

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS

LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

PROBLEMAS DE CAVITAÇÃO ORIGINADOS POR ESCOAMENTOS

A ALTAS VELOCIDADES

- Estudo das Flutuações de Pressão -

Luís Vasconcelos e Menezes Faceira

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

Lisboa, Abril de 1973



LNEC

514

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS  
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

*Para o Sr. Rui de  
Carvalho em nome  
do Sr. e Sr.  
Luís Faceira*

SERVIÇO DE HIDRÁULICA  
DIVISÃO DE HIDRÁULICA DAS ESTRUTURAS

Proc.65/11/4403

PROBLEMAS DE CAVITAÇÃO ORIGINADOS POR ESCOAMENTOS  
A ALTAS VELOCIDADES

- Estudo das Flutuações de Pressão -

Luís Vasconcelos e Menezes Faceira

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

Lisboa, Abril de 1973

1. The first part of the document is a list of names and titles.

2. The second part is a list of dates.

3.

4. The third part is a list of names and titles.

5. The fourth part is a list of dates.

6.

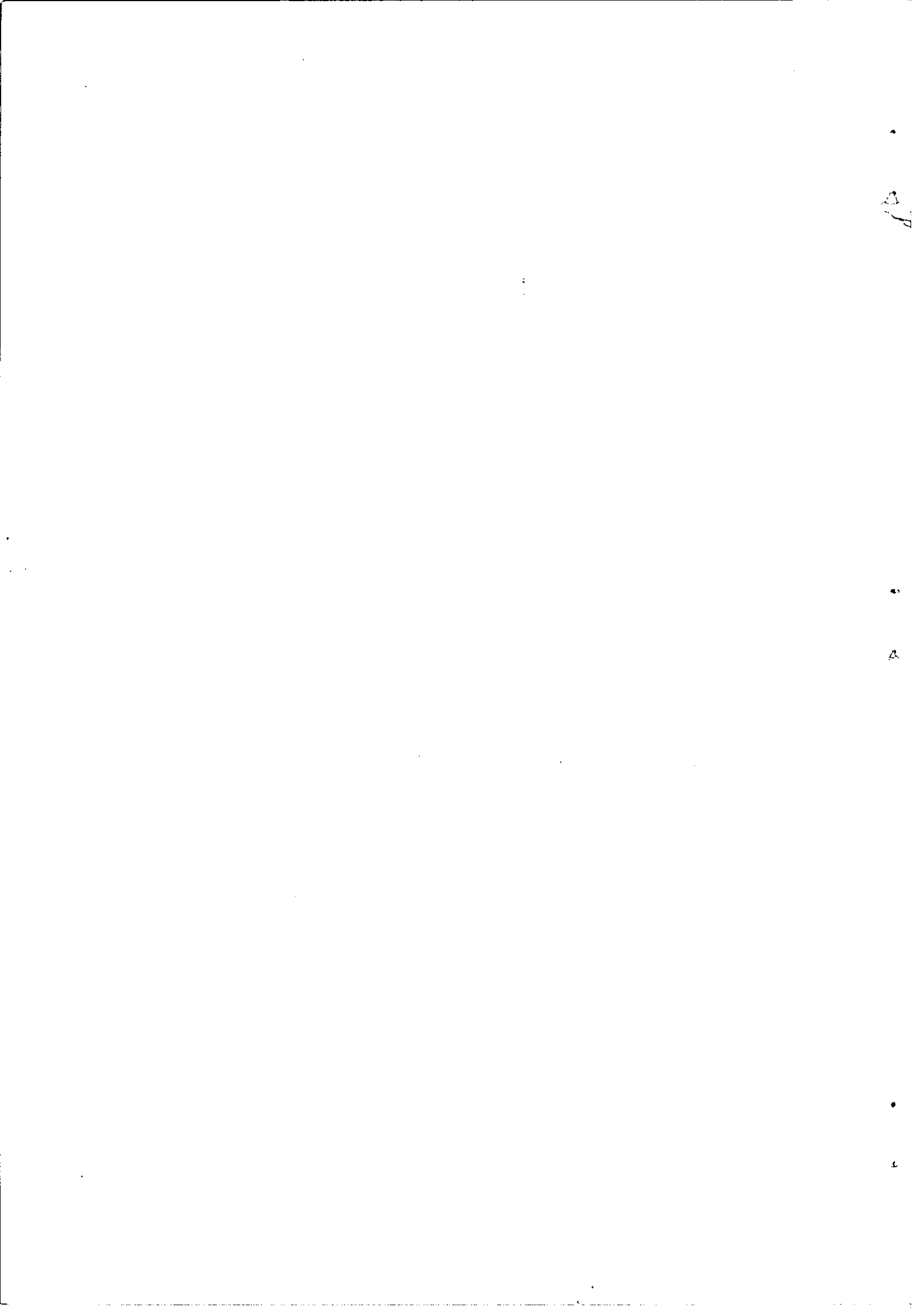
7.

8.

9.

10. The final part is a list of names and titles.

A MEUS PAIS



## AGRADECIMENTO

Ao recordarmos, agora, as facilidades e dificuldades com que depará-  
mos para poder concluir a tempo este trabalho, não queremos deixar de ma-  
nifestar o nosso agradecimento a todos quantos nos deram o seu valioso au-  
xílio, nas diversas formas por que o mesmo se pôde manifestar e tornar ú-  
til.

Bem hajam.

Dentre todos, que não individualizamos, por desnecessário, não pode-  
mos deixar, porém, de referir o nome do Engenheiro Electrotécnico, David  
Augusto Oliveira Leite, especialista da Divisão de Estudo e Construção de  
Aparelhagem do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

É que, a par dos seus conhecimentos técnicos — bem conhecidos, mas nun-  
ca por demais realçados — impressionou-nos o seu abnegado espírito de sa-  
crifício e a sua inexcedível honestidade intelectual e moral.

Sempre esquecido de si mesmo, indiferente a todas as contrariedades,  
que soube vencer, o Eng<sup>o</sup> David Leite, em tão curto espaço de tempo, tornou  
possível a realização de um estudo que, para alguns, se apresentaria, mes-  
mo, impossível.

E, embora honrando-nos com a sua amizade, impõe-se-nos, aqui, apenas,  
a grande estatura do técnico e do homem.

Igualmente queremos testemunhar o nosso agradecimento:

— Ao Centro de Estudos de Electrónica da Comissão de Estudos de Ener-  
gia Nuclear, do Instituto de Alta Cultura, pela cedência do gravador ana-  
lógico, e ainda pelas facilidades concedidas para a utilização do analisa

dor de Fourier.

- AO Laboratório de Hidráulica de Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - pelas facilidades concedidas para a utilização do correlador digital e demais aparelhagem electrónica.

É, ainda, de justiça salientar o trabalho desenvolvido pelos seguintes elementos:

- Manuel Miranda (modelador especializado); João Lopes (servente de laboratório) e José Assunção (servente de laboratório), na parte referente às realizações experimentais;

- Amândio Costa, na parte correspondente à dactilografia;

- Ildemundo Martins, enc.-geral de modelos, e Alves Rosa, ajudante de experimentador de 1.ª classe, na parte correspondente à documentação fotográfica; e

- José Banha, na impressão deste relatório.

## S U M Á R I O

Entre os problemas importantes a resolver pelos projectistas de grandes estruturas hidráulicas situa-se o da cavitação.

Com o objectivo de estudar o papel desempenhado pela rugosidade das superfícies de betão em contacto com os escoamentos a altas velocidades no aparecimento daquele fenómeno, foi elaborado um plano de investigação, no qual se previam 5 fases de estudos.

O presente trabalho constitui a concretização das 3 primeiras.

Dos estudos e ensaios realizados, salientam-se:

A - o projecto e construção duma instalação experimental para a realização de escoamentos a altas velocidades;

B - o estudo da aparelhagem de detecção e de registo das flutuações turbulentas de pressão;

C - o estudo das vias de análise - em ambos os domínios: o das amplitudes e o das frequências - desta grandeza turbulenta;

D - comparação de algumas das principais Vias de Análise Espectral, à custa da determinação das estimas do Espectro de Potência correspondente a um mesmo ensaio, e utilizando:

- um analisador panorâmico;
- um analisador de onda;
- um analisador de Fourier; e
- um computador, via conversor analógico digital;

E - a determinação da evolução das características - em amplitude e em frequência - das flutuações de pressão em lages de betão liso, para di



ferentes velocidades do escoamento com superfície livre.

Na estima dos respectivos Espectros de Potência, foi utilizada a seguinte aparelhagem:

- um analisador panorâmico; e
- um analisador de Fourier; e, finalmente,

F - o estudo da influência da pressão média na determinação do desvio padrão das flutuações de pressão.

Na detecção das flutuações de pressão foram utilizados transdutores de 2 tipos:

- de capacidade; e
- de extensómetros de resistência;

e para o seu registo recorreu-se à utilização dum gravador analógico.

## ÍNDICE DO TEXTO

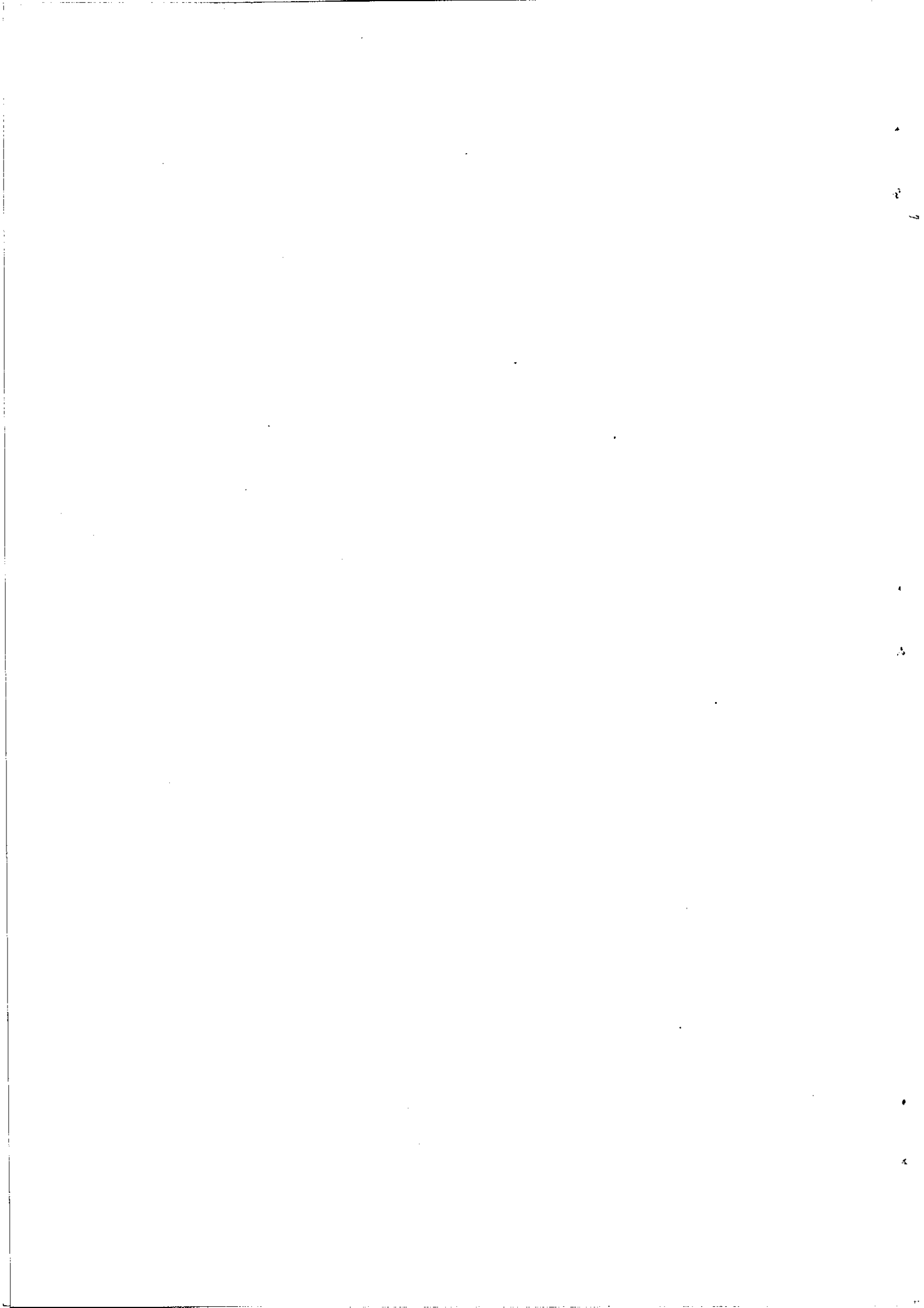
	Pág.
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO. OBJECTIVOS DO PRESENTE TRABALHO .....	1
CAPÍTULO 2	
O PROBLEMA DA CAVITAÇÃO NAS ESTRUTURAS HIDRÁULICAS .....	5
2.1 - Generalidades .....	5
2.2 - O conceito de cavitação .....	6
2.3 - Principais consequências da cavitação .....	9
2.4 - As figuras de cavitação .....	11
2.5 - A formação das bolhas de cavitação .....	12
2.6 - O colapso das bolhas de cavitação .....	15
2.7 - A influência da rugosidade do betão no fenómeno da cavitação .....	17
2.8 - O conceito de altas velocidades .....	20
CAPÍTULO 3	
O ESTUDO DAS FLUTUAÇÕES TURBULENTAS DE PRESSÃO NO DOMÍNIO DA HIDRÁULICA	25
3.1 - Generalidades .....	25
3.2 - Os estudos realizados .....	28
3.3 - O dispositivo geral de ensaios .....	35
CAPÍTULO 4	
DETECÇÃO, REGISTO E ANÁLISE DAS FLUTUAÇÕES TURBULENTAS DE PRESSÃO.....	49

PRIMEIRA PARTE: APARELHAGEM DE DETECÇÃO E REGISTO .....	49
4.1 - Generalidades .....	49
4.2 - Os transdutores de pressão .....	50
4.3 - Condicionadores de sinal .....	58
4.3.1 - Condicionadores de sinal para transdutores capacitivos .....	58
4.3.2 - Condicionadores de sinal para transdutores extensométricos ...	60
4.4 - Registo .....	61
4.4.1 - Considerações prévias .....	61
4.4.2 - Registo directo .....	63
4.4.3 - Gravação magnética em FM .....	64
4.4.4 - Registo diferido .....	70
SEGUNDA PARTE: VIAS DE ANÁLISE .....	71
4.5 - Generalidades .....	71
4.5.1 - Estudo das flutuações de pressão no domínio das amplitudes ...	73
4.5.2 - Estudo das flutuações de pressão no domínio das frequências ..	75
4.6 - Voltímetro de valor eficaz .....	76
4.7 - Analisador de onda .....	77
4.8 - Analisador panorâmico .....	79
4.9 - Correlador digital .....	80
4.9.1 - Análise no domínio das amplitudes .....	82
4.9.2 - Análise no domínio da frequência .....	83
4.10 - Analisador de Fourier .....	84
4.11 - Computador .....	87
4.12 - Exemplo ilustrativo .....	89
4.12.1 - Ensaio seleccionado .....	89
4.12.2 - Espectro de potência determinado pelo analisador de onda ....	90

4.12.3 - Espectro de frequência determinado pelo analisador panorâmico .	92
4.12.4 - Espectro de potência determinado no analisador de Fourier ...	94
4.12.5 - Espectros determinados pelo computador .....	100
4.13 - Conclusões .....	112
4.13.1 - Em relação à aparelhagem de detecção das flutuações de pressão	112
4.13.2 - Em relação à aparelhagem de registo das flutuações de pressão	113
4.13.3 - Em relação às vias de análise das flutuações de pressão .....	114
4.13.3.1 - No domínio das amplitudes .....	114
4.13.3.2 - No domínio das frequências .....	115

## CAPITULO 5

REALIZAÇÕES EXPERIMENTAIS .....	117
5.1 - Generalidades .....	117
5.2 - Realização de ensaios preliminares no canal (escoamentos com superfície livre) .....	122
5.3 - Realização de ensaios preliminares na câmara (escoamentos em pressão) .....	127
5.4 - Problemas relacionados com as rugosidades das superfícies sólidas em contacto com os escoamentos .....	127
5.4.1 - Generalidades .....	127
5.4.2 - Caso de escoamentos em pressão .....	134
5.4.3 - Caso de escoamentos com superfície livre .....	136
5.4.3.1 - Estudos prévios .....	136
5.4.3.2 - Solução final .....	136



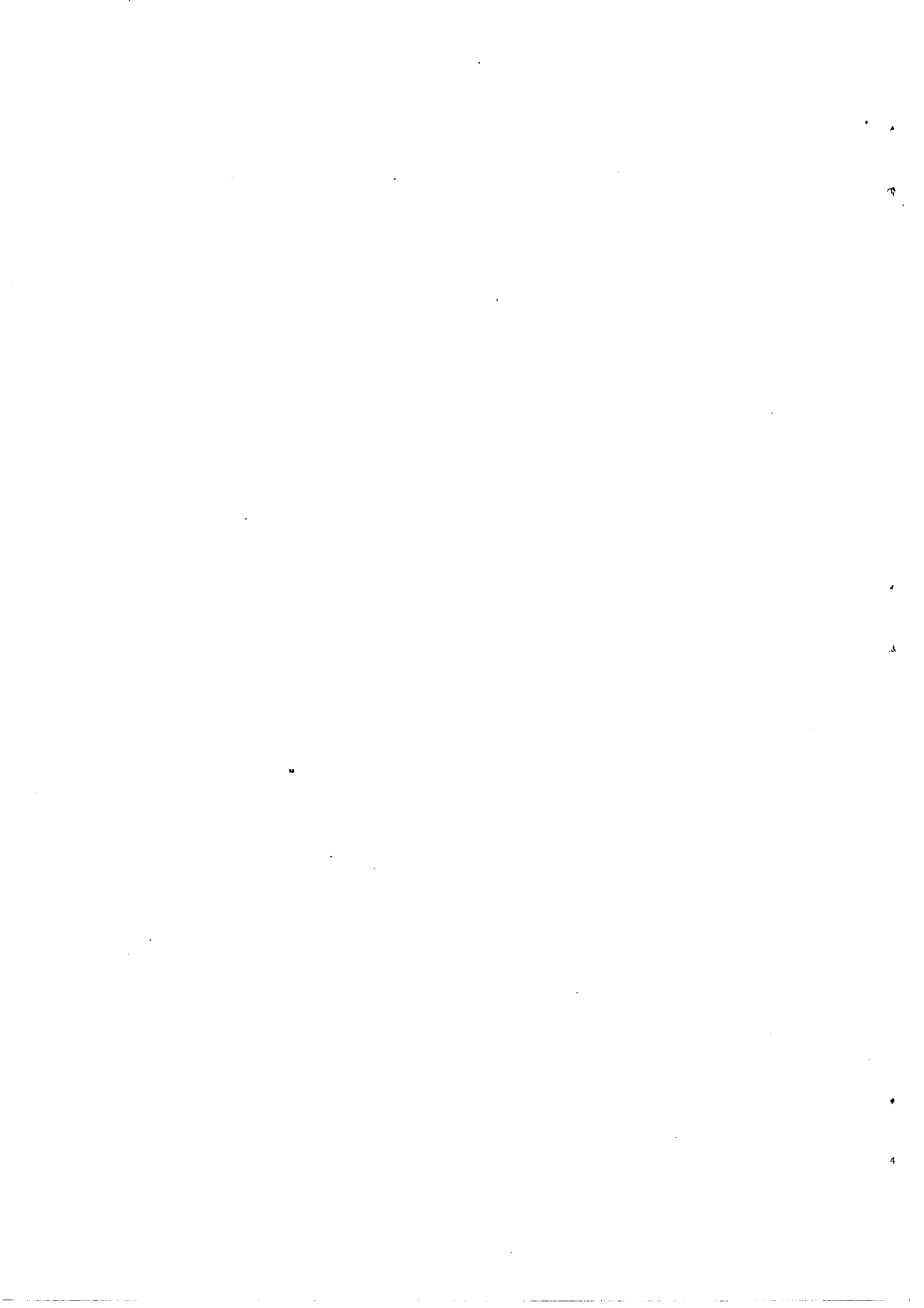
## ÍNDICE DAS FOTOGRAFIAS

- Fot. 3.1 - A instalação experimental de ensaios
- Fot. 3.2 - Grupo moto-bomba principal (125 C.V.; 1460 r.p.m.;  $500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$   
a 50 m  $\text{H}_2\text{O}$ )
- Fot. 3.3 - A câmara de ensaios (escoamentos em pressão)
- Fot. 3.4 - O canal de ensaios (escoamentos com superfície livre)
- Fot. 3.5 - Pormenor da fixação dos transdutores de pressão ao "plexiglas"  
(câmara de ensaios)
- Fot. 4.1 - Transdutores de capacidade utilizados nos ensaios com escoamentos com superfície livre
- Fot. 4.2 - Transdutores Bell & Howell
- Fot. 4.3 - Transdutores KULITE
- Fot. 4.4 - O analisador de onda utilizado nos ensaios
- Fot. 4.5 - O analisador panorâmico utilizado nos ensaios
- Fot. 4.6 - Espectro determinado pelo analisador panorâmico
- Fot. 4.7 - Aparelhagem utilizada na análise das flutuações de pressão,  
via correlador
- Fot. 4.8 - O correlador digital da F.E.U.P.
- Fot. 4.9 - Aparelhagem utilizada na análise das flutuações de pressão,  
via analisador de Fourier
- Fot. 4.10 - O analisador de Fourier do C.E.E.

- Fot. 4.11 - Aparelhagem utilizada na via computador
- Fot. 4.12 - A perfuradora do S.H. do L.N.E.C.
- Fot. 5.1 - Pormenor do molde utilizado nos estudos prévios para a definição do convergente
- Fot. 5.2 - Pormenor do molde utilizado nos estudos prévios para a definição do convergente
- Fot. 5.3 - Convergente experimental realizado à escala aproximada de 1:4
- Fot. 5.4 - Pormenor do molde do convergente instalado no dispositivo de ensaios
- Fot. 5.5 - Pormenor do molde do convergente instalado no dispositivo de ensaios
- Fot. 5.6 - Bloco de betão que integra o convergente
- Fot. 5.7 - Aparelhagem utilizada nos ensaios prévios
- Fot. 5.8 - Placa de "plexiglas", de 10 mm de espessura, utilizada nos ensaios prévios
- Fot. 5.9 - Placas de "plexiglas", de 50 mm de espessura, utilizadas nos ensaios
- Fot. 5.10 - Pormenor da placa de "plexiglas" de 50 mm de espessura (rugosidade K11)
- Fot. 5.11 - Fase da construção das placas de betão (escoamentos com superfície livre)
- Fot. 5.12 - Placa de betão já concluída (vista de baixo)

- Fot. 5.13 - Placa de betão já concluída (vista de cima)
- Fot. 5.14 - Sistema inicial de calibração dos transdutores capacitivos
- Fot. 5.15 - Dispositivo de calibração dos transdutores
- Fot. 5.16 - Câmaras de calibração dos transdutores (vista de lado)
- Fot. 5.17 - Câmaras de calibração dos transdutores (vista da zona de colocação dos transdutores)
- Fot. 5.18 - Cabina de observação e de centralização da aparelhagem electrónica de registo
- Fot. 5.19 - Transdutores utilizados nesta 1ª fase dos estudos
- Fot. 5.20 - Transdutores "simulados" a utilizar nos estudos da influência da área sensível às flutuações de pressão dos transdutores
- Fot. 5.21 - Dispositivos de fixação dos transdutores Bell & Howell às placas de betão
- Fot. 5.22 - Dispositivos de fixação dos transdutores capacitivos e transdutor "simulado"
- Fot. 5.23 - Conjunto (separado) formado por um transdutor capacitivo e respectivas peças de adaptação
- Fot. 5.24 - Conjunto (associado) formado por um transdutor capacitivo e respectivas peças de adaptação
- Fot. 5.25 - Espectro do ensaio 139, via analisador panorâmico
- Fot. 5.26 - Espectro do ensaio 142, via analisador panorâmico
- Fot. 5.27 - Espectro do ensaio 143, via analisador panorâmico
- Fot. 5.28 - Espectro do ensaio 144, via analisador panorâmico





## ÍNDICE DAS FIGURAS

- Fig. 2.1 - Cavitação. Objectivos da Investigação Aplicada em Engenharia Hidráulica.
- Fig. 2.2 - Evolução, ao longo do tempo, do raio duma cavidade esférica.
- Fig. 2.3 - Colapso duma cavidade, na vizinhança dum contorno sólido.
- Fig. 3.1 - Instalação Experimental de Ensaios.
- Fig. 3.1.1 - Esquema da solução inicial para a realização de escoamentos com superfície livre.
- Fig. 3.1.2 - Esquema da solução inicial para a realização de escoamentos em pressão.
- Fig. 3.2 - Câmara de Ensaios. Placa lisa de "Plexiglas".
- Fig. 3.3 - Câmara de Ensaios. Placa lisa de "Plexiglas". Localização dos transdutores de pressão.
- Fig. 3.4 - Câmara de Ensaios. Placa rugosa (K1) de "Plexiglas". Localização dos transdutores de pressão.
- Fig. 3.5 - Câmara de Ensaios. Placa rugosa (K11) de "Plexiglas". Localização dos transdutores de pressão.
- Fig. 3.6 - Câmara de Ensaios. Placa rugosa (K2) de "Plexiglas". Localização dos transdutores de pressão.
- Fig. 3.7 - Câmara de Ensaios. Placa rugosa (K22) de "Plexiglas". Localização dos transdutores de pressão.
- Fig. 3.8 - Convergente em betão. Cortes longitudinais.

- Fig. 4.1 - Relação entre os deslocamentos dinâmicos e estáticos de um sistema.
- Fig. 4.2 - Curva de calibração do transdutor de capacidade C 128.
- Fig. 4.3 - Curva de calibração do transdutor de extensómetros L 49119.
- Fig. 4.4 - Gravação dos sinais - Diagrama de blocos.
- Fig. 4.5 - Vias de análise dos sinais - Diagrama de blocos.
- Fig. 4.6 - Análise Espectral: via analisador de onda.
- Fig. 4.7 - Análise Espectral: via analisador de Fourier. Espectro EP-6/12.
- Fig. 4.8 - Análise Espectral: via analisador de Fourier. Espectros EP-6/15.
- Fig. 4.9 - Análise Espectral: via analisador de Fourier. Espectro EP-6/16.
- Fig. 4.10 - Análise Espectral: via computador. Cálculo 601.
- Fig. 4.11 - Análise Espectral: via computador. Cálculo 602.
- Fig. 4.12 - Análise Espectral: via computador. Cálculo 605.
- Fig. 4.13 - Análise Espectral: via computador. Cálculo 606.
- Fig. 4.14 - Análise Espectral: via computador. Programa "ESPEN 35".
- Fig. 4.15 - Análise Espectral: via computador. Janelas espectrais.
- Fig. 5.1 - Localização prevista para os transdutores nos escoamentos em pressão.
- Fig. 5.2 - Furação das placas de "plexiglas" de 1 cm de espessura para colocação dos respectivos transdutores.
- Fig. 5.3 - Dispositivo de fixação dos transdutores capacitivos.

- Fig. 5.4 - Conjunto dos dispositivos de fixação dos transdutores de capacidade ao betão.
- Fig. 5.5 - Escoamentos com superfície livre. Localização dos transdutores.
- Fig. 5.6 - Flutuações de pressão. Registos no tempo. Lage de betão liso. Transdutor na 4ª. posição. Ensaios 139 e 140.
- Fig. 5.7 - Flutuações de pressão. Registos no tempo. Lage de betão liso. Transdutor na 4ª. posição. Ensaios 141 e 142.
- Fig. 5.8 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 139. Espectro EP-139/1.
- Fig. 5.9 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 139. Espectro EP-139/2.
- Fig. 5.10 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 139. Espectro EP-139/3.
- Fig. 5.11 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 140. Espectro EP-140/1.
- Fig. 5.12 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 140. Espectro EP-140/2.
- Fig. 5.13 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 140. Espectro EP-140/3.
- Fig. 5.14 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 140. Espectro EP-140/4.
- Fig. 5.15 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 141. Espectro EP-141/1.
- Fig. 5.16 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 141. Espectro EP-141/2.
- Fig. 5.17 - Escoamento com superfície livre. Ensaio 141. Espectro EP-141/3.
- Fig. 5.18 - Escoamentos das flutuações de pressão, de acordo com os trabalhos de MINAMI e AKI.
- Fig. 5.19 - Escoamentos com superfície livre. Lage de betão liso. Desvio padrão das flutuações de pressão. Ensaios 139 a 144.
- Fig. 5.20 - Escoamentos em pressão. Influência da pressão média na determinação do desvio padrão.
- Fig. 5.21 - Influência da área dos transdutores, de acordo com os trabalhos de SERAFINI, MINAMI e AKI.

- Fig. 5.22 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Comprimento de transição  $u_t$  entre a camada limite laminar e a camada limite turbulenta, em função da velocidade de  $\bar{U}_\infty$  do escoamento.
- Fig. 5.23 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da velocidade de atrito  $u_*$ , em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.
- Fig. 5.24 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura  $\delta_0$  da película laminar, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.
- Fig. 5.25 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura nominal  $\delta$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.
- Fig. 5.26 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura de deslocamento  $\delta_*$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.
- Fig. 5.27 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura de quantidade de movimento  $\delta_2$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.
- Fig. 5.28 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura de energia  $\delta_3$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias

cias L, ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.

Fig. 5.29 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso.

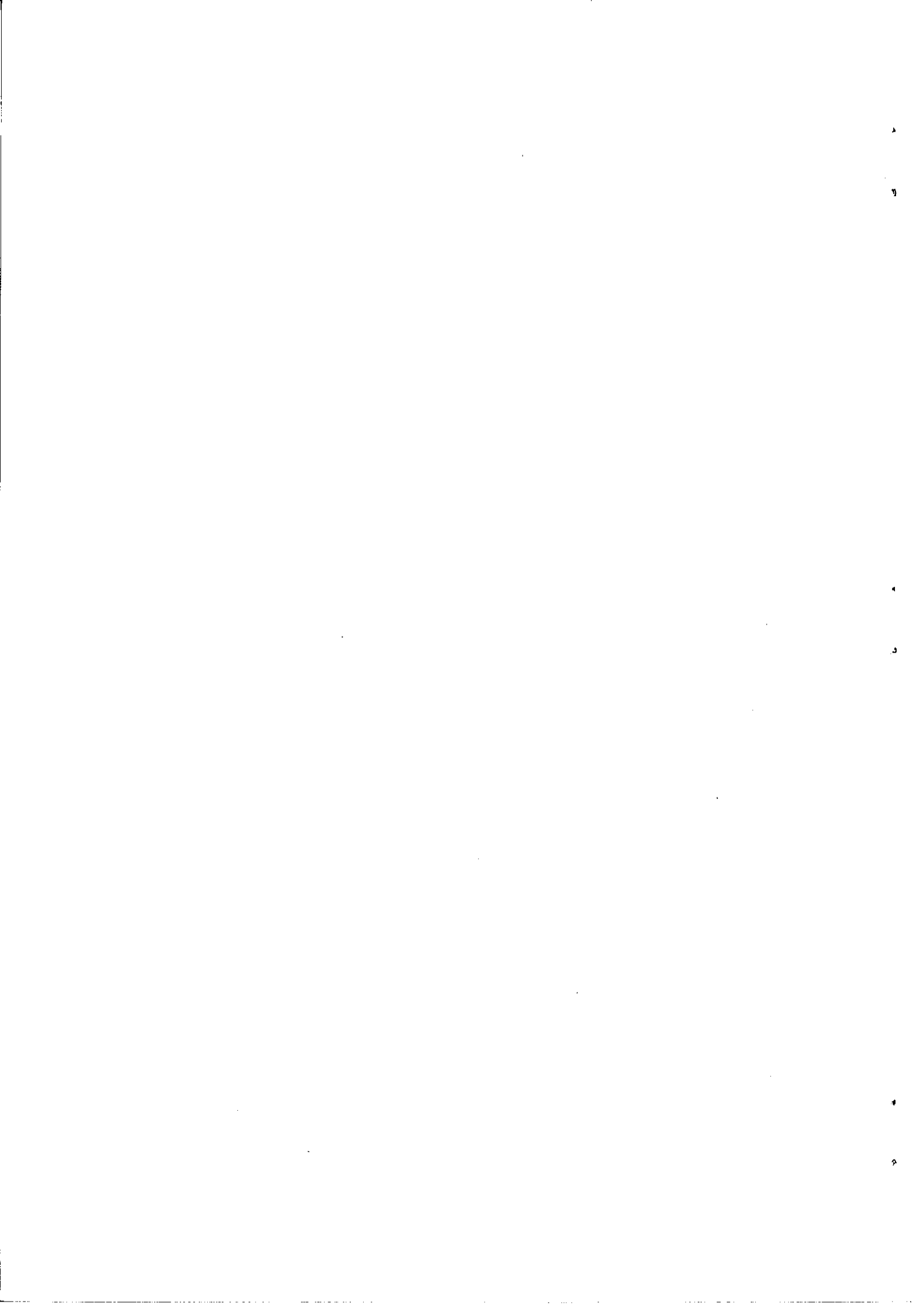
Variação de  $\frac{d}{\delta_*}$  no caso dos transdutores SOUTHERN.

Fig. 5.30 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso.

Variação de  $\frac{d}{\delta_*}$  no caso dos transdutores CEC.

Fig. 5.31 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso.

Variação de  $\frac{d}{\delta_*}$  no caso dos transdutores KULITE.



## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO. OBJECTIVOS DO PRESENTE TRABALHO

Entre os problemas importantes a resolver pelos projectistas de grandes estruturas hidráulicas, ao pretenderem definir a geometria dos contornos sólidos em contacto com os escoamentos a altas velocidades, situa-se o do aparecimento de cavitação.

Daí ter-se julgado de interesse para um trabalho de tese, a que a crgânica do Laboratório obriga, o estudo deste fenómeno no domínio da Hidráulica das Estruturas, com vista ao estabelecimento de critérios de dimensionamento de protótipos em que esse risco fosse grandemente afastado.

ABECASIS, na sua dissertação (1) apresentada a concurso para investigador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em 1961, abordou, entre outros, o problema do risco de cavitação em soleiras descarregadoras, considerando separadamente os fenómenos consequentes do valor médio que a pressão toma no paramento daquelas estruturas e os que provêm do valor instantâneo mínimo que a mesma grandeza pode tomar em consequência das suas flutuações de pressão.

E, assim, pela primeira vez, em Portugal, se dava início ao estudo experimental dum fenómeno, cuja importância foi justamente posta em destaque, e que ainda não tinha sido devidamente sentido na sua verdadeira dimensão.

A formulação do problema da cavitação provocada por valores instantâneos da pressão surge-nos feita em termos tão claros, que não deixa margem a quaisquer dúvidas quanto à importância que se atribuiu ao estudo das flutuações de pressão.



Como muito bem fazem sentir ARNDT e IPPEN (13), são muito limitados os estudos existentes do efeito da rugosidade das superfícies sólidas, em contacto com os escoamentos, sobre as flutuações de pressão.

Daí o interesse da continuação e aprofundamento da investigação iniciada por ABECASIS (2), beneficiando da aparelhagem com que, hoje em dia, é possível contar.

Mas, em nossa opinião, a análise das flutuações de pressão, para além do interesse de que se reveste no estudo de problemas relacionados com a cavitação, constitui uma matéria de base, indispensável para o esclarecimento de muitos problemas, no domínio da Hidráulica.

Por tal motivo, julgou-se conveniente efectuar um estudo detalhado das flutuações turbulentas de pressão, no sentido dum melhor esclarecimento das suas características, quer no domínio das amplitudes, quer no das frequências, tentando correlacioná-las com determinados parâmetros característicos, tais como a rugosidade equivalente de NIKURADSE, a velocidade de atrito, as espessuras nominal e de deslocamento da camada limite turbulenta, a pressão média e as dimensões do transdutor utilizado na detecção dessas flutuações.

Com esse objectivo foi elaborado, de acordo com os condicionalismos existentes, um plano de investigação a longo prazo, no qual se prevêem 5 fases:

1ª FASE - projecto e construção duma instalação experimental para a realização de escoamentos a altas velocidades sobre lages planas.

2ª FASE - estudo das vias de detecção, registo e análise das flutuações turbulentas de pressão.

3ª FASE - realização de ensaios prévios, com o objectivo de verificar o funcionamento da instalação e de ilustrar as diferentes vias de análise, utilizando lages com rugosidades artificiais.

4ª FASE - realização de ensaios definitivos, em que se procederá à determinação, simultaneamente com o registo das flutuações de pressão, dos perfis de velocidade com vista à determinação dos parâmetros característicos da camada limite, em particular das espessuras nominal e de deslocamento, da velocidade de atrito e da rugosidade equivalente de NIKURADSE. Estudar-se-á ainda a influência das dimensões do transdutor sobre as características apresentadas pelas flutuações de pressão.

5ª FASE - realização de ensaios em protótipos que completarão os realizados em laboratório.

O presente trabalho constitui a concretização das fases 1 a 3 deste plano.

No capítulo 2 faz-se uma breve síntese dos conhecimentos existentes sobre cavitação resultante da pesquisa bibliográfica efectuada sobre a matéria. No capítulo 3 aborda-se o problema das flutuações turbulentas de pressão no domínio da hidráulica, procurando-se justificar a importância do seu estudo, e descreve-se a instalação experimental que foi projectada e construída para a realização de escoamentos a altas velocidades.

A sistematização das vias de detecção, registo e análise das flutuações turbulentas de pressão constituem a matéria do capítulo 4.

No capítulo 5 descrevem-se as realizações de carácter experimental e, finalmente, no capítulo 6 faz-se uma meditação sobre o trabalho efectuado e possibilidades futuras dele resultantes.

## CAPÍTULO 2

### O PROBLEMA DA CAVITAÇÃO NAS ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

#### 2.1 - Generalidades

Parece ter sido LEONHARD EULER quem, em 1754, reconheceu, pela primeira vez, a possibilidade de existência dum fenómeno que WILLIAM FROUDE, em 1895, viria a designar por cavitação.

No entanto, os primeiros estudos experimentais que se conhecem tinham sido já realizados em 1874 por OSBORNE REYNOLDS que, através da sua histórica experiência, demonstrou que ao fenómeno da cavitação estava associado um ruído característico, que atribuiu ao colapso das bolhas de vapor formadas, no seio do escoamento, como consequência da baixa pressão instalada na secção contraída do respectivo venturi.

Também já em 1868 HERMANN Von HELMHOLTZ tinha abordado o papel desempenhado pela cavitação na formação duma superfície livre.

Muitos autores se têm dedicado, desde então, ao estudo da cavitação, principalmente a seguir à introdução da hélice como meio de propulsão dos navios. Com efeito, parece dever atribuir-se a Sir JOHN THORNYCROFT e a S. W. BARNABY a observação, em 1894, do fenómeno da cavitação nas respectivas pás, logo seguida, um ano depois, da realização dos primeiros estudos em modelo reduzido efectuados por Sir CHARLES PARSONS.

Este investigador teve, para isso, necessidade de projectar e construir o primeiro túnel de cavitação de que há memória, no qual realizou ensaios de cavitação utilizando um modelo de hélice com duas polegadas de diâmetro.

Posteriormente, em 1910, projectou um túnel de maiores dimensões que lhe permitiu realizar ensaios com modelos de hélices até ao limite de doze polegadas de diâmetro, e que constituiu o ponto de partida para o projecto dos túneis de cavitação mais aperfeiçoados que, desde então, têm sido executados.

Em 1917, foi publicado um trabalho célebre, da autoria de JOHN WILLIAM STRUTT, mais conhecido por Lord RAYLEIGH, no qual foi estudada a hidrodinâmica do colapso dum vazio esférico, trabalho esse que desempenhou um papel primordial no estudo do mecanismo físico da cavitação.

Dada a vastíssima bibliografia publicada neste campo, havia urgente necessidade da sistematização dos estudos realizados, e por isso um dos nossos primeiros objectivos, ao iniciarmos este estudo, era o de elaborar um trabalho de síntese dos conhecimentos existentes.

No entanto, após a publicação recente do livro (114) de KNAPP, DAILY e HAMMITT, que aborda os principais problemas relacionados com a cavitação, julgamos que aquele objectivo deixou de ter o interesse de que se revestia inicialmente, razão pela qual iremos procurar ser breves.

## 2.2 - O conceito de cavitação

Ao procurarmos realizar uma síntese dos aspectos mais significativos do fenómeno da cavitação no domínio da Hidráulica das Estruturas, não poderíamos deixar no olvido a resposta à pergunta que naturalmente se impõe, no início: o que é a cavitação?

Não nos parece muito fácil responder a esta interrogação com uma definição que, sendo concisa, contenha no entanto em si informação suficiente para a sua identificação em relação a outros fenómenos físicos.

Esta dificuldade resulta, a nosso ver, dos dois factores seguintes:

- da diversidade de pontos de vista dos diferentes autores que, sobre o assunto, se têm pronunciado;

- o do conhecimento incompleto do verdadeiro mecanismo físico do fenómeno.

A título de exemplo, poderemos citar as definições dadas por ARNDT e IPPEN (13); por CANAVELIS (\*) e por ABECASIS (1).

Segundo ARNDT e IPPEN, "...a cavitação pode ser definida como o processo de formação duma fase de vapor, num líquido, quando sujeito a pressões baixas".

Como se verifica, para estes autores, o que verdadeiramente caracteriza o fenómeno da cavitação é a formação de cavidades cheias de vapor, como resultado da existência duma baixa pressão. Esta definição parece ser um pouco imprecisa para satisfazer os fins em vista e daí a necessidade de os autores a completarem, mais adiante, pelo esclarecimento das razões motivadoras do fenómeno.

Para CANAVELIS (\*) a definição mais geral que se pode dar de cavitação é "... a formação de cavidades macroscópicas num líquido a partir de núcleos gasosos microscópicos".

Salientando um aspecto de muito interesse do mecanismo de formação das cavidades, ignora no entanto outros aspectos não menos importantes do fenómeno.

Tal como os primeiros autores, Canavelis considera como fundamental a existência de cavidades, não se pronunciando, na definição dada, sobre a natureza do conteúdo de tais cavidades.

Finalmente para ABECASIS (1) "... a cavitação é um fenómeno dinâmi-

---

(\*)-CANAVELIS, R.-"Contribution à l'étude de l'érosion de cavitation dans les turbomachines hydrauliques", Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, CHATOU, 1967.

co que consiste na formação, e no colapso subsequente, de cavidades, ou bolhas, cheias de vapor, num líquido em escoamento".

Em relação às anteriores, e sob o ponto de vista de Engenharia Hidráulica, esta parece ser a definição mais esclarecedora do fenómeno, embora de carácter mais restrito, como seria de esperar.

Nela estão bem salientes os seguintes aspectos:

- a cavitação é um fenómeno tipicamente hidráulico;
- a cavitação possui características dinâmicas resultantes do aparecimento e posterior colapso de cavidades no seio dum líquido em movimento.

Tal como Arndt e Ippen, Abecasis especifica a natureza do conteúdo das referidas cavidades, esclarecendo, em complemento da definição dada, que tais cavidades se formam em zonas onde a pressão local desce até à tensão do vapor.

Parece-nos, pois, que, qualquer que seja a definição de cavitação, ela estará sempre sujeita a críticas mais ou menos pertinentes.

Julgamos no entanto preferível, dentro dos conhecimentos existentes sobre o seu mecanismo físico e sob o ponto de vista que nos interessa, de definir cavitação como sendo um fenómeno tipicamente hidráulico, caracterizado por três aspectos principais:

A - formação de cavidades de vapor, a partir de núcleos microscópicos existentes no campo do escoamento, como consequência da pressão ter atingido, em certos pontos, determinados valores críticos;

B - crescimento dessas cavidades como consequência dum fenómeno de evaporação; e

C - colapso brusco final dessas cavidades, como resultado dum aumento da pressão, em relação àqueles valores críticos.

### 2.3 - Principais consequências da cavitação

As consequências que advêm, para os escoamentos e para as estruturas em contacto com aqueles, do aparecimento da cavitação são bem conhecidas dos que se têm debruçado sobre este fenómeno, e é precisamente por isso que o seu estudo se reveste hoje de particular importância, dada a tendência que se tem verificado para o aumento das velocidades máximas atingidas quer pelos escoamentos, quer pelos rotores das diferentes máquinas hidráulicas, ou ainda pelos próprios perfis hidrodinâmicos ou mesmo aerodinâmicos, no caso destes terem a possibilidade de contactos com o meio líquido.

Podemos distinguir três tipos principais de efeitos perniciosos da cavitação:

- os que modificam as características hidrodinâmicas dos escoamentos;
- os que provocam a erosão das superfícies sólidas em contacto com o líquido; e, finalmente,
- os que dão origem a ruídos e provocam vibrações.

A importância relativa de cada um destes efeitos dependerá, naturalmente, dos casos específicos em estudo.

Assim, no caso das máquinas hidráulicas, para além das vibrações a que estas podem estar sujeitas e do ruído que provocam, a cavitação tem como consequência principal o aumento de resistência ao escoamento líquido, que se traduz numa quebra de rendimento da máquina.

No caso das grandes estruturas hidráulicas o aspecto de maior interesse, relacionado com o aparecimento da cavitação, é o risco de erosão dos contornos sólidos em contacto com os escoamentos a altas velocidades. A sua importância é tal que, muitas vezes, se consideram como sinónimos os vocábulos cavitação e erosão.



Dois dos primeiros casos conhecidos de erosão do betão - imputados à cavitação (\*) - são, de acordo com HARROLD (\*\*), os das barragens de MADDEN (1935) - no Panamá - e de BONNEVILLE (1939), nos Estados Unidos da América.

Desde então, têm sido muitos os casos citados na literatura especializada, e, ainda recentemente, INOZEMTSEV publicou um trabalho (98) no qual apresenta dois quadros comparativos da composição e propriedades apresentadas pelos betões utilizados na construção de algumas barragens, entre as quais a de MIRANDA, no rio Douro.

Dado serem relativamente numerosos os trabalhos publicados sobre o problema da cavitação em estruturas hidráulicas, e uma vez que o assunto não se enquadra nos objectivos do presente trabalho, deixaremos, para outra oportunidade, o trabalho de síntese que, sobre ele, julgamos de interesse efectuar.

No entanto, gostaríamos, desde já, de referir ainda os trabalhos de BALL (17); RAO e THIRUVENGADAM (155); BROWN (39); ROBERTSON (165); JOHNSON (104); BERRYHILL (25); LEMOS e PINTO da SILVA (121); WADEKAR (198); WAGNER (199); DESTENAY e BERNARD (69); TULLIS e SKINNER (194); CASSIDY (48) e o de WINN e JOHNSON (204).

---

(\*) - como se sabe - veja-se, por exemplo, KENN (106) - o betão é um dos materiais de construção que apresentam menor resistência a este tipo de erosão.

(\*\*) - HARROLD, J.C. - "Experiences of the Corps of Engineers" - Proc. of the A.S.C.E. - pp. 1014-1040, Sept., 1945.

## 2.4 - As figuras de cavitação

A cavitação é acompanhada, como se salientou oportunamente, da formação de cavidades cujas dimensões dependem, naturalmente, da intensidade do fenómeno.

Tais cavidades, ao associarem-se e ao acompanharem as características hidrodinâmicas do escoamento, irão apresentar determinadas formas que constituem o que normalmente é designado por figura de cavitação.

No entanto, não existe, até ao momento, uma normalização capaz de caracterizar, sem margem para dúvidas, as diferentes figuras de cavitação que podem ser observadas na prática.

As dificuldades encontradas residem, a nosso ver, não só nos diferentes conceitos de cavitação e das fronteiras que se pretendam estabelecer entre as diferentes figuras, mas ainda no facto delas dependerem, em certa medida, do processo utilizado na sua observação.

Vários têm sido os critérios seguidos, mas a maioria apenas se baseia no aspecto apresentado pelas respectivas figuras.

Assim, para alguns autores, teremos apenas CAVIDADES MÓVEIS e CAVIDADES FIXAS, enquanto que, para outros, haverá a considerar ainda mais um tipo, o das CAVIDADES OSCILANTES, que, a nosso ver, é mais consequência dum certo "factor de escala" na medição do fenómeno do que propriamente de mais um tipo distinto de figura de cavitação.

São classificações que têm a vantagem da sua simplicidade mas que, em contrapartida, não permitem estabelecer uma distinção entre figuras, que nos parecem completamente diferentes.

De maior interesse foi, sem dúvida, a classificação proposta (21) por BEAUFRÈRE, que se baseia em três critérios importantes apresentados pelas

figuras de cavitação: o seu aspecto, a sua localização e a sua estabilidade espaço-temporal.

Pena foi que esta tentativa de estabelecimento duma normalização neste campo não tivesse tido a divulgação que seria de esperar.

BEAUFRÈRE começa por salientar a importância do método de observação utilizado, considerando quatro hipóteses:

- A - à vista desarmada;
- B - por via fotográfica ou cinematográfica normal;
- C - por via cinematográfica ultra-rápida;
- D - e, finalmente, pelo recurso à televisão.

Em seguida, propõe a consideração de 9 casos típicos de figuras de cavitação em relação ao critério descritivo aspecto; de 4, em relação à localização e de 7, no respeitante à estabilidade espaço-temporal, atribuindo a cada caso um dígito diferente.

Deste modo, uma figura de cavitação será, no caso mais simples, definida à custa dum número formado por três algarismos.

Por exemplo, a CAVITAÇÃO 326 possui uma figura que, no critério aspecto, é constituída por cavidades isoladas; no critério localização, se situa na vizinhança duma superfície, e, finalmente, no critério de estabilidade espaço-temporal apresenta características de instabilidade espacial e também de instabilidade temporal, mas de evolução lenta.

## 2.5 - A formação das bolhas de cavitação

Na definição de cavitação apresentada no parágrafo 2.2 focou-se um aspecto importante do seu mecanismo físico ao afirmar-se que a formação das respectivas bolhas era uma consequência da pressão ter atingido, em certos pontos do escoamento, determinados valores críticos.

A maioria dos autores consultados considera que aquele valor crítico, responsável pelo desencadear do fenómeno da cavitação - e que, por isso mesmo, poderemos designar por pressão crítica de início de cavitação - corresponde ao da tensão de vapor do líquido à temperatura local.

Será, no entanto, inteiramente válida esta hipótese?

Como hoje se sabe, seria preciso aplicar a um líquido esforços de tração da ordem de grandeza das forças de ligação molecular, se não existissem, disseminados nele, núcleos microscópicos que tornam possível a cavitação tal como a entendemos.

Com efeito, admitindo-se que à cavitação esteja associado um fenómeno de vaporização rápida - do tipo ebulição, mas provocada por uma descida de pressão, conservando-se constante a temperatura - parece aceitável considerar como pressão crítica, de início de cavitação, a pressão necessária para o desencadear daquele fenómeno de vaporização.

Sendo assim - e admitindo-se igualmente que a referida vaporização se processa a partir dos núcleos gasosos existentes no escoamento - o problema da determinação da pressão crítica de início de cavitação pode ser resolvido pelo estudo (\*) do equilíbrio dos referidos núcleos gasosos.

Julgamos de interesse referir aqui o caso dos núcleos (considerados como esféricos) serem constituídos por gases perfeitos e sofrerem transformações que possam ser consideradas como isotérmicas.

O estudo do seu equilíbrio estático conduz à expressão:

$$P = P_v + \frac{K}{R^3} - \frac{2T}{R} \dots\dots\dots (2.5.1)$$

em que:

P = pressão no líquido

P<sub>v</sub> = tensão de vapor no líquido à temperatura considerada

---

(\*) - consulte-se, por exemplo, KNAPP, R.T. ed. al. [114].

T = tensão superficial

K = constante (dado que a temperatura se mantém constante ao longo da transformação)

R = raio do núcleo.

A expressão (2.6.1) pode tomar um aspecto mais elucidativo se a representarmos sob a forma:

$$(P - P_v) = F(R) \dots\dots\dots (2.6.2)$$

Esta função apresenta um mínimo para o qual se obtêm os valores:

$$R = R_c = \frac{3}{2} \frac{K}{T} \sqrt{2} \dots\dots\dots (2.6.3)$$

e

$$(P - P_v) = (P - P_v)_c = - \frac{4T}{3R_c} \dots\dots (2.6.4)$$

que iremos designar por raio crítico ( $R_c$ ) e por pressão diferencial crítica -  $(P - P_v)_c$  -.

Por outras palavras: poderemos dizer que os referidos núcleos, ao serem arrastados pelo escoamento e ao atravessarem zonas de pressão progressivamente decrescentes, evoluem - de acordo com a lei traduzida pela expressão (2.6.1) - dentro duma situação de equilíbrio estável, praticamente sem aumento apreciável de dimensão.

A partir duma determinada situação - correspondente àqueles valores críticos - os núcleos passam a estar sujeitos a um equilíbrio instável, caracterizado pelo aumento brusco das suas dimensões.

Como se pode verificar através da expressão (2.6.4), a pressão crítica de início da cavitação será sempre inferior à tensão de vapor do líquido à temperatura em questão.

Sendo assim, poderia não parecer válida a hipótese admitida por aqueles autores, ao considerarem a tensão de vapor do líquido como a pressão crítica responsável pelo desencadear do fenómeno da cavitação.

No entanto, esse modelo teórico afasta-se um pouco do real, uma vez que, nas fases que antecedem as condições críticas, se verifica uma difusão gasosa que, embora lenta, provoca um aumento nas dimensões dos referidos núcleos. Como consequência, o valor de  $(P - P_v)_c$  torna-se cada vez mais próximo do seu valor nulo.

Por isso, parece-nos aceitável aquela hipótese, nos casos reais que interessa considerar.

## 2.6 - O colapso das bolhas de cavitação

Um dos primeiros estudos realizados sobre o mecanismo da cavitação deve-se a Lord RALEYGH, que apreciou minuciosamente o caso teórico do colapso dum vazio esférico, no interior dum fluido incompressível.

O seu estudo, sobre as pressões geradas no líquido pelo colapso isotérmico do referido vazio (considerando que este conserva a sua forma esférica, centrada na primitiva posição), permitiu demonstrar a existência de elevadas pressões e, deste modo, justificar, pela primeira vez, as erosões resultantes da cavitação.

Este modelo teórico de colapso das bolhas de cavitação tem sido o ponto de partida para o estudo de modelos mais próximos da realidade, de que CANAVELIS (\*), em 1967, elaborou uma síntese muito completa.

Embora o mecanismo exacto do colapso das bolhas de cavitação continue a ser um problema ainda não completamente resolvido (\*\*), poderemos dizer, no entanto, que existem dois tipos de colapso:

- o que se verifica fora de qualquer influência de parede
- e o que é fortemente influenciado por ela.

---

(\*) - CANAVELIS, R. - "Contribution à l'étude de l'érosion de cavitation dans les turbomachines hydrauliques" - Chatou, 1967.

(\*\*) - sobre as teorias que têm sido apresentadas para explicar o mecanismo da erosão provocada pela cavitação, consulte-se, por exemplo, RAO e THIRUVENGADAM (155).

No primeiro caso parece legítimo aceitar-se como válido o modelo de colapso esférico, e os estudos realizados demonstraram o papel principal desempenhado não só pela pressão média, mas também pelos gases, não dissolvidos, existentes no líquido.

Havendo influência de parede, a hipótese de colapso esférico deixa de constituir uma realidade física e vários têm sido, neste caso, os modelos apresentados para ilustrar este tipo de colapso.

Para tanto poderemos citar o proposto, em 1971, por PLESSET e CHAPMAN (150), na continuação de estudos anteriores.

Dado, porém, que o assunto se afasta dos objectivos deste trabalho, não o abordaremos aqui.

Também o não faremos em relação aos problemas levantados pela realização de ensaios experimentais (\*), efectuados quer com o propósito de selecção de materiais, que apresentem boa resistência a este tipo de erosão, quer no sentido de encontrar soluções(\*\*) que possam atenuar as erosões havidas como inevitáveis.

Julgamos, no entanto, de interesse apresentar dois esquemas - retirados de THIRUVENGADAM (187) - que ilustram dois aspectos importantes do mecanismo de colapso das bolhas de cavitação:

- o da evolução dum cavidade esférica nas três hipóteses indicadas na fig. 2.2; e,
- o da formação dum jacto líquido a alta velocidade (fig. 2.3), como consequência do colapso se verificar nas vizinhanças dum contorno sólido.

---

(\*) - veja-se, por exemplo, CANAVELIS (44).

(\*\*) - veja-se, por exemplo, INOZEMTSEV (98).

## 2.7 - A influência da rugosidade do betão no fenómeno da cavitação

Podem distinguir-se, nos estudos da cavitação, dois tipos distintos de investigação:

- o que visa, fundamentalmente, o conhecimento do seu mecanismo físico e que poderemos designar, por isso mesmo, de investigação de base;
- e o que procura encontrar solução para os problemas levantados, no domínio da Engenharia Hidráulica, pelo risco de aparecimento de cavitação.

Como facilmente se compreende, não se podem estabelecer fronteiras rígidas entre estes dois tipos de investigação, uma vez que os estudos deles decorrentes são, em certa medida, complementares.

Na figura 2.1 procurou-se destacar os aspectos principais duma investigação do tipo aplicado e que, a nosso ver, deverá procurar apoiar-se nos resultados já alcançados pela investigação de base e na realização de estudos, em modelo reduzido (\*) e à escala 1:1.

Esta investigação aplicada pode ser motivada pela necessidade de apreciação dum determinado projecto, ou destinar-se ao estabelecimento de critérios gerais de dimensionamento, que permitam eliminar as consequências perniciosas provocadas pela cavitação.

No caso das grandes estruturas hidráulicas, um dos problemas que têm preocupado os respectivos projectistas é o do risco de erosão das superfícies de betão - em contacto com os escoamentos a altas velocidades - provocada pelo aparecimento da cavitação.

---

(\*) - veja-se por exemplo, HOLL e WISLICENUS (93) ou ROBERTSON (165).



Embora se procure que as superfícies de betão apresentem um tipo de a cabamento o mais perfeito e liso possível, a verdade é que existem certos factores - principalmente económicos e de construção - que contribuem para que esse objectivo nem sempre se possa verificar na prática.

Deste modo, torna-se muito importante o conhecimento da ordem de gran deza das rugosidades e das deficiências que podem ser toleradas, sem ris co de cavitação.

Apesar disso, não encontramos - na pesquisa bibliográfica efectuada - muitos trabalhos que abordassem o problema do início de cavitação nas su perfícies rugosas de betão, merecendo destacar aqui alguns dos autores que - além de ABECASIS (2) - mais se têm destacado neste domínio:

- SHALNEV - este investigador tem realizado estudos sobre o papel de se mpenhado pela rugosidade no aparecimento da cavitação, no caso de saliên cias isoladas, de formas geométricas bem definidas.

- GOLGATE - realizou um dos primeiros estudos sobre a influência da ru gosidade natural no fenómeno da cavitação.

Ao contrário, no entanto, do que o título do seu trabalho (58) fazia prever, os estudos por ele realizados dizem respeito - em nossa opinião - mais ao problema do início da cavitação do que propriamente ao da erosão respectiva.

Nele se correlacionam - ao que supomos, pela primeira vez - os parâ metros:

- velocidade de atrito:  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ ; e,

- pressão média na superfície rugosa de betão:  $\bar{P}$ .

- HOLL - este investigador tem-se dedicado ao estudo do início da ca vitação provocada por rugosidades isoladas, bidimensionais, tendo - a nos so ver - particular interesse o trabalho (88).

Nele se salienta o facto do chamado coeficiente de pressão média mínima  $C_{\bar{P}_m}$  ser função da rugosidade relativa  $\frac{K}{\delta}$ ; do factor de forma  $H = \frac{\delta_*}{\delta_2}$  e do número de Reynolds local - correspondente à rugosidade em causa -

$$R_K = \frac{\bar{U}_k K}{\nu}$$

Os símbolos utilizados nestas expressões correspondem respectivamente:

$\delta$  = espessura nominal da camada limite;

$\delta_*$  = espessura de deslocamento;

$\delta_2$  = espessura de quantidade de movimento;

$\bar{U}_k$  = velocidade média da camada limite, correspondente à altura  $K$  da rugosidade; e

$\nu$  = viscosidade cinemática do líquido.

Aquele coeficiente é definido como:

$$C_{\bar{P}_m} = \frac{\bar{P}_\infty - \bar{P}_m}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}_\infty^2}$$

em que:

$\rho$  = massa específica do líquido;

$\bar{P}_\infty$  = pressão média no escoamento não perturbado;

$\bar{U}_\infty$  = velocidade média no escoamento não perturbado; e

$\bar{P}_m$  = pressão média mínima num ponto do escoamento, no interior da camada limite.

- ARNDT e IPPEN - realizaram estudos que poderemos considerar do mesmo tipo dos de HOLL e de ABECASIS, embora utilizando superfícies com rugosidades artificiais bidimensionais e não chegando a efectuar registos das flutuações turbulentas de pressão.

Em resumo, poderemos dizer que - no domínio da Hidráulica e retirando

do o trabalho (1) de Abecasis - não se encontraram estudos que tenham abordado o problema da correlação da rugosidade das superfícies de betão com os parâmetros estatísticos das flutuações turbulentas de pressão provocadas pelos escoamentos a altas velocidades, quando em contacto com tais rugosidades.

Com o plano de investigações elaborado para o efeito, julgamos poder vir a contribuir para o preenchimento desta lacuna.

## 2.8 - O conceito de "altas velocidades"

Temos vindo a falar de "altas velocidades" sem termos precisado, até ao momento, o que deveria entender-se por tal.

É, aliás, o que acontece com a maioria dos autores que têm utilizado esta expressão, e que preferem deixar a resposta em suspenso, talvez por pensarem que o conceito havido é, em certa medida, intuitivo, dispensando, por tal motivo, o esclarecimento que, a nosso ver, se impõe.

Para isso, julgamos necessário, em primeiro lugar, estabelecer uma diferença de base no conceito de "altas velocidades", de acordo com a causa que provoca tais escoamentos.

Com efeito, enquanto que nos ensaios realizados em laboratório raramente haverá necessidade do recurso a escoamentos com velocidades superiores a 5 metros por segundo, já em protótipo este valor é, em geral, amplamente ultrapassado (\*).

BROWN (39) - um dos raros autores que se pronunciaram sobre este assunto - define como altas, as velocidades da ordem dos 15 metros por segundo, ou superiores.

ROZANOV, ed. al. (170) declaram que a experiência tem demonstrado ser praticamente impossível a eliminação do risco de cavitação para estruturas hidráulicas com quedas a partir dos 30/40 metros, o que equivale à conside

---

(\*) - veja-se, por exemplo, BERRYHILL (25).

ração de velocidades da ordem dos 25 metros por segundo (\*).

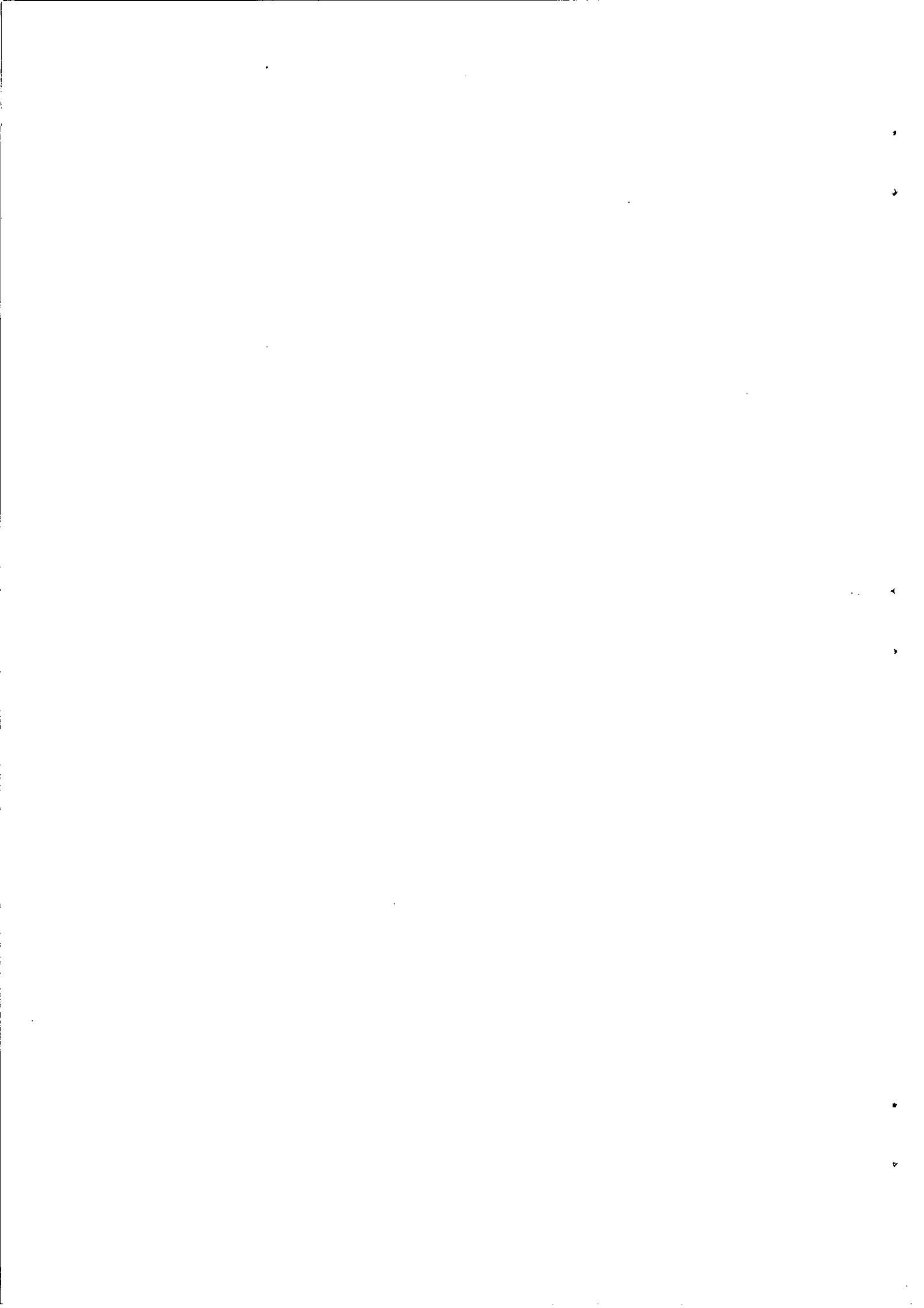
Por estes motivos - e em nossa opinião - poderemos considerar como possuindo "altas velocidades" os escoamentos que:

- resultantes de ensaios laboratoriais, apresentem valores iguais ou superiores a 5 metros por segundo; ou que,

- observados em protótipos, apresentem valores iguais ou superiores a 20 metros por segundo.

---

(\* ) - valores inferiores a estes são citados, por exemplo, em (98).



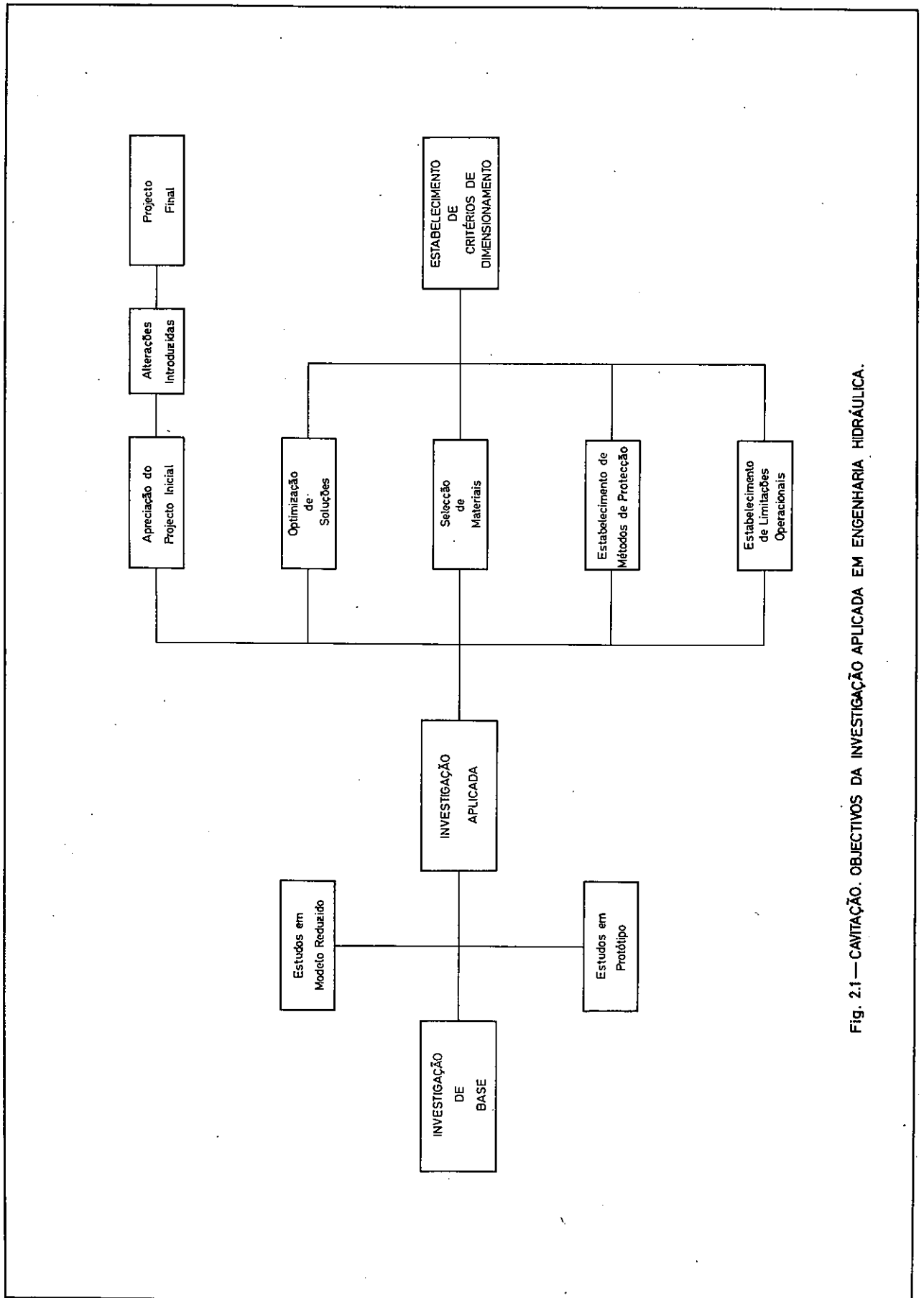


Fig. 2.1—CAVITAÇÃO. OBJECTIVOS DA INVESTIGAÇÃO APLICADA EM ENGENHARIA HIDRÁULICA.

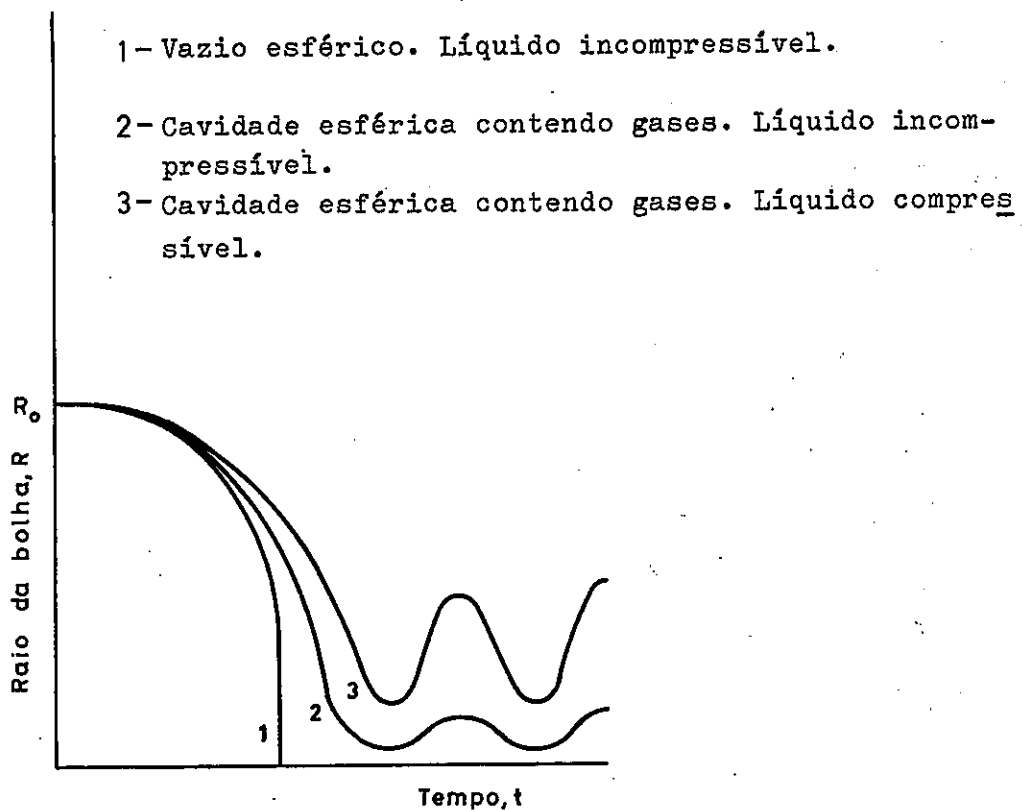


Fig. 2.2 - Evolução, ao longo do tempo, do raio duma cavidade esférica (RALEIGH, 1917, e outros).

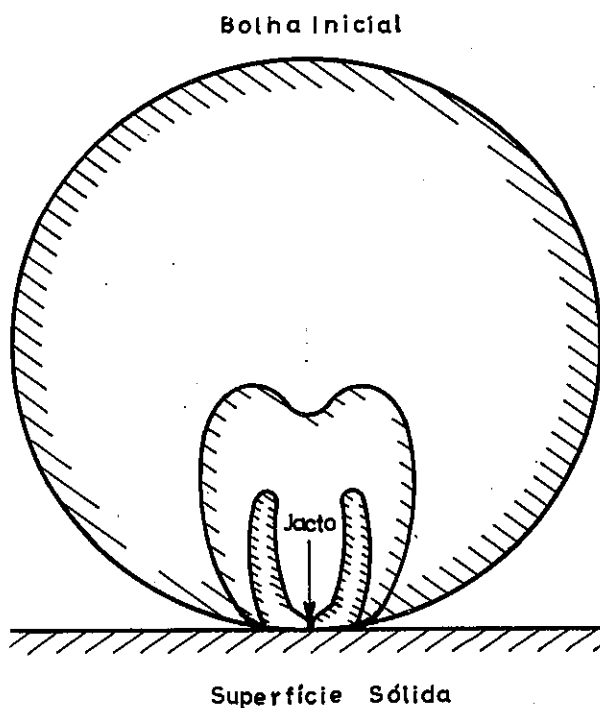


Fig. 2.3 - Colapso duma cavidade na vizinhança dum contorno sólido (PLESSET e CHAPMAN, 1970).

## CAPÍTULO 3

### O ESTUDO DAS FLUTUAÇÕES TURBULENTAS DE PRESSÃO NO DOMÍNIO DA HIDRÁULICA

#### 3.1 - Generalidades

Normalmente, os escoamentos hidráulicos apresentam, como se sabe, características turbulentas e daí o interesse do estudo destes fenómenos, iniciado, em 1877, por BOUSSINESQ.

Várias têm sido, desde então, as teorias apresentadas para explicar o mecanismo da turbulência, designação atribuída (168) a WILLIAM THOMSON - Lord KELVIN, podendo ser facilmente consultadas em quase todos os autores.

Uma síntese dessas teorias pode ser encontrada na publicação (122) de LENCASTRE.

Para o presente trabalho tem interesse salientar a importância da teoria estatística da turbulência\* que, nas últimas décadas, tem orientado toda a investigação neste domínio, principalmente após os trabalhos pioneiros de G.I. TAYLOR (1935); A.N. KOLMOGOROFF (1941); A. OBUKHOFF (1941); L. ONSAGER (1945); J. BASS (1946); A.A. TOWNSEND (1947); C.F. VON WEIZSÄCKER (1948); W. HEISENBERG (1948); G.K. BATCHELOR (1948); J.K. de FÉRIET (1948); L. AGOSTINI (1949).

Foi no entanto REYNOLDS (1893) quem, pela primeira vez, considerou que a velocidade instantânea  $-U-$  dos escoamentos turbulentos se poderia considerar como a soma duma velocidade média  $-\bar{U}-$  e duma flutuação  $-u-$  em

---

\* - ver, por exemplo, a publicação (3)



torno deste valor, ou seja:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \dots \dots \dots (3.1)$$

Idênticas considerações foram feitas para o caso da pressão instantânea, P:

$$P(t) = \bar{P} + p(t) \dots \dots \dots (3.2)$$

A turbulência é um fenómeno tridimensional, caracterizado não só pela flutuação da velocidade - que tem sido a grandeza mais facilmente mensurável - ou da pressão, mas ainda de outras quantidades tais como a temperatura ou a concentração de substâncias dissolvidas ou em suspensão.

Com efeito, o que verdadeiramente define a turbulência é a existência de determinados condicionalismos impostos pela interacção e ruptura de turbilhões de várias dimensões, entre os quais existe um determinado mecanismo de transferência de energia, dando origem, no seu conjunto, a intensas acções de mistura.

A concepção da estrutura turbulenta como um complexo sistema de turbilhões possuindo diferentes níveis de energia torna fisicamente compreensível a existência das flutuações de velocidade ou de pressão, como consequência da passagem contínua daqueles turbilhões, ao serem arrastados pelo escoamento.

Ao falarmos de turbilhão, seguimos o critério de MACAGNO (128) na distinção entre os vocábulos espanhóis vortice e torbellino, que poderemos designar por vórtice e turbilhão ou redemoinho, e a que julgamos corresponder, na literatura inglesa, vortex e eddy e, na literatura francesa, vortex e tourbillon.

Para Macagno, embora aqueles dois vocábulos correspondam necessariamente a fenómenos basicamente equivalentes, distinguem-se entre si pelo

facto de ao vórtice estar associado um movimento mais regular, enquanto o turbilhão é caracterizado pela irregularidade e pela instabilidade espaço - temporal ou, por outras palavras, pelo carácter aleatório do seu movimento.

Como muito bem salienta NOVAIS BARBOSA (143), o progresso registado nas técnicas de medição e registo das flutuações das diferentes grandezas turbulentas "... poderá contribuir decisivamente para o desenvolvimento do conhecimento do mecanismo dos escoamentos turbulentos e suas acções nos meios sólidos em contacto com o fluido".

Com efeito, têm sido precisamente as dificuldades de realização experimental destes estudos, não só no aspecto de detecção e registo das respectivas grandezas, mas ainda nas próprias vias de análise dos registos obtidos, que têm dificultado extraordinariamente tal conhecimento.

E se, mesmo quando os estudos incidem sobre os gases, em particular o ar, as dificuldades encontradas são grandes e obrigam a toda uma infraestrutura de apoio, que vai desde a existência de instalações de ensaio adequadas à aparelhagem a que é necessário recorrer e à disponibilidade em pessoal técnico qualificado para o efeito, muito maiores se apresentam os obstáculos, quando se pretendem realizar os mesmos ensaios, mas utilizando a água como fluido.

Os instrumentos que permitiram, até ao presente, um melhor conhecimento das características dos escoamentos turbulentos foram os anemómetros de fio e de filme quente, principalmente quando o fluido em estudo era o ar.

Nos últimos anos, têm sido feitos notáveis progressos na técnica de anemometria, com o emprego de métodos ópticos, tirando partido da utilização dos raios laser.

Esta nova técnica tem, em relação às anteriores, a inegável vantagem de não perturbar o escoamento, pelo que se julga vir a desempenhar um notável papel no estudo da turbulência hidráulica.

### 3.2 - Os estudos realizados

Como foi já salientado, as realizações experimentais no domínio da turbulência atmosférica têm incidido principalmente no estudo das flutuações turbulentas de velocidade, embora existam alguns trabalhos publicados sobre as flutuações turbulentas de pressão.

No entanto, é em alguns problemas relacionados com a hidráulica das estruturas que o conhecimento do campo de pressões nos contornos sólidos em contacto com os escoamentos a altas velocidades se reveste da maior importância prática, em particular devido às acções erosivas manifestadas por tais escoamentos, em virtude dos riscos de vibração de certos elementos da estrutura — tais como comportas — e da cavitação e problemas dela decorrentes.

Daí o grande interesse dum estudo detalhado das características das flutuações turbulentas de pressão não só no domínio das amplitudes, mas, ainda, no das frequências.

A grande maioria dos trabalhos publicados, abordando o problema das flutuações de pressão, tem tido como objectivo principal a resolução de alguns casos específicos.

Deste modo, e para além dos trabalhos relacionados com a cavitação e referidos no capítulo anterior, poderemos assinalar as 22 comunicações apresentadas ao 12º Congresso da Associação de Pesquisas Hidráulicas (I.A.H.R.) realizado em 1967, e ainda alguns trabalhos publicados a partir de 1966, entre os quais se destacam o de ROUSE e JEZDINSKY (169), que aborda o caso

das flutuações de pressão na zona de separação do escoamento provocada pelo alargamento brusco da secção duma conduta em pressão; o de KEIR, UNNY e HILL (105), que trata do caso das flutuações de pressão na zona do ressalto hidráulico submerso provocado a jusante duma comporta plana; o de BOWERS e TSAI (34), em que foram realizados estudos idênticos, mas para o caso do ressalto hidráulico associado a bacias de dissipação de energia deste tipo; o de NARAYANAN e REYNOLDS (137), que aborda um caso idêntico ao estudado por TATINCLAUX (184), mas utilizando um tipo diferente de obstrução; e ainda a comunicação de MINAMI e AKI (135), apresentada em 1970 ao 10º. Congresso das Grandes Barragens (I.C.O.L.D.), que constitui um dos raros trabalhos publicados sobre estudos, deste tipo, realizados em protótipos.

Estes trabalhos, embora tenham contribuído para um melhor esclarecimento dos problemas que abordam, como era seu objectivo, não fornecem, na sua maioria, informação suficiente, capaz de contribuir eficazmente para a resolução das múltiplas dificuldades encontradas na realização prática dos ensaios.

A nosso ver, esta carência de elementos resulta não só da própria complexidade dos assuntos em causa, mas também da existência de toda uma eficiente infraestrutura de apoio que, ocupando-se da resolução desses problemas, permite que o investigador se possa dedicar, exclusivamente, àquele tipo de investigação aplicada.

Ora, dada a quase completa falta de experiência e dos meios necessários com que deparámos, houve necessidade de projectar e construir uma instalação experimental para a realização de escoamentos a altas velocidades e de resolver os problemas relacionados com a aparelhagem e detecção, de registo e de análise, pelo que julgamos ter contribuído, assim, para um possível bom êxito dos estudos previstos no Serviço de Hidráulica, neste domínio.

Em Portugal, o estudo das flutuações de pressão iniciou-se com os trabalhos de LENCASTRE (122) e de ABECASIS (1), mas a investigação então levada a cabo não teve a continuidade que seria de esperar e só muito recentemente NOVAIS BARBOSA (143) tornou a abordar o assunto numa forma esclarecida, mesmo não esquecendo as tentativas de RODRIGUES DE ALMEIDA (9) no sentido de preencher aquele vazio.

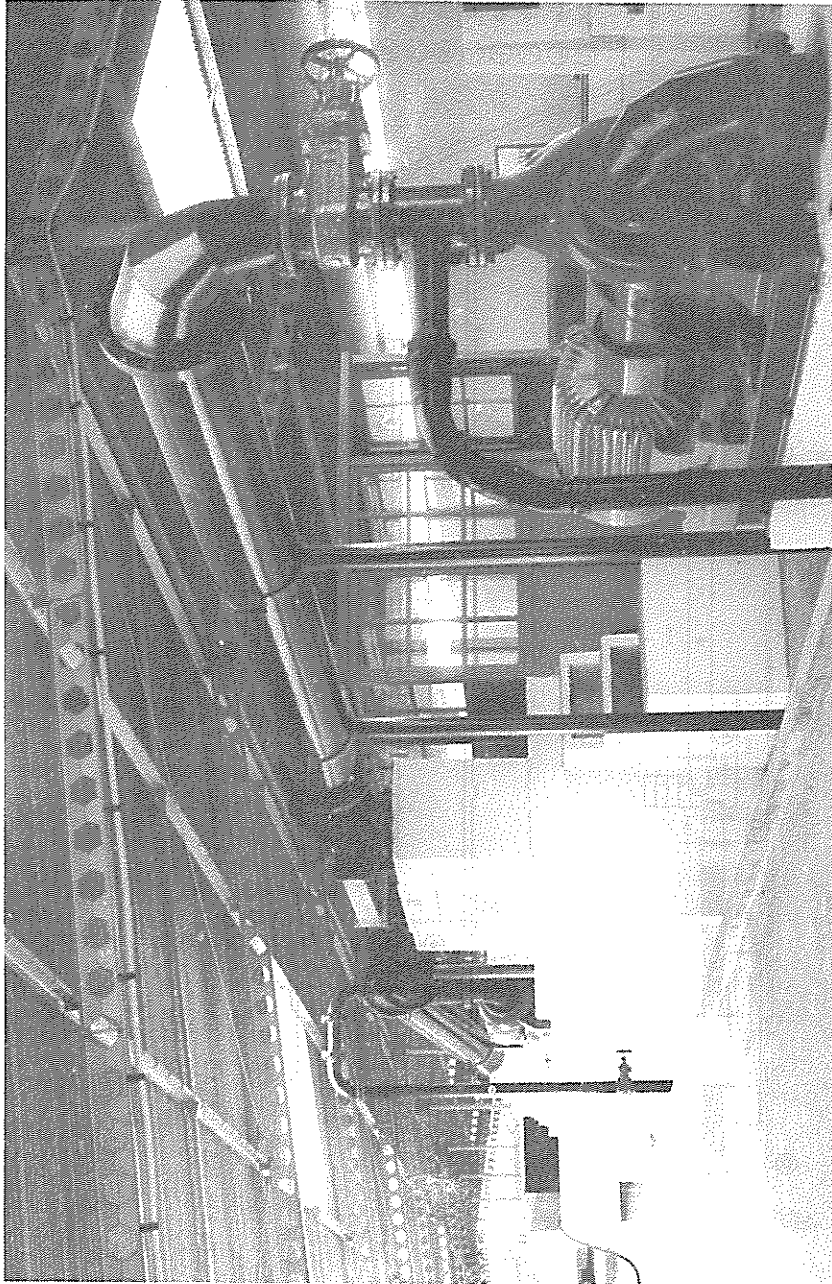
LENCASTRE, na dissertação (122) apresentada em 1961 a concurso para investigador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ocupou-se do estudo das acções dos jactos livres em fundos fixos.

Justificando a necessidade dum estudo prévio do fenómeno da turbulência, tece, ali, considerações de muito interesse sobre as funções de correlação e escalas de turbulência e ainda sobre as funções espectrais.

Este trabalho constitui, mesmo, uma etapa muito importante na resolução dos problemas levantados pelo estudo das flutuações de pressão, sendo de assinalar a parte correspondente à aparelhagem de medida e sistemas de elaboração de resultados, que julgamos poder considerá-lo, em valor absoluto, trabalho pioneiro neste campo.

Posteriormente, em 1965, RODRIGUES DE ALMEIDA parece ter tentado um estudo deste tipo, que se limitou, no aspecto prático - e tanto quanto se pode deduzir do seu trabalho (9) - ao registo em fita magnética dos ensaios obtidos a partir dos transdutores de tipo indutivo, que utilizou para o efeito.

Finalmente, em 1971, NOVAIS BARBOSA publicou um trabalho (143), de muito interesse prático, sobre o registo e medição das flutuações de pressão, particularmente no respeitante ao estudo efectuado sobre as características dos respectivos transdutores, trabalho esse integrado no plano de in-



Fot.3.1.1 - A instalação experimental de ensaios

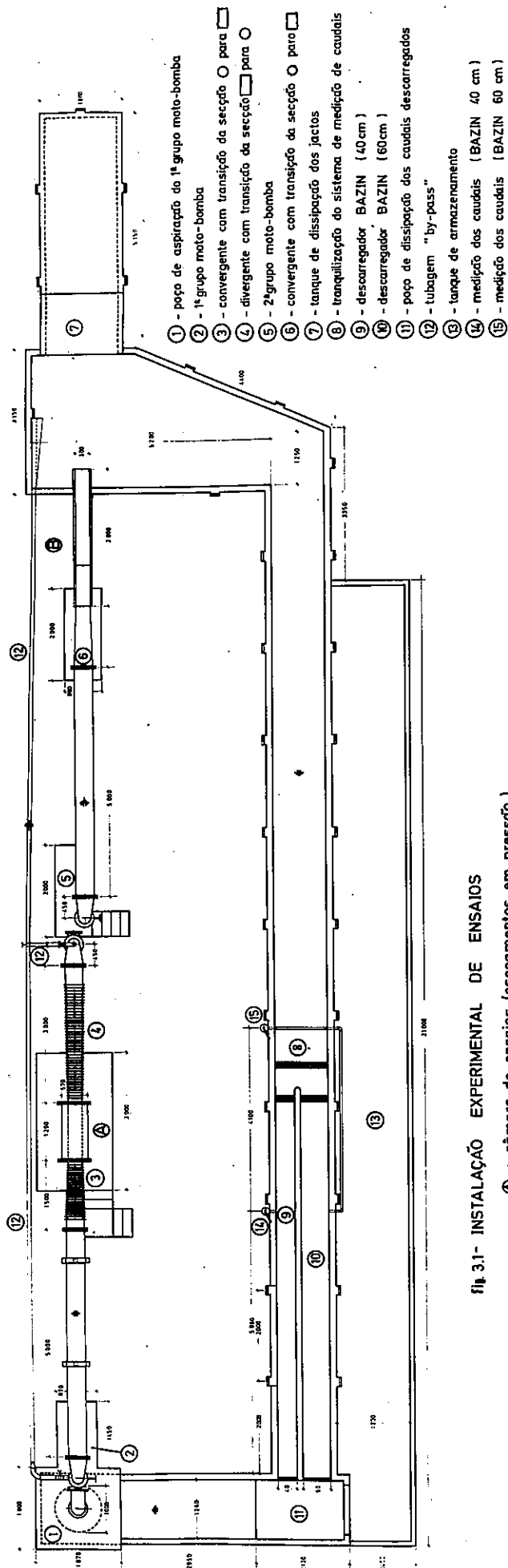


Fig. 3.1- INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL DE ENSAIOS

- A - câmara de ensaios (escoamentos em pressão)  
 B - canal de ensaios (escoamentos com superfície livre)

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL  
PARA ALTAS VELOCIDADES DE ESCOAMENTO

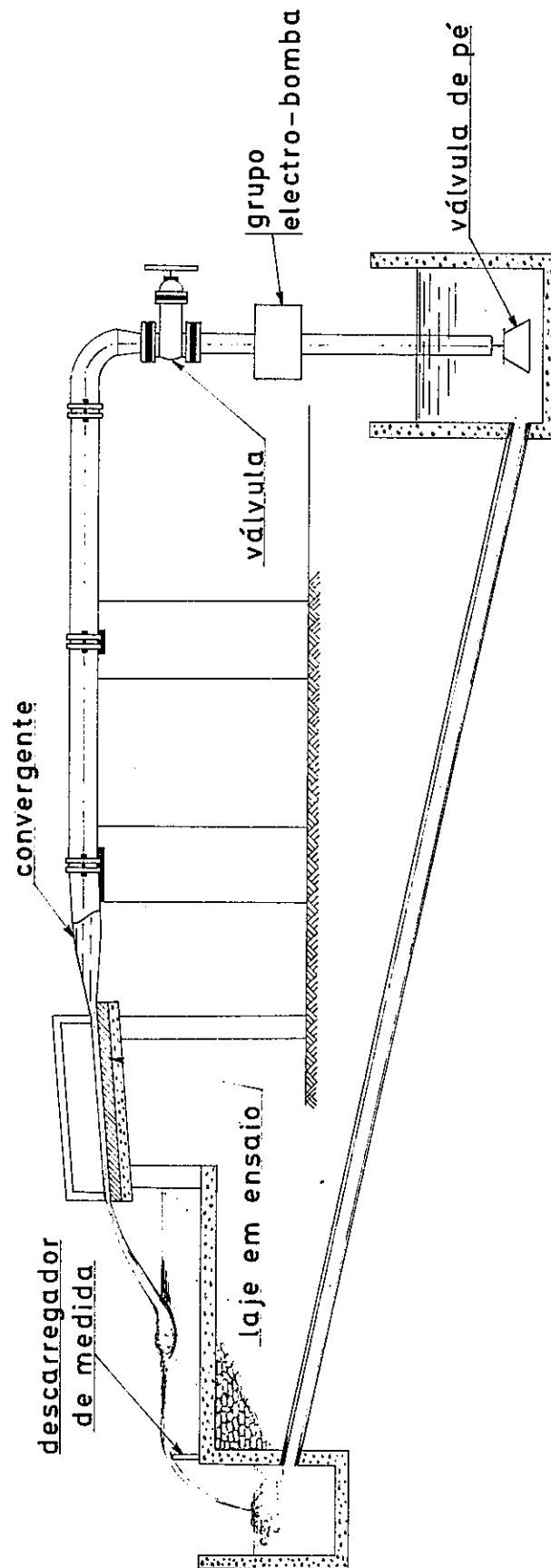


Fig. 3.11- Esquema da solução inicial para a realização de escoamentos com superfície livre



INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL  
PARA ALTAS VELOCIDADES DE ESCOAMENTO

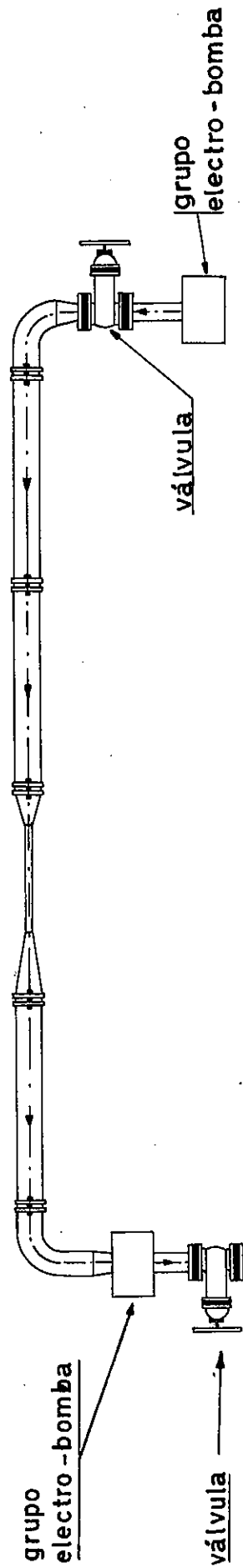


Fig. 3.1.2 - Esquema da solução inicial para a realização de escoamentos em pressão

investigação (\*), que tem vindo a ser executado nos últimos anos, e com carácter de continuidade, no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

### 3.3 - O dispositivo geral de ensaios

Para a concretização dos ensaios que pretendíamos realizar houve, como se disse, necessidade de projectar uma instalação experimental que permitisse o estudo das flutuações de pressão provocadas pelos escoamentos a altas velocidades.

Uma das primeiras dificuldades encontradas foi a da fixação das velocidades máximas de ensaio, uma vez que havia fortes conditionalismos económicos que limitavam as ambições neste aspecto.

Como se torna óbvio, havia todo o interesse em atingir velocidades da ordem de grandeza das observadas em protótipos e, por isso, julgou-se de interesse realizar um estudo técnico-económico que permitisse optimizar a solução a ser executada, dentro da gama de soluções possíveis, com vista à concretização dos múltiplos aspectos dos ensaios pretendidos.

Esse estudo iniciou-se por uma pesquisa do mercado de bombas, para se conhecer as suas potencialidades, e, com esse objectivo, foram consultadas as principais firmas metropolitanas representantes de bombas, de fabrico nacional e estrangeiro, e estabelecidos contactos com os respectivos técnicos, de forma a esclarecer algumas dúvidas surgidas.

Na posse destes elementos, foram então estudados vários tipos de solução, considerando associações de bombas em série, em paralelo e em série-paralelo, visto existirem dois problemas básicos a resolver: o problema das altas velocidades pretendidas e o dos caudais que eram necessários,

---

(\*)-"Estudo da Turbulência Hidráulica. Estudo das Flutuações de Pressão".

em face das secções de ensaio consideradas.

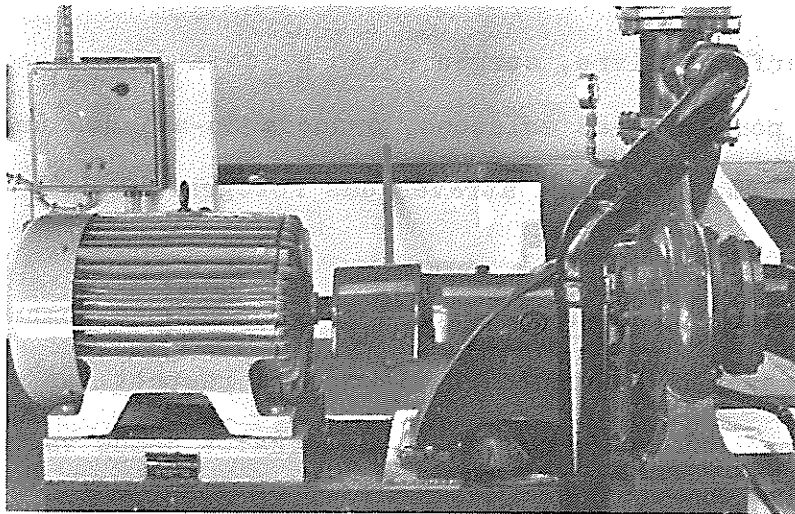
Outro problema que foi preciso resolver dizia respeito à concepção da própria instalação experimental de ensaios, uma vez que os objectivos a atingir foram sucessivamente aumentando, de acordo com a conveniência de realização de mais estudos de base, sentida ao longo da meditação sobre estes assuntos.

Inicialmente, pretendia-se, como ainda se pretende, dar continuidade aos estudos iniciados por ABECASIS sobre o problema do risco de cavitação, em soleiras descarregadoras, provocado pelos valores instantâneos mínimos que a pressão pode tomar no paramento daquelas estruturas, como consequência das suas flutuações, conforme afirmação feita já no capítulo 1.

Para isso, a instalação experimental que se previa era a indicada esquematicamente na figura 3.1.1, basicamente idêntica à utilizada por Abecasis nos seus ensaios, e constituída por um ou mais grupos electro-bombas e por um canal de secção rectangular, onde se iria provocar um escoamento com superfície livre.

No entanto, a realização de escoamentos em pressão tornaria possível a concretização de estudos mais completos sobre as características das flutuações de pressão, em particular pela possibilidade existente de variação da pressão média, à custa da utilização de dois grupos electro-bombas, entre os quais seria intercalada a respectiva secção de ensaio. Esta solução permitiria ainda a realização dos ensaios em condições hidraulicamente mais bem definidas, aspecto particularmente importante numa primeira fase dos ensaios, em que não seriam determinados os perfis de velocidade.

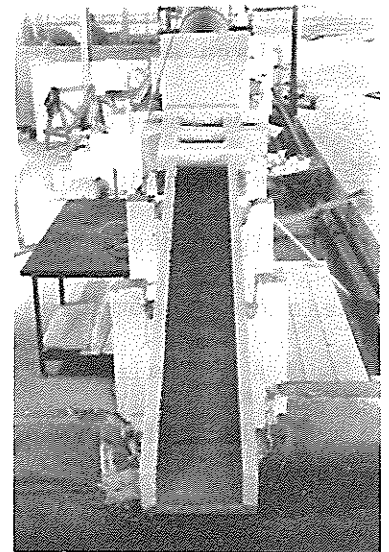
Surgiu assim o tipo de instalação experimental representado esquematicamente na figura 3.1.2, em certa medida parecido com o utilizado por ARNDT e IPPEN para a realização dos seus estudos (13).



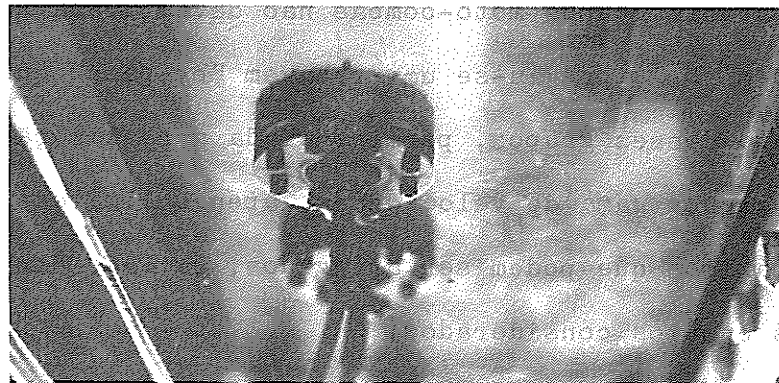
Fot.3.2 - Grupo moto-  
bomba prin-  
cipal (125  
C.V.1460 r  
p.m.; 500m<sup>3</sup>  
h<sup>-1</sup> a 50 m  
H<sub>2</sub>O)



Fot.3.3 - A câmara de ensaios (escoamen-  
tos em pressão)



Fot.3.4 - O canal de en-  
saios (escoamen-  
tos com superfi-  
cie livre)



Fot.3.5 - Pormenor da fixação dos transdutores de  
pressão ao "plexiglas" (câmara de ensaios)

Mas, dada a importância de que se reveste a realização de ensaios no caso de escoamentos com superfície livre, surgiu então a ideia de aproveitar as vantagens oferecidas por ambas as soluções, associando-as numa única instalação experimental, como se mostra através das Fotografias 3.1 a 3.4, e do esquema indicado na figura 3.1.

Pelo accionamento conjunto, ou separado, dos dois grupos moto-bombas que integram a instalação, e por conveniente regulação das respectivas válvulas, é possível variar a pressão média na câmara de ensaios desde valores correspondentes aos da tensão de vapor de água (à temperatura dos ensaios) até cerca de 40 metros de coluna de água.

Para a medição das pressões médias foram previstas tomadas para ligação a manómetros, mano-vacuómetros e vacuómetros - devidamente calibrados - seleccionados de acordo com a gama de pressões dos respectivos ensaios.

Igualmente foram previstas tomadas para a ligação aos habituais painéis de piezómetros.

A instalação funciona em circuito fechado - como se pode ver pela Fig. 3.1 - havendo um tanque que, pelo seu volume de armazenamento, não permite a ocorrência de grandes variações do nível do poço de aspiração do 1º grupo moto-bomba, que se pode manter, assim, praticamente, constante ao longo dos ensaios.

O caudal máximo disponível, nas condições actuais de funcionamento da instalação, é de cerca de  $720 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Dado que os dois grupos moto-bombas não devem trabalhar com caudais inferiores a  $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , previu-se uma tubagem "by-pass" que, garantindo o bom funcionamento desses grupos, permite ainda a realização de ensaios em pressão para qualquer gama de velocidades, apenas limitada superiormente pelos caudais máximos que podem ser atingidos, em face das características específicas dos ensaios considerados.

A primeira zona de ensaios é constituída por uma câmara em pressão (Fot. 3.3) com as dimensões de 2,85 cm x 30,3 cm x 110,5 cm, situada entre os referidos grupos.

Das duas tampas que a integram (Fig. 3.2 a 3.7) uma é constituída por uma placa lisa de "plexiglas" e a outra pode ser seleccionada entre várias placas - lisas ou rugosas - do mesmo material, mas nas quais existem aberturas para a instalação dos respectivos transdutores (Fot. 5.9 e 5.10).

A espessura destas placas é de 50 mm e previu-se um contraventamento, realizado à custa de perfilados  $\square$  de ferro - para assegurar a rigidez do conjunto.

A segunda zona de ensaios permitiu a realização de escoamentos com superfície livre, sobre lages de betão de diferentes rugosidades.

O convergente (Fig. 3.8), instalado a montante do respectivo canal, - e que realiza a transição da secção circular de 43 cm de diâmetro, da tubagem principal, para a secção rectangular de 30 cm x 5 cm - resultou dum estudo prévio que teve por objectivo o de garantir boas condições de escoamento no canal.

Nas fotografias 5.1 a 5.6 procura dar-se uma ideia dos estudos realizados nesse sentido.

Inicialmente, previa-se um canal do mesmo tipo do utilizado por Abecassis (1), que permitiria a utilização de lages amovíveis.

No entanto, a experiência aconselhou a substituição integral do canal (lage mais paredes laterais) de forma a poderem ladear-se determinados problemas de ordem construtiva.

Para a medição dos caudais fez-se uso da técnica habitual no Serviço, recorrendo-se a descarregadores Bazin. Teve-se particular cuidado em garantir uma boa tranquilização e em eliminar as oscilações do nível da água

nos "poços" piesométricos, de forma a assegurar boas condições de escoamento no canal de medida e de permitir a leitura fácil dos respectivos hidrómetros de ponta direita.

O controle da temperatura dos escoamentos foi conseguido por intermé-dio de um termómetro de mercúrio, devidamente calibrado, que permitia leitu-ras com a precisão de 1/10 de grau centígrado, o que foi considerado sati-sfatório.

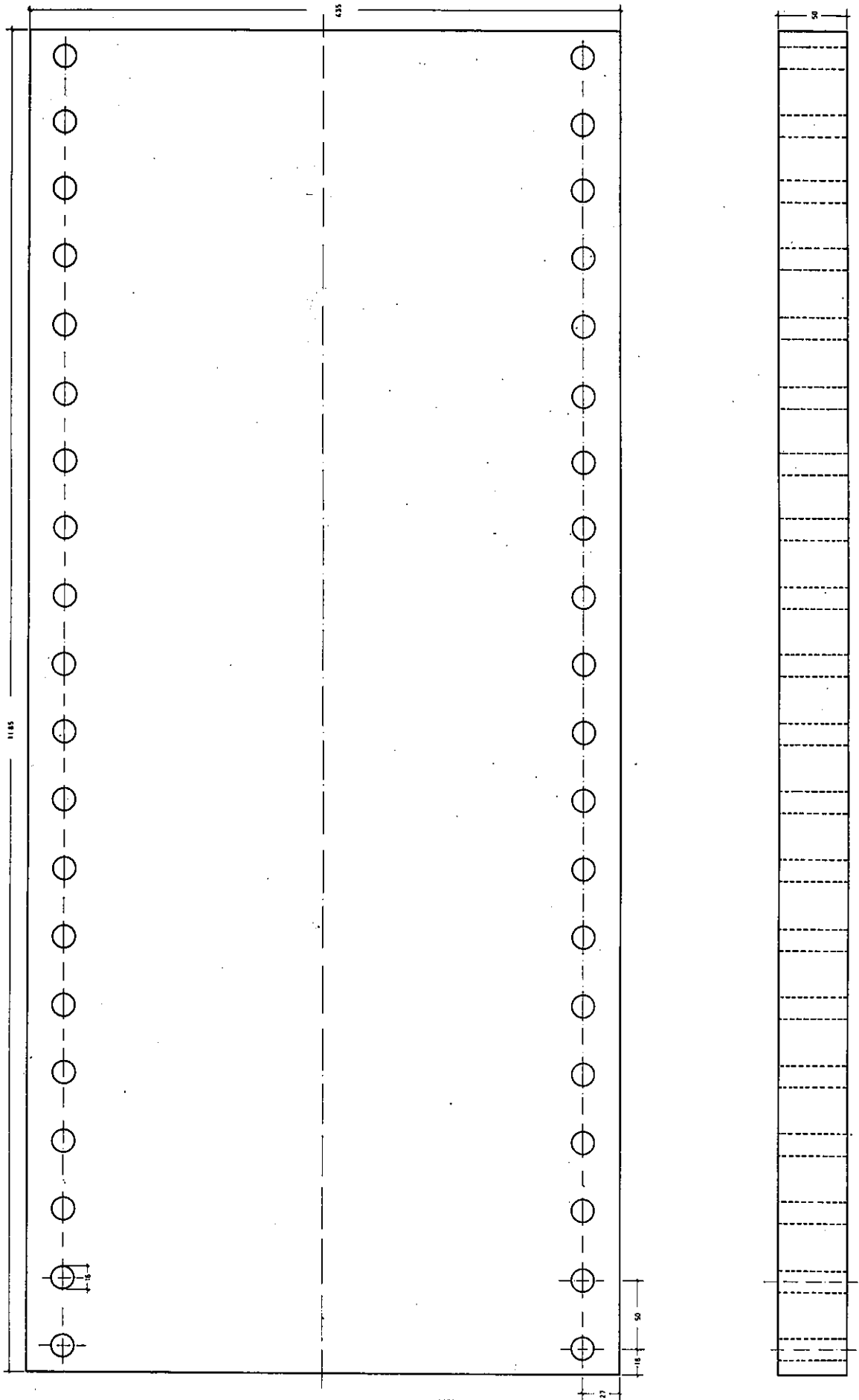


Fig. 3.2 - CÁMARA DE ENSAIOS Placa lisa de "Plexiglas"



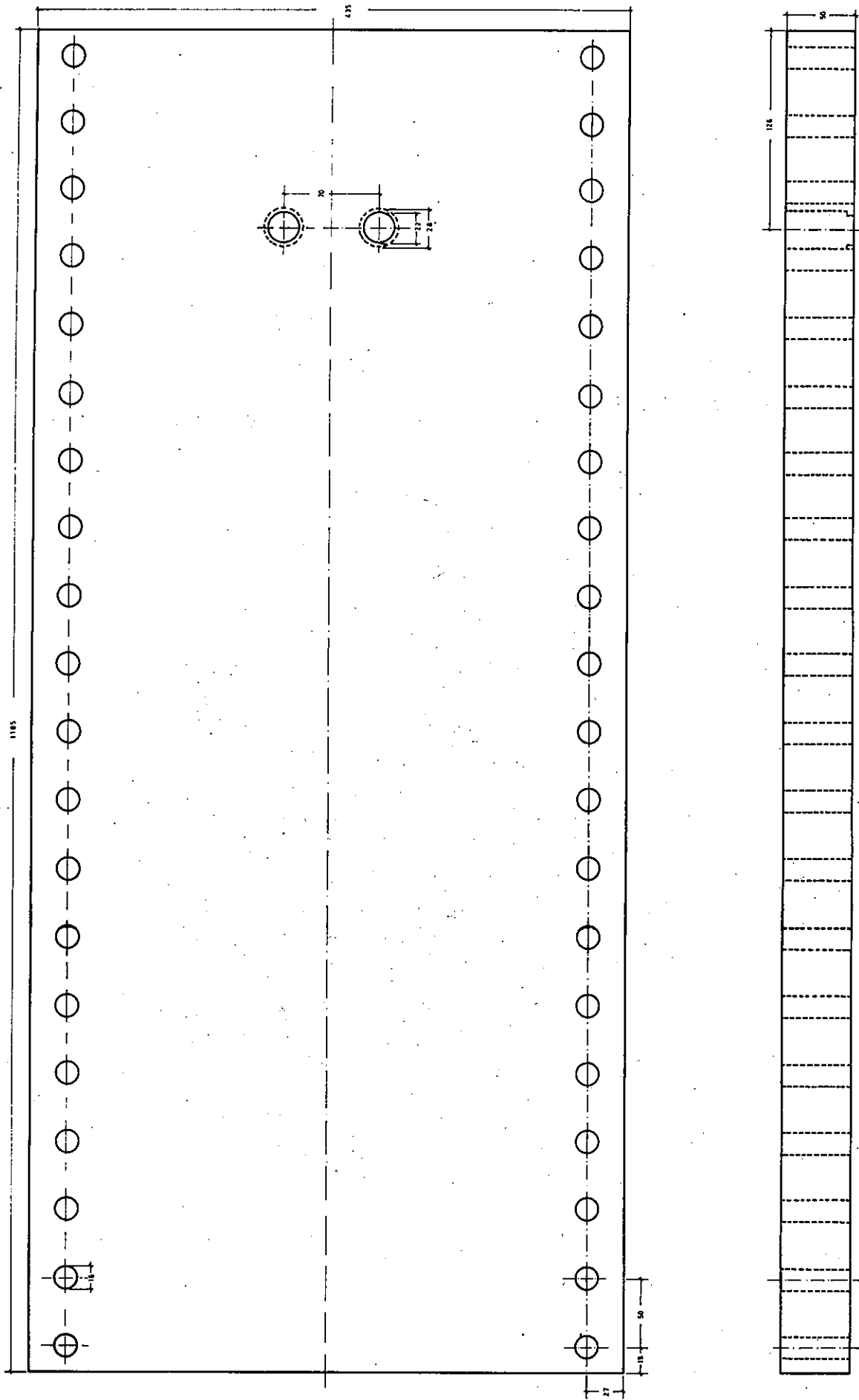


Fig.3.3 - CÂMARA DE ENSAIOS Placa lisa de Plexiglas" localização dos transdutores de pressão

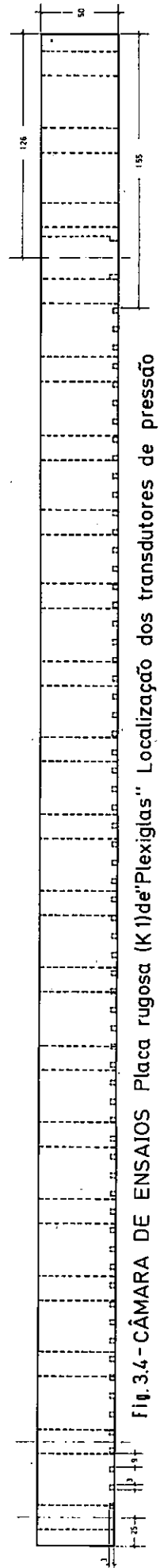
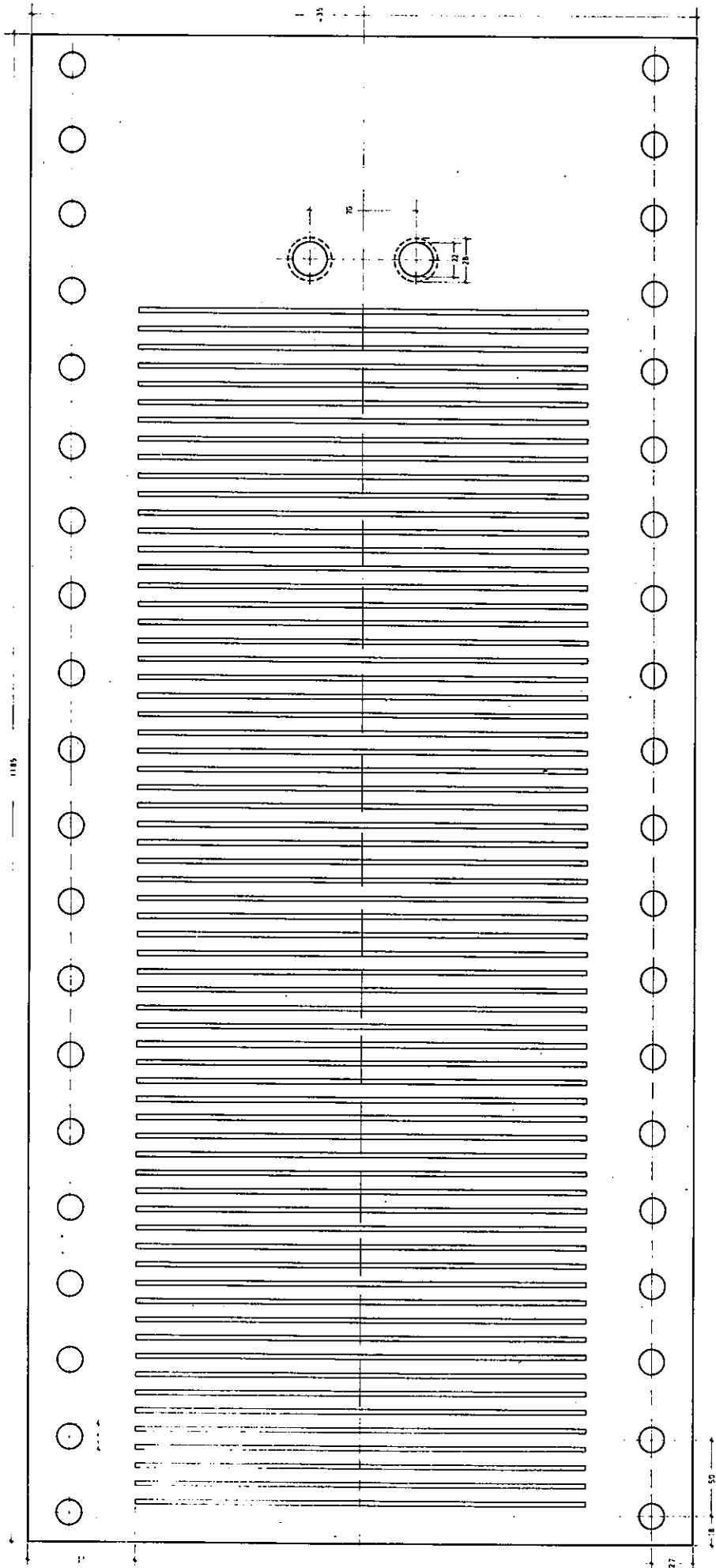


Fig. 3.4 - CÂMARA DE ENSAIOS Placa rugosa (K1) de "Plexiglas" Localização dos transdutores de pressão

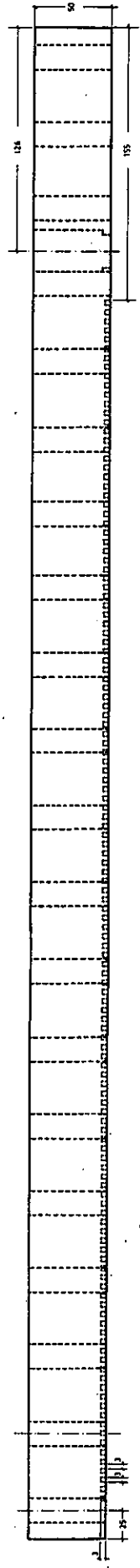
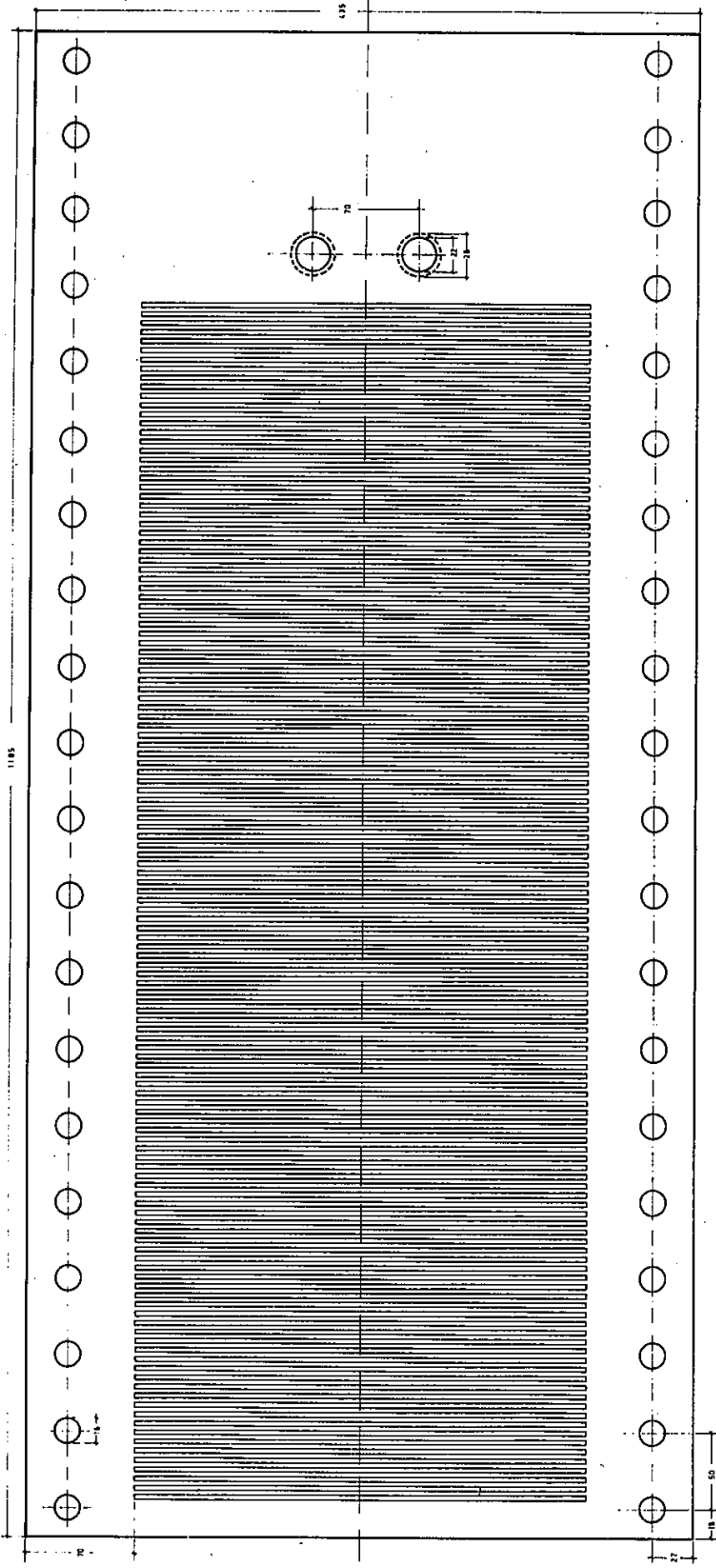


FIG. 3.5 - CÂMARA DE ENSAIOS Placa rugosa (K11) de Plexiglas" Localização dos transdutores de pressão

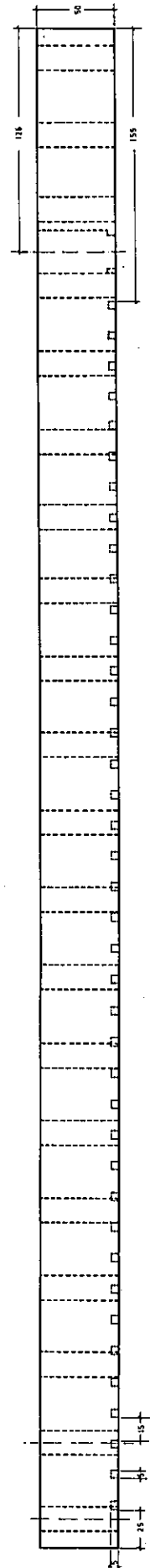
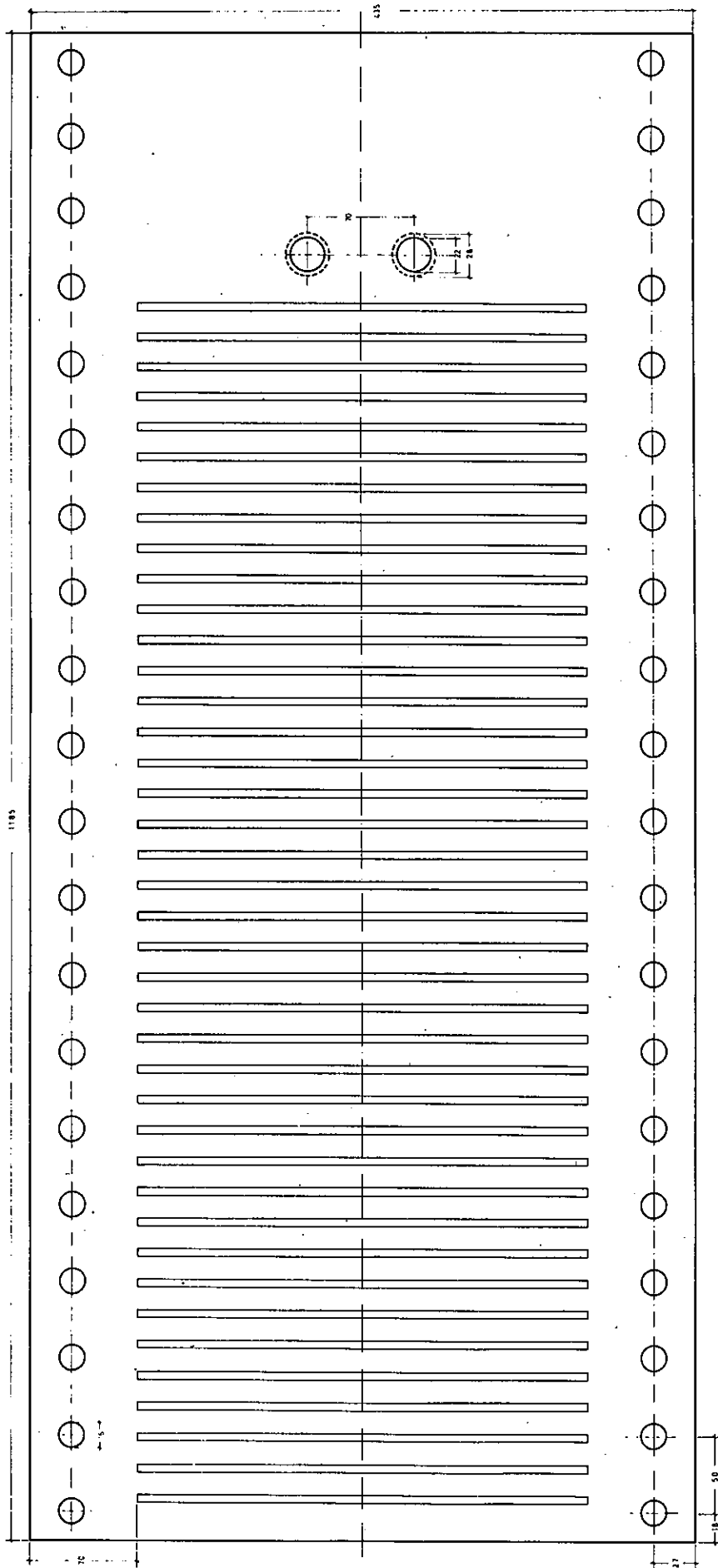


FIG. 3.6 - CÂMARA DE ENSAIOS Placa rugosa (K2) de "Plexiglas" Localização dos transdutores de pressão

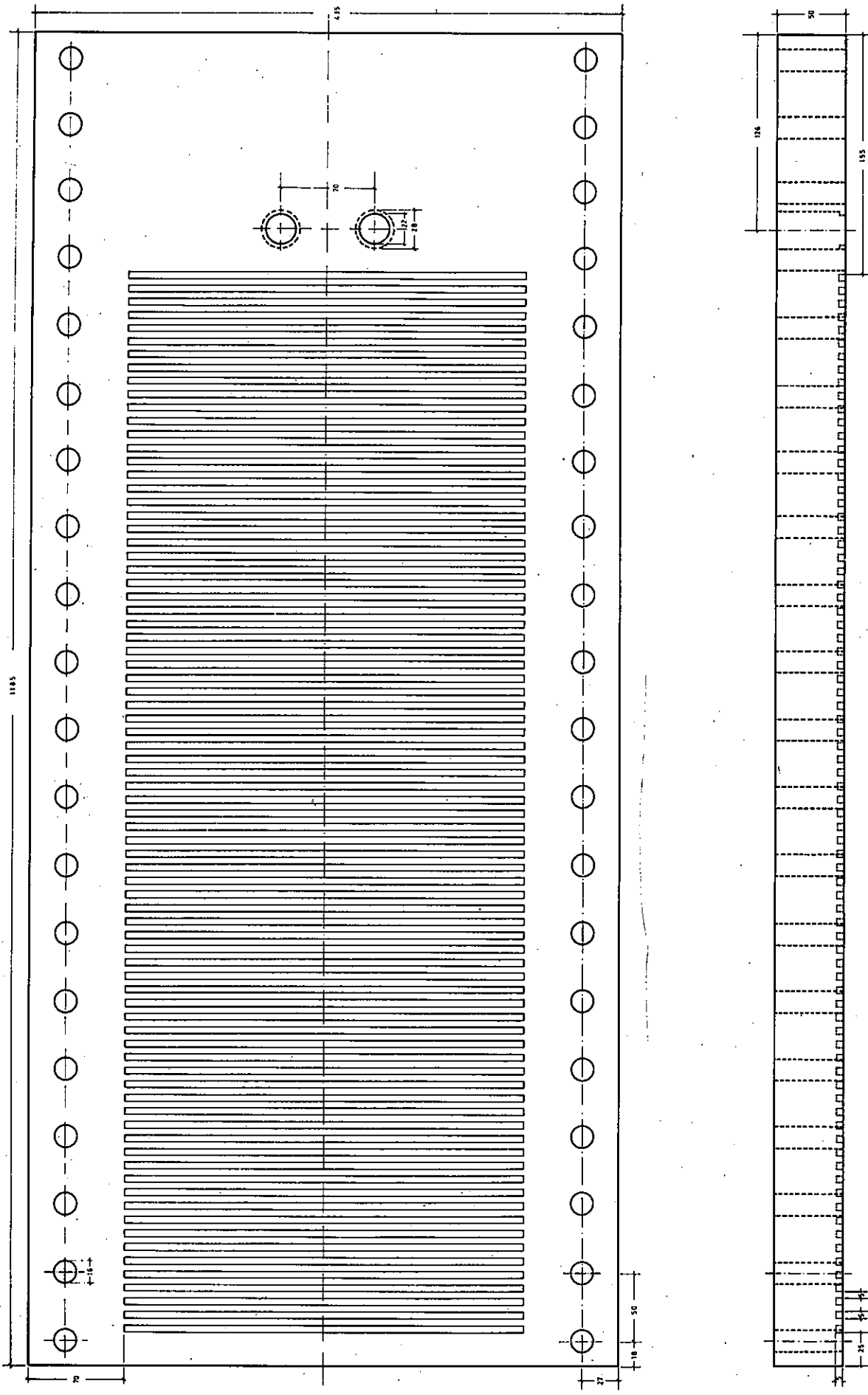
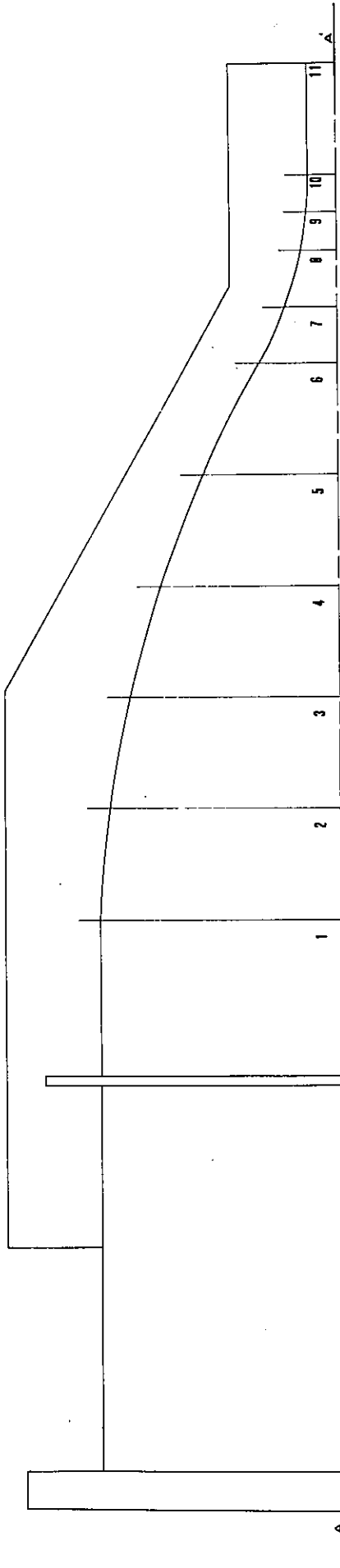
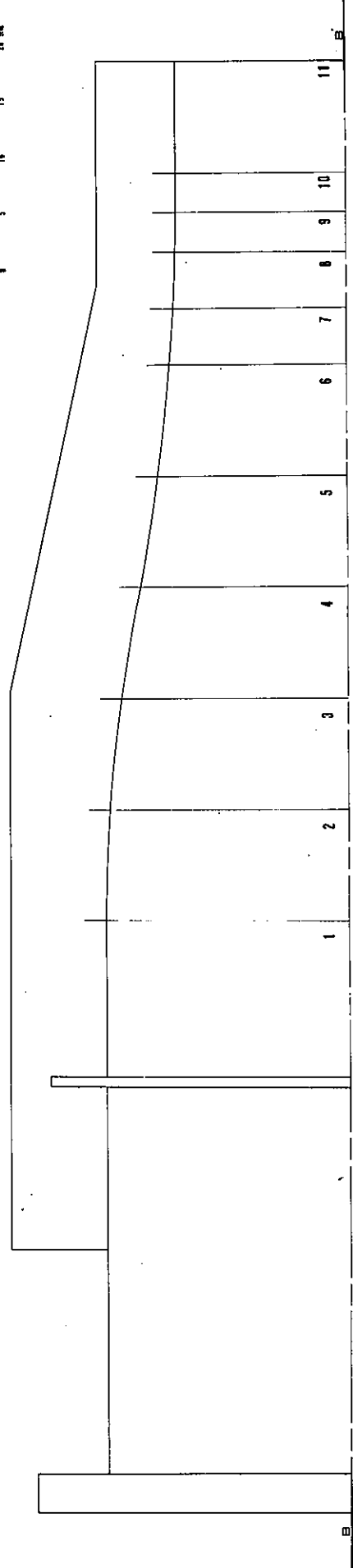


Fig. 3.7- CÂMARA DE ENSAIOS Placa rugosa (K2.2) de "Plexiglas" Localização dos transdutores de pressão

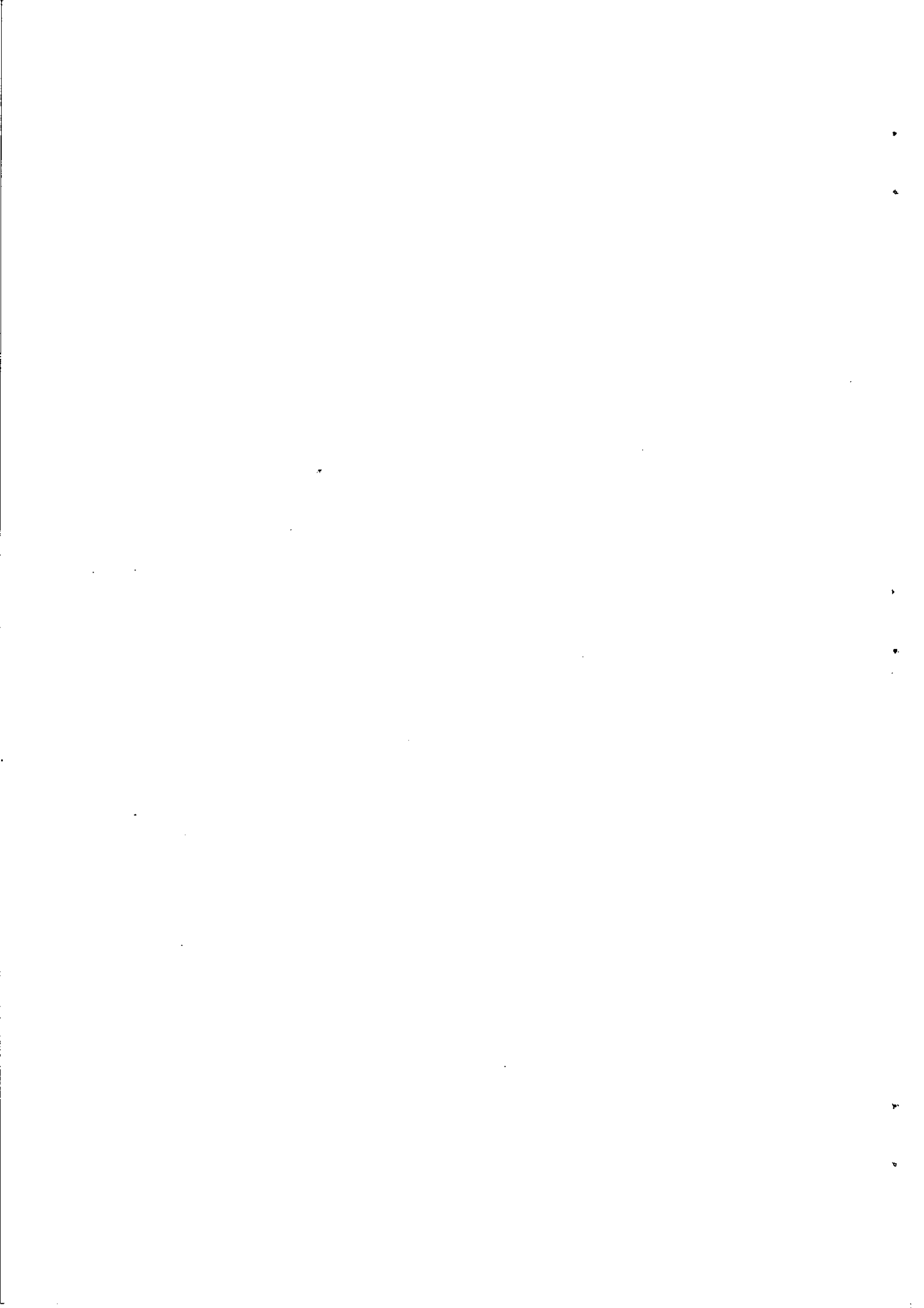


Alçada principal. Corte longitudinal AA



Planta. Corte longitudinal BB

FIG. 38-CONVERGENTE EM BETÃO  
cortes longitudinais



## CAPÍTULO 4

### DETECÇÃO, REGISTO E ANÁLISE DAS FLUTUAÇÕES TURBULENTAS DE PRESSÃO

#### PRIMEIRA PARTE: APARELHAGEM DE DETECÇÃO E REGISTO

##### 4.1 - Generalidades

Nos capítulos anteriores procurou-se salientar a necessidade de realização de ensaios que permitissem o estudo das flutuações turbulentas de pressão nas superfícies rugosas em contacto com os escoamentos a altas velocidades.

Assim, e no final do capítulo 3, fez-se uma breve descrição da instalação experimental de ensaios que foi construída para os tornar possíveis.

Chegou agora o momento de nos referirmos aos estudos realizados sobre a aparelhagem de detecção e registo das respectivas flutuações de pressão, estudo esse que possibilitou, posteriormente, a sua análise estatística, e de que nos ocuparemos na 2ª. parte deste capítulo.

Como se sabe, a Divisão de Hidráulica das Estruturas do LNEC possuía apenas 4 transdutores capacitivos, da marca SOUTHERN, tipo G252, de 10 psig, e um aparelho de 5 canais para condicionamento dos sinais destes transdutores.

Em face das necessidades decorrentes dos estudos que se pretendiam realizar, houve necessidade da aquisição de novos transdutores.

Com efeito, enquanto que nos escoamentos com superfície livre a pressão instantânea não se afastaria muito do valor correspondente à pressão atmosférica, já nos escoamentos em pressão seria necessário atender à sua componente estática, que podia situar-se dentro duma gama de pressões (ab



solutas) que se estenderia desde valores próximos dos da tensão de vapor da água (à temperatura de realização dos ensaios) até cerca de 4 kg por cm<sup>2</sup>.

Para se ter a garantia da constância das características dos transdutores em toda a gama de pressões considerada, julgou-se conveniente a consideração de dois campos distintos de medida:

- de 0 a 50 psia; e
- de 0 a 15 psia.

Os transdutores dentro desta última gama de pressões podiam ser ainda utilizados nos ensaios para escoamentos com superfície livre, o que, como se irá ver adiante, se revelou ser de grande utilidade.

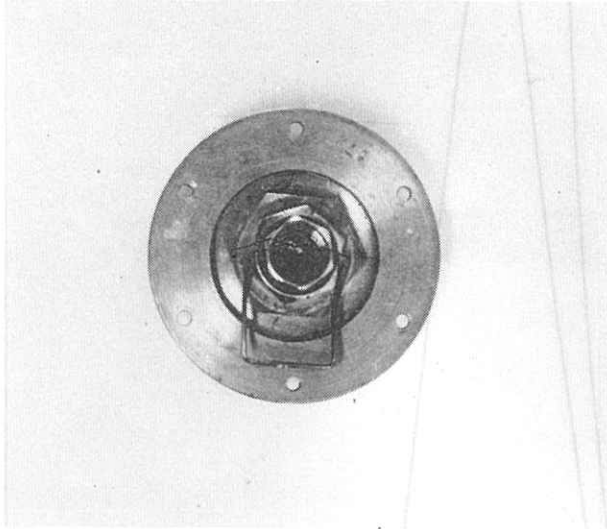
Além do campo de medida, as restantes características principais consideradas para a sua selecção, foram:

- precisão;
- sensibilidade e resolução;
- frequência própria;
- área do elemento sensível; e
- tipo de aparelhagem conversora do sinal da célula em sinal eléctrico compatível com o seu registo (condicionadores de sinal).

#### 4.2 - Os transdutores de pressão

Dado que os transdutores SOUTHERN possuíam, como se referiu, um campo de medida de 0 a 10 psig, houve necessidade de averiguar, antes da sua utilização nos ensaios, se as características por eles manifestadas se mantinham para pressões inferiores às atmosféricas.

Dos estudos realizados foi possível verificar que estes transdutores



Fot.4.1 - Transdutores de capacidade utilizados nos ensaios com escoamentos com superfície livre



Fot.4.2 - Transdutores Bell & Howell



Fot.4.3 - Transdutores KULITE

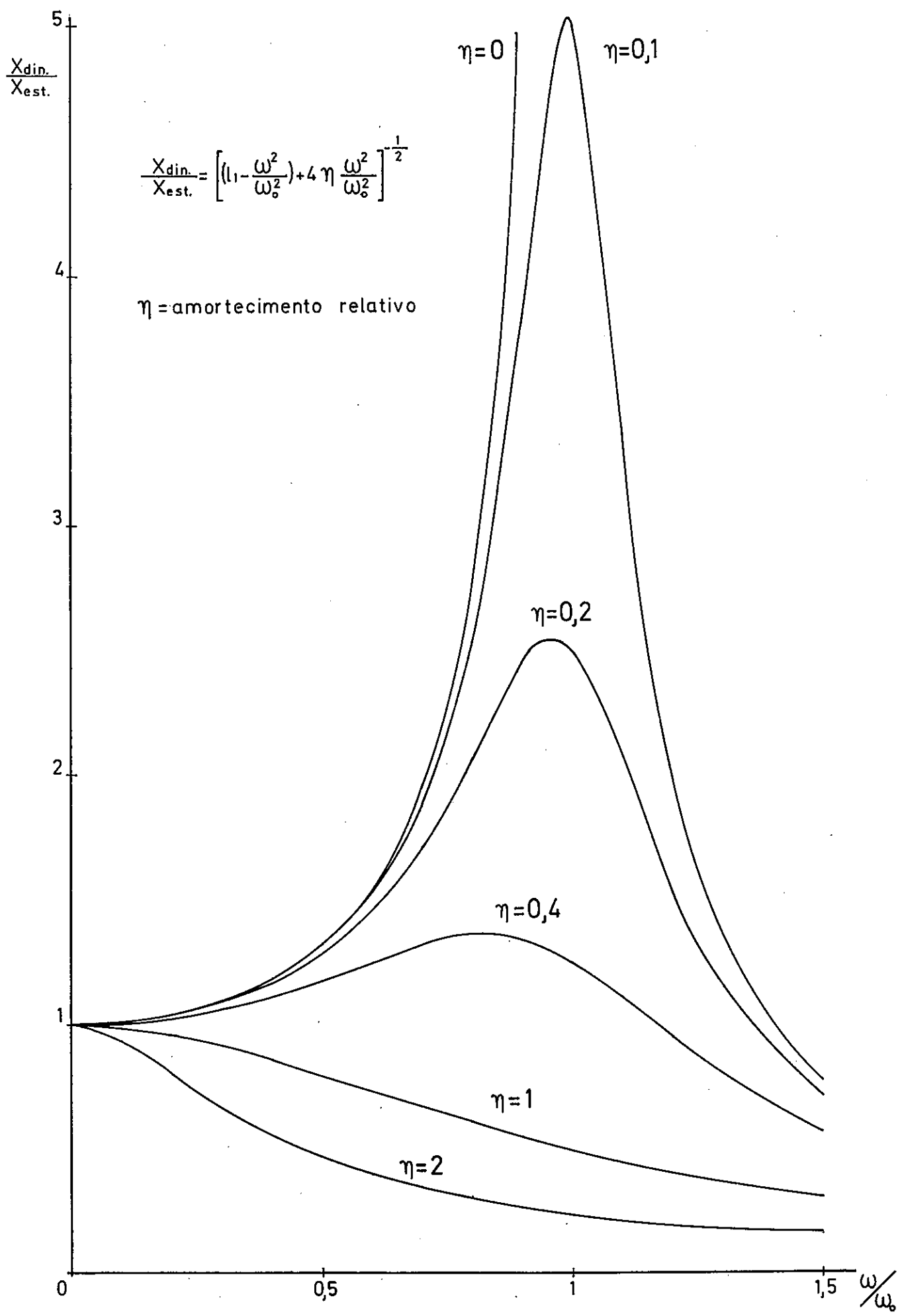


Fig. 4.1 - Relação entre os deslocamentos dinâmicos e estáticos de um sistema.

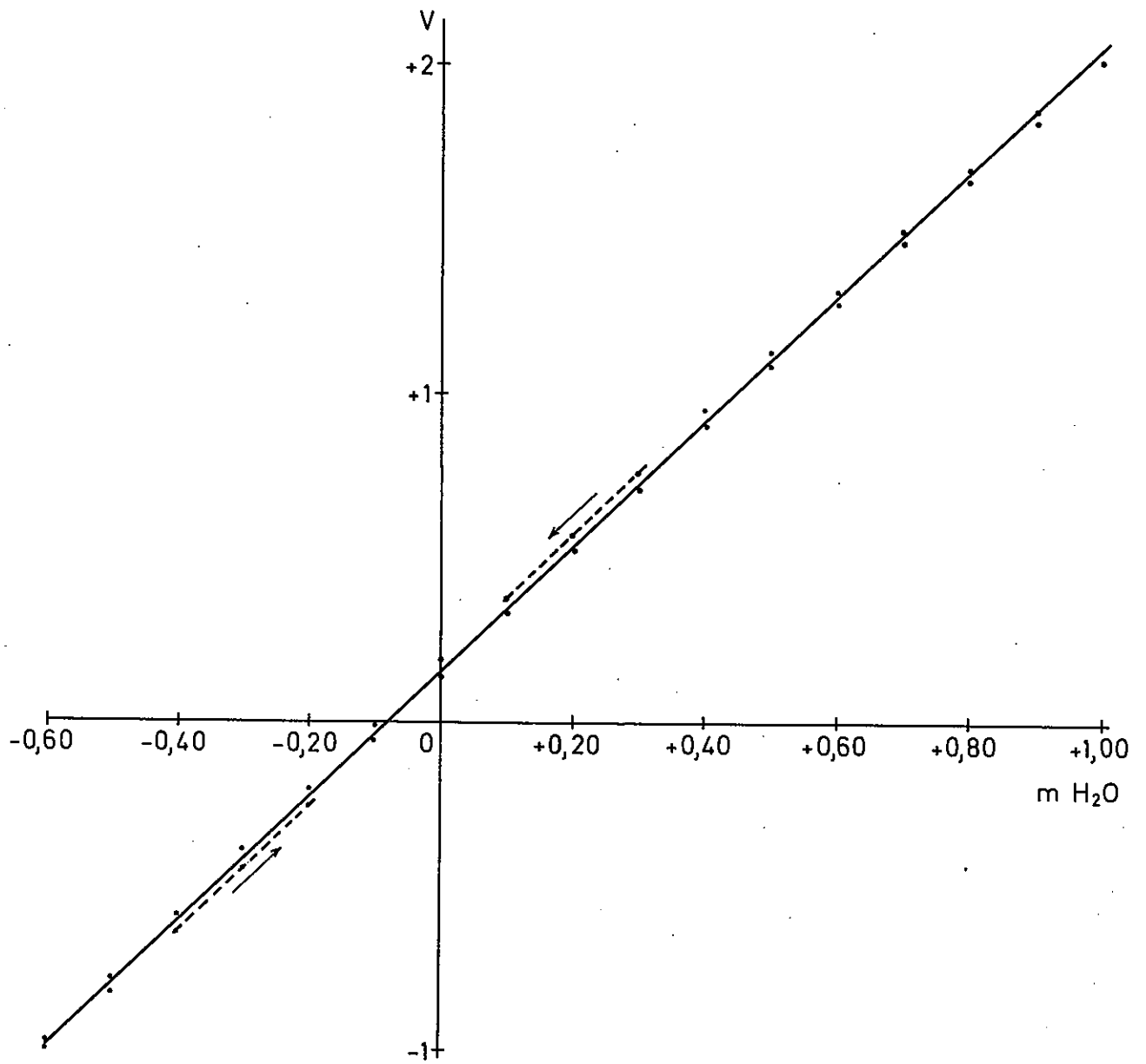


Fig. 4.2 - Curva de calibração do transdutor de capacidade C 128.

podiam suportar, temporariamente, depressões (\*) de 1 metro de coluna de água - sem deterioração e conservando uma linearidade aceitável (Fig. 4.2) - o que tornou possível a sua utilização nos ensaios realizados com escoamentos com superfície livre.

Nestas células (Fot. 4.1), o diafragma, sobre o qual se exerce a pressão, constitui uma das armaduras de um condensador, cuja capacidade varia-  
rá ao deformar-se a membrana.

São diafragmas à face, com um diâmetro de cerca de 21 mm e frequência própria no ar - segundo indicação de catálogo - de 6.000 Hz.

Na água o transdutor exibirá uma frequência de ressonância inferior (143) e um amortecimento relativo superior.

Estimando para aquela o valor de 1.000 Hz, o erro do transdutor, correspondente a uma frequência de 300 Hz, será (Fig. 4.1) inferior a 10%, o que se considerou satisfatório.

Um dos inconvenientes destes transdutores é o seu elevado desvio de zero com a temperatura.

Porém, no nosso caso, esta desvantagem não se faz sentir, na prática, uma vez que estamos interessados apenas na detecção das flutuações de pressão - e não no seu valor médio - e ainda porque:

- os ensaios são de curta duração; e
- houve o cuidado de, antes de se efectuarem os registos, deixar estabilizar o escoamento.

Em 4.1.2 se indicarão outras características destes transdutores, em conjugação com o respectivo condicionador de sinal.

Para as medições correspondentes aos ensaios realizados com escoamentos em pressão foram adquiridos transdutores de extensómetros, em virtude:

---

(\*) - em relação à pressão atmosférica.

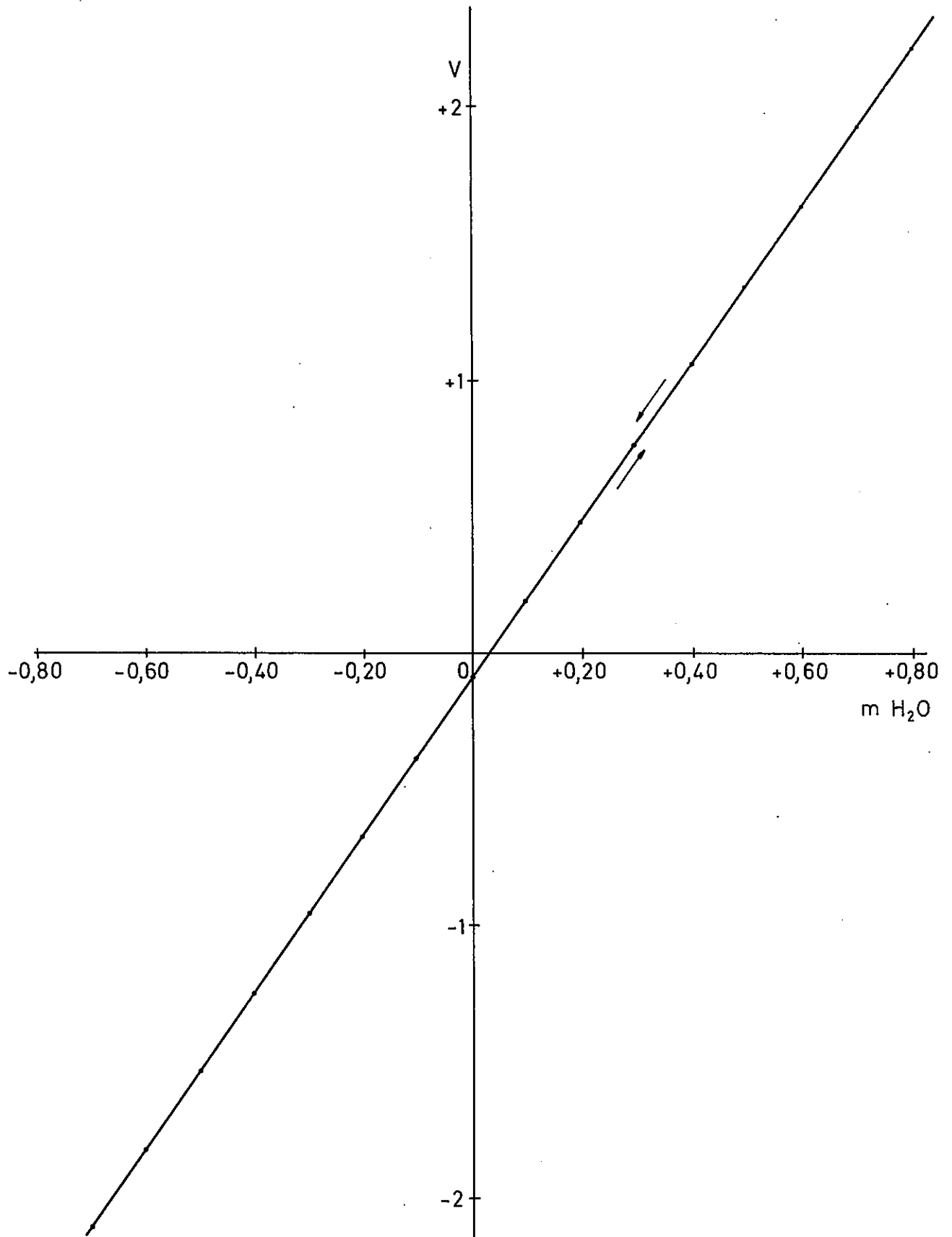


Fig. 4.3 - Curva de calibração do transdutor de extensómetros L49119.

- de se possuir a aparelhagem de extensometria complementar; e,
- se terem obtido propostas de células deste tipo de alta qualidade.

Escolheram-se os modelos que apresentavam o diafragma à face para que a relação entre as frequências de ressonância na água e no ar fosse máxima.

De acordo com o que se disse anteriormente sobre os campos de medida, adquiriram-se:

- 2 transdutores de extensômetros de resistência CEC, tipo 4-327 (Fot. 4.2), com diafragma de 22,1 mm de diâmetro, de 15 psia e frequência própria de 12.200 Hz.

- 2 transdutores de extensômetros de resistência CEC, tipo 4-327, com diafragma de 22,1 mm de diâmetro, de 50 psia e frequência própria de 15.000 Hz.

- 1 transdutor de extensômetros de semi-condutores integrados no diafragma, marca KULITE (Fot. 4.3), com diafragma de 2,15 mm, tipo XTL-1M-190, de 25 psia e frequência própria de 100.000 Hz.

- 1 transdutor de extensômetros de semi-condutores integrados no diafragma, marca KULITE, com diafragma de 2,15 mm, tipo XTS-1M-190, de 50 psia e frequência própria de 130.000 Hz.

Em relação aos transdutores CEC, os KULITE apresentam as seguintes vantagens:

- menor área do elemento sensível;
- elevadas frequências próprias;
- maior sensibilidade às pressões; e
- menor sensibilidade às acelerações.

Em contrapartida, o seu desvio de zero, com a temperatura, é superior, embora muito menor que o apresentado pelos transdutores capacitivos.

No entanto, estes transdutores miniatura não chegaram ainda a ser utilizados, por se ter verificado não estarem operacionais.

De acordo com o fabricante, tratar-se-ia de um desvio de zero, e foram devolvidos para substituição.

Nos transdutores CEC, a deformação do diagrama, em consequência da pressão, é transmitida a uma ponte Wheatstone de extensómetros de resistência com quatro braços activos.

A simetria térmica e mecânica do conjunto faz com que a tensão de desequilíbrio da ponte seja uma função linear da pressão aplicada ao diafragma.

Estes transdutores têm ainda uma compensação adicional da sensibilidade térmica, exterior ao elemento sensível.

As principais características dos transdutores de extensómetros de resistência adquiridos - além dos já indicados - são:

- Resistência nominal:  $350 \Omega$ ;
- Tensão nominal de excitação: 10 V;
- Linearidade e histerese:  $\pm 0,2\%$  f.e.;
- Desvio de zero com a temperatura:  $0,015\%$  f.e. $\times^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;
- Variação da sensibilidade com a temperatura:  $0,012\%$  f.e. $\times^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;
- Sensibilidade às vibrações:
  - transdutores de 15 psia:  $0,08\%$  f.e. $\times \text{g}^{-1}$
  - transdutores de 50 psia:  $0,05\%$  f.e. $\times \text{g}^{-1}$



#### 4.3 - Condicionadores de sinal

##### 4.3.1 - Condicionadores de sinal para transdutores capacitivos

Utilizou-se a aparelhagem que foi projectada e construída no L.N.E.C. (D.E.C.A.) para trabalhar com os transdutores capacitivos SOUTHERN e cujo princípio de funcionamento é o seguinte:

- cada célula capacitiva faz parte de um circuito ressonante série-paralelo utilizado numa zona de grande variação de impedância com a frequência;

- a variação da capacidade da célula faz variar a impedância do circuito;

- alimentando-a a frequência constante por um oscilador controlado a cristal, obtém-se, nos terminais do circuito ressonante, uma tensão modulada em amplitude;

- depois de conveniente amplificação e desmodulação, obtém-se, à saída desta aparelhagem, uma variação de tensão proporcional à variação da capacidade da célula.

Ligado a cada transdutor existe uma pequena caixa (Fot. 5.19) onde está localizada a bobine ajustável do circuito de ressonância.

Da capacidade em paralelo do circuito faz parte a correspondente ao cabo coaxial de ligação - com 5 metros de comprimento - de tal modo que pequenas variações da capacidade desse cabo não têm influência apreciável na tensão de saída.

A frequência do oscilador é 2,037 MHz, o que permite uma resposta até 1.500 Hz, no caso de flutuações de 3 metros de coluna de água, ou superior, para flutuações de menor amplitude.

Em virtude de o binário de aperto do corpo roscado do transdutor alterar a sua sensibilidade, foram construídas peças de adaptação (Fotografias 5.23 e 5.24 e Figuras 5.3 e 5.4) que, uma vez aplicadas nos transdutores, permitiram a constância da sensibilidade ao longo dos ensaios.

Para a calibração destes transdutores foi igualmente construída uma câmara (Fot. 5.16 e 5.17) em ligação com um dispositivo (Fot. 5.15) que permitia efectuar - através dum hidrómetro de ponta direita - leituras das pressões - em coluna de água - com uma precisão de 1/10 de mm.

Fez-se a calibração dos transdutores para pressões superiores e inferiores à atmosférica, tendo-se verificado ser possível trabalhar com depressões da ordem dos 60 cm de coluna de água sem alteração apreciável da linearidade.

Os valores da sensibilidade média - entre (-0,60 m) e (1,00 m), de coluna de água - foram, para os respectivos transdutores, os seguintes:

- C 53 .....	2,05 V × m <sup>-1</sup>
- C 117 .....	2,35 V × m <sup>-1</sup>
- C 128 .....	1,88 V × m <sup>-1</sup>
- C 148 .....	3,15 V × m <sup>-1</sup>
Linearidade e histerese: .....	± 2%

Resolução: ≅ 3 mm H<sub>2</sub>O para frequências superiores a 0,01 Hz.

O maior inconveniente destes transdutores de capacidade é a influência da temperatura, como foi já referido em 4.1.

Verificou-se, experimentalmente, que a sua variação de capacidade - sem bobine - correspondia a -11 cm de coluna de água, por grau centígrado de variação da temperatura. Com a bobine do circuito ressonante, aquele valor passou a ser de +7 cm de coluna de água, por grau centígrado de

variação da temperatura.

Por este motivo, haverá toda a conveniência na utilização, em futuros ensaios, de transdutores com menor coeficiente de temperatura, como, por exemplo, os transdutores CEC de 15 psia ou os KULITE de 25 psia. Voltaremos a abordar este assunto nos capítulos seguintes.

#### 4.3.2 - Condicionadores de sinal para transdutores extensométricos

Na calibração dos transdutores de extensômetros de resistência utilizaram-se pontes convencionais de extensometria - SANBORN e PHILIPS - tendo-se provocado variações de pressão desde:

- 9,0 metros de coluna de água

até

+ 1,5 metros de coluna de água, no caso dos transdutores CEC de 15 psia, e de:

- 9,0 metros de coluna de água

até

+ 13,0 metros de coluna de água, no caso dos transdutores CEC de 50 psia, tendo-se obtido, em toda esta gama de pressões considerada, uma linearidade plenamente satisfatória.

Nos ensaios realizados na câmara de ensaios (escoamentos em pressão) utilizaram-se duas pontes PHILIPS PR 9303, por possuírem uma banda passante mais extensa:

- Frequência da tensão de excitação: 6.000 Hz;

- Frequência máxima mensurável: 1.250 Hz.

A tensão de excitação utilizada foi de 6V.

Na figura 4.3 apresenta-se uma curva de calibração - do transdutor

L 49119 - obtida para uma gama de pressões variando entre os valores:

- 0,70 metros de coluna de água,
- e
- + 0,80 metros de coluna de água

com ganho da ponte na posição:  $0,2^{\circ}/\text{‰}$ .

Julgamos de interesse salientar o facto dos erros provenientes:

- da ponte;
- do voltímetro; e,
- da determinação do desnível correspondente à coluna de água considerada,

serem superiores aos resultados destes transdutores.

Na posição de ganho considerada<sup>(\*)</sup>, as sensibilidades apresentadas pelos transdutores foram:

- transdutor L 48388:  $2,74 \text{ V} \times \text{m}^{-1}$
- transdutor L 49119:  $2,87 \text{ V} \times \text{m}^{-1}$ .

#### 4.4 - Registo

##### 4.4.1 - Considerações prévias

Como tem sido já salientado, um dos principais objectivos do presente trabalho foi o da estruturação das bases necessárias para a análise estatística - no domínio das amplitudes e no das frequências - das flutuações turbulentas de pressão.

Com efeito, e como foi igualmente posto em evidência nos capítulos anteriores, é bastante reduzido - no domínio da hidráulica - o conhecimento

---

(\*) - Com as pontes no ganho máximo - posição de  $0,1^{\circ}/\text{‰}$  - a resolução destes transdutores é superior a 4 mm de coluna de água.

existente sobre as características apresentadas por tais flutuações de pressão.

E, se já são limitados os dados de que se pode dispôr no campo das amplitudes, muito mais se faz sentir a escassez de informação no domínio das frequências.

Daí o ter-se julgado constituir trabalho particularmente útil a análise das características das flutuações turbulentas de pressão neste último domínio.

E porque assim aconteceu, o segundo problema a resolver<sup>(\*)</sup> consistiu no estudo da aparelhagem que permitisse o registo fiel da informação contida nos sinais provenientes dos transdutores de pressão<sup>(\*\*)</sup>.

Pelos motivos que esperamos possam falar por si, chegou-se à conclusão da importância - para o registo desses sinais - da aquisição dum gravador magnético com modulação de frequência (FM).

Assim, com base em especificações cuidadosamente elaboradas pelo Engenheiro David Leite, foi lançado um concurso público para a aquisição de um gravador analógico de FM.

Entretanto, e com vista à avaliação das possibilidades de utilização da aparelhagem de registo existente no Serviço, foram realizadas alguns ensaios preliminares no canal para escoamentos com superfície livre<sup>(\*\*\*)</sup>.

---

(\*)-naturalmente que o primeiro foi o da selecção dos respectivos transdutores, como se referiu em 4.2.

(\*\*)-por não influir nas considerações que iremos fazer, não abordaremos aqui o problema da influência da área do elemento sensível do transdutor na detecção fiel das características apresentadas pelo campo de pressões turbulentas.

(\*\*\*)-na altura a única zona de ensaios disponível.

#### 4.4.2 - Registo directo

Nesses ensaios preliminares utilizou-se um registador oscilográfico - HONEYWELL 906T - de 12 canais para galvanómetros, miniaturizados, de espelho.

Este aparelho possibilita a escolha da velocidade de arrastamento do papel entre 4 disponíveis: de 8,4 a 1060 milímetros por segundo.

O registo é obtido por intermédio dum feixe de raios ultra-violetas, e utilizaram-se galvanómetros do tipo M1650, por fornecerem resposta linear na gama de frequências compreendida entre 0 e 1000 Hz.

Os referidos ensaios foram feitos para três condições de escoamento, correspondendo a velocidades, respectivamente, da ordem dos:  $6 \text{ m s}^{-1}$ ;  $10 \text{ m s}^{-1}$  e  $12 \text{ m s}^{-1}$ , tendo-se registado num dos canais o sinal dum dos transdutores capacitivos SOUTHERN, utilizados para o efeito, e num outro canal um sinal sinusoidal de 100 Hz, que serviu para o estabelecimento, no papel, da escala dos tempos.

Pela análise desses registos foi possível verificar:

a) - a presença de frequências elevadas, em alguns casos superiores a 300 Hz;

b) - a dificuldade de leitura das amplitudes dos sinais; e

c) - a dificuldade de fixação química e de permanência dos registos no papel.

Daqui o poder concluir-se:

d) - a impraticabilidade de utilização directa de registadores de pena;

e) - a impraticabilidade de utilização do registador HONEYWELL 906 T na determinação das séries cronológicas, dadas as dificuldades: de leitura,

de fixação química e de permanência dos registos, assinaladas em b) e c) (\*).

Em consequência:

f) - chegou-se à conclusão da inexistência, na altura, duma via que possibilitasse a análise estatística das flutuações de pressão.

E, por estes motivos:

g) - mais nos convencemos da necessidade da utilização de vias de análise que não estivessem dependentes desses registos gráficos directos.

#### 4.4.3 - Gravação magnética em FM

Julgamos ter chegado, agora, à altura oportuna para abordarmos, finalmente, o problema da gravação magnética em FM.

O princípio da gravação parece ser - como quase tudo o que é verdadeiramente importante - duma grande simplicidade.

Com efeito, a tensão de um oscilador é modulada em frequência pelo sinal de entrada e é esta tensão modulada que vai ser gravada.

Na reprodução o sinal é previamente desmodulado e filtrado, obtendo-se, assim, à saída, uma tensão que poderemos designar por imagem da primitiva.

E, deste modo, consegue-se a gravação dos sinais desde uma frequência nula (componente estática) até uma frequência elevada, função naturalmente das características do gravador e da velocidade de reprodução da fita.

Este tipo de gravação possui, em relação à gravação directa dos sinais, ainda, as seguintes vantagens:

- melhor relação sinal/ruído;

---

(\*)-além de que uma análise espectral realizada a partir das séries cronológicas determinadas por este processo se revela igualmente impraticável.

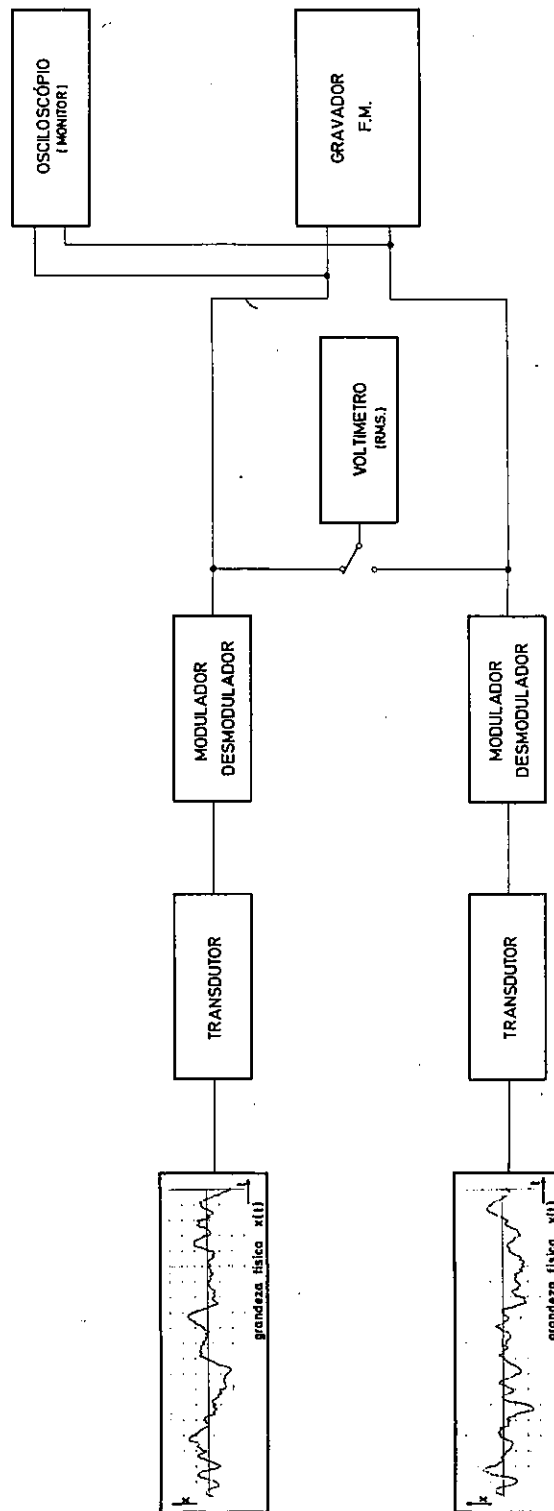


Fig. 4.4 GRAVAÇÃO DOS SINAIS - DIAGRAMA DE BLOCOS



- melhor linearidade; e,
- menor distorção.

A utilização de um gravador de FM, além das facilidades que oferece no capítulo do "armazenamento" dos sinais e posterior reprodução dessa informação, permite, ainda, pela expansão ou contracção da base de tempo, a exploração de algumas das vias de análise indicadas na Figura 4.5.

Mas, antes, talvez importe salientar a possibilidade da sua utilização em ensaios em protótipos, para os quais não se dispõe, normalmente, dos meios e do tempo necessários para a análise completa destes fenómenos.

Vejamos, então, agora, em que medida se pode tirar partido da multiplicação, ou desmultiplicação, da velocidade em que foi gravado o sinal.

Para isso vejamos o que acontece a um sinal gravado à velocidade (\*)  $V$  e reproduzido a uma velocidade  $n V$ .

Naturalmente que a base de tempo que irá corresponder à segunda das velocidades virá dividida por  $n$  e, sendo assim, as frequências do sinal gravado aparecerão, então, multiplicadas por  $n$ .

Deste modo, e de acordo com a via escolhida, poderá haver conveniência em estender ou encurtar a gama de frequências de modo a esta se situar dentro das compatíveis com o sistema, que está a ser utilizado para a análise do sinal.

Aquando da realização dos ensaios preliminares, não se dispunha ainda dum gravador magnético em FM.

Por esse motivo e socorrendo-nos da existência dum modulador/desmodulador construído na D.E.C.A. (\*\*), foi tentado o registo, em fita magnética,

---

(\*)-referimo-nos, como é óbvio, à velocidade de passagem da fita magnética pelas cabeças de gravação ou de reprodução.

(\*\*)-veja-se VICENTE, L. - "Sistemas de transmissão para registo magnético, telemidade e correlação" - Relatório interno LNEC - Janeiro 1964 - com curso para obtenção de certificado de estágio.

das flutuações de pressão em escoamentos com superfície livre (\*), pela utilização dum gravador do tipo convencional.

Este sistema - já referido por RODRIGUES DE ALMEIDA (9) - mostrou enfermar dos seguintes inconvenientes:

a) - impossibilidade de gravação simultânea em mais do que um canal, com as consequências que daí advêm, quer no respeitante aos tempos totais de gravação, quer ainda na impossibilidade da determinação das correlações cruzadas;

b) - impossibilidade de expansão ou contracção da base tempo; e, ainda,

c) - qualidade deficiente de gravação/reprodução, dadas as características da aparelhagem utilizada e dos sinais gravados.

Mas, não se podendo dispor da aparelhagem de registo capaz de garantir o estudo estatístico das flutuações turbulentas de pressão, não era possível dar seguimento ao plano de trabalhos elaborado.

No entanto, e porque foi possível contar com o precioso auxílio de alguns - e a boa vontade de todos - conseguiu obter-se, finalmente, ainda que por empréstimo, um gravador magnético de FM, que, apesar de apresentar características inferiores às do gravador cuja aquisição tinha sido proposta, permitiu o prosseguimento dos estudos.

Este gravador, da marca AMPEX, tipo SP-300, pertencente ao Centro de Estudos de Electrónica, da Comissão de Estudos de Energia Nuclear, do Instituto de Alta Cultura - apresentava as seguintes características principais:

- número de canais: .....4

---

(\*) - ensaios preliminares já assinalados em 4.4.2.

- velocidades (\*) disponíveis:

15 ips  
7 1/2 ips  
3 3/4 ips  
1 7/8 ips

- níveis de entrada (ajustáveis): de 0,1 a 10  $V_{ef}$ ;

- resposta em frequência ( $\pm 1$  d B):

0 - 2 500 Hz (a 15 ips);  
0 - 1 250 Hz (a 7 1/2 ips);  
0 - 625 Hz (a 3 3/4 ips);  
0 - 312 Hz (a 1 7/8 ips);

- relação sinal/ruído: entre 35 e 38 d B);

- desvio de velocidade:

$\pm 0,2\%$  (a 15 e 7 1/2 ips);  
 $\pm 0,4\%$  (a 3 3/4 e 1 7/8 ips); e

- largura das fitas magnéticas: 1/4".

Como facilmente se verifica este gravador apresenta uma relação máxima de velocidades de 8.

Foi, pois, com este gravador - e fitas magnéticas AGFA PE 36K 18/540, de baixo factor de ruído - que se realizaram os registos - num total de 142 - das flutuações turbulentas de pressão correspondentes aos estudos realizados na câmara de ensaios ou no canal.

A velocidade de gravação utilizada em todos os registos foi a corres

---

(\*)-julgamos preferível - tal como aconteceu no caso dos transdutores de pressão - não efectuar a conversão destas unidades para o sistema métrico.

pondente a 7 1/2 ips, por ser a mais conveniente.

No entanto, e em relação aos ensaios considerados como mais importantes, fizeram-se, ainda, gravações nas duas velocidades extremas - 15 e 1 7/8 ips - para se poder tirar, como iremos ver mais adiante, o maior partido da contracção e expansão da respectiva base de tempo.

Como se compreende, nem sempre será possível - dada a resposta em frequência - a gravação na velocidade menor.

Dado ter-se verificado - nos ensaios prévios de estudo das características apresentadas pelo gravador, no estado actual de conservação - que as velocidades e a sua relação se mantinham, ainda, dentro das tolerâncias constantes das especificações acima referidas, não foi necessária a gravação de qualquer base de tempo.

No início e final de cada sessão de ensaios - ou sempre que tal se tornava necessário por alteração do ganho dos canais de gravação - procedeu-se à calibração do gravador.

Esta consiste, fundamentalmente, na gravação duma tensão de amplitude conhecida e facilmente relacionável com a sensibilidade dos transdutores utilizados.

Na reprodução, e representando por:

$\Delta p$  = variação de pressão;

$\frac{\Delta V_e}{\Delta p}$  = sensibilidade do conjunto: transdutor mais condicionador de sinal; e

$\frac{\Delta V_e}{\Delta V_s}$  = relação entre a tensão de calibração aplicada à entrada ( $\Delta V_e$ ) e à saída ( $\Delta V_s$ ) do gravador;

$$\Delta p = \frac{\frac{\Delta V_e}{\Delta V_s}}{\frac{\Delta V_e}{\Delta p}} = \Delta V_s \dots\dots\dots (4.0)$$

expressão que estabelece a correspondência entre a variação de pressão e a tensão à saída do gravador.

#### 4.4.4 - Registo diferido

Pelas razões já expostas em 4.4.2, o registo directo das flutuações turbulentas de pressão era impraticável no caso da utilização de registadores de pena.

No entanto, aproveitando as possibilidades oferecidas pelo gravador Ampex, foi já possível a utilização dum registador - da marca BRUSH, tipo MARK 260 - cedido pela Divisão de Fundações e Túneis do Serviço de Barragens do LNEC.

As suas principais características são:

- número de canais: 6;
- velocidades de arrastamento do papel:  
de 1 mm por minuto a 125 mm por segundo;
- sinal de entrada: de 1 mV por divisão a 10 V por divisão;
- resposta em frequência ( $\pm 2\%$ ):
  - o - 40 Hz (para desvios de 50 divisões)
  - e
  - o - 100 Hz (para desvios de 10 divisões);
- linearidade: inferior a 0,5 % f.e.

Com os registos obtidos através deste aparelho, foi possível efectuar-se - a partir das respectivas séries cronológicas - uma análise harmónica generalizada (\*), via computador, que forneceu uma primeira informação sobre a gama de frequências contida nos respectivos sinais.

A desmultiplicação efectuada foi a máxima (8x) permitida pelo gravador Ampex.

---

(\*)-dado que se dispunha do respectivo programa.

Conseguiu-se obter, assim, o que poderemos talvez designar por "registro diferido" do sinal original.

A determinação das séries cronológicas, utilizando este artifício da desmultiplicação de velocidades, torna já viável - no caso de se conseguir compatibilidade entre os intervalos de amostragens praticáveis (com comodidade de leitura das respectivas amplitudes) e as frequências máximas do sinal - a determinação das séries no tempo.

No entanto, e como veremos adiante, existem outras vias - inclusive a do conversor analógico/digital - que permitem efectuar, em melhores condições, a análise no domínio das frequências.

Estes "registos diferidos" revelam-se - e é um aspecto que nos parece ser de assinalar - particularmente importantes pelas possibilidades que oferecem no aspecto de documentação gráfica dos sinais (Fig. 5.7) e de informação que transmitem acerca das suas características mais evidentes.

## 2ª. PARTE: VIAS DE ANÁLISE

### 4.5 - Generalidades

Como se referiu no capítulo 3, as diferentes grandezas turbulentas apresentam características do tipo aleatório.

Deste modo, não as poderemos representar por expressões matemáticas explícitas (23), havendo necessidade de recorrer à determinação de certas funções estatísticas que possibilitem a sua definição em ambos os domínios:

- o das amplitudes; e
- o das frequências.

Iremos tratar aqui do caso das flutuações turbulentas de pressão, con-

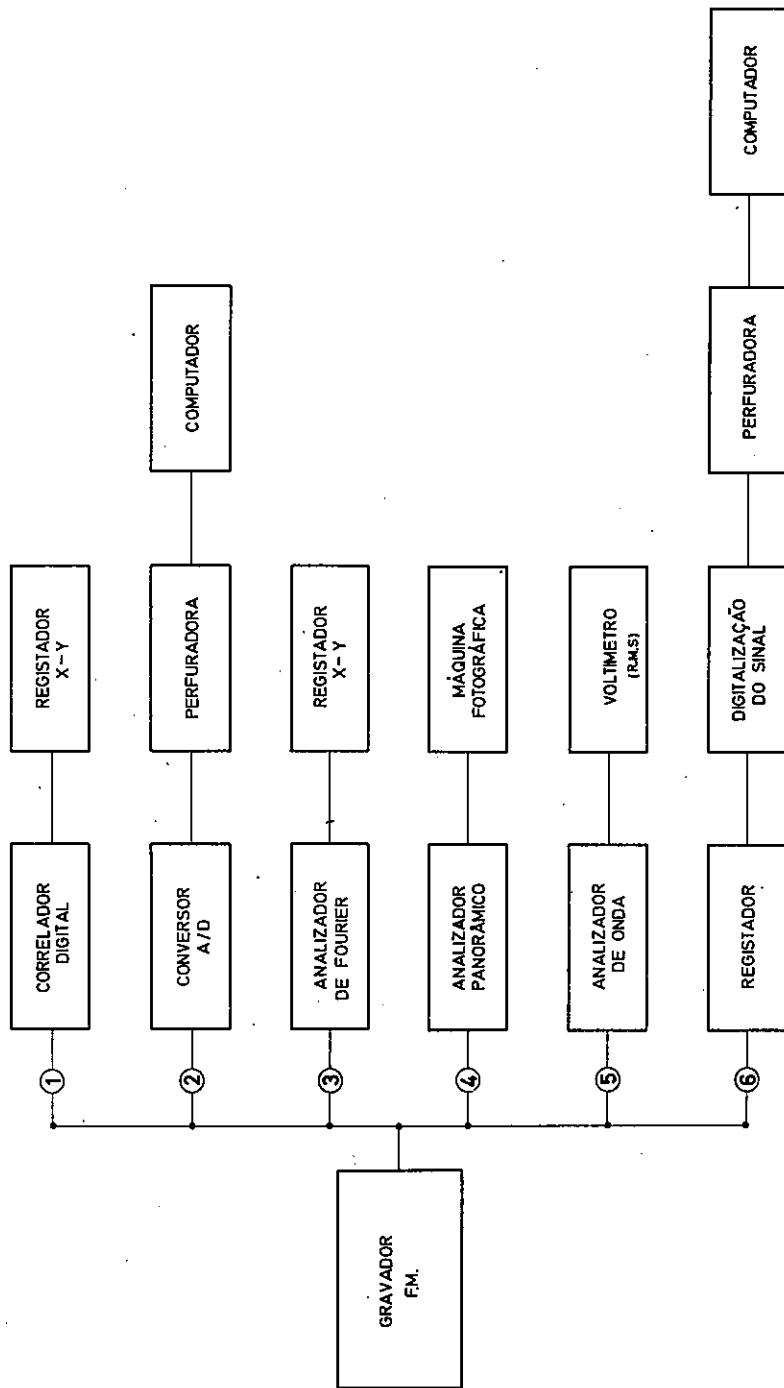


Fig. 4.5 vias de ANÁLISE DOS SINAIS - DIAGRAMA DE BLOCOS

siderando que o processo estocástico que lhe está associado é estacionário e ergódico.

Por outras palavras: iremos supor que as médias temporais existem e são independentes do instante inicial considerado e da respectiva amostra.

#### 4.5.1 - Estudo das flutuações de pressão no domínio das amplitudes

Se representarmos por  $P(t)$  o valor instantâneo da pressão de origem turbulenta; por  $\bar{P}$  o seu valor médio temporal, e por  $p(t)$  a sua flutuação em torno da média, podemos definir as principais funções, que interessa considerar na prática, pelas expressões (\*):

- Valor quadrático médio:  $E P^2(t)$

$$E [P^2(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt \dots (4.1)$$

- Valor médio:  $\bar{P}$

$$\bar{P} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \dots (4.2)$$

- Variância:  $\sigma^2$

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - \bar{P}]^2 dt \dots (4.3)$$

- Desvio padrão:  $\sigma$

$$\sigma = + \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [P(t) - \bar{P}]^2 dt \dots (4.4)}$$

(\*) - veja-se, por exemplo, PIERSOL e BENDAT (23).



- Função de densidade de probabilidade: FDP(P)

$$\begin{aligned}
 \text{FDP}(P) &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{\text{Prob} [P < P(t) < P + \Delta p]}{\Delta p} \\
 &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta p} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_p}{T} \right] \dots \dots \dots (4.5)
 \end{aligned}$$

em que:

$$T_p = \sum_{i=1}^K \Delta t_i = \text{tempo total de permanência da pressão } P(t) \text{ entre os valores limites: } \underline{P} \text{ e } \underline{P + \Delta p}$$

$\Delta t_i$  = tempo parcial de permanência da pressão (P(t) entre os referidos valores limites

T = tempo total do registo considerado

- Função de distribuição de probabilidade: FP(P)

$$\text{FP}(P) = \text{Prob.} [P(t) \ll P] = \int_{-\infty}^P \text{FDP}(P) dp \dots (4.6)$$

A relação entre o valor quadrático médio, o valor médio e a variância, é dada pela expressão:

$$E [P^2(t)] = \sigma^2 + \bar{P}^2 \dots \dots \dots (4.7)$$

Como se verifica, só no caso do valor médio da pressão ser nulo é que há coincidência dos valores correspondentes à variância e ao valor quadrático médio.

Dado que, normalmente, estamos interessados apenas no estudo das flutuações de pressão

$$p(t) = P(t) - \bar{P} \dots \dots \dots (4.8)$$

teremos:

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \dots \dots \dots (4.9)$$

e

$$\sigma = + \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \dots\dots\dots} \quad (4.10)$$

Dos estudos realizados neste domínio - quer através dos dados retirados dos registos cronológicos, quer pela análise das curvas de densidade e de distribuição de probabilidade, obtidas no correlador - foi possível confirmar que as flutuações turbulentas de pressão mostram possuir distribuições que podem ser consideradas - dum ponto de vista pragmático - como normais (\*).

Sendo assim, a definição das flutuações turbulentas de pressão, em termos de amplitude, fica perfeitamente assegurada pelo conhecimento:

- do respectivo desvio padrão  $\sigma$ .

#### 4.5.2 - Estudo das flutuações de pressão no domínio das frequências

Como se sabe, o processo mais adequado para a análise das flutuações turbulentas de pressão no domínio das frequências consiste na determinação da função de densidade espectral de potência - ou, simplesmente, espectro de potência - definido a partir da transformada de Fourier da função de autocorrelação, pela expressão (\*\*):

$$P_p(f) = 4 \int_0^{\infty} R_p(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau \dots\dots\dots \quad (4.11)$$

---

(\*)-dado o pouco tempo disponível para a elaboração deste relatório, não iremos documentar aqui o trabalho realizado neste campo.

(\*\*)-considera-se o espectro de potência definida apenas para frequências positivas. Veja-se, por exemplo, BENDAT e PIERSOL (23).

sendo:

$$R_p(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t) p(t-\tau) dt \dots (4.12)$$

a função de autocorrelação respectiva, e  $p(t)$  a flutuação de pressão.

No entanto, como não se pode dispor de registos cronológicos de duração ilimitada, o que iremos obter na prática são apenas estimas desses espectros.

Sendo assim, torna-se muito importante que estas estimas apresentem boa estabilidade e resolução.

Mas, para que a análise espectral possa ser encarada como uma técnica de ensaio eficaz, convirá ainda que as estimas possam ser obtidas duma maneira rápida, cómoda e económica.

Com o objectivo de verificar as potencialidades das vias de análise existentes foi seleccionado um ensaio - o ensaio nº. 6 - que permitiu a obtenção de estimas do respectivo espectro, obtidas por intermédio de 4 dessas vias de análise.

#### 4.6 - Voltímetro de valor eficaz (\*)

Como é sabido, um dos problemas que existem na determinação do desvio padrão das flutuações turbulentas de pressão - ou de outra grandeza flutuante no tempo - é o da sua imprecisão, como consequência da existência, nos sinais, de frequências baixas.

O voltímetro utilizado nos ensaios foi o DISA - já referido em 4.4.4 - que responde só a partir de 1 Hz.

Daí a importância da utilização dum gravador magnético de FM, resultante da possibilidade que oferece de multiplicação das frequências contidas nos sinais, à custa dum aumento da velocidade de reprodução.

---

(\*) - utilizaremos algumas vezes esta designação, por consagrada no domínio da electrónica, que corresponde, como se sabe, ao valor "R.M.S" ou ao desvio padrão.

Conseguem-se, assim, valores mais próximos dos reais.

Deste modo, poderemos considerar ser esta uma boa via de análise das flutuações de pressão no domínio das amplitudes.

#### 4.7 - Analísador de onda

Estes analisadores de frequência são do tipo dos receptores heterodinos, com uma frequência intermédia constante e um filtro a cristal de banda muito estreita.

Assim, ao sintonizar-se o aparelho numa frequência  $f$ , qualquer, ele irá medir o valor eficaz das harmónicas existentes nessa banda, centrada em  $f$ .

Por este processo conseguem-se obter, no caso dum sinal aleatório, valores do espectro de frequência (\*).

Para a determinação dos valores do espectro de potência dos sinais gravados, foi utilizado um conjunto de aparelhagem constituído por um analisador de onda da HEWLETT-PACKARD e por um voltímetro DISA de valor eficaz.

Conseguiu obter-se assim a variância correspondente à potência do sinal na banda equivalente do filtro.

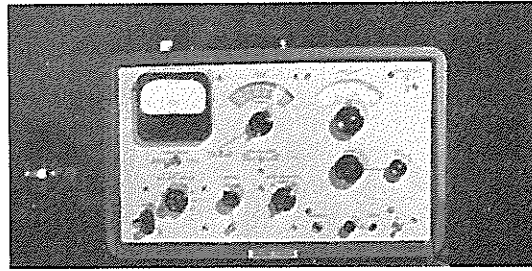
Determinou-se experimentalmente essa banda equivalente, ou seja a largura da janela espectral, tendo-se obtido o valor:

$$b_{eq} = 5,32 \text{ Hz.}$$

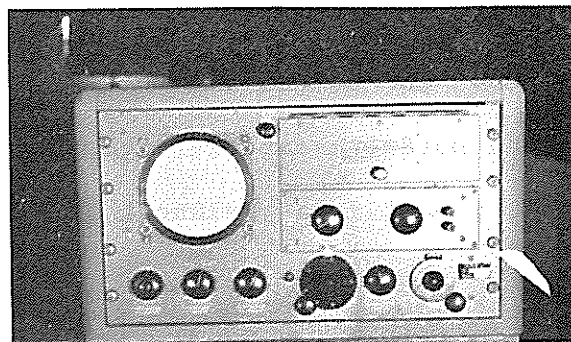
O valor do espectro de potência das flutuações de pressão, para uma dada frequência  $f$ , é dado, a partir da variância  $\sigma^2$ , pela expressão:

$$P(f) = \left[ \frac{\frac{\Delta v_e}{\Delta v_s}}{\frac{\Delta v_e}{\Delta t}} \right]^2 \times \frac{\sigma^2}{b_{eq}} \dots (4.13)$$

(\*) - sempre que, ao longo do texto, se falar da determinação de valores do espectro, deve entender-se, naturalmente, que se trata de valores dos espectros - de frequência ou de potência - estimados.



Fot.4.4 - O analisador de onda utilizado nos ensaios



Fot.4.5 - O analisador panorâmico utilizado nos ensaios

em que os restantes símbolos têm o significado já referido em 4.4.4.

Se não houver multiplicação da velocidade de reprodução dos sinais gravados, esta análise pode fazer-se - tomando certas precauções - só a partir de 10 Hz.

Esta via já tem, no entanto, bastante interesse, se utilizarmos as possibilidades de multiplicação de velocidades do gravador.

Com efeito, sendo  $nV$  a velocidade de reprodução dum sinal gravado à velocidade  $V$ , teremos:

- frequência mínima de análise:  $\frac{10}{n}$  Hz
- largura equivalente da janela espectral:  $\frac{5,32}{n}$  Hz.

Assim, para a relação máxima de velocidades ( $n = 8$ ) do gravador Ampex, consegue-se obter:

- frequência mínima de análise: 1,25 Hz
- largura da janela espectral: 0,665 Hz.

#### 4.8 - Analizador panorâmico

Outra via de análise a que se recorreu neste estudo foi a do analisador panorâmico.

Utilizou-se, para isso, o "Sonic Analyser" PANORAMIC, modelo LP - la (Fot. 4.5), pertencente à D.E.C.A..

O seu princípio de funcionamento é idêntico ao do analisador de onda, descrito no parágrafo anterior, apenas com a diferença de se tratar dum a parêlho de funcionamento dinâmico.

Por outras palavras: o aparelho permite, automática e continuamente, o deslocamento da janela espectral, na banda pré-seleccionada.

O respectivo espectro (\*) é visualizado num "écran" osciloscópico de

---

(\*) - não esquecer que se trata de estimas e do espectro de frequência.

elevada persistência, sendo de um segundo o tempo de varrimento na banda to tal seleccionada.

O aparelho permite a análise de frequências de 30 a 20.000 Hz nas seguintes bandas: 20 KHz (escala logarítmica); e 5.000 Hz, 1.000 Hz e 200 Hz (escalas lineares).

A deflexão vertical pode ajustar-se em escala linear ou logarítmica (dB).

Pode fazer-se a sua calibração a partir de um gerador de ruído branco calibrado.

Cada varrimento fornece uma estima do espectro que, naturalmente, variará de varriamento para varrimento.

Por isso a técnica normalmente seguida é a da sobreposição, na mesma fotografia, de vários varrimentos.

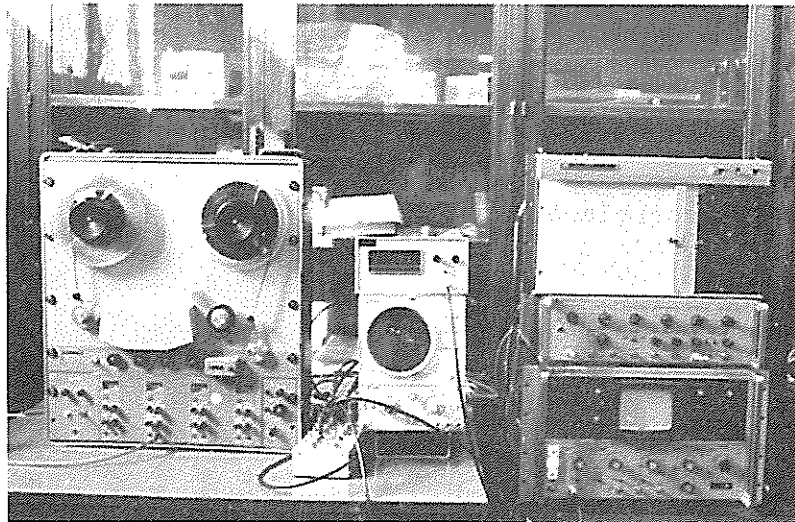
Tal como acontece para o analisador de onda, a utilização dum gravador pode revelar-se igualmente útil neste caso.

Determinaram-se vários espectros com o analisador (Fot. 4.6 e Fig. 4.6 a 4.13) utilizando equipamento fotográfico POLAROID, com película de 3000 ASA.

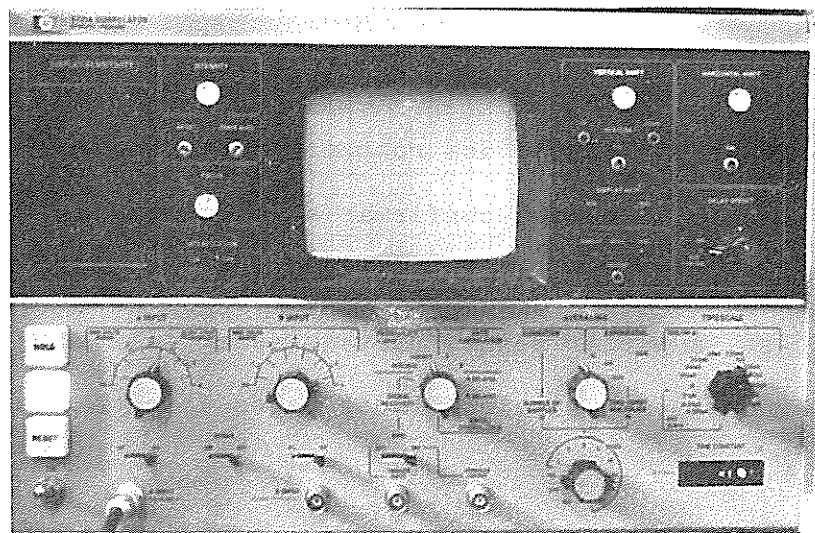
O tempo de exposição que mostrou ser o mais conveniente foi o de 3 minutos, o que correspondeu a cerca de 180 varrimentos (estimas do espectro de frequência), tendo-se empregado, sempre, a escala vertical linear, não se tendo, no entanto, efectuado a sua calibração por se terem considerado estes espectros como fornecendo, apenas, informação qualitativa.

#### 4.9 - Correlador digital

Nesta via de análise utilizou-se o Correlador HEWLETT PACKARD, modelo 3721 (Fot. 4.7 e 4.8) do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



Fot.4.7 - Aparelhagem utilizada na análise das flutuações de pressão, via correlador



Fot.4.8 - O correlador digital da F.E.U.P.



Este aparelho determina 100 pontos das funções:

- de densidade de probabilidade;
- de distribuição de probabilidade;
- de autocorrelação; e
- de correlação cruzada.

Estas funções são apresentadas no "écran" osciloscópico (Fot. 4.8), podendo ser transferidas para um registador XY.

A gama de frequência que o correlador permite analisar estende-se de 0 a 250 KHz, e os intervalos de amostragem  $\Delta T$  podem ir de 1  $\mu$ s a 1s.

Na determinação das funções de correlação, o atraso  $\Delta \tau$  - intervalo de tempo entre os seus pontos - é igual ao intervalo de amostragem.

O número de amostras pode ser escolhido entre valores de  $2^7$  (128) e  $2^{17}$  ( $128 \times 1024$ ) (\*).

#### 4.9.1 - Análise no domínio das amplitudes

A análise dos fenómenos no domínio das amplitudes pode fazer-se através da função de densidade de probabilidades ou da função de distribuição de probabilidade.

No estudo efectuado preferiu-se a primeira daquelas duas funções por ser mais cómoda a determinação dos respectivos parâmetros estatísticos.

Através dela foi possível confirmar a boa concordância destas curvas com a correspondente a uma distribuição normal.

Verificou-se, a partir dessas curvas, serem idênticos os desvios padrões correspondentes aos sinais obtidos pelos dois transdutores utiliza

---

(\*) - para mais pormenor consulte-se (144).

dos nos ensaios com escoamentos em pressão.

Por isso, passou a determinar-se apenas a função de distribuição de probabilidade das flutuações de pressão detectadas pelo transdutor L 49119.

Estas curvas permitiram, ainda, a comparação do desvio padrão obtido por seu intermédio e através do voltímetro DISA de valor eficaz (Quadro 5.3).

#### 4.9.2 - Análise no domínio das frequências

Para a análise das flutuações turbulentas de pressão no domínio das frequências, as funções que interessa considerar são:

- a de autocorrelação; e
- a de correlação cruzada.

A primeira daquelas funções é calculada, pelo correlador, da seguinte maneira:

$$R_p(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N p(K \Delta T) \cdot p(K \Delta T - \tau) \dots\dots\dots (4.14)$$

Igualmente se poderia escrever, para a função de correlação cruzada, uma expressão análoga a esta.

Os principais problemas que podem surgir, quando se pretenda obter qual quer daquelas funções, resultam da escolha do intervalo de amostragem mais conveniente e do número N de amostras que será conveniente seleccionar.

Com efeito, para se obterem melhores estimas, convirá realizar os cálculos para um número máximo de amostras e, simultaneamente, para um intervalo de amostragem que convém ser, também, o maior possível.

Mas, como se sabe pelo teorema da amostragem, deve respeitar-se a condição:

$$T \ll \frac{1}{2 F_{\max}} \dots\dots\dots (4.15)$$

sendo  $F_{\max}$  a frequência a partir da qual se pode considerar como desprezável

vel a energia do respectivo espectro de potência.

O nosso principal interesse na determinação das funções de autocorrelação residia na possibilidade da obtenção dos espectros de potência das flutuações turbulentas de pressão.

A ideia era a de calcular no computador, a partir dos pontos daquela função, a respectiva transformada de Fourier.

No entanto, e dado que se pôde recorrer à utilização dum analisador de Fourier - de que iremos tratar a seguir - decidiu-se abandonar esta via, por ser de execução mais demorada.

Utilizou-se ainda o correlador para a determinação da função de correlação cruzada dos sinais provenientes dos transdutores utilizados nos ensaios com escoamentos em pressão (Fot. 3.5).

A simples comparação desta função com as de autocorrelação - obtidas para cada um daqueles sinais - permitiu verificar (\*) a perfeita coincidência das características estatísticas apresentadas pelas flutuações de pressão detectadas por cada um dos referidos transdutores.

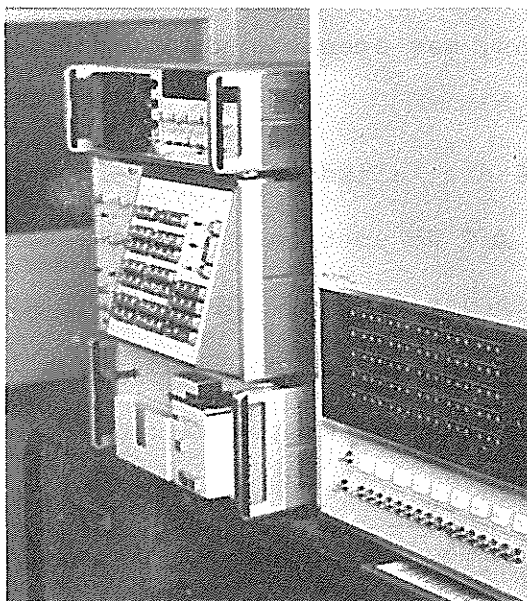
Este facto revestiu-se de particular importância, uma vez que permitiu assegurar a viabilidade dos estudos previstos sobre a influência da área do elemento sensível dos transdutores, e de que nos ocuparemos, com maior pormenor, no capítulo 5.

#### 4.10 - Analisador de Fourier

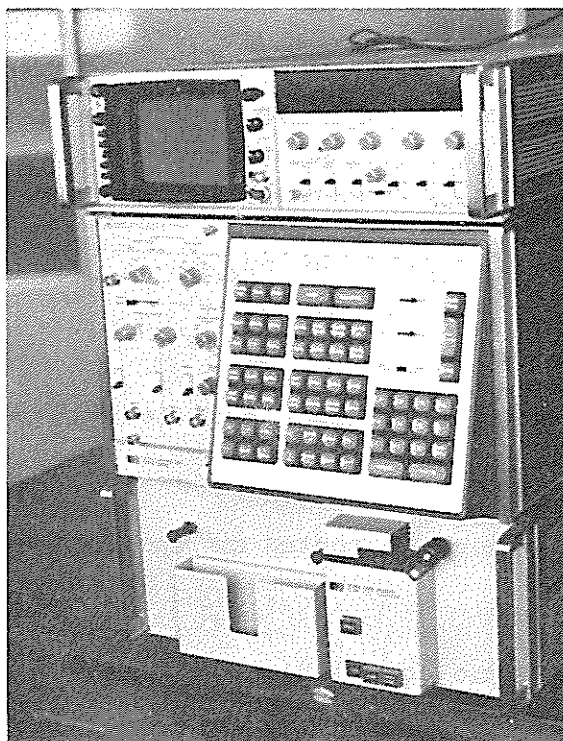
A determinação do grande número de espectros existentes - e de que apresentamos apenas alguns neste trabalho - só foi possível graças à utilização do analisador de Fourier HEWLETT PACKARD 5450 A, com computador 2116 B de 8K memórias, do Centro de Estudos de Electrónica (Fot. 4.9 e 4.10).

---

(\*)-por falta de tempo, não pudemos incluir, neste relatório, as referidas curvas.



Fot.4.9 - Aparelhagem utilizada na análise das flutuações de pressão, via analisador de Fourier



Fot.4.10 - O analisador de Fourier do C.E.E.

Este aparelho permite a análise em ambos os domínios: o das amplitudes e o das frequências, mas apenas o utilizámos para a determinação dos espectros de potência.

O sinal gravado é digitalizado num conversor analógico-digital, de acordo com o intervalo  $\Delta T$  de amostragem seleccionado.

O espectro de potência é determinado, neste analisador, a partir do produto da transformada de Fourier do sinal, pela transformada conjugada.

A primeira é calculada pela expressão:

$$F(m\Delta F) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(n\Delta T) e^{-j \frac{2\pi nm}{N}} \dots (4.16)$$

em que:

$N$  = número de pontos no domínio de tempo

$\Delta T$  = intervalo de amostragem

$\Delta F = \frac{1}{T} = \frac{1}{N\Delta T} = \frac{F_{\max}}{N/2} = \text{resolução.}$

Cada frequência no espectro, depois de uma transformação de Fourier, pode ser representada como:

$$F(m\Delta F) = A(m\Delta F) + j B(m\Delta F) \dots (4.17)$$

A multiplicação pelo conjugado conduz ao espectro de potência:

$$F(m\Delta F)^2 = A^2(m\Delta F) + B^2(m\Delta F) \dots (4.18)$$

com 2 graus de liberdade.

Se o número de pontos, no domínio do tempo, era  $N$ , no domínio da frequência passará a ser  $\frac{N}{2}$ .

É este último o número de pontos que aparece representado no respectivo "écran" osciloscópico.

Tal como acontecia no correlador, podemos transferir o espectro que

aparece neste "écran" para um registador XY.

Com o actual número de memórias do computador (8 K), o número máximo de pontos, no domínio do tempo, é:

$$N = 1\ 024.$$

Sendo assim, o espectro de potência virá definido, no máximo, por 512 pontos.

Cada um destes pontos corresponde à média aritmética obtida a partir dos M valores calculados pelo analisador.

Com efeito, uma vez seleccionado o número M de médias pretendido, o analisador realiza M cálculos para cada uma das frequências consideradas e determina, em seguida, a respectiva média aritmética.

Obtêm-se assim estimas para os respectivos espectros com 2M graus de liberdade.

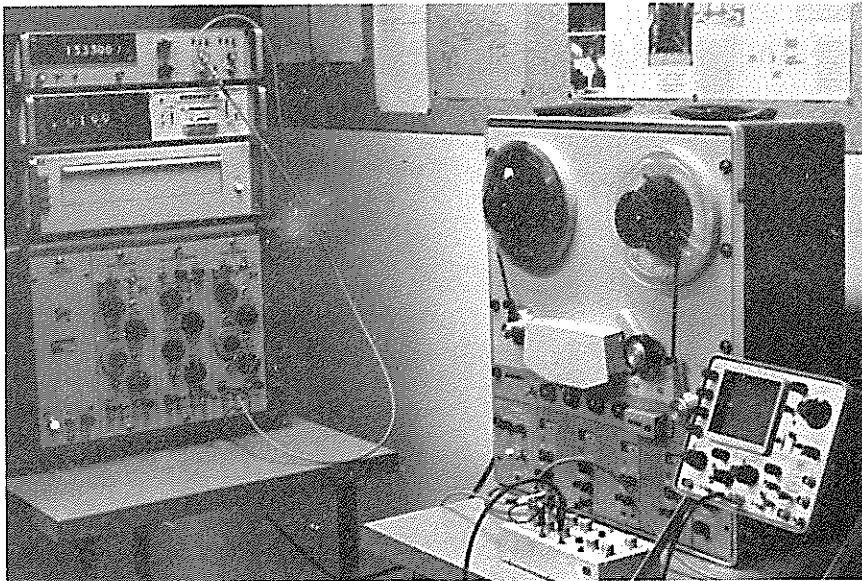
#### 4.11 - Computador

Para possibilitar a comparação desta via com as restantes, recorreu-se à determinação do espectro de potência pelo computador, a partir das respectivas séries cronológicas.

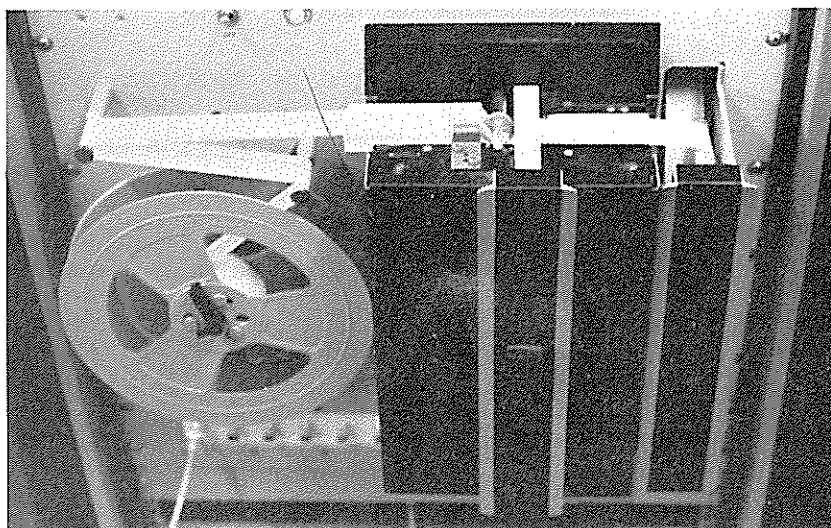
Pelo recurso à desmultiplicação máxima de velocidades do gravador e pelo registo em papel - à velocidade máxima permitida pela aparelhagem respectiva - era possível a determinação daquelas séries no tempo.

No entanto preferiu tentar-se, por razões óbvias, a utilização do sistema de aquisição de dados do Serviço constituído por:

- um "Coupler Controller" 2575 A;
- um voltímetro digital 3480 B, com gavetas "Scanning Unit" 3485 A;
- uma perfuradora de alta velocidade 2753 A.



Fot.4.11 - Aparelhagem utilizada na via computador



Fot.4.12 - A perfuradora do S.H. do L.N.E.C.

Toda a aparelhagem (Fot. 4.11 e 4.12) é da marca HEWLETT PACKARD, sendo a velocidade nominal da perfuradora de 120 caracteres por segundo.

Na prática não é conveniente, no entanto, a utilização de mais de 110 caracteres por segundo.

Como são precisos, para uma boa resolução, cinco caracteres:

1 espaço + 1 sinal + 3 dígitos,

só se pode contar, no máximo, com uma frequência de amostragem de:

$$\frac{110}{5} = 22 \text{ Hz,}$$

o que corresponderá a uma frequência máxima do sinal a analisar de 11 Hz.

Por este motivo, esta via só tem viabilidade de utilização no estudo das flutuações turbulentas de pressão, recorrendo-se a um gravador analógico de FM, que permita uma desmultiplicação de velocidades compatível com as frequências máximas do sinal.

No caso do gravador AMPEX, utilizado neste estudo, e dado que se dispõe duma desmultiplicação de 8 vezes, só se poderá ir até aos 88 Hz, o que é insuficiente, como se verá, para o estudo das flutuações de pressão nas lages de betão (escoamentos com superfície livre).

#### 4.12 - Exemplo ilustrativo

##### 4.12.1 - Ensaio seleccionado

Com o objectivo de verificar as potencialidades oferecidas pelas diferentes vias de análise espectral das flutuações turbulentas de pressão, seleccionou-se um ensaio que permitiu a obtenção de estimas do respectivo espectro através das seguintes vias:

- analisador de onda;
- analisador panorâmico;
- analisador de Fourier; e



- computador.

O referido ensaio foi realizado nas seguintes condições:

- escoamento em pressão (câmara de ensaios);
- placa de "plexiglas" liso (rugosidade KO);
- velocidade média na secção:  $\bar{U} = 10,76 \text{ m s}^{-1}$ ; e
- pressão média na secção:  $\bar{P} = 12,0 \text{ m H}_2\text{O}$ .

#### 4.12.2 - Espectro de potência determinado pelo analisador de onda

Na figura 4.6 está indicado o espectro de potência que foi obtido através do analisador de onda já referido em 4.7.

Para tal, e dadas as limitações deste aparelho na análise das baixas frequências, recorreu-se à multiplicação máxima de velocidades permitida pelo gravador AMPEX.

Assim, utilizando-se a relação máxima:

$$n = 8$$

conseguiu-se (vêr 4.7) realizar uma análise para:

- limite inferior de análise = 1,25 Hz; e
- largura da janela espectral = 0,665 Hz.

Como se pôde observar pela Figura 4.6, as estimas dos valores do espectro são tanto menos estáveis quanto mais nos aproximamos do limite inferior de análise.

Como é evidente, com um gravador de melhor relação de velocidades, conseguir-se-ão obter estimas do espectro em melhores condições.

No entanto, este processo de determinação do espectro revelou-se muito moroso.

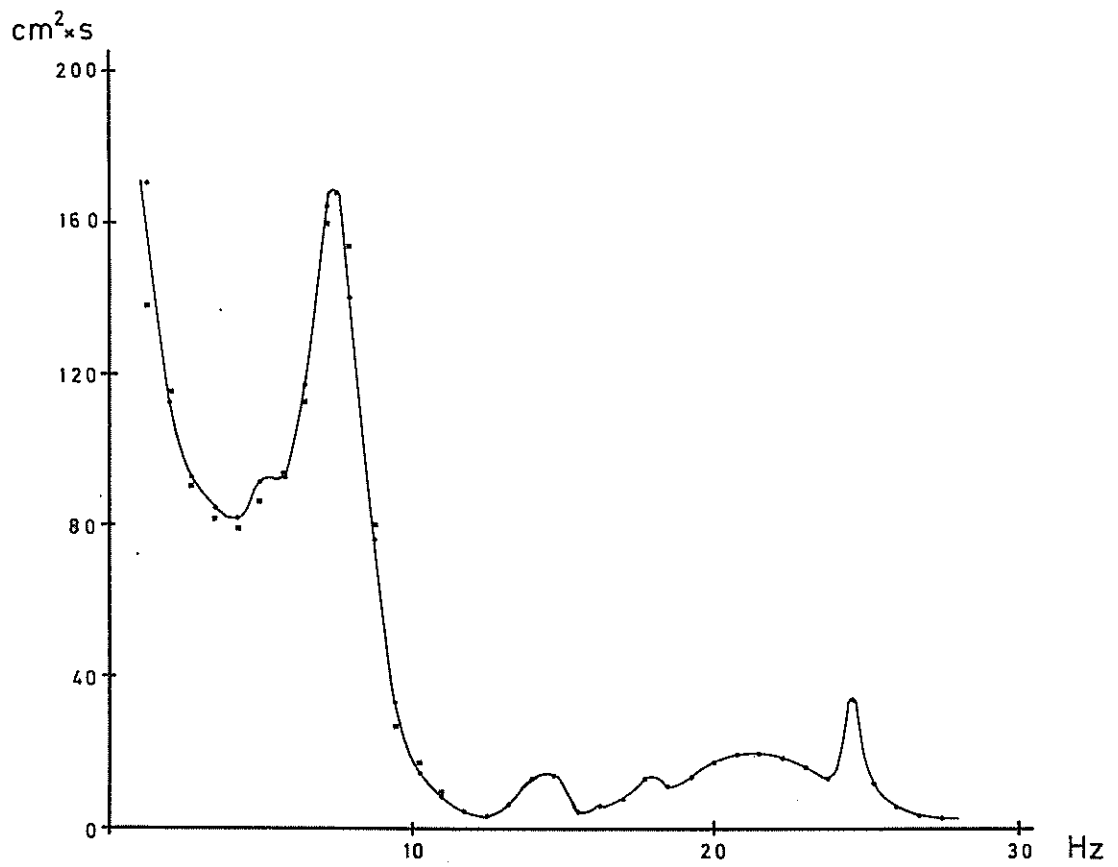


Fig. 4.6 - Análise Espectral: via analisador de onda.

#### 4.12.3 - Espectro de frequência determinado pelo analisador panorâmico

Na Fotografia 4.6 mostra-se a estima do espectro obtida pelo analisador panorâmico descrito em 4.8.

Esta via de análise tem como inconvenientes principais:

- não permitir a análise directa para frequências inferiores a 30 Hz;
- não possibilitar uma análise "fina" (com janela espectral de pequena largura); e
- tornar difícil a quantificação da estima (valor da ordenada correspondente a cada frequência).

Esta via apresenta, no entanto, a vantagem da facilidade e rapidez de determinação dessas estimas, o que a torna de interesse na apreciação e comparação qualitativa dos espectros.

De resto, o inconveniente apresentado pelo valor elevado da frequência mínima de análise pode, em certa medida, tal como aconteceu no exemplo anterior, ser atenuado pela utilização dum gravador.

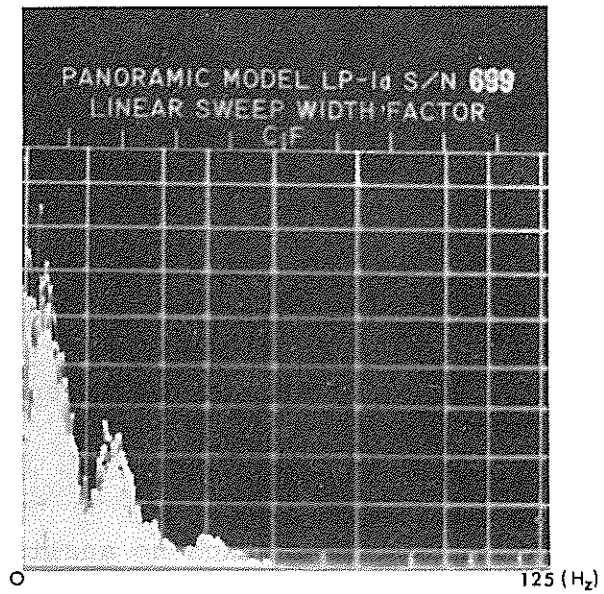
No entanto, aqui o problema é um pouco diferente do anterior, como consequência de estarem fixadas as bandas em que se pode trabalhar.

Com efeito, e a título exemplificativo, vejamos o que poderia acontecer se quiséssemos analisar um sinal possuindo um espectro de potência que se estendesse desde frequências muito baixas até, por exemplo, 200 Hz.

Poderíamos realizar a análise deste sinal:

- a) - com velocidade de reprodução igual à de gravação:

Neste caso iríamos seleccionar, naturalmente, a banda de 200 Hz e obteríamos a análise do sinal desde 30 a 200 Hz, em toda a largura do varrimento;



Fot.4.6 - Espectro determinado pelo analisador panorâmico

b) - com velocidade de reprodução 8 vezes superior à de gravação:

Neste caso teríamos que adoptar a banda dos 5.000 Hz (a de 1.000 Hz não servia, como é óbvio) e a análise do sinal seria, então, obtida desde 4 a 200 Hz, em cerca de  $1/3$  da largura total de varrimento. Isto significava que o espectro ficaria como que "estrangulado" na respectiva fotografia, não se tornando cómoda a sua análise.

Mas, se a gama de frequências entre 4 e 8 Hz não fosse muito importante, talvez fosse conveniente, então, utilizar uma desmultiplicação de 4 vezes e não de 8, dado que isso possibilitava já a escolha da banda dos 1.000 Hz e, conseqüentemente, poder-se-ia obter um espectro em cerca de  $4/5$  da largura total de varrimento.

Impõe-se, pois, a conclusão de nem sempre interessar a máxima multiplicação de velocidades.

#### 4.12.4 - Espectros de potência determinados no analisador de Fourier

Tendo sido possível utilizar, como se referiu, o analisador de Fourier HEWLETT PACKARD do Centro de Estudos de Electrónica, conseguiu-se não só documentar esta via de análise através da determinação de estimas do espectro correspondente ao ensaio nº. 6, como, ainda, - e se irá ver mais adiante - realizar já um estudo da evolução das características das flutuações de pressão, no domínio das frequências, para o caso de escoamento com superfície livre sobre lages de betão liso.

No quadro nº. 4.1 estão sintetizados os principais dados que permitem definir as condições de cálculo das estimas obtidas.

Como se pode observar, todos os cálculos foram efectuados com 1024 pontos retirados do registo magnético correspondente ao ensaio em causa.

A digitalização desses pontos efectuou-se, como se referiu em 4.10,

QUADRO-4.1

Cálculo	Figura	Nº de pontos do registo	Intervalo da leitura (s)	ESPECTRO DE POTÊNCIA					Observações
				Frequência de corte seccionada (Hz)	Frequência máx. do gráfico (Hz)	Resolução (Hz)	número de médias	Graus de liberdade	
6/12	4.7	1024	0,005	100	50	0,195	50	100	* Espectros obtidos por multiplicação (2x) da velocidade de reprodução das respectivas fitas magnéticas.
*6/15	4.8	"	0,005	100	50	0,098	"	"	
*6/16	4.9	"	0,005	100	50	0,098	"	"	

Análise Espectral: via analisador de Fourier

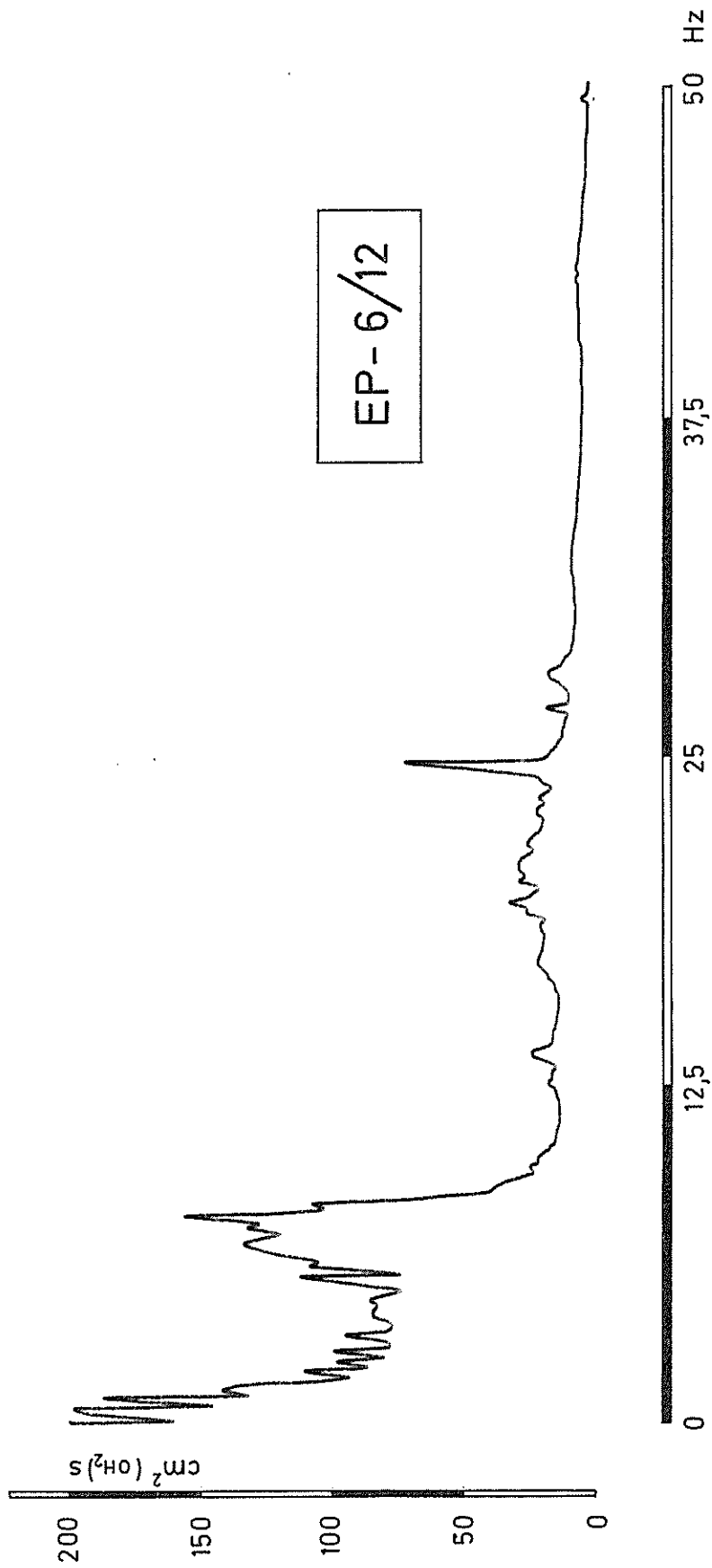


Fig. 4.7 - Análise Espectral: via analisador de Fourier.

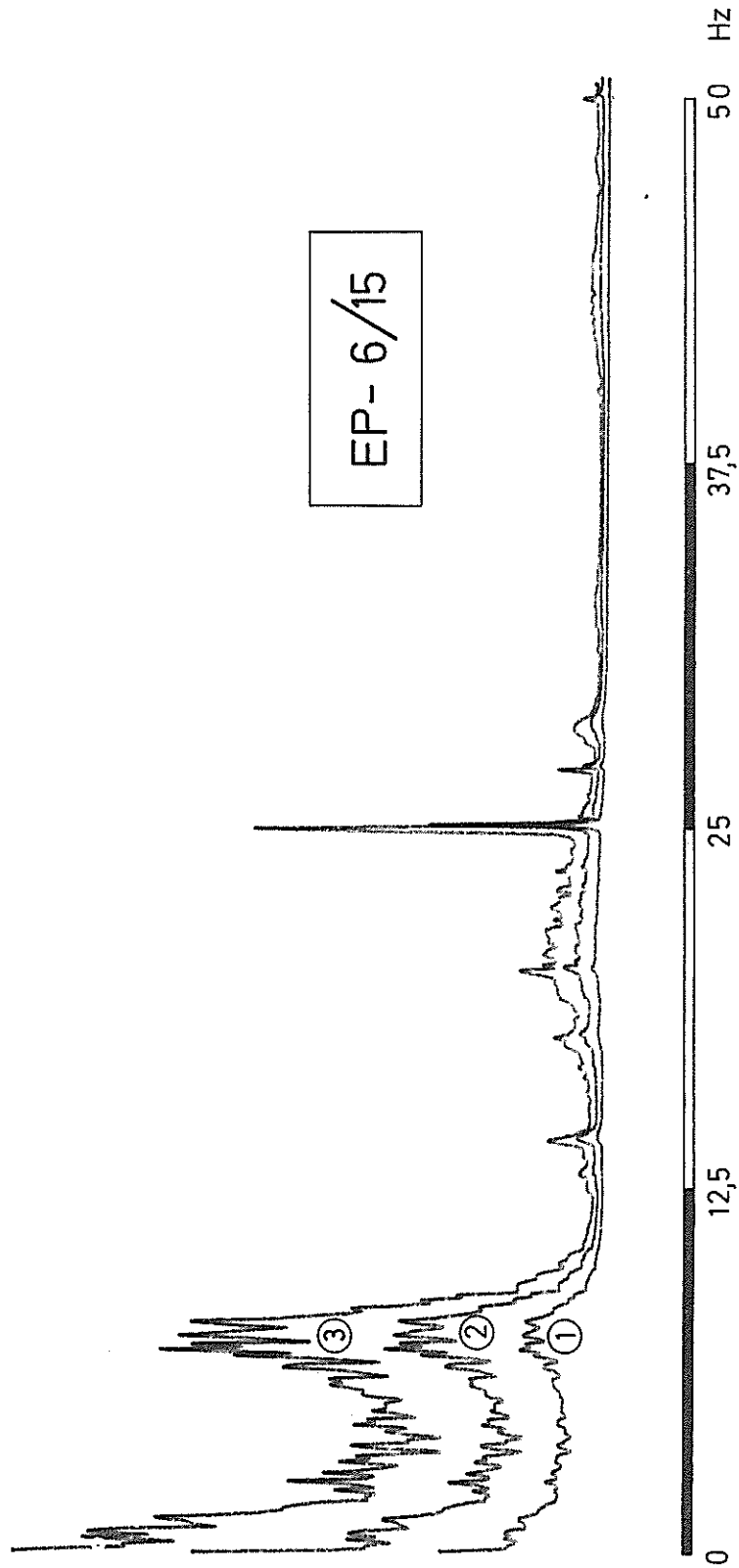


Fig. 4.8 - Análise Espectral: via analisador de Fourier.



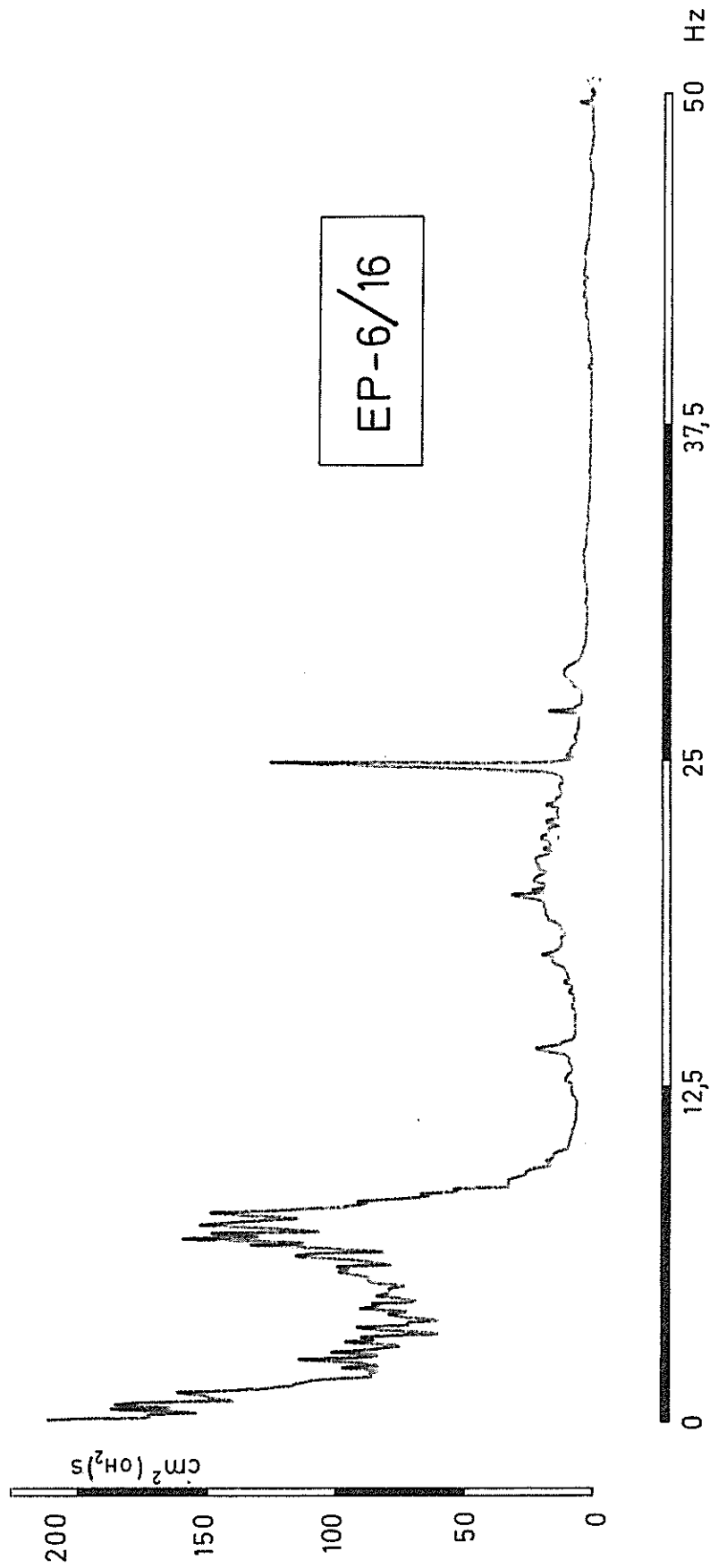


Fig. 4.9 - Análise Espectral: via analisador de Fourier.

no conversor analógico-digital que integra o analisador de Fourier.

O número de médias com que se efectuaram os cálculos foi de 50. Por outras palavras: os valores obtidos para o correspondente espectro estimado resultaram da média aritmética - para cada frequência central - dos 50 valores calculados.

Isto corresponde, pelo processo utilizado nos respectivos cálculos, a estimas com 100 graus de liberdade.

Apresentamos aqui apenas alguns dos espectros de potência determinados, por julgarmos serem suficientes para documentar algumas das suas potencialidades neste domínio e, ainda, porque iremos utilizar, no capítulo 5, esta via de análise aplicada já a um estudo concreto.

Os sinais gravados foram reproduzidos "em tempo real" e "em tempo diferido".

Em ambos os casos a saída do gravador foi ligada directamente à entrada do analisador.

Embora o tempo de cálculo - até obtenção dos valores do espectro estimado - dependa do número de médias considerado, mesmo para o caso de 50, esse tempo é, apenas, de cerca de 3 minutos.

Querendo o seu traçado em papel, haverá que contar ainda com o tempo de transposição do espectro do "écran" osciloscópico para o registador XY, que, no entanto, é inferior àquele valor.

Daqui se poderá inferir da rapidez de resposta deste aparelho.

Sendo assim - e com uma boa programação dos ensaios - poderá já ser analisado, na prática, um valor considerável de registos o que, por outras vias, seria completamente impossível.

E surge aqui, também, o interesse da utilização dum gravador analógico de FM, pois, para um melhor aproveitamento das possibilidades oferecidas por esta aparelhagem, há necessidade, em nossa opinião, do "armazena-

mento" da informação respectiva.

No entanto, a utilização do gravador pode revelar-se ainda de grande utilidade na análise dos sinais em "tempo diferido". Isso mesmo se procura demonstrar pelos cálculos 6/15 e 6/16, representados nas figuras 4.8 e 4.9,

Deste modo, foi possível aumentar para o dobro a resolução do espectro, o que permitiu salientar (Fig. 4.9), por forma ainda mais vincada do que a já observada na estima 6/12 (Fig. 4.7), a presença, no sinal, duma componente sinusoidal com uma frequência próxima dos 24 Hz.

Outra das vantagens oferecidas por este analisador consiste na possibilidade de escolha das escalas - vertical e horizontal - mais convenientes, como se pretendeu mostrar pelas 3 curvas da Fig. 4.8.

O caminho seguido para a determinação destes espectros - e dos que apresentamos no capítulo 5 - foi:

- primeiro, determinava-se uma estima do espectro (com um número de médias reduzido) para uma gama de frequências bastante superior à previsível pela simples observação do sinal no "écran" dum osciloscópio;

- depois, e em face dessa estima, seleccionava-se a gama de frequências que mais interessava considerar; e,

- por último, obtinha-se a estima final do espectro, para a frequência de corte considerada e para um número M de médias igual a 50 (\*).

#### 4.12.5 - Espectros determinados pelo computador (\*\*)

No quadro nº. 4.2 apresentam-se os principais dados que permitiram a determinação das estimas do espectro de potência pelo computador.

Como se sabe, para a obtenção destas estimas é necessário a determi-

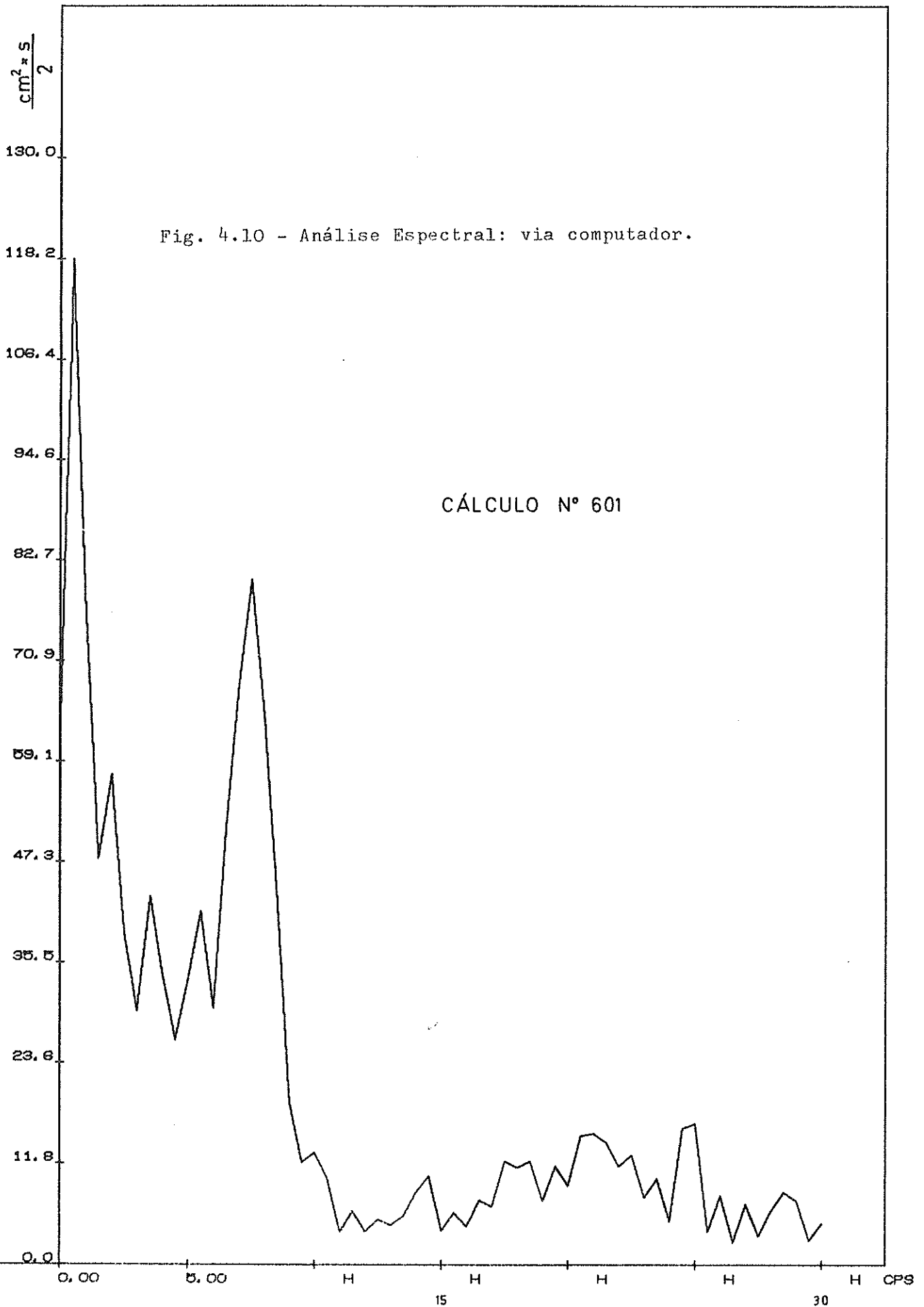
---

(\*) - verificou-se não ser necessário um número maior.

(\*\*)- agradecemos ao Dr. Mendes de Carvalho a possibilidade que nos deu da utilização e reprodução do programa "ESPEN 35", de sua autoria.

QUADRO - 4.2

Cálculo	Figura	Nº de pontos do registo	Intervalo de leitura <sup>(s)</sup>	Nº de pontos da função de autocorrelação	ESPECTRO DE POTÊNCIA					Observações
					Frequência de corte (Hz)	Janela Espectral	Largura da Janela (Hz)	Resolução (Hz)	Graus de liberdade	
* 600	—	6 144	0,01667	150	30	RECT.	0,200	0,200	41	* excedeu as possibilidades do computador
601	4.10	3 000	"	60	"	"	0,500	0,500	50	
602	4.11	3 000	"	75	"	"	0,400	0,200	40	
* 604	—	6 144	"	150	"	PARZEN	0,200	0,200	152	
605	4.12	3 000	"	197	"	"	0,568	0,500	56	
606	4.13	3 000	"	279	"	"	0,400	0,200	39	



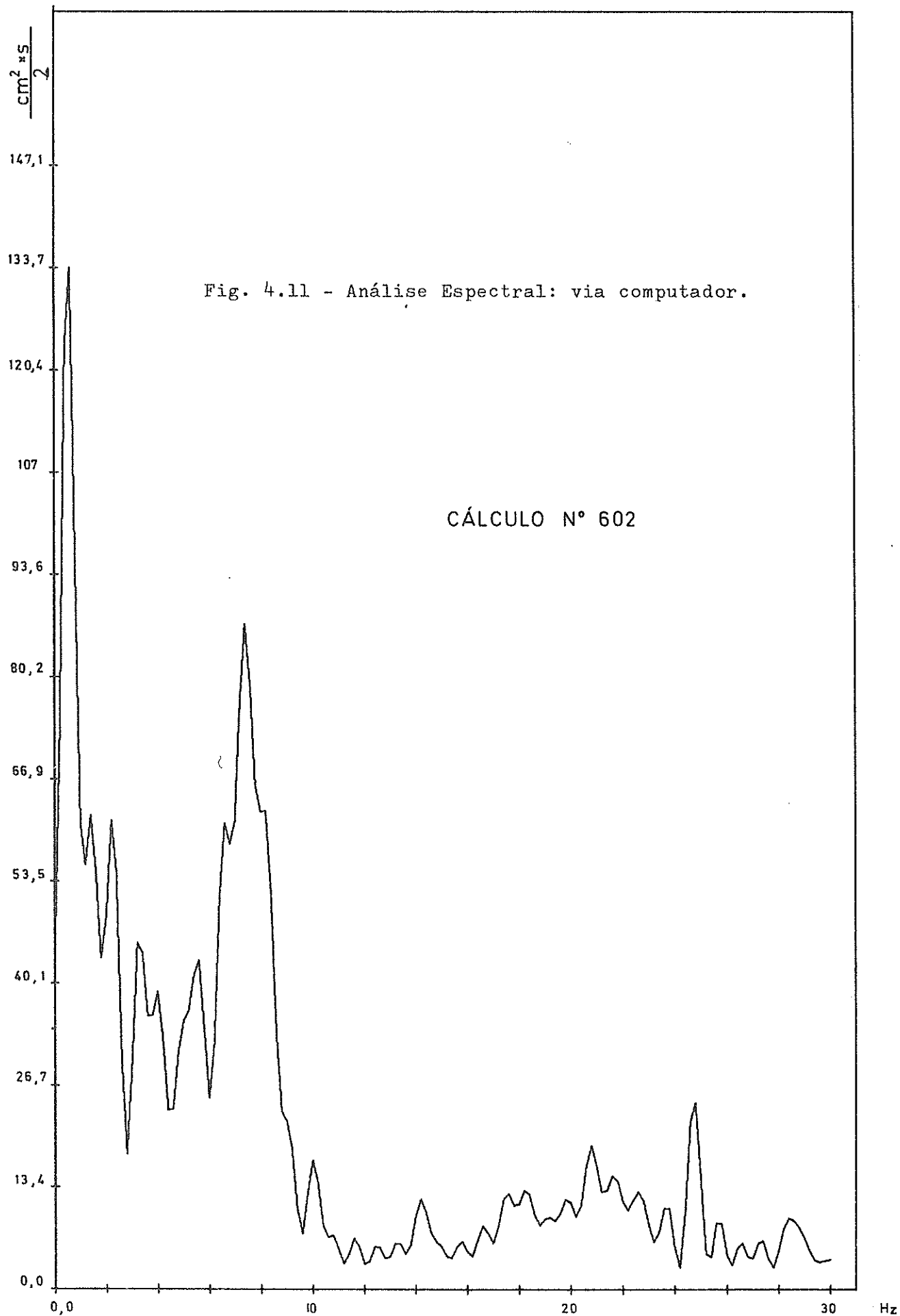


Fig. 4.11 - Análise Espectral: via computador.

CÁLCULO N° 602

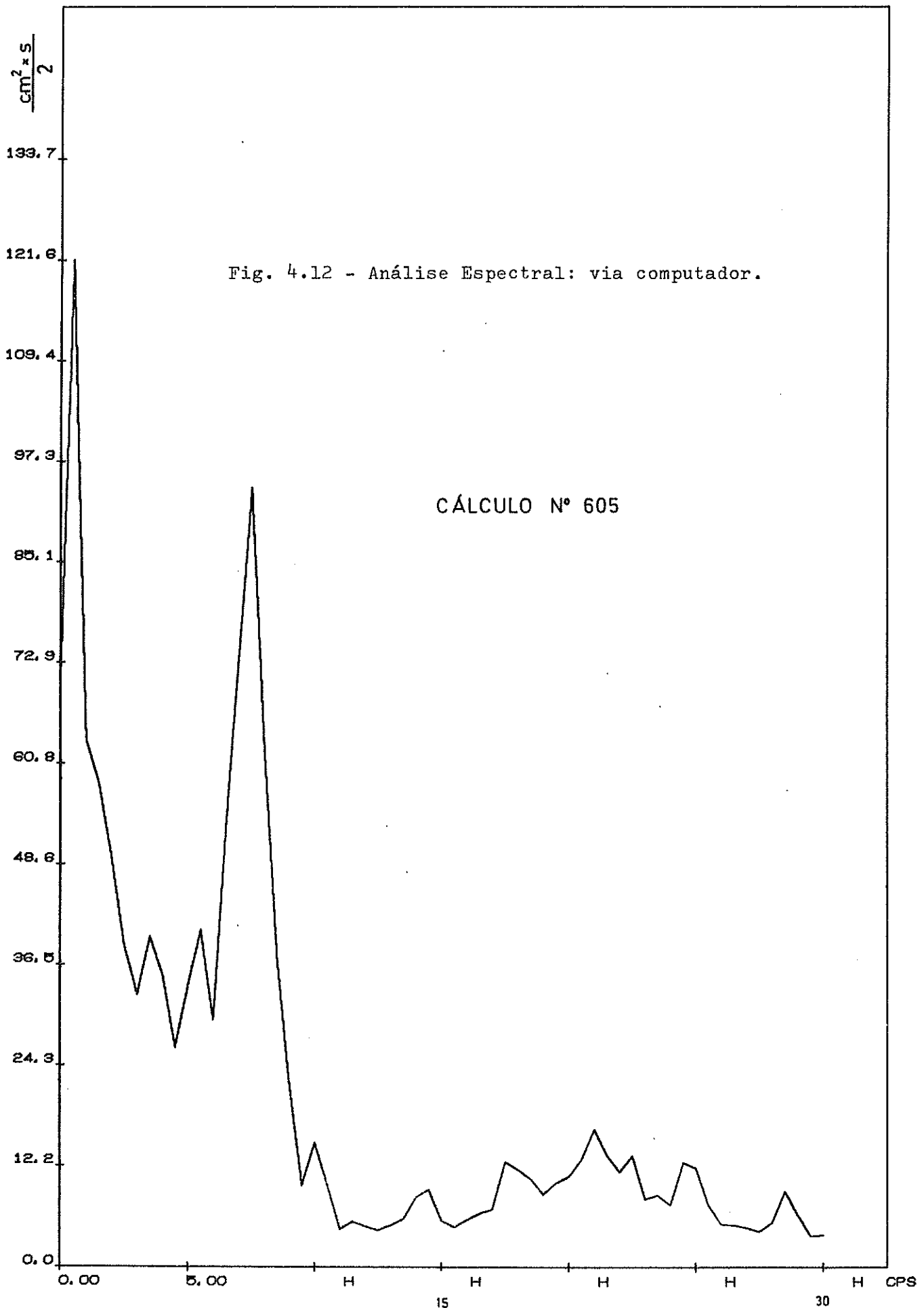
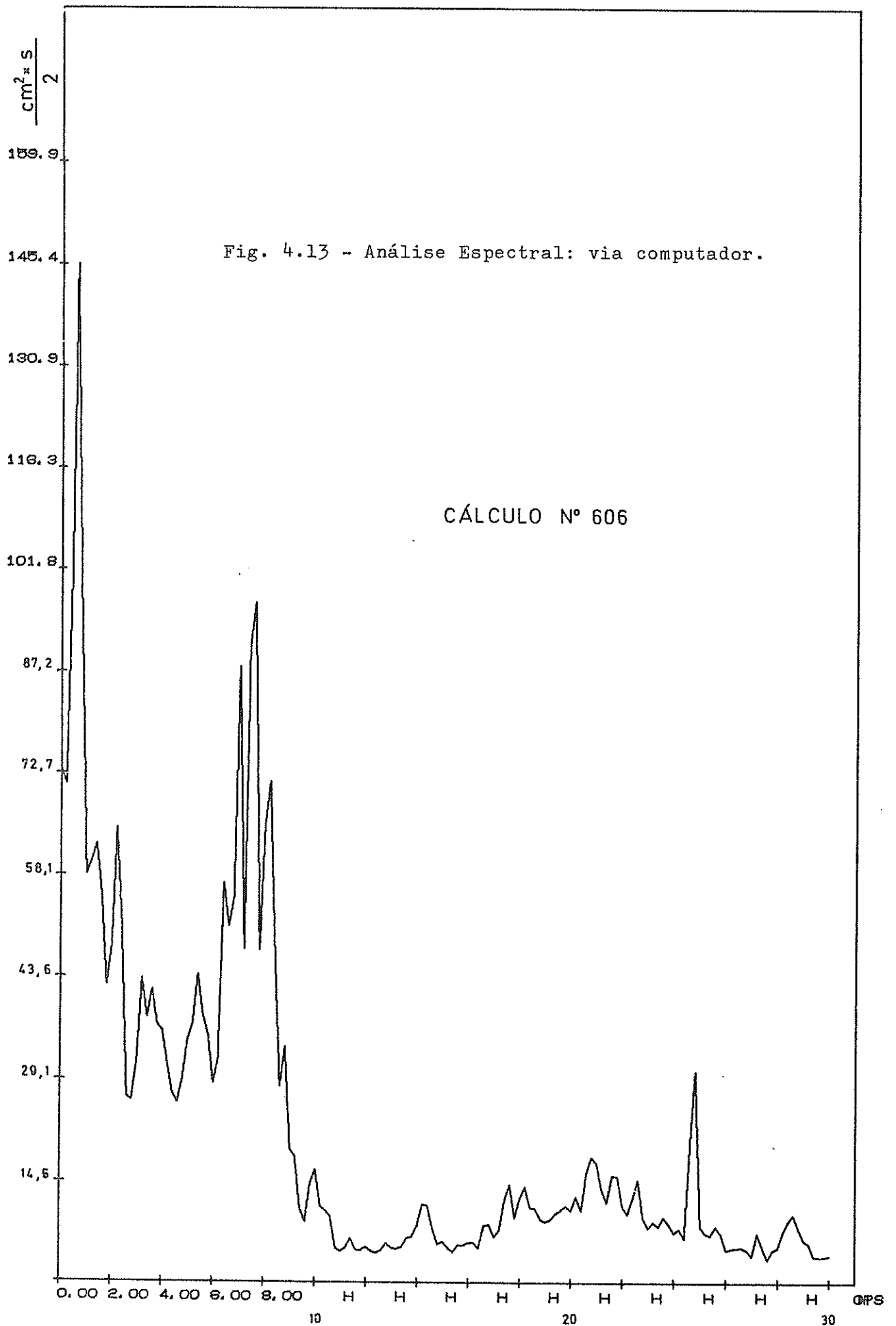


Fig. 4.12 - Análise Espectral: via computador.

CÁLCULO Nº 605





```

ESPEN;

"BEGIN"
"REAL"CONST,FC,NADA,X,Y,DT,MEDIA,DF,UR,K,AL,BL,MD,MQ,MZ,
EPS,PDTDF,ESC,A,B,DIF,SOMA;
"INTEGER"NU,N,KK,M,ML,I,NP,R,J,Q,DFP,FCP;
"BOOLEAN"COV,PW,PF,DES,INT,REC;
"READ"N,DT,KK,CONST;
N:=N"DIV"KK;
"BEGIN"
"ARRAY"Z,ZL[1:N];
MEDIA:=0;
"FOR"I:=1"STEP"1"UNTIL"N"DO"
"BEGIN"
"READ"ZL[I];
ZL[I]:=ZL[I]*CONST;
"IF"KK>1"THEN""FOR"J:=1"STEP"1"UNTIL"KK-1"DO""READ"NADA;
MEDIA:=MEDIA+ZL[I]
"END";
MEDIA:=MEDIA/N;
"FOR"I:=1"STEP"1"UNTIL"N"DO"ZL[I]:=ZL[I]-MEDIA;
MAIS:"PRINT"PUNCH(3);"L"MAIS:";
"READ"READER(3);NU,M,ML,FC,PF,PW,DES,INT,COV,REC;
DF:=FC/ML;
"IF"PF"THEN"
"BEGIN"
Z[1]:=ZL[1];
"FOR"I:=2"STEP"1"UNTIL"N"DO"Z[I]:=ZL[I]-ZL[I-1]
"END"
"ELSE"
"FOR"I:=1"STEP"1"UNTIL"N"DO"Z[I]:=ZL[I];

"IF"PW"THEN"
"READ"AL,BL"ELSE"
"BEGIN"
AL:=1;
BL:=0
"END";
Y:=Z[1];
"FOR"I:=2"STEP"1"UNTIL"N"DO"
"BEGIN"
X:=Z[I];
Z[I]:=X*AL+Y*BL;
Y:=X
"END";

```

Fig.4.14 a - Análise espectral.Via computador

Programa "ESPEN" [Ref. 132]

```

"BEGIN"
"ARRAY"C,W[0:M];V,U[0:ML];

"PROCEDURE"JANT(A);
"INTEGER"A;
"BEGIN"
"SWITCH"L:=L1,L2,L3,L4,L5;
"GOTO"L[A];
L1:"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"M"DO"W[R]:=1;
NP:=N"DIV"M;
"GOTO"SAI;
L2:"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"M"DO"W[R]:=0.5+0.5*COS(3.1416*R/M);
NP:=ENTIER(2.667*N/M);
"GOTO"SAI;
L3:"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"M"DO"W[R]:=0.54+0.46*COS(3.1416*R/M);
NP:=ENTIER(2.47*N/M);
"GOTO"SAI;
L4:"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"M"DO"W[R]:=1-R/M;
NP:=ENTIER(3*N/M);
"GOTO"SAI;
L5:"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"M/2"DO"
"BEGIN"
W[R]:=1-6*((R/M)+2-(R/M)+3);
NP:=R
"END";
"FOR"R:=NP+1"STEP"1"UNTIL"M"DO"W[R]:=2*(1-R/M)+3;
NP:=ENTIER(3.71*N/M);
"GOTO"SAI;
SAI:"END"JANT;

PUNCH(4);

"PRINT"'"L5"          CALCULO NO. ',DIGITS(6);SAMELINE,NU,'"L2"';
"IF"COV"THEN"

"PRINT" '"L'   TAU          AUTOCOV'L3"';

"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"M"DO"
"BEGIN"
SOMA:=0;
"FOR"i:=1"STEP"1"UNTIL"N-R"DO"SOMA:=SOMA+Z[i]*Z[i+R];
C[R]:=SOMA/(N-R);
"IF"COV"THEN"
"PRINT"ALIGNED(3,2),R*DT, '"S5"', SAMELINE, FREEPOINT(8),C[R]
"END";
"IF"NOT"COV"THEN""PRINT"'"L2"',C[0],'"L5"';

"PRINT"'"L10"';

PDTDF:=6.28318531*DT*OF;
L:"PRINT"PUNCH(3),'L'JANELA:';
"READ"READER(3),J;
JANT(J);
"PRINT"'"L5"NO. DE GRAUS DE LIBERDADE =',SAMELINE,DIGITS(3),NP,'"L4"';
MD:=MQ:=MZ:=0;

```

Fig.4.14 b - Análise espectral. Via computador

Programa "ESPEN" (continuação)

```

"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"ML"DO"
"BEGIN"
SOMA:=0;
"FOR"Q:=1"STEP"1"UNTIL"M-1"DO"
SOMA:=SOMA+C[Q]*W[Q]*COS(PDTDF*R*Q);
U[R]:=DT*(C[M]*W[M]*COS(PDTDF*R*M)+C[0]*W[0]+2*SOMA);
V[R]:=U[R]/(AL*AL+BL*BL+2*AL*BL*COS(PDTDF*R));
MZ:=MZ+V[R]*DF;
MD:=MD+(R*DF)+2*V[R]*DF;
MQ:=MQ+(R*DF)+4*V[R]*DF
"END";
EPS:=SQRT((MZ*MQ-MD*MD)/(MZ*MQ));

"IF"NP<20"THEN"
"BEGIN"
"PRINT"PUNCH(3),'L'MENOS DE 20 GRAUS DE LIBERDADE';
INT:="FALSE";
WAIT;
"GOTO"CONT
"END";

"IF"NP"GE"20"AND"NP<30"THEN"
"BEGIN"
A:=0.765;
B:=1.38
"END"
"ELSE"
"IF"NP"GE"30"AND"NP<40"THEN"
"BEGIN"
A:=0.71;
B:=1.32
"END"
"ELSE"
"IF"NP"GE"40"AND"NP<50"THEN"
"BEGIN"
A:=0.74;
B:=1.28
"END"
"ELSE"

"IF"NP"GE"50"AND"NP<75"THEN"
"BEGIN"
A:=0.77;
B:=1.24
"END"
"ELSE"
"IF"NP"GE"75"AND"NP<100"THEN"
"BEGIN"
A:=0.80;
B:=1.20
"END"
"ELSE"
"IF"NP"GE"100"AND"NP<150"THEN"
"BEGIN"
A:=0.85;
B:=1.130
"END"

```

Fig.4.14 c-Análise espectral. Via computador

Programa "ESPEN" (continuação)

```

"ELSE"
"IF"NP"GE"150"AND"NP<200"THEN"
"BEGIN"
A:=0.87;
B:=1.139
"END"
"ELSE"
"IF"NP"GE"200"AND"NP<250"THEN"
"BEGIN"
A:=0.90;
B:=1.10
"END";
"IF"NP"GE"250"THEN"
"BEGIN"
"PRINT"PUNCH(3),'L'MAIS DE 250 GRAUS DE LIBERDADE :',SAMELINE,
DIGITS(4),NP;
"READ"READER(3),A,B;
"END";

CONT:"PRINT" 'L' F P(F) INT. CONF. 80%'L3'';
"IF"NP<20"THEN""FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"ML"DO"
"PRINT"ALIGNED(1,3),R*DF,'S5',SAMELINE,FREEPOINT(8),V[R]"ELSE"
"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"ML"DO"
"PRINT"ALIGNED(1,3),R*DF,PREFIX('S5'),FREEPOINT(8),V[R],
V[R]/B,V[R]/A;

"PRINT"'L4'EPSILON = ',SAMELINE,FREEPOINT(4),EPS;
"PRINT"'L4'MZ = ',SAMELINE,FREEPOINT(9),MZ,' MD = ',MD,' MQ = ',MQ;
'L20'';

"IF"DES"THEN"
"BEGIN"
"PRINT"PUNCH(3),'L'ESCALA:';
"READ"READER(3),REC;
"IF"REC"THEN"
"BEGIN"
AL:=0;
"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"ML"DO"
"IF"V[R]>AL"THEN"AL:=V[R];
"PRINT"PUNCH(3),AL;
ESC:=2000/AL;
FCP:=1500
"END"
"ELSE"
"READ"READER(3),ESC,FCP;
SETORIGIN(300,0);
DRAWLINE(0,2500);
DRAWLINE(0,0);
WAY(0,4);
"FOR"i:=0"STEP"200"UNTIL"2300"DO"
"BEGIN"
MOVEPEN(-150,i);
"PRINT"PUNCH(5),ALIGNED(4,1),i/ESC;
MOVEPEN(0,i);
CENCHARACTER(1);
"END";
DFP:=FCP"DIV"ML;
"FOR"i:=0"STEP"10*DFP"UNTIL"FCP"DO"
"BEGIN"
DRAWLINE(i,0);
CENCHARACTER(1);
MOVEPEN(i-20,-40);
"PRINT"PUNCH(5),ALIGNED(1,2),DF*i/DFP;
MOVEPEN(i,0)
"END";

```

Fig.4.14 d- Análise espectral Via computador

Programa "ESPEN" (continuação)

```

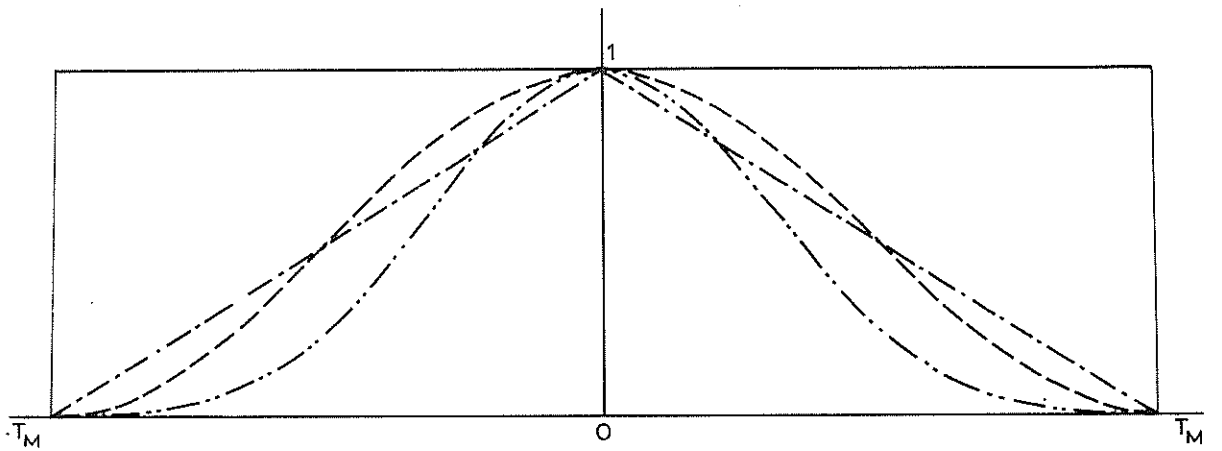
DRAWLINE(DFP*(ML+5),0);
MOVEPEN(DFP*(ML+5),-40);
"PRINT"PUNCH(5);"CPS";
MOVEPEN(800,-200);
WAY(0,4);
"PRINT"PUNCH(5);"CALCULO NO.";SAMELINE,DIGITS(6),NU;
MOVEPEN(0,V[0]*ESC);
"FOR"R:=1"STEP"1"UNTIL"ML"DO"DRAWLINE(DFP*R,V[R]*ESC);

"IF"INT"THEN"
"FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"ML"DO"
"BEGIN"
UR:=V[R]*ESC;
MOVEPEN(DFP*R,UR/B);
DRAWLINE(DFP*R,UR/A)
"END";
MOVEPEN(DFP*(ML+5),0);
DRAWLINE(DFP*(ML+5),2500);
DRAWLINE(0,2500);
MOVEPEN(0,800);
"END""ELSE"
"BEGIN""FOR"R:=0"STEP"1"UNTIL"ML"DO""PRINT"PUNCH(1),V[R];
"PRINT"PUNCH(1);"LHN30";
"END"
"END";
"PRINT"PUNCH(3);"L2"SE CONTINUA, ESCREVA T; SE NAO, ESCREVA F;";
"READ"READER(3);REC;
"IF"REC"THEN"
"BEGIN"
"PRINT";"F";
"GOTO"MAIS
"END"
"END"
"END";

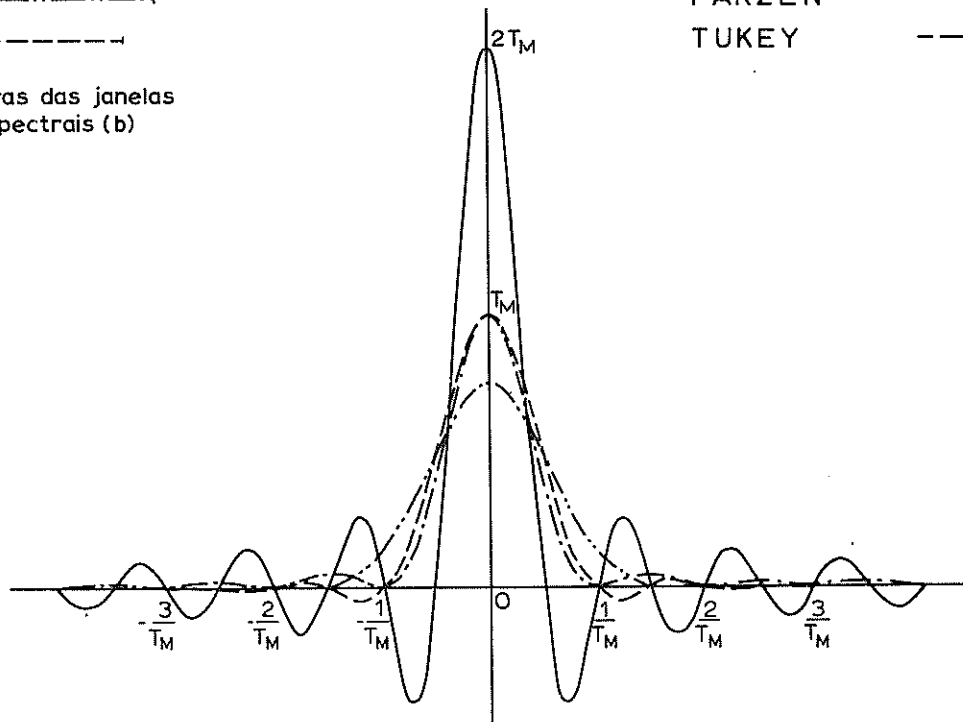
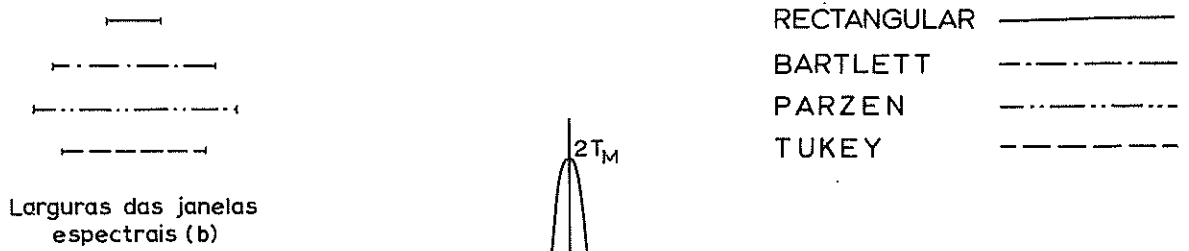
```

Fig. 4.14 e - Análise espectral. Via computador

Programa "ESPEN" (continuação)



JANELAS TEMPORAIS



JANELAS ESPECTRAIS

Fig. 4.15—JANELAS UTILIZADAS  
NA ANÁLISE ESPECTRAL

nação prévia das séries cronológicas dos respectivos sinais.

Esse objectivo pode alcançar-se, na prática, pela digitalização dos "registos diferidos" ou pelo recurso a um conversor analógico-digital.

Este último processo — que é o mais cómodo — pode, no entanto, limitar as possibilidades de análise dos sinais, se houver necessidade da obtenção duma fita de dados.

Com efeito, e como se viu em 4.11, mesmo com as perfuradoras de alta velocidade — actualmente disponíveis — não se poderá realizar uma análise espectral — em "tempo real" — se o sinal contiver frequências elevadas.

Esta dificuldade pode ser vencida pela utilização dum gravador magnético de FM, desde que a sua relação de velocidades (reprodução/gravação) seja compatível com a gama de frequências que interessa investigar.

No caso do sistema de aquisição de dados do Serviço de Hidráulica do LNEC, a fita de dados que se obtém permite análises até cerca de 11 Hz.

Por utilização do gravador AMPEX SP-300 essa análise poder-se-ia estender, no entanto, a uma frequência máxima de 88 Hz, como se salientou em 4.11.

#### 4.13 - Conclusões

##### 4.13.1 - Em relação à aparelhagem de detecção das flutuações de pressão

No início destes estudos, existiam na Divisão de Hidráulica das Estruturas do S.H. quatro transdutores capacitivos da marca SOUTHERN de 10 psig.

Estes transdutores permitiam apenas o estudo das flutuações de pressão em escoamentos com superfície livre.

Dado pretender-se também o registo das flutuações de pressão associadas a escoamentos em pressão — com valores médios que podiam variar dentro

duma vasta gama - houve necessidade da realização dum estudo pormenorizado sobre esta aparelhagem que permitisse a aquisição dos transdutores mais convenientes.

Com o estudo realizado foi possível:

- um melhor esclarecimento das possibilidades agora existentes neste campo; e,

- a aquisição de transdutores capazes de responder às necessidades acima referidas (Fot. 4.2 e 4.3)

Igualmente foi possível:

- construir dispositivos de calibração dos transdutores (Fot. 5.15);

-- efectuar ensaios que permitiram garantir a viabilidade de utilização dos transdutores capacitivos nos ensaios (escoamentos com superfície livre) que iriam ser realizados (Fot. 3.4); e,

- conceber um sistema de fixação destes transdutores ao betão (5.23) que permitiu a sua calibração fora do local de utilização e deu garantias de servir para todos os ensaios.

#### 4.13.2 - Em relação à aparelhagem de registo das flutuações de pressão

Pretendendo-se realizar o registo das flutuações turbulentas de pressão de forma a permitir a sua posterior análise estatística, uma das primeiras medidas tomadas foi a de saber quais as disponibilidades apresentadas, neste campo, pelo Serviço.

Dado ter-se concluído não existir qualquer aparelhagem capaz de garantir o registo nessas condições, foi preciso encontrar solução para este problema, através dum estudo que demonstrou a conveniência da aquisição dum gravador magnético de FM.



As razões que aconselhavam esta medida ficaram tão patentes ao longo deste capítulo que bastará referir aqui, apenas, uma outra utilização (\*) ainda não citada: referimo-nos à possibilidade - oferecida por alguns destes aparelhos - de introdução do atraso temporal, no estudo da correlação de sinais, técnica esta que está, actualmente, posta de parte, por motivos óbvios.

#### 4.13.3 - Em relação às vias de análise das flutuações de pressão

##### 4.13.3.1 - No domínio das amplitudes

Como se viu, existem várias vias para o estudo das flutuações de pressão no domínio das amplitudes.

Poderemos, no entanto, destacar como mais importantes, na prática:

- a via correlador; e
- a via analisador de Fourier.

Recorrendo-se à utilização dum gravador analógico de FM podem ainda utilizar-se:

- a via computador; e
- o voltímetro de valor eficaz.

No entanto, e uma vez que se verificou, pelos estudos efectuados neste domínio, que as flutuações de pressão apresentam curvas de densidade de probabilidade que podem, para efeitos práticos, serem consideradas como normais, julgamos que esta última via (gravador analógico de FM + voltímetro de valor eficaz (\*\*)) é suficiente para garantir a viabilidade destes estudos, como se pode verificar pela observação do Quadro 5.3, onde se com-

---

(\*)-além da sua utilização nos ensaios em protótipos, como é óbvio.

(\*\*)-existe no S.H., como se disse, aparelhagem deste tipo.

param os valores do desvio padrão obtidos por esta via e pela do correlador.

Esta parece-nos ser, pois, uma conclusão de grande interesse prático.

#### 4.13.3.2 - No domínio das frequências

Quando se iniciaram estes estudos era muito limitada a experiência existente neste campo.

Por isso julgou-se fundamental realizar um estudo sobre as potencialidades oferecidas, neste domínio, pelas vias de análise existentes, com o objectivo de verificar se a análise espectral que elas permitem podia ser encarada como uma técnica de ensaio eficaz.

Para isso seria necessário que as respectivas estimas:

- apresentassem boa estabilidade e resolução;
- permitissem a análise em toda a gama de frequências do sinal; e
- pudessem ser obtidas duma maneira rápida, cómoda e económica.

Com a finalidade da concretização deste estudo, foi seleccionado um ensaio que permitiu a determinação de estimas obtidas por intermédio das principais vias disponíveis:

- analisador de onda;
- analisador panorâmico;
- analisador de Fourier; e
- computador.

Os espectros obtidos estão representados nas figuras 4.6 a 4.13 e na fotografia 4.6 e por eles se pode observar uma "boa concordância" das estimas.

Dado terem-se já salientado as vantagens e inconvenientes de cada uma

destas vias (4.6 a 4.12) julgamos ser de referir aqui, apenas, as principais conclusões a que se chegou com a realização deste estudo:

1 - a da importância da utilização dum gravador magnético de FM na análise espectral das flutuações turbulentas de pressão;

2 - a da inegável vantagem do analisador de Fourier, em relação a to das as restantes vias consideradas <sup>(\*)</sup>;

3 - a da possibilidade de utilização do analisador de Fourier como verdadeira "ferramenta de trabalho" no estudo das flutuações turbulentas de pressão; e

4 - a da viabilidade de utilização prática - embora para fins qualitativos - do sistema analisador panorâmico + gravador magnético de FM.

---

(\*) - analisador de onda; analisador panorâmico e computador.

## CAPÍTULO 5

### REALIZAÇÕES EXPERIMENTAIS

#### 5.1 - Generalidades

Um dos primeiros problemas que tivémos de resolver - a par dos que resultaram do estudo sobre a aparelhagem de detecção, de registo e de análise das flutuações turbulentas de pressão - foi o do local onde poderia ser construída uma instalação experimental que possibilitasse a realização dos ensaios.

Embora não tenha sido tarefa fácil, encontrou-se, finalmente, uma zona (\*) que, pela sua extensão, permitiu a construção da instalação projectada (Fig. 3.1 e Fot. 3.1).

No entanto, e para que ela viesse a funcionar, houve necessidade de providenciar (\*\*) no sentido de garantir o fornecimento de energia eléctrica ao local, e de verificar as possibilidades de construção do convergente que antecede o escoamento com superfície livre, dado não ser viável - por razões económicas - a sua construção em latão.

Dada a importância de que se revestia este último problema como consequência da necessidade de garantir um bom escoamento no canal, foi realizado um estudo prévio da viabilidade da sua construção em betão, tendo sido, para o efeito, executados convergentes (\*\*\*) à escala reduzida (Fot. 5.1 a 5.3), que conduziram à solução final (Fot. 5.4 a 5.6) cuja definição geométrica se encontra dada na Figura 3.8.

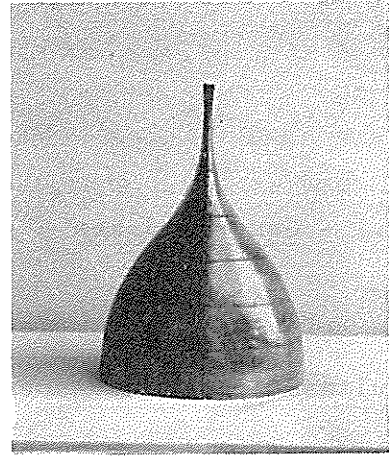
---

(\*) - aproveitamos para agradecer à DET do S.H. - na pessoa do seu Chefe - as facilidades concedidas.

(\*\*)- agradecemos o trabalho realizado pelo Eng<sup>o</sup> Elect. Dias Ferreira - e na sua pessoa os restantes elementos da equipa de trabalho - na resolução deste problema que poderia parecer, à primeira vista, de somente importância, mas que a simples consulta da Fotografia 3.2 pode rectificar.

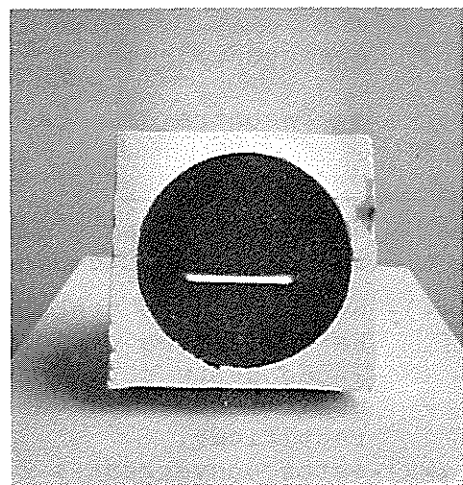
(\*\*\*)-estes convergentes foram feitos em gesso. Para o bom êxito destes estudos muito contribuiu o trabalho do modelador especializado Jaime Dias Custódio, a quem apresentamos o nosso agradecimento.

Fot.5.1 - Pormenor do molde utilizado nos estudos prévios para a definição do convergente

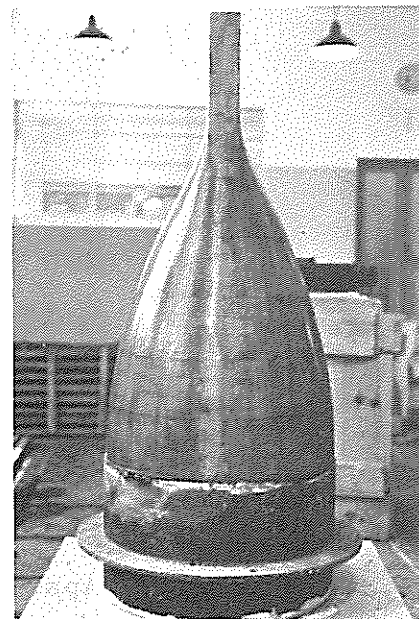


Fot.5.2 - Pormenor do molde utilizado nos estudos prévios para a definição do convergente

Fot.5.3 - Convergente experimental realizado à escala aproximada de 1:4



Fot.5.4 - Pormenor do molde do convergente instalado no dispositivo de ensaios



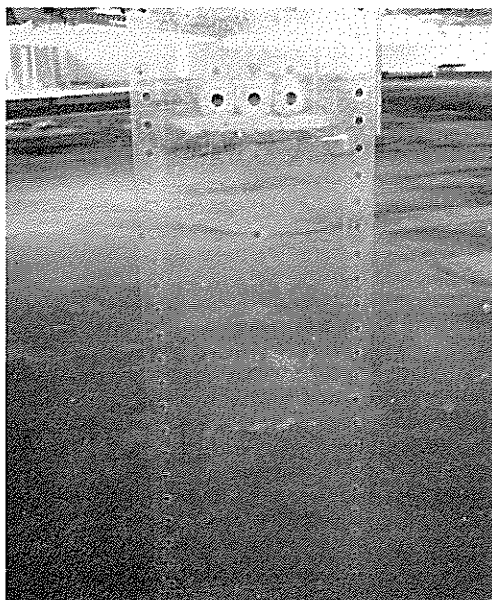
Fot.5.5 - Pormenor do molde do convergente instalado no dispositivo de ensaios

Fot.5.6 - Bloco de betão que integra o convergente

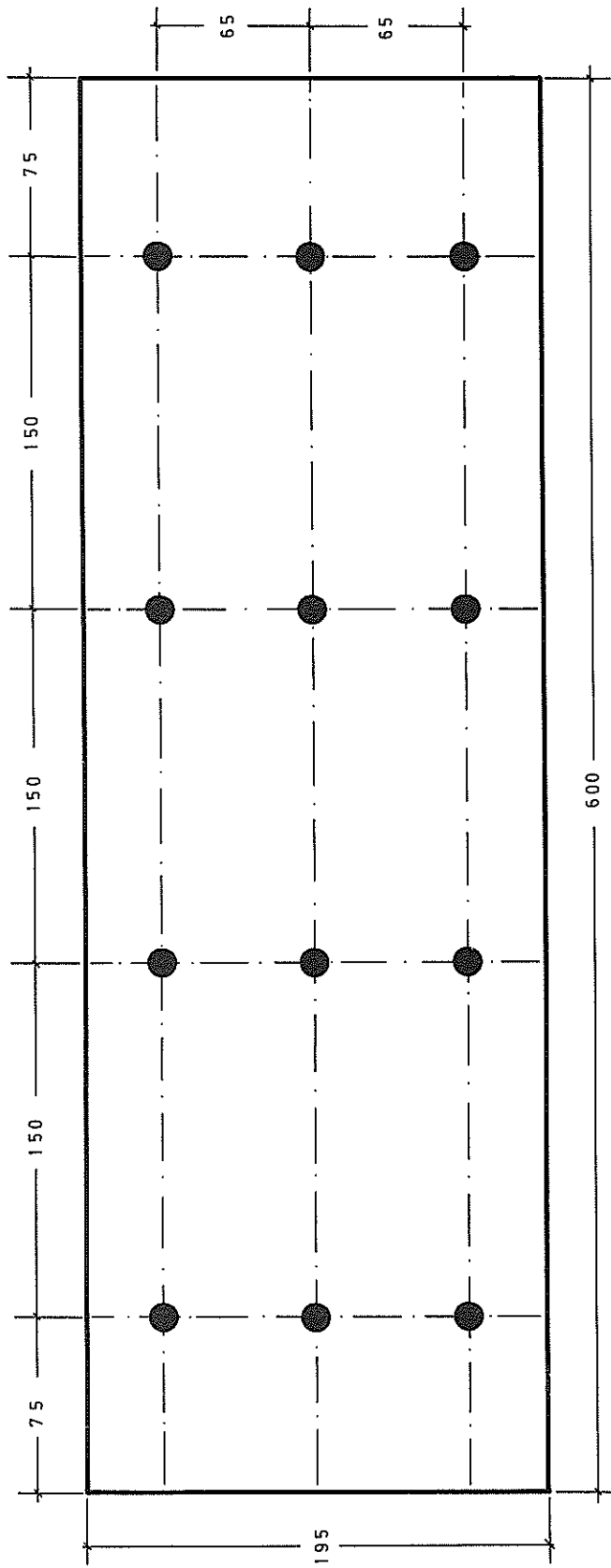




Fot.5.7 - Aparelhagem utilizada nos ensaios pr̃evios



Fot.5.8 - Placa de "plexiglas", de 10 mm de espessura, utilizada nos ensaios pr̃evios



ESCALA: 1/3

● — TRANSDUTORES

Fig. 5.1-Localização prevista para os transdutores,  
nos escoamentos em pressão



## 5.2 - Realização de ensaios preliminares no canal (escoamentos com superfície livre)

Paralelamente com a construção da instalação experimental e o fornecimento de energia eléctrica, foram realizados estudos para a criação de adaptadores para os transdutores de pressão que iam ser utilizados nos escoamentos com superfície livre e em pressão.

Nas Figuras 5.3 e 5.4 apresentam-se os desenhos (\*) correspondentes aos dispositivos de fixação dos transdutores capacitivos SOUTHERN, que foi preciso mandar executar (\*\*) para possibilitar a sua colocação nas lages de betão e, ainda, para garantir a constância do aperto destes transdutores, ao longo dos ensaios.

Inicialmente, tentou-se a técnica de calibração no local destes transdutores (Fot. 5.14) que se mostrou, no entanto, pouco viável, dadas as características destes transdutores e as necessidades dos ensaios.

Por isso, teve que pensar-se na construção de dispositivos que permitissem a sua calibração em melhores condições (Fot. 5.15 a 5.17).

Com o objectivo de verificar as condições de escoamento no canal, foram realizados alguns ensaios que permitiram verificar a dificuldade da conservação do betão da "aresta" superior da secção de saída do convergente, o que criava irregularidades na superfície livre do escoamento.

Este problema resolveu-se pelo prolongamento do convergente, conseguido pela colocação duma placa de latão idêntica às utilizadas nos descarregadores Bazin.

---

(\*) - aproveitamos para agradecer o notável trabalho realizado pelo ajudante de experimentador Luís Alberto Ferreira. Em particular, é de sua autoria uma grande parte dos desenhos apresentados.

(\*\*)- agradecemos - na pessoa de seus Chefes - a todo o pessoal das oficinas de mecânica que tornou possível - apesar das dificuldades resultantes da mudança de instalações - a concretização dos dispositivos de que iremos falar ao longo deste capítulo.

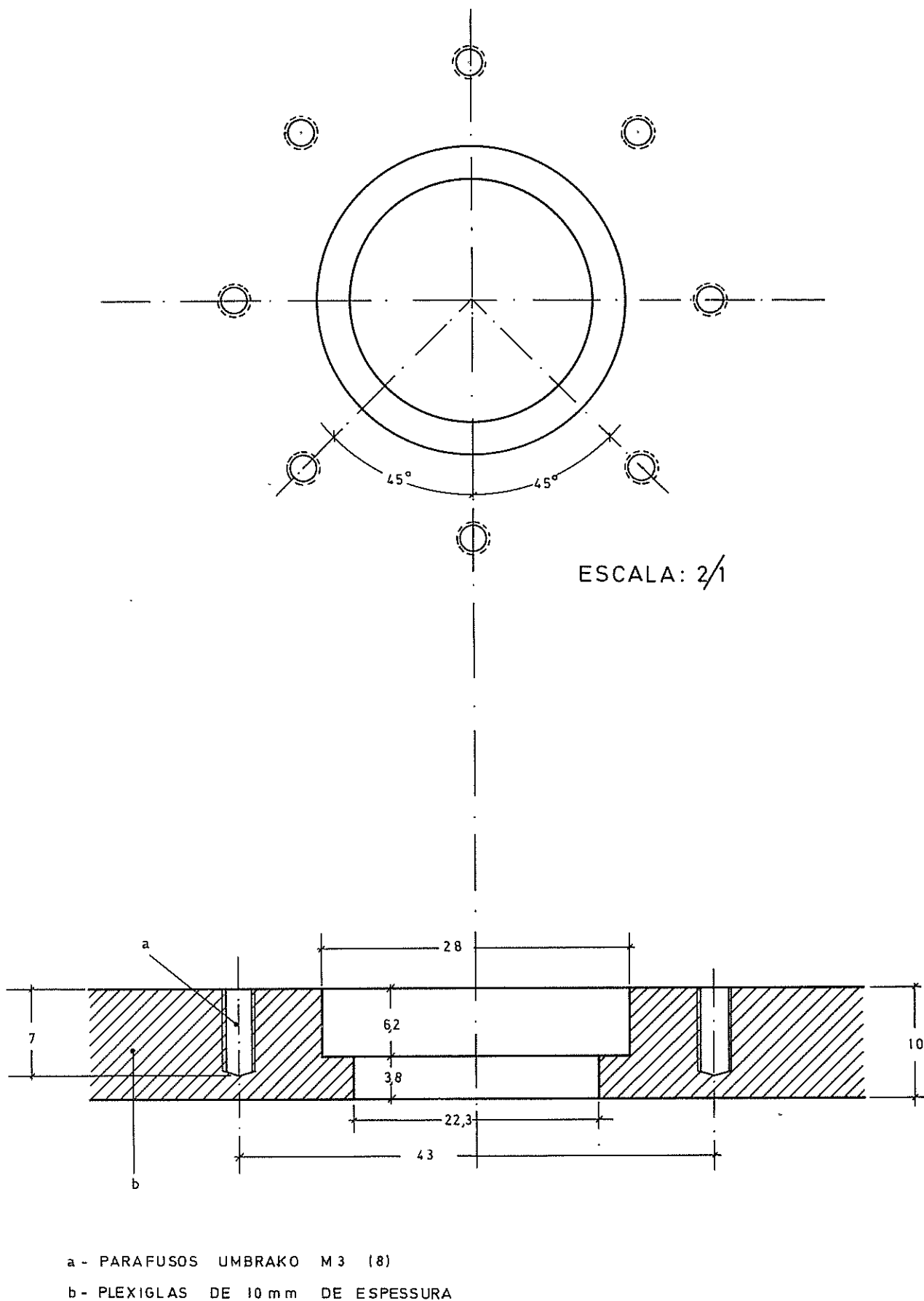
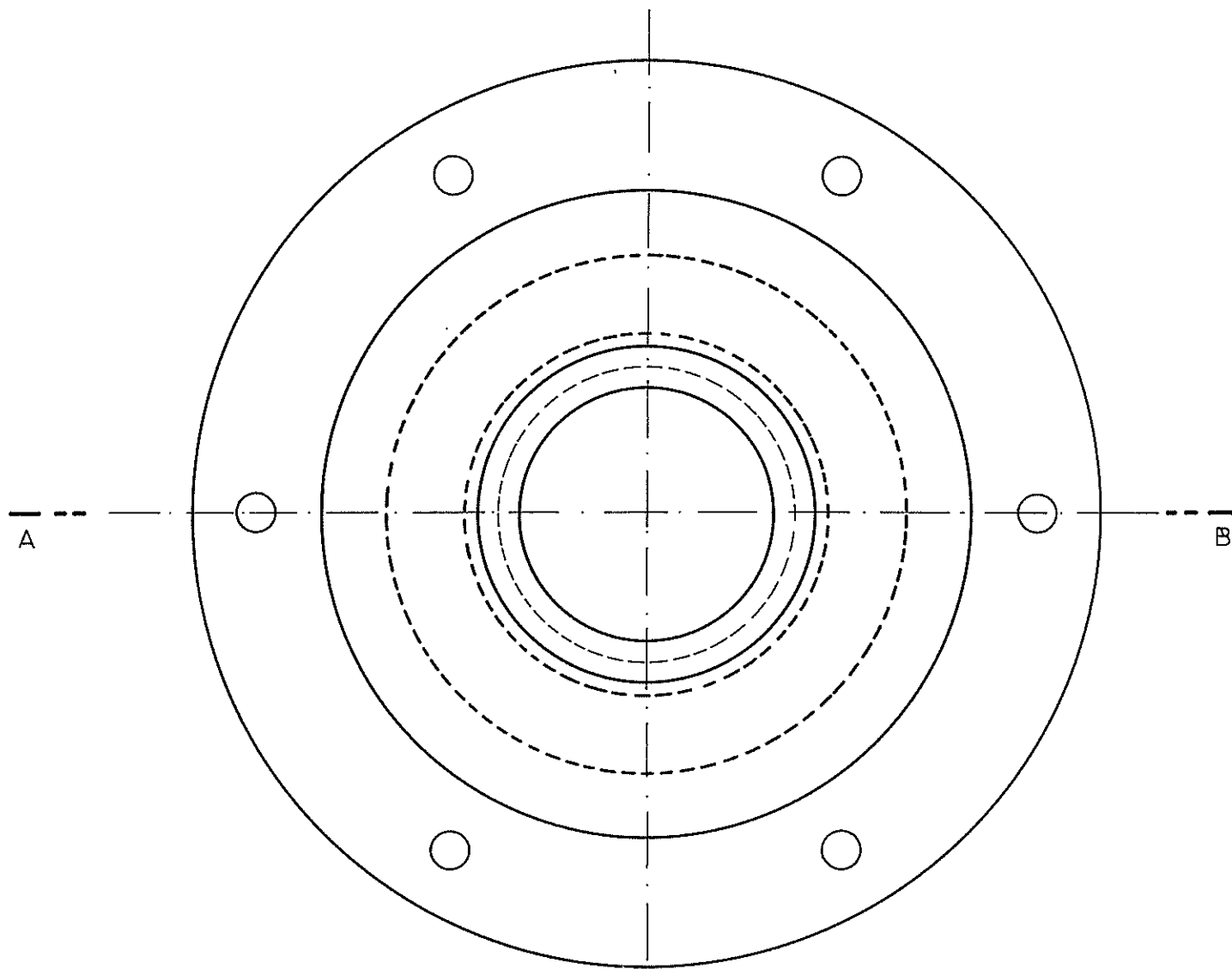
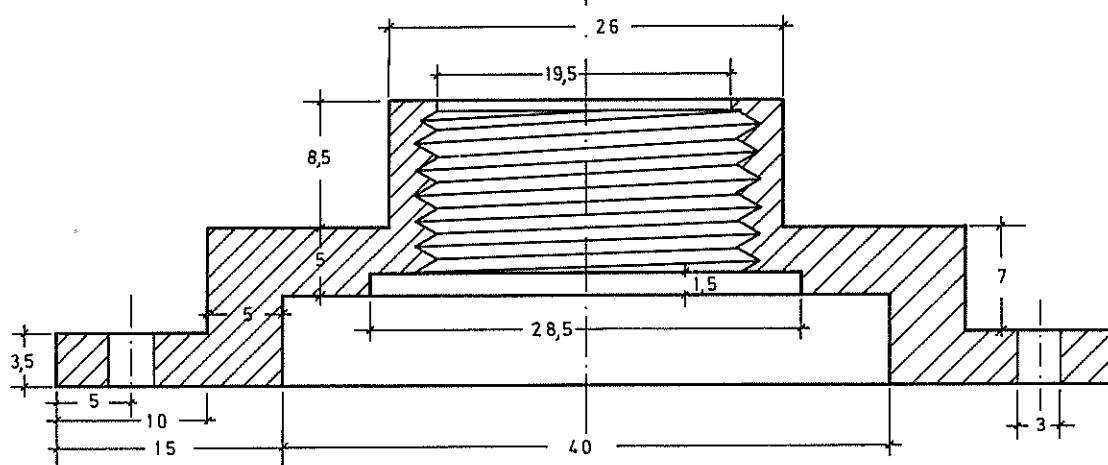


Fig.5.2-Furação das placas de "plexiglas" de 1cm de espessura para colocação dos respectivos transdutores

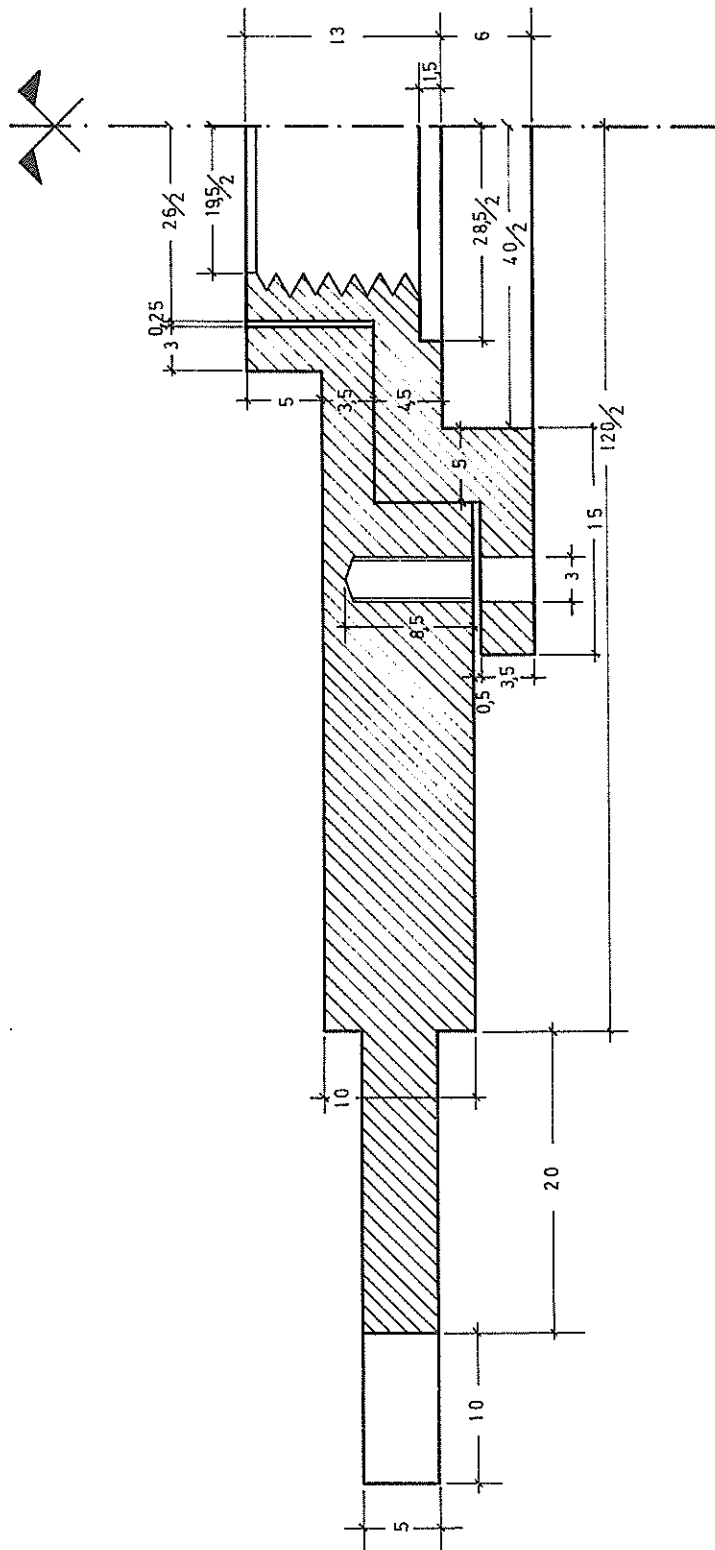


ESCALA: 2/1



CORTE A-B

Fig.5.3-Dispositivo de fixação dos transdutores capacitivos



ESCALA: 2/1

Fig. 5.4-Conjunto dos dispositivos de fixação dos transdutores de capacidade ao betão

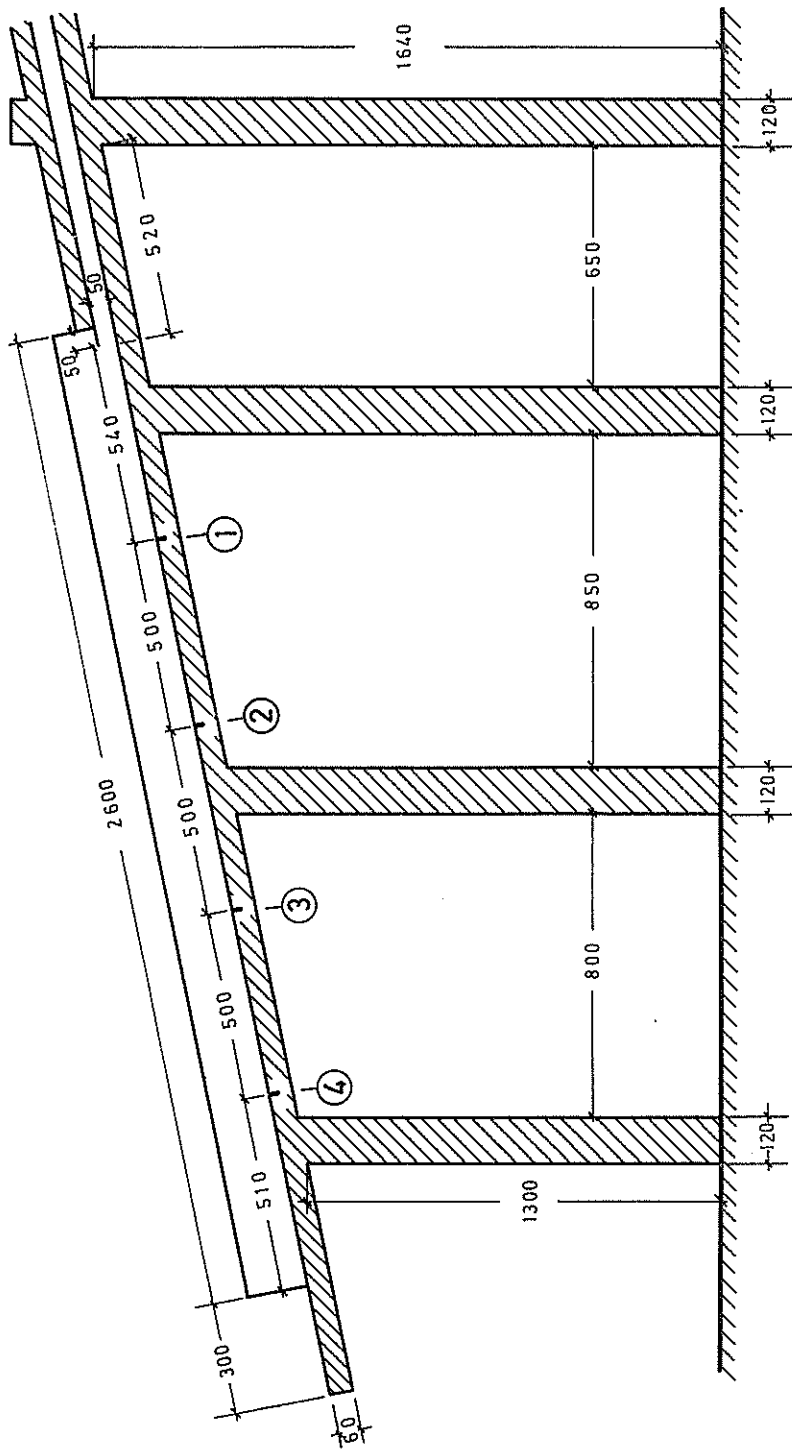


Fig. 5.5- Escoamentos com superfície livre. Localização dos transdutores

### 5.3 - Realização de ensaios preliminares na câmara (escoamentos em pressão)

Com o objectivo de verificar as condições de escoamento na câmara de ensaios, foram realizados ensaios preliminares para os quais foi utilizada uma placa de "perspex" de 10 mm de espessura (Fot. 5.8).

Embora o número de aberturas previsto (Fig. 5.2) para a colocação dos transdutores de extensómetros de resistência CEC (Fot. 4.2) fosse a indicada na Fig. 5.1, só foi possível conseguir-se a furação do conjunto de três dessas aberturas (Fot. 5.8).

Estes ensaios foram muito úteis, dado terem permitido verificar, como se referiu já em 4.9.2, que o escoamento, na câmara de ensaios, podia ser considerado como perfeitamente bidimensional na zona de colocação dos transdutores.

Deste modo, pôde-se mandar executar a furação nas placas de "plexiglas" de 50 mm nas condições indicadas nas Figuras 3.3 a 3.7.

### 5.4 - Problemas relacionados com as rugosidades das superfícies sólidas em contacto com os escoamentos

#### 5.4.1 - Generalidades

Como se sabe, o escoamento dum fluído, na zona de influência dos contornos sólidos, realiza-se em camada limite que, nos casos que interessa considerar na prática, apresenta características turbulentas.

Sendo assim, junto das superfícies em contacto com os escoamentos instala-se um acentuado gradiente transversal de velocidades, como consequência da existência duma "película" laminar, de reduzidas dimensões, que realiza a transição entre a velocidade de escoamento nula, na parede, e a velocidade correspondente ao "início" da camada limite turbulenta.

A consideração de um "início" para a camada limite turbulenta resulta, a-  
penas, de um juízo hipotético.

Com efeito, considera-se que é a intersecção da recta de distribuição de  
velocidades nessa "película" laminar com a curva representativa da lei de dis-  
tribuição de velocidades da camada limite turbulenta que define os limites en-  
tre aqueles dois regimes de escoamento.

Ora, na realidade (172), o que se passa é uma transição gradual, mas es-  
ta hipótese teórica tem pelo menos a vantagem de permitir definir a espessura  
da "película" laminar com a distância  $\delta_0$  daquele ponto ao contorno sólido em  
contacto com o escoamento.

E uma vez definido o conceito de espessura da "película" laminar, poderá  
estabelecer-se também, e duma forma mais significativa, o conceito de rugosi-  
dade de uma superfície, encarado dum ponto de vista hidráulico.

Assim, se representarmos por  $K$  a altura duma saliência existente na su-  
perfície, parece imediata a consideração do parâmetro adimensional:

$$\left\{ \frac{K}{\delta_0} \right.$$

como um critério para a avaliação da influência exercida sobre o escoamento pe-  
la saliência.

Com efeito, se:

$$\frac{K}{\delta_0} \ll 1$$

a saliência estará como que "mergulhada" na "película" laminar e a sua influ-  
ência não se fará sentir.

Pelo contrário, se:

$$\frac{K}{\delta_0} \gg 1$$

a saliência "rompe" a "película" laminar e irá exercer a sua influência sobre  
o escoamento.

E o que se acabou de dizer para uma saliência, pode, naturalmente, ser extrapolado para o caso da rugosidade estar distribuída ao longo da superfície, embora surja, aqui, o problema de saber qual o valor de K que poderá definir melhor este tipo de rugosidade.

Poder-se-ia, por exemplo, tentar uma definição de K baseada em considerações estatísticas, mas, normalmente, o que acontece, na prática, é procurar estabelecer-se a equivalência entre a rugosidade em estudo e a utilizada por NIKURADSE, nos seus notáveis trabalhos experimentais.

Surge, deste modo, o conceito de "rugosidade equivalente de NIKURADSE"  $K_S$ .

E porque a maioria dos estudos realizados se baseia neste critério poderemos considerar como parâmetro que melhor permite caracterizar a influência destes tipos de rugosidade, o número de Reynolds "rugoso"  $R_{K_S}$  definido como:

$$R_{K_S} = \frac{K_S u_w}{\nu} \dots \dots \dots (5.1)$$

em que:

- $K_S$  = rugosidade equivalente de NIKURADSE;
- $u_w$  = velocidade de atrito; e
- $\nu$  = viscosidade cinemática,

que possibilita o estabelecimento da separação entre os três regimes hidráulicos, normalmente aceites (172) no caso de superfícies rugosas:

- regime hidraulicamente liso, quando;

$$0 \ll R_{K_S} \ll 5 \dots \dots \dots (5.2)$$

- regime de transição, para:

$$5 \ll R_{K_S} \ll 70 \dots \dots \dots (5.3)$$



- regime completamente rugoso, a partir dum valor:

$$R_{K_S} > 70 \dots\dots\dots (5.4)$$

A lei de distribuição de velocidade na camada limite será, nestes casos, dada pela expressão:

$$\frac{\bar{U}_y}{\mu_*} = 5,75 \log \frac{y}{K_S} + B \dots (5.5)$$

em que:

$\bar{U}_y$  = velocidade média na camada limite à distância y da superfície, e

$$B = f(R_{K_S}).$$

Este valor de B dependerá do regime hidráulico considerado.

Assim:

- para:  $R_{K_S} < 5$ , podemos escrever

$$B = 5,5 + 5,75 \log \frac{K_S \mu_*}{\nu}; \dots\dots (5.6)$$

- para:  $5 \ll R_{K_S} \ll 70$ ,

B : terá que ser obtido a partir, por exemplo, da Fig. 20.21 da publicação (172); e

- para:

$$R_{K_S} > 70$$

teremos

$$B = 8,5,$$

e, conseqüentemente:

$$\frac{\bar{U}_y}{\mu_*} = 5,75 \log \frac{y}{K_S} + 8,5 \dots\dots\dots (5.7)$$

A partir da determinação das velocidades  $U_{\underline{y_1}}$  e  $U_{\underline{y_2}}$  em dois pontos da

camada limite, é possível (1) determinar os valores de  $\underline{u}_*$  e de  $\underline{K}_S$ , pelas expressões:

$$\underline{u}_* = \frac{\bar{U}_{y_2} - \bar{U}_{y_1}}{5,75 \log \frac{y_2}{y_1}} \dots \dots \dots (5.8)$$

$$\log K_S = \log y_1 - 0,174 \frac{\bar{U}_{y_1}}{\underline{u}_*} + \frac{B}{5,75} \dots (5.9)$$

Pensamos, no entanto, que a determinação da "rugosidade equivalente de NIKURADSE" só terá interesse se as rugosidades em estudo puderem ser consideradas como distribuídas (\*) ao longo das superfícies em contacto com os escoamentos.

Por isso, nos nossos estudos, apenas iremos considerar (\*\*) o caso de rugosidades - bi e tridimensionais - nessas condições.

Outro problema que surge como resultado das superfícies não serem lisas é o da imprecisão das leituras de  $\underline{y}_1$ , particularmente no caso dos regimes completamente rugosos, que apresentam uma lei de distribuição de velocidades dada pela expressão 5.7.

Assim, quando se pretendam medir velocidades na respectiva camada limite turbulenta, haverá necessidade de entrar em linha de conta com este factor, como muito bem foi salientado, entre outros, por MAGGIOLO, GUARGA e BORGHI (130).

Dado não haver possibilidade de medição de velocidades na camada limite (\*\*\*) e para além das dificuldades - de que falaremos a seguir - de realização prática, o problema que mais nos preocupou foi o de saber qual o plano - em relação a altura das rugosidades - mais conveniente para si-

(\*) - com uma certa uniformidade.

(\*\*) - dentro da programação actual. É evidente que o estudo para os casos de rugosidades isoladas tem muito interesse mas, deve ser feito, a nosso ver, depois deste.

(\*\*\*) - entre outros motivos, pela impossibilidade de calibração da aparelhagem - aliás inexistente - necessária para o efeito.

tuar a membrana dos transdutores.

Por razões essencialmente de ordem construtiva, a solução que se julgou mais conveniente tomar em relação aos ensaios de pressão foi a da colocação (Fig. 3.3. a 3.7) dessa membrana no plano superior da "rugosidade".

No parágrafo 5.4.3.2 abordaremos o caso da colocação dos transdutores nas lages de "betão" utilizados em escoamentos com superfície livre.

Julgamos, ainda, conveniente - dado que iremos mais adiante (5.5.1) fazer uma aplicação prática - tratar, aqui, da definição das espessuras características da camada limite.

Como se sabe, a zona do fluido que sofre a influência retardadora dos contornos sólidos em contacto com o escoamento é designada, normalmente, por camada limite. Dada a imprecisão deste conceito, não se torna muito fácil uma definição da sua espessura. Daí, talvez, a designação de espessura "nominal" da camada limite.

Com efeito, aquela acção retardadora vai-se fazendo sentir cada vez com menor intensidade à medida que nos afastamos da fronteira e, consequentemente, a velocidade que pode observar-se vai tendendo para a do escoamento "no infinito".

Daí as dificuldades de definição encontradas e que são, em certa medida, vencidas pela consideração dessa espessura "nominal" da camada limite,  $\delta$ , que corresponde à distância do contorno sólido ao seu bordo "exterior", definido este como o lugar geométrico dos pontos onde a velocidade atinge o valor de:

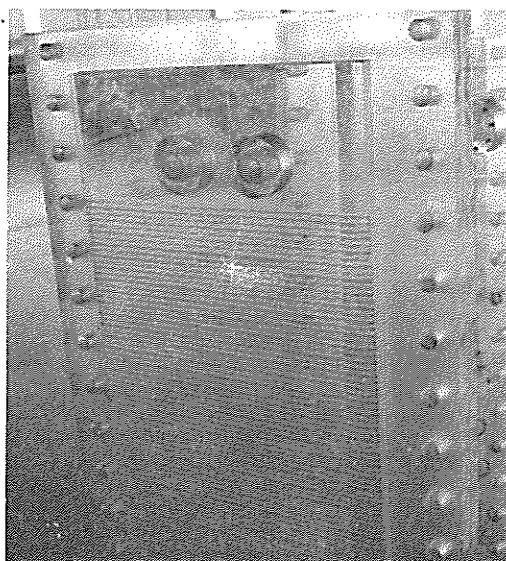
$$0,99 \bar{U}_{\infty}$$

Espessuras com maior sentido físico são, certamente, as seguintes:

- espessura de deslocamento  $\delta_u$ .



Fot.5.9 - Placas de "plexiglas", de 50 mm de espessura, utilizadas nos ensaios



Fot.5.10 - Pormenor da placa de "plexiglas" de 50 mm de espessura (rugosidade K11)

$$\delta_* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}}\right) dy \approx \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}}\right) dy \dots (5.10)$$

Esta espessura representa o deslocamento que seria necessário dar ao contorno sólido para que se realizasse um escoamento teórico, irrotacional, de velocidade  $\bar{u}_{\infty}$  e transportando o mesmo caudal do escoamento real.

Esta espessura é muito utilizada - como vimos já e iremos ainda ver - no estabelecimento de parâmetros adimensionais, devido ao seu significado físico e ainda pelo facto de, ao contrário do que acontece com  $\delta$ , a determinação do seu valor numérico estar menos sujeita a variação;

- espessura de quantidade de movimento  $\delta_2$

$$\delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}} \left(1 - \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}}\right) dy \approx \int_0^{\delta} \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}} \left(1 - \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}}\right) dy. (5.11)$$

Esta espessura de quantidade de movimento  $\delta_2$  pode, pois, definir-se como a altura duma camada do fluido animada duma velocidade uniforme  $\bar{u}_{\infty}$  para a qual o fluxo da quantidade de movimento  $\rho \bar{u}_{\infty}^2 \delta_2$  fosse igual ao já perdido pelo escoamento real;

- espessura de energia  $\delta_3$

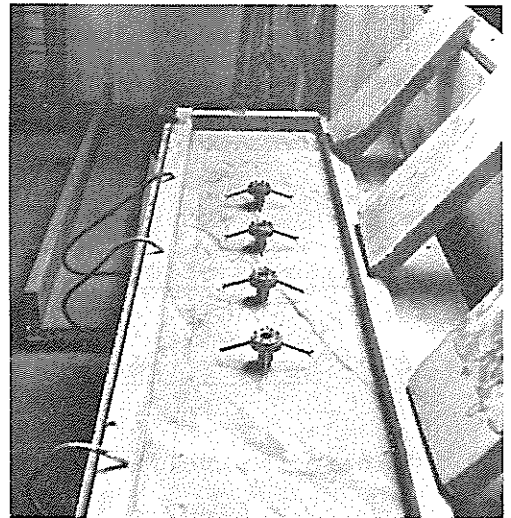
$$\delta_3 = \int_0^{\infty} \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}} \left(1 - \frac{\bar{u}_y^2}{\bar{u}_{\infty}^2}\right) dy \approx \int_0^{\delta} \frac{\bar{u}_y}{\bar{u}_{\infty}} \left(1 - \frac{\bar{u}_y^2}{\bar{u}_{\infty}^2}\right) dy \dots (5.12)$$

Esta espessura de energia  $\delta_3$  pode definir-se, duma forma análoga à anterior, como a altura duma camada do fluido - animada duma velocidade uniforme  $\bar{u}_{\infty}$  - para a qual o fluxo de energia  $\rho \bar{u}_{\infty}^3 \delta_3$  fosse igual ao já perdido pelo escoamento real.

#### 5.4.2 - Caso de escoamentos em pressão

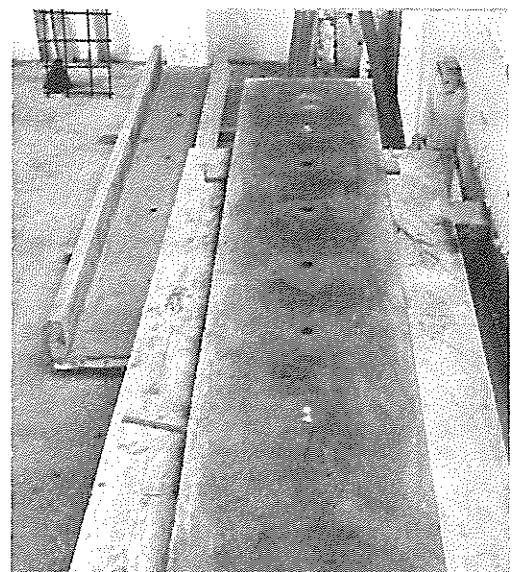
Inicialmente pensava estabelecer-se uma rugosidade do tipo "dente de serra", idêntica à utilizada por ARNDT e IPPEN (13) nos seus ensaios.

Fot.5.11 - Fase da construção das placas de betão (escoamentos com superfície livre)



Fot.5.12 - Placa de betão já concluída (vista de baixo)

Fot.5.13 - Placa de betão já concluída (vista de cima)



No entanto, e por motivos construtivos, não foi possível a sua concretização e, em sua substituição, escolheu-se, então, a indicada nas Figuras 3.4 a 3.7.

#### 5.4.3 - Caso de escoamentos com superfície livre

##### 5.4.3.1 - Estudos prévios

Não foi muito fácil a resolução do problema da escolha do tipo de rugosidade a utilizar nas lages de betão.

Dado o tipo de ensaios que se pretendia efectuar e a inexistência de aparelhagem que possibilitasse a medição das velocidades na camada limite turbulenta, resolveu-se utilizar uma rugosidade, geometricamente bem definida, e uniformemente distribuída pela superfície de betão.

Para tal pensou-se na utilização de placas rugosas de 3 mm de espessura, feitas dum material plástico, e que seriam coladas ao betão.

Através dos ensaios realizados (\*) concluiu-se não ser viável esta técnica que foi, por isso, abandonada.

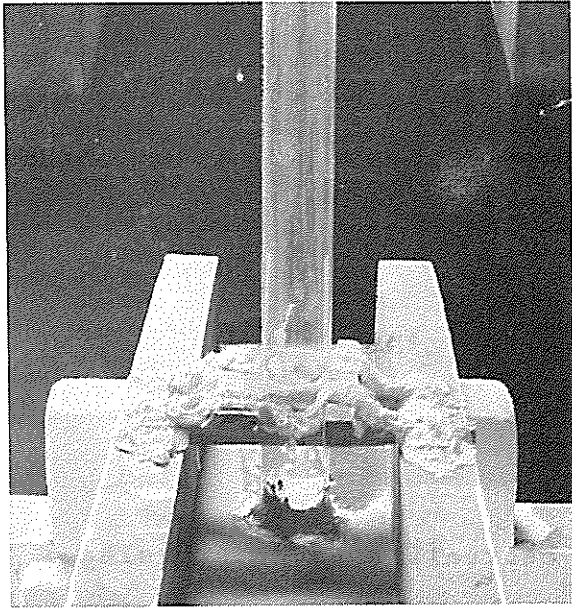
##### 5.4.3.2 - Solução final

Dado não ter sido possível a utilização da técnica de ensaio que estava prevista de início, houve que pensar noutros processos, capazes de resolver o problema.

Assim surgiu a ideia de aproveitar as placas rugosas já existentes para moldar, directamente sobre elas, as placas de betão.

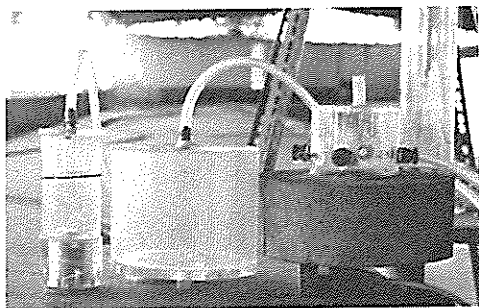
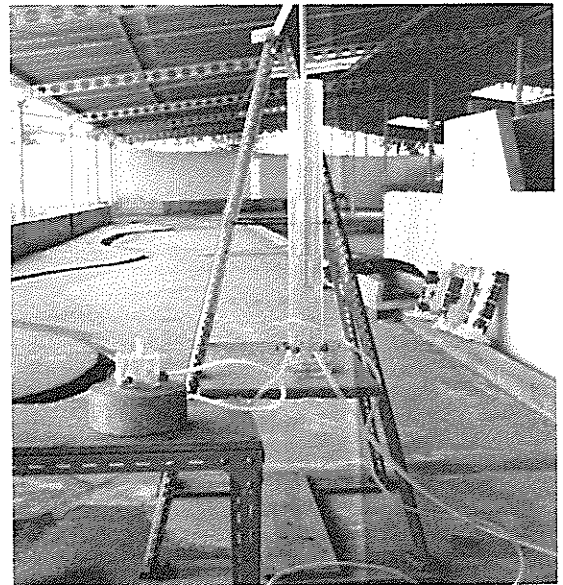
---

(\*) - aproveitamos para agradecer ao Eng<sup>o</sup>. António Correia Ramalho a colaboração dada neste estudo e ainda os realizados na câmara de ensaios.



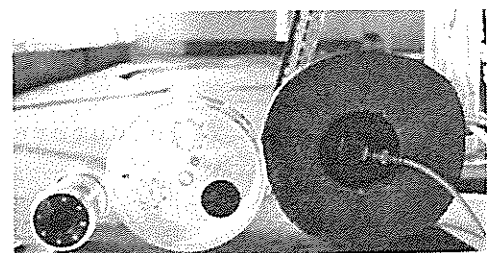
Fot.5.14 - Sistema inicial de calibração dos transdutores capacitivos

Fot.5.15 - Dispositivo de calibração dos transdutores

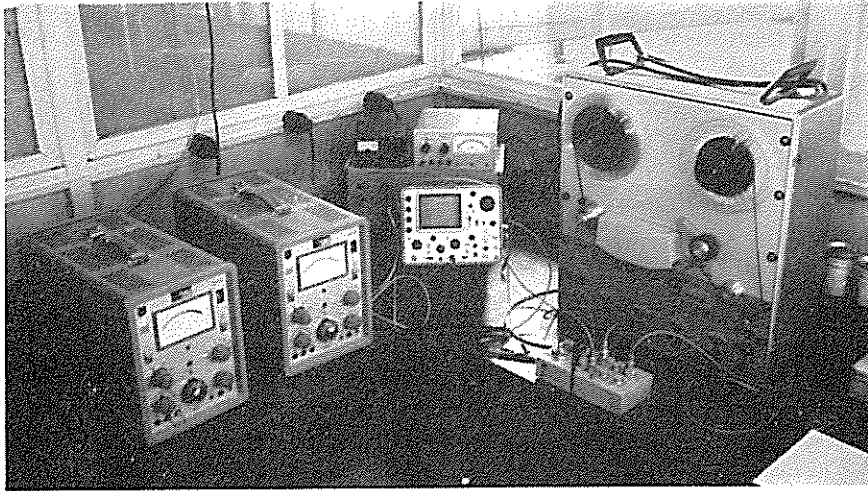


Fot.5.16 - Câmaras de calibração dos transdutores (vista de lado)

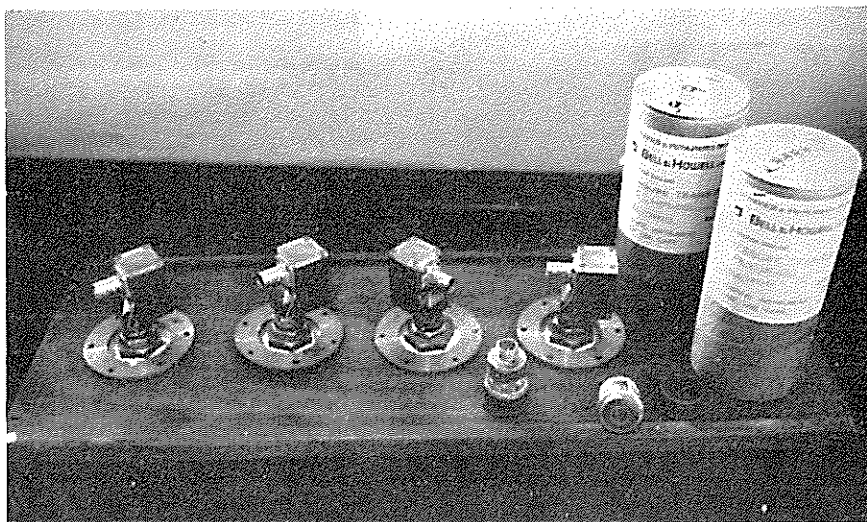
Fot.5.17 - Câmaras de calibração dos transdutores (vista da zona de colocação dos transdutores)



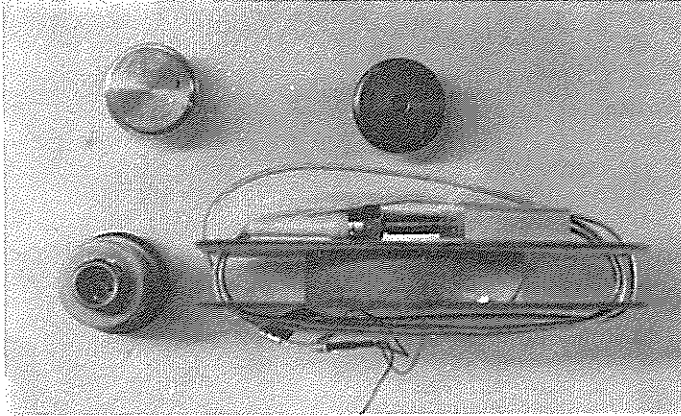




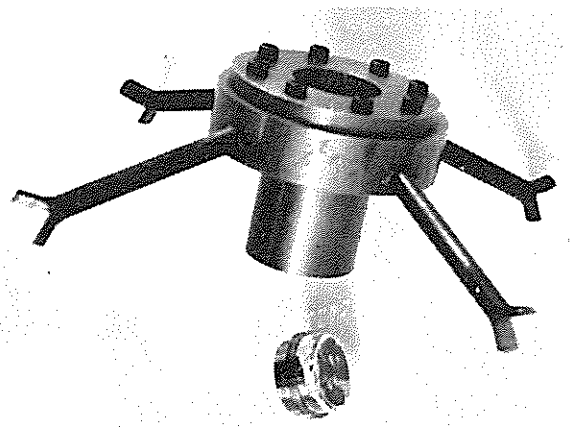
Fot.5.18 - Gabina de observação e de centralização da aparelhagem electrónica de registo



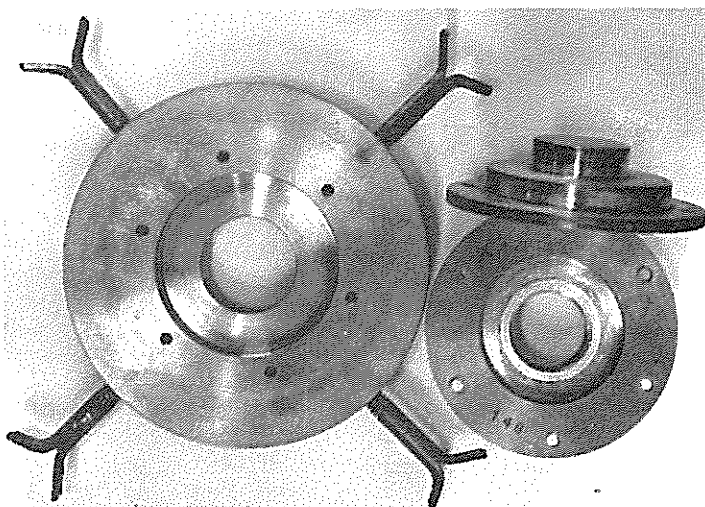
Fot.5.19 - Transdutores utilizados nesta 1ª fase dos estudos



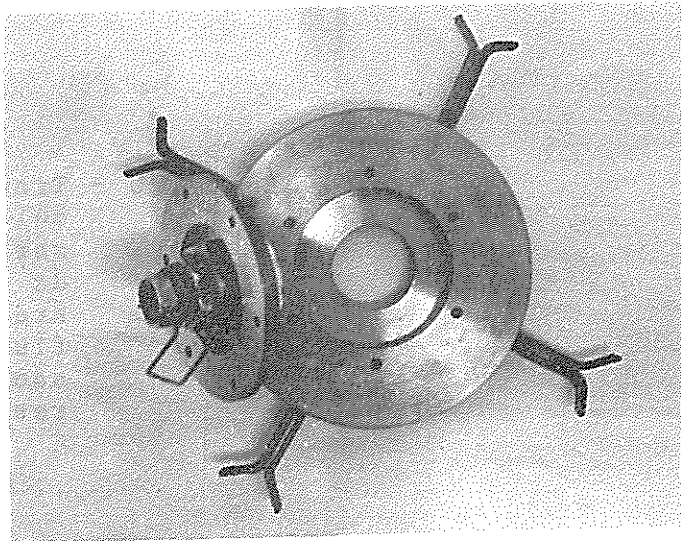
Fot.5.20 - Transdutores "simulados" a utilizar nos estudos da influência da área, sensível às flutuações de pressão, dos transdutores



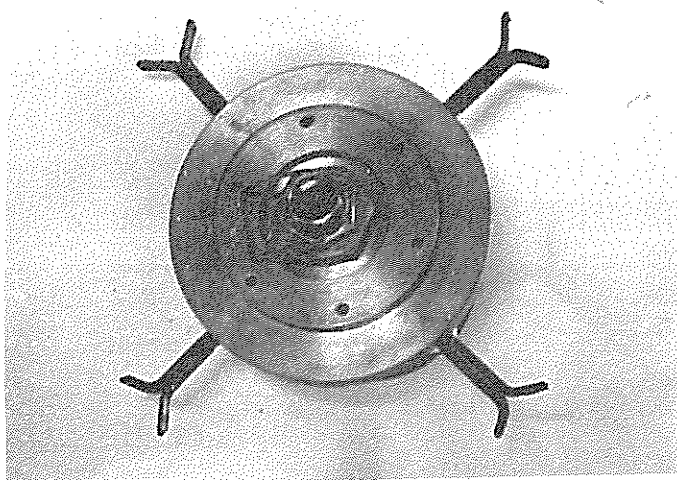
Fot.5.21 - Dispositivos de fixação dos transdutores Bell & Howell às placas de betão



Fot.5.22 - Dispositivos de fixação dos transdutores capacitivos e transdutor "simulado"



Fot.5.23 - Conjunto (separado) formado por um transdutor capacitivo e respectivas peças de adaptação



Fot.5.24 - Conjunto (associado) formado por um transdutor capacitivo e respectivas peças de adaptação

Para averiguar da sua exequibilidade, foram moldadas pequenas lages, tendo-se utilizado os diferentes tipos de rugosidade disponíveis.

Dado que a conclusão a que se chegou foi positiva, tornou-se possível obter, deste modo, lages de betão com rugosidades bi e tridimensionais, capazes de garantir a concretização dos estudos programados neste campo.

Em relação à utilização dos transdutores, e como resultado da experiência obtida já nos ensaios preliminares, pareceu ser conveniente a construção de "transdutores simulados" (Fot. 5.22), que pudessem ser colocados no betão aquando da construção das respectivas lages, permitindo, deste modo, definir, com rigor, a sua posição.

Através das fotografias 5.11 a 5.13 pode verificar-se o processo que foi utilizado, e que julgamos ser suficientemente elucidativo para dispensar qualquer comentário adicional.

## 5.5 - Ensaios realizados no canal (escoamentos com superfície livre)

### 5.5.1 - Considerações prévias

Após os ensaios realizados com o objectivo do afinamento do canal, e que já foram referidos em 5.2, foi possível a realização do estudo que se apresenta a seguir, no qual se utilizou uma lage plana de betão liso.

Os ensaios foram realizados para uma gama de velocidades médias - à saída (\*) do convergente - compreendida entre  $5,09 \text{ m s}^{-1}$  e  $13,26 \text{ m s}^{-1}$ .

Em 5.5.2 ir-se-á tratar, com certo pormenor, dos aspectos relacionados com o registo e análise das flutuações de pressão e por isso, aqui, julgamos ser de referir, apenas, o estudo teórico sobre o desenvolvimento aproximado da camada limite turbulenta, na lage plana de betão liso utilizada nos ensaios.

---

(\*) - com uma secção rectangular de 30 cm x 4 cm.

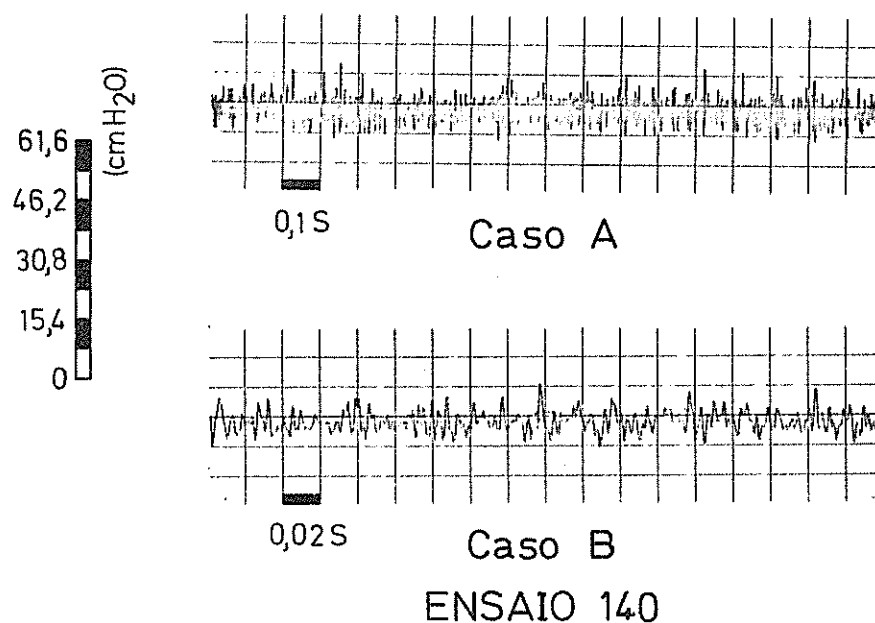
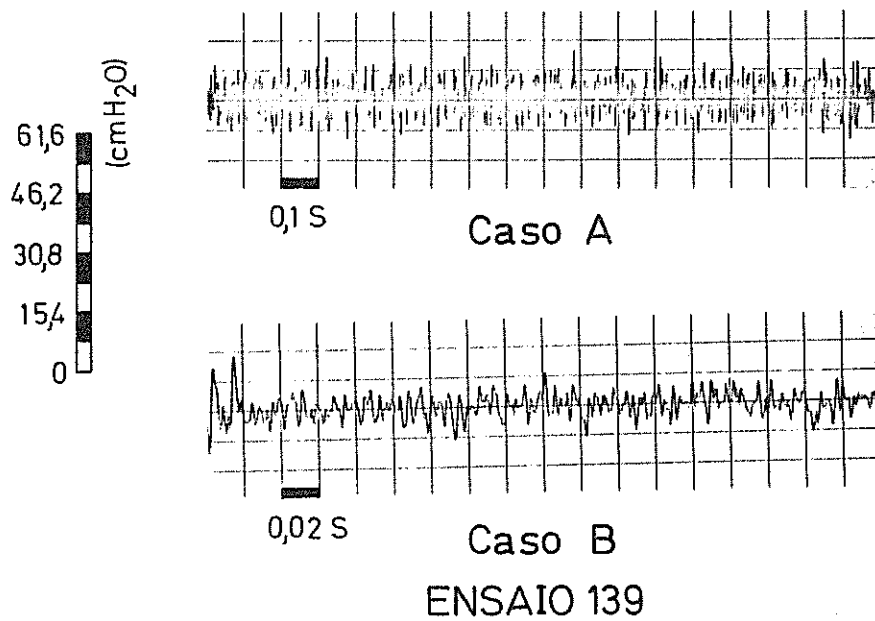


Fig.5.6-Flutuação de pressão na lage de betão liso. Registos no tempo. Transdutor na 4ª posição.

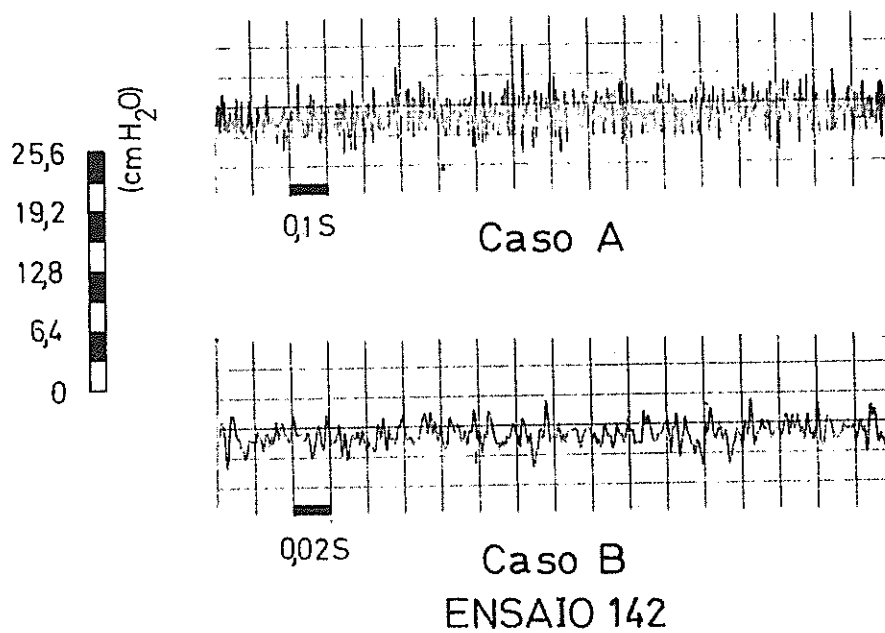
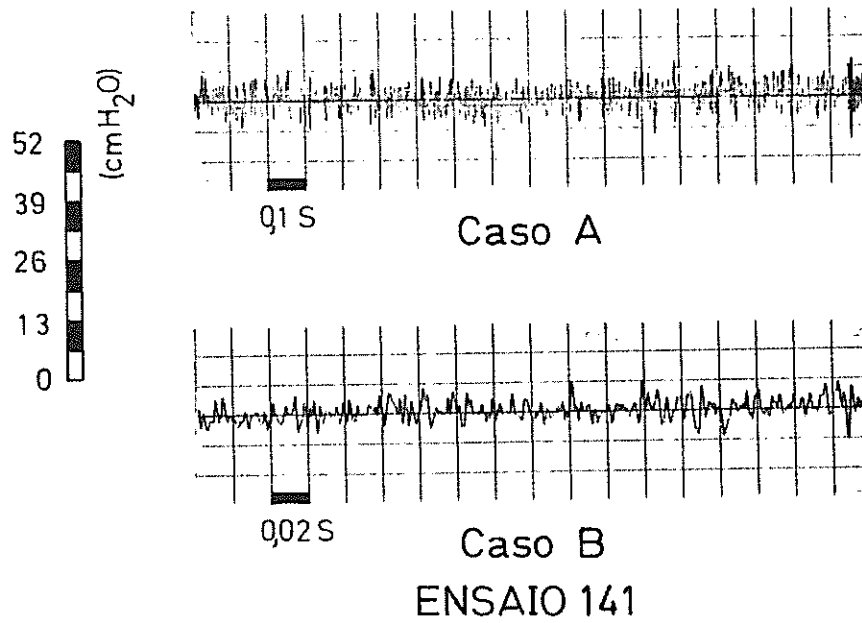


Fig.5.7- Flutuação de pressão na lage de betão liso. Registos no tempo. Transdutor na 4ª posição.

Nele foram utilizadas (120) as fórmulas:

- número de Reynolds "de transição"  $R_t$ :

$$3,5 \times 10^5 < R_t = \frac{\bar{U}_\infty u_t}{\nu} < 10^6 \dots\dots\dots (5.13)$$

- velocidade de atrito  $u_*$ :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \frac{0,172 \bar{U}_\infty}{\sqrt{R_{u}}} \dots\dots\dots (5.14)$$

- espessura da "película" laminar  $\delta_0$ :

$$\delta_0 = 5 \frac{\nu}{u_*} \dots\dots\dots (5.15)$$

- espessura "nominal" da camada limite  $\delta$ :

$$\delta = 0,370 \frac{u}{5 \sqrt{R_u}} \dots\dots\dots (5.16)$$

- espessura de deslocamento  $\delta_*$ :

$$\delta_* = 0,046 \frac{u}{5 \sqrt{R_u}} \dots\dots\dots (5.17)$$

- espessura da quantidade de movimento  $\delta_2$ :

$$\delta_2 = 0,036 \frac{u}{5 \sqrt{R_u}} \dots\dots\dots (5.18)$$

- espessura de energia  $\delta_3$ :

$$\delta_3 = 0,065 \frac{u}{5 \sqrt{R_u}} \dots\dots\dots (5.19)$$

em que:

$x_t$  = distância entre o início da lagem plana de betão liso e a zona de transição entre a camada limite laminar e a camada limite turbulenta;

$x$  = distância ao início da lagem.

Nas Figuras 5.22 a 5.29 apresentam-se as curvas traçadas para o efeito.

Deve notar-se, no entanto, que estas fórmulas são válidas para:

$$10^5 < R_x < 10^7$$

Dado que os valores de R estavam compreendidos entre:

$$9 \times 10^5 < R_x < 5 \times 10^7$$

Isso significa que, para os valores de  $R_x > 10^7$ , os cálculos efectuados conduzem a valores de  $\delta$  por defeito.

No entanto, e dado tratar-se de cálculos aproximados, não se julgou necessário uma maior precisão, até porque isso pouco iria reflectir-se nos valores encontrados para  $\delta_*$ ,  $\delta_2$  e  $\delta_3$ , que são, precisamente, os mais importantes.

No respeitante a  $\mu_*$ , e para valores de  $R_x > 10^7$ , poder-se-ia utilizar a fórmula de SCHULTZ-GRUNOW:

$$\frac{\tau_0}{\rho \bar{u}_\infty^2} = 0,185 (\log R_x)^{-2,58} \dots (5.20)$$

o que daria:

$$\mu_* = \frac{0,43 \bar{u}}{(\log R_x)^{1,29}} \dots \dots \dots (5.21)$$

### 5.5.2 - Estudo das flutuações de pressão em lages planas de betão liso

#### 5.5.2.1 - Estudo das flutuações de pressão no domínio das amplitudes

Nestes ensaios foram utilizados, como se disse, os transdutores capa



citivos existentes na Divisão, da marca SOUTHERN.

A sua localização encontra-se definida na figura 5.5. Por ela se pode ver que o transdutor colocado na 2ª. posição está a 1,04 m do início da lage, enquanto que o da 4ª. posição se encontra a 2,04 metros.

Para o estudo das características estatísticas de pressão interessava a determinação do seu desvio padrão que, como se viu em 4.6, pôde ser realizado através dum voltímetro de valor eficaz e de multiplicação de velocidades de reprodução dos sinais gravados no AMPEX, tipo SP-300, já referido em 4.4.3.

Os valores obtidos pelos transdutores colocados na 2ª. e 4ª. posições encontram-se indicados no quadro 5.2.

Nas figuras 5.6 e 5.7 podem ser observados os registos cronológicos, correspondentes aos ensaios 139 a 142, obtidos pelo registador BRUSH, tipo MARK 260, já referido em 4.4.4.

Os casos A e B diferem apenas na velocidade de papel utilizado para o registo gráfico das respectivas flutuações de pressão. Como se pode observar, o registo A pouca informação fornece, em relação ao B.

#### 5.5.2.2 - Estudo das flutuações de pressão no domínio das frequências

Para a análise dos registos das flutuações de pressão correspondentes ao transdutor colocado na 4ª. posição, foram utilizadas duas vias de análise:

- a do analisador panorâmico; e
- a do analisador de Fourier.

Inicialmente só foi possível contar com a primeira daquelas vias - já descrita em 4.8 - e os respectivos espectros podem ser observados nas fotografias 5.25 a 5.28.

Quadro 5.1-Enscoamentos com superfície livre. Espectros de potência.  
Lage plana de betão liso. Transdutor na 4ª. posição.

Ensaio	Espectro de potência	Número de pontos	Número de médias	Graus de liberdade	Frequência de corte (Hz)	Resolução (Hz)	Freq.max. de gráfico (Hz)	Velocidade média à saída do convergente (m s <sup>-1</sup> )
139	EP-139/1	1024	50	100	1000	1,953	1 000	13,26
	EP-139/2						1 000	
	EP-139/3						500	
140	EP-140/1	1024	50	100	1000	1,953	1 000	11,59
	EP-140/2						1 000	
	EP-140/3						1 000	
	EP-140/4						500	
141	EP-141/1	1024	50	100	1000	1,953	1 000	10,23
	EP-141/2						1 000	
	EP-141/3						500	
142	EP-142/6	1024	50	100	1000	1,953	1 000	7,85
	EP-142/7						500	
143	EP-143/2	1024	50	100	1000	1,953	1 000	6,42
	EP-143/3				500	0,976	500	
	EP-143/4				500	0,976	250	

Posteriormente houve a possibilidade de utilização do analisador de Fourier do Centro de Estudos de Electrónica - descrito em 4.10 - o que permitiu o traçado dos espectros que documentam este trabalho.

Por dificuldades resultantes de falta de tempo e de pessoal, só foi possível apresentar as escalas - horizontal e vertical - dos espectros EP-139/1 a EP-141/3 (\*).

Por este motivo, pensávamos, inicialmente, não apresentar os espectros de potência correspondentes aos ensaios 142 e 143.

No entanto, e apesar desse inconveniente - atenuado, em certa medida, pela inclusão, no texto, do quadro 5.1 - , acabámos por incluí-los (\*\*) neste relatório por pensarmos que eles se tornam, mesmo assim, úteis para um melhor esclarecimento das características das flutuações de pressão, no domínio das frequências.

### 5.5.3 - Conclusões

Como se pode observar pelos quadros, figuras e fotografias publicadas, e ainda pelo próprio texto, o estudo realizado sobre as características das flutuações de pressão associadas a escoamentos com superfície livre, sobre lages planas de betão liso, permite tirar já algumas conclusões de interesse.

Com efeito:

A - Em relação às características dessas flutuações de pressão no domínio das amplitudes, pôde verificar-se:

- que o desvio padrão obtido (que, como se disse em 4.5.1 é o parâme

---

(\*) - aproveitamos para agradecer ao estagiário para ajudante de experimentador Luís Manuel Gomes Dias o trabalho realizado, particularmente na execução de alguns desenhos.

(\*\*) - só os que nos pareceram de maior interesse.

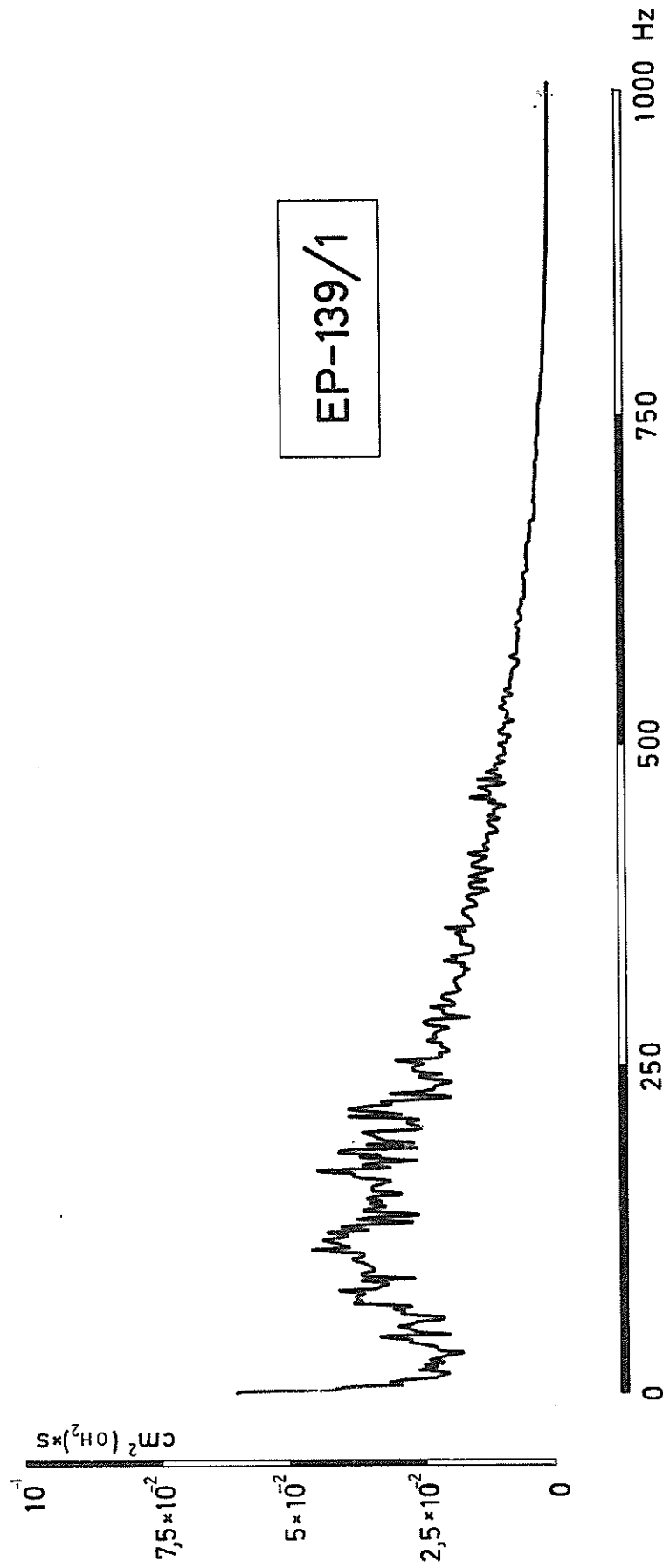


Fig. 5.8 - Escoamento com superfície livre: análise espectral. Ensaio 139.  
Transdutor na 4ª. posição.

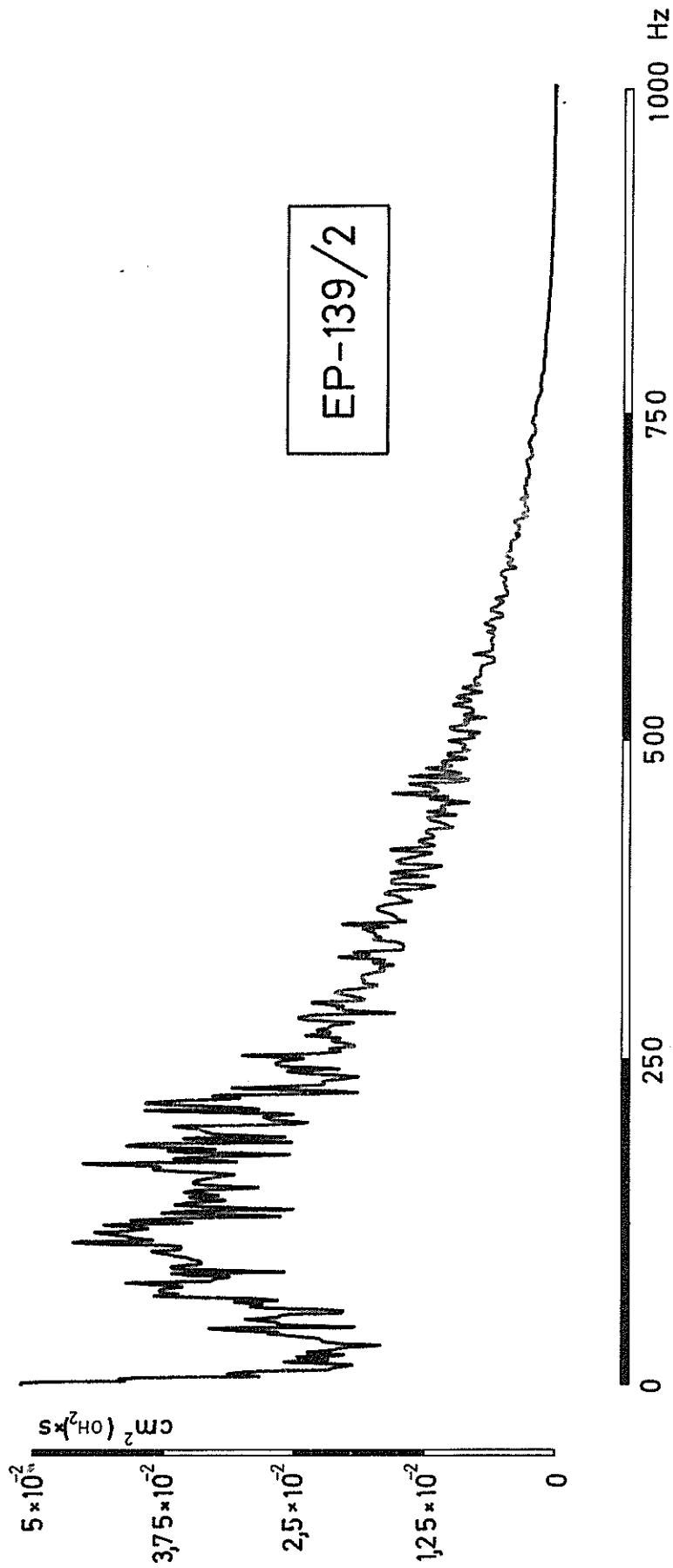


Fig. 5.9 - Escoamento com superfície livre: análise espectral. Ensaio 139.  
Transdutor na 4ª. posição.

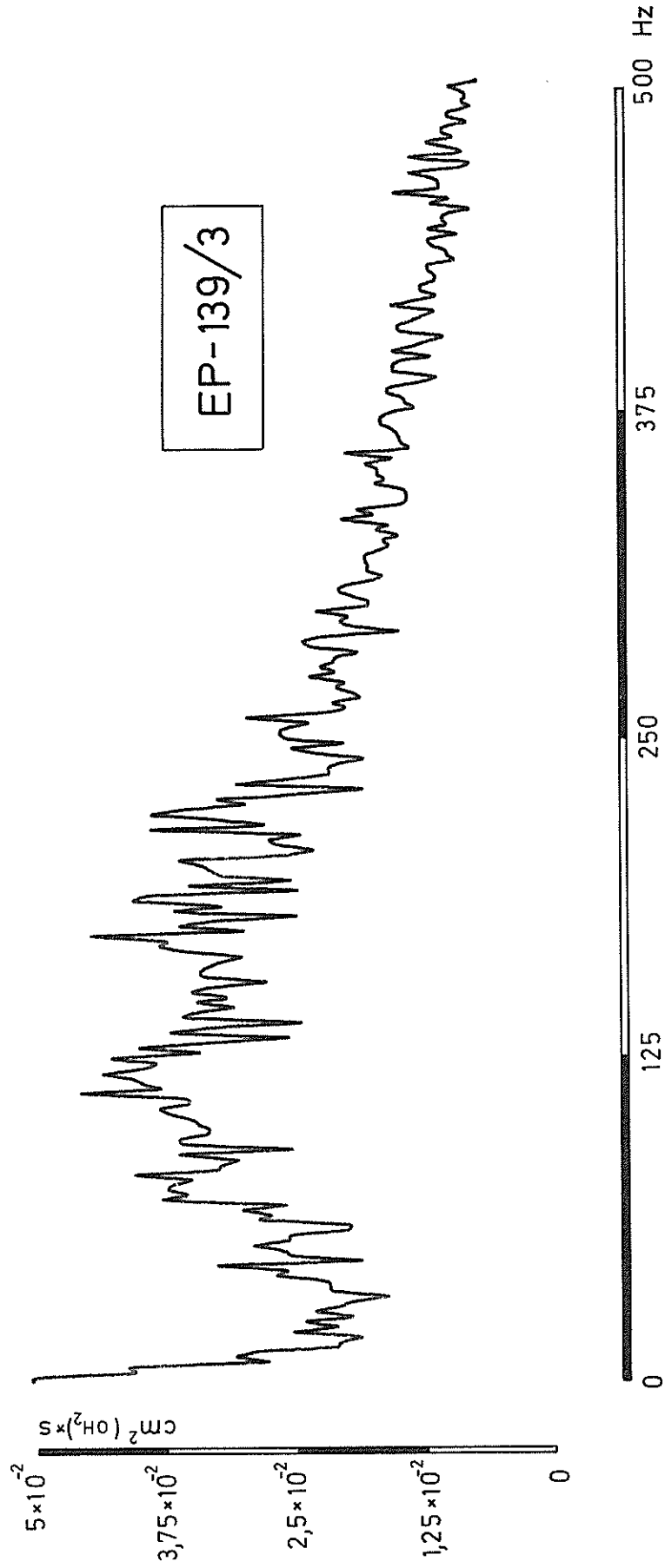


Fig. 5.10 - Escoamento com superfície livre: análise espectral. Ensaio 139.  
 Transdutor na 4ª. posição.

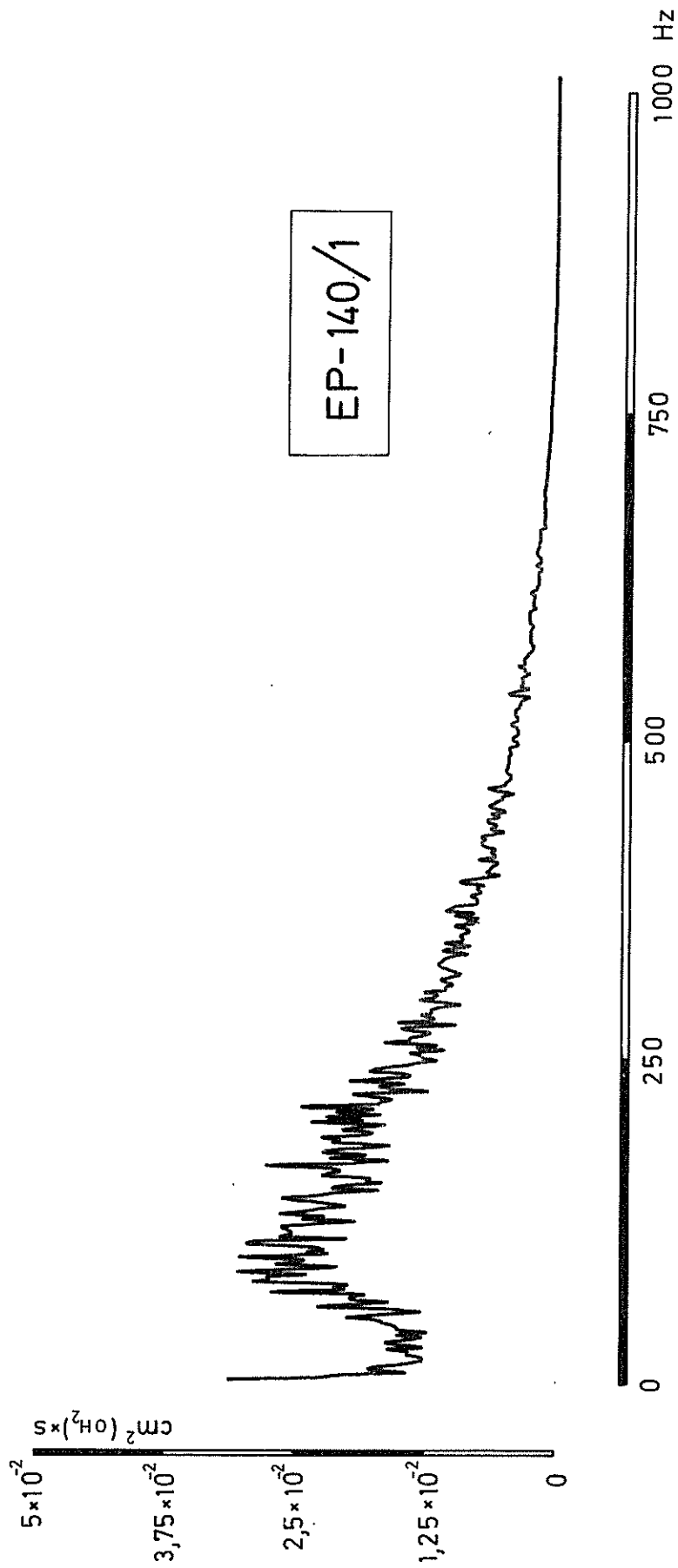


Fig. 5.11 - Escocamento com superfície livre: análise espectral.  
Ensaio 140. Transdutor na 4ª. posição.

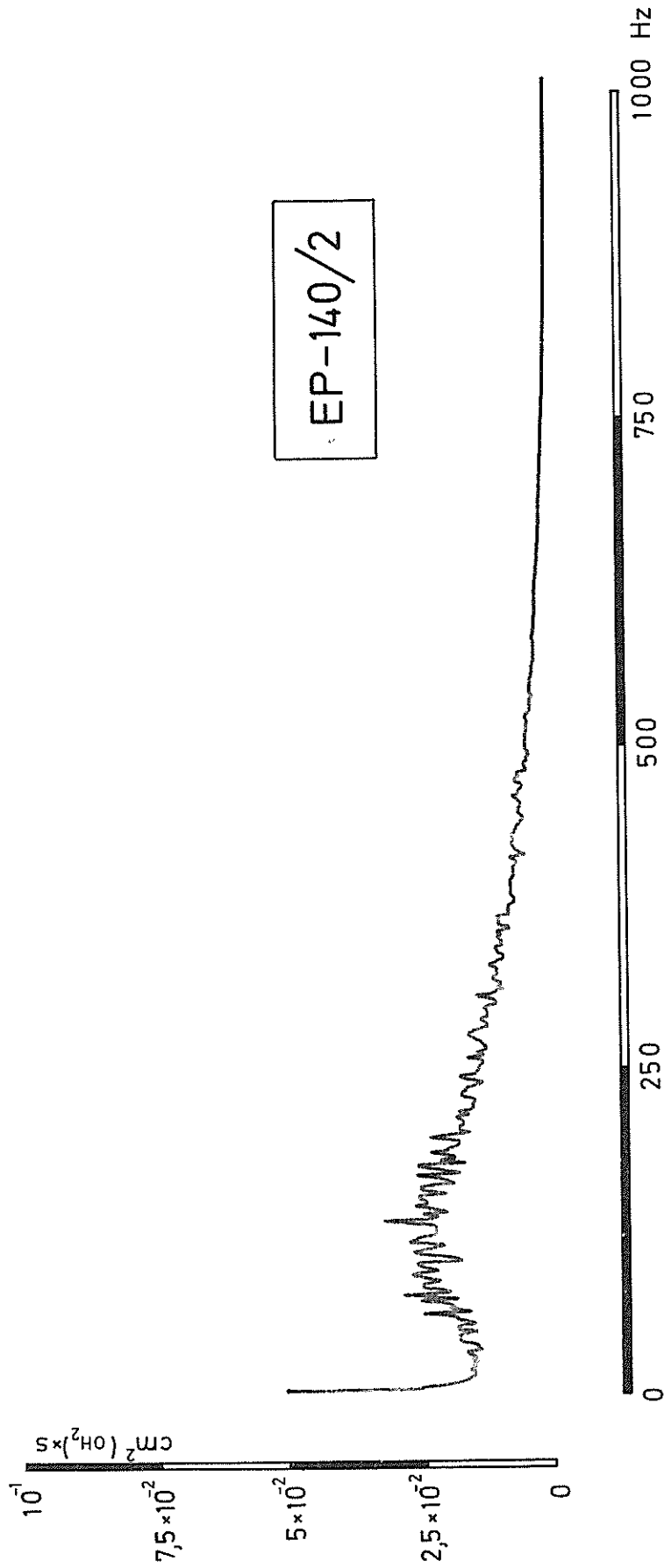


Fig. 5.12 - Escoamento com superfície livre: análise espectral.  
 Ensaio 140. Transdutor na 4ª. posição.



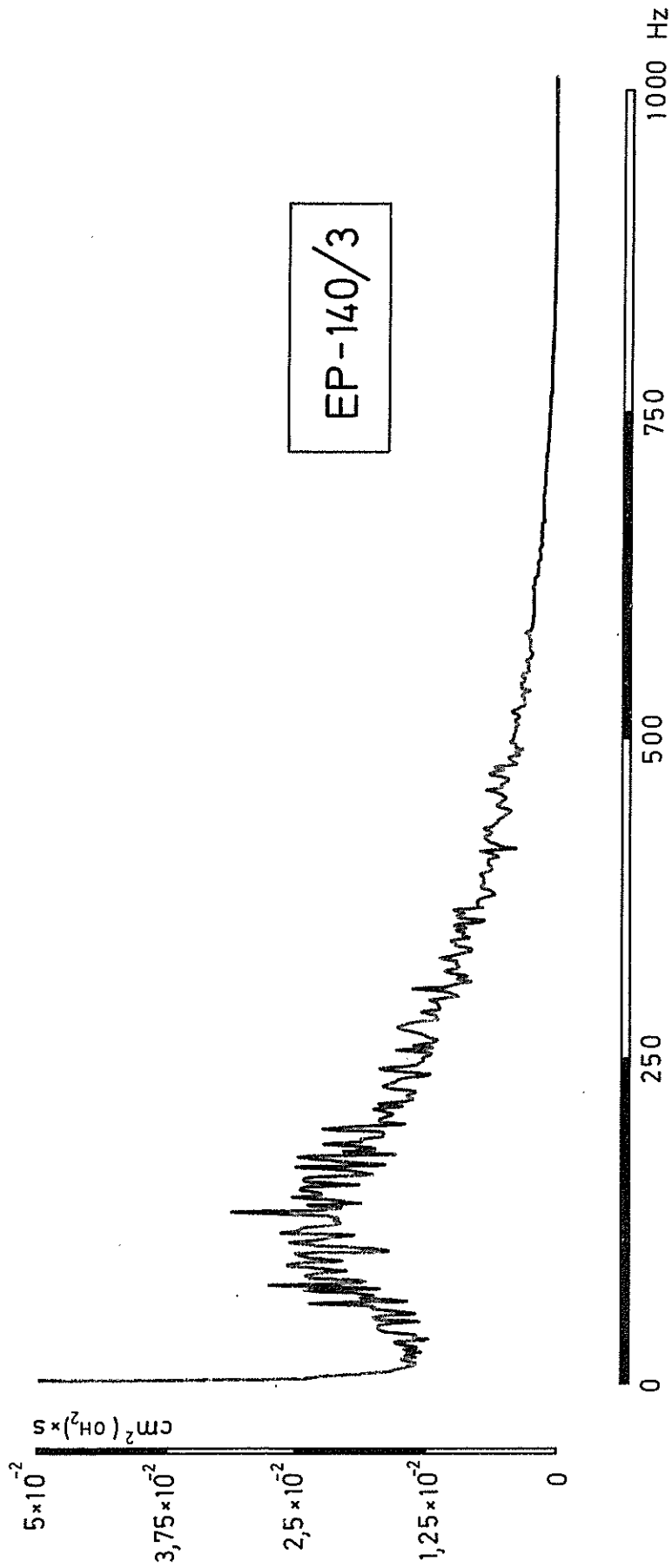


Fig. 5.13 - Escoamento com superfície livre: análise espectral.  
 Ensaio 140. Transdutor na 4ª. posição.

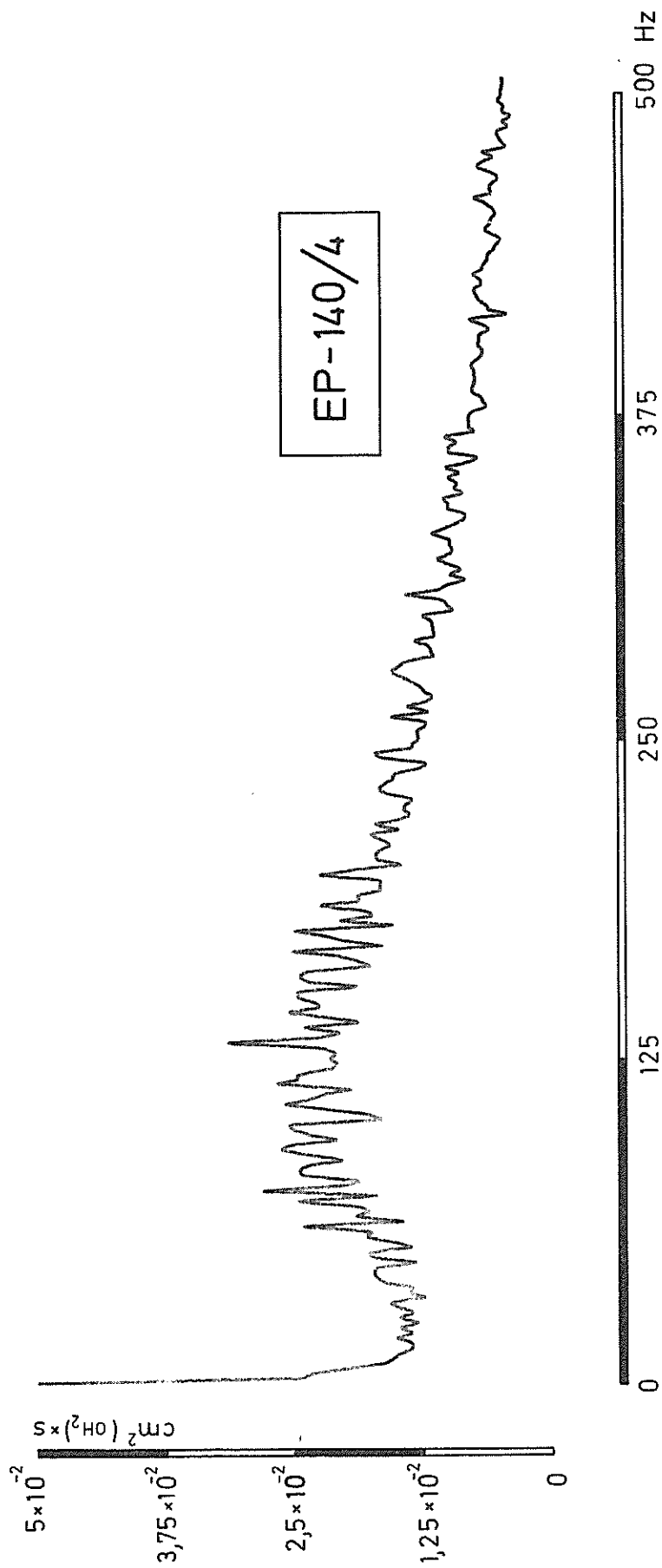


Fig. 5.14 - Escoamento com superfície livre: análise espectral.  
 Ensaio 140. Transdutor na 4ª. posição.

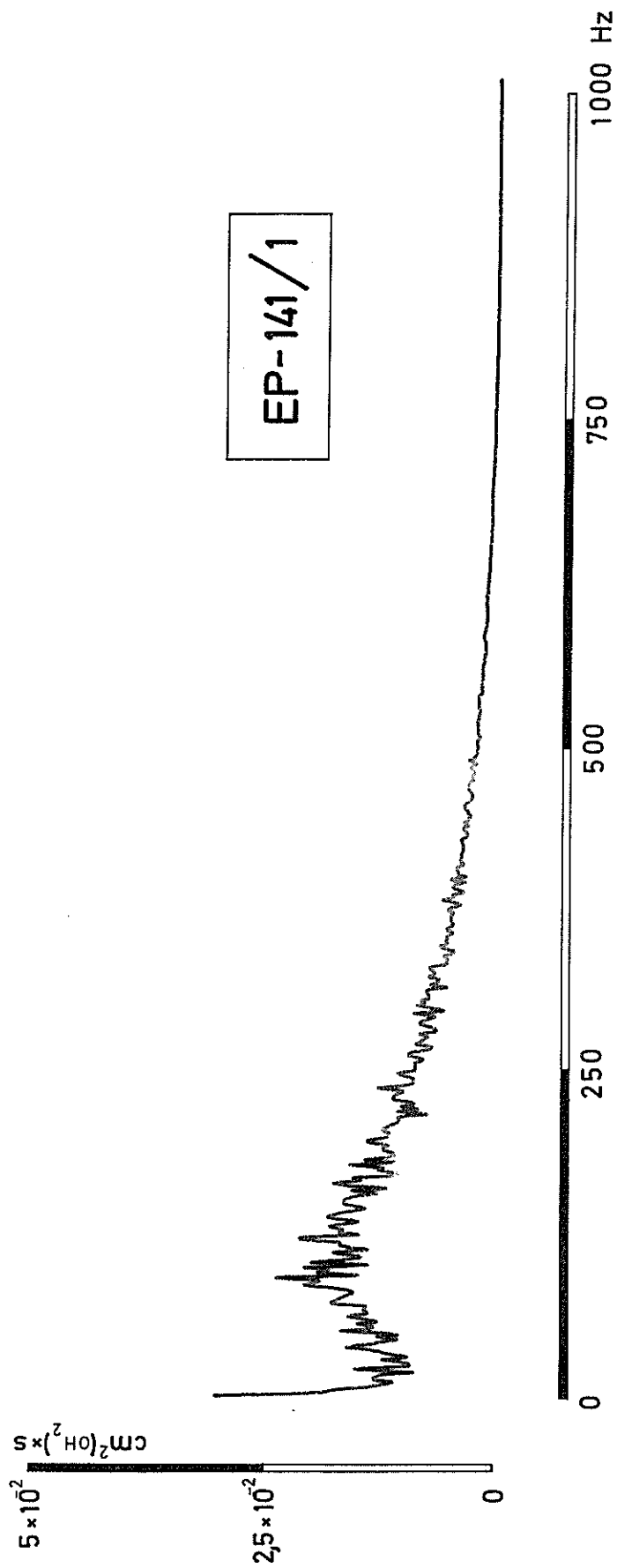


Fig. 5.15 - Escoamento com superfície livre: análise espectral.  
Ensaio 141. Transdutor na 4ª. posição.

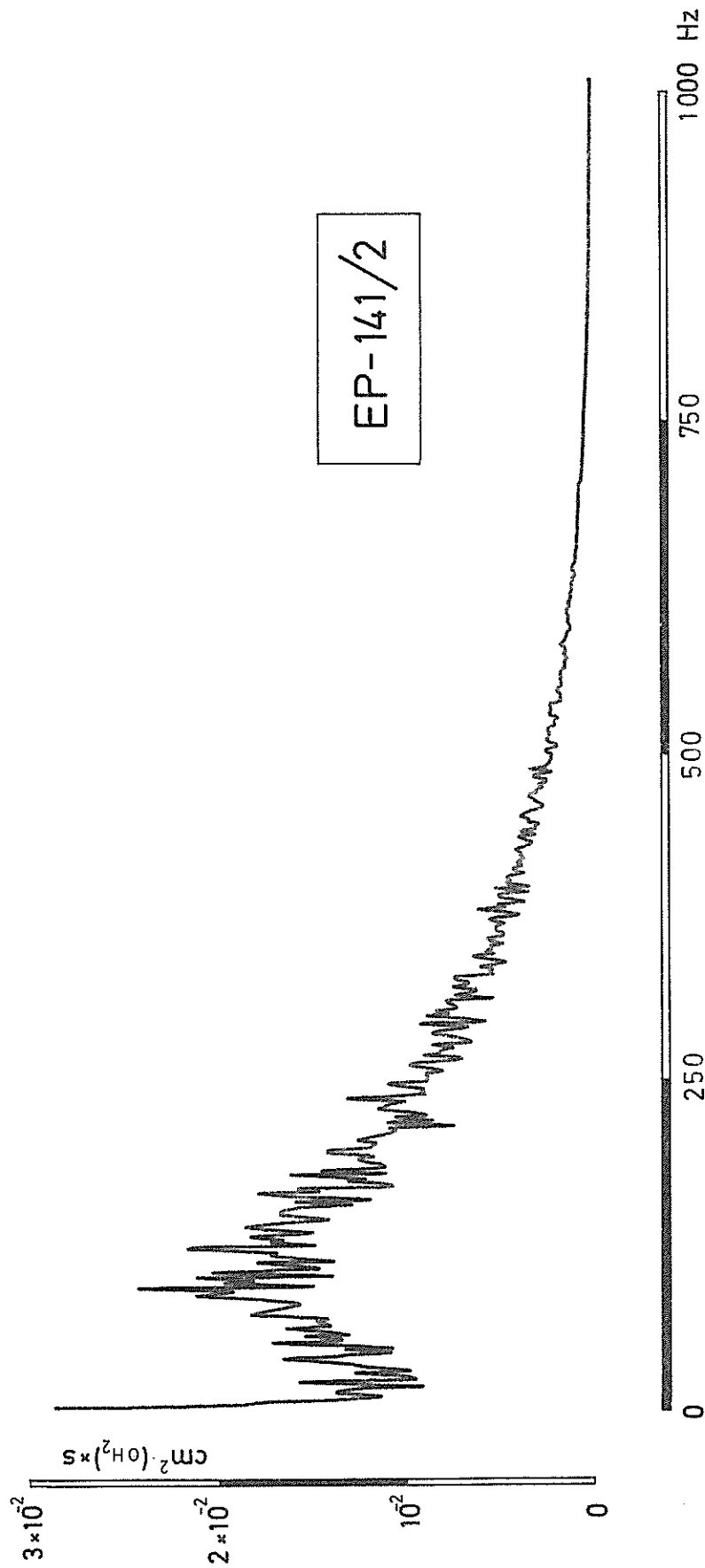


Fig. 5.16 - Escoamento com superfície livre: análise espectral.  
 Ensaio 141. Transdutor na 4ª. posição.

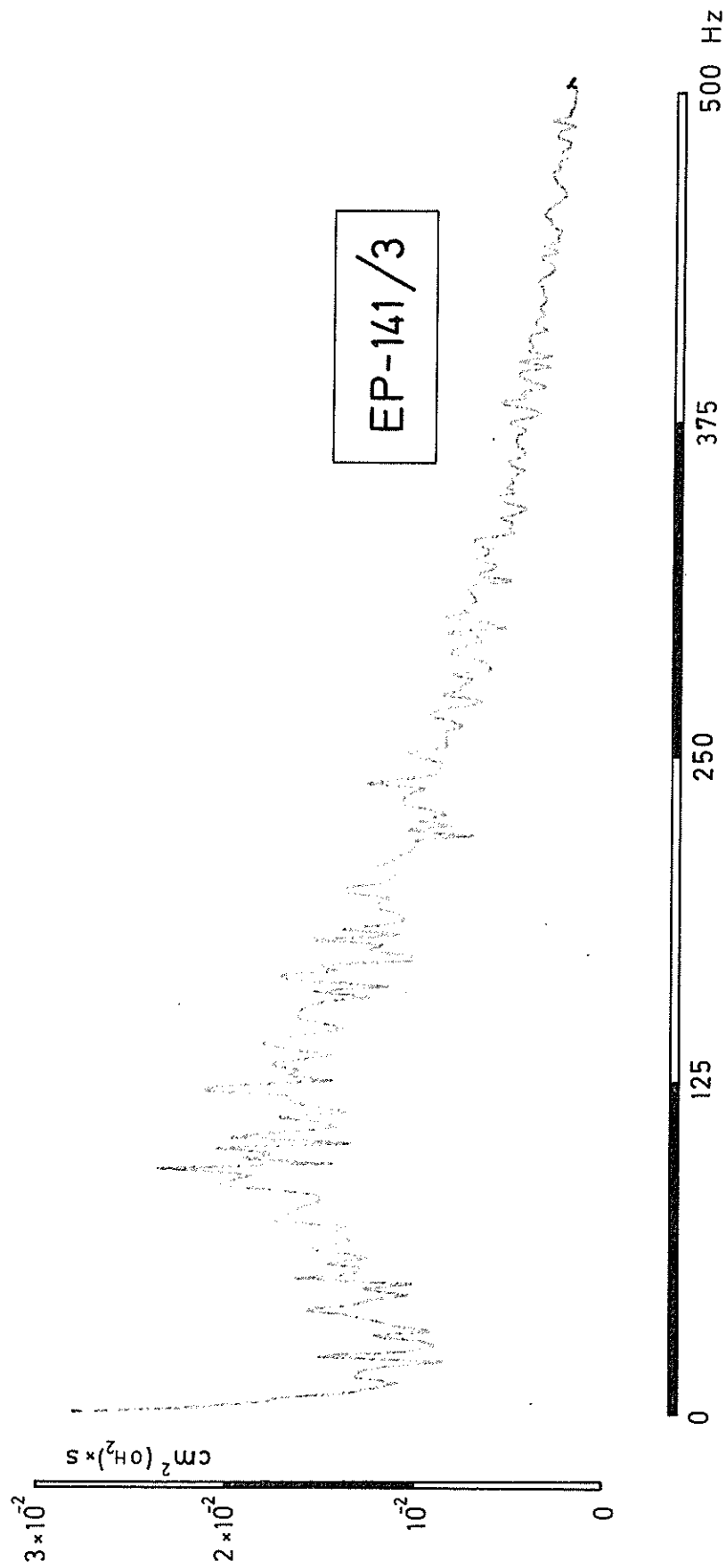
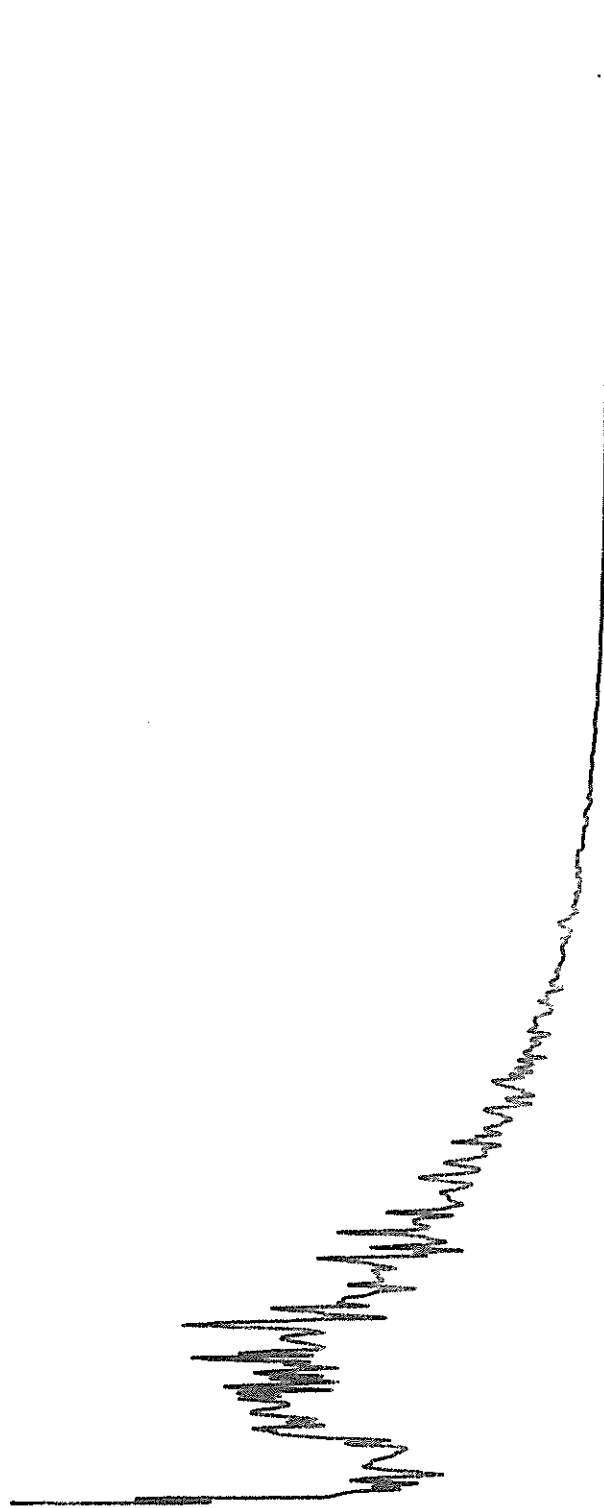
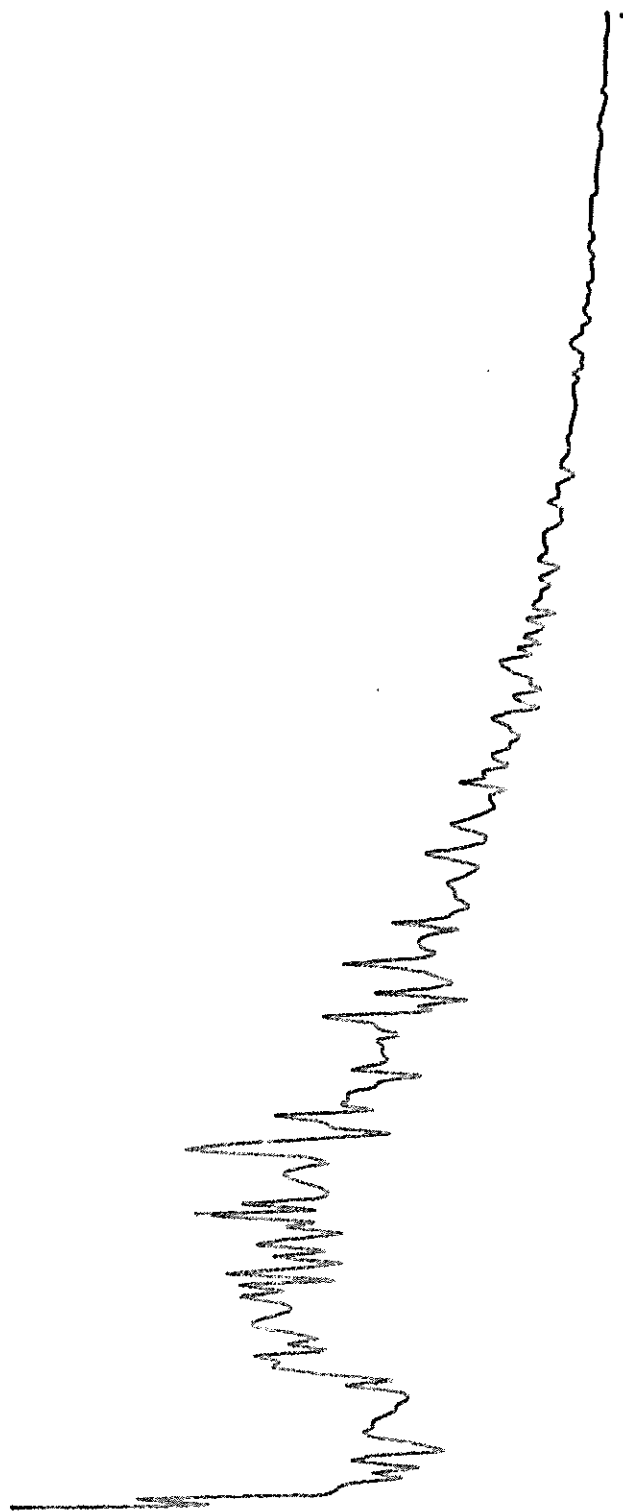


Fig. 5.17 - Escoamento com superfície livre: análise espectral.  
 Ensaio 141. Transdutor na 4ª. posição.



Espectro EP - 142/6 . Escoamento com superfície livre. Transdutor na 4ª. posição.



Espectro EP - 142/7. Escoamento com superfície livre. Transdutor na 4ª. posição.

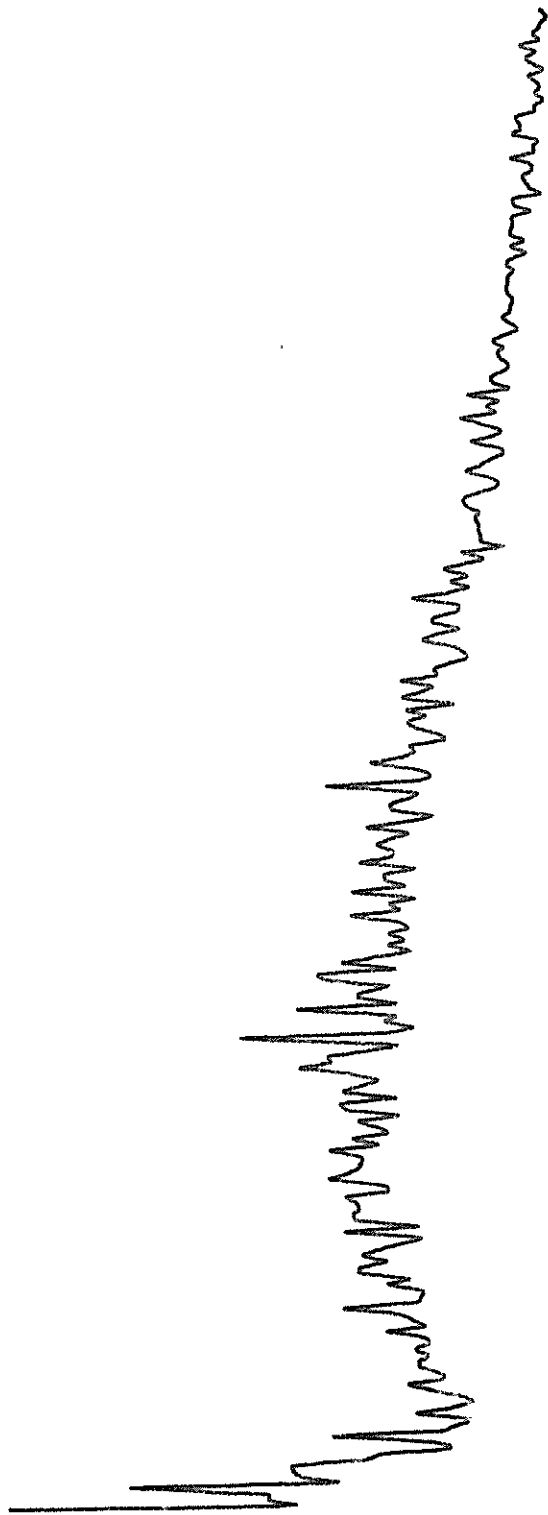


Espectro EP - 143/2. Escocamento com superfície livre. Transdutor na 4ª. posição.

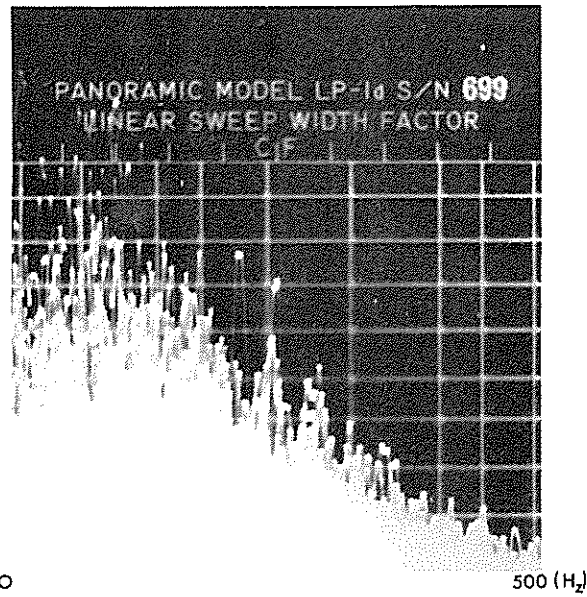




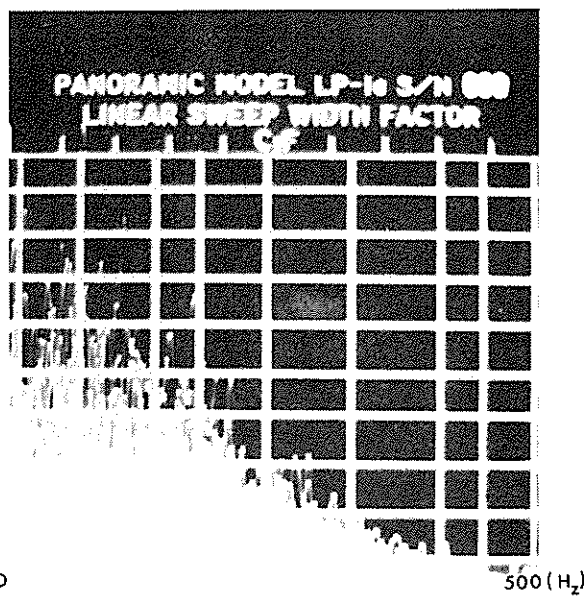
Espectro EP - 143/3. Escoamento com superfície livre. Transdutor na 4a. posição.



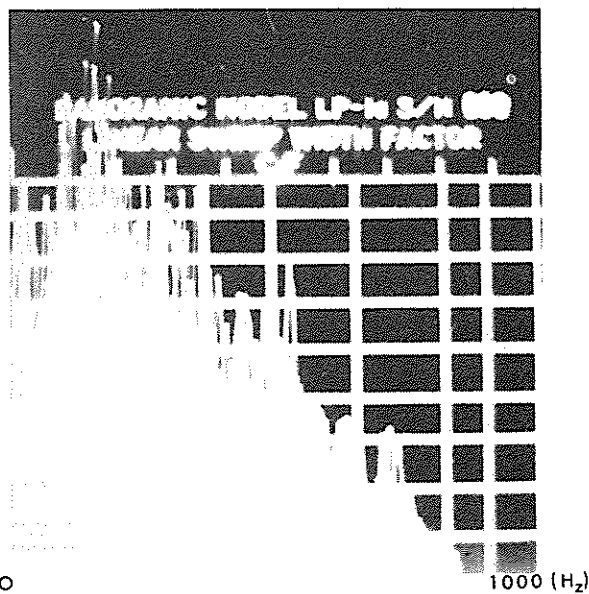
Espectro EP - 143/4. Escoamento com superfície livre. Transdutor na 4ª. posição.



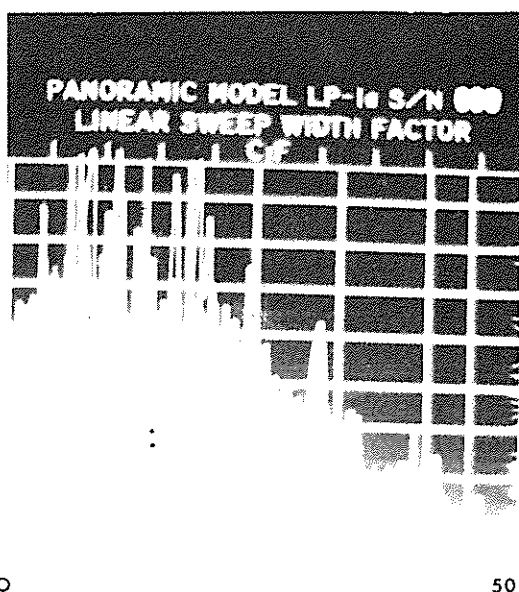
Fot.5.27 - Espectro do ensaio 143, via analisador panorâmico



Fot.5.28 - Espectro do ensaio 144, via analisador panorâmico



Fot.5.25 - Espectro do ensaio 139, via analisador panorâmico



Fot.5.26 - Espectro do ensaio 142, via analisador panorâmico

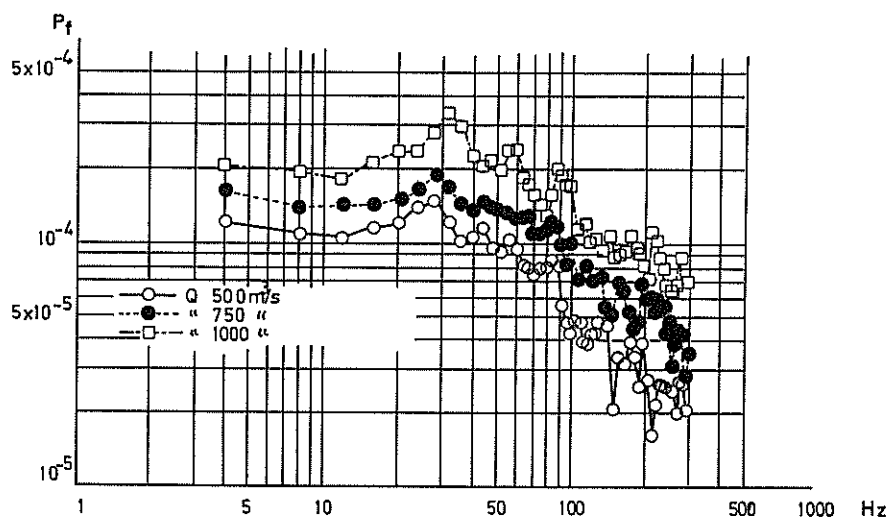


Fig. 5.18 - Escoamentos com superfície livre: análise espectral.  
 Ensaio realizado por MINAMI e AKI 135 .

QUADRO 5.2-Escoamentos com superfície livre. Desvio padrão das flutuações de pressão. Lage de betão liso.

ENSAIO	Velocidade média à saída do convergente $\bar{U}$ (m s <sup>-1</sup> )	Desvio padrão das flutuações de pressão (cm H <sub>2</sub> O)	
		Transdutor na 2ª. posição	Transdutor na 4ª. posição
139	13,26	1,9	3,3
140	11,59	1,6	2,7
141	10,23	1,3	2,1
142	7,85	0,8	1,3
143	6,42	0,6	0,9
144	5,09	0,4	0,6

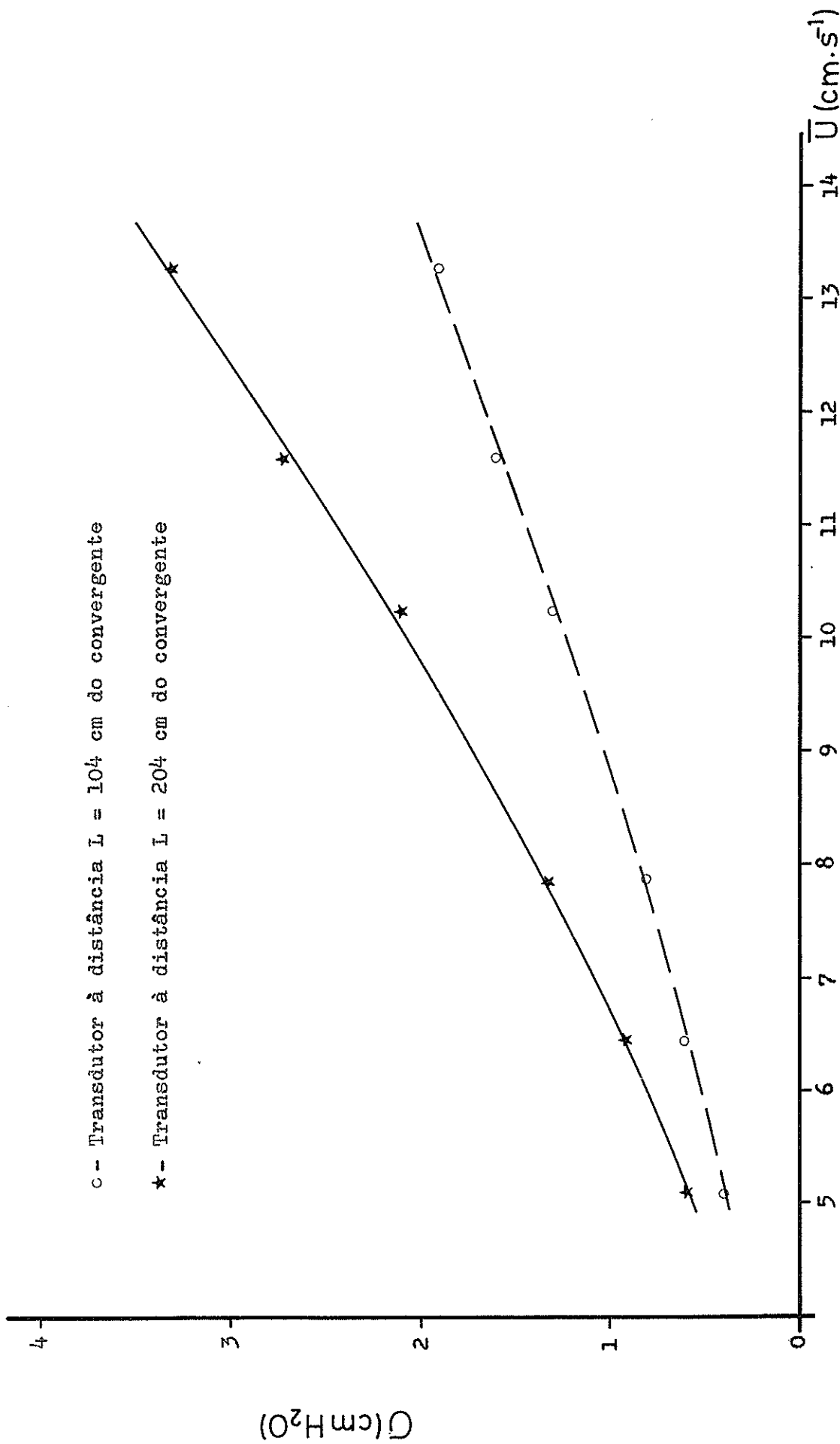


Fig. 5.19 - Escoamentos com superfície livre. Laje de betão liso.

Desvio padrão das flutuações de pressão. Ensaios 139 a 144.

tro estatístico capaz de as definir), mesmo para velocidades da ordem dos  $13 \text{ m s}^{-1}$  e com o transdutor na 4ª. posição, corresponde a um valor muito baixo.

Do estudo realizado sobre a sua evolução ao longo da lage foi possível verificar:

- que esse desvio padrão vai aumentando progressivamente com o desenvolvimento da camada limite turbulenta, o que aconselha a realização de ensaios com lages ainda mais compridas.

B - Em relação às características das flutuações de pressão no domínio das frequências, pôde, igualmente, verificar-se:

- a existência de elevadas frequências;

- o aumento progressivo da gama de frequências do espectro de potência, acompanhando o aumento das velocidades do escoamento ou, em outros termos, com o aumento da turbulência deste.

C - Em relação à aparelhagem de detecção, registo e análise destas flutuações de pressão, pôde comprovar-se:

- a impossibilidade dum estudo deste tipo com a aparelhagem disponível no seu início; e

- a importância das soluções encontradas, que permitem - como se vê - que estes estudos possam concretizarem-se na prática.

D - Em relação aos estudos previstos sobre a influência da área do elemento sensível dos transdutores, foi já possível concluir-se:

- do seu interesse e importância, em face da gama de frequências contida nas flutuações turbulentas de pressão, como é posto em evidência através dos respectivos espectros de potência.



E - Em relação a trabalhos realizados por outros autores, foi já possível:

- verificar a boa concordância entre os trabalhos de MINAMI e AKI (135) e os nossos; e,

- verificar que estes últimos permitem completar ainda aqueles, uma vez que a análise espectral realizada se estendeu a frequências de corte de acordo com a energia dos respectivos espectros, o que não aconteceu com os referidos estudos de MINAMI e AKI.

## 5.6 - Ensaaios realizados na câmara (escoamentos em pressão)

### 5.6.1 - Considerações prévias

Dado não ter sido possível fazer o rebaixo previsto nas placas de "plaxiglas" de 50 mm, os estudos efectuados corresponderam a secções de ensaio de 30 cm x 4,30 cm.

Esta circunstância limitou, por um lado, as velocidades máximas que puderam ser atingidas e, por outro, deram origem a que o escoamento, na zona de entrada na câmara, sofresse uma expansão brusca, passando duma altura de 2,85 cm para outra de 4,30 cm.

### 5.6.2 - Estudo das flutuações no domínio das amplitudes

#### 5.6.2.1 - Comparação dos valores do desvio padrão obtidos pelas vias: correlador e voltímetro de valor eficaz

Aproveitando as facilidades que nos foram concedidas pelo Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para a utilização do correlador digital mencionado em 4.9, foi possível efectuar

QUADRO 5.3-Escoamentos em pressão.Influência da pressão média na determinação do desvio padrão das flutuações de pressão

ENSAIO	Pressão média $\bar{P}$ (m H <sub>2</sub> O)	Velocidade média na secção $\bar{U}$ (m.s <sup>-1</sup> )	Desvio padrão das flutuações de pressão (cm H <sub>2</sub> O)	
			Via correlador	Via voltímetro R.M.S.
68	30,0	6,36	37,8	38
69	20,5		41,4	41
70	16,0		42,6	42
71	9,5		50,6	49
65	3,5		51,7	52
72	1,0		56,5	54
74	1,0		57,9	55
73	0,0		53,4	52
75	-1,0		44,9	42
76	-2,0		28,2	28
77	-3,0		35,8	33

um estudo sobre as características apresentadas pelas flutuações de pressão no domínio das amplitudes.

Assim, pelas curvas de densidade de probabilidade determinadas no correlador, foi possível verificar a distribuição normal das flutuações de pressão.

Deste modo, a definição das suas características em amplitude pode fazer-se apenas pelo conhecimento do desvio padrão e do valor médio, e interessava averiguar até que ponto o voltímetro de valor eficaz podia ser utilizado como via de análise, dado ser o único instrumento disponível no Serviço para o efeito.

Como já foi referido em 4.6, este aparelho apresenta, na prática, o inconveniente da imprecisão das leituras como consequência da sua incapacidade de resposta às baixas frequências contidas no sinal.

Daí que, como se viu, só com o recurso a um gravador magnético de FM se pudesse vencer esta dificuldade.

Como se pode observar no quadro 5.3, foi possível verificar a boa concordância entre os valores do desvio padrão obtidos a partir das curvas de densidade de probabilidade determinadas no correlador, e pelo voltímetro de valor eficaz.

#### 5.6.2.2 - Influência da pressão média no valor do desvio padrão das flutuações de pressão

Um dos problemas que interessavam averiguar era o da possível influência da pressão média nas características estatísticas apresentadas pelas flutuações de pressão.

Com esse objectivo foram realizados ensaios em que se mantiveram as mesmas condições hidráulicas, à excepção da pressão média.

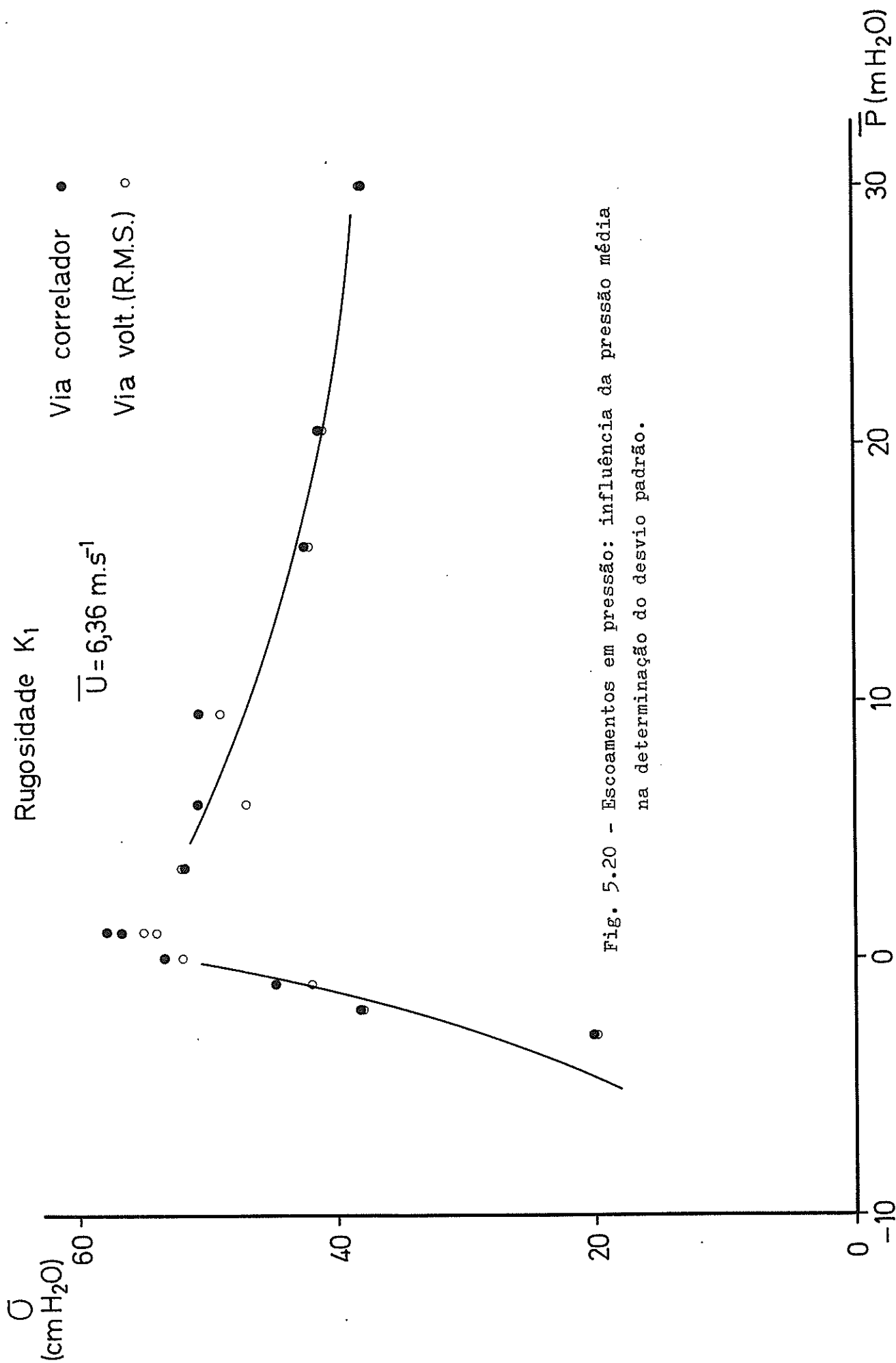


Fig. 5.20 - Escoamentos em pressão: influência da pressão média na determinação do desvio padrão.

No quadro 5.3 mostram-se os valores obtidos no caso da placa de "plexiglas" de rugosidade K1 (Fig. 3.4).

A gama de pressões considerada estendeu-se desde o valor -3,0 metros de coluna de água até +30,0 metros de coluna de água.

Estes valores foram limitados:

- superiormente: pelas características dos transdutores CEC de 50 psia utilizados; e

- inferiormente: pelo aparecimento, à vista desarmada, de bolhas gasosas que eram arrastadas pelo escoamento.

Como se verifica na Figura 5.20 parece que a pressão média influi nas características das flutuações de pressão. No entanto, e dadas as condições hidráulicamente desfavoráveis em que se foi forçado a trabalhar, julgamos não ter chegado ainda a altura das conclusões.

#### 5.6.2.3 - Conclusões

Com a realização destes ensaios pretendeu-se, fundamentalmente, resolver os problemas de carácter experimental e obter registos que pudessem vir a servir de ilustração das vias de análise disponíveis.

Como se viu, estes objectivos foram plenamente alcançados tendo sido possível efectuar, ainda, um estudo das características estatísticas das flutuações de pressão, no domínio das amplitudes, associadas a escoamentos em pressão, que levou à conclusão da importância da utilização dum gravador analógico de FM na determinação do desvio padrão através da via: voltímetro de valor eficaz.

#### 5.7 - Prosseguimento dos ensaios

##### 5.7.1 - Ensaio no canal (escoamentos com superfície livre)

Para a concretização da 4ª. fase dos estudos previstos no plano de in

investigação citado no capítulo 1, falta apenas resolver os problemas decorrentes da necessidade da determinação da distribuição de velocidades na camada limite turbulenta.

Com efeito, estão já preparadas as lages de betão - liso e rugoso - que tornarão possível a realização dos ensaios previstos e nas quais serão utilizados os transdutores: CEC de 15 psia e KULITE de 25 psia.

Para além dos motivos que aconselham a sua utilização (4.3.1) existe ainda um outro: o da possibilidade do estudo da influência da área do elemento sensível do transdutor nas características apresentadas pelas flutuações de pressão por ele detectadas.

Trata-se dum problema relacionado com a capacidade de resolução espacial apresentada pelos transdutores, como consequência das suas dimensões finitas.

O parâmetro adimensional que interessa considerar é (Fig. 5.21)  $\frac{d}{\delta_*}$  em que  $d$  é o diâmetro do transdutor.

Pensamos realizar este estudo em 2 fases:

— numa primeira fase, utilizaremos lages de betão liso (Fot. 5.11 a 5.13) e serão feitos registos magnéticos (gravador de FM) utilizando os transdutores CEC e KULITE (Fot. 5.20), estes últimos integrados no "transdutor" simulado CEC construída para o efeito; e,

— numa segunda fase, será realizado um estudo idêntico a este, mas para o caso de lages de betão rugoso, e ainda um outro resultante do problema da descontinuidade - no aspecto da rugosidade da superfície - introduzida pelos transdutores.

Este último problema foi, aliás, perfeitamente equacionado por Abecasis no seu trabalho (1).

Estes estudos serão encarados dum ponto de vista estatístico.

Assim, no domínio das amplitudes interessará estabelecer a relação:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_r} = f\left(\frac{d}{\delta_*}\right) \dots\dots\dots (5.24)$$

em que:

$\sigma_m$  = desvio padrão medido

$\sigma_r$  = verdadeiro desvio padrão (d → 0)

d = diâmetro do elemento sensível do transdutor

$\delta_*$  = espessura de deslocamento da camada limite.

No domínio das frequências existem dois problemas importantes a analisar:

— o de saber até que ponto a dimensão dos transdutores limita a gama de frequências registada; e,

— o de saber, conseqüentemente, até que ponto os valores do espectro de potência são afectados por ela.

Quanto ao problema - referido no início - da determinação das velocidades na camada limite turbulenta, aguarda-se que exista a necessária aparelhagem de medida e ainda os dispositivos de calibração que a permitam utilizar.

#### 5.7.2 - Ensaio na câmara (escoamentos em pressão)

Também neste caso estão já criadas as condições de ensaio necessárias para a concretização dos estudos previstos na 4ª. fase do plano de investigação respectivo (\*).

Sendo assim, poder-se-á estudar a influência exercida:

---

(\*)-com a reserva já assinalada em 5.7.1. No entanto, neste caso, existe já o projecto da aparelhagem de medida das velocidades na camada limite.

- pela pressão média;
- pela área do elemento sensível dos transdutores; e,
- pela rugosidade (K11 e K22) das superfícies em contacto com os escoamentos (Fot. 5.9 e 5.10), nas características estatísticas das respectivas flutuações de pressão:

## 5.8 - Conclusões

Pela documentação apresentada é possível concluir-se que foram atingidos os objectivos pretendidos com a realização deste trabalho (capítulo 1), e que foi possível apresentar, ainda, os principais resultados obtidos como consequência dum estudo, já concluído, sobre as características estatísticas das flutuações de pressão, em lages planas de betão liso, associadas a escoamentos com superfície livre.

Assim, foi possível concluir-se que:

A - no domínio das amplitudes, os valores dos respectivos desvios padrões são bastante baixos (quadro 5.2);

B - no domínio das frequências, e como se pode observar pelos espectros de potência determinados pelo analisador de Fourier - Fig. 5.8 e seguintes - ou pelo analisador panorâmico - Fot. 5.25 a 5.28 -, existe uma percentagem de energia apreciável associada a frequências superiores a 500 Hz, no caso das velocidades máximas de ensaio, e, ainda, que a gama de frequências, associadas a tais flutuações de pressão, vai-se estendendo a frequências cada vez mais elevadas, de acordo com o aumento das velocidades do respectivo escoamento.



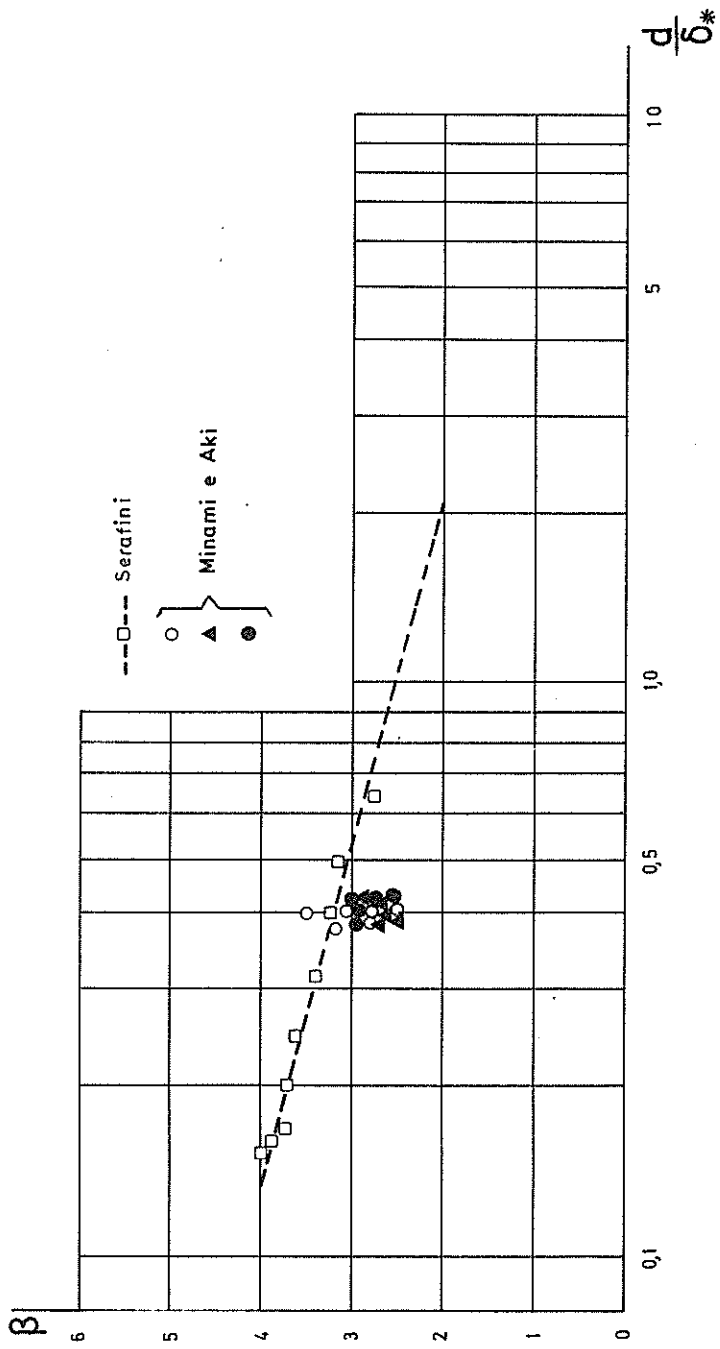


Fig. 5.21 - Influência da área dos transdutores, de acordo com os trabalhos de SERAFINI, MINAMI e AKI (135).

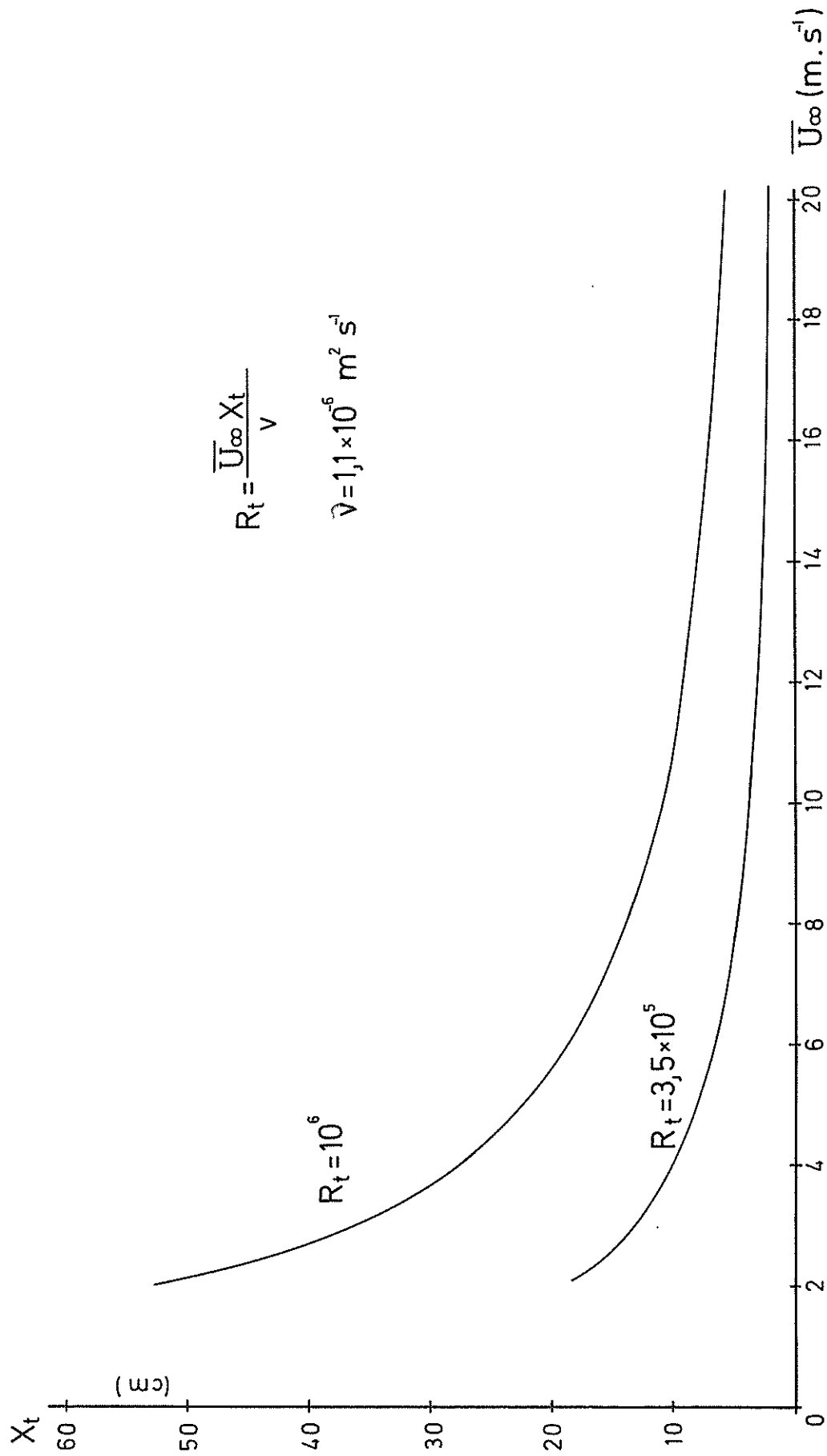


Fig. 5.22 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Comprimento de transição  $X_t$  entre a camada limite laminar e a camada limite turbulenta, em função da velocidade de de  $\bar{U}_\infty$  do escoamento.

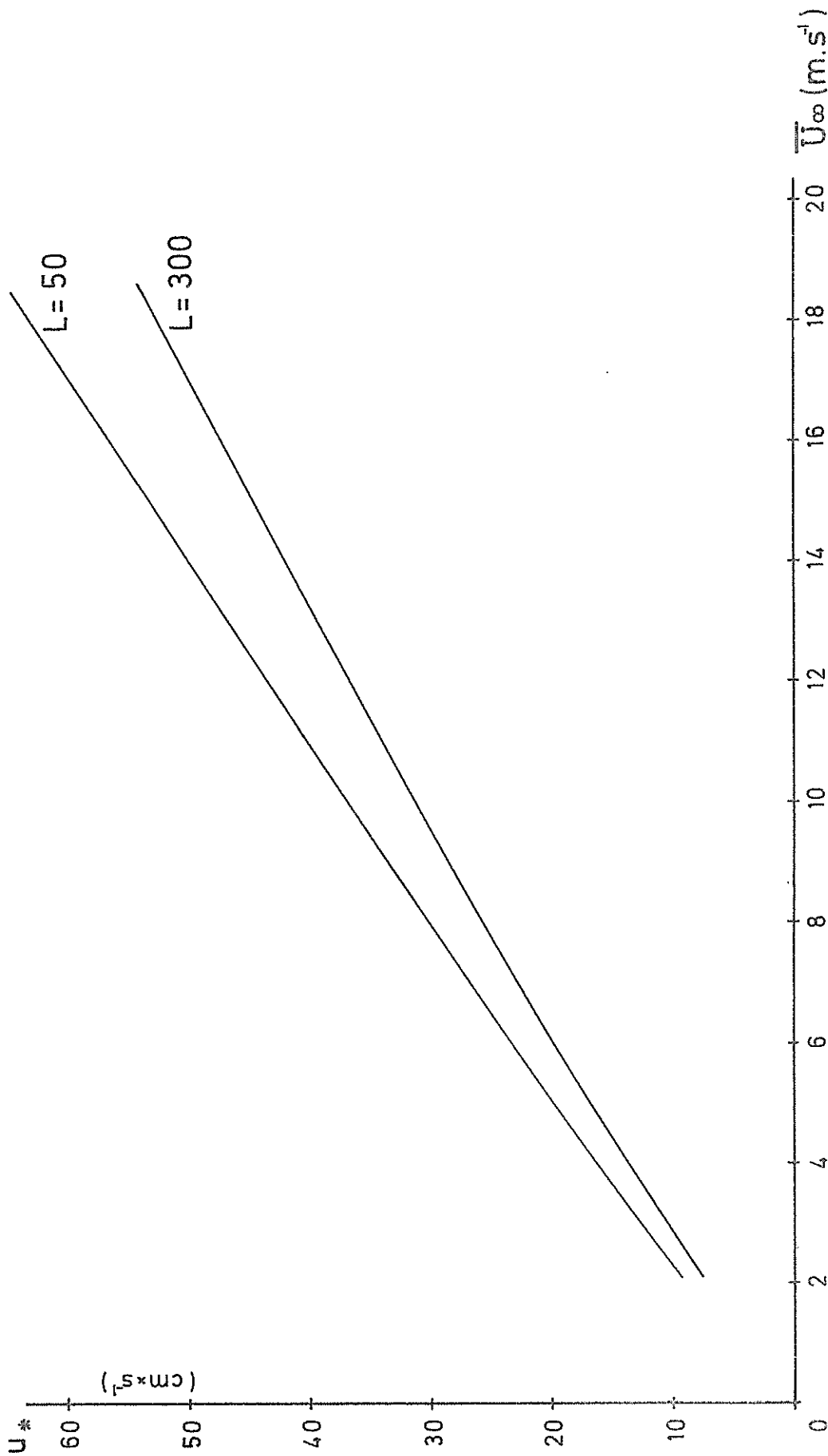


Fig. 5.23 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da velocidade de atrito  $U^*$ , em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 e 300 cm.

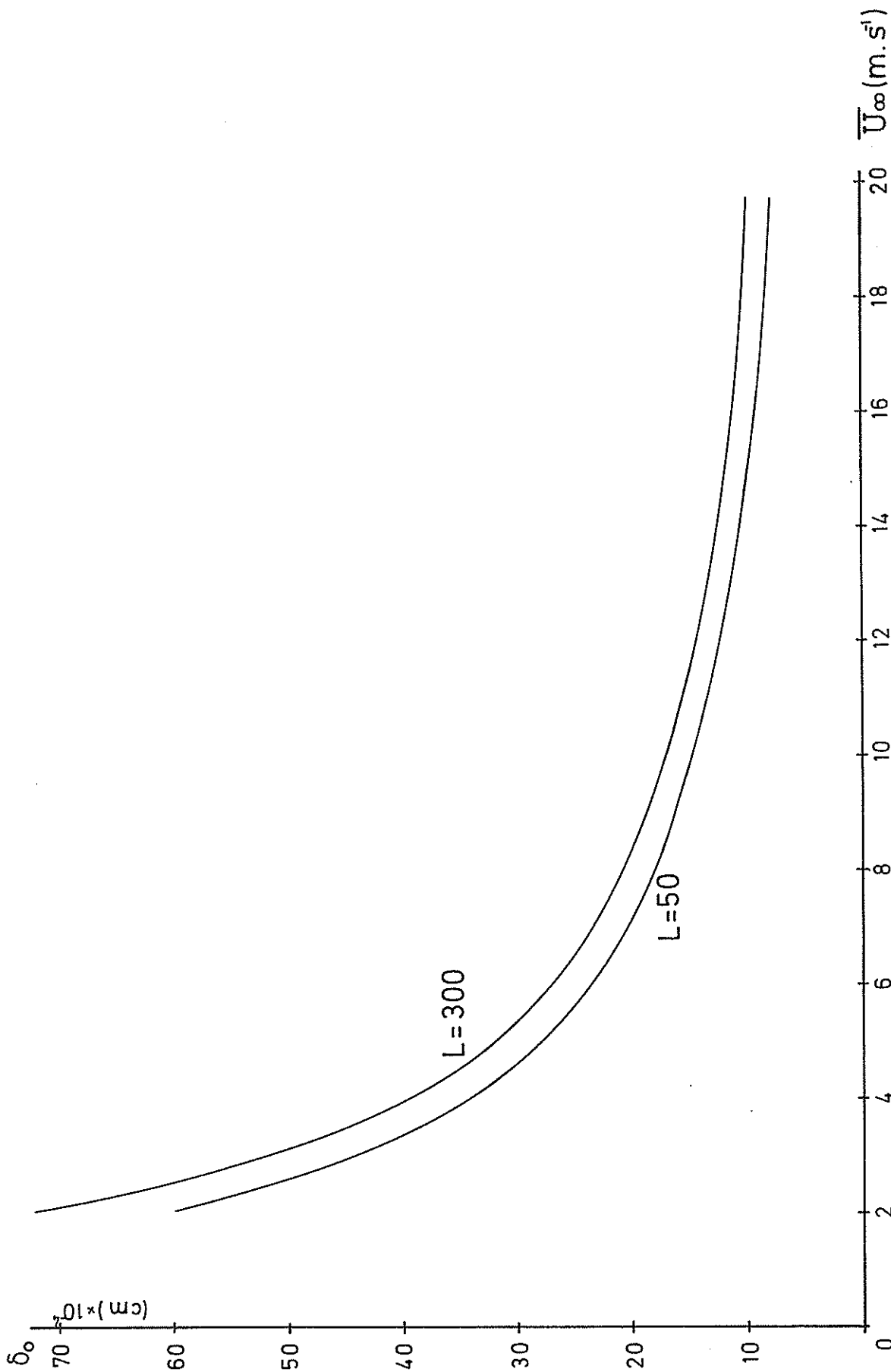


Fig. 5.24 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura  $\delta_0$  da "película" laminar, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.

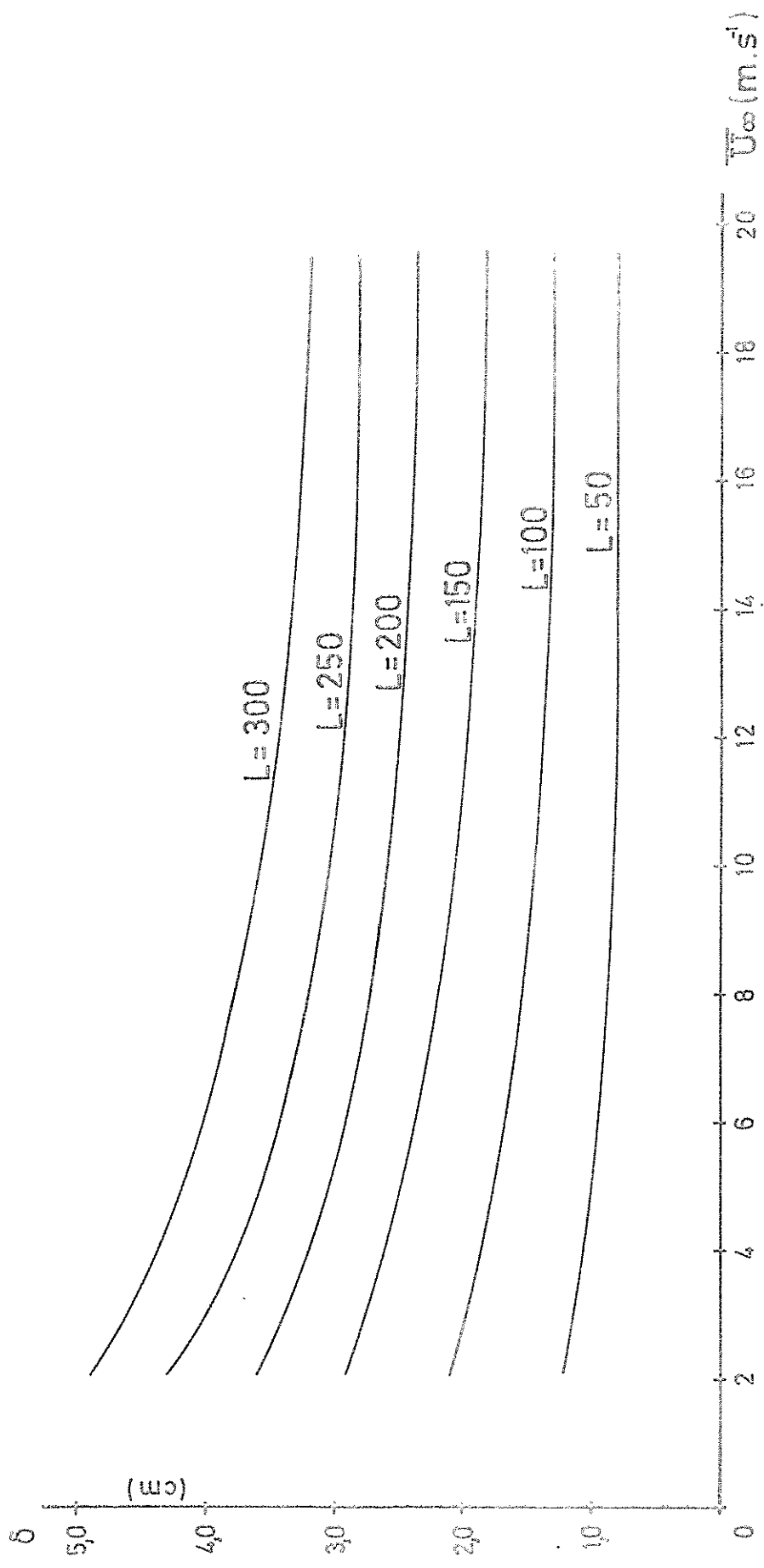


Fig. 5.25 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura nominal  $\delta$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.

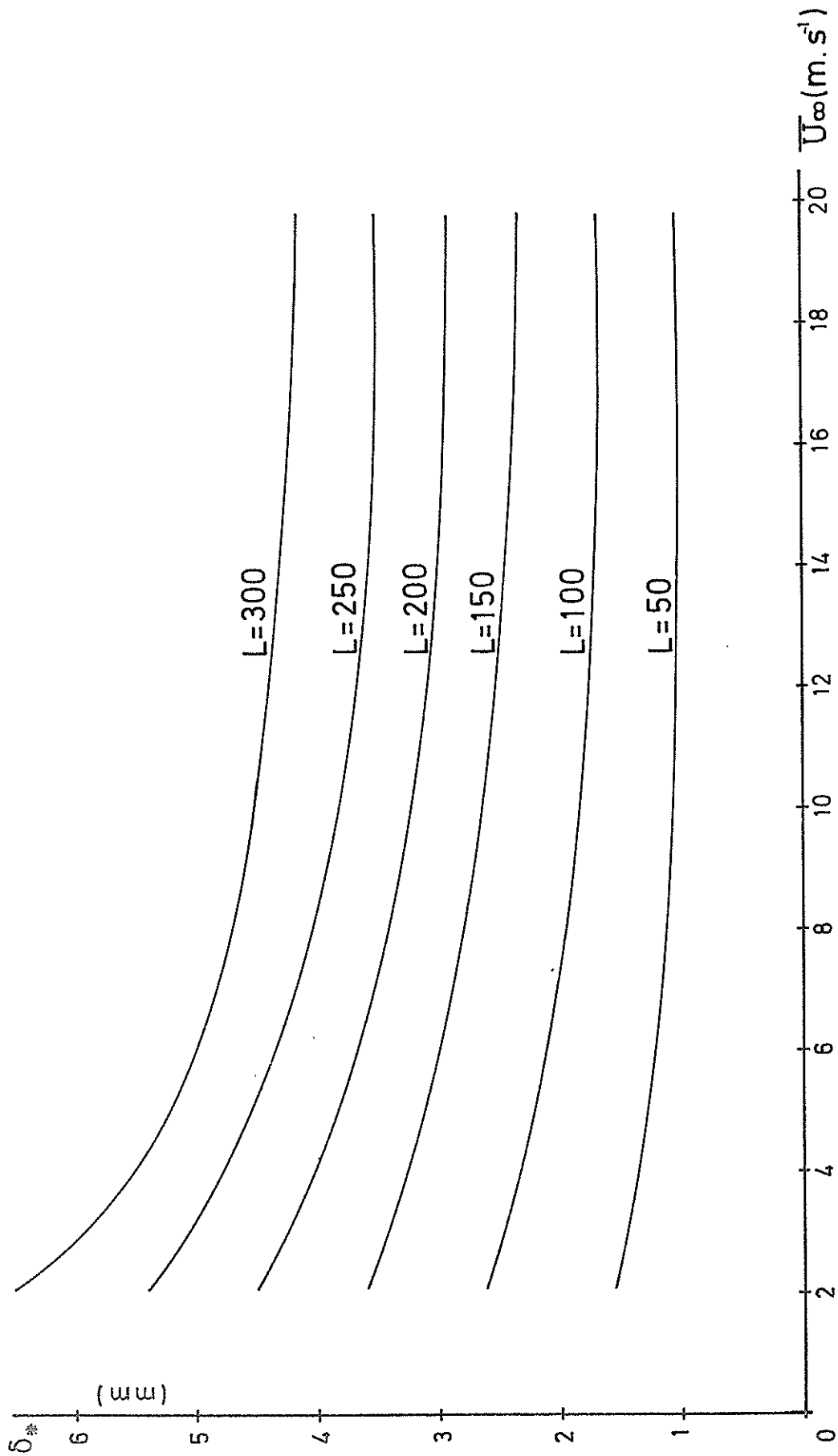


Fig. 5.26 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espesura de deslocamento  $\delta^*$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\overline{U}$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.

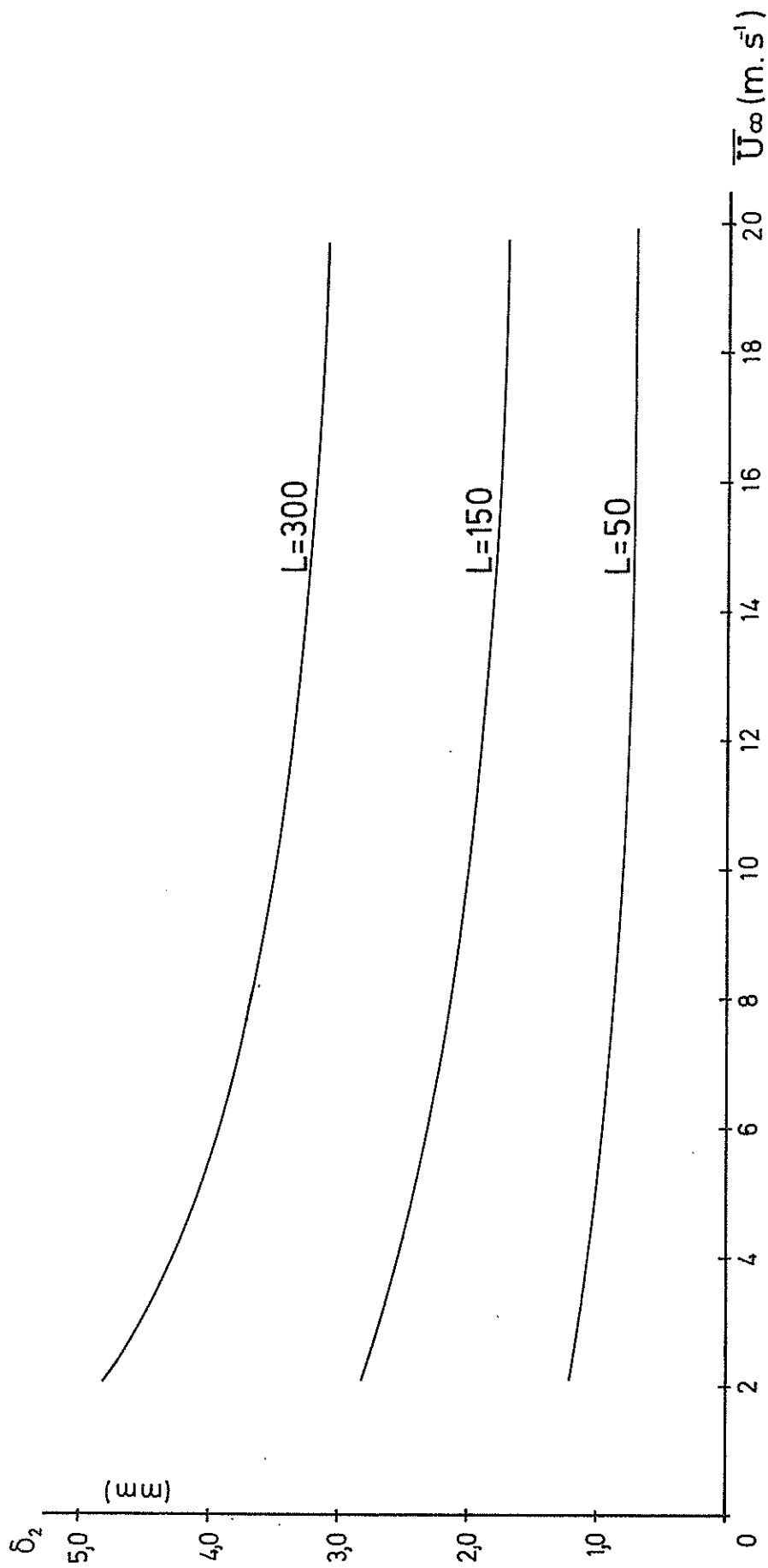


Fig. 5.27 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura de quantidade de movimento  $\delta_2$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.

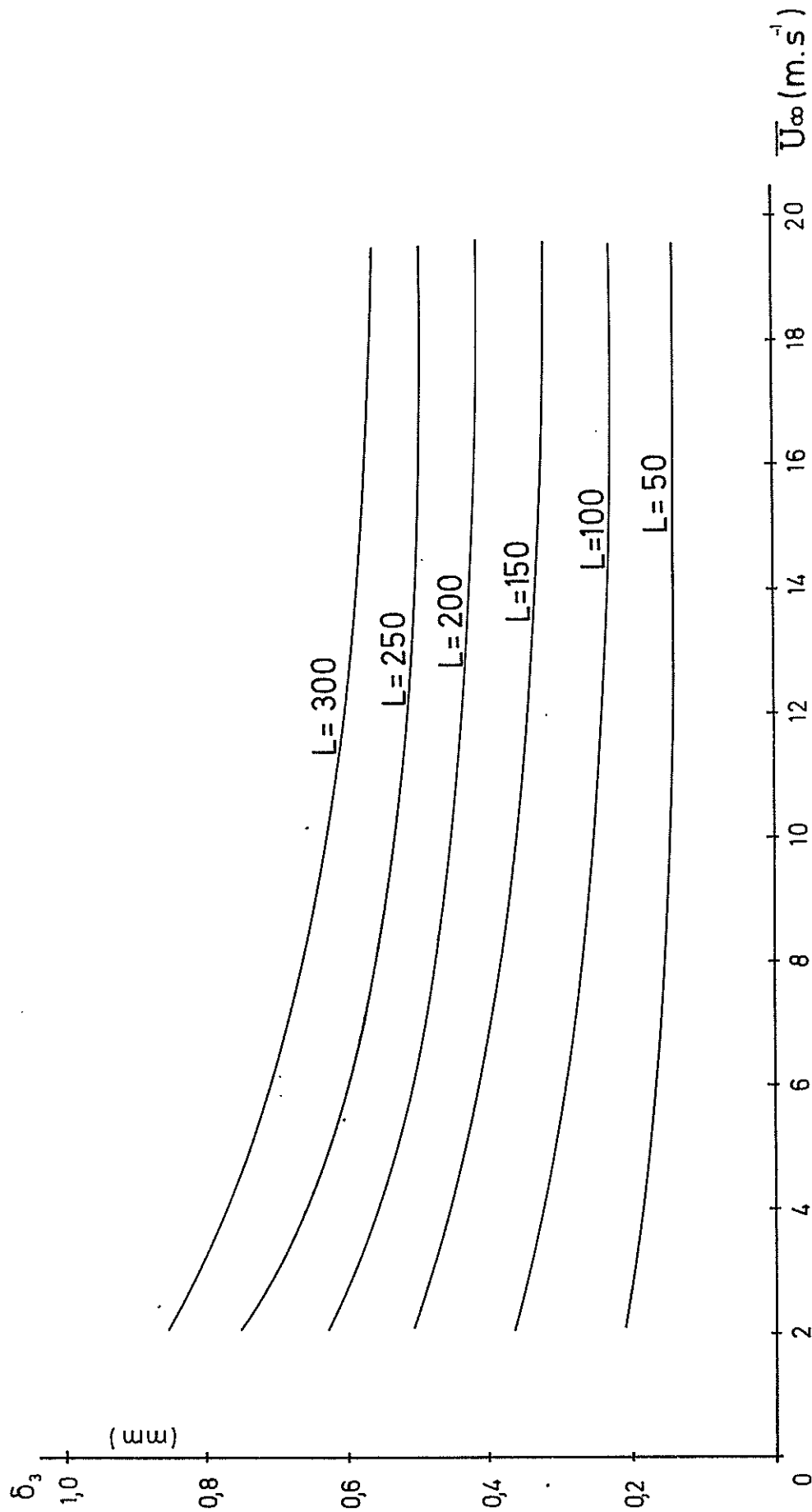


Fig. 5.28 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação da espessura de energia  $\delta_3$  da camada limite turbulenta, em função da velocidade  $\bar{U}_\infty$  do escoamento, para distâncias  $L$ , ao início da lage, compreendidas entre 50 cm e 300 cm.



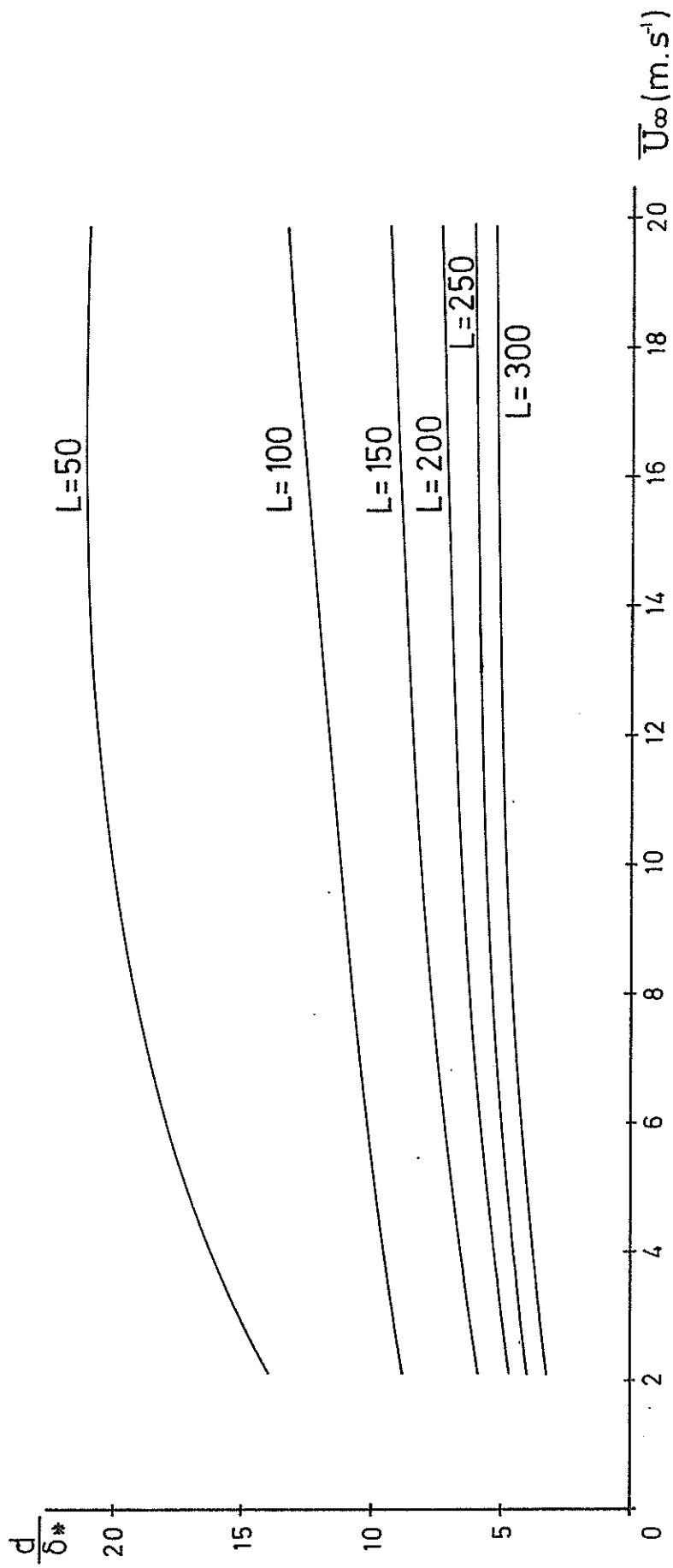


Fig. 5.29 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso. Variação de  $\frac{d}{\delta^*}$  no caso dos transdutores SOUTHERN.

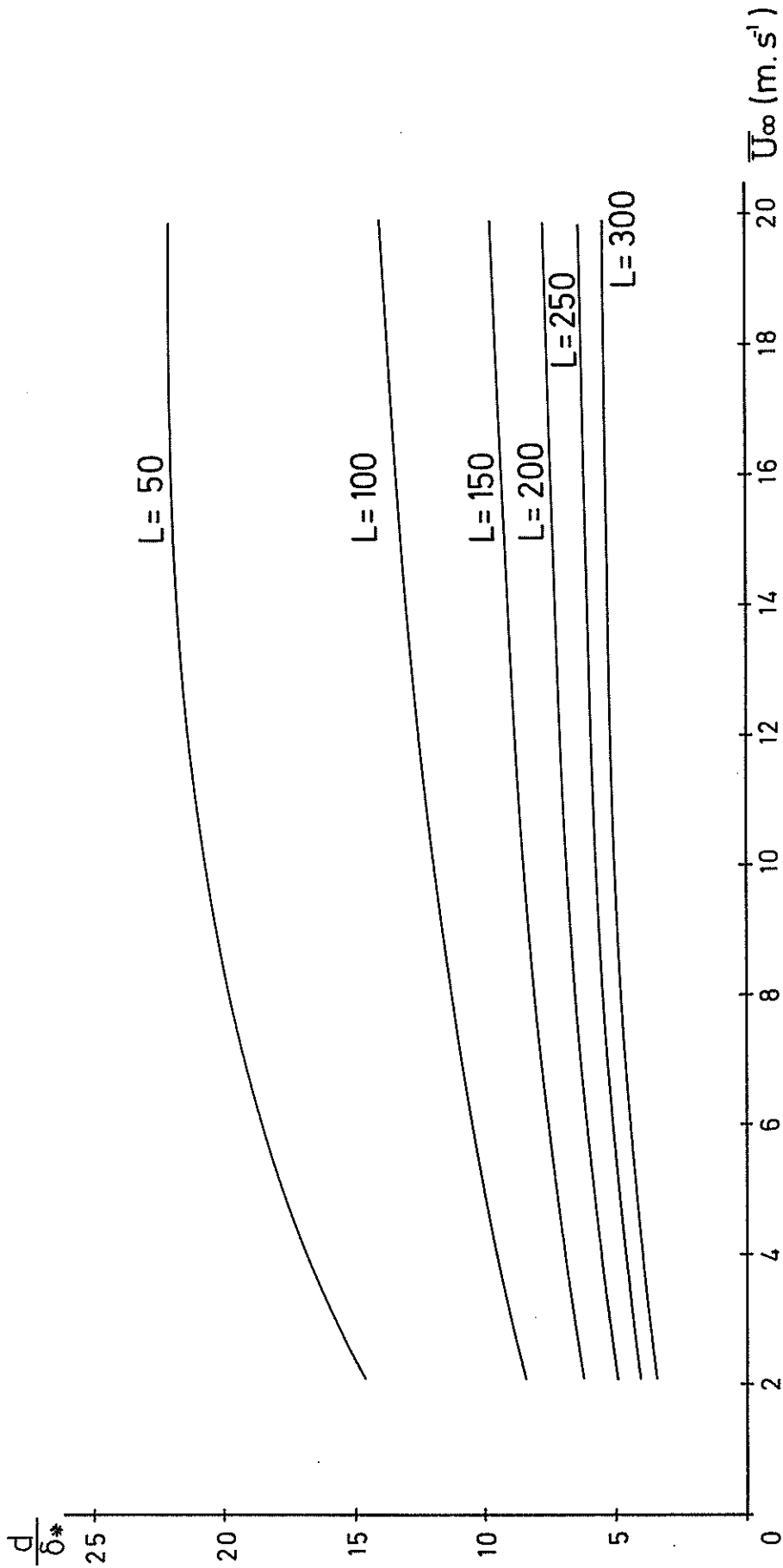


Fig. 5.30 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso.  
 Variação de  $\frac{d}{\delta^*}$  no caso dos transdutores CEC.

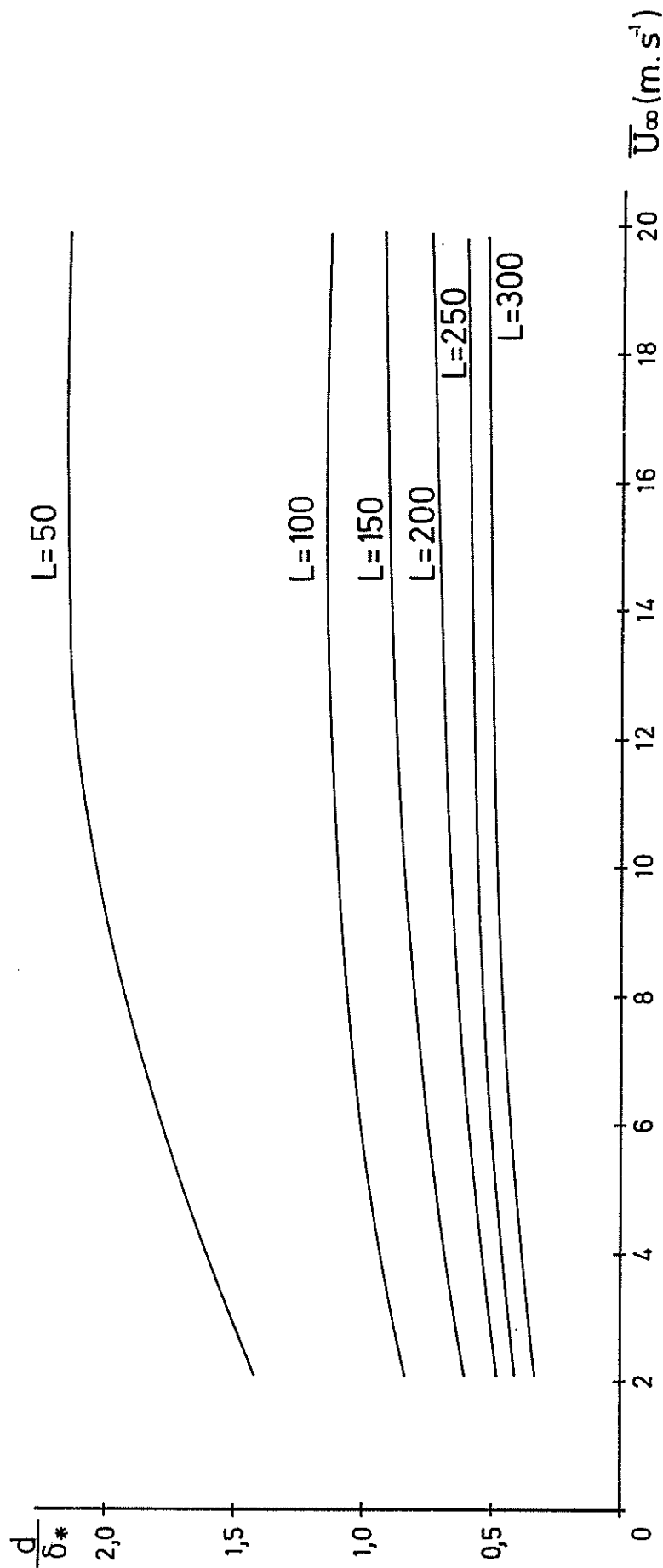


Fig. 5.31 - Escoamentos com superfície livre. Lages planas de betão liso.  
 Variação de  $\frac{d}{\delta^*}$  no caso dos transdutores KULITE.

## CAPÍTULO 6

### MEDITAÇÃO SOBRE O TRABALHO REALIZADO E POSSIBILIDADES FUTURAS DELE RESULTANTES

#### 6.1 - Em relação aos objectivos do presente trabalho

Apesar do texto não conseguir dar uma ideia completa do volume considerável dos estudos que foi necessário efectuar e do trabalho desenvolvido para os concretizar, julgamos, mesmo assim, poder concluir-se, pela sua leitura, que foram amplamente alcançados os objectivos fixados de início.

Com efeito - e apesar das dificuldades inesperadas com que deparámos, quer no aspecto económico quer no oficial (\*) foi possível:

- Construir uma instalação experimental permanente, que permite a realização, simultânea, de escoamentos a altas velocidades, com superfície livre e em pressão.

Criou-se, assim, a infraestrutura necessária para a realização, no Serviço de Hidráulica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de uma gama de ensaios que, até ao momento, não tinham tido possibilidades de concretização.

Mas, esta instalação - que esperamos possa ter contribuído para o enriquecimento do já tão valioso património da Divisão - para além dos ob-

---

(\*)-Em consequência da ampliação das instalações do L.N.E.C., toda a maquinaria das oficinas de mecânica teve que ser deslocada. Este período coincidiu precisamente com uma das fases mais importantes da nossa tese: a da construção de dispositivos, dos mais variados tipos, que permitissem a realização dos ensaios em boas condições.

jectivos fundamentais que justificaram a sua construção, permitirá ainda - em caso de necessidade<sup>(\*)</sup> - a realização de ensaios, em modelo reduzido, bidimensionais.

Por isso pensamos ter realizado um trabalho útil e que talvez justifique, só por si, o investimento que, em média<sup>(\*\*)</sup>, é necessário dispendir com uma tese;

- contribuir para um melhor conhecimento das vias de detecção, de registo e de análise das flutuações turbulentas de pressão.

Como se sabe, a experiência que existia até então no Serviço de Hidráulica - e poderemos, em certa medida, generalizar a outros Laboratórios igualmente importantes - era muito diminuta. E outra situação não seria de esperar, se atendermos às dificuldades existentes na obtenção da aparelhagem capaz de responder às necessidades dos estudos que se faziam sentir neste domínio e que, por isso, aguardavam oportunidade de concretização.

O nosso mérito, se o houve, será talvez o de, uma vez reconhecida a importância de que se revestiam estes estudos, ter procurado encontrar soluções práticas que pudessem constituir um primeiro passo para a resolução efectiva destes problemas. Assim, foi nossa preocupação procurar - sem descurar as já existentes - novas vias de análise que pudessem constituir verdadeiras "ferramentas de trabalho", permitindo a realização de ensaios que implicassem o conhecimento das características das flutuações turbulentas de pressão, quer no domínio das amplitudes, quer no das frequências.

Com o estudo realizado julgamos, pois, ter contribuído:

- para um melhor conhecimento das vantagens e inconvenientes dos transdutores de pressão a serem utilizados em futuros ensaios;

---

(\*)-por julgarmos que seria um mau aproveitamento das suas potencialidades.

(\*\*)-estamos convencidos ser este o nosso caso.

- para a resolução do problema do registo das flutuações turbulentas de pressão no domínio da hidráulica, em particular pela ideia de utilização dum gravador analógico - encarado nas suas diferentes potencialidades - que tornou possível a análise estatística dessas flutuações;

- para a utilização de vias de análise já conhecidas, mas ainda não completamente exploradas, devido, fundamentalmente, à gama de frequências contida nas flutuações turbulentas de pressão e aos problemas que existiam no respeitante à aparelhagem de detecção; e ainda

- para o estudo das possibilidades de utilização de algumas das vias de análise com que hoje em dia é possível contar e que permitem dar uma eficiente resposta às exigências dos ensaios, realizados não apenas com objectivos de pura especulação, mas, principalmente, como resultado da necessidade da resolução de problemas reais.

E ainda:

- realizar ensaios prévios que servissem para a ilustração das vias de análise das flutuações turbulentas de pressão.

Para além dos ensaios realizados com o objectivo de tornar verdadeiramente operacional a instalação, foi possível ainda realizar uma vasta gama de ensaios, que possibilitou a ilustração de algumas das principais vias de análise, como se pôde observar na 2ª. parte do capítulo 4.

Deste modo, foi possível evidenciar algumas das suas vantagens e inconvenientes, permitindo, a quem estiver interessado no estudo destes fenómenos, a escolha da via considerada como mais conveniente.

Consideramos ser este um aspecto particularmente importante do trabalho realizado, uma vez que, no seu início, deparámos com uma quase comple-

ta ausência de dados concretos em que nos pudessemos apoiar.

- realizar já os primeiros estudos sobre as características estatísticas - no domínio das amplitudes e das frequências - das flutuações turbulentas de pressão<sup>(\*)</sup> em superfícies de betão liso e para altas velocidades do escoamento com superfície livre

Embora não constituindo já um objectivo do presente trabalho, realizaram-se ensaios com escoamentos com superfície livre, utilizando lages de betão liso<sup>(\*\*)</sup> que permitiram o estudo das flutuações de pressão no domínio das amplitudes e das frequências.

Igualmente foram realizados ensaios utilizando rugosidades bi e tri-dimensionais (artificialmente conseguidas) que serviram, basicamente, para a resolução dos problemas levantados por este tipo de ensaios, e que se acham descritos, embora com a brevidade imposta pela necessidade da entrega rápida deste relatório, no capítulo 5.

- realizar já os primeiros estudos sobre a influência - no domínio das amplitudes - da pressão média nas características estatísticas das flutuações de pressão, em escoamentos em pressão a alta velocidade

Estes estudos, embora também não constituíssem um objectivo deste trabalho, integram-se nos previstos no plano de investigação elaborado, e contribuíram, duma forma eficaz, para evidenciar o interesse da realização deste tipo de ensaios.

---

(\*) - utilizando, como se acentuou oportunamente, os transdutores capacitivos SOUTHERN.

(\*\*) - utilizando secções (à saída dos convergentes) de 30 cm x 5 cm e de 30 cm x 4 cm.

## 6.2 - Em relação ao prosseguimento dos estudos

É nossa intenção prosseguir na concretização progressiva do plano de investigação definido no capítulo 1, pela realização dos ensaios que constituem a sua 4ª. fase.

Para isso foram já realizados os primeiros estudos e tomadas as medidas que irão possibilitar a realização daqueles ensaios.

Assim, estão já prontas as lages de betão liso (Fot. 5.11 a 5.13) e com rugosidades artificiais bi e tridimensionais, nas quais irão ser aplicados os transdutores CEC de 15 psia e o KULITE de 25 psia. Deste modo, pode afirmar-se já a viabilidade de realização dos estudos:

- da evolução das características estatísticas das flutuações de pressão, ao longo das lages de betão (escoamentos com superfície livre);
- da influência da área do elemento sensível<sup>(\*)</sup> nos respectivos registos (Fot. 5.20);
- da influência da descontinuidade introduzida pela colocação dos transdutores, no caso das lages rugosas.

Ao mesmo tempo reatar-se-á o estudo já iniciado<sup>(\*\*)</sup> no sentido da criação da aparelhagem e das técnicas de ensaio que possibilitem a medição das velocidades na camada limite turbulenta em ambas as secções de ensaio.

Estão também prontas as placas de "plexiglas" de 50 mm de espessura (Fot. 5.9 e 5.10), que irão permitir a realização dos ensaios com escoamen

---

(\*) - estudo idêntico irá ser realizado para o caso de escoamentos em pressão.

(\*\*)- existe já um projecto completo para a construção da aparelhagem que irá permitir a medição das velocidades na camada limite turbulenta, no caso dos escoamentos em pressão.



tos em pressão.

Têm particular interesse os estudos sobre a influência da:

- pressão média  $\bar{P}$ ; e das
- rugosidades  $K_0$ ;  $K_{11}$  e  $K_{22}$ ,

nas características estatísticas apresentadas pelas respectivas flutuações de pressão.

Igualmente se prevê a realização de ensaios sobre a influência da área do elemento sensível dos transdutores que, em certa medida, são do mesmo tipo dos que se prevêem no caso dos escoamentos com superfície livre.

Como já foi salientado no capítulo 1, uma vez conseguida a aparelhagem necessária, proceder-se-á, simultaneamente com o registo das flutuações de pressão, à determinação dos parâmetros característicos das respectivas camadas limites turbulentas.

Poder-se-á estabelecer, assim, a correlação entre estes parâmetros e os resultantes da análise estatística das flutuações de pressão.

Finalmente, tentaremos realizar ensaios em protótipos que possam complementar os realizados em Laboratório.

Para a sua concretização haverá necessidade, como é óbvio, do estabelecimento dum plano de trabalho em colaboração com as entidades interessadas neste tipo de estudos.

A utilização do gravador analógico, cuja aquisição se prevê que possa vir a concretizar-se em breve, contribuirá, certamente, para o preenchimento duma lacuna que, a nosso ver, se verificava neste campo.

Poder-se-ia ter ido mais além?

É bem possível.

Ficamos, todavia, com a consciência tranquila, mesmo sem pensarmos que a obra humana é sempre incompleta e, deste modo, estímulo para o seu desenvolvimento constante.

*Luís Vasconcelos e Meneses Faceira*

Luís Vasconcelos e Meneses Faceira



## B I B L I O G R A F I A

- 1 - ABECASIS, F.M.M.  
"Soleiras descarregadoras. Alguns problemas especiais" - LNEC, Memória n.º 175, Lisboa, 1961
- 2 - ABECASIS, F.M.M.  
"Fluctuations de pression dans une paroi plane en contact avec un écoulement a grande vitesse" - LNEC, Memória n.º 287, Lisboa, 1966
- 3 - ABDUL KHADER; SURESH RAO, H.  
"Cavitation in stilling basin appurtenances" - Proc. 14<sup>e</sup> Congress IAHR, Vol. 5, paper 210 - p.p. 73-76, Paris, 1971
- 4 - ABELEV, A.S.; KARTELEV, B.G.; PLOKHOTNIKOV, I.V.  
"Investigation of relative cavitation resistance of materials and protective coatings and development of measures against cavitation erosion of hydraulic structure elements" - Proc. 14<sup>e</sup> Congress IAHR, Vol. 5, paper 209, pp. 69-72, Paris, 1971
- 5 - ABREU FARO, M.J.  
"Determinação do espectro de potência e da função de autocorrelação a partir de 'Séries no Tempo'" - LNEC, Memória n.º 152, Lisboa, 1960
- 6 - ABREU FARO, M.J.  
"Bases teóricas para determinação experimental do espectro de potência" - LNEC, Memória n.º 171, Lisboa, 1961
- 7 - ABREU FARO, M.J.  
"Fundamento das telecomunicações"  
AEIST, Lisboa, 1965
- 8 - AGOSTINI, L.; BASS, J.  
"Les théories de la turbulence" - Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de L'Air, Paris, 1960

9 - ALMEIDA, J.R.de

"Descarregadores de lâmina livre sobre todo o coroamento de barragens. Dissipação - Restituição nas encostas" - LNEC, Memória nº 323, Lisboa, 1969

10 - ÁLVARES RIBEIRO, A.

"Escoamento turbulento, correlação, probabilidade. Análise Espectral" Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia, Univ. do Porto, 1971

11 - ÁLVARES RIBEIRO, A.

"Descarregadores - Camada limite turbulenta" - 3<sup>as</sup> Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil - II - 2 (tema Português) - 1971

12 - ANTON, I.

"Similitude de cavitation sur les turbines hydrauliques" - Mécanique Appliquée (Bucarest), 9, (5), pp. 943-953, 1964

13 - ARNDT, E.A. and IPPEN, A.T.

"Cavitation near surfaces of distributed roughness" - M.I.T., Report No. 104, 1967

14 - ARNDT, E.A.; IPPEN, A.T.

"Rough surface effects on cavitation inception" - Journal of Basic Engineering, 90, D, Nº 2, pp. 249-261, June, 1968

15 - ARNDT, R.A.; IPPEN, A.

"Turbulence measurements in liquids using an improved total pressure probe" - Journal of Hydraulic Research, Vol. 8, nº. 2, pp.131-159, 1970

16 - ARUTYUNOV, R.A.; GOMOLKO, L.N.

"Cavitation resistance of concrete used in hydraulics engineerings" Hydrotechnical Construction, nº. 10, pp. 890-894, Oct., 1967

17 - BALL, J.W.

"Hydraulic characteristics of gate slots" - ASCE, 85, HY10, Oct.1959

- 18 - BALLOFFET, A.  
 "Pressures on spillway flip buckets"  
 Part I. Proc. A.S.C.E. Vol. 87, No HY5, pp. 87-98, Sept. 1961
- 19 - BATCHELOR, G.K.  
 "The theory of homogeneous turbulence"  
 Cambridge University Press. 1970
- 20 - BATCHELOR, G.K.  
 "An introduction to fluid dynamics"  
 Cambridge University Press. 1970
- 21 - BEAUFRÈRE, J.  
 "Description et définition des diverses figures de cavitation observées dans les machines et conduits hydrauliques"  
 La Houille Blanche, n<sup>o</sup>. 4, pp. 521-536, Sept. 1962
- 22 - BECERRIL, E.  
 "Hidromecánica"  
 Editorial Dossat, S.A. - Madrid, 1960
- 23 - BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G.  
 "Random data: analysis and measurement procedures"  
 Wiley - Interscience, 1971
- 24 - BENSON, B.W.  
 "Cavitation inception on three dimensional elements" DTMB, Ref.2104,  
 1966
- 25 - BERRYHILL, R.H.  
 "Experience with prototype energy dissipators" Part I, ASCE-89-HY3 -  
 pp. 181-201, May, 1963
- 26 - BINDEL, S.  
 "Cavitation des hélices marines. Comparaison entre le modèle et le réel". La Houille Blanche, n<sup>o</sup>. 2, 3, pp. 177-187, 1968

- 27 - BIRKOFF, G. and ZARANTONELLO, E.H.  
 "Wakes, jets and cavities". Academic Press - New York, 1957
- 28 - BLACKMAN, R.B.; TUKEY, J.W.  
 "The measurement of power spectra". Dover Publications, Inc. 1958
- 29 - BOBBE, P.C.  
 "Dependence of cavitation intensity on water temperature in a flow device". Cavitation Forum, ASME, pp. 53-54, 1970
- 30 - BOLOGA, M.K. et all.  
 "Cavitation and erosion development". Transactions Symposium IAHR, Part 1 - H2- pp. 1-9, Stockholm, 1970
- 31 - BONNIN, J.  
 "Début de cavitation dans les liquides différents". E.D.F. - Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches - Serie A, n<sup>o</sup>. 4, pp. 53-72, 1970
- 32 - BORDEN, A.  
 "Prediction of cavitation inception speeds on rough hydrodynamic bodies" - Proc. Sixth Symp. on Naval Hydrodyn., Washington D.C., Paper 8, 1966
- 33 - BOUVARD, M.; DUMAS, H.  
 "Application de la méthode de fil chaud à la mesure de la turbulence dans l'eau". 1<sup>er</sup> partie - La Houille Blanche - n<sup>o</sup>. 3, pp.257-270, 1967. 2<sup>eme</sup> partie-La Houille Blanche-n<sup>o</sup> 7, p.p.723-734, 1967
- 34 - BOWERS, C.E. and TSAI, F.Y.  
 "Fluctuating pressures in spillway stilling basins". ASCE, 96, HY6, pp. 2071-2079, Nov. 1969
- 35 - BRADSHAW, P.  
 "Irrotational fluctuations near a turbulent boundary layer". J.Fluid Mech, Vol. 27, pp. 209-230, part 2, 1967

- 36 - BRADSHAW, P.  
"Experimental fluid mechanics". The Commonwealth and International Library-Pergamon Press - 1970
- 37 - BRADSHAW, P.  
"A introduction to turbulence and its measurement". The Commonwealth International Library - Pergamon Press - 1970
- 38 - BRODKEY, R.S.  
"The phenomena of fluid motions". Addison - Wesley Publishing Company
- 39 - BROWN, F.R.  
"Cavitation in hydraulic structures: Problems created by cavitation phenomena". ASCE, 89, HY1, pp. 99-115, Jan. 1963
- 40 - BRUNTON, J.H.  
"Deformation of solids by impact of liquids at high speeds". ASTM Special Technical Publication, No. 307, pp. 83-98, 1961
- 41 - BULL, M.K.  
"Wall-pressure fluctuations associated with subsonic turbulent boundary layer flow". J. Fluid Mech., Vol. 28, Part A, pp. 719-754, 1967
- 42 - BURSALI, T.S.  
"Bottom shear measurements in an open channel flow". 12<sup>th</sup> Congress IAHR, pp. A24.1-8, 1967
- 43 - CALLIS, G.T.  
"A suggested mechanism of erosion damage". National Physical Laboratory, Cavitation in Hydrodynamics, pp. 18f.1-11, London, 1956
- 44 - CANAVELIS, R.  
"Recensement et examen critique des méthodes de détermination de la résistance à l'érosion de cavitation". La Houille Blanche, n<sup>o</sup>. 5/A, pp. 603-618, Sept., 1964
- 45 - CANAVELIS, R.  
"Jet impact and cavitation damage". Trans.ASME, Journal of Basic Engineering, 90D, n<sup>o</sup>. 3, pp. 355-367, Sept., 1968



- 46 - CANAVELIS, R.  
"Analyse du mécanisme de l'érosion de cavitation". La Houille Blanche  
II-III, pp. 189-196, 1968
- 47 - CASEAU, P.  
"Évolution d'une bulle au voisinage de l'équilibre.-Théorie linéarisée".  
7<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique S.H.F. - "Bulles et Gouttes", 1962
- 48 - CASSIDY, J.J.  
"Design spillway crests for high-head operation". ASCE - Vol 96-HY3,  
pp. 745-753, Mar., 1970
- 49 - CHAO, J.L. and SANDBORN  
"Study of static pressure along a rough boundary". ASCE, 91, HY2,  
pp. 193-204, Mar., 1965
- 50 - CHEVALIER, J.  
"Recensement, description et examen critique des méthodes d'essais de  
cavitation sur modèle réduit". La Houille Blanche, n<sup>o</sup> 4, pp. 537-552,  
1962
- 51 - CHINCHOLLE, L.  
"Étude de l'écoulement d'une émulsion". La Houille Blanche  
première partie - n<sup>o</sup> 5, pp. 515-529, 1967;  
deuxième partie - n<sup>os</sup> 2/3, pp. 197-212, 1968
- 52 - CHINCHOLLE, L.  
"L'effect fusée et l'érosion mécanique de cavitation". Bull. Techn.  
de le Suisse Romande, 94, 19, pp. 269-279 - Sept., 1968
- 53 - CHIVERS, T.C.  
"Effect of air content on advanced cavitation". The Engineer, 226,  
n<sup>o</sup>. 5873, pp. 250-254, Aug. 1968
- 54 - CHUANG, H.; CERMAK, J.E.  
"Turbulence measured by electrokinetic transducer". ASCE, Vol. 91,  
HY6, pp. 1-8, Nov. 1965

- 55 - CLARK, J.A.  
"A study of incompressible turbulent boundary layer in channel flow"  
Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering; pp. 455-468,  
Dec., 1968
- 56 - CLYDE, C.; EINSTEIN, H.A.  
"Fluctuating total head in a viscous sublayer". ASCE, Vol. 92, EM2,  
pp. 251-275, Apr., 1966
- 57 - COCKRELL, D.J.  
"Techniques for turbulence measurement". University of Leicester,  
Engineering Department, Report 71 - 1971
- 58 - COLGATE, D.  
"Cavitation damage of roughned concrete surfaces". Proc. ASCE, Paper  
2241, 85, HY11, Oct., 1959
- 59 - CORMAULT, P.  
"Incidence des teneurs en gaz de l'eau sur la mesure des bruit comme  
critère d'apparition de la cavitation". 7<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique  
S.H.F. - "Bulles et Gouttes" - Chatou - 1962
- 60 - CORMAULT, P.  
"Contribution à l'étude de l'influence des teneurs en gaz de l'eau  
sur la cavitation dans les turbomachines hydrauliques". Bull. du Cen  
tre de Recherches et d'Essais de Chatou, Suppl. au n<sup>o</sup> 2, p.1-1962
- 61 - COUPRY, G.  
"A new method for analysing random data". Office National D'études  
et de Recherches Aérospatiales Chantillon, France
- 62 - DAILY, J.W.  
"Cavitation phenomena in hydraulic systems". Journal of the Boston  
Society of Civil Engineering (Boston) 52(3), pp. 195-221, July, 1965
- 63 - DAILY, J.W.; JOHNSON, V.E.  
"Turbulence and boundary layer effects on the inception of cavitation  
from gas nuclei". M.I.T., Hydrodynamics Laboratory, Report No.21, July, 1955

- 64 - DAILY, J.W.; LIN, J.D.  
 "The distribution of the mean static pressure in turbulent boundary layers in relation to inception of cavitation". MIT, Technical Report No. 34, June, 1959
- 65 - DAILY, J.W.; LIN, J.D. and BROUGHTON, R.S.  
 "Turbulence and static pressure in relation to inception of cavitation". Ninth Convention. IAHR - p.p. 110-122, Dubrovnik, 1961
- 66 - DANIEL, F,  
 "Notion de pression critique en cavitation développée". La Houille Blanche, n<sup>o</sup>. 6, 25, pp. 577-580 - 1970
- 67 - DAVIES, R.M.; TREVENA, D.H.; REES, N.J.M.; LEWIS, G.M.  
 "The tensile strength of liquids under dynamics stressing". National Physical Laboratory. Cavitation in Hydrodynamics, pp. 5p.1-19 London, 1956
- 68 - DeCORSO, S.M.; KOTHMANN, R.E.  
 "Erosion by liquid impact". ASTM - Special Technical Publication, n<sup>o</sup> 307, pp. 32-45, 1961
- 69 - DESTENAY, G.; BERNARD, J.  
 "Quelques exemples de dégradation des bétons par cavitation dans les ouvrages hydroélectriques". La Houille Blanche II-III, pp. 167-176, 1968
- 70 - DODU, J.; DUPORT, J.; MICHEL, J.M.  
 "Le tunnel hydrodynamique de l'Université de Grenoble". La Houille Blanche, 23, n<sup>o</sup>. 8, pp. 694-702, 1968
- 71 - DOL'NIKOV, O.E.  
 "Influence des vibrations sur la cavitation". Chatou, Electricité de France. Service des Études Hydrauliques, s.d.
- 72 - EDEL, U.U.  
 "The experimental research of cavitation in hydro-turbines". 13<sup>th</sup> Congress IAHR, Vol. 5-A, pp. 163-165 - Japan, 1969

- 73 - EISENBERG, P.  
"A critical review of recent progress in cavitation research". National Physical Laboratory. Cavitation in Hydrodynamics, London, pp. 1p. 1-16 - 1956
- 74 - EISENBERG, P.  
"Modern developments in the mechanics of cavitation". - Applied Mechanics Reviews, Vol. 10, no. 3, pp. 85-89, Mar., 1957
- 75 - ELLIS, A.T.  
"Techniques for pressure pulse measurements and high-speed photography in ultrasonic cavitation". National Physical Laboratory. Cavitation in Hydrodynamics, London, pp. 8p.1-31, 1956
- 76 - ENGEL, O.G.  
"Impact of liquid drops". ASTM - Special Technical Publication, no. 307, pp. 3-16, 1961
- 77 - FINNIE, I.  
"Erosion by solid particles in a fluid stream". ASTM - Special Technical Publication, no. 307, pp. 70-82, 1961
- 78 - FISHER, M.J.; DAVIES, P.O.A.L.  
"Correlation measurements in a non-frozen pattern of turbulence". J. Fluid Mech. Vol. 18 - part 1, pp. 97-116, 1964
- 79 - GALBRAITH, C.C.; CLARK, R.R.  
"Bonneville dam concrete after six years". Engineering News-Record pp. 333-335, Mar., 1943
- 80 - GALPERIN, R.S.; et al.  
"Cavitation in elements of hydraulic structures and methods of controlling it". Hydrotechnical Construction, no. 8, 1971
- 81 - GALPERIN, R.; et al.  
"Hydraulic structures operation under cavitation conditions". Proc. 14<sup>e</sup> Congress IAHR, Paris, Vol. 5, paper 203, pp. 45-48, 1971

- 82 - GRAVETO, V.M.N.  
"Correlations between turbulence parameters and mean flow characteristics in fluid flow". M.I.T., 1967
- 83 - GUITON, P.  
"Cavitation dans les pompes". La Houille Blanche, (6), pp. 701-727, 1962
- 84 - HAMMITT, F.G.  
"Observations on cavitation damage in a flowing system". Transactions of the ASME, Series P, 85, (3), pp. 347-359, Sept., 1963
- 85 - HAMMITT, F.G.  
"Collapse of a spherical bubble in a pressure gradient". ASME, Cavitation Forum, pp. 44-46, 1970
- 86 - HINZE, J.O.  
"Turbulence. An introduction to the mechanism and theory". McGraw-Hill, Inc.-New York, 1959
- 87 - HOLL, J.W.  
"The effect of surface irregularities on incipient cavitation". Penn. State Univ., Ordnance Res. Lab., TM 53410-03, 1958
- 88 - HOLL, J.W.  
"The inception of cavitation on isolated surface irregularities". Transactions of the ASME, Series D, 82, (1), pp. 169-183, 1960
- 89 - HOLL, J.W.  
"An effect of air content on the occurrence of cavitation". Transactions of the ASME, 82, (4), pp. 941-946, 1960
- 90 - HOLL, J.W.  
"The estimation of the effect of surface irregularities on the inception of cavitation". ASME, Symposium on Cavitation in Fluid Machinery, pp. 3-15, G.M. Woods et al. (eds)., 1965

- 91 - HOLL, J.W.  
 "Nuclei and cavitation". Journal of Basic Engineering. Transactions of the ASME. Vol. 92, No. 4, pp. 681-688, Dec., 1970
- 92 - HOLL, J.W.; TREASTER, A.L.  
 "Cavitation hysteresis". Journal of Basic Engineering - Trans. of the A.S.M.E., pp. 199-212, Mar., 1966
- 93 - HOLL, J.W.; WISLICENUS, G.F.  
 "Scale effects on cavitation". Journal of Basic Engineering. Transactions of the ASME, Series D, Vol. 83, No.3, pp. 385-398, Sept., 1961
- 94 - HOLMAN, J.P.  
 "Experimental methods for engineers". McGraw-Hill, Inc. - New York - 1966
- 95 - HUGUENIN, R.  
 "Influence des divers types de cavitation sur les bruits, érosions et performances des machines hydrauliques". La Houille Blanche, 3, pp. 363-376, 1964
- 96 - HUGUENIN, R.  
 "Comparaison entre cavitation sur modèle et sur prototype pour les turbines et les hélices". Proc. 14<sup>e</sup> Congress I.A.H.R., Vol. 5, paper 222, pp. 135-140, Paris, 1971
- 97 - HWANG; LI-SAN; LAURSEN, E.M.  
 "Shear measurement techniques for rough surface". ASCE, Vol. 89, HY2, pp. 19-37, Mar., 1963
- 98 - INOZEMTSEV, Yu.P.  
 "Cavitation destruction of concrete and protective facings under natural conditions". Hydrotechnical Construction, n<sup>o</sup>. 1, pp. 35-42, Jan., 1969
- 99 - IPPEN, A.T.; TANKIN, R.S.; RAICHLIN, F.  
 "Turbulence measurement in free surface flow with an impact tube-pressure transducer combination". M.I.T. - Hydrodynamics Laboratory, Technical Report, n<sup>o</sup>. 20, 1955
- LNEC - Proc.65/11/4403

- 100 - JANEIRO BORGES, A.R.  
"O túnel aerodinâmico do Laboratório Nacional de Engenharia Civil".  
LNEC, Memória nº. 319, Lisboa, 1968
- 101 - JANEIRO BORGES, A.R.  
"Sobre a influência da constituição do vento natural na aerodinâmica das construções". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1969
- 102 - JELER, V.  
"Recherches sur l'aération des zones cavitationnaires dans les galeries de vidange de fond des barrages". Proc. 14<sup>e</sup> Congress IAHR, Vol. 5, paper 217, pp. 109-114, Paris, 1971
- 103 - JENKINS, G.M.; WATTS, D.G.  
"Spectral analysis and its applications". Holden-Day, 1969
- 104 - JOHNSON, V.E.Jr.  
"Mechanics of cavitation". ASCE, 89, HY3, pp. 251-275, May, 1963
- 105 - KEIR, G.; UNNY, T.E.; and HILL, H.M.  
"Pressure fluctuations on submerged sluice gate". ASCE, 95, HY6, pp. 1781-1791, Nov., 1969
- 106 - KENN, M.J.  
"Cavitating eddies and their incipient damage to concrete". Civil Engineering and Public Works Review, pp. 1404-1405, Nov., 1966
- 107 - KENN, M. J.  
"Protection of concrete from cavitation damage". Proc. of The Institution of Civil Engineering - Vol. 49, pp. 75-79, May, 1971
- 108 - KERR, S.L. and ROSENBERG, K.  
"An index of cavitation erosion by mean of radioisotopes". ASME, 20, (6), pp. 1308-1314, 1958
- 109 - KHINCHIN, A.I.  
"Mathematical foundations of statistical mechanics". Dover Publications, Inc. - New York, - 1949

- 110 - KHOVKO, V.N.  
 "Cavitation erosion of turbines in the lower Dnieper hydroelectric station". Hydrotechnical Construction, n<sup>o</sup>. 6, pp. 537-542, June, 1969
- 111 - KNAPP, R.T.  
 "Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation damage". Trans. ASME, pp. 1045-1054, Oct., 1955
- 112 - KNAPP, R.T.  
 "Further studies of the mechanics and damage of fixed type cavities"  
 - National Physical Laboratory - Cavitation in Hydrodynamics, London, pp. 19p.1-14, 1956
- 113 - KNAPP, R.  
 "Cavitation scale effect". Proc. VII Congress of IAHR, Lisboa, 1957
- 114 - KNAPP, R.T.; DAILY, J.W.; HAMMITT, F.G.  
 "Cavitation". McGraw-Hill, Inc., New York, 1970
- 115 - KNAPP, R.T.; HOLLANDER, A.  
 "Laboratory investigation of the mechanism of cavitation". Transactions of the ASME, pp. 419-435, July, 1948
- 116 - LANDAU, L.; LIFCHITZ, E.  
 "Mécanique des fluides". Editions MIR, Moscow, 1971
- 117 - LEHMAN, A.F.; YOUNG, J.O.  
 "Experimental investigations of incipient and desinent cavitation"  
 Journal of Basic Engineering. Trans. ASME, Series D, Vol. 86, No. 2, pp. 275-284, June, 1964
- 118 - LEITH, W.C.; McILQUHAM, W.S.  
 "Accelerated cavitation erosion and sand erosion". ASTM - Special Technical Publication, n<sup>o</sup>. 307, pp. 46-69, 1961
- 119 - LEMOINE, R.  
 "Cavitation sur les seuils deversants". Proc. 6<sup>th</sup> Congress of IAHR  
 - Vol. 3, c22-1/8, The Hague, 1955



- 120 - LEMOS, F.O.  
"A instabilidade da camada limite". LNEC, Lisboa, 1965
- 121 - LEMOS, F.O.; PINTO DA SILVA, D.  
"Vidanges de fond débouchant dans des bassins d'amortissement.  
L'érosion du béton". LNEC, Memória nº 292, Lisboa, 1966
- 122 - LENCASTRE, A.  
"Descarregadores de lâmina livre". LNEC, Memória nº. 174, Lisboa, 1961
- 123 - LISENKO, P.E.; BEDEV, V.D.; CHEPAJKIN, G.A.  
"Decrease in cavitation erosion intensity for high-head gates using  
the supercavitating structures". Proc. 14<sup>e</sup> Congress IAHR, Vol. 5,  
paper 202, pp. 41-44, Paris, 1971
- 124 - LOCHER, F.A.  
"On the role of cavitation in the flow-induced vibration of high-  
-head gates". Cavitation Forum. A.S.M.E., pp. 28-30, 1970
- 125 - LOWSON, M.V.  
"Pressure fluctuations in turbulent boundary layers". NASA-TND, 3156
- 126 - LUMLEY, J.  
"Stochastic tools in turbulence". Academic Press. Londres, 1970
- 127 - LYSNE, D.K.; GUTTORMSEN, O.  
"Air demand in high head regulated outlet works". Proc. 14<sup>e</sup> Congress  
I.A.H.R., Vol. 5, pap. 211, pp. 77-80, Paris, 1971
- 128 - MACAGNO, E.O.  
"Turbulencia". Universidad Central de Venezuela - Facultad de Inge-  
niería - Departamento de Hidráulica, 1966
- 129 - MACAGNO, E.O.  
"Computational study of accelerated flow in a two-dimensional expan-  
sion". Journal of Hydraulic Research, Vol. 8, nº. 1, pp. 41-64, 1970

- 130 - MAGGIOLO, O.J.; GUARGA, R.; BORGHI, J.  
 "A new method for measuring shear stresses in a hydraulically rough flow". J. of Hydr. Res., Vol. 8, n<sup>o</sup>. 2, pp. 189-217, 1970
- 131 - McQUIVEY, R.S.; RICHARDSON, E.V.  
 "Some turbulence measurements in open-channel flow". ASCE, Vol. 95, HY1, pp. 209-223, Jan., 1969
- 132 - MENDES DE CARVALHO, M.  
 "Simulação da agitação irregular - Técnicas matemáticas". LNEC, tese para especialista, 1973
- 133 - MENDES DE CARVALHO, M.; RAMOS, F.S.; MORAES, C.C.  
 "Spectral computations on pressure wave gauge records". LNEC, Memória n<sup>o</sup>. 391, Lisboa, 1971
- 134 - MICHEL, J.M.  
 "Étude expérimentale d'écoulements à cavités ventilées". 5<sup>e</sup> Colloque d'Aérodynamique Appliquée - Nov., 1968
- 135 - MINAMI, I.; AKI, S.  
 "A consideration on the supervision of a concrete arch dam in the flood time". Dixième Congress des Grands Barrages. Montreal, Q38, R8, pp. 113-138, 1970
- 136 - MÜLLER, A.; GYR, A.  
 "An explanation of the pressure minima which causes cavitation by means of a vortex model". Swiss Federal Institute of Technology, 1970
- 137 - NARAYANAN, R.; REYNOLDS, A.J.  
 "Pressure fluctuations in reattaching flow". ASCE, 94, HY6, 1968
- 138 - NAUDASCHER, E.; FARELL, C.  
 "Unified analysis of grid turbulence". ASCE, Vol. 96, EM2, pp. 121-141, Apr., 1970
- 139 - NAUDÉ, C.F. and ELLIS, A.T.  
 "On the mechanism of cavitation damage by non hemispherical cavities collapsing in contact with a solid boundary". ASME, 83, Series D, (4), pp. 648-656, 1961

- 140 - NECE, R.E.; GIVLER, C.A.; DRINKER, P.A.  
"Measurement of boundary shear stress in an open channel curve with a surface Pitot tube". M.I.T. - Hydrodynamics Laboratory, Technical Note nº. 6, Aug., 1959
- 141 - NOVAIS BARBOSA, J.  
"Nota sobre a definição de valores médios em escoamentos turbulentos". Revista da Faculdade de Engenharia, Univ. do Porto, 1970
- 142 - NOVAIS BARBOSA, J.  
"Funções de correlação. Sua utilização em escoamentos turbulentos". Revista da Faculdade de Engenharia, Univ. do Porto, 1971
- 143 - NOVAIS BARBOSA, J.  
"Registo de flutuações de pressão em escoamentos turbulentos". Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Laboratório de Hidráulica, Maio, 1971
- 144 - NOVAIS BARBOSA, J.  
"Turbulência hidráulica. Análise estatística de flutuações". Laboratório de Hidráulica, Faculdade de Engenharia, Univ. do Porto, 1972
- 145 - NUMACHI, F.; OBA, R. and CHIDA, J.  
"Effect of surface roughness on cavitation performance of hydrofoils". A.S.M.E., Vol. 87, Ser. D, No. 2, 1965
- 146 - ONIPCHENKO, G.F.  
"Lock gates for high heads". Hyrotechnical Construction, nº. 9, pp. 822-825, Sept., 1969
- 147 - PAI, S.I.  
"Viscous flow theory". II-Turbulent flow. D. Van Nostrand Company, Inc., 1957
- 148 - PANOVKO, Y.  
"Elements of the applied theory of elastic vibration". MIR Publications, Moscow, 1971

- 149 - PERKINS, F.E.; EAGLESON, P.S.  
"The development of a total head tube for high frequency pressure fluctuations in water". M.I.T.-Hydrodynamics Laboratory - Technical Note no. 5, July, 1959
- 150 - PLESSET, M.S. and CHAPMAN, R.B.  
"Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary". J. Fluid Mech, Vol. 47, 2, pp. 283-290, 1971
- 151 - PLANDTL, L.; TIETJENS, O.G.  
"Fundamentals of hydro - and aeromechanics". Dover Publications, Inc., 1934
- 152 - PRANDTL, L.; TIETJENS, O.G.  
"Applied hydro-and aeromechanics". Dover Publications, Inc., 1934
- 153 - RAO, B.C.S.; RAO, N.S.L.; SEETHARAMIATH, K.  
"Cavitation erosion studies with Venturi and rotating disk in water". Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering, pp. 563-579, Sept., 1970
- 154 - RAO, B.C.S.; RAO, N.S.L.; SEETHARAIHAH, K.  
"Selecting metals and alloys to resist cavitation damage". Water Power, pp. 136-138, Apr., 1971
- 155 - RAO, N.S.G. and THIRUVENGADAM, A.  
"Prediction of cavitation damage". ASCE, 87, HY5, pp. 37-62, 1961
- 156 - RASMUSSEN, R.E.H.  
"Some experiments on cavitation erosion in water mixed with air". National Physical Laboratory - Cavitation in Hydrodynamics, London, pp. 20p.1-25, 1956
- 157 - RASMUSSEN, R.E.H.  
"Résultats d'expériences relatives à l'influence d'une admission d'air dans les écoulements soumis à la cavitation". 1<sup>e</sup> partie-Revue Générale de L'Hydraulique, n<sup>o</sup> 56, pp. 59-73. 2<sup>e</sup> partie-Idem, n<sup>o</sup> 57-pp124-143

158 - RATA, A.

"Le détermination acoustique du seuil de cavitation. Méthodes et appareillages utilisées". 7<sup>e</sup> Journées de L'Hydraulique, S.H.F.. "Bulles et Gouttes", Chatou, 1962

159 - RATA, A.

"Recensement et examen critique des méthodes d'observation de la cavitation par voie acoustique". La Houille Blanche, 6, pp. 681-1963

160 - RAYLEIGH, Lord

"On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity". Philosophical Magazine, Series 4, Vol. 34, pp. 94-98, 1917

161 - RESCH, F.J.

"Hot-film turbulence measurements in water flow". ASCE, Vol. 96, HY3, pp. 787-800, Mar., 1970

162 - RHEINGANS, W.J.

"Cavitation in hydraulic turbines". ASTM - Special Technical Publication, n<sup>o</sup>. 307, pp. 17-31, 1961

163 - RICHARDSON, E.V.; McQUIVEY, R.S.

"Measurement of turbulence in water". ASCE, Vol. 94, HY2, pp. 411-430, Mar., 1968

164 - ROBERTSON, J.M.

"Water tunnels for hydraulic investigations". Transactions of the ASME, Vol. 78, n<sup>o</sup>. 1, pp. 95-169, 1956

165 - ROBERTSON, J.M.

"Cavitation in hydraulic structures; scale effects involved in cavitation experiments". Paper ASCE, 89, HY3, Part. 1, pp. 167-180, May, 1963

- 166 - ROUSE, H.  
"Engineering hydraulics". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950
- 167 - ROUSE, H.  
"Cavitation in the mixing zone of a submerged jet". La Houille Blanche, n<sup>o</sup>. 1, pp. 9-19, 1953
- 168 - ROUSE, H.; INCE, S.  
"History of hydraulics". Dover Publications, Inc., 1957
- 169 - ROUSE, H.; JEDZDINSKY, V.  
"Fluctuation of pressure in conduit expansions". ASCE, 92, HY3, pp. 1-12, May, 1966
- 170 - ROZANOV, N.P.; LYSENKO, P.E.; BEDEV, V.D.; KAVESHNIKOV, A.T.; CHEPAIKIN, G.A.  
"Use of supercavitating elements of spillway hydraulic structures". Hydrotechnical Construction, n<sup>o</sup>. 8, pp. 733-737, Aug., 1971
- 171 - SAYRE, W.W.; ALBERTSON, M.L.  
"Roughness spacing in rigid open channels". ASCE, Vol. 87, HY3, pp. 121-150, May, 1961
- 172 - SCHLICHTING, H.  
"Boundary-layer theory". Sixth edition - McGraw-Hill, Inc., 1968
- 173 - SELLIN, R.H.J.  
"Some experimentals with hot-film anemometer in water". Journal of Hydraulic Research, Vol. 8, n<sup>o</sup>. 1, pp. 71-88, 1970
- 174 - SERAFINI, J.  
"Wall pressure fluctuations and pressure velocity correlations in a turbulent boundary layer". NASA-R 165
- 175 - SHALNEV, K.K.  
"Cavitation due to surface roughness". Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, n<sup>o</sup>. 2, pp. 206-220, 1951

- 176 - SHALNEV, K.K.; SHALOBASON, I.A.  
 "Influence of magnetic field on cavitation and erosion". IAHR, Symposium Stockholm, Part 1, paper H1, 1970
- 177 - SHTERN, E.P.; TRIFEL, M.S.; GLIKSHTEIN, E.D.  
 "Electrochemical investigations of corrosion - cavitation damage on low-alloy steels". Hydrotechnical Construction, no. 4, pp. 316-323, Apr., 1969
- 178 - SICCARDI, F.  
 "Fenomeni di cavitazione incipiente". Università di Genova
- 179 - SIMÕES, F.E.R.  
 "Determinação do espectro de potência a partir de registos cronológicos". Instituto Superior Técnico, Lisboa, Março, 1972
- 180 - SPIEGEL, M.R.  
 "Estatística". Coleção Schaum. Rio de Janeiro, 1971
- 181 - STERN, J.; BARBEYRAL, J.de; POGGI, R.  
 "Méthodes pratiques d'étude des fonctions aléatoires". DUNOD, 1967
- 182 - STRASBERG, M.  
 "Undissolved air cavities as cavitation nuclei". National Physical Laboratory - Cavitation in Hydrodynamics, London, pp. 6p.1-13, 1956
- 183 - STREETER, V.L.  
 "Fluid mechanics". Fourth Edition. McGraw-Hill, Inc., 1966
- 184 - TATINCLAUX, J.-C.  
 "Pressure fluctuations in the viscosity of normal walls of variable thickness". University of Iowa, 1966
- 185 - THIRUVENGADAM, A.  
 "A unified theory of cavitation damage". Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Series D, Vol. 85, no. 3, pp. 365-376, Sept., 1963

- 186 - THIRUVENGADAM, A.  
"Recent investigation on cavitation damage at HYDRONAUTICS, Incorporated, U.S.A.". Modern Trends in Hydraulic Engineering Research, Vol. 2 - Central Water and Power Research Station. POONA. INDIA, pp. 76-88, 1966
- 187 - THIRUVENGADAM, A.  
"Cavitation erosion". Applied Mechanics Reviews, Vol. 24, no. 3, pp. 245-253, Mar., 1971
- 188 - TOPCHIASHVILI, M.I.; ANDRIANOV, K.A.; SHALNEV, K.K.  
"Use of polymeric materials for protection against cavitation erosion". IAHR, Symposium Stockholm, Part 1, paper H5, 1970
- 189 - TRACY, H.J.  
"Turbulent flow in a three-dimensional channel". ASCE, Vol. 91, HY6, pp. 9-35, Nov., 1965
- 190 - TSAI, F.Y. and BOWERS, C.E.  
"Fluctuating pressures in spillway stilling basins". ASCE, 95, HY6, pp. 2071-2079, Nov., 1969
- 191 - TULLIS, J.P.  
"Control of flow in closed conduits". Fort Collins, Colorado State University, 1971
- 192 - TULLIS, J.P.; HOGAN, R.A.  
"Predicting cavitation in valves". Symposium Stockholm, IAHR, Transactions - Part 1. 65-pp. 1-10, 1970
- 193 - TULLIS, J.P.; MARSHNER, B.W.  
"Review of cavitation research on valves". ASCE, Vol. 94, HY1, pp.1-16, Jan., 1968
- 194 - TULLIS, J.P.; SKINNER, M.M.  
"Reducing cavitation in valves". ASCE, Vol. 94, HY6, pp.1475-1488, Nov., 1968



- 195 - UEMATSU, T.  
 "Proceedings of the U.S.-Japan seminar on similitude in fluid mechanics". Cambridge, Massachusetts; Minneapolis; Minnesota; Iowa City, Iowa; Palo Alto and Berkeley, California. 1967
- 196 - VARGA, J.J.; SEBESTYEN, G.  
 "Noise measuring as a complementary and checking method for pump testing". IAHR, Symposium Stockholm, Part 1, paper 13, 1970
- 197 - VARGA, J.J.; SEBESTYEN, G.; FAY, A.  
 "Detection of cavitation by acoustic and vibration-measurements methods". La Houille Blanche, 24, no. 2, pp. 137-149, 1969
- 198 - WADEKAR  
 "Cavitation problems of hydropower plants". Modern Trends in Hydraulic Engineering Research - Vol. 2, Central Water and Power Research Station - POONA. INDIA, pp. 248-254, 1966
- 199 - WAGNER, W.E.  
 "Glen Canyon dam diversion tunnel outlets". ASCE, Vol. 93, HY6, pp. 113-134, Nov., 1967
- 200 - WHEELER, W.H.  
 "Mechanisms of cavitation erosion". National Physical Laboratory Cavitation in Hydrodynamics, London, pp, 2p.1-31, 1966
- 201 - WHIPPEN, W.G.; JOHSON, G.D.  
 "A high-head cavitation test stand for hydraulic turbines". ASCE, Vol. 83, HY2, pp. 1201-1/13, Apr., 1957
- 202 - WILLIAMS, E.E.; McNULTY, P.  
 "Some factors affecting the inception of cavitation". National Physical Laboratory. Cavitation in Hydrodynamics, London, pp. 2p.1-10, 1956

203 - WILLMARTH, W.W.

"Space-time correlations and spectra of wall pressure in a turbulent boundary layer". NASA - Memo. 3-17-59W, 1959

204 - WINN, W.P.; JOHNSON, D.E.

"Cavitation parameters for outlet valves". ASCE, Vol. 96, HY12, pp. 2519-2533, Dec., 1970

205 - YAGLOM, A.M.

"An introduction to the theory of stationary random functions". Prentice-Hall, Inc., 1962

206 - YERSHOV, N.S.; BOROUSKIY, B.I.; YAKIMOV, V.V.

"Experimental investigation of the influence of thermodynamic properties of liquid on cavitation phenomena". Transaction of Russian. (Biblioteca do LNEC: n<sup>o</sup>. 62235)

207 - YUAN, S.W.

"Foundations of fluid mechanics". Prentice-Hall International, Inc., London, 1970