborada antes do início dos ensaios, tendo-se determinado para cada período a

ensaiar, a correspondência entre a excentricidade das articulações das hastes que movimentam os batedores do gerador e a altura da onda produzida. Na calibração, os valores da altura da onda eram determinados pela média de alturas encontradas, em registos contínuos efectuados em catorze linhas de dois metros de comprimento, normais ao gerador e distribuídas ao longo deste, na zona do tanque de fundo horizontal, situada entre a base do talude da praia e o gerador. As curvas de calibração foram refeitas duas vezes durante o período total dos ensaios, devido ao envelhecimento dos filtros ter obrigado à sua substituição. Em virtude da rápida desadaptação destas curvas achou-se mais indicado, a partir de certo momento, que coincidiu com o início dos ensaios com areia, efectuar o acerto da altura de onda por tentativas, no princípio de cada ensaio, efectuando-se as medições do mesmo modo e com a aparelhagem que anteriormente se utilizava nas calibrações. Era esta constituída por uma sonda de capacidade, montada sobre um transportador de sondas ao longo do qual se deslocava a velocidade constante, sendo o registo efectuado por um registador "Moseley" (Figs. 43 e 44).

No decurso de cada ensaio, além de se confirmar a altura pretendida para a onda à saída do gerador, eram medidos:

- a altura da onda na rebentação;
- a obliquidade das cristas na rebentação;
- o caudal sólido transportado;
- a velocidade média da corrente longitudinal.

Era também definido, no fim de cada ensaio, o perfil transversal da praia, a profundidade média de rebentação e a largura média da zona compreendida entre a rebentação e a linha do osta.

Junto da rebentação, zona em que as profundidades, por serem demasiado pequenas, não permitiam o funcionamento da sonda de capacidade, usava-se, na medição das alturas das ondas, o sistema tradicional, constituído

por um hidrómetro ligado a um "olho catódico".

A medição da altura da onda na rebentação,  $H_b$ , efectuava-se do modo

FIG. 43 - Medição da altura das ondas à saída do gerador.

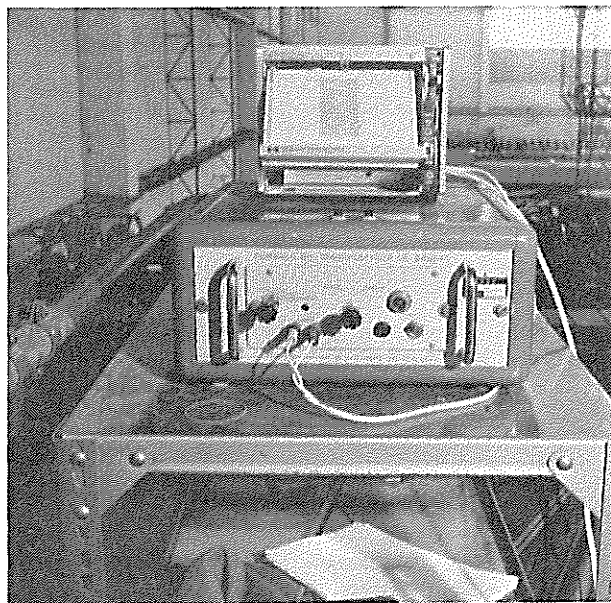
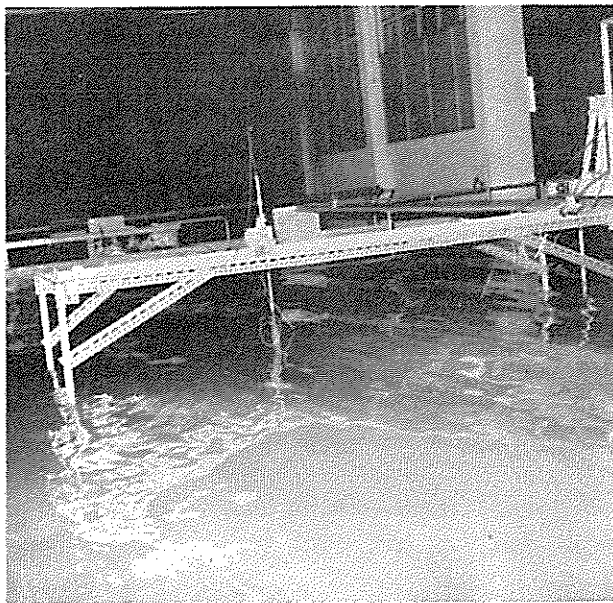
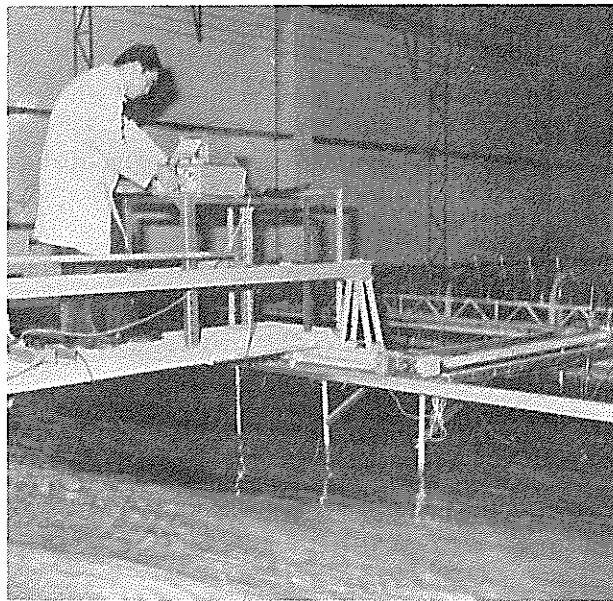


FIG. 44 - Aparelhos utilizados na medição das alturas das ondas à saída do gerador: sonda de capacidade; transportador de sondas; comando do transportador de sondas; registador "Moseley".

seguinte:

- localizava-se, em determinado perfil, o ponto de rebentação, observando a movimentação dos grãos do fundo. Considerava-se atingido o ponto de rebentação quando, ao observar os fundos desse perfil, caminhando no sentido do largo para a costa, os grãos deixavam de apresentar o seu movimento característico de vai-vem sobre o fundo para serem lançados rapidamente em direcção à costa;

- após a localização, colocava-se nesse ponto o hidrómetro instalado no passadiço rolante e efectuavam-se determinações das cotas da crista e da cava da onda, com auxílio de um "olho catódico" (Fig. 45);

- repetia-se a mesma operação em 12 perfis transversais distribuídos ao longo da praia, tomando-se a média do conjunto como altura da onda na rebentação.

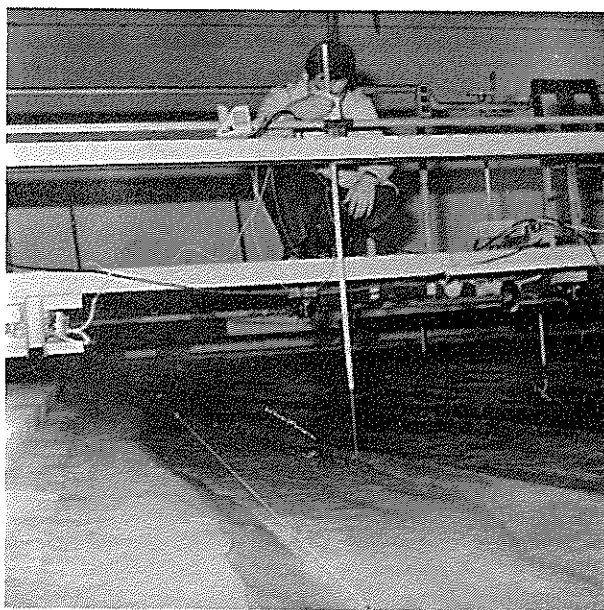


FIG. 45 - Medição da altura das ondas na rebentação.

O ângulo com a costa, na rebentação, era determinado após ter decorrido um mínimo de seis horas de ensaio, para que a praia se encontrasse aproximadamente estabilizada sob o ponto de vista de perfil transversal. Procedia-se do modo seguinte, (Fig. 46 e 47):

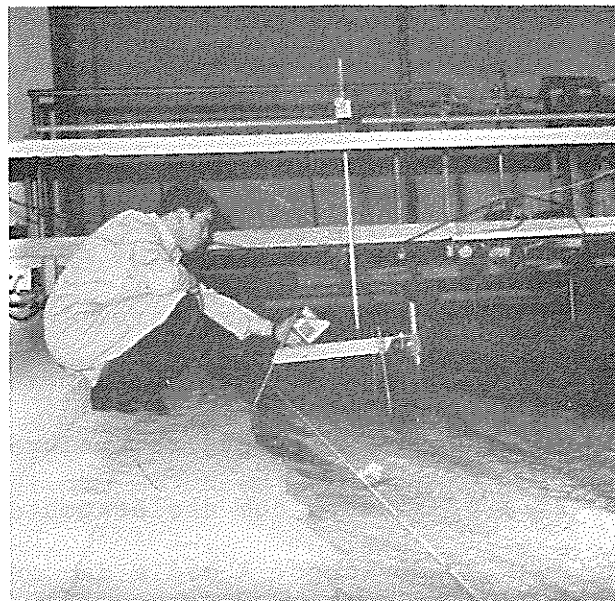


FIG. 46 - Hidrómetros ligados a um "olho catódico", usados na definição da obliquidade da onda na rebentação.

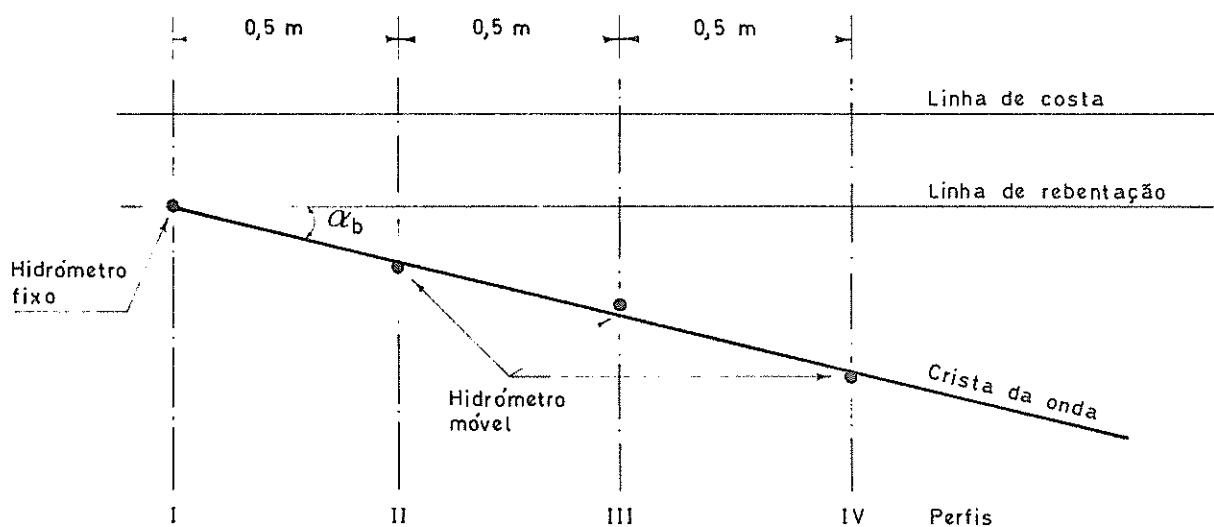


FIG. 47 - Esquema de determinação do ângulo na rebentação.

- localizava-se sobre determinado perfil transversal I o ponto de rebentação pelo processo que se acabou de indicar;

- colocava-se nesse ponto um hidrómetro fixo, montado sobre um tripé e regulado por forma a que a sua ponta fosse tocada pela água apenas durante uma fracção de segundo, na passagem da crista da onda;

- fixava-se o passadiço móvel numa posição tal que o hidrómetro sobre ele montado se deslocasse sobre o perfil II, afastado 0,50 m do perfil I, e colocava-se a sua extremidade a uma cota tal que fosse também tocada pela

crista da onda ao propagar-se, apenas durante uma fracção de segundo;

- estando ambos os hidrómetros ligados a fases diferentes do mesmo "olho catódico", deslocava-se perpendicularmente à praia o que se encontrava sobre o passadiço até que ambos os sectores do olho catódico se iluminassem simultaneamente, o que correspondia a estarem nesse instante, os extremos de ambos os hidrómetros a tocar a mesma crista de onda. Esta operação de acerto do hidrómetro, montado sobre o passadiço, por deslocamento ao longo da régua em que se apoiava, era efectuada quatro vezes, sendo dois acertos efectuados com deslocamento no sentido da costa e os outros dois no sentido do largo. A média das quatro posições definia o ponto da crista sobre o perfil II distanciada 0,50 m do ponto fixo;

- a operação efectuada no perfil II era repetida nos perfis III e IV, afastados 1,00 e 1,50 m do perfil I em que se situava o hidrómetro fixo. Ficavam, assim, localizados quatro pontos a partir dos quais se traçava uma recta passando pelo ponto fixo. Esta recta era usada para definir a obliquidade na rebentação, no perfil I;

- repetia-se a operação em mais sete perfis, distribuídos ao longo da praia, sendo o ângulo na rebentação no ensaio definido pela média dos ângulos nos oito perfis.

Os resultados das medições da altura da onda e da obliquidade na rebentação encontram-se inscritos no quadro 2 do anexo II, juntamente com os valores calculados com base na teoria da onda de pequena amplitude sendo tomada como profundidade na rebentação no cálculo desta última grandeza, o valor medido no fim de cada ensaio.

As figuras 6 e 7 do mesmo anexo permitem comparar os valores obtidos pelos três métodos.

Vejamos agora como se avaliava o caudal sólido litoral. O material móvel acumulava-se, como se referiu, junto da extremidade B do modelo, onde era medido e de novo lançado na praia (Fig. 48). Nesta medição usavam-se

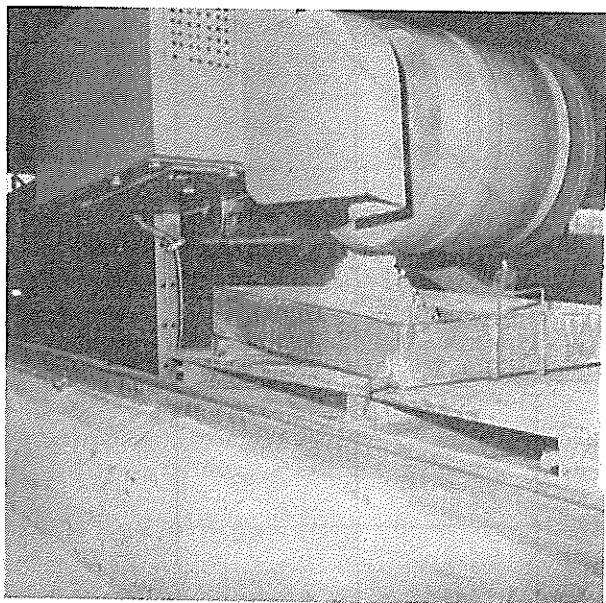


FIG. 48 - Acumulação de material móvel na extremidade B da praia e operação manual de alimentação.

medidas de capacidade do tipo comercial. O intervalo entre medições variava de 30 a 10 minutos conforme o caudal sólido litoral era pequeno ou elevado. Nos ensaios de maior caudal sólido chegava a corresponder a cada operação de alimentação o lançamento de dezena e meia de litros de material móvel, apesar da redução do intervalo de medição para 10 minutos. Todo o material móvel transportado era deste modo medido, sendo elaborado um gráfico onde se iam registando os volumes acumulados em função do tempo de ensaio, de que se apresenta um exemplo na figura 49.

Este gráfico permitia avaliar também a maior ou menor regularidade das quantidades transportadas e condicionava, por essa razão, a duração do ensaio que, conforme os casos, oscilava entre 20 e 50 horas.

O caudal sólido litoral correspondente ao ensaio era determinado a partir da recta definida pelos pontos desse gráfico, desprezando-se sempre as primeiras horas de ensaio, que apresentavam geralmente caudais pouco significativos, devido certamente a não ter sido ainda atingido num perfil transversal estável.

A partir da décima hora de cada ensaio, determinava-se a velocidade



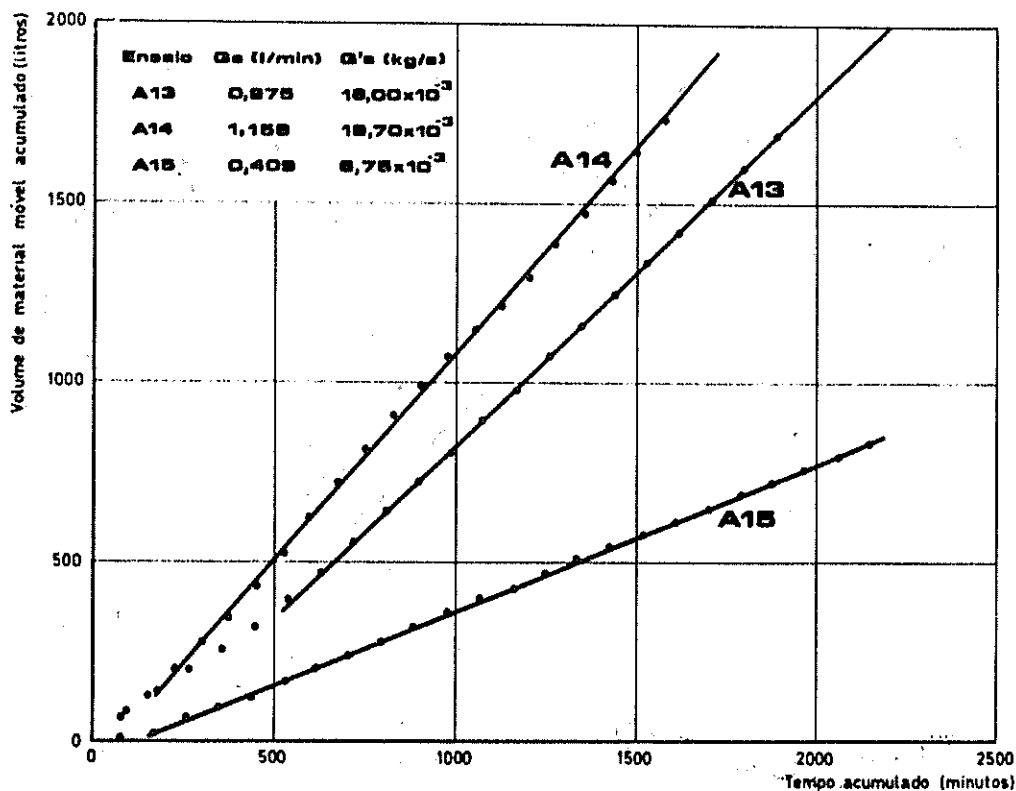


FIG. 49 - Volumes de alimentação acumulados ao longo do ensaio. Ensaios A13; A14 e A15.

média da corrente longitudinal. Devido às pequenas profundidades não foi possível utilizar micromolinetes na sua avaliação, tendo-se recorrido à cronometragem de percursos de um flutuador constituído por uma esfera de plástico ou um pequeno círculo de cartão lançado entre a linha de rebentação e a costa. Colocavam-se duas referências transversalmente à rebentação, de forma a definirem um percurso com um comprimento de 0,25 ou 0,50 m conforme a maior ou menor tendência do flutuador para se escapar para o largo através da linha de rebentação ou encahar na costa. Seguidamente cronometravam-se seis percursos do flutuador. Determinava-se a velocidade nesse ponto pela média dos valores encontrados. Repetia-se a operação em oito pontos ao longo da praia, escolhidos em zonas em que esta se não encontrasse deformada e em que, portanto, a linha de água mantivesse uma direcção próxima da inicial. A velocidade da corrente longitudinal, tomada para o ensaio era a média dos oito pontos, ou seja do conjunto de

48 valores.

Mediam-se também, no fim de cada ensaio, a profundidade na rebentação,  $h_b$ , e a distância entre as linhas de rebentação e de costa,  $l_b$ . Estes valores eram obtidos efectuando as médias das medições em catorze pontos distribuídos pelo comprimento total da praia e encontram-se registados no quadro 3 do anexo II.

No fim de cada ensaio levantavam-se ainda três perfis transversais da praia móvel, escolhidos em zonas em que a linha de costa se encontrasse pouco deformada. Na fig. 8 do anexo II encontra-se representado um perfil transversal para cada ensaio, tendo-se escolhido aquele cujas características  $h_b$  e  $l_b$  estivessem mais próximas das médias obtidas nas medições que se acabam de referir.

## 5 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 - Ensaio destinado à avaliação da influência da altura das ondas no valor do caudal sólido

Estes ensaios (P1 a P6) foram efectuados ainda nas instalações provisórias, tendo sido usado um período único de 0,8 s e alturas de onda variando entre 0,9 e 5,0 cm. O material móvel utilizado foi pedra-pomes com  $\gamma_s = 450 \text{ kg/m}^3$  e  $d_{50} = 1,62 \text{ mm}$ .

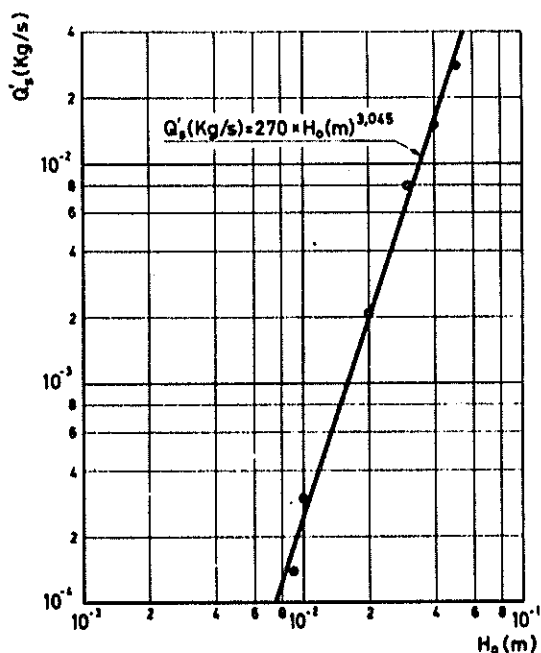
Encontrou-se (Fig. 50) a seguinte variação de  $Q_s^i$  com  $H_o$ :

$$Q_s^i \text{ (kg/s)} = 270 \times H_o^{2,0-5} \text{ (m)}$$

Como se vê no quadro 1 do anexo II, os parâmetros  $Q_s^i/P_1$ ,  $H_o/L_o$  e  $H_o/d(\gamma_s/\gamma_{sa}^i)$ , variam todos simultaneamente nesta série de ensaios o que torna pouco significativo interpretar essas variações.

Estes resultados, por dizerem respeito a ensaios efectuados com pedra-pomes serão utilizados mais adiante no estudo da influência do peso específico, onde têm acentuada utilidade, dada a escassez de ensaios com mate-

FIG. 50 -  $Q'_g$  em função de  $H_o$ . Ensaio P1 a P6.



riais móveis diferentes da areia.

### 5.2 - Ensaio destinados a avaliar a influência do período das ondas no valor do caudal sólido

Com esta finalidade realizaram-se os ensaios P8 a P14 utilizando a mesma pedra-pomes que anteriormente.

Embora se pretendesse que todos os ensaios apresentassem a mesma altura de onda ao largo ( $H_o = 2,0$  cm), nos ensaios P8 a P11, os primeiros que se realizaram na instalação de ensaio definitiva, obtiveram-se devido a deficiência de calibração, valores variáveis entre 1,9 e 2,6 cm, como se pode ver no já citado quadro 1 do anexo II.

Aos ensaios P12 a P14 que apresentavam o valor correcto, juntou-se o ensaio P2 com a mesma altura de onda e ainda o P10 em que a altura de  $H_o$  era 1,9 cm e tentou-se testar com eles a influência do período (Fig. 51), corrigindo previamente os valores de  $Q'_g$ , efectuando a sua divisão pelo valor de  $\sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_o$  do ensaio correspondente. Este produto variava de ensaio para ensaio, muito embora a todos eles correspondesse um ângulo ao largo  $\alpha_o$  igual a  $30^\circ$ , pois a variação da declividade implicava uma alteração do ângulo na rebentação, como se vê nos ábacos da figura 12.

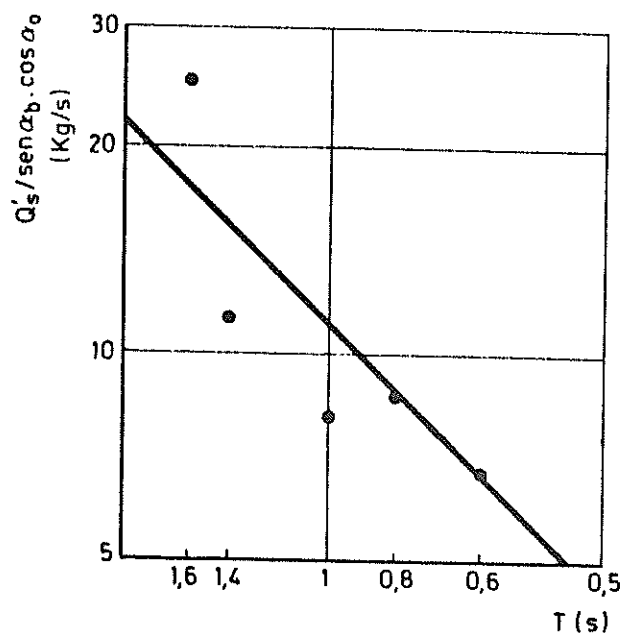


FIG. 51 - Caudal sólido em peso submerso,  $Q'_s$ , em função do período, T. Ensaios P2; P10; P12; P13 e P14.

Encontrou-se uma variação de  $Q'_s / \text{sen } \alpha_b \cdot \text{cos } \alpha_o$  com T aproximadamente linear o que era de esperar pois tratava-se dum conjunto de ensaios com  $\delta_o$  e D aproximadamente constantes, devendo portanto o rendimento de transporte  $R = Q'_s / \frac{\rho E^2}{32 \pi} H_o^2 T \text{ sen } \alpha_b \cdot \text{cos } \alpha_o$  ser também aproximadamente constante.

Os resultados desses ensaios poderão ainda ser utilizados, do mesmo modo que os da série anterior, para estudar a influência do peso específico.

### 5.3 - Ensaios destinados a avaliar a influência do peso específico do material móvel no valor do caudal sólido

Pretendia-se estudar a influência do peso específico sobre o valor do caudal sólido litoral efectuando ensaios com areia, pedra-pomes, baquelite, granulado de casca de noz e poliestireno, não se tendo no entanto chegado a ensaiar este último material. O esquema elaborado consistia em efectuar com cada um dos materiais três ensaios com  $T = 0,8s$ ,  $\alpha_o = 15^\circ$  e alturas de onda ao largo de 1,5; 2,5; 3,5 cm.

Na figura 52 encontram-se inscritos os valores de  $Q'_s / P_1$  em função de

$\delta_0$  para os materiais ensaiados. Nota-se tendência para os caudais sólidos se apresentarem menos elevados no caso da areia. Obteve-se um transporte nulo no ensaio A2' efectuado com areia e com 1,5 cm de altura de onda. Neste ensaio o valor do parâmetro adimensional D era apenas de 9. De notar que o ensaio A6, com a mesma declividade, apresenta um rendimento de transporte que sobe a 0,367, o que só se pode explicar pela influência do aumento de D, cujo valor sobe neste ensaio para 28.

Tentou-se em seguida a análise conjunta dos resultados de todos os ensaios realizados com materiais móveis diferentes da areia:

- os do presente trabalho: P1 a P18 com pedra-pomes; B1 a B3 com baquelite e C1 a C3 com casca de noz granulada;

- dos ensaios de Sauvage e Vincent (quadro 4 do anexo I) efectuados com pedra-pomes e poliestireno;

- os de Lepetit (quadro 7 do mesmo anexo) efectuados com baquelite de dois diâmetros médios diferentes.

Começou-se por proceder do mesmo modo que no capítulo anterior, comparando os resultados com a previsão da recta C.E.R.C. Verifica-se, (Fig. 53), que a mancha dos pontos experimentais se dispõe segundo uma direcção idêntica à desse recta embora os valores de  $Q'_S$  apresentem tendência a ser mais elevados.

Atendendo a que a recta que apresenta os mínimos desvios relativamente ao conjunto dos resultados de ensaios realizados em laboratório com areia, reunidos na figura 23, é  $Q'_S = 0,147 P$ , verifica-se que os rendimen-

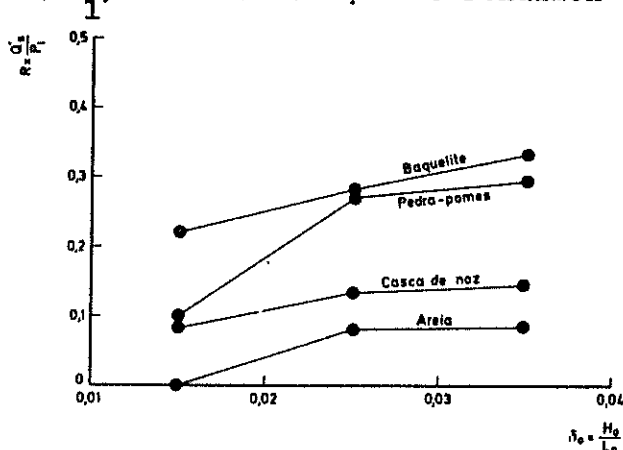


FIG. 52 - R em função de  $\delta_0$  para diversos materiais móveis.

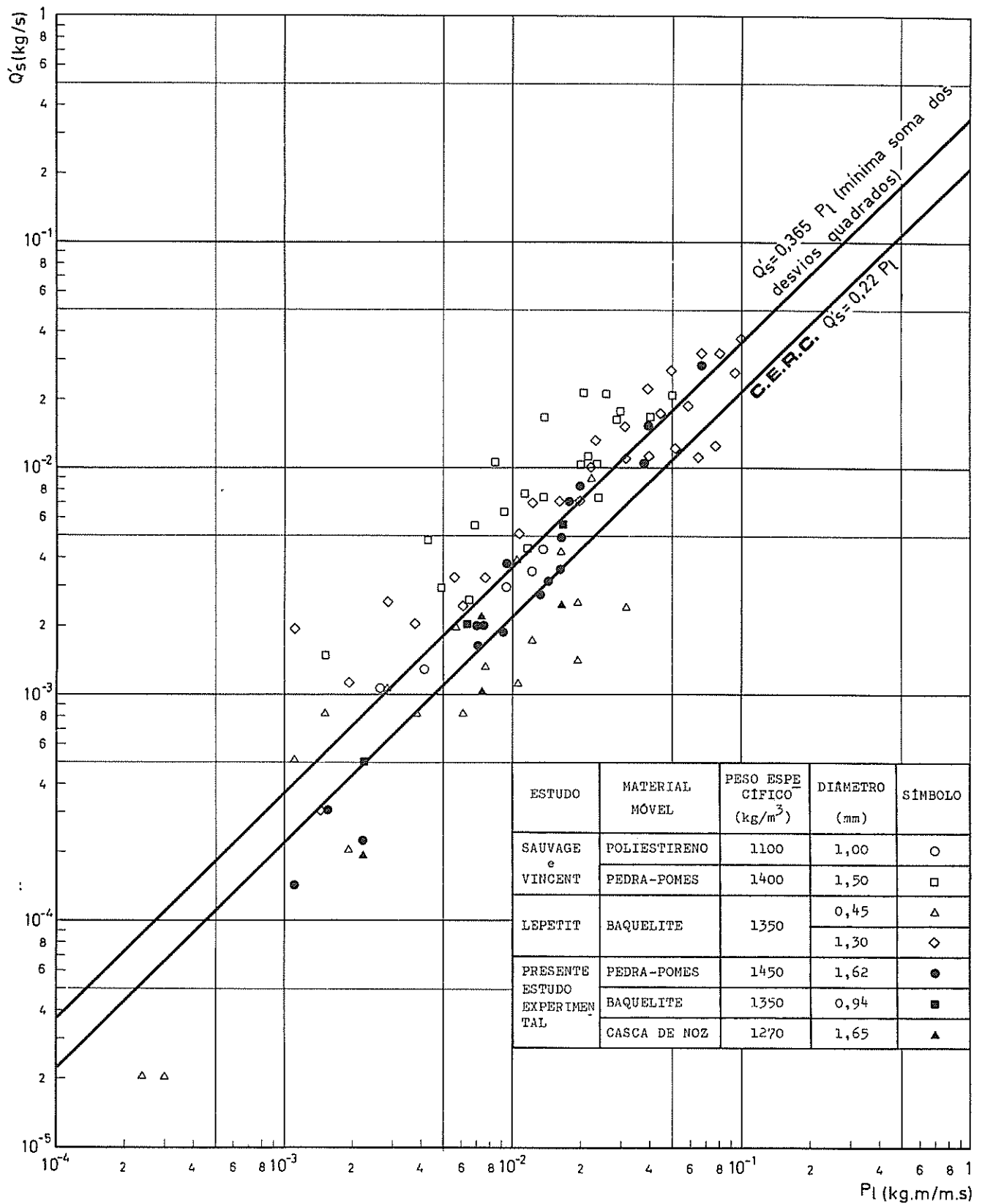
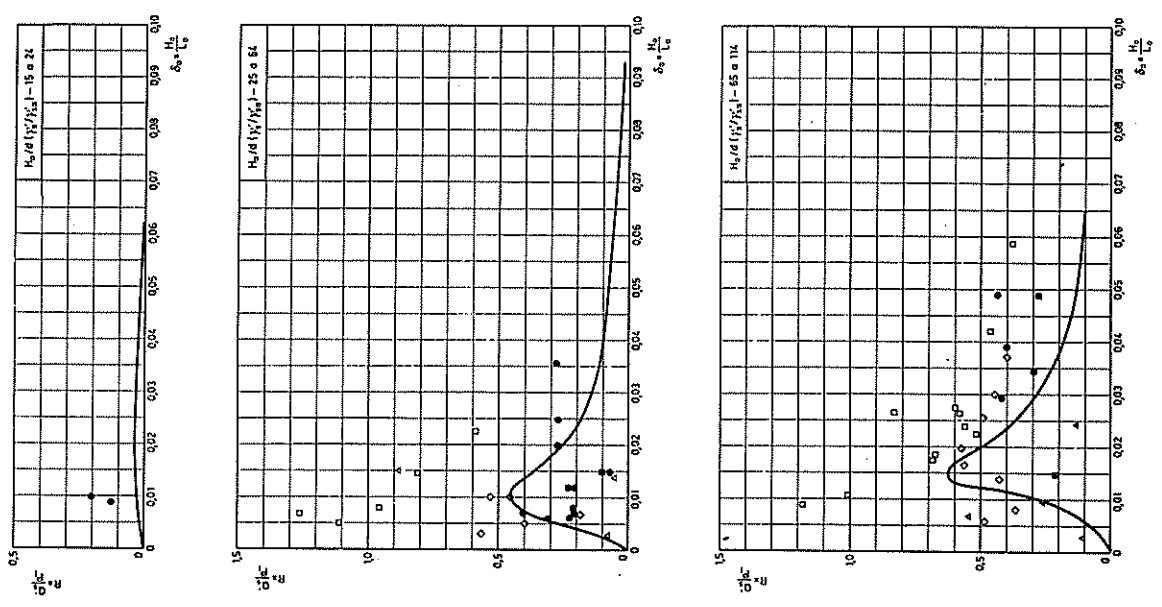


FIG. 53 -  $Q'_s$  em função de  $P_1$  para o conjunto dos resultados dos ensaios realizados com materiais móveis diferentes da areia.



ESTUDO	MATERIAL	FECHA DE EFECTUACION (a/a/a)	DIAMETRO (cm)	ESTRUCO
SARGADE	MÓVEL	1100	1,00	O
VERGENT	SOLESTRADO	1400	1,50	D
LEPITIT	BAQUELITE	1350	0,15	A
FRENTE	FERRA-FORES	1450	1,30	◊
ESTUDO	FERRA-FORES	1450	1,62	◐
ESTRUCO	BAQUELITE	1350	0,34	■
PLA	CASCA DE MOZ.	1270	1,65	▲

FIG. 54 - Comparação dos resultados de ensaios experimentais efectuados com materiais móveis diferentes da areia, com as curvas  $R = f(\delta_0, D)$ , apresentadas na figura 25-A.

tos são em média duas vezes e meia superiores quando o material móvel é diferente da areia.

Na Fig. 54 pode apreciar-se a posição do conjunto dos pontos experimentais, resultantes dos ensaios com materiais móveis diferentes da areia, relativamente às curvas definidas na Fig. 25-A. Verifica-se ser a correspondência muito deficiente principalmente na gama dos valores de D compreendidos entre 25 e 165. Também nesta figura se evidencia a tendência para os rendimentos de transporte serem superiores aos que correspondem a ensaios com areia.

#### 5.4 - Ensaio destinado a avaliar a influência do diâmetro do material móvel

Esta série de ensaios foi estabelecida a partir do esquema desenvolvido nos capítulos anteriores. Mantiveram-se constantes os parâmetros  $\rho_s/\rho$  e  $H_o/L_o$  e estudou-se a variação do rendimento de transporte  $Q'_s/P_1$  com o parâmetro  $H_o/d$  ( $\gamma'_s/\gamma'_{sa}$ ) fazendo-se variar este último não só à custa da altura da onda mas também do diâmetro da areia.

Estes ensaios estão inscritos no quadro 1 do anexo II com a numeração de A7 a A15 e foram efectuados com areias com três diâmetros diferentes: 1,26; 0,69 e 0,33 mm.

Na figura 55 comparam-se os resultados destes ensaios com uma curva

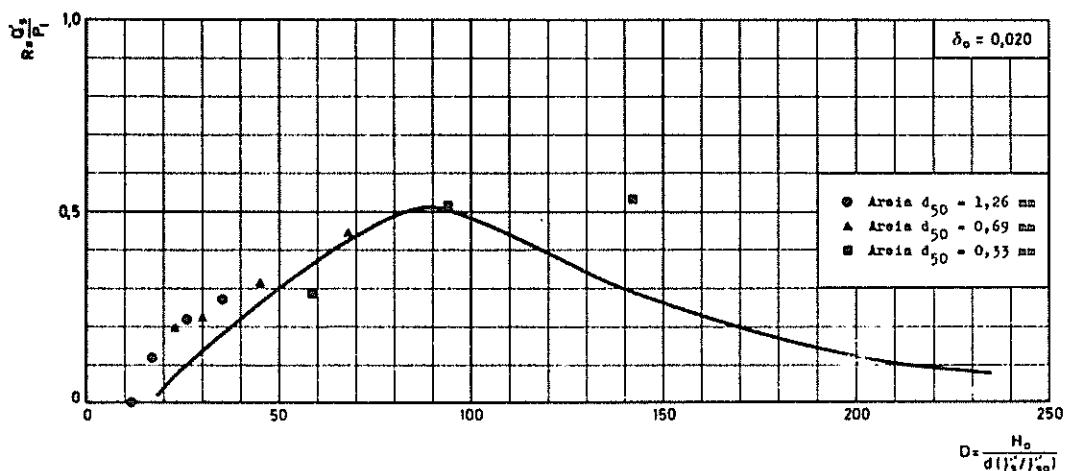


FIG. 55 - Comparação dos resultados experimentais dos ensaios A7 a A16 com a curva  $R=f(D)$  com  $\delta_0=0,02$  (deduzida das curvas da fig. 25-A).



$R = f(D)$ , obtida efectuando um corte pela declividade 0,020 na família de curvas experimentais da Figura 25-A.

Verifica-se uma boa concordância, o que parece confirmar ser o parâmetro  $D$  e não o diâmetro, que condiciona o rendimento de transporte para valores constantes de declividade. Esta conclusão torna-se mais evidente, se ao analisar a figura 55 se tiver em conta a existência de ensaios de diferentes diâmetros que se encontram praticamente sobrepostos devido a apresentarem valores de  $D$  muito próximos.

Tem ainda interesse comparar os resultados efectuados com areia (Al a Al5), com as curvas da figura 25-A, obtidas da análise dos resultados dos estudos experimentais que figuram na bibliografia. É o que se faz na figura 56 verificando-se uma concordância bastante satisfatória.

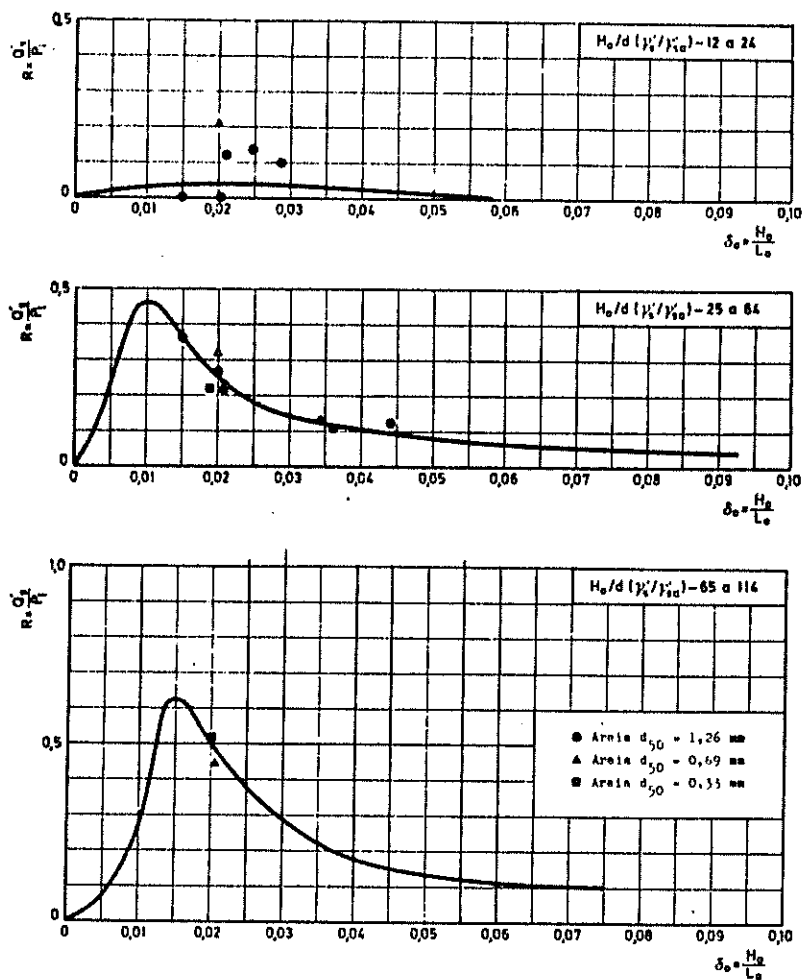


FIG. 56 - Comparação dos resultados dos ensaios efectuados com areia com as curvas da figura 25-A.

## CAP. V - CONCLUSÕES

O transporte litoral é um fenómeno complexo, que se encontra ainda numa fase incipiente de conhecimento. Este facto origina, no campo da previsão dos caudais sólidos, uma proliferação de opiniões divergentes sobre a influência das diversas grandezas que nele parecem actuar.

O único facto bem estabelecido e que tem sido sublinhado por muitos dos autores de trabalhos sobre este assunto, é a estreita relação existende entre o valor do caudal sólido litoral e a componente segundo a direcção da costa do fluxo de energia da onda. Por esta razão, pareceu importante no presente trabalho, tentar evidenciar essa relação em todos os casos em que aparentemente se não verificava o que, de um modo geral, foi conseguido.

A acentuada carência de resultados experimentais obtidos com materiais móveis com densidades diferentes da que a areia apresentada, torna difícil a análise da influência do peso específico na intensidade do transte sólido litoral.

Os únicos resultados disponíveis parecem ser os de Sauvage e Vincent, em número inferior a três dezenas.

Inman mostra que os resultados daqueles autores passam a enquadrar-se na mancha de pontos que serviram para o traçado da recta do C.E.R.C. se na avaliação dos caudais sólidos se usarem, em vez dos volumes, os respectivos pesos submersos transportados na unidade de tempo. Também na fórmula de Castanho se pode exprimir a principal influência do peso específico, tomando o caudal sólido nas unidades referidas.

Os resultados dos ensaios de Lepetit, cedidos pelo Laboratoire National d'Hydraulique (França), juntamente com os do presente estudo, elevando para o triplo o número de resultados de ensaios com materiais móveis diferentes da areia, permitem uma mais segura confirmação experimental da hipótese

tese citada.

Poderá, deste modo, em estudos em modelo reduzido efectuados com materiais móveis de baixa densidade, admitir-se que o método de previsão traduzido pela recta do C.E.R.C. continua tão válida como para a areia desde que se tome o caudal sólido, não em volume ou em peso real, mas em peso submerso transportado na unidade de tempo.

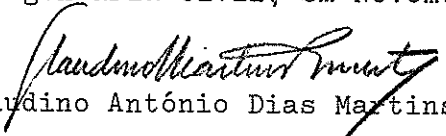
O resultado com mais interesse conseguido neste trabalho é, no entanto, a verificação da importância do parâmetro adimensional  $D=H_o/d(\gamma'_s/\gamma'_{sa})$  na interpretação dos resultados experimentais existentes. Este parâmetro não fora ainda utilizado na interpretação dos resultados experimentais respeitantes ao estudo do transporte sólido litoral, tendo no entanto revelado bastante interesse na análise das condições que regulam o aparecimento dos sistemas barra-fossa nas praias.

Parece traduzir a relação de intensidades entre a tensão gerada nos fundos pela corrente longitudinal e a tensão crítica de início de arrastamento do material móvel em causa, no seio de um escoamento uniforme com características de turbulento rugoso.

A acentuada influência deste parâmetro, dentro de certa gama dos seus valores, revelou-se na análise da massa dos resultados de ensaios colhidos na bibliografia e foi parcialmente confirmada pela parte experimental do presente trabalho.

Segundo esta perspectiva deixaria de ter significado analisar isoladamente a influência do diâmetro do material móvel no valor do rendimento de transporte.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Novembro de 1972.

  
Cláudio António Dias Martins Vicente  
Estagiário para especialista

BIBLIOGRAFIA CITADA NO TEXTO

- 1 - SILVESTER, R. - Sediment transport and accretion around the coastline of Japan. Proceedings of tenth conference on Coastal Engineering. Vol. I. Japan 1966.
- 2 - OTTMANN, F. - Introduction à la géologie marine et littorale. Masson et C<sup>ie</sup>. Paris 1965.
- 3 - LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - Vocabulário de Estradas e Aeródromos. Lisboa 1962.
- 4 - JOHNSON, J. and EAGLESON, P. - Coastal processes. Estuary and coastline hydrodynamics. Ippen ed. New York 1966.
- 5 - ELIAS, N. - Características e evolução do perfil transversal das praias. LNEC 1968.
- 6 - DEAN, R. and EAGLESON, P. - Finite amplitude waves. Estuary and coastline hydrodynamics. Ippen ed. New York 1966.
- 7 - CARVALHO, J. - Características das ondas na rebentação - Caso de batimetria paralela - Sua aplicação ao transporte sólido litoral. 3<sup>as</sup>, Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil. 1971.
- 8 - RUSSELL, R. e OSORIO, J. - An experimental investigation of drift profiles in a closed channel. Proceedings of sixth conference on Coastal Engineering. Florida. 1957.
- 9 - SHEPPARD, F. - Submarine geology. Harper and Brothers publishers. New York 1948.
- 10 - BONNEFILLE, R. - L'utilisation des paramètres adimensionnels dans l'étude de l'hydrodynamique des sédiments. XI convegno di idraulica e costruzioni idrauliche. Genova. Ottobre 1968.
- 11 - INGLE, J. - The movement of beach sand. Elsevier Publishing Company. Amsterdám 1966.

- 12 - SITARZ, J. - Contribution à l'étude de l'évolution des plages à partir de la connaissance des profils d'équilibre. Centre de Recherches et d'Études Océanographiques. Paris 1963.
- 13 - NODA, E. - Coastal movable-bed scale-model relationship. California 1971.
- 14 - EAGLESON, P. - Theoretical study of longshore currents on a plane beach. Report No. 82. Hydrodynamic Laboratory. Massachusetts Institute of Technology. 1965.
- 15 - COMOLET, R. - Introduction à l'analyse dimensionnelle et aux problèmes de similitude en mécanique des fluides. Masson et C<sup>ie</sup>, editeurs. Paris 1958.
- 16 - KRUMBEIN, W. - Shore currents and sand movement on a model beach. Technical memorandum No. 7. Beach Erosion Board. Washington. 1944.
- 17 - SHAY, E. and JOHNSON, J. - Model studies on the movement of sand transported by wave action along a straight beach. University of California. Berkeley. 1951.
- 18 - DAS, M. - Longshore sediment transport rates: a compilation of data. Coastal Engineering Research Center. Miscellaneous paper no. 1-71. September 1971.
- 19 - JOHNSON, J. - Sand transport by littoral currents. Reprinted from Proceedings of the fifth Hydraulics Conference. Bulletin 34, State University of Iowa. Studies in Engineering. 1953.
- 20 - SAUVAGE, G. et VINCENT, M. - Transport littoral et formation de flèches et de tombolos. Proceedings of the fifth Conference on Coastal Engineering. Grenoble. 1954.
- 21 - LARRAS, J. et BONNEFILLE, R. - Quantités de sable charriées par la houle parallèlement à la côte. A.I.R.H. Onzième congrès. Vol. V. Leningrad 1965.

- 22 - BONNEFILLE, R. e PERNECKER, L. - Étude théorique et expérimentale du transport littoral. Electricité de France. Bulletin de la direction des études et recherches. No. 3, serie A. Grenoble 1967.
- 23 - WATTS, G. - A Study of sand movement at South Lake Worth Inlet, Florida. Beach Erosion Board. Technical Memorandum n.º.42. 1953.
- 24 - SAVAGE, R. - Laboratory determination of littoral-transport rates. Journal of the Waterways and Harbours Division. Vol. 88. No.WW 2. May 1962. Part I. American Society of Civil Engineers.
- 25 - INMAN, L., KOMAR, P. and BOWEN, A. - Longshore transport of sand. Proceedings of the Eleventh Conference on Coastal Engineering. Vol. I. London 1968.
- 26 - BEACH EROSION BOARD - Munch-Petersen's littoral drift formula. Bulletin of the Beach Erosion Board. Vol. 4. No. 4. Oct. 1950.
- 27 - CASTANHO, J. - Rebentação das ondas e transporte litoral. Memória 275, LNEC. Lisboa 1966.
- 28 - ABECASIS, F., CASTANHO, J. e CARVALHO, J. - A previsão das características das ondas do mar. Memória n.º. 114, LNEC. Lisboa 1957.
- 29 - COVAS, J. - Calibração de um gerador de vagas do tipo "serpente". Relatório interno, LNEC. Lisboa 1969.
- 30 - INMAN, D. - Littoral processes and the development of shorelines. Proceedings of the Coastal Engineering Santa Barbara Speciality Conference. Octobre 1965.
- 31 - PUTNAM, J., MUNK, W. and TRAYLOR, M. - The prediction of longshore currents. Transactions, American Geophysical Union. Vol.30, no. 3. Washington. June 1940.

32 - EAGLESON, P.<sup>M</sup> - Growth of longshore currents downstream of a sur-zone barrier. Coastal Engineering Santa Barbara Speciality Conference. October, 1965.

BIBLIOGRAFIA GERAL

- BAJORUNAS, L. - Littoral transport energy relationship. Proceedings of twelfth conference on Coastal Engineering. Vol. II. Washington 1970.
- BREBNER, A. and KAMPHUIS, J. - Model tests on the relationship between deep water wave characteristics and longshore currents. Proceedings of eighth conference on Coastal Engineering. Mexico 1963.
- BREBNER, A. and KAMPHUIS, J. - Model tests on the breaking of waves at an angle with a shoreline. I.A.H.R. Tenth Congress. Vol. I. London 1963.
- CASTANHO, J. - Wave energy and littoral transport. Proceedings of ninth conference on Coastal Engineering. Lisbon 1964.
- CASTANHO, J. - Influence of grain size on littoral drift. Proceedings of twelfth conference on Coastal Engineering. Vol. II. Washington 1970.
- COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER - Shore protection planning and design. Tec. Rep. no. IV. 1966.
- EDELMAN, T. - Littoral transport in the breaker zone, caused by oblique waves. I.A.H.R. Tenth Congress. Vol. I. London 1963.
- FAIRCHILD, J. - Laboratory tests of longshore transport. Proceedings of twelfth conference on Coastal Engineering. Vol. II. Washington 1970.
- FAIRCHILD, J. - Correlation of littoral transport with wave energy along shores of New York and New Jersey. Coastal Engineering Research Center. Tec. Mem. no. 18. Washington Nov. 1966.



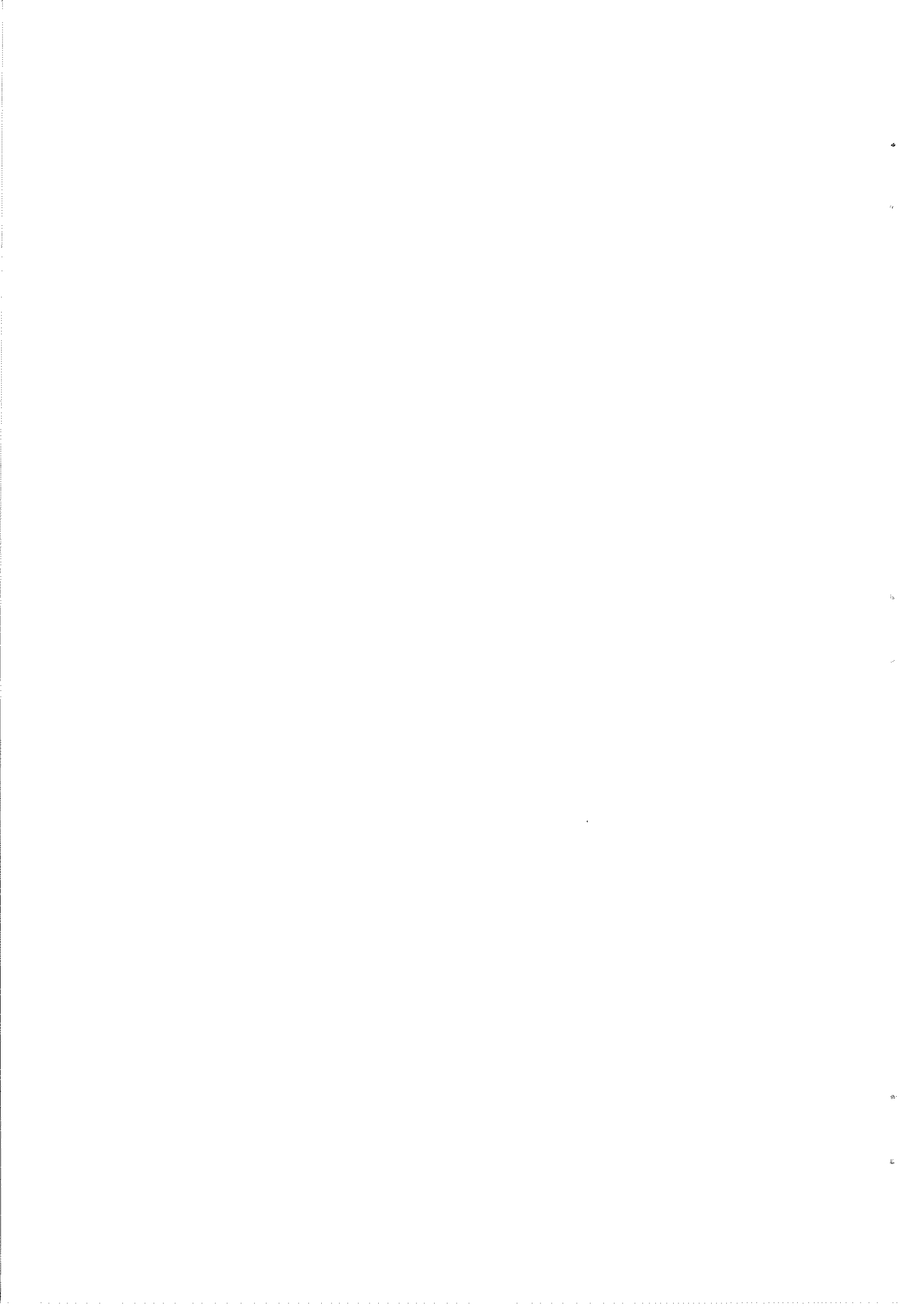
- GALVIN, C. - Breaker type classification on three laboratory beaches.  
Journal of Geophysical Research. Vol. 73, No. 12, June, 1968. Reprinted for U.S. Army Coastal Engineering Research Center. June 1968.
- GALVIN, C. - Longshore current velocity: a review of theory and data.  
Reviews of Geophysics, Vol. 5, No. 3, Aug. 1967. Reprinted for U.S. Army Coastal Engineering Research Center. August 1967.
- GALVIN, C. and NELSON, R. - Compilation of longshore current data. Coastal Engineering Research Center. Miscellaneous paper No. 2-67. March 1967.
- GODDET, J. - Étude du début d'entraînement des matériaux mobiles sous l'action de la houle. La Houille Blanche n<sup>o</sup>. 2. Mars-Avril. Grenoble 1960.
- IVERSEN, H. - Laboratory study of breakers. University of California. Berkeley. California.
- KARASHEV, A. - Alongshore sediment transportation. I.A.H.R. Eleventh congress. Vol. V. Leningrad 1965.
- LARRAS, J. - Vitesses des courants dans les brisants. Cahiers Oceanographiques N<sup>o</sup>. 3. Mars 1969.
- L'HERMITTE, P. - Mouvement des matériaux de fond sous l'action de la houle. Annales des Ponts et Chaussées. N<sup>o</sup>. 3. Mai-Juin. Paris 1961.
- L.N.E.C. - Estudo experimental sobre a formação e evolução de flechas de areia. Relatório n<sup>o</sup>. 794. Lisboa 1955.
- SHEPARD, F. and SAYNER, D. - Longshore and coastal currents at Scripps Institution Pier. Bulletin of the Beach Erosion Board. Vol. VII. No.1. Jan. 1953.
- SONU, C. MCCLOY, J. and MCARTHUR, D. - Longshore currents and longshore topographies. Proceedings of tenth conference on Coastal Engineering. Vol. I. Japan 1966.

- THORNTON, E. - A field investigation of sand transport in the surf zone.  
Proceedings of eleventh conference on Coastal Engineering  
Vol. I. London 1968.
- THORNTON, E. - Variation of longshore current across the surf zone.  
Proceedings of twelfth conference on Coastal Engineering.  
Vol. I. Washington 1970.
- UNIVERSITY OF CALIFORNIA - Final report on sand transportation by wave  
action. Department of Engineering. Berkeley. California.  
1951.
- VERA-CRUZ, D. - Erosão de praias - Panorama geral. Situação em Portugal.  
Memória 370 do LNEC.
- WIEGEL, R. - Oceanographical engineering . 2nd ed. Prentice-Hall Inc.1965.
- ZENKOVITCH, V. and BOLDYREV, V. - Alongshore sediment streams and methods  
of their study. I.A.H.R. Eleventh Congress. Vol. V.  
Leningrad 1965.
- ZENKOVITCH, V. - Processes of coastal development. Oliver and Boyd Ltd.  
Edimburg and London 1967.



ANEXO I

ELEMENTOS PERTENCENTES A REVISÃO DOS CO  
NHECIMENTOS RELACIONADOS COM A PREVISÃO  
DO CAUDAL SÓLIDO LITORAL (CAP. III)



QUADRO 1 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. RESULTADOS DE EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO. KRUMBEIN.  
(ANEXO I)

Nº do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>S</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> x x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_S}{P_L}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_sa} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
1	1,14	2,03	0,063	17,5	23,90	0,180	0,079	0,303	0,031	126	<p>AUTOR: KRUMBEIN</p> <p>MATERIAL MOVEL:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- areia</li> <li>- <math>\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>- <math>d_{50} = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}</math></li> <li>- <math>m = 10^\circ</math></li> </ul> <p>OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- profundidade no tanque h = 0,396 m</li> <li>- ângulo do gerador com a praia α = 15°</li> <li>- comprimento da praia c = 12 m</li> </ul>
2	1,38	2,97	0,044	19,4	12,38	0,155	0,040	0,310	0,015	88	
3	1,44	3,23	0,035	20,0	11,52	0,145	0,025	0,461	0,011	70	
4	1,80	5,05	0,030	23,9	5,16	0,150	0,024	0,215	0,006	60	
5	1,69	4,46	0,030	22,7	4,81	0,140	0,021	0,229	0,007	60	
6	1,94	5,87	0,023	25,3	3,79	0,125	0,012	0,316	0,004	46	
7	2,04	6,49	0,026	26,8	4,29	0,130	0,017	0,252	0,004	52	
8	1,84	5,28	0,024	24,4	5,16	0,120	0,012	0,430	0,004	48	
9	1,56	3,80	0,030	21,0	6,19	0,140	0,019	0,326	0,008	60	
10	1,49	3,46	0,040	20,0	8,07	0,150	0,035	0,231	0,012	80	
11	1,65	4,25	0,032	22,4	5,16	0,150	0,025	0,206	0,008	64	
12	1,40	3,06	0,046	24,0	12,38	0,190	0,055	0,225	0,015	92	
13	1,10	1,89	0,072	17,2	32,84	0,190	0,106	0,310	0,038	144	
14	0,97	1,47	0,088	16,3	27,51	0,215	0,157	0,175	0,060	176	
15	1,25	2,44	0,059	18,3	17,16	0,175	0,074	0,232	0,024	118	

QUADRO 2 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. RESULTADOS DE EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO. SAVILLE.  
(ANEXO I)

Nº.º do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_L}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s \cdot d}{\gamma'_{sa}}}$	OBSERVAÇÕES
1	0,74	0,85	0,045	10,0	1,83	0,130	0,020	0,092	0,053	150	AUTOR: SAVILLE
2	0,85	1,13	0,039	10,2	3,15	0,115	0,015	0,210	0,035	130	MATERIAL MÓVEL:
3	0,94	1,38	0,035	10,5	4,91	0,100	0,012	0,409	0,026	117	- areia
4	1,00	1,56	0,034	10,8	4,45	0,100	0,012	0,371	0,022	113	- γ' = 1650 kg/m <sup>3</sup>
5	0,74	0,85	0,052	10,0	2,35	0,130	0,025	0,094	0,050	175	- d <sub>50</sub> = 0,3 x 10 <sup>-3</sup> m
6	0,84	1,10	0,045	10,2	3,82	0,120	0,020	0,191	0,040	150	OUTRAS CARACT.DOS ENSAIOS:
7	0,99	1,53	0,038	10,7	6,91	0,110	0,016	0,432	0,025	127	- ângulo do gerador com a praia
8	1,17	2,14	0,032	11,4	6,66	0,095	0,011	0,605	0,015	107	α = 10°
9	1,50	3,51	0,025	13,1	1,42	0,095	0,009	0,158	0,007	83	- comprimento da praia c = 18 m

QUADRO 3 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. RESULTADOS DE EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO. SHAY e JOHNSON.  
( ANEXO I)

No. do ensaio	T (s)	L <sub>o</sub> (m)	H <sub>o</sub> (m)	α <sub>o</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> x x cos α <sub>o</sub>	P <sub>l</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	Q' <sub>s</sub> P <sub>l</sub>	δ <sub>o</sub>	$\frac{H_o}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
1	1,40	3,06	0,027	13,0	2,31	0,095	0,009	0,244	0,009	90	<p>AUTOR: SHAY e JOHNSON</p> <p>MATERIAL MÓVEL:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- areia</li> <li>- γ'<sub>s</sub> = 1650 kg/m<sup>3</sup></li> <li>- d<sub>50</sub> = 0,3 x 10<sup>-3</sup> m</li> <li>- m = 5,75° (1/10)</li> </ul> <p>OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- profundidade no tanque: 0,426 a 0,517 m</li> <li>- ângulo do gerador com a praia: α = 10°</li> <li>- comprimento da praia c = 18 m</li> </ul>
2	1,38	2,97	0,028	12,7	2,84	0,100	0,011	0,269	0,010	93	
3	1,09	1,85	0,036	11,2	5,30	0,110	0,015	0,351	0,020	120	
4	1,08	1,82	0,029	11,0	5,33	0,095	0,008	0,636	0,016	97	
5	1,14	2,03	0,031	11,5	5,25	0,100	0,011	0,490	0,015	103	
6	1,13	1,99	0,031	11,4	6,93	0,100	0,011	0,652	0,015	103	
7	1,12	1,96	0,028	11,3	6,89	0,095	0,008	0,852	0,014	93	
8	1,07	1,79	0,036	11,0	4,61	0,110	0,015	0,309	0,020	120	
9	1,08	1,82	0,031	11,0	5,85	0,100	0,010	0,577	0,017	103	
10	1,08	1,82	0,035	11,0	4,89	0,105	0,014	0,361	0,019	117	
11	1,08	1,82	0,035	11,0	5,72	0,110	0,014	0,402	0,020	117	
12	1,00	1,56	0,038	10,9	5,96	0,110	0,016	0,384	0,024	127	
13	1,00	1,56	0,037	10,9	5,75	0,110	0,015	0,390	0,024	123	
14	1,00	1,56	0,034	10,9	5,64	0,105	0,012	0,478	0,022	113	
15	0,86	1,15	0,047	10,2	3,04	0,125	0,023	0,131	0,041	157	
16	0,86	1,15	0,045	10,2	3,07	0,120	0,020	0,150	0,039	150	
17	0,86	1,15	0,047	10,2	2,86	0,120	0,022	0,129	0,041	157	
18	1,14	2,03	0,033	11,5	7,58	0,100	0,012	0,626	0,016	110	



No. do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>00</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> x xcos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_L}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES	
19	0,76	0,90	0,057	20,0	6,15	0,265	0,064	0,096	0,063	190	AUTOR: SHAY e JOHNSON MATERIAL MÓVEL: idem OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - ângulo do gerador com a praia α = 20° - comprimento da praia c = 18 m	
20	0,86	1,15	0,058	20,2	9,64	0,250	0,071	0,137	0,050	193		
21	1,15	2,06	0,045	21,6	13,04	0,190	0,043	0,302	0,022	150		
22	1,25	2,44	0,041	22,3	7,60	0,180	0,037	0,206	0,017	137		
23	1,05	1,72	0,045	21,0	16,46	0,200	0,041	0,397	0,026	150		
24	1,05	1,72	0,045	21,1	14,03	0,200	0,041	0,338	0,026	150		
25	0,88	1,21	0,047	31,0	12,71	0,310	0,059	0,216	0,039	157		AUTOR: SHAY e JOHNSON MATERIAL MÓVEL: - areia - γ' <sub>s</sub> = 1650 kg/m <sup>3</sup> - d <sub>50</sub> = 0,3 x 10 <sup>-2</sup> m - m = 5,75° (1/10) OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - profundidade no tanque 0,426 a 0,517 m - ângulo do gerador com a praia α = 30° - comprimento da praia c = 18 m
26	0,88	1,21	0,050	31,0	6,99	0,315	0,068	0,103	0,041	167		
27	0,88	1,21	0,054	31,0	5,09	0,325	0,081	0,063	0,045	180		
28	0,88	1,21	0,045	31,0	4,34	0,305	0,053	0,082	0,037	150		
29	0,88	1,21	0,046	31,0	3,84	0,305	0,055	0,069	0,038	153		
30	0,88	1,21	0,048	31,0	5,46	0,310	0,061	0,089	0,039	160		
31	0,88	1,21	0,045	31,0	5,00	0,305	0,053	0,094	0,037	150		
32	0,88	1,21	0,045	31,2	2,43	0,305	0,053	0,046	0,037	150		
33	0,88	1,21	0,047	31,0	5,37	0,310	0,059	0,091	0,039	157		
34	0,88	1,21	0,049	31,0	3,49	0,315	0,065	0,054	0,041	163		
35	0,88	1,21	0,049	31,0	3,71	0,315	0,065	0,057	0,041	163		
36	0,75	0,88	0,054	30,4	1,26	0,360	0,077	0,016	0,062	180		
37	0,75	0,88	0,054	30,4	2,15	0,360	0,077	0,028	0,062	180		
38	0,75	0,88	0,053	30,4	2,02	0,355	0,073	0,027	0,060	177		

(Continuação)

N.º do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) × 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> × xcos α <sub>0</sub>	P <sub>l</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_l}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
39	1,00	1,56	0,041	32,2	4,95	0,270	0,044	0,112	0,026	137	<p>AUTOR: SHAY e JOHNSON</p> <p>MATERIAL MÓVEL:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- areia</li> <li>- <math>\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>- <math>d_{50} = 0,3 \times 10^{-3} \text{ m}</math></li> <li>- <math>m = 5,75^\circ (1/10)</math></li> </ul> <p>OUTRAS CARACT.DOS ENSAIOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- profundidade no tanque 0,426 a 0,517 m</li> <li>- ângulo do gerador com a praia <math>\alpha = 10^\circ</math></li> <li>- comprimento da praia c = 18 m</li> </ul>
40	1,00	1,56	0,048	32,2	7,36	0,290	0,065	0,113	0,031	160	
41	1,00	1,56	0,055	32,2	7,30	0,295	0,087	0,084	0,033	183	
42	1,50	3,51	0,020	40,1	1,47	0,195	0,011	0,129	0,006	68	
43	1,50	3,51	0,027	40,1	2,83	0,210	0,022	0,126	0,008	90	
44	1,50	3,51	0,026	40,1	2,83	0,210	0,021	0,136	0,008	87	
45	1,50	3,51	0,018	40,1	3,12	0,170	0,008	0,388	0,005	60	
46	1,50	3,51	0,022	40,1	3,62	0,200	0,014	0,255	0,006	73	
47	1,25	2,44	0,034	35,3	5,69	0,225	0,032	0,179	0,014	113	
48	1,25	2,44	0,031	35,3	7,08	0,220	0,026	0,275	0,013	103	
49	1,25	2,44	0,028	35,3	11,91	0,210	0,020	0,594	0,012	93	
50	1,25	2,44	0,029	35,3	8,93	0,210	0,022	0,415	0,012	97	
51	1,25	2,44	0,032	35,3	7,05	0,220	0,027	0,257	0,013	107	
52	1,10	1,89	0,041	34,0	5,42	0,260	0,047	0,116	0,022	137	
53	1,10	1,89	0,039	34,0	9,88	0,255	0,042	0,238	0,020	130	
54	1,10	1,89	0,037	34,0	6,00	0,255	0,037	0,160	0,020	123	
55	1,10	1,89	0,038	34,0	8,45	0,255	0,039	0,214	0,020	127	
56	1,37	2,93	0,025	37,5	1,37	0,210	0,018	0,078	0,009	83	
57	1,37	2,93	0,022	37,5	2,74	0,200	0,013	0,212	0,007	73	
58	1,37	2,93	0,021	37,5	2,55	0,200	0,012	0,216	0,007	70	

No. do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) × 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> × x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> (kg.m / m.s)	Q' <sub>s</sub> / P <sub>L</sub>	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{Y'_{sa}}{Y'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
59	0,76	0,90	0,059	30,2	5,22	0,360	0,093	0,056	0,066	197	AUTOR: SHAY e JOHNSON MATERIAL MÓVEL: - areia - $Y'_{sa} = 1650 \text{ kg/m}^3$ - $d_{50} = 0,3 \times 10^{-3} \text{ m}$ - $m = 5,75^\circ (1/10)$ OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - ângulo do gerador com a praia $\alpha = 30^\circ$ - comprimento da praia $c = 10 \text{ m}$ - profundidade no tanque: 0,426 a 0,517 m
60	0,86	1,15	0,054	30,7	11,13	0,325	0,079	0,140	0,047	180	
61	0,86	1,15	0,062	30,7	13,91	0,345	0,111	0,125	0,054	207	
62	1,00	1,56	0,054	31,5	29,55	0,295	0,084	0,352	0,035	180	
63	1,00	1,56	0,060	31,5	24,69	0,310	0,109	0,227	0,039	200	
64	1,15	2,06	0,045	33,0	17,09	0,260	0,059	0,289	0,022	150	
65	1,15	2,06	0,049	33,0	23,51	0,265	0,071	0,330	0,024	163	
66	1,25	2,44	0,043	34,2	14,65	0,245	0,055	0,265	0,018	143	
67	1,25	2,44	0,039	34,2	15,28	0,230	0,043	0,358	0,016	130	
68	0,76	0,90	0,058	40,4	8,99	0,410	0,102	0,088	0,064	193	AUTOR: SHAY e JOHNSON MATERIAL MÓVEL: idem OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS - ângulo do gerador com a praia $\alpha = 40^\circ$ - comprimento da praia $c = 10 \text{ m}$
69	0,86	1,15	0,053	41,0	15,83	0,365	0,086	0,184	0,046	177	
70	0,86	1,15	0,062	41,0	12,15	0,380	0,122	0,099	0,053	207	
71	0,86	1,15	0,054	41,0	9,40	0,365	0,089	0,105	0,047	108	
72	0,86	1,15	0,058	41,0	12,07	0,370	0,104	0,116	0,050	193	
73	0,93	1,35	0,054	41,5	19,05	0,345	0,091	0,209	0,040	180	
74	1,00	1,56	0,054	42,5	13,01	0,330	0,094	0,139	0,035	180	
75	1,00	1,56	0,060	42,2	20,34	0,340	0,119	0,170	0,038	200	

Nº. do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>S</sub> (kg/s) × 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> × x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> (kg.m / m.s)	Q' <sub>S</sub> / P <sub>L</sub>	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
76	1,05	1,72	0,051	42,6	15,44	0,305	0,081	0,190	0,029	170	AUTOR: SHAY e JOHNSON MATERIAL MÓVEL: idem OUTRAS CARACT.DOS ENSAIOS: - ângulo do gerador com a praia α = 40° - comprimento da praia c = 10 m
77	1,05	1,72	0,051	42,6	16,15	0,310	0,083	0,196	0,030	170	
78	1,15	2,06	0,050	44,1	15,76	0,290	0,081	0,194	0,025	167	
79	1,15	2,06	0,045	44,1	16,06	0,280	0,064	0,253	0,022	150	
80	1,25	2,11	0,038	46,1	10,74	0,250	0,044	0,244	0,016	127	
81	1,25	2,14	0,036	46,1	11,28	0,245	0,039	0,292	0,015	120	
82	0,76	1,90	0,061	50,4	4,54	0,410	0,113	0,040	0,068	203	AUTOR: SHAY e JOHNSON MATERIAL MÓVEL: - areia - γ' <sub>S</sub> = 1650 kg/m <sup>3</sup> - d <sub>50</sub> = 0,3 × 10 <sup>-3</sup> m - m = 5,75° (1/10) OUTRAS CARACT.DOS ENSAIOS: - ângulo do gerador com a praia α = 50° - comprimento da praia c = 10 m - profundidade no tanque 0,426 a 0,517 m
83	0,75	1,90	0,058	50,4	4,45	0,400	0,100	0,046	0,064	193	
84	0,56	1,15	0,061	51,1	6,78	0,370	0,115	0,059	0,053	203	
85	0,86	1,15	0,054	51,1	10,50	0,355	0,087	0,121	0,047	180	
86	0,86	1,15	0,055	51,1	8,86	0,355	0,090	0,098	0,048	183	
87	0,86	1,15	0,058	51,1	11,05	0,360	0,102	0,109	0,050	193	
88	1,00	1,56	0,053	53,4	11,13	0,305	0,084	0,133	0,034	177	
89	1,00	1,56	0,050	53,4	11,60	0,300	0,073	0,159	0,032	167	
90	1,00	1,56	0,051	53,4	13,87	0,305	0,077	0,179	0,033	170	
91	1,14	2,03	0,041	56,6	5,64	0,240	0,045	0,126	0,020	137	
92	1,14	2,03	0,042	56,6	9,99	0,245	0,048	0,208	0,021	140	
93	1,25	2,44	0,040	60,2	7,13	0,195	0,038	0,188	0,016	133	
94	1,25	2,44	0,042	60,2	7,05	0,200	0,043	0,164	0,017	140	

QUADRO 4 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. RESULTADOS DE EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO. SAUVAGE e VINCENT.  
(ANEXO I)

N.º do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> x x cos α <sub>0</sub>	P <sub>l</sub> ( $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_l}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_s} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
1	0,94	1,38	0,056	21	12,96	0,230	66,11	0,196	0,040	112	AUTOR: SAUVAGE e VINCENT
2	0,94	1,38	0,048	21	9,50	0,220	46,45	0,204	0,035	96	MATERIAL MÓVEL: - areia
3	0,94	1,38	0,031	21	4,32	0,190	16,73	0,258	0,023	63	- γ' <sub>s</sub> = 1650 kg/m <sup>3</sup> - d <sub>m</sub> = 0,5 x 10 <sup>-3</sup> m
4	0,94	1,38	0,028	21	4,32	0,185	13,29	0,325	0,021	469	AUTOR: SAUVAGE e VINCENT
5	0,94	1,38	0,027	21	3,42	0,180	12,02	0,284	0,020	451	MATERIAL MÓVEL:
6	0,94	1,38	0,023	21	2,88	0,170	8,24	0,349	0,017	385	- poliestireno
7	0,94	1,38	0,022	21	2,16	0,165	7,32	0,295	0,016	369	- γ' <sub>s</sub> = 100 kg/m <sup>3</sup>
8	0,94	1,38	0,017	21	1,26	0,155	4,11	0,307	0,013	285	- d <sub>m</sub> = 1,0 x 10 <sup>-3</sup> m
9	0,94	1,38	0,014	21	0,99	0,145	2,60	0,380	0,010	235	
10	0,94	1,38	0,037	21	20,88	0,200	25,09	0,832	0,027	101	AUTOR: SAUVAGE e VINCENT
11	0,94	1,38	0,039	21	17,46	0,210	29,27	0,596	0,028	105	MATERIAL MÓVEL:
12	0,94	1,38	0,038	21	16,20	0,205	27,79	0,583	0,027	103	- pedra-pomes
13	0,94	1,38	0,034	21	11,16	0,195	20,66	0,561	0,024	103	- γ' <sub>s</sub> = 400 kg/m <sup>3</sup>
14	0,94	1,38	0,033	21	10,08	0,195	19,46	0,518	0,023	89	- d <sub>m</sub> = 1,5 x 10 <sup>-3</sup> m
15	0,94	1,38	0,026	21	7,56	0,180	11,15	0,678	0,019	72	

OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - ângulo do gerador com a praia - 15°; profundidade do tanque - 0,15 m.

(Continuação)

No. do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>S</sub> (kg/s) × 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> × x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{s}}$ )	$\frac{Q'_S}{P_L}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_S}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
16	0,94	1,38	0,024	21	6,12	0,170	8,97	0,682	0,018	66	AUTOR: SAUVAGE e VINCENT MATERIAL MÓVEL: - pedra-pomes - γ' <sub>S</sub> = 400 kg/m <sup>3</sup> - d <sub>m</sub> = 1,5 × 10 <sup>-3</sup> OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - ângulo do gerador com a praia: 15° - profundidade do tanque: 0,15 m
17	0,94	1,38	0,021	21	5,40	0,165	6,67	0,810	0,016	58	
18	0,94	1,38	0,011	21	1,44	0,135	1,50	0,962	0,008	31	
19	0,75	0,88	0,053	18	20,52	0,235	48,27	0,425	0,061	146	
20	0,75	0,88	0,049	18	16,20	0,225	39,50	0,410	0,056	135	
21	0,75	0,88	0,038	18	10,26	0,210	22,17	0,463	0,043	104	
22	0,75	0,88	0,031	18	7,20	0,190	13,35	0,539	0,035	115	
23	0,75	0,88	0,020	18	2,88	0,165	4,83	0,597	0,023	55	
24	0,58	0,52	0,042	16	7,20	0,235	23,44	0,307	0,081	115	
25	0,58	0,52	0,031	16	4,32	0,210	11,41	0,378	0,060	84	
26	0,58	0,52	0,024	16	2,52	0,190	6,19	0,407	0,046	66	
27	1,32	2,70	0,029	28	21,24	0,185	20,02	1,061	0,011	80	
28	1,32	2,70	0,025	28	16,70	0,170	13,67	1,185	0,009	68	
29	1,32	2,70	0,020	28	10,44	0,160	8,24	1,267	0,007	54	
30	1,32	2,70	0,015	28	4,68	0,145	4,20	1,114	0,005	40	

QUADRO 5 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. RESULTADOS DE EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO. MOTTA.  
(ANEXO I)

No. do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) × 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> × x cos α <sub>0</sub>	P <sub>1</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_1}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
1	1,70	4,50	0,023	17	1,9	0,100	8,8	0,217	0,005	121	AUTOR: MOTTA MATERIAL MÓVEL: - areia - $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ - $d = 0,19 \times 10^{-3} \text{ m}$  OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - profundidade no tanque 0,30 m
2	1,42	3,12	0,043	14	1,7	0,115	29,4	0,058	0,014	226	
3	1,42	3,12	0,032	14	0,8	0,105	14,9	0,054	0,010	168	
4	1,42	3,12	0,021	14	0,7	0,100	6,1	0,115	0,007	111	
5	1,27	2,54	0,054	13	1,4	0,125	45,1	0,031	0,021	284	
6	1,27	2,54	0,043	13	1,1	0,115	26,3	0,042	0,017	226	
7	1,27	2,54	0,033	13	0,7	0,105	14,2	0,049	0,013	174	
8	1,13	2,00	0,044	13	0,7	0,125	26,7	0,026	0,022	232	
9	1,13	2,00	0,033	13	0,8	0,115	13,8	0,051	0,017	174	
10	0,99	1,53	0,043	12	1,1	0,125	22,3	0,049	0,028	226	
11	0,88	1,22	0,043	7	1,5	0,080	12,7	0,118	0,035	226	
12	0,88	1,22	0,038	7	1,0	0,075	9,3	0,108	0,031	200	
13	0,88	1,22	0,035	7	0,8	0,075	7,9	0,101	0,029	184	
14	0,88	1,22	0,032	7	0,3	0,070	6,2	0,049	0,026	168	

QUADRO 6 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. RESULTADOS DE EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO. LARRAS e BONNEFILLE.  
(ANEXO I)

Nº do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> x x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{kg \cdot m}{m \cdot s}$ )	$\frac{Q'_s}{P_L}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}}}$	OBSERVAÇÕES
1	1,80	0,998	0,051	20	2,0	0,250	50,7	0,039	0,051	283	AUTOR: LARRAS e BONNEFILLE MATERIAL MÓVEL: - areia - $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ - $d_m = 0,18 \times 10^{-3}$
2	1,00	1,560	0,022	21	2,6	0,160	7,6	0,344	0,014	122	
3	1,00	1,560	0,043	21	2,5	0,210	37,9	0,066	0,028	239	
4	1,00	1,560	0,065	21	4,9	0,240	98,9	0,050	0,042	361	
5	1,50	3,510	0,022	27	3,4	0,150	10,6	0,320	0,006	122	
6	1,50	3,510	0,045	27	6,0	0,190	56,3	0,107	0,013	250	
7	1,50	3,510	0,067	27	11,3	0,190	124,7	0,091	0,019	372	
8	1,50	3,510	0,067	27	31,7	0,220	144,4	0,219	0,019	122	AUTOR: LARRAS e BONNEFILLE MATERIAL MÓVEL - areia - $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ - $d_m = 0,55 \times 10^{-3}$
9	1,50	3,510	0,101	27	72,0	0,255	380,4	0,189	0,029	184	
10	1,00	1,560	0,065	21	10,6	0,240	98,9	0,107	0,042	118	
11	1,00	1,560	0,113	21	24,0	0,290	361,0	0,066	0,072	205	
12	1,75	4,800	0,111	31	94,4	0,255	536,1	0,176	0,023	202	
13	1,75	4,800	0,088	31	121,5	0,230	303,9	0,400	0,018	160	
14	1,00	1,560	0,065	21	27,7	0,240	98,9	0,280	0,042	118	
15	1,25	2,450	0,115	24	56,2	0,280	451,3	0,125	0,047	209	

OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - profundidade no tanque - h = 0,40m; ângulo do gerador com a praia α = 20°



(Continuação)

Nº do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (º)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> x x cos α <sub>0</sub>	P <sub>l</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	Q' <sub>s</sub> P <sub>l</sub>	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s \cdot d}{\gamma'_{sa}}}$	OBSERVAÇÕES
16	1,75	2,440	0,090	24	74,1	0,240	324,4	0,228	0,019	99	<p>AUTOR: LARRAS e BONNEFILLE</p> <p>MATERIAL MÓVEL:</p> <p>- areia</p> <p>- <math>\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3</math></p> <p>- <math>d_m = 0,90 \times 10^{-3} \text{ m}</math></p> <p>OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS:</p> <p>- profundidade no tanque <math>h = 0,4 \text{ m}</math></p> <p>- ângulo do gerador com a praia <math>\alpha = 20^\circ</math></p>
17	1,00	1,560	0,108	21	29,4	0,280	318,4	0,092	0,069	120	
18	1,00	1,560	0,086	21	46,2	0,265	191,1	0,242	0,055	96	
19	1,00	1,560	0,129	21	46,1	0,300	486,7	0,095	0,083	143	
20	1,25	2,440	0,090	24	30,4	0,255	251,7	0,121	0,037	100	
21	1,25	2,440	0,132	24	59,5	0,290	615,8	0,097	0,054	147	
22	1,50	3,500	0,157	27	111,1	0,295	1063,5	0,104	0,045	174	
23	1,50	3,500	0,146	27	96,0	0,290	904,1	0,106	0,042	162	
24	1,50	3,500	0,135	27	103,0	0,285	759,6	0,136	0,039	150	
25	1,75	4,780	0,140	31	273,9	0,280	936,4	0,293	0,029	156	
26	1,40	3,060	0,133	26	101,8	0,285	688,1	0,148	0,044	148	
27	1,60	4,000	0,135	28	113,6	0,275	781,9	0,145	0,034	150	
28	1,80	5,030	0,133	32	200,0	0,270	838,2	0,239	0,026	148	
29	1,25	2,440	0,132	24	70,1	0,290	615,8	0,114	0,054	147	
30	1,25	2,440	0,110	24	44,6	0,270	398,2	0,112	0,045	122	
31	1,50	3,490	0,112	27	122,9	0,265	486,2	0,253	0,032	124	
32	1,75	4,780	0,111	31	139,4	0,255	536,1	0,260	0,023	123	
33	1,25	2,440	0,088	24	22,2	0,250	236,0	0,094	0,036	98	
34	1,25	2,440	0,066	24	20,5	0,230	122,1	0,168	0,027	73	

(Continuação)

Nº. do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) × 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> × x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_L}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
35	1,00	1,560	0,065	21	7,4	0,240	98,9	0,075	0,042	72	AUTOR: LARRAS e BONNEFILLE MATERIAL MÓVEL: - areia - γ' <sub>s</sub> = 1650 kg/m <sup>3</sup> - d <sub>m</sub> = 0,90 × 10 <sup>-3</sup> m
36	0,75	0,870	0,061	20	4,8	0,275	74,8	0,064	0,070	68	
37	1,50	3,500	0,067	27	103,7	0,220	144,4	0,718	0,019	74	
38	1,50	3,500	0,090	27	133,4	0,245	290,2	0,460	0,026	100	
39	1,25	2,440	0,165	24	113,3	0,310	1029,0	0,110	0,068	183	AUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - profundidade no tanque h = 0,4 m - ângulo do gerador com a praia α = 20°
40	1,75	4,780	0,067	31	113,3	0,210	160,8	0,704	0,014	74	
41	1,75	4,780	0,044	31	29,3	0,185	61,1	0,479	0,009	49	
42	1,50	3,500	0,045	27	28,3	0,190	56,3	0,503	0,013	50	
43	1,25	2,440	0,044	24	10,0	0,200	47,2	0,212	0,018	49	
44	1,00	1,560	0,043	21	9,1	0,210	37,9	0,240	0,028	48	
45	0,75	0,870	0,040	20	4,3	0,240	28,1	0,153	0,046	44	
46	1,25	2,440	0,029	24	2,4	0,170	17,4	0,138	0,012	16	AUTOR: LARRAS e BONNEFILLE MATERIAL MÓVEL: - areia - γ' <sub>s</sub> = 1650 kg/m <sup>3</sup> - d <sub>m</sub> = 1,8 × 10 <sup>-3</sup> m
47	1,50	3,510	0,080	27	39,4	0,235	220,0	0,179	0,023	44	
48	1,00	1,560	0,049	21	6,4	0,225	52,7	0,122	0,031	27	
49	1,00	1,560	0,058	21	8,1	0,235	77,1	0,105	0,037	32	
50	1,25	2,440	0,088	24	35,0	0,255	240,7	0,145	0,036	49	AUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS - idem
51	1,25	2,440	0,107	24	48,0	0,270	376,7	0,127	0,044	59	
52	1,1	1,890	0,092	22	24,0	0,265	240,6	0,100	0,049	51	
53	1,0	1,560	0,105	21	20,9	0,275	295,6	0,071	0,067	58	

(Continuação)

Nº.º do ensaio	T (s)	L <sub>o</sub> (m)	H <sub>o</sub> (m)	α <sub>o</sub> (º)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> x x cos α <sub>o</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_L}$	δ <sub>o</sub>	$\frac{H_o}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
54	1,0	1,560	0,032	21	0,4	0,190	19,0	0,021	0,021	13	AUTOR: LARRAS e BONNEFILLE MATERIAL MÓVEL: - areia - $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ - $d_m = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m}$ OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - profundidade no tanque h = 0,4 m - ângulo do gerador com a praia α = 20°
55	1,0	1,560	0,056	21	3,4	0,225	68,8	0,049	0,036	22	
56	1,1	1,890	0,074	22	10,6	0,245	143,9	0,074	0,039	30	
57	1,1	1,890	0,077	22	12,5	0,250	159,0	0,079	0,041	31	
58	0,80	1,000	0,048	20	0,8	0,240	43,1	0,019	0,048	19	
59	1,25	2,440	0,110	24	63,4	0,275	405,5	0,156	0,045	44	
60	0,80	1,000	0,061	20	0,6	0,260	75,5	0,008	0,061	24	
61	1,00	1,560	0,100	21	24,0	0,285	277,9	0,086	0,064	40	
62	0,80	1,000	0,098	20	5,8	0,305	228,5	0,025	0,098	39	
63	1,00	1,560	0,108	21	9,6	0,280	318,4	0,030	0,069	27	
64	1,50	3,500	0,110	27	14,4	0,265	469,0	0,031	0,032	28	
65	1,25	2,450	0,110	24	12,5	0,270	398,2	0,031	0,045	28	
66	1,75	4,800	0,089	31	12,5	0,240	324,4	0,039	0,019	22	
67	1,50	3,500	0,090	27	9,3	0,245	290,2	0,032	0,026	23	
68	1,25	2,440	0,088	24	5,9	0,250	236,0	0,025	0,036	22	
69	1,00	1,560	0,086	21	3,2	0,260	187,5	0,017	0,055	22	
70	1,75	4,800	0,067	31	5,9	0,215	164,7	0,036	0,014	17	
71	1,50	3,500	0,067	27	3,2	0,220	144,4	0,022	0,019	17	

QUADRO 7 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. RESULTADOS DE EXPERIÊNCIAS DE LABORATÓRIO. LEPETIT.  
(ANEXO I)

No. do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub>	Q' <sub>s</sub> (kg/s) × 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> × × cos α <sub>0</sub>	P <sub>l</sub> ( $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$ )	$\frac{Q'_s}{P_l}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
1	0,80	1,00	0,010	20	0,5	0,145	1,1	0,442	0,010	103	<p>AUTOR: LEPETIT</p> <p>MATERIAL MÓVEL:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- baquelite</li> <li>- <math>\gamma'_s = 350 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>- <math>d_m = 0,45 \times 10^{-3} \text{ m}</math></li> </ul> <p>OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- profundidade no tanque 0,40 m</li> <li>- ângulo do gerador coma praia <math>\alpha = 20^\circ</math></li> <li>- comprimento da praia.</li> </ul>
2	0,80	1,00	0,015	20	1,2	0,160	2,8	0,427	0,015	155	
3	0,80	1,00	0,020	20	1,9	0,180	5,6	0,338	0,020	207	
4	0,80	1,00	0,026	20	3,8	0,195	10,3	0,369	0,026	273	
5	0,80	1,00	0,031	20	4,1	0,210	15,7	0,261	0,031	324	
6	0,80	1,00	0,036	20	8,8	0,215	21,7	0,405	0,036	376	
7	1,00	1,56	0,005	21	0,02	0,098	0,24	0,082	0,003	52	
8	1,00	1,56	0,011	21	0,8	0,125	1,5	0,543	0,007	113	
9	1,00	1,56	0,016	21	0,8	0,150	3,7	0,214	0,010	169	
10	1,00	1,56	0,022	21	1,3	0,160	7,5	0,172	0,014	230	
11	1,00	1,56	0,027	21	1,7	0,170	12,1	0,141	0,017	282	
12	1,00	1,56	0,032	21	2,5	0,190	19,0	0,132	0,021	334	
13	1,50	3,50	0,005	27	0,02	0,093	0,3	0,059	0,0014	52	
14	1,50	3,50	0,011	27	0,2	0,109	1,9	0,104	0,003	113	
15	1,50	3,50	0,017	27	0,8	0,140	5,9	0,135	0,005	179	
16	1,50	3,50	0,022	27	1,1	0,150	10,6	0,104	0,006	230	
17	1,50	3,50	0,028	27	1,4	0,165	18,9	0,074	0,008	291	
18	1,50	3,50	0,034	27	2,4	0,180	30,4	0,079	0,010	357	

(Continuação)

N.º do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (º)	Q' <sub>s</sub> (kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>0</sub> x x cos α <sub>0</sub>	P <sub>L</sub> ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$\frac{Q'_s}{P_L}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_{sa}} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
19	0,80	1,00	0,010	20	1,9	0,140	1,1	1,740	0,010	38	AUTOR: LEPETIT
20	0,80	1,00	0,015	20	2,5	0,160	2,8	0,890	0,015	56	MATERIAL MÓVEL:
21	0,80	1,00	0,020	20	3,2	0,180	5,6	0,570	0,020	71	- baquelite
22	0,80	1,00	0,026	20	5,1	0,195	10,3	0,496	0,026	94	- γ' <sub>s</sub> = 350 kg/m <sup>3</sup>
23	0,80	1,00	0,031	20	7,0	0,210	15,7	0,445	0,031	108	- d <sub>m</sub> = 1,3 x 10 <sup>-3</sup> m
24	0,80	1,00	0,036	20	10,2	0,215	21,7	0,469	0,036	132	OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS
25	0,80	1,00	0,041	20	10,8	0,230	30,1	0,358	0,041	150	- profundidade no tanque
26	0,80	1,00	0,046	20	11,3	0,235	38,8	0,291	0,046	165	0,40 m
27	0,80	1,00	0,051	20	12,0	0,250	50,7	0,237	0,051	183	- ângulo do gerador com a
28	0,80	1,00	0,055	20	11,3	0,255	62,4	0,181	0,056	202	praia
29	0,80	1,00	0,061	20	12,5	0,260	75,5	0,166	0,061	221	α = 20º
30	1,00	1,56	0,011	21	0,3	0,130	1,5	0,196	0,007	38	
31	1,00	1,56	0,016	21	2,0	0,150	3,7	0,534	0,010	56	
32	1,50	3,50	0,039	30	17,2	0,195	43,4	0,397	0,011	141	
33	1,50	3,50	0,043	33	18,3	0,210	56,8	0,322	0,012	155	

(Continuação)

№ do ensaio	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	(kg/s) x 10 <sup>-3</sup>	sen α <sub>b</sub> x x cos α <sub>0</sub>	P <sub>l</sub> ( $\frac{kg \cdot m}{m \cdot s}$ )	$\frac{Q'_s}{P_l}$	δ <sub>0</sub>	$\frac{H_0}{\frac{\gamma'_s}{\gamma'_s} \cdot d}$	OBSERVAÇÕES
34	1,50	3,50	0,051	39	26,0	0,240	91,3	0,285	0,015	183	AUTOR: LEPETIT MATERIAL MÓVEL: - baquelite - $\gamma'_s = 350 \text{ kg/m}^3$ - $d = 1,3 \times 10^{-3} \text{ m}$  OUTRAS CARACT. DOS ENSAIOS: - profundidade no tanque 0,40 m - ângulo do gerador com a praia α = 20°
35	1,00	1,56	0,022	21	3,2	0,160	7,5	0,424	0,014	78	
36	1,00	1,56	0,027	21	6,8	0,170	12,1	0,560	0,017	99	
37	1,00	1,56	0,035	21	12,9	0,190	22,7	0,568	0,022	127	
38	1,00	1,56	0,043	21	22,1	0,210	37,9	0,584	0,028	155	
39	1,00	1,56	0,048	21	26,7	0,215	48,3	0,553	0,031	174	
40	1,00	1,56	0,054	21	31	0,225	64,0	0,485	0,035	197	
41	1,00	1,56	0,059	21	31,3	0,230	78,1	0,401	0,038	66	
42	1,00	1,56	0,065	21	35,9	0,240	98,9	0,363	0,042	235	
43	1,50	3,50	0,011	27	1,1	0,109	1,9	0,570	0,003	38	
44	1,50	3,50	0,017	27	2,4	0,140	5,9	0,406	0,005	61	
45	1,50	3,50	0,022	27	5,1	0,150	10,6	0,480	0,006	80	
46	1,50	3,50	0,028	27	6,9	0,165	18,9	0,365	0,008	103	
47	1,50	3,50	0,034	27	15,0	0,180	30,4	0,493	0,010	122	

QUADRO 8 - ENSAIOS DE SAUVAGE E VINCENT COM VARIAÇÃO DA OBLIQUIDADE DAS ONDAS  
(ANEXO I)

T = 0,94 s;  $H_{0,15} = 0,026$  m;  $L_0 = 1,38$  m.

$H_0$ (cm)	$\delta_0$	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$\alpha_0$ ( $^\circ$ )	$\text{sen} \alpha_b \cdot \cos \alpha_0$	$P_t$ ( $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{s}}$ ) $\times 10^{-3}$	$P_l$ ( $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{s}}$ ) $\times 10^{-3}$	$P_l$ l/min	$Q'_s$ (kg/s) $\times 10^{-3}$	$\frac{Q'_s}{P_t}$	$\frac{Q'_s}{P_l}$
2,6	0,019	10,0	13,7	0,140	61,95	8,67	1,40	5,04	0,081	0,581
2,6	0,019	15,0	20,7	0,175	61,95	10,84	2,10	7,56	0,122	0,697
2,7	0,019	20,0	27,8	0,220	66,82	14,70	2,70	9,72	0,145	0,661
2,7	0,020	25,0	35,2	0,260	66,82	17,37	3,05	10,98	0,164	0,632
2,8	0,020	30,0	43,0	0,275	71,66	19,76	3,30	11,88	0,166	0,601
3,0	0,022	35,0	51,5	0,265	82,49	21,85	3,60	12,96	0,157	0,593
3,3	0,024	40,0	61,3	0,220	99,81	21,96	3,85	13,86	0,139	0,631
4,3	0,031	45,0	74,8	0,143	169,46	24,23	4,30	15,48	0,091	0,639

QUADRO 9 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. MEDIÇÕES NA NATUREZA. WATTS (1953)  
(ANEXO I)

DATAS (1952)	PERÍODO DE TEMPO (DIAS)	$P_1$ (kg/m.s)	$Q'_s$ (kg/s)	$R = \frac{Q'_s}{P_1}$
Cálculos baseados em dados mensais (9 a 30 dias)				
7 a 31/3	24,23	5,460	2,383	0,436
3 a 30/4	25,17	4,095	1,884	0,460
1 a 31/5	30,83	1,837	0,670	0,365
2 a 11/6	9,17	0,971	0,499	0,514
Cálculos baseados em dados diários (0,3 a 4 dias)				
7 a 9/3	2,17	19,004	6,264	0,330
16 a 18/3	2,00	18,689	2,873	0,154
28 a 30/3	2,17	9,555	3,522	0,369
30 a 31/3	0,5	23,624	11,354	0,481
7 a 8/4	1,33	5,827	2,497	0,429
16 a 19/4	3,17	23,939	3,557	0,149
30/4 a 2/5	2,00	13,308	3,005	0,226
12 a 16/5	4,17	8,505	2,891	0,340
27 a 28/5	0,5	2,310	1,332	0,577
28/5	0,33	7,560	1,997	0,264
29 a 30/5	0,5	2,100	1,997	0,951
2 a 3/6	1,66	4,410	1,200	0,272



QUADRO 10 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. MEDIÇÕES  
 (ANEXO I)  
 NA NATUREZA. CALDWELL. (1956)

Data do levantamento hidrográfico	Intervalo em dias	$P_1$ (kg.m/m.s)	$Q'_S$ (kg/s)	$R = \frac{Q'_S}{P_1}$
29/ 3/48	65	32,549 N	10,250 N	0,315
1/ 6/48	66	93,446 S	18,660 S	0,200
6/ 8/48	95	12,600 N	2,654 N	0,210
9/11/48	77	65,622 N	5,414 N	0,083
25/ 1/49	73	55,648 N	14,718 N	0,264
8/ 4/49	123	8,925 S	7,403 S	0,829
19/ 8/49				

NOTA: As medidas das grandezas  $P_1$  e  $Q'_S$  apresentam-se seguidas pelas letras N ou S conforme são de sentido dirigido para norte ou para sul.

QUADRO 1.1 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. MEDI-  
 (ANEXO I) ÇÕES NA NATUREZA. KOMAR (1968)

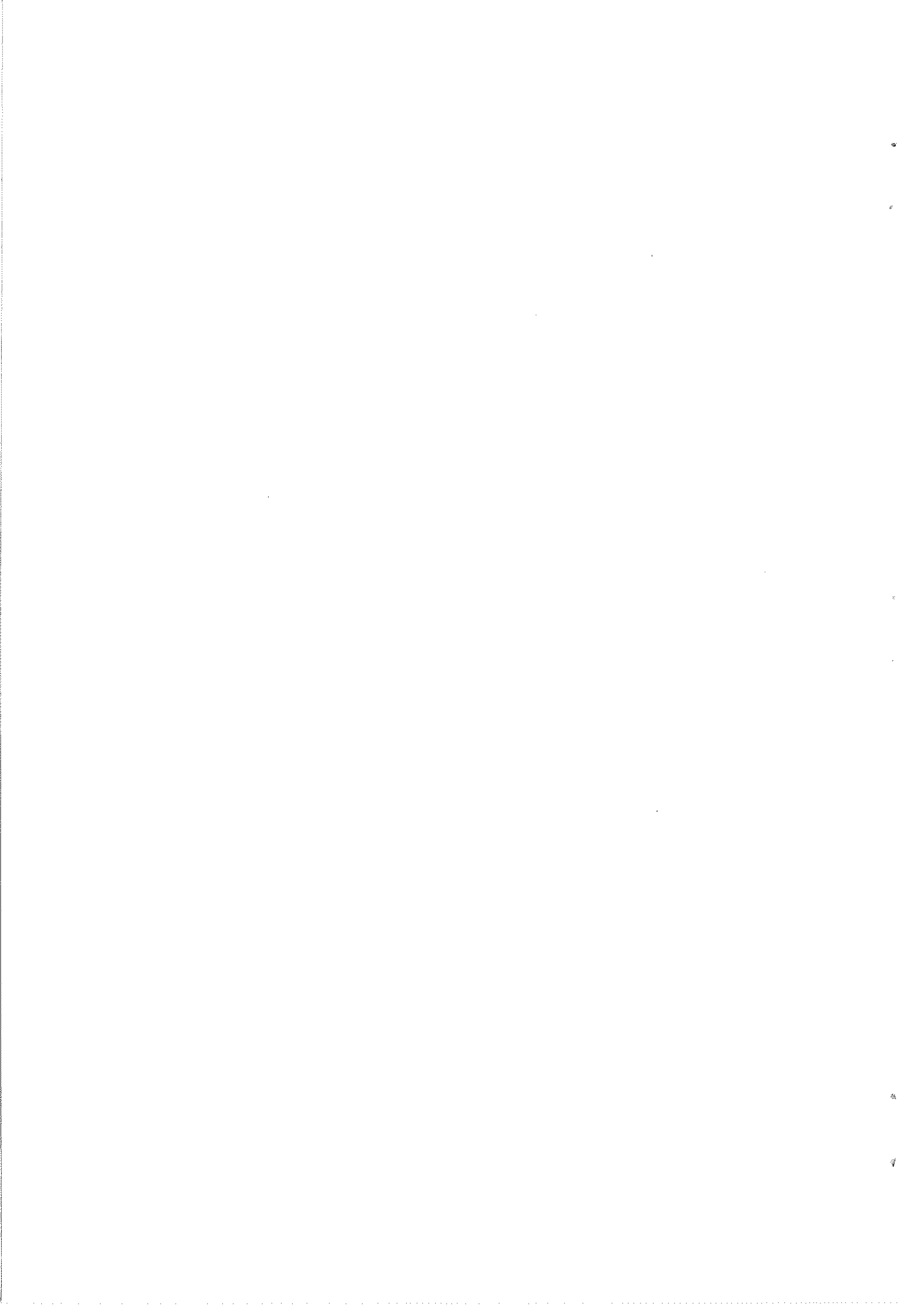
DATA	$P_1$ (kg.m/m.s)	$Q'_s$ (kg/s)	$R = \frac{Q'_s}{P_1}$
4/ 5/66	4,384	4,450	1,015
5/ 5/66	10,604	8,305	0,783
11/10/66	3,045	2,540	0,834
13/10/66	1,522	0,937	0,616
22/ 5/67	2,047	1,437	0,702
22/ 5/67	3,885	4,214	1,085
23/ 5/67	0,630	0,596	0,946
23/ 5/67	1,837	0,876	0,477
28/ 1/68	0,630	0,289	0,459
11/ 5/68	1,837	2,032	1,106
14/11/67	1,522	1,262	0,829
22/11/67	38,848	29,786	0,767
4/ 9/68	9,292	4,643	0,500
5/ 9/68	4,147	3,723	0,898

QUADRO 12 - CAUDAL SÓLIDO LITORAL. MEDI-  
(ANEXO I)  
ÇÕES NA NATUREZA. INGLE (1966)

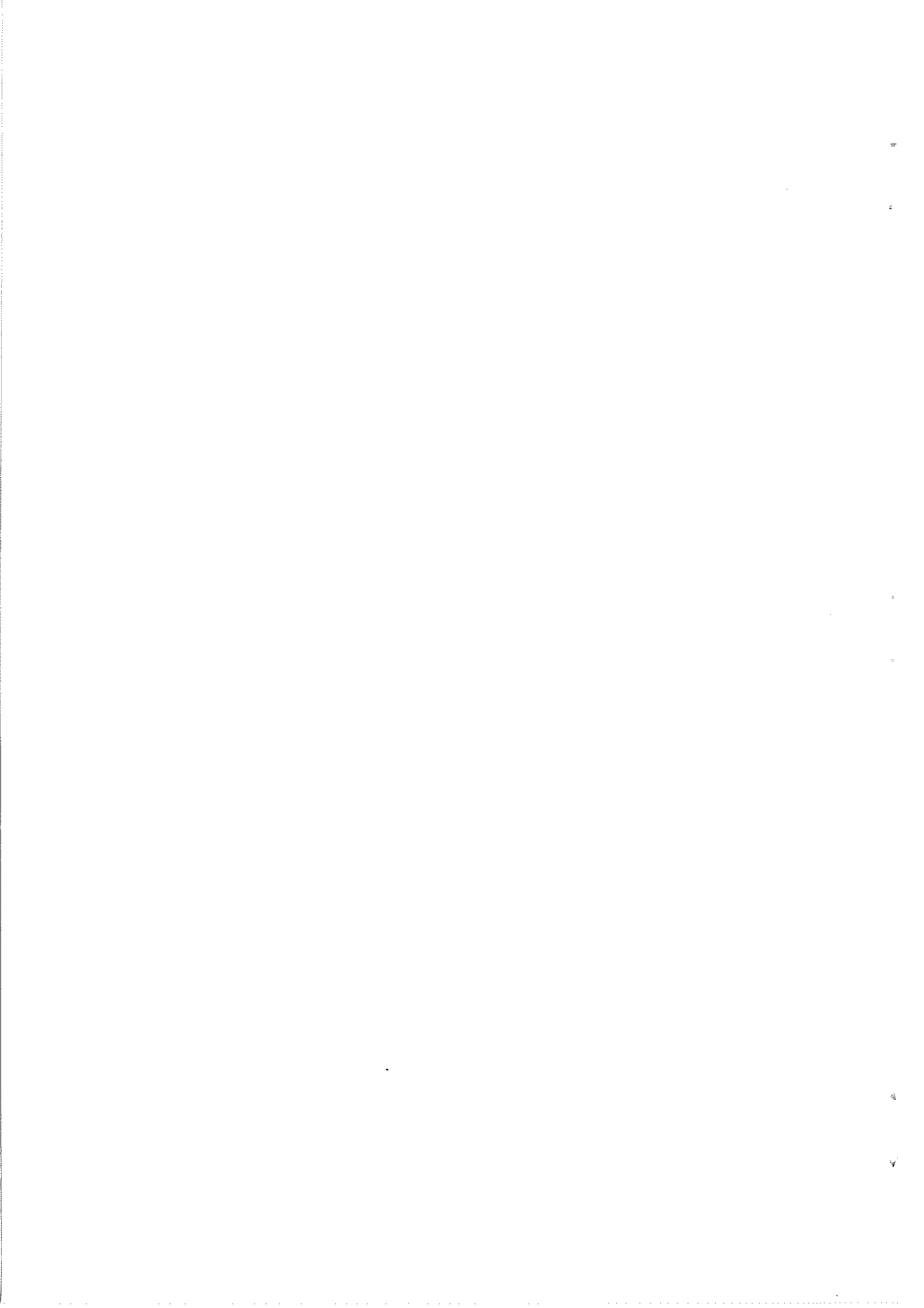
Local	Data	Diâmetro (m) $\times 10^{-3}$	$Q'_s$ (kg/s)	$P_1$ ( $\frac{kg \cdot m}{m \cdot s}$ )	$R = \frac{Q'_s}{P_1}$
Praia de Goleta Point	30/ 4/1961	0,287	23,732	71,661	0,331
	29/ 5/1961	0,238	12,422	34,292	0,362
	22/ 7/1961	0,146	0,797	34,518	0,023
	6/ 9/1961	-	1,848	12,925	0,143
	20/10/1961	0,139	0,701	17,781	0,039
	6/12/1961	-	9,698	13,912	0,697
	26/ 1/1962	0,198	6,176	21,498	0,287
	16/ 3/1962	0,178	3,942	18,915	0,208
Praia de Trancas	26/ 2/1961	0,186	3,601	26,900	0,134
	11/ 4/1961	-	9,523	20,921	0,455
	12/ 4/1961	0,309	9,777	26,853	0,364
	1/ 6/1961	0,191	1,857	46,620	0,281
	20/ 7/1961	0,153	1,025	39,353	0,026
	1/ 9/1961	0,193	8,655	48,672	0,178
	18/10/1961	0,174	2,646	35,090	0,075
	30/11/1961	0,250	14,639	36,602	0,400
	19/ 1/1962	0,173	3,662	25,494	0,144
	14/ 3/1962	0,377	9,304	17,645	0,527

(Continuação)

Local	Data	Diâmetro (m) $\times 10^{-3}$	$Q'_s$ (kg/s)	$P_1$ ( $\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ )	$R = \frac{Q'_s}{P_1}$
Praia de Santa Mónica	28/ 2/1961	0,305	12,054	32,066	0,376
	10/ 4/1961	0,428	9,015	36,240	0,249
	26/ 5/1961	0,214	3,171	22,816	0,139
	17/ 6/1961	0,166	0,657	5,449	0,121
	25/ 9/1961	0,195	7,622	41,821	0,182
	24/10/1961	0,143	0,657	12,427	0,053
	1/12/1961	0,372	1,305	26,171	0,050
	24/ 1/1962	0,230	2,751	6,442	0,427
	15/ 3/1962	0,271	2,663	4,583	0,581
Praia de Huntington	3/ 3/1961	-	12,291	11,975	1,026
	25/ 4/1961	0,155	1,025	47,443	0,022
	9/ 6/1961	0,240	11,695	35,017	0,334
	21/ 7/1961	0,165	1,822	34,019	0,054
	5/ 9/1961	0,294	25,186	95,842	0,263
	17/10/1961	-	6,509	23,089	0,282
	5/12/1961	0,151	0,657	11,613	0,057
	25/ 1/1962	0,155	2,103	100,058	0,021
	22/ 3/1962	0,221	4,389	21,546	0,204
Praia de la Jolla	8/ 3/1961	0,183	3,592	35,925	0,100
	24/ 4/1961	-	3,452	45,270	0,076
	25/ 5/1961	0,190	8,182	42,955	0,190
	11/ 7/1961	0,169	3,189	36,240	0,088
	28/ 8/1961	0,164	1,542	17,781	0,087
	17/10/1961	0,150	1,586	62,915	0,025
	28/11/1961	0,168	1,445	4,809	0,300
	17/ 1/1962	0,168	0,648	8,074	0,080
	12/ 3/1962	0,173	1,875	43,228	0,043



ANEXO II  
ELEMENTOS PERTENCENTES AO ES  
TUDO EXPERIMENTAL (CAP. IV)



QUADRO 1 (ANEXO II) - RESULTADOS DO PRESENTE ESTUDO EXPERIMENTAL. VA

LORES DOS PARÂMETROS ADIMENSIONAIS: R,  $\delta_o$  e D

Nº. DO ENSAIO	MATERIAL	MOVEL	T (s)	$L_o$ (m)	$H_o$ (m)	$\alpha_o$ (°)	$P_L$ (kg.m/m.s)	$Q'_S$ (kg/s)	$R = \frac{Q'_S}{P_L}$	$\delta_o = \frac{H_o}{L_o}$	$D = \frac{H_o}{d \left( \frac{V'_S}{V'_S a} \right)}$
P1	Pedra-pomes ( $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ ; $d_{50} = 1,62 \text{ mm}$ )		0,80	$99,8 \times 10^{-2}$	0,010	30,0	$1,5 \times 10^{-3}$	$0,30 \times 10^{-3}$	0,200	0,010	23
P2			0,80	99,8	0,020	30,0	7,5	2,08	0,277	0,020	45
P3			0,80	99,8	0,030	30,0	19,3	8,10	0,420	0,030	68
P4			0,80	99,8	0,040	30,0	38,1	15,17	0,398	0,040	90
P5			0,80	99,8	0,050	30,0	64,4	28,08	0,436	0,050	113
P6			0,80	99,8	0,009	30,0	1,1	0,14	0,127	0,009	20
P7			1,60	399,3	0,023	50,0	14,0	3,11	0,222	0,006	52
P8			1,60	399,3	0,026	30,0	17,0	7,02	0,406	0,007	59
P9			1,20	224,6	0,026	30,0	15,8	3,43	0,217	0,012	59
P10			1,00	156,0	0,019	30,0	7,0	1,62	0,231	0,012	43
P11			1,40	305,8	0,024	30,0	13,0	2,70	0,208	0,008	54
P12			1,60	399,3	0,020	30,0	9,3	3,75	0,402	0,005	45

PROFUNDIDADE NO TANQUE: ENSAIOS P1 a P7 - 0,30 m; ENSAIOS P8 a P16 - 0,40 m.



(Continuação)

N.º DO ENSAIO	MATERIAL MÓVEL	T (s)	L <sub>o</sub> (m)	H <sub>o</sub> (m)	α <sub>o</sub> (o)	P <sub>L</sub> (kg.m/m.s)	Q' <sub>s</sub> (kg/s)	R = $\frac{Q'_s}{P_L}$	$\delta_o = \frac{H_o}{L_o}$	D = $\frac{H_o}{d(\gamma'_s/\gamma'_{sa})}$
P13	PEDRA-POMES ( $\gamma'_s = 450 \text{ kg/m}^3$ , $d_{50} = 1,62 \text{ mm}$ )	0,60	56,2x10 <sup>-2</sup>	0,020	30,0	6,8x10 <sup>-3</sup>	1,94x10 <sup>3</sup>	0,285	0,036	45
P14		1,40	305,8	0,020	30,0	9,0	1,84	0,204	0,007	45
P15		0,80	99,8	0,050	15,0	37,1	10,26	0,277	0,050	113
P16		0,80	99,8	0,035	15,0	16,3	4,81	0,295	0,035	79
P17		0,80	99,8	0,015	15,0	2,2	0,22	0,100	0,015	34
P18		0,80	99,8	0,025	15,0	7,3	2,00	0,274	0,025	37
B1	BAQUELITE ( $\gamma'_s = 50 \text{ kg/m}^3$ , $d_{50} = 0,94 \text{ mm}$ )	0,80	99,8	0,035	15,0	16,3	5,46	0,335	0,035	176
B2		0,80	99,8	0,015	15,0	2,2	0,48	0,218	0,015	75
B3		0,80	99,8	0,025	15,0	7,3	2,02	0,277	0,025	125
C1	CASCA DE NOZ ( $\gamma'_s = 270 \text{ kg/m}^3$ , $d_{50} = 1,65 \text{ mm}$ )	0,80	99,8	0,025	15,0	7,3	0,99	0,136	0,025	93
C2		0,80	99,8	0,015	15,0	2,2	0,19	0,086	0,016	56
C3		0,80	99,8	0,035	15,0	16,3	2,40	0,147	0,035	130

PROFUNDIDADE NO TANQUE: - 0,40 m.

(Continuação)

Nº DO ENSAIO	MATERIAL MÓVEL	T (s)	L <sub>0</sub> (s)	H <sub>0</sub> (m)	α <sub>0</sub> (°)	P <sub>L</sub> (kg.m/m.s)	Q' <sub>S</sub> (kg/s)	R = $\frac{Q'_S}{P_L}$	$\delta_0 = \frac{H_0}{L_0}$	$D = \frac{H_0}{d(\gamma'_s/\gamma'_sa)}$
A1	AREIA (γ <sub>s</sub> = 1650 kg/m <sup>3</sup> ; d <sub>50</sub> = 1,26 mm)	0,80	99,8x10 <sup>-2</sup>	0,029	15,0	10,2x10 <sup>-3</sup>	0,99x10 <sup>-3</sup>	0,097	0,029	23
A2		0,80	99,8	0,037	15,0	18,2	1,98	0,109	0,037	29
A2''		0,80	99,8	0,015	15,0	2,2	0	0	0,015	12
A3		0,80	99,8	0,025	15,0	7,3	0,99	0,136	0,025	20
A4		0,80	99,8	0,035	15,0	16,3	2,18	0,134	0,035	28
A5		0,80	99,8	0,045	15,0	29,2	3,66	0,125	0,045	36
A6		1,20	224,6	0,034	15,0	16,2	5,94	0,367	0,015	27
A7		1,00	156,0	0,033	15,0	15,4	3,37	0,219	0,021	26
A8		1,20	224,6	0,044	15,0	31,7	8,51	0,269	0,020	35
A8'		0,70	76,0	0,015	15,0	2,2	0	0	0,020	12
A9		0,80	99,8	0,021	15,0	5,0	0,61	0,122	0,021	17

PROFUNDIDADE NO TANQUE: - 0,40 m.

(Continuação)

CLASSIFICAÇÃO	MATERIAL	T (s)	$L_o$ (m)	$H_o$ (m)	$\alpha_o$ (°)	$P_L$ (kg.m/m.s)	$Q'_s$ (kg/s)	$R = \frac{Q'_s}{P_L}$	$\delta_o = \frac{H_o}{P_L}$	$D = \frac{H_o}{d \frac{(\gamma'_s/\gamma'_{sa})}{sa}}$
A10	MOVEL AREIA ( $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ ; $d_{50} = 0,69 \text{ mm}$ )	0,80	$99,8 \times 10^{-2}$	0,021	15,0	$5,0 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-3}$	0,220	0,021	30
A11		0,71	78,7	0,016	15,0	2,5	0,49	0,196	0,020	23
A12		1,00	156,0	0,031	15,0	13,1	4,13	0,315	0,020	45
A13		1,20	224,6	0,047	15,0	36,2	16,00	0,442	0,021	68
A14	AREIA ( $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ ; $d_{50} = 0,33 \text{ mm}$ )	1,20	224,6	0,047	15,0	36,2	19,10	0,530	0,021	142
A15		1,00	156,0	0,031	15,0	13,1	6,75	0,515	0,020	94
A16		0,80	99,8	0,019	15,0	3,9	1,10	0,281	0,019	58

PROFUNDIDADE NO TANQUE: - 0,40 m.

QUADRO 2 (ANEXO II) - CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS ENSAIADAS NO PRESENTE ESTUDO EXPERIMENTAL

Nº. DO ENSAIO	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	L (m)	H <sub>0</sub> (m)	H (m)	H <sub>0</sub> (m)			α <sub>0</sub> (°)	α (°)	α <sub>b</sub> (°)		
						MEDIDO	ONDA SOLITARIA	ONDA DE PEQUENA AMPLITUDE			MEDIDO	ONDA SOLITARIA	ONDA DE PEQUENA AMPLITUDE
P1	0,80	99,8x10 <sup>-2</sup>	96x10 <sup>-2</sup>	0,010	0,010	0,009	0,014	-	30	28,8	12,5	12,5	-
P2	0,80	99,8	96	0,020	0,019	0,021	0,022	-	30	28,8	15,5	16,0	-
P3	0,80	99,8	96	0,030	0,028	0,033	0,029	0,031	30	28,8	17,0	18,5	13,0
P4	0,80	99,8	96	0,040	0,038	0,039	0,035	0,040	30	28,8	18,0	20,5	13,5
P5	0,80	99,8	96	0,050	0,049	0,049	0,040	0,049	30	28,8	20,0	22,5	15,5
P6	0,80	99,8	96	0,009	0,009	0,007	0,013	0,011	30	28,8	12,0	12,0	9,0
P7	1,60	399,3	253	0,023	0,019	0,033	0,034	0,028	50	29,1	15,5	16,0	10,0
P8	1,60	399,3	284	0,026	0,023	0,040	0,040	0,033	30	20,8	-	11,0	8,0
P9	1,20	224,6	194	0,026	0,023	0,029	0,033	0,031	30	25,5	10,5	13,5	9,0
P10	1,00	156,0	146	0,019	0,017	0,034	0,035	0,027	30	27,9	6,0	10,5	7,5
P11	1,40	305,8	239	0,024	0,021	0,021	0,024	0,023	30	23,0	11,0	13,5	8,5
P12	1,60	399,3	284	0,020	0,018	0,031	0,035	0,032	30	20,8	13,5	12,0	7,0

(Continuação)

Nº. DO ENSAIO	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	L (m)	H <sub>0</sub> (m)	H (m)	H <sub>0</sub> (o)			α <sub>0</sub> (o)	α (o)	α <sub>b</sub> (o)		
						MEDIDO	ONDA SOLITARIA	ONDA DE PEQUENA AMPLITUDE			MEDIDO	ONDA SOLITARIA	ONDA DE PEQUENA AMPLITUDE
P13	0,60	56,2x10 <sup>-2</sup>	56x10 <sup>-2</sup>	0,020	0,020	0,018	0,018	0,018	30	30,0	15,0	20,0	11,0
P14	1,40	305,8	239	0,020	0,018	0,018	0,030	0,027	30	23,0	15,0	11,0	7,0
P15	0,80	99,8	99	0,050	0,049	0,041	0,054	0,054	15	14,8	-	11,5	7,0
P16	0,80	99,8	99	0,035	0,034	0,029	0,032	0,045	15	14,8	9,5	10,0	4,5
P17	0,80	99,8	99	0,015	0,015	0,013	0,018	0,021	15	14,8	7,0	7,5	4,0
P18	0,80	99,8	99	0,025	0,024	0,022	0,026	0,031	15	14,8	8,5	9,0	5,0
B1	0,80	99,8	99	0,035	0,034	0,032	0,032	0,040	15	14,8	8,0	10,0	6,0
B2	0,80	99,8	99	0,015	0,015	0,014	0,018	0,020	15	14,8	7,5	7,5	4,5
B3	0,80	99,8	99	0,025	0,024	0,023	0,026	0,031	15	14,8	9,0	9,0	5,0
C1	0,80	99,8	99	0,025	0,024	0,023	0,026	0,032	15	14,8	9,0	9,0	4,5
C2	0,80	99,8	99	0,015	0,015	0,011	0,018	0,020	15	14,8	7,5	7,5	4,5
C3	0,80	99,8	99	0,035	0,034	0,028	0,032	0,044	15	14,8	9,5	10,0	4,5
A1	0,80	99,8	99	0,029	0,030	0,030	0,028	0,033	15	14,8	6,5	9,5	5,5
A2	0,80	99,8	99	0,037	0,038	0,040	0,033	0,041	15	14,8	9,0	10,5	6,0

(Continuação)

Nº. DO ENSAIO	T (s)	L <sub>0</sub> (m)	L (m)	H <sub>0</sub> (m)	H (m)	H <sub>b</sub> (m)			α <sub>0</sub> (°)	α (°)	α <sub>b</sub> (°)		
						MEDIDO	ONDA SOLITARIA	ONDA DE PEQUENA AMPLITUDE			MEDIDO	ONDA SOLITARIA	ONDA DE PEQUENA AMPLITUDE
A3	0,80	99,8x10 <sup>-2</sup>	99x10 <sup>-2</sup>	0,025	0,024	0,024	0,026	0,028	15	14,8	8,5	9,0	6,0
A4	0,80	99,8	99	0,035	0,034	0,033	0,032	0,040	15	14,8	10,0	10,0	6,0
A5	0,80	99,8	99	0,045	0,044	0,040	0,038	0,049	15	14,8	16,0	11,0	6,5
A6	1,20	224,6	194	0,034	0,031	0,052	0,041	0,045	15	12,9	7,5	7,5	4,5
A7	1,00	156,0	146	0,033	0,031	0,040	0,036	0,041	15	14,0	8,0	8,5	5,0
A8	1,20	224,6	194	0,044	0,040	0,067	0,049	0,056	15	12,9	8,0	8,5	4,5
A8'	0,70	76,0	76	0,015	0,015	-	-	-	15	14,8	-	8,5	-
A9	0,80	99,8	99	0,021	0,020	0,023	0,023	0,025	15	14,7	7,0	8,5	5,5
A10	0,80	99,8	99	0,021	0,020	0,018	0,023	0,027	15	14,7	8,0	8,5	4,5
A11	0,71	78,7	78	0,016	0,016	0,019	0,018	0,020	15	15,0	9,0	8,5	5,0
A12	1,00	156,0	146	0,031	0,029	0,041	0,034	0,039	15	14,0	8,0	8,5	5,0
A13	1,20	224,6	194	0,047	0,043	0,057	0,051	0,059	15	12,9	8,0	8,5	5,0
A14	1,20	224,6	194	0,047	0,043	0,060	0,051	0,062	15	12,9	8,5	8,5	4,5
A15	1,00	156,0	146	0,031	0,029	0,047	0,034	0,039	15	14,0	8,5	8,5	5,0
A16	0,80	99,8	99	0,019	0,018	0,019	-	-	15	14,8	7,0	-	-

QUADRO 3 (ANEXO II) - CARACTERÍSTICAS DA PRAIA E VELOCIDADES DA CORRENTE LONGITUDINAL, NO PRESENTE ESTUDO EXPERIMENTAL

Nº. DO ENSAIO	MATERIAL MÓVEL	$l_b$ (m)	$h_b$ (m)	$m = \text{tg } \theta$	$V_l$ (m/s)
P1	Pedra-pomes ( $\gamma'_s = 450 \text{ kg/m}^3$ ; $d_{50} = 1,62 \text{ mm}$ ; $d_{90} = 1,85 \text{ mm}$ )	-	-	-	0,019
P2		-	-	-	0,058
P3		0,260	0,035	0,135	-
P4		0,357	0,039	0,109	0,121
P5		0,397	0,049	0,123	0,159
P6		0,052	0,016	0,308	0,031
P7		0,098	0,032	0,327	0,045
P8		0,194	0,051	0,263	0,043
P9		0,182	0,038	0,209	0,040
P10		0,199	0,045	0,226	0,040
P11		0,122	0,024	0,197	0,038
P12		0,150	0,030	0,200	0,035
P13		0,103	0,014	0,136	0,101
P14		0,114	0,030	0,263	0,031
P15		0,412	0,037	0,090	0,077
P16		0,133	0,015	0,113	0,067
P17		0,066	0,011	0,167	0,018
P18		0,116	0,019	0,164	0,037
B1	Baquelite ( $\gamma'_s = 350 \text{ kg/m}^3$ $d_{50} = 0,94 \text{ mm}$ ; $d_{90} = 1,28 \text{ mm}$ )	0,296	0,028	0,095	0,072
B2		0,147	0,014	0,095	0,019
B3		0,228	0,019	0,083	0,026

NOTA:  $m = h_b/l_b$

(Continuação)

Nº. DO ENSAIO	MATERIAL MÓVEL	$l_b$ (m)	$h_b$ (m)	$m = \text{tg } \theta$	$V_l$ (m/s)
C1	Casca de noz ( $\gamma'_s = 270 \text{ kg/m}^3$ $d_{50} = 1,65 \text{ mm}$ ; $d_{90} = 1,87 \text{ mm}$ )	0,145	0,016	0,110	0,037
C2		0,098	0,014	0,143	0,016
C3		0,218	0,016	0,073	0,055
A1	Areia ( $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ $d_{50} = 1,26 \text{ mm}$ ; $d_{90} = 1,75 \text{ mm}$ )	0,210	0,025	0,119	0,082
A2		0,256	0,029	0,113	0,105
A3		0,164	0,028	0,171	0,076
A4		0,206	0,027	0,131	0,109
A5		0,304	0,034	0,112	0,126
A6		0,190	0,031	0,163	0,040
A7		0,135	0,026	0,193	0,038
A8		0,233	0,036	0,155	0,109
A9		0,232	0,021	0,091	0,049
A10	Areia ( $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ $d_{50} = 0,69 \text{ mm}$ ; $d_{90} = 1,02 \text{ mm}$ )	0,113	0,016	0,142	0,066
A11		0,075	0,014	0,187	0,071
A12		0,179	0,026	0,145	0,109
A13		0,282	0,039	0,138	0,147
A14	Areia ( $\gamma'_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ $d_{50} = 0,33 \text{ mm}$ ; $d_{90} = 0,63 \text{ mm}$ )	0,209	0,032	0,153	0,125
A15		0,165	0,027	0,164	0,095
A16		0,097	0,019	0,190	0,078

NOTA:  $m = h_b/l_b$



QUADRO 4 - CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS NO GERADOR (h = 0,40 m)  
(ANEXO II)

EM FUNÇÃO DAS MESMAS CARACTERÍSTICAS EM GRANDES PROFUNDIDADES

T (s)	L <sub>0</sub> (cm)	$\frac{h}{L_0}$	L (cm)	$\frac{H}{H_0}$	$\alpha$ (°)				$\frac{H'_0}{H_0} = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}}$				$\frac{H}{H_0} = \frac{H'_0}{H_0} \times \frac{H}{H'_0}$					
					$\alpha_0$ 5°	15°	30°	50°	$\alpha_0$ 5°	15°	30°	50°	$\alpha_0$ 5°	15°	30°	50°		
0,6	56,2	0,712	56,1	1,00	5,0	15,0	30,0	50,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,8	99,8	0,401	98,6	0,98	4,9	14,8	29,6	49,2	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,95
1,0	156,0	0,256	146,3	0,93	4,7	14,0	28,0	45,9	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,93	0,93	0,93	0,93	0,90
1,2	224,6	0,178	193,5	0,91	4,3	12,9	25,5	41,3	1,00	1,00	1,00	0,98	0,93	0,91	0,91	0,91	0,90	0,85
1,4	305,8	0,131	239,1	0,92	3,9	11,7	23,0	36,8	1,00	1,00	1,00	0,99	0,90	0,92	0,92	0,92	0,89	0,821
1,6	399,4	0,100	283,3	0,93	3,6	10,6	20,8	32,9	1,00	1,00	1,00	0,99	0,88	0,93	0,93	0,92	0,90	0,82
1,8	505,4	0,079	327,1	0,96	3,2	9,6	18,9	29,7	1,00	1,00	1,00	0,99	0,86	0,96	0,96	0,96	0,95	0,82
2,0	624,0	0,064	369,7	0,98	3,0	8,8	17,2	26,9	1,00	1,00	1,00	0,99	0,85	0,95	0,98	0,97	0,94	0,84

QUADRO 5 - CALCULO DA DESFASAGEM ELEMENTAR DOS BATEDORES DO GERADOR  
(ANEXO II)

n (s)	L <sub>0</sub> (cm)	L (cm)	sen α = sen α <sub>0</sub> th $\frac{2\pi h}{L}$				X = δ b $\frac{\text{sen } \alpha}{L}$			
			α <sub>0</sub> = 5°	15°	30°	50°	α <sub>0</sub> = 5°	15°	30°	50°
0,6	56,2	56,1	0,087	0,258	0,499	0,766	1,17	3,46	6,68	10,23
0,8	99,8	98,6	0,086	0,256	0,494	0,757	0,65	1,94	3,76	5,75
1,0	156,0	146,3	0,082	0,243	0,469	0,718	0,42	1,24	2,40	3,68
1,2	224,6	193,5	0,075	0,223	0,431	0,660	0,29	0,86	1,67	2,56
1,4	305,8	239,1	0,068	0,202	0,391	0,599	0,21	0,64	1,23	1,88
1,6	399,4	283,3	0,062	0,184	0,355	0,544	0,16	0,49	0,94	1,44
1,8	505,4	327,1	0,056	0,167	0,320	0,49	0,13	0,38	0,74	1,13
2,0	624,0	369,7	0,052	0,153	0,296	0,453	0,10	0,31	0,60	0,92

δ b = 30 x 25 = 750 (cm)

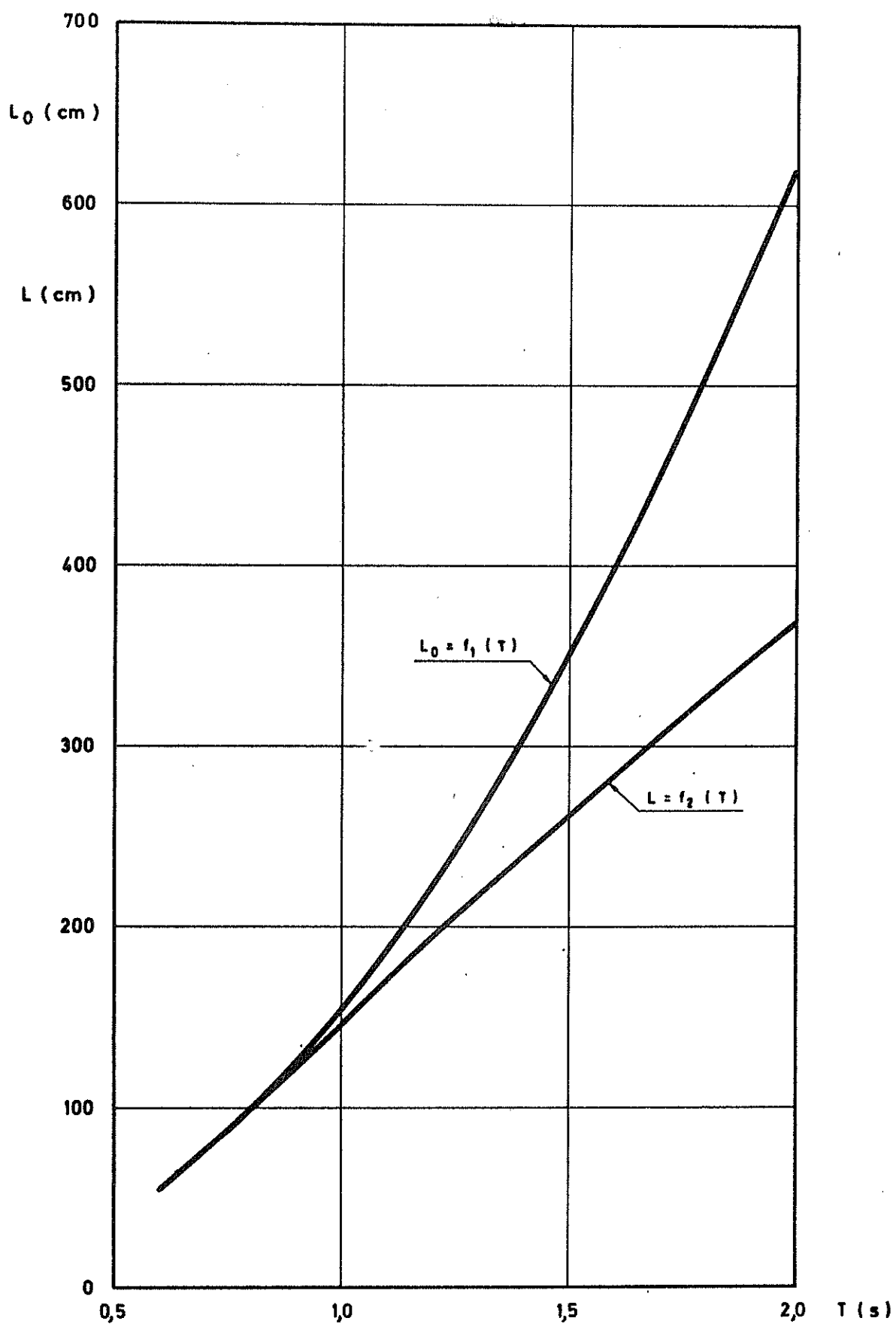


FIG. 1 (ANEXO II) - Comprimentos de onda ao largo ( $L_0$ ) e à saída do gerador ( $L$ ) em função do período.

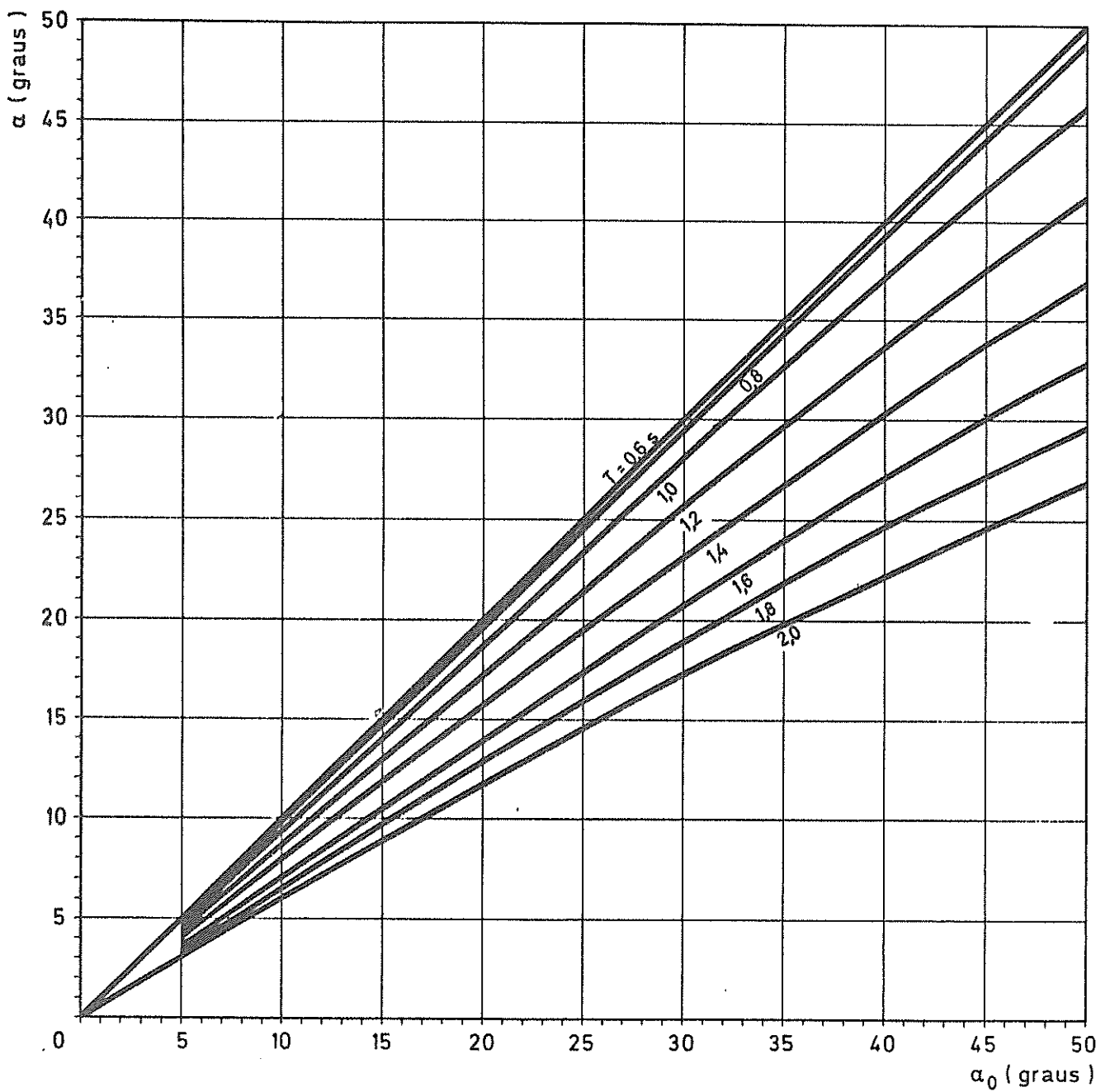


FIG. 2 (ANEXO II) - Ângulo à saída do gerador ( $\alpha$ ) em função do ângulo em grandes profundidades ( $\alpha_0$ ) e do período ( $T$ ).

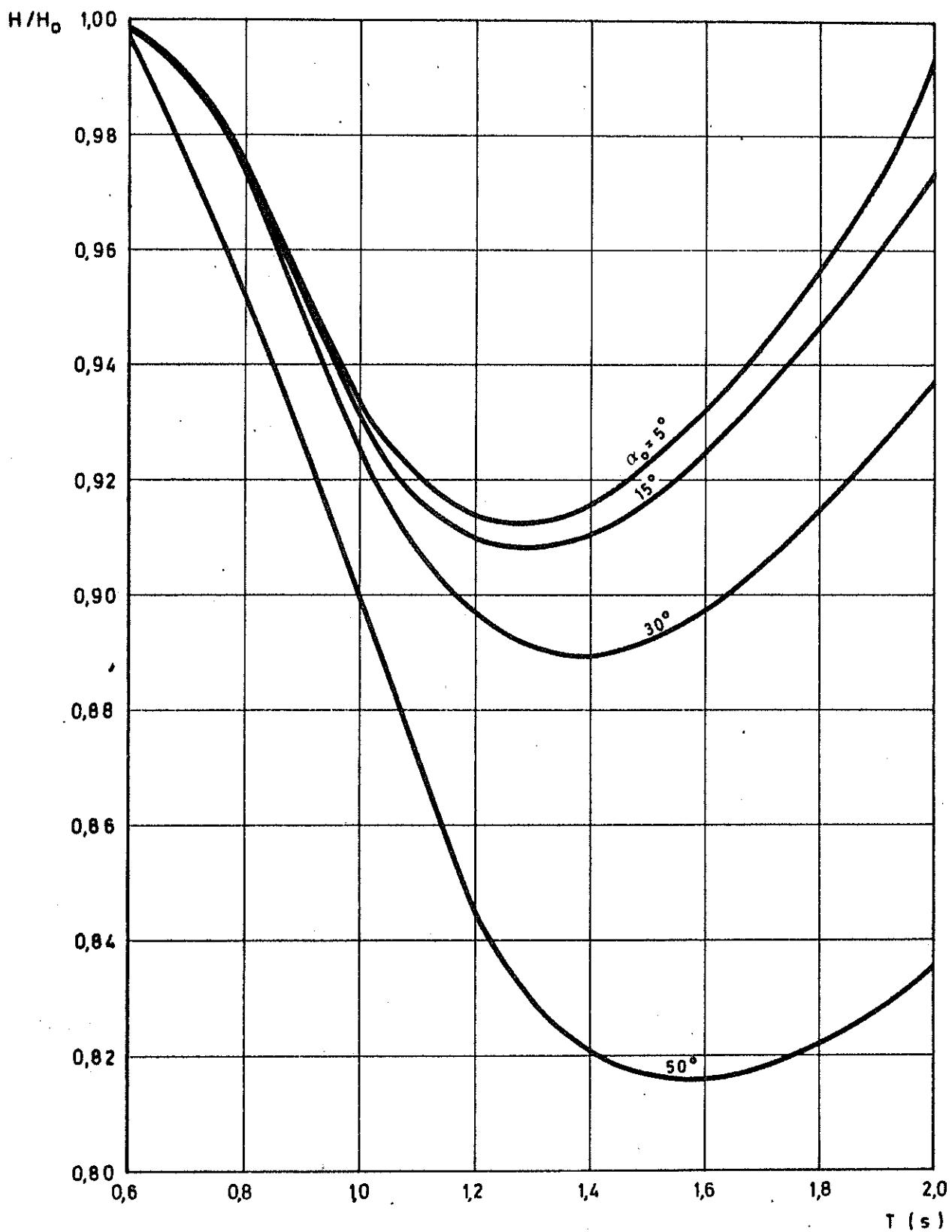


FIG. 3 (ANEXO II) - Quociente ( $H/H_0$ ) da amplitude da onda à saída do gerador pela amplitude em grandes profundidades.

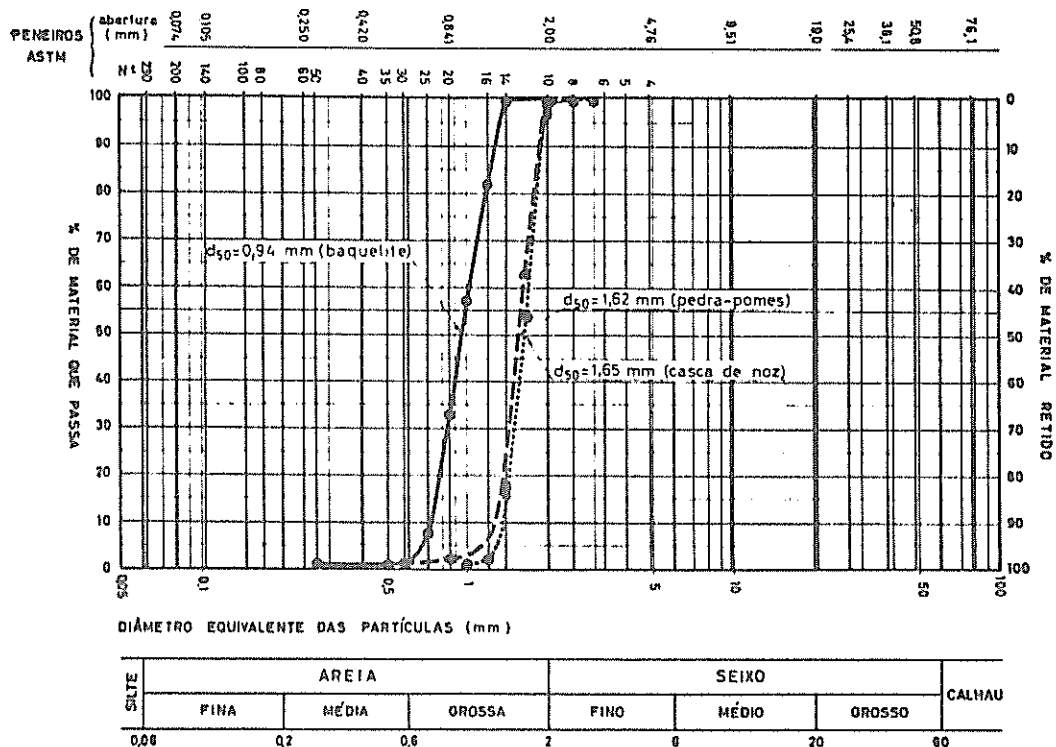


FIG. 4 (ANEXO II) - Curvas granulométricas dos materiais móveis, diferentes da areia, utilizados nos ensaios.

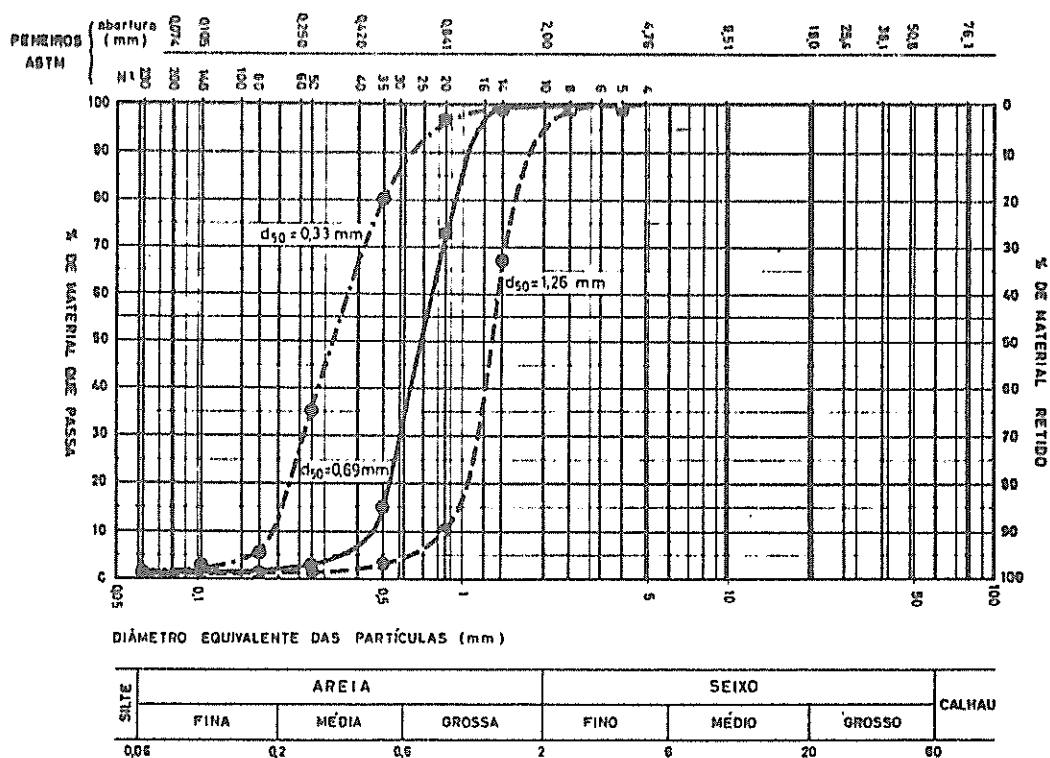


FIG. 5 (ANEXO II) - Curvas granulométricas das três areias utilizadas nos ensaios.

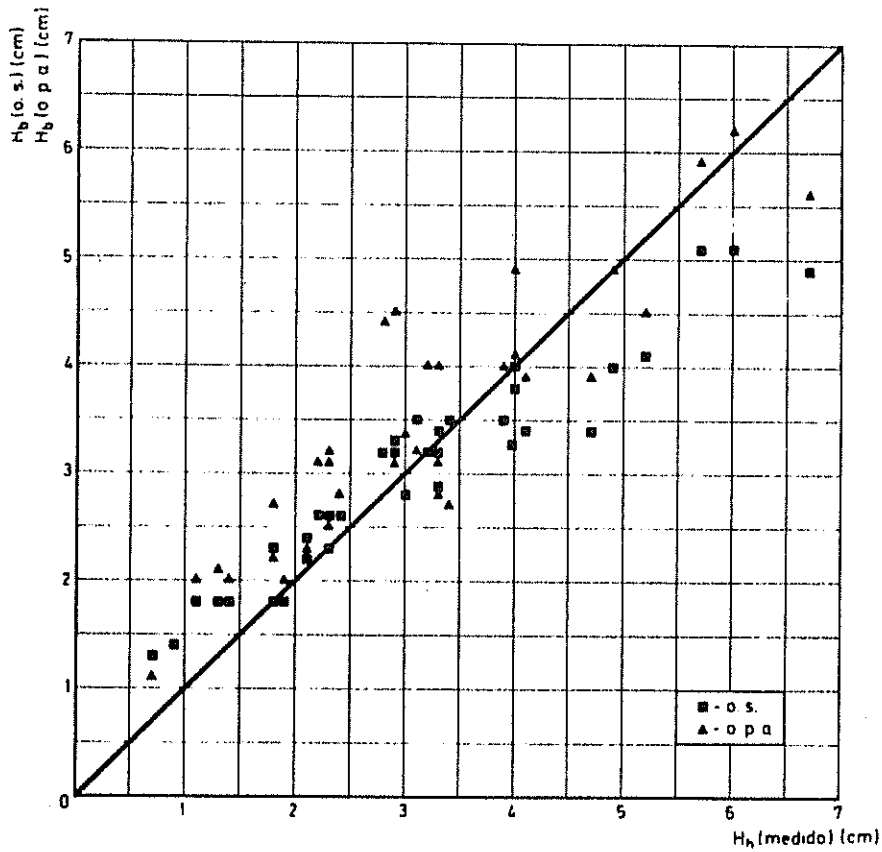


FIG. 6 (ANEXO II) - Comparação de valores de altura de onda na rebentação ( $H_b$ ) medidos, com os calculados segundo a teoria da onda de pequena amplitude (o.p.a.).

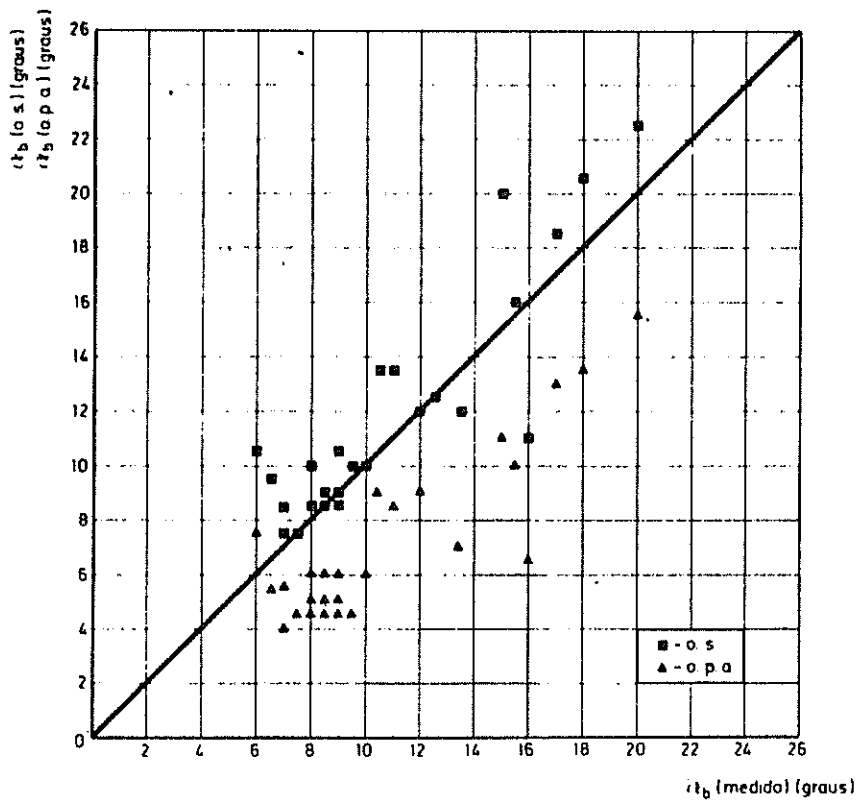


FIG. 7 (ANEXO II) - Comparação dos valores da obliquidade da onda na rebentação ( $\alpha_b$ ) medidos, com os valores calculados segundo a teoria da onda solitária (o.s.) e segundo a teoria da onda de pequena amplitude (o.p.a.).

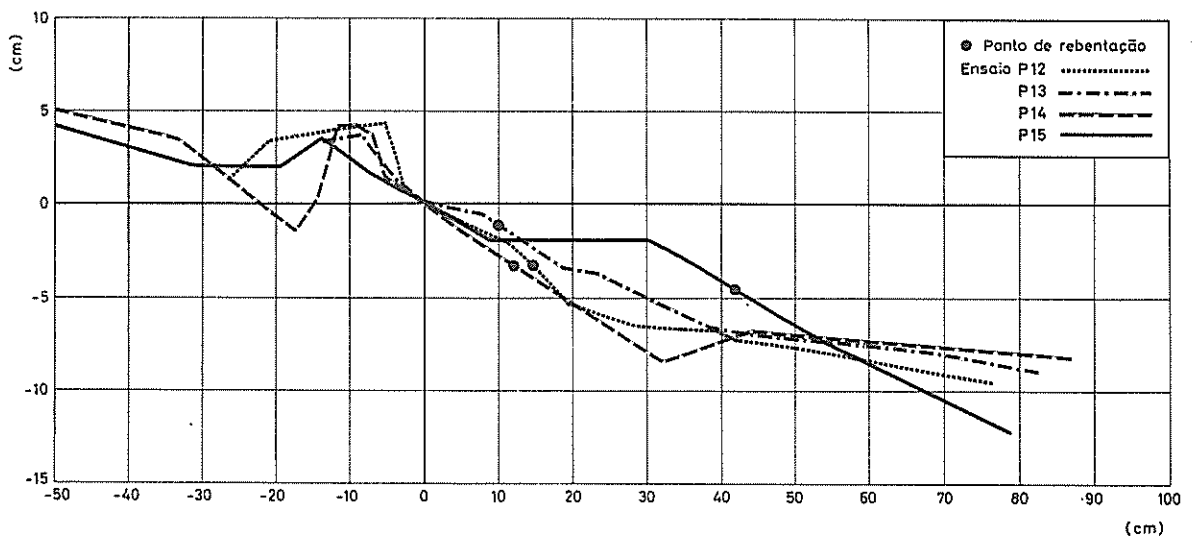
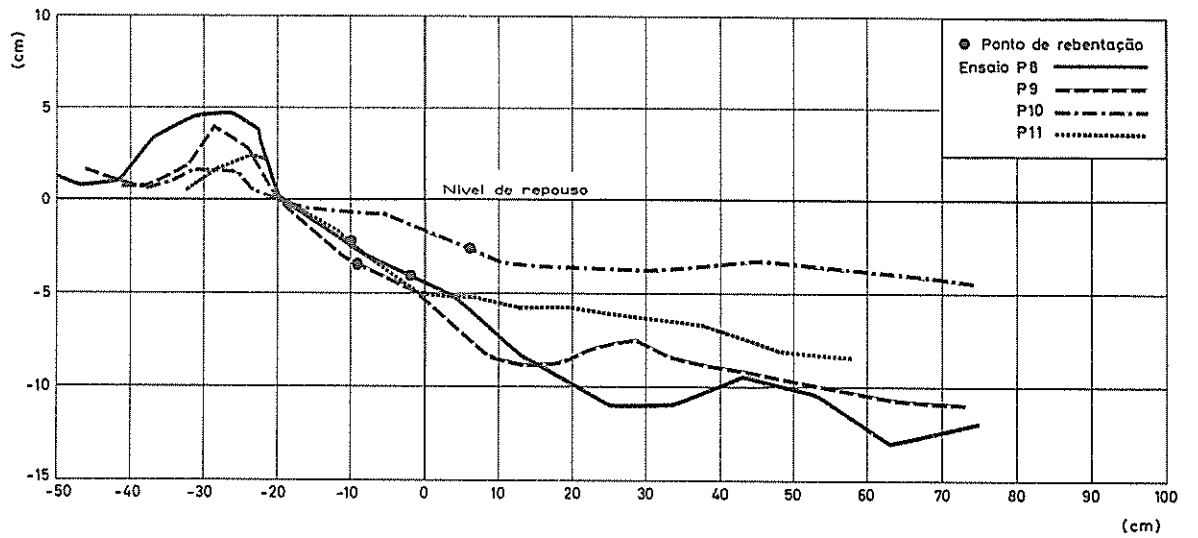
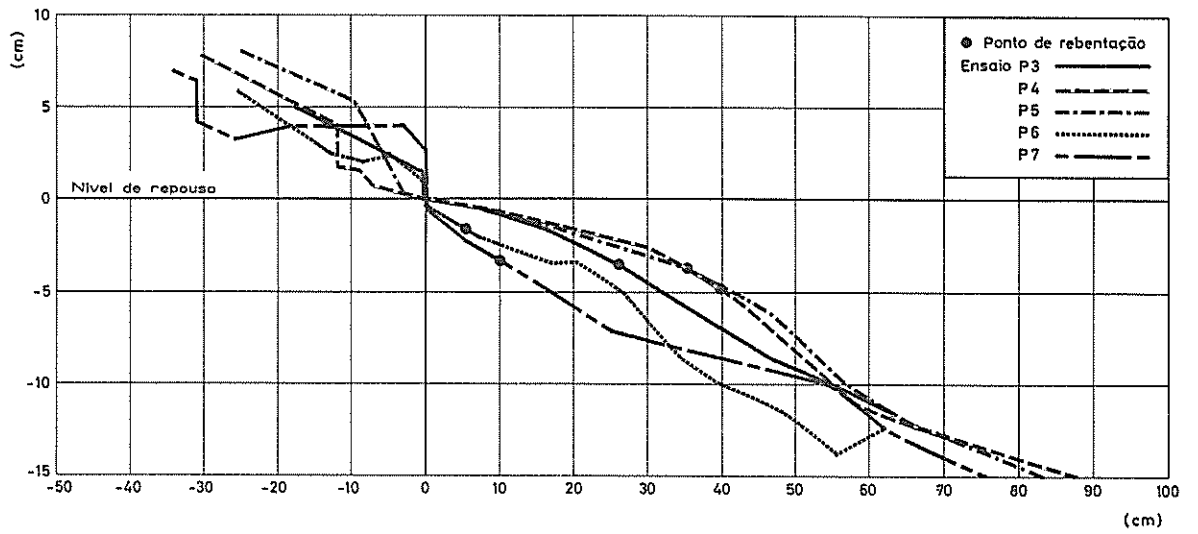


FIG. 8 (ANEXO II) - Perfis transversais levantados no fim de cada ensaio.



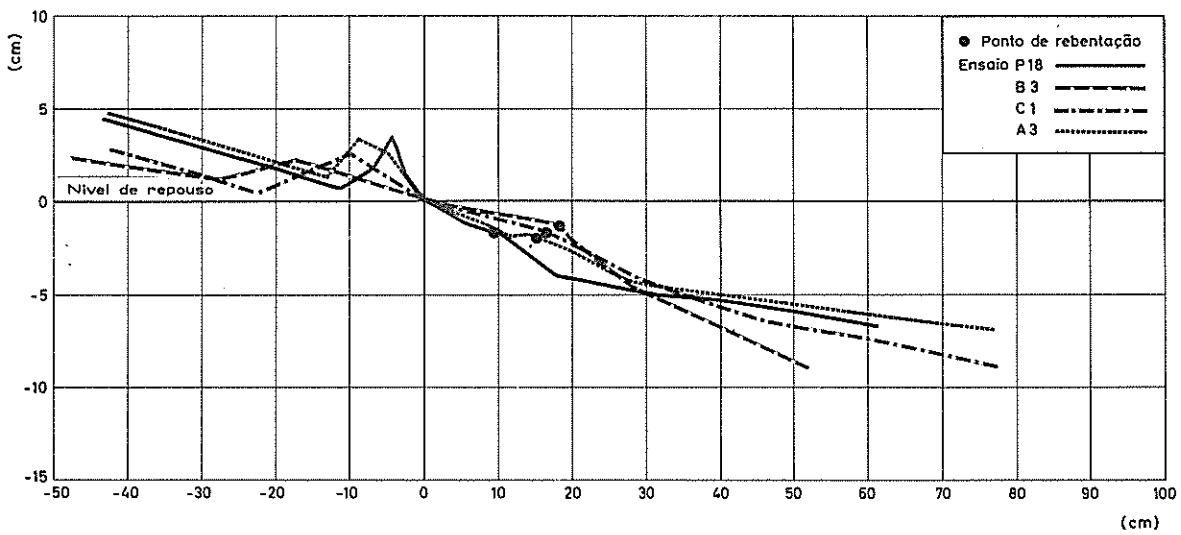
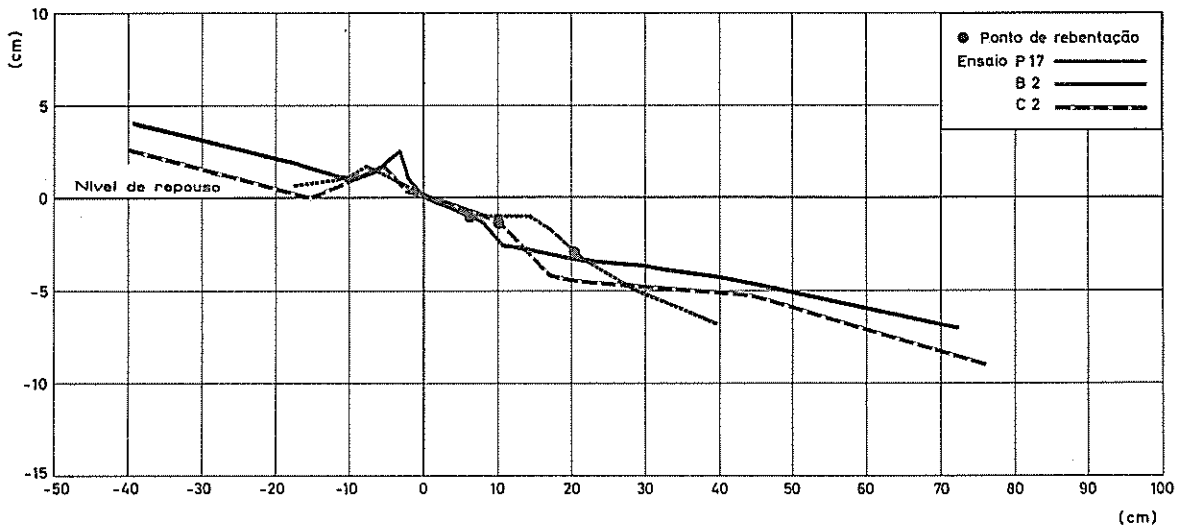
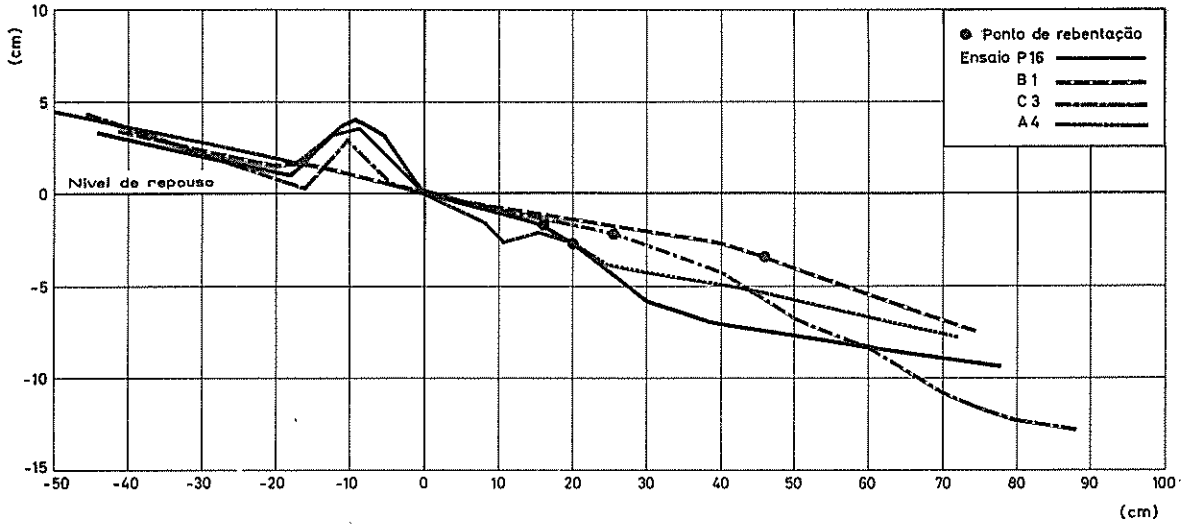


FIG. 8 (ANEXO II) (cont.) - Perfis transversais levantados no fim de cada ensaio.

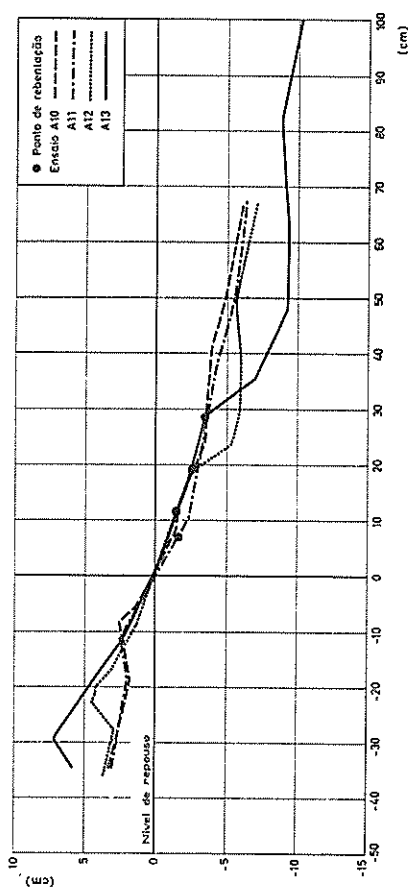
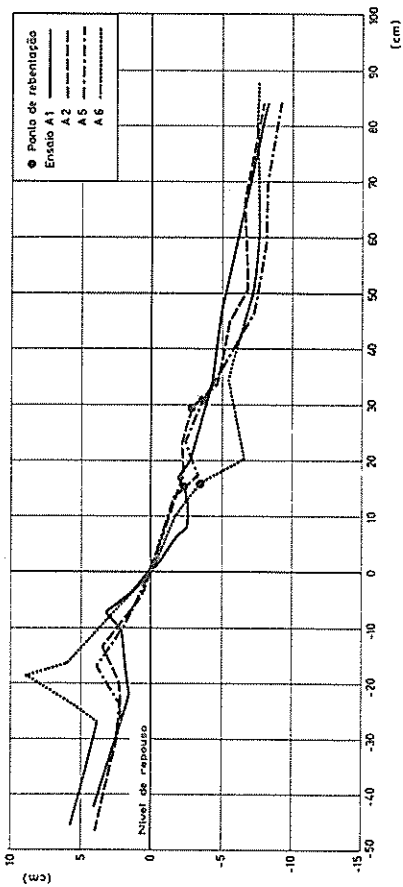
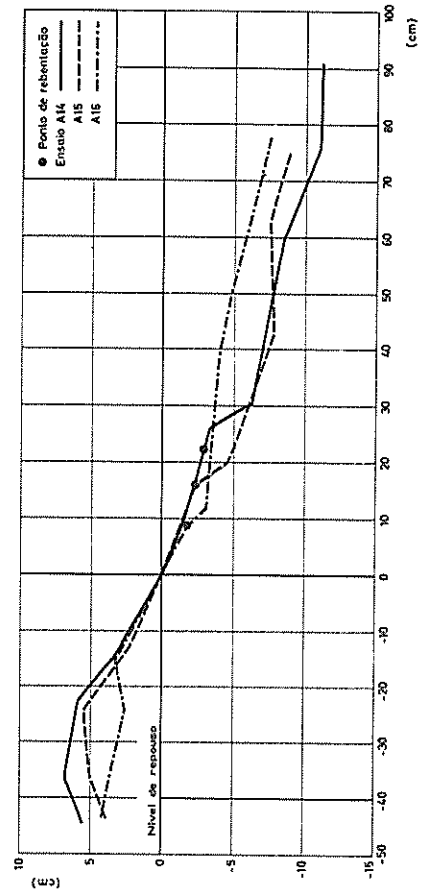
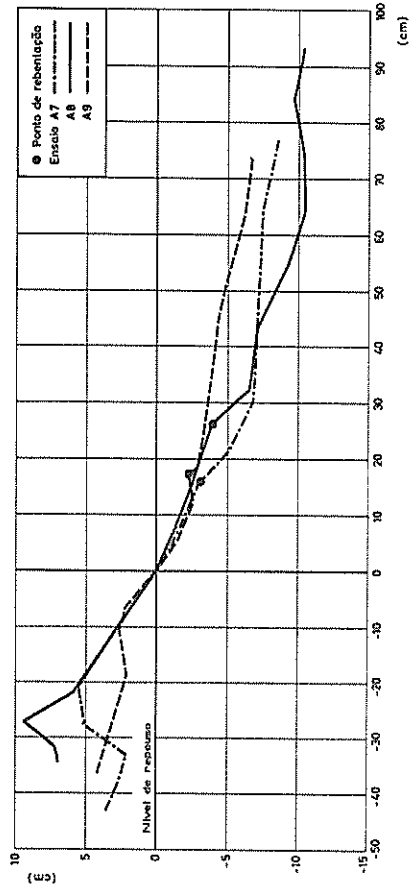


FIG. 8 (ANEXO II) (cont.) - Perfis transversais levantados no fim de cada ensaio.



ANEXO III  
CORRENTES LONGITUDINAIS



## ANEXO III

### CORRENTES LONGITUDINAIS

#### 1 - INTRODUÇÃO

O transporte sólido litoral processa-se em grande parte, e por vezes mesmo na sua totalidade, no seio da corrente longitudinal que o ataque oblíquo das ondas a uma praia gera sobre a plataforma de rebentação. Por esta razão, torna-se conveniente associar o estudo de ambos os fenómenos.

Efectua-se neste anexo uma revisão dos conhecimentos relativos a correntes longitudinais, integrada nos dois esquemas teóricos que têm sido utilizados na abordagem deste fenómeno, ou sejam, um esquema baseado nas quantidades de movimento em jogo e um segundo que se apoia em considerações energéticas.

Na parte experimental deste estudo foram efectuadas, como já se referiu, medições de correntes longitudinais e das grandezas com elas relacionadas e necessárias à interpretação dos resultados experimentais, como sejam a largura e o declive médios da zona compreendida entre a linha de rebentação e a costa.

#### 2 - ESQUEMA TEÓRICO BASEADO EM CONSIDERAÇÕES DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Considere-se o caso geral do ataque oblíquo nas condições esquemáticas definidas na figura 1.

O teorema de Euler aplicado ao elemento de volume ABCDEF permite estabelecer que as forças exteriores superficiais e volúmicas que actuam nesse elemento são equilibradas em cada instante pelas forças de inércia e pela variação da quantidade de movimento através da superfície envolvente.

Admitindo a hipótese da existência dentro do sólido considerado, de um

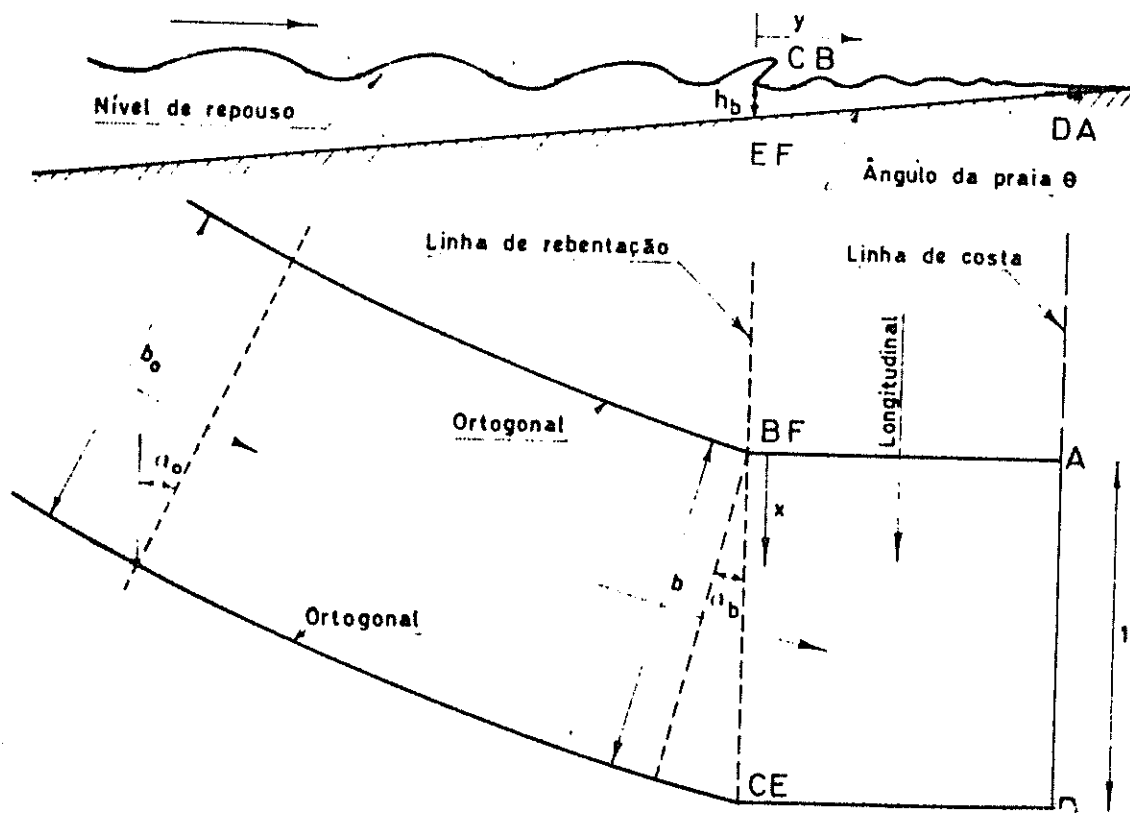


FIG. 1 (ANEXO III) - Esquema de ataque oblíquo.

escoamento quase estacionário definido pela média, tomada durante um período  $T$ , de cada termo da equação de Euler, e considerando o equilíbrio segundo uma direcção paralela à costa, situada portanto num plano horizontal, aparecem anuladas as forças de inércia e as forças volúmicas devidas à aceleração da gravidade que constituem o peso da água contido no volume ABCDEF e não têm portanto componente segundo a direcção considerada.

Admitindo que se pode desprezar a tensão na face BCEF e que na face ABF é igual e de sinal contrário à existente na face CDE, pode considerar-se que a variação da quantidade de movimento através da superfície envolvente ABCDEF equilibra a força exercida pelo escoamento sobre a superfície ADEF do fundo.

A vantagem de aplicação do teorema de Euler é a que resulta da possibilidade de poder-se abstrair de todas as forças de atrito interno entre as

partículas.

Pode escrever-se então:

$$M_{b1} + \rho Q_{ABF} V_{ABF} - \rho Q_{CDE} V_{CDE} - F = 0 \quad (1-III)$$

em que  $M_{b1}$  é o fluxo de quantidade de movimento através de BCEF,  $Q$  e  $V$  respectivamente os caudais e velocidades médias da corrente longitudinal nas secções indicadas em índice e  $F$  a resultante segundo a direcção paralela à praia das forças de atrito na superfície do fundo ADEF.

a) Putnam e outros [31] consideram na aplicação deste esquema que o volume de água entrado no sólido através da face BCEF, durante um período  $T$ , é englobado na corrente longitudinal adquirindo a sua velocidade e sentido. Origina-se assim uma diferença de caudais  $Q_b$  nas faces ABF e CDE tomando a equação (1-III) a forma:

$$M_{b1} - \rho Q_b \cdot \cos \alpha_b V_1 - F = 0$$

Com base nesta equação e considerando  $h_b = 1,28 H_b$  obtêm-se:

$$V_1 = \frac{a}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{6,05 \cdot g^{1/2} \cdot H_b^{1/2} \cdot \sin \alpha_b}{a}} - 1 \right] \quad \text{em (m/s)} \quad (2-III)$$

com 
$$a = \frac{2,61 \text{ m } H_b \cos \alpha_b}{kT}$$

em que  $k$  é o coeficiente de rugosidade hidráulica dos fundos definido por

$$k = \frac{\tau}{\rho V_1^2}$$

sendo  $\tau$  a tensão tangencial no fundo.

Putnam e outros [31] apresentam também uma expressão para a previsão de  $V_1$  baseada em considerações de energia, que será tratada mais à frente.



b) Eagleson [14] utiliza a teoria da onda de pequena amplitude partindo igualmente de um esquema teórico baseado em considerações de quantidade de movimento. Faz várias hipóteses simplificativas sobre a distribuição de velocidades entre a rebentação e a costa e sobre a sua variação ao longo de um período da onda. Considera o escoamento que constitui a corrente longitudinal como turbulento rugoso e aplica o factor de resistência de Darcy-Weisbach para exprimir a resistência ao escoamento devida à rugosidade dos fundos. Calcula este factor pela equação de Karman-Prandtl para um escoamento uniforme em contacto com uma fronteira rugosa:

$$f = \left[ 2 \log_{10} \frac{d_b}{k} + 1,74 \right]^{-2} \quad (3-III)$$

sendo  $k$  a rugosidade de Nikuradse, que se pode supor igual a  $d_{90}$  no caso de granulometria com diâmetros variáveis.

Eagleson chega à expressão final:

$$V_1^2 = \frac{3}{8} \cdot \frac{gH_b^2 n_b}{h_b} \cdot \frac{\text{sen}\theta \cdot \text{sen}\alpha_b \cdot \text{sen}2\alpha_b}{f} \quad (4-III)$$

em que  $n_b$  é o cociente da energia transmitida pela energia total da onda na rebentação e que, com pequeno erro, se pode tomar como igual à unidade.

Atendendo a que a diferença entre o  $\text{sen}\theta$  e o seu arco é inferior a dois por cento para valores de  $\theta$  menores que  $15^\circ$  e que é possível (Fig.2) ajustar uma parábola do  $2^\circ$  grau à curva  $\text{sen}\alpha_b \text{sen}2\alpha_b$  para valores de  $\alpha_b$  compreendidos entre  $0$  e  $20^\circ$ , e fazendo ainda:

$$\frac{h_b}{H_b} = 1,28$$

$$n_b \approx 1$$

$$\text{sen}\theta \approx \text{tg}\theta = m = \frac{h_b}{l_b}$$

em que  $l_b$  e  $m$  são a largura e o declive da zona compreendida entre a linha de rebentação e a costa, obtem-se:

$$V_1 \text{ proporcional a } H_b, \alpha_b^{\sqrt{2}}, l_b^{-\sqrt{2}}, f^{-\sqrt{2}}.$$

$V_1$  cresceria então com a altura da onda e o seu ângulo na rebentação e diminuiria com o aumento do afastamento da linha de rebentação em relação à costa e com a rugosidade relativa dos fundos  $\frac{k}{h_b}$ .

Eagleson [32] aplica o mesmo esquema teórico à dedução do crescimento das correntes longitudinais a partir de uma barreira natural ou artificial que intercepte a zona compreendida entre a linha de rebentação e a costa (Fig. 3). A expressão obtida, que comparou com os resultados de experiências de laboratório, próprias e de outros autores, e com dados de medições

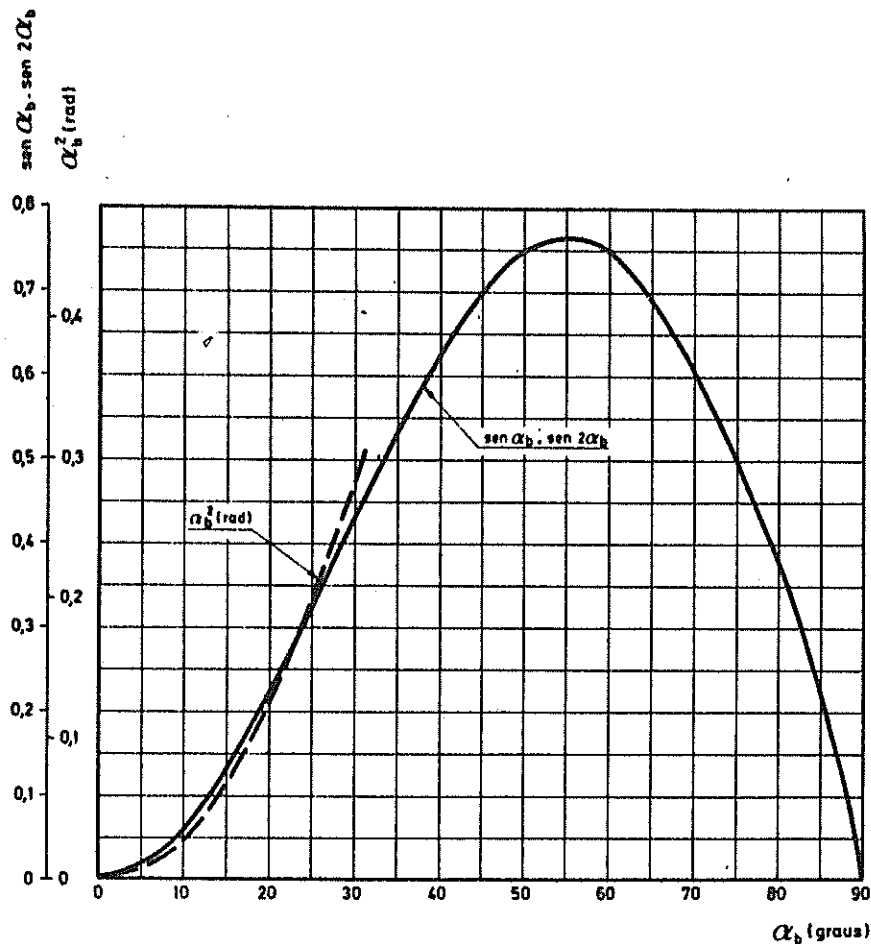


FIG. 2 (ANEXO III) - Comparação de  $\sin \alpha_b \cdot \sin 2\alpha_b$  com  $\alpha_b^2$  (radianos).

em protótipo, é a seguinte:

$$\frac{V_1^2(x)}{A} = 1 \left[ 1 - \frac{V_1^2(0)}{A} \right] e^{-Bx} \quad (5-III)$$

em que  $V_1(0)$  e  $V_1(x)$  são os valores da velocidade da corrente longitudinal, imediatamente a seguir e à distância  $x$  da barreira, e  $A$  e  $B$  as expressões que se indicam:

$$A = \frac{3}{8} \cdot \frac{gH_b^2 n_b}{h_b} \cdot \frac{\text{sen}\theta \cdot \text{sen}\alpha_b \cdot \text{sen}2\alpha_b}{f} \quad (6-III)$$

e

$$B = \frac{2}{5} \cdot \frac{f}{h_b \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\alpha_b} \quad (7-III)$$

Se considerarmos que a barreira intercepta totalmente a corrente paralela à costa, teremos  $V_1(0) = 0$  e a equação (5-III) tomará a forma:

$$V_1^2(x) = A(1 - e^{-Bx}) \quad (8-III)$$

O crescimento de  $V_1$  desde zero até ao seu valor máximo, de completo desenvolvimento, igual a  $\sqrt{A}$ , faz-se de maneira assintótica. A distância  $X$ , da barreira impermeável, a que a corrente longitudinal atinge 95 % do seu valor de completo desenvolvimento (Fig.3), será calculado pela expressão:

$$0,95^2 A = A(1 - e^{-BX})$$

donde:

$$X = \frac{2,32}{B} = \frac{5,8 h_b \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\alpha_b}{f} \quad (9-III)$$

A distância a que se faz sentir a influência da barreira, cresce deste modo com a altura de onda e o ângulo de ataque diminuindo com a rugosidade relativa dos fundos, ou seja, considerando as outras grandezas constantes, com o diâmetro das areias.

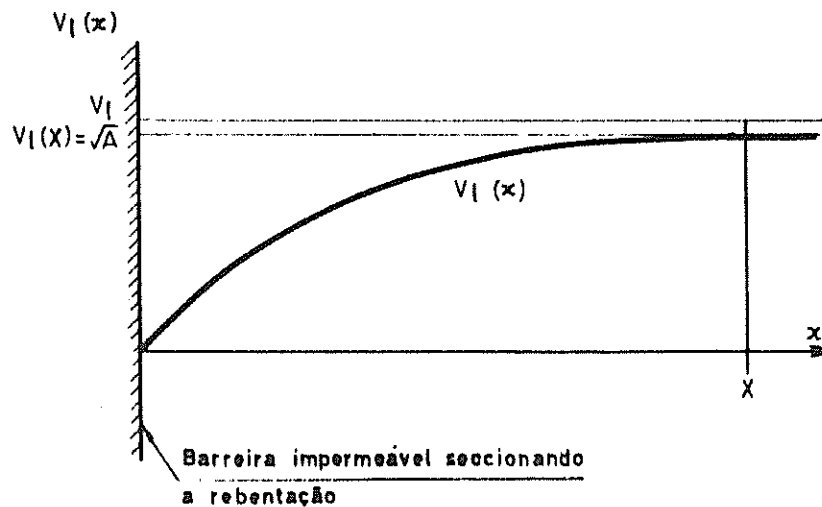


FIG. 3 (ANEXO III) - Esquema do crescimento da corrente longitudinal a partir de uma barreira impermeável, segundo Eagleson [32].

Com base nesta expressão calcularam-se os comprimentos de crescimento  $X$  em função da altura na rebentação para diversos valores de rugosidade absoluta do fundo,  $k$ , sendo os resultados apresentados na figura 4 deste anexo.

Assim, pela figura 4, uma onda de modelo, com  $H_b = 4$  cm, a actuar sobre um material de fundo com  $k \cong d_{90} = 1$  mm gerará uma corrente longitudinal que atingirá 95 % do seu valor de completo desenvolvimento a uma distância de 1 m de uma barreira impermeável que seccione a rebentação.

### 3 - ESQUEMA TEÓRICO BASEADO EM CONSIDERAÇÕES ENERGÉTICAS

Examine-se o fluxo de energia transmitida por uma onda ao longo de um tubo de fluxo formado por dois raios de onda, pelo fundo e pelo nível médio da água (Fig. 5).

Desprezando as perdas de energia por atrito e as eventuais ondas reflectidas, o fluxo através das secções 1 e 2 será igual. No entanto se a secção 1 representar a linha de rebentação e a secção 2 a linha de costa já ocorrerá uma dissipação de energia, na rebentação da onda que se processará entre as duas secções, o que acarretará uma diminuição do fluxo de ener

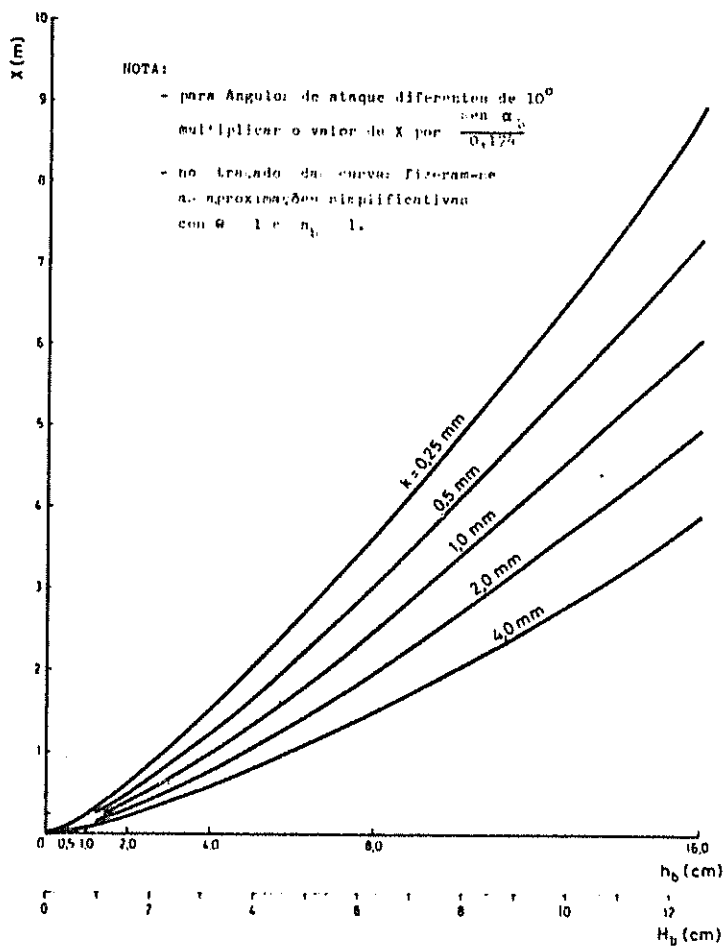


FIG. 4 (Anexo III) - Crescimento da corrente longitudinal a partir duma barreira impermeável existente na costa, calculado segundo a fórmula de Eagleson, com  $\alpha_b = 10^\circ$ .

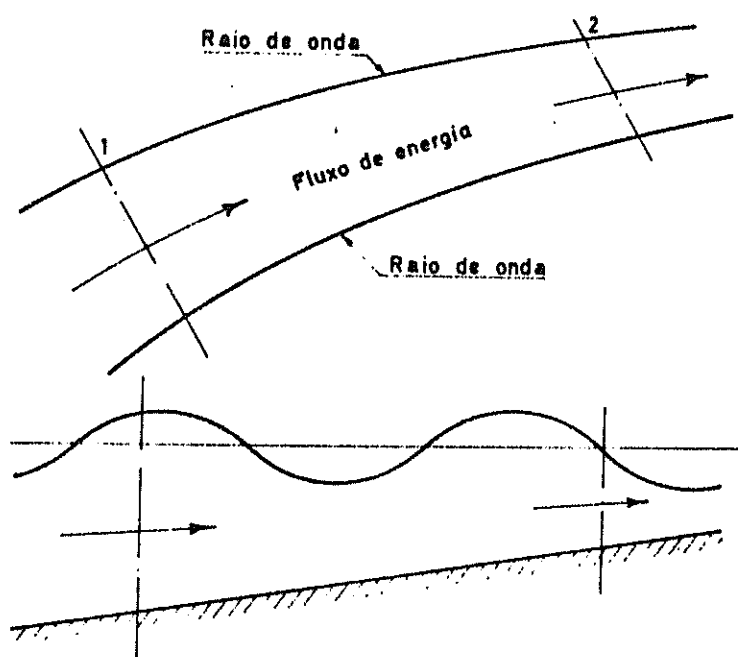


FIG. 5 (Anexo III) - Esquema dum tubo de fluxo de energia.

gia.

No caso da incidência frontal a energia transmitida através da reben-  
tação será convertida em calor no atrito interno desenvolvido na rebenta-  
ção, no espraiamento, no retorno e nas correntes de circulação esquematiza-  
das na figura 15 do capítulo II.

No caso mais geral, da incidência oblíqua há ainda a considerar uma  
fracção de energia com componente segundo a linha de costa, que fica dispo-  
nível e vai manter o movimento da corrente longitudinal.

Consideremos ainda o esquema da figura 1 deste anexo. A componente se-  
gundo a linha de costa da potência transmitida através da face BCEF é, se-  
gundo a teoria da onda solitária:

$$P_1 = \frac{\gamma}{T} \left[ \frac{4}{3} \cdot H_b \cdot h_b \right]^{3/2} \cdot b \cdot \text{sen} \alpha_b \quad (10\text{-III})$$

ou fazendo  $H_b/h_b = 0,78$  e substituindo  $b$  por  $\text{cos} \alpha_b$  vem:

$$P_1 = 1,11 \frac{\gamma}{T} \cdot H_b^3 \cdot \text{sen} 2 \alpha_b \quad (11\text{-III})$$

Apenas uma pequena fracção s desta potência é utilizada na alimenta-  
ção da corrente longitudinal, isto é, consumida em atrito do escoamento so-  
bre a superfície ADEF, de área S.

Assim:

$$s \cdot P_1 = F \cdot V_1 \quad (12\text{-III})$$

sendo F a força de atrito no fundo:

$F = \tau_o \cdot S$  com  $\tau_o = K \cdot V_1^2$  em que K é o coeficiente de atrito  
e pode ser expresso em função do coeficiente de Chezy, X, vindo  $k = \frac{g}{X^2}$   
ou do coeficiente de Darcy-Weisbach, f, vindo  $K = \frac{f}{8}$ .

Substituindo em (12-III) S pelo seu valor  $S = l \times \frac{h_b}{\text{sen} \theta}$  vem:

$$s \cdot P_1 = \frac{f}{8} \cdot \rho \cdot \frac{h_b}{\text{sen} \theta} \cdot V_1^3 \quad (13\text{-III})$$

Substituindo ainda nesta expressão  $P_1$  pelo seu valor indicado em (11-III) e tomando  $\frac{H_b}{h_b} = 0,78$  vem:

$$V_1 = \left[ \frac{6,97 \cdot g \cdot s}{f} \cdot \text{sen}\theta \cdot \frac{H_b^2}{T} \cdot \text{sen}2\alpha_b \right]^{1/3} \quad (14-III)$$

a) Putnam e outros [31] apresentaram, além da expressão baseada em considerações de quantidade de movimento, que já se mencionou, uma outra baseada neste tipo de análise, tendo chegado a um resultado praticamente igual ao da expressão (14-III) com a única diferença de considerarem  $\text{sen}\theta \approx \text{tg}\theta$ .

Fazendo na expressão (14-III)  $\text{sen}\theta \approx \frac{h_b}{l_b} = \frac{1,28 H_b}{l_b}$  chega-se a:

$V_1$  proporcional a  $H_b$ ;  $s^{1/3}$ ;  $(\text{sen}2\alpha_b)^{1/3}$ ;  $l_b^{-1/3}$ ;  $T^{-1/3}$ ;  $f^{-1/3}$

$V_1$  cresce com a altura de onda e o ângulo na rebentação e decresce com o aumento da distância entre a linha de rebentação e a linha de costa, com o período da onda e com o aumento da rugosidade relativa dos fundos,  $\frac{k}{h}$ .

Comparando com o que acontece na expressão (4-III) apresentada por Eagleson verifica-se haver coincidência na influência de  $H_b$ . As influências de  $l_b$ ,  $f$  e  $\alpha_b$  ocorrem com o mesmo sentido mas menos intensas. Aparecem ainda nesta última expressão as grandezas  $T$  e  $s$  a influenciar o valor de  $V_1$ .

A relação  $s$  entre a fracção da componente da potência paralela à costa, que é utilizada na alimentação das correntes longitudinais, e o valor total dessa componente, é um coeficiente para o qual não é apresentada por Putnam uma via teórica de avaliação.

A maneira de determinar o seu valor seria a partir dos dados de medição de  $V_1$ . É assim que procede Putnam encontrando valores diferentes para diferentes rugosidades do fundo. Poder-se-ia assim, conhecido o coeficiente  $s$  para uma determinada praia utilizar esse valor na previsão das correntes longitudinais nessa praia ou em praias de rugosidade semelhante. É, no en

tanto, de prever que  $s$  seja não só função da rugosidade mas também de  $m$  e das características da ondulação, pelo que não se deverá generalizar o valor de  $s$  obtido numa praia a partir de um pequeno número de medições de  $V_1$ , o que torna esta expressão pouco útil na previsão das correntes longitudinais.