

TUBOS DE IMPEDÂNCIA E SUAS APLICAÇÕES

NA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES

ACÚSTICAS DE MEIOS POROSOS

Antonio Carlos Tavora Stross

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

APROVADO POR:

Arthur Palmeira Ripper Neto.  
Arthur Palmeira Ripper Neto

Luiz Bevilacqua  
Luiz Bevilacqua

Affonso Carlos Seabra da Silva Telles  
Affonso Carlos Seabra da Silva Telles

RIO DE JANEIRO

ESTADO DO RIO DE JANEIRO - BRASIL

SETEMBRO DE 1975



AGRADECIMENTOS

Ao CNPq.

Ao Professor Arthur Ripper pela orientação e ricas contribuições durante o desenvolver e término do trabalho.

À equipe de arquitetos da FUNDREM, Milton e Angela.

Ao fotografo Carlos Eduardo Nunes Pereira.

Aos funcionários da COPPE.

Aos amigos Ligia e Marcos pela presença inestimável.

A meus pais, Simone e Hanns pelo incentivo e colaboração.

RESUMO

A determinação da impedância acústica e coeficiente de absorção em meios porosos é realizada em tubos de impedância para ar e água.

A medição em água envolve o desenvolvimento de uma técnica experimental própria.

Os parâmetros porosidade, densidade, permeabilidade e espessura das amostras porosas são medidos experimentalmente, e é estudado o modo como estes influenciam a impedância e absorção acústica.

Os parâmetros da amostra assim determinados são introduzidos em teoria de propagação em meios porosos existente e a absorção teoricamente obtida é comparada com os dados das medições em tubo de impedância.

Os valores maiores de absorção medidos em comparação com os previstos pela teoria são atribuídos às ressonâncias nas cavidades do esqueleto poroso.

ABSTRACT

Acoustic impedances and absorption coefficients in fluid-saturated porous solids are experimentally determined in air and water in impedance tubes.

An experimental methodology is developed for the measurements in water.

A study is made of the ways in which the experimentally measured parameters porosity, density, permeability and sample thickness, influence acoustic impedance and absorption.

Those parameters are introduced into an existent theory of propagation in porous media and the resulting absorption is compared with the one obtained experimentally.

The higher values of the measured acoustic absorption as compared to the ones predicted by the theory are attributed to resonances in the cavities of the porous esqueleton.

ÍNDICE

	<u>PÁG.</u>
CAPÍTULO I - CONCEITOS E TEORIA .....	1
I.1 - Introdução .....	1
I.2 - Impedância Acústica .....	1
I.3 - Sistema Estacionário .....	3
I.4 - Condições de Reflexão .....	4
I.5 - Transmissão entre Três Meios .....	7
I.6 - Teoria .....	9
I.7 - Propagação em Meios Porosos .....	17
 CAPÍTULO II - METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	25
II.1 - Introdução .....	25
II.2 - Primeira Experiência .....	25
II.3 - Tubo de Impedância para Água .....	29
II.4 - Tubo de Impedância para Ar .....	39
II.5 - Tratamento de Resultados Experimentais .....	56
 CAPÍTULO III - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	61
III.1 - Introdução .....	61
III.2 - Gráficos .....	61
 CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES.....	98
IV.1 - Comparação dos Resultados Experimentais .....	98

	<u>PÁG.</u>
IV.2 - Observações Gerais sobre os Gráficos .....	103
IV.3 - Comparaçāo Teórica .....	108
IV.4 - Modelo Acústico .....	120
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>122</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>123</b>

## CAPÍTULO I

### CONCEITOS E TEORIA

#### I.1. INTRODUÇÃO

As experiências realizadas neste trabalho envolvem alguns fenômenos acústicos, cujas definições e conceituações são necessárias à compreensão do que foi idealizado.

A finalidade deste primeiro capítulo é a apresentação dos fundamentos teóricos e dos conceitos físicos envolvidos no trabalho.

#### I.2. IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

##### (i) Impedância Acústica Específica

A razão entre a pressão acústica em um meio, e a velocidade da partícula associada, é definida como "impedância acústica específica",  $Z$ , do meio para o tipo particular de movimento oscilatório presente [1].

Para ondas planas se propagando na direção  $x$  positiva, a razão é,

$$Z_+ = \frac{p_+}{u_+} = \frac{j \rho_0 c w \xi_+}{j w \xi_+} = \rho_0 c ,$$

e para ondas planas na direção  $x$  negativa,

$$z_- = \frac{p_-}{u_-} = \frac{-j \rho_0 c w \xi_-}{j w \xi_-} = -\rho_0 c .$$

onde:

$p$  - pressão acústica

$u$  - velocidade de partícula

$\rho_0$  - densidade do meio sem perturbação

$c$  - velocidade de propagação

$w$  - frequência angular

$\xi$  - densidade de energia instantânea

A impedância acústica específica de um meio, para ondas planas propagando-se em ambas as direções, é a quantidade real de módulo  $\rho_0 c$ , que tem grande significado como propriedade acústica característica do meio. Por esta razão é chamada "impedância característica (Resistiva)" do meio.

Para outros tipos de propagação ou sistemas estacionários, a impedância acústica específica tem ambas parte real e imaginária, chamadas "Resistência acústica específica" e "Reatância acústica específica".

$$Z = \frac{P}{u} = R + j X$$

### (ii) Impedância Acústica

A "impedância acústica"  $Z$  de um meio, agindo em, ou através de uma superfície de área  $S$ , é o quociente complexo da pressão acústica na superfície dividida pela velocidade de volume

associada.

$$Z = \frac{P}{U}$$

A área S pode ser também unitária ou elementar.

É por meio desta definição que geralmente se faz a analogia acústico/elétrica. Será extensamente utilizada por ser mais conveniente no tratamento de impedâncias de superfície e impedâncias de terminação.

### (iii) Impedância Acústica de Transferência

---

meio de propagação	• (1) P	(2) u ou U
--------------------	---------	------------

---

É a razão entre a pressão acústica em (1) e a velocidade, de partícula ou de volume associada a (2).

### I.3. SISTEMA ESTACIONÁRIO

O princípio de formação do sistema estacionário, consiste na brusca mudança de meio de propagação de uma onda plana progressiva. A onda acústica ao atingir a interface é em parte transmitida e em parte refletida.

Se o primeiro meio de propagação estiver contido num contorno cilíndrico de dimensões transversais pequenas em relação ao comprimento de onda, tal que a superfície cilíndrica constitua um

forte descasamento de impedância com relação à do meio de propagação nele contido, e em havendo uma terminação no cilindro, forna-se nele um sistema de ondas estacionário.

Este surge de uma superposição da onda incidente com a onda refletida. Suas pressões acústicas somam-se e subtraem-se, conforme suas relações de fase e amplitudes.

O sistema estacionário apresenta distribuição de amplitudes constantes no tempo e variando de ponto para ponto ao longo da direção de propagação, apresentando planos de mínima pressão e máximas velocidades (nós) e planos de máxima pressão e mínimas velocidades (antinós).

As características acústicas da terminação são dadas pela sua impedância acústica, isto é, pela relação entre a pressão acústica e a velocidade de volume na interface meio de propagação/terminação. Esta impedância pode ser determinada experimentalmente a partir da relação de amplitudes dos nós e antinós e da sua posição em relação à terminação.

#### I.4. CONDIÇÕES DE REFLEXÃO

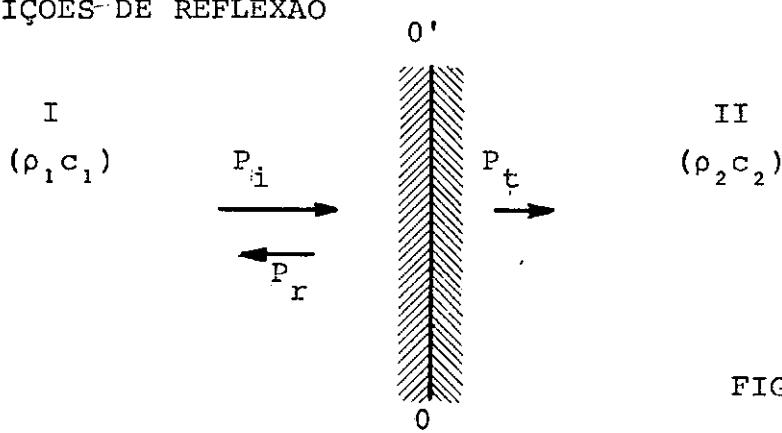


FIG. 1

## 1. Fluido/Fluido

Sendo  $\rho_1 c_1$  e  $\rho_2 c_2$  (Fig. 1) as impedâncias características dos meios fluidos I e II, a reflexão da onda incidente  $p_i$  na interface  $O'-O$  (Fig. 1), deve satisfazer constantemente e em todos os pontos da superfície de separação, a duas condições de contorno:

- (a) A pressão acústica nos dois lados da interface deve ser a mesma.
- (b) As velocidades de partícula normais à superfície em cada ponto devem ser iguais nos dois fluidos.

A condição da continuidade de pressão, resulta da lei fundamental que diz ser a pressão em um fluido uma função escalar continua de valor-único; e a igualdade das velocidades impõe que as duas superfícies permaneçam constantemente em contato na interface.

Aplicando as condições de contorno às ondas de pressão representadas por  $p_i = A_1 e^{j(wt-k_1 x)}$ ,  $p_r = B_1 e^{j(wt+k_1 x)}$  e  $p_t = A_2 e^{j(wt-k_2 x)}$  obtém-se a relação de amplitudes das ondas incidente e refletida:

$$B_1 = A_1 \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}$$

Daí, observa-se que a reflexão na superfície de dois meios fluidos, tem as seguintes características:

- (i) A pressão acústica da onda refletida, na interface

está em fase com a pressão da onda incidente, ou  $180^\circ$  fora de fase, dependendo se  $\rho_2 c_2 > \rho_1 c_1$  ou  $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$  ( $\Rightarrow B_1 > 0$  ou  $B_1 < 0$ ).

(ii) A razão entre a amplitude da onda refletida e a amplitude da onda incidente, é sempre menor que a unidade.

(iii) No caso limite de  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 \rightarrow \infty$ , que é a reflexão em um meio muito denso (como interface AR-ÁGUA), forma-se um antinó na interface, devido à pequena redução de amplitude, e  $0^\circ$  de defasamento ( $B_1 > 0$ ).

(iv) No caso limite de  $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1 \rightarrow 0$ , que é a reflexão em um meio muito rarefeito (como interface ÁGUA-AR), forma-se um nó na interface, pois a onda refletida tem quase a mesma amplitude que a onda incidente, e  $180^\circ$  de defasamento ( $B_1 < 0$ ), promovendo a anulação.

## 2. Fluido/Sólido

Se o meio II for sólido, ao invés de fluido, a reflexão é caracterizada pelo parâmetro  $Z_n$ , impedância acústica específica normal do sólido, definido como a razão de pressão acústica agindo na superfície do sólido e a associada velocidade do fluido normal à superfície.

A continuidade da pressão acústica e das velocidades de partícula no contorno à  $x = 0$ , transforma-se na continuidade da razão entre estas,

$$\frac{p_i + p_r}{u_i + u_r} = z_n \quad \text{à } x = 0$$

Obtem-se daí,

$$z_n = \frac{(A_1 + B_1)}{(A_1 - B_1)} \rho_1 c_1 \quad \text{e}$$

$$B_1 = A_1 \left[ \frac{(r_n - \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2} \right]^{1/2} \quad (\text{I.4.1})$$

O coeficiente de reflexão é definido pela razão,

$$\alpha_r = \frac{B_1^2}{A_1^2} \quad , \quad (\text{I.4.2})$$

que pode ser calculada a partir da impedância acústica normal da face, usando (I.4.1) e obtendo,

$$\alpha_r = \frac{(r_n - \rho_1 c_1)^2 + x_n^2}{(r_n + \rho_1 c_1)^2 + x_n^2} \quad (\text{I.4.3})$$

## I.5. TRANSMISSÃO ENTRE TRÊS MEIOS

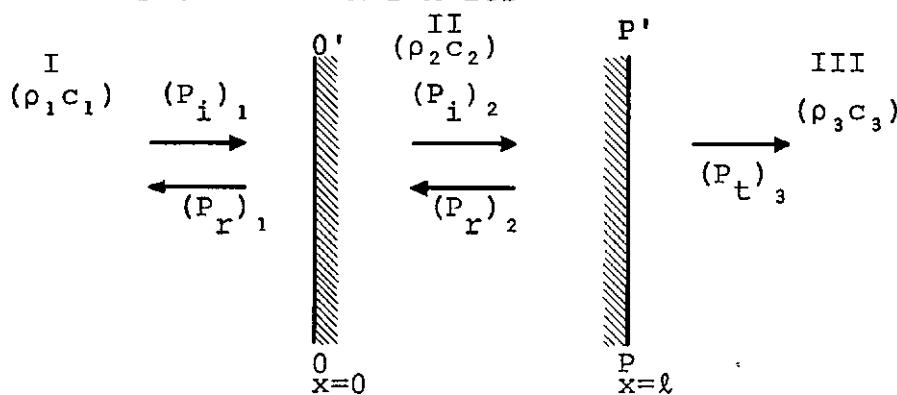


FIG. 2

Representando-se as ondas planas pela ... notação exponencial,

$$(p_i)_1 = A_1 e^{j(wt-k_1 x)}$$

$$(p_r)_1 = B_1 e^{j(wt+k_1 x)}$$

$$(p_t)_2 = A_2 e^{j(wt-k_2 x)}$$

$$(p_r)_2 = B_2 e^{j(wt+k_2 x)}$$

$$(p_t)_3 = A_3 e^{j[wt-k_3(x-e)]}$$

onde  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$ ,  $B_2$  e  $A_3$  são as amplitudes das ondas de pressão, determina-se através das condições de contorno à  $x=0$  e à  $x=l$  (Fig. 2), as razões de amplitudes  $B_1/A_1$  e  $A_3/A_1$ , e os coeficientes de reflexão e transmissão,

$$\alpha_r = \frac{\left[ \left( \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} - 1 \right) + \left( \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} + 1 \right) \left( \frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2} \right) \cos(2k_2 l) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} + 1 \right) \left( \frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2} \right) \sin(2k_2 l) \right]^2}{\left[ \left( \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} + 1 \right) + \left( \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} - 1 \right) \left( \frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2} \right) \cos(2k_2 l) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} - 1 \right) \left( \frac{\rho_3 C_3 - \rho_2 C_2}{\rho_3 C_3 + \rho_2 C_2} \right) \sin(2k_2 l) \right]^2} \quad (I.5.1)$$

e

$$\alpha_t = \frac{4 \rho_3 C_3 \rho_1 C_1}{(\rho_3 C_3 + \rho_1 C_1)^2 \cos^2(k_2 l) + \left( \rho_2 C_2 + \frac{\rho_3 C_3 \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} \right)^2 \sin^2(k_2 l)} \quad (I.5.2)$$

Estas duas expressões permitem o cálculo de  $\alpha_r$  e  $\alpha_t$  em função do que acontece no meio de propagação II. Este  $\alpha_r$  é determinado a partir de dados diferentes do  $\alpha_r$  da expressão

(I.4.3) anterior, cujo cálculo é feito a partir de dados provenientes de medições realizadas no meio de propagação I, ignorando-se o que está ocorrendo nos meios II e III.

Estas duas últimas expressões (I.5.1 e I.5.2) serão utilizadas no capítulo IV para comparações teóricas e a expressão (I.4.3) do coeficiente de reflexão será empregada para a verificação dos resultados experimentais.

## I.6. TEORIA

Apresentamos aqui o método de Melling [7] para a determinação de impedâncias acústicas de amostras a partir de medições realizadas em sistemas estacionários formados nos chamados tubos de impedância.

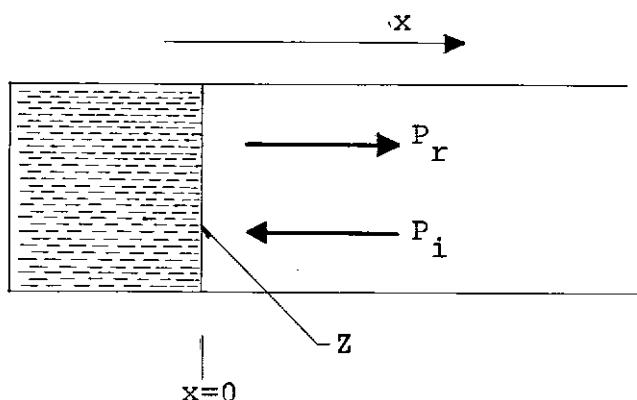


FIG. 3

As ondas incidente e refletida podem ser representadas por,

$$p_i = p_+ e^{j k x}$$

$$p_r = p_- e^{-j k x}$$

onde, a razão das amplitudes por conveniência pode ser expressa por,

$$\frac{p_-}{p_+} = e^{-2\psi} = \xi + j\zeta = r .$$

a pressão total no sistema estacionário é a soma

$$p_{\text{total}} = p_i + p_r = p_+ e^{jkx} + p_- e^{-jkx}$$

$$= p_+ e^{jkx} + p_+ e^{-2\psi} e^{-jkx}$$

...

$$p_{\text{total}} = p_+ e^{jkx} [1 + e^{-2(\psi+jkx)}]$$

multiplicando pelo complexo conjugado,

$$p_{\text{total}} = 1 + \xi^2 + \zeta^2 + 2\xi (\cos^2 kx - \sin^2 kx) + 4\xi \sin kx \cos kx$$

O módulo de  $p_{\text{total}}$  é,

$$|p_{\text{total}}|^2 = |p_+|^2 (1 + |r|^2 + 2\xi \cos 2kx + 2\xi \sin kx)$$

fazendo  $\operatorname{tg} \beta = \frac{\xi}{\zeta}$  temos,

$$2\xi \cos 2kx + 2\xi \sin kx = 2\sqrt{\xi^2 + \zeta^2} [\cos(\beta - 2kx)] ,$$

e a pressão total toma a forma,

$$|p_{\text{total}}|^2 = |p_+|^2 (1 + |r|^2 + 2|r| [\cos(\beta - 2kx)]) .$$

Quando a função coseno é máxima,  $p_{\text{total}}$  também é,

$$|p_{\text{total}}|^2 = |p_+|^2 (1 + |r|)^2 .$$

o coeficiente de reflexão é definido por,

$$\alpha_r = \frac{p_-^2}{p_+^2} = |r|^2 ,$$

e o coeficiente de absorção, pela lei de conservação de energia acústica,

$$\alpha = (1 - \alpha_r) \quad .$$

$$\alpha = (1 - \sqrt{1-\alpha})^2$$

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad .$$

Para o cômputo de  $\alpha$  uma expressão mais adequada será instituída mais adiante.

A impedância  $Z$  de face de amostra é por definição:

$$Z = \frac{p_{\text{total}}}{u_{\text{total}}} \quad .$$

A velocidade é dada pela equação de movimento, para ondas harmônicas simples,

$$u_{\text{total}} = \frac{1}{jwp} \text{ grad } p_{\text{total}} \quad .$$

$$u_{\text{total}} = \frac{1}{jwp} \frac{\partial p_{\text{total}}}{\partial x} \quad .$$

como  $p_{\text{total}}$  do sistema estacionário é,

$$p_{\text{total}} = p_+ e^{j kx} [1 + e^{-2(\psi+jkx)}]$$

$$jwp \underline{u}_{\text{total}} = p_+ jk e^{jkx} [1 + e^{-2(jkx+\psi)}] + p_+ e^{jkx} [-2jk e^{-2(jkx+\psi)}]$$

$$Z = \rho c jk \frac{p_+ e^{jkx} [1 + e^{-2(\psi+jkx)}]}{p_+ jk e^{jkx} [1 + e^{-2(jkx+\psi)}] + p_+ e^{jkx} [-2jk e^{-2(jkx+\psi)}]}$$

$$Z = \rho c \frac{1 + e^{-2(\psi+jkx)}}{1 - e^{-2(\psi+jkx)}} = \rho c \frac{e^{\psi+jkx} + e^{-(\psi+jkx)}}{e^{\psi+jkx} - e^{-(\psi+jkx)}}$$

$$Z = \rho c \coth(\psi + jkx) .$$

Substituindo  $\psi = \psi_1 + j\psi_2$  e  $x = d$ , obtem-se a impedância  $Z$  em um ponto genérico distando "d" da face da amostra,

$$Z = \rho c \coth(\psi_1 + j(\psi_2 + kd)) .$$

$$\text{Fazendo } (\psi_2 + kd) = A ,$$

$$Z = \rho c \coth(\psi_1 + jA) ,$$

e escrevendo  $Z = R + jX$ , resolve-se para  $R$  e  $X$ , obtendo-se,

$$\text{Re}(Z) = \rho c \frac{\tanh \psi_1 (1 + \tan^2 A)}{\tanh^2 \psi_1 + \tan^2 A} \quad (I.6.1)$$

$$\text{Im}(Z) = \rho c \frac{\tan A (1 - \tan^2 \psi_1)}{\tanh^2 \psi_1 + \tan^2 A} \quad (I.6.2)$$

chamando:

$d_1$  - distância de face ao primeiro mínimo de pressão

$D = \lambda/2$  - distância entre dois mínimos consecutivos,

observa-se que:

$$0 \leq d \leq D \Rightarrow \pi \leq \psi_2 \leq 0 .$$

A distância  $d_1$  relaciona-se então com a parte imaginária de  $\psi$  por:

$$\begin{aligned} \psi_2 &= \pm \pi - kd_1 \\ \psi_2 &= \pm \pi \mp \frac{\pi}{\lambda/2} d_1 = \pm \pi \left[ 1 \mp \frac{d_1}{D} \right] \\ \therefore \quad \psi_2 &= \pi \left[ 1 - \frac{d_1}{D} \right] \end{aligned} \quad (\text{I.6.3})$$

O SWR (Stand Wave Ratio) do sistema estacionário é definido por,

$$\text{SWR} = \frac{p_+ + p_-}{p_+ - p_-},$$

que relaciona-se com  $\psi_1$  pela parte real da equação,

$$\frac{p_-}{p_+} = e^{-2(\psi_1 + j\psi_2)},$$

devido a,

$$\frac{p_-}{p_+} = \frac{\text{SWR} - 1}{\text{SWR} + 1} = e^{-2\psi_1}.$$

Então,

$$\text{SWR} - 1 = \text{SWR } e^{-2\psi_1} + e^{-2\psi_1}$$

$$\therefore \text{SWR}(1 - e^{-2\psi_1}) = 1 + e^{-2\psi_1}$$

$$\therefore \text{SWR} = \frac{e^{\psi_1} + e^{-\psi_1}}{e^{\psi_1} - e^{-\psi_1}} = \coth \psi_1 .$$

Para SWR em dB ,

$$(\text{SWR})_{\text{dB}} = 20 \log_{10} |\coth \psi_1|$$

$$\psi_1 = \text{Arie} \coth \left| 10 \frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20} \right| \quad (\text{I.6.4})$$

Voltando ao coeficiente de absorção  $\alpha$  , para a determinação de uma expressão mais adequada a partir da impedância acústica de face,

$$\frac{Z}{\rho c} = \coth (\psi + jkx) . \quad (\text{I.6.5})$$

à  $x = 0$  , (na face) ,

$$\frac{Z}{\rho c} = \coth \psi$$

$$\therefore \frac{Z}{\rho c} = \frac{e^{\psi} + e^{-\psi}}{e^{\psi} - e^{-\psi}} = \frac{1 + e^{-2\psi}}{1 - e^{-2\psi}}$$

$$\therefore \frac{Z}{\rho c} = \frac{1 + r}{1 - r}$$

$$\therefore r = \frac{\frac{Z}{\rho c} - 1}{\frac{Z}{\rho c} + 1} \quad \text{e} \quad |r|^2 = \left[ \frac{\frac{Z}{\rho c} - 1}{\frac{Z}{\rho c} + 1} \right]^2 \quad (\text{I.6.6})$$

Como a responsável pela absorção é a parte resistiva da impedância acústica, pode-se determinar  $\alpha$  a partir do indi

cador de absorção SWR , fazendo,

$$\operatorname{Im}(Z) = \frac{X}{\rho c} = 0 \quad \text{e} \quad \left| \frac{Z}{\rho c} \right| = \frac{R}{\rho c} .$$

de (5) ,

$$\frac{R}{\rho c} = |\coth \psi_1|$$

e de (4)

$$|\coth \psi_1| = 10^{\frac{\text{SWR}}{20}}$$

$$\therefore \frac{R}{\rho c} = 10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} .$$

Substituindo em (I.6.6) obtem-se,

$$|r|^2 = \left| \frac{\frac{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} - 1}{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} + 1}}{\frac{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} + 1}{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} - 1}} \right|^2$$

$$\text{e} \quad \alpha = 1 - \left| \frac{\frac{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} - 1}{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} + 1}}{\frac{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} + 1}{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}} - 1}} \right|^2 \quad (\text{I.6.7})$$

Reunindo os resultados, e substituindo finalmente

(I.6.4) em (I.6.1) e (I.6.2) ,

$$\operatorname{Re}(Z) = \rho c \frac{\frac{1}{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}}} (1 + \operatorname{tg}^2 \psi_2)}{\left( \frac{1}{10^{\frac{(\text{SWR})_{\text{dB}}}{20}}} \right)^2 + \operatorname{tg}^2 \psi_2} \quad (\text{I.6.1})$$

$$\text{Im}(Z) = \rho c \frac{\operatorname{tg} \psi_2 \left[ 1 - \left( \frac{1}{\frac{(\text{SWR})}{20} \text{dB}} \right)^2 \right]}{\left( \frac{1}{\frac{(\text{SWR})}{20} \text{dB}} \right)^2 + \operatorname{tg}^2 \psi_2} \quad (\text{I.6.2})$$

$$\psi_2 = \pi \left( 1 - \frac{d_1}{D} \right) \quad (\text{I.6.3})$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\frac{(\text{SWR})}{20} \text{dB} - 1}{\frac{(\text{SWR})}{20} \text{dB} + 1} \right|^2 \quad (\text{I.6.7})$$

que são as equações que proporcionam a determinação da parte real e parte imaginária de impedância acústica, e os coeficientes de absorção das amostras a partir das medições nos sistemas estacionários de  $d_1$ , D e SWR.

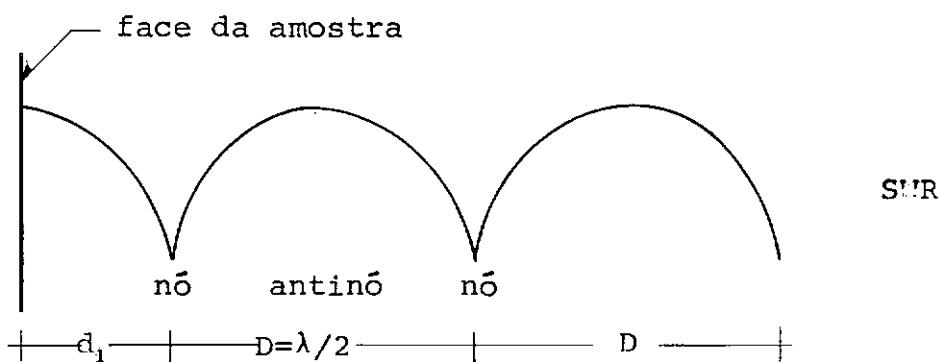


FIG. 4

## I.7. PROPAGAÇÃO EM MEIOS POROSOS

Uma teoria simplificada de propagação em meios porosos (MORSE [2]), servirá para apontar os parâmetros que definem acuraticamente as amostras e para comparação de resultados teóricos e experimentais.

Esta teoria considera o meio poroso como um contínuo em que os poros são suficientemente pequenos e aleatoriamente distribuídos.

A porosidade é definida como a fração do volume total do meio poroso ocupado pelo fluido.

$$\Omega = \frac{V_F}{V}$$

Sobre propagação em meios porosos embebidos de fluido, M.A. BIOT [11], e L. HSIEH [9], mostram que têm influência acuraticamente, somente os poros interligados no interior do esqueleto poroso. Define-se então, para este fim, a "porosidade efetiva", fração do volume total ocupada pelo fluido nos poros interligados. Os poros separados, são incorporados ao esqueleto sólido, e à sua densidade. Este será o significado da porosidade  $\Omega$  considerada.

As hipóteses formuladas são:

- ( i ) O sólido é perfeitamente rígido e incompressível.
- ( ii) A velocidade do fluido  $u(x,t)$  entre os poros é considerada globalmente como o volume médio de fluido que passa através de uma área unitária normal ao fluxo, por segundo.

(iii) Em consequência, na interface entre material poroso e o exterior, a componente normal de  $u(x,t)$  será contínua.

A massa do fluido que ocupa um volume unitário do meio poroso é:

$$\Omega(\rho + \delta)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido em equilíbrio e  $\delta$  é o acréscimo instantâneo de massa específica devido ao campo acústico.

No caso, a equação da continuidade tem a forma:

$$\Omega \frac{\partial \delta}{\partial t} - \rho \operatorname{div} \underline{u} = 0 \quad (\text{I.6.1})$$

A relação entre a mudança instantânea de massa específica  $\delta$  e a pressão acústica  $p$ , pode ser considerada em primeira aproximação

$$\delta = k_p \rho p \quad , \quad (\text{I.6.2})$$

onde  $k_p$  é a compressibilidade efetiva do fluido nos poros, que será considerada função da frequência do campo acústico.

para altas frequências:  $k_p = k_s$  (compressibilidade adiabática do fluido livre)

para baixas frequências:  $k_p = k_t$  (compressibilidade isotérmica do fluido livre)

$$k_t > k_s$$

$$\therefore k_p = k_t(w) .$$

Combinando a equação de continuidade (I.6.1) e a equação de estado (2), obtem-se:

$$k_p \Omega \left( \frac{\partial p}{\partial t} \right) + \operatorname{div} \underline{u} = 0 , \quad (I.6.3)$$

que no caso de ondas harmônicas simples assume a forma,

$$jw k_p \Omega p = \operatorname{div} \underline{u} . \quad (I.6.4)$$

O movimento de parte do sólido junto com o fluido dentro de seus poros é considerado como uma massa adicionada ao fluido, formando uma massa efetiva

$$\rho_p = (1,5 \rightarrow 5) \rho$$

para materiais acústicos no ar.

A resistência ao fluxo do fluido nos poros interligados é dada por  $\Phi$ , que é a diferença de pressão necessária para causar um fluxo unitário através do material.

Levando em conta esta resistência ao fluxo tem-se a equação de movimento:

$$\rho_p \left( \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} \right) + \Phi \underline{u} + \operatorname{grad} p = 0 , \quad (I.6.5)$$

e para ondas harmônicas,

$$jw \rho_p \left[ 1 + j \frac{\Phi}{\rho_p w} \right] \underline{u} = \operatorname{grad} p . \quad (I.6.6)$$

Introduzindo o potencial de velocidades ,

$$\underline{u} = - \operatorname{grad} \psi ,$$

obtem-se da equação de movimento (I.6.5),

$$p = \rho_p \left( \frac{\partial \psi}{\partial t} \right) + \Phi \psi , \quad (I.6.7)$$

e da equação (3),

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{k_p \Omega} \nabla \cdot \underline{u} = \frac{1}{k_p \Omega} \nabla^2 \psi . \quad (I.6.8)$$

Substituindo (I.6.8) em (I.6.7) resulta,

$$\nabla^2 \psi = k_p \rho_p \Omega \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + k_p \Omega \psi \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (I.6.9)$$

que é a equação da onda para propagação em meios porosos. O último termo desta equação representa perdas por atrito.

A velocidade de propagação é,

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{k_p \rho_p \Omega}} , \quad (I.6.10)$$

que pode ser comparada com  $\sqrt{\frac{1}{\rho k}}$  para o fluido livre.

Quando  $\Omega$  é pequena,  $c_p > c$ .

Quando  $\rho_p \Omega > \rho$ , como ocorre frequentemente, tem-se  $c_p < c$ .

Ambas densidade efetiva e velocidade efetiva são quantidades complexas, por causa do termo de fricção  $\Phi$ . Para muito altas frequências ambas são reais,

$$\rho_e \approx \rho_p \quad e \quad \rho_e > \rho$$

$$c_e \approx c_p \quad e \quad c_e < c .$$

Com a finalidade de se obter uma equação de onda em

forma mais simples são introduzidos os seguintes parâmetros:  
massa específica efetiva do fluido,

$$\rho_e = \rho_p \left(1 + \frac{j\Phi}{\rho_p w}\right) , \quad (I.6.11)$$

compressibilidade efetiva,

$$k_e = \Omega k_p \quad (I.6.12)$$

e velocidade de propagação efetiva,

$$c_e = \frac{1}{\sqrt{\rho_e k_e}} = \frac{1}{\sqrt{\rho_e k_p \Omega}} = \frac{1}{\sqrt{\rho_p \left(1 + \frac{j\Phi}{\rho_p w}\right) k_p \Omega}} \quad (I.6.13)$$

$$c_e = c_p \left(1 + \frac{j\Phi}{\rho_p w}\right)^{-1/2} \quad (I.6.14)$$

Com estes parâmetros, a equação de movimento (I.6.6),  
(I.6.7) fica,

$$\begin{aligned} j w \rho_e u &= \nabla p \\ -j w \rho_e \nabla \psi &= \nabla p \\ \therefore p &= -j w \rho_e \psi \end{aligned} \quad (I.6.15)$$

A equação da continuidade (I.6.4) fica

$$\begin{aligned} j w k_p \Omega p &= \operatorname{div} \underline{u} \\ j w \rho_e p &= \operatorname{div} \underline{u} \end{aligned}$$

e usando (I.6.9) tem-se,

$$k_e = \frac{1}{\rho_e c_e^2} \quad e$$

$$\frac{j w}{\rho_e c_e^2} p = \operatorname{div} \underline{u} \quad (\text{I.6.16})$$

Substituindo-se (I.6.15) em (I.6.16) obtem-se a equação de onda

$$\nabla^2 \psi + \left(\frac{w}{c_e}\right)^2 \psi = 0 \quad (\text{I.6.17})$$

Uma solução para esta equação é uma onda plana progressiva na direção  $x$  positiva representada por:

$$\psi = A e^{j \left(\frac{w}{c_e}x - iwt\right)} = A e^{j (k_e x - wt) - \gamma_e x}, \quad (\text{I.6.18})$$

onde

$$\left(\frac{w}{c_e}\right) = w \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_p \Omega}} \left[1 + \frac{j \Phi}{\rho_p w}\right]^{1/2} = (j k_e - \gamma_e).$$

Chamando,

$$a \equiv -\gamma_e / (w \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_p \Omega}})$$

$$b \equiv k_e / (w \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_p \Omega}})$$

$$a + j b = \left[1 + j \left(\frac{\Phi}{\rho_p w}\right)\right]^{1/2}$$

$$[a + j b]^2 = 1 + \frac{j \Phi}{\rho_p w}$$

$$a^2 - b^2 = 1$$

$$2ab = \frac{\Phi}{\rho_p w}$$

$$\therefore b \sqrt{1 + b^2} = \frac{\Phi}{2\rho_p w},$$

$$b^4 + b^2 - \left(\frac{\Phi}{2\rho_p w}\right)^2 = 0$$

$$\therefore \therefore b^2 = \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\Phi^2}{\rho_p w}} - \frac{1}{2} \right]^{1/2},$$

e

$$a = \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\Phi^2}{\rho_p w}} + \frac{1}{2} \right]^{1/2}.$$

Então obtém-se a solução,

$$= A e^{j(k_e x - wt) - \gamma_e x}$$

$$k_e = w \sqrt{k_p \rho_p \Omega} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\Phi^2}{\rho_p w}} + \frac{1}{2} \right]^{1/2}$$

$$\gamma_e = w \sqrt{k_p \rho_p \Omega} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\Phi^2}{\rho_p w}} - \frac{1}{2} \right]^{1/2}$$

Esta teoria do comportamento acústico de meios porosos, fornece os parâmetros que influenciam a propagação da onda de pressão acústica nestes materiais.

Basicamente, os parâmetros são:

( i ) Porosidade efetiva

( ii) Densidade do esqueleto sólido

(iii) Densidade e compressibilidade do fluido de propagação

( iv) Resistência ao fluxo

( v ) Frequênciā

( vi) Espessura da amostra.

A proposição experimental deste trabalho é a variação física destes parâmetros.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### II.1. INTRODUÇÃO

A metodologia experimental desenvolvida neste trabalho, tem por finalidade, e determinação de impedância acústica de meios porosos nos dois meios de propagação, AR e ÁGUA.

A pesquisa envolveu três experiências distintas:

A primeira, buscava a determinação da função de transferência de impedância acústica de meios porosos na água, gerando-se num tubo a propagação de ondas progressivas harmônicas.

Esta experiência não deu resultados satisfatórios.

Em uma segunda fase, realizou-se duas outras experiências usando-se a técnica de ondas estacionárias, com o objetivo de determinar a impedância acústica de terminação de materiais porosos em tubos de impedância para ar e água.

#### II.2. PRIMEIRA EXPERIÊNCIA

Nesta fase preliminar da pesquisa, trabalhou-se com um tubo horizontal de sete metros de comprimento, na tentativa de formar na água um sistema de ondas progressivo permanente. Fisicamente, para isto, seria necessário um tubo de comprimento infinito, impossível experimentalmente. Tentou-se uma simulação, com a colo-

cação de limalhia de acrílico na seção final do tubo de sete metros, para introduzir amortecimento e ausência de reflexão.

A idéia consistia em usar as propriedades de fricção dos meios porosos no próprio funcionamento do tubo.

Neste tubo, seriam pesquisadas impedâncias de transferência de meios porosos, colocados numa região intermediária da onda progressiva.

Resumidamente, o funcionamento do tubo consistia, na emissão de onda em uma das extremidades por um excitador eletro-dinâmico, acoplado a um sistema pistão-membrana elástica; e na recepção de sinais de pressão por dois transdutores piezoelétricos, axialmente separados de quarenta centímetros, distando o primeiro oitenta centímetros da fonte, ficando entre os transdutores o lugar reservado para o meio poroso a ser pesquisado.

Outro fato importante, nesta primeira concepção da experiência, é que pretendia-se um casamento de impedâncias ótimo entre a água e o meio poroso, para manter as características da onda progressiva permanente. Este casamento seria conseguido com a igualdade de densidades do esqueleto do meio poroso e da água.

Em termos gerais, a experiência engloba um setor de excitação e controle, e outro de medição das grandezas acústicas.

Um único instrumento (1) centraliza excitação, medição e parte do controle: o analizador de função de transferência (TFA). Completando o esquema de controle, um medidor de vibrações para a estrutura (6), e um osciloscópio para a observação de forma

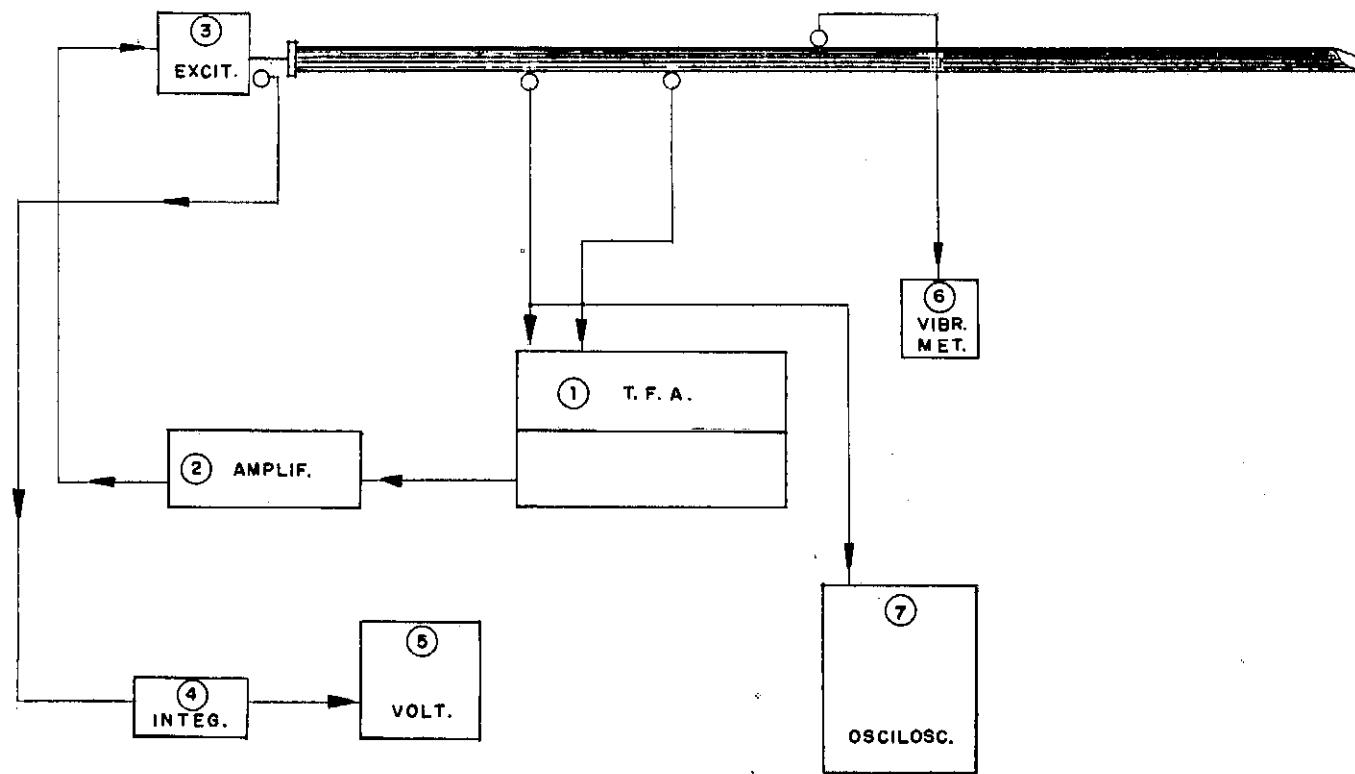


FIGURA 5

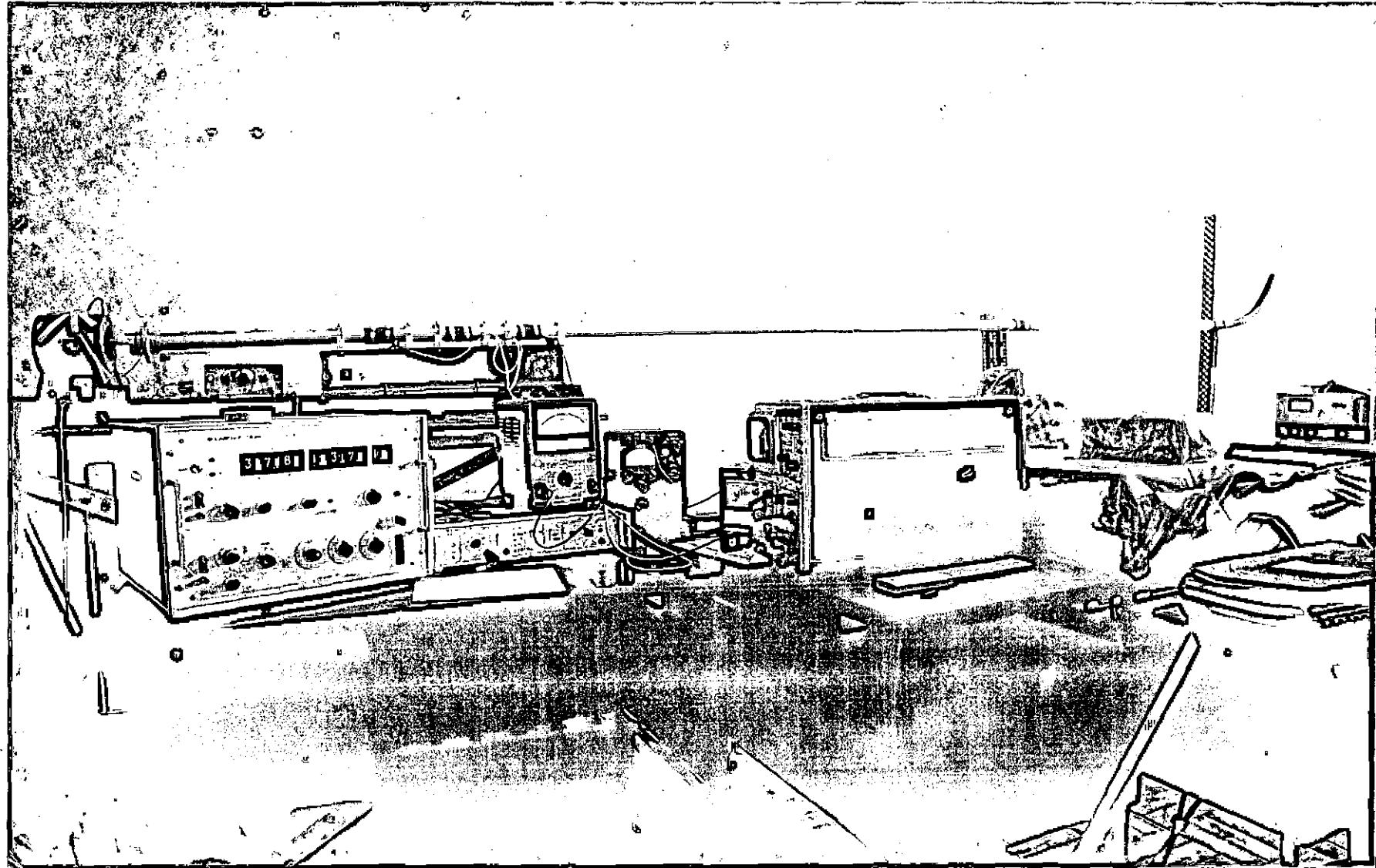


FOTO 1

da onda (7).

A principal função do TFA nesta experiência, é a determinação da impedância de transferência do meio poroso, por meio de comparação dos sinais dos dois transdutores receptores.

Nesta primeira experiência constatou-se que:

- ( i') A simulação do sistema de ondas progressivo não era boa,
- ( ii) Não havia repetibilidade de dados,
- ( iii) Presença de vibrações de estrutura nocivas às medições acústicas.
- ( iv) O casamento de impedâncias do meio poroso com a água não surtia o efeito esperado.

Devido a uma forte reflexão na face de amostra, formava-se um sistema de ondas estacionário entre esta e a fonte, tornando o sinal do segundo transdutor imprestável para comparações e medições.

### II.3. TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA ÁGUA

#### II.3.1. Introdução

A formação indesejável do sistema estacionário no primeiro tubo, transformou-se no ponto de partida para a nova metologia de medições: formar um sistema estacionário, e dentro dele observar as alterações ocasionadas pela introdução de uma amostra porosa.

Esta nova diretriz da pesquisa continha em si uma

enorme vantagem: aproveitar uma experiência realizada paralelamente à primeira, com a técnica do sistema estacionário no ar, para comparações de resultados nos dois meios de propagação. Esta experiência para o ar, necessitava apenas de algumas melhorias técnicas, para seu aproveitamento nas medições com meios porosos.

### II.3.2. Construção

Sendo a água o meio de propagação, o maior descasamento de impedâncias que se consegue, aliada a uma adequada simplicidade experimental, acontece para a terminação ÁGUA-AR. Deve-se a isto, o grande descasamento de impedâncias características dos dois meios AR e ÁGUA, que é da ordem de  $10^5$  MKS rayls [1] .

Para aproveitar a superfície horizontal da água, es colheu-se na construção do novo tubo a posição vertical.

Outro cuidado importante a ser tomado, diz respeito ao comportamento da nova estrutura a ser construída, sendo conveniente grande rigidez e inércia para torná-la não excitável a níveis vibratórios indesejáveis.

Foi aproveitado o mesmo tubo, e todo esquema emisor-receptor da primeira experiência. Depois de pronto, colocado em funcionamento, observou-se o forte sistema estacionário que se for mava com a reflexão na superfície ÁGUA-AR, em seu interior.

A continuação do trabalho foi a determinação das fre quências de melhor funcionamento do conjunto, das grandezas a serem medidas, e a verificação da repetibilidade destas medições.

### II.3.3. Metodologia da Medição

Um sistema de ondas estacionário, como foi visto, é definido pelo conhecimento do SWR e da posição dos mínimos de pressão.

O comprimento de onda é medido através das distâncias entre nós; o SWR, pela relação entre as amplitudes de pressão que ocorrem nos antinós e nós (capítulo I.5, Fig. 4).

A maneira convencional de se obter tais medições, consiste no deslocamento de um elemento captador de pressão no interior do sistema estacionário, por intermédio do qual seja possível localizar os nós e antinós, e determinar seus níveis de pressão acústica.

Esta técnica experimental já havia sido testada com bons resultados para sistema estacionário no ar, mas mostrou-se incomoda para o tubo de propagação na água, pelas seguintes razões:

- ( i) O funcionamento dos transdutores fixos ao tubo da primeira experiência, mostraram-se altamente precisos, valendo a pena o aproveitamento deste esquema construtivo.
- (ii) A montagem de um transdutor móvel, esbarrava nas dificuldades técnicas do seu deslocamento com relação à colocação das amostras, assim como poderia trazer problemas para os contatos elétricos, muito sensíveis à influências externas.

Apareceu então uma nova solução para a metodologia

da medição: deslocar a terminação do sistema, a superfície ÁGUA-AR, mantendo fixo o transdutor de pressão. Uma solução de fácil adaptação à nova geometria do conjunto, pois abaixar o nível da água, significa esvaziar o tubo, necessitando apenas de colocação de uma torneira para este fim.

A idéia consiste no aproveitamento da condição de contorno ser fixa na superfície ÁGUA-AR, a existência de um nó de pressão na interface de reflexão (capítulo I.4). O transdutor fixo atua como observador estático, de todas as variações de pressão que ocorrem no tubo, feitas por ele passar a medida que o nível da água desce. O excitador acompanha acusticamente o sistema, emitindo hora com velocidades máximas, hora com pressões máximas, dependendo das conveniências geométricas impostas por cada posição do nível da água.

Após a constatação de que realmente, com o deslocamento da superfície de reflexão, ocorriam máximos e mínimos de pressão no transdutor fixo, as soluções restantes apareceram por si só:

- ( i ) Um tubo de vidro graduado para marcar a posição do nível da água no tubo,
- ( ii) Um recipiente para reenche-lo após cada esvaziamento,
- ( iii) A alimentação do recipiente por uma mangueira ligada à instalação arquitetônica,
- ( iv) Tudo isto montado numa torre de três metros de altura com um sistema de fios e roldanas na extremidade superior.

### II.3.4. Instrumentação

Os equipamentos utilizados para geração e mensuração são os mostrados no diagrama de bloco (Fig. 6), no esquema (Fig. 7) e na fotografia (nº 2).

Com esta instrumentação e este esquema de medições ficou constatado excelente repetibilidade de dados experimentais , tanto no que diz respeito as pressões acústicas quanto no que se refere a distâncias entre nós medidas na escala de níveis.

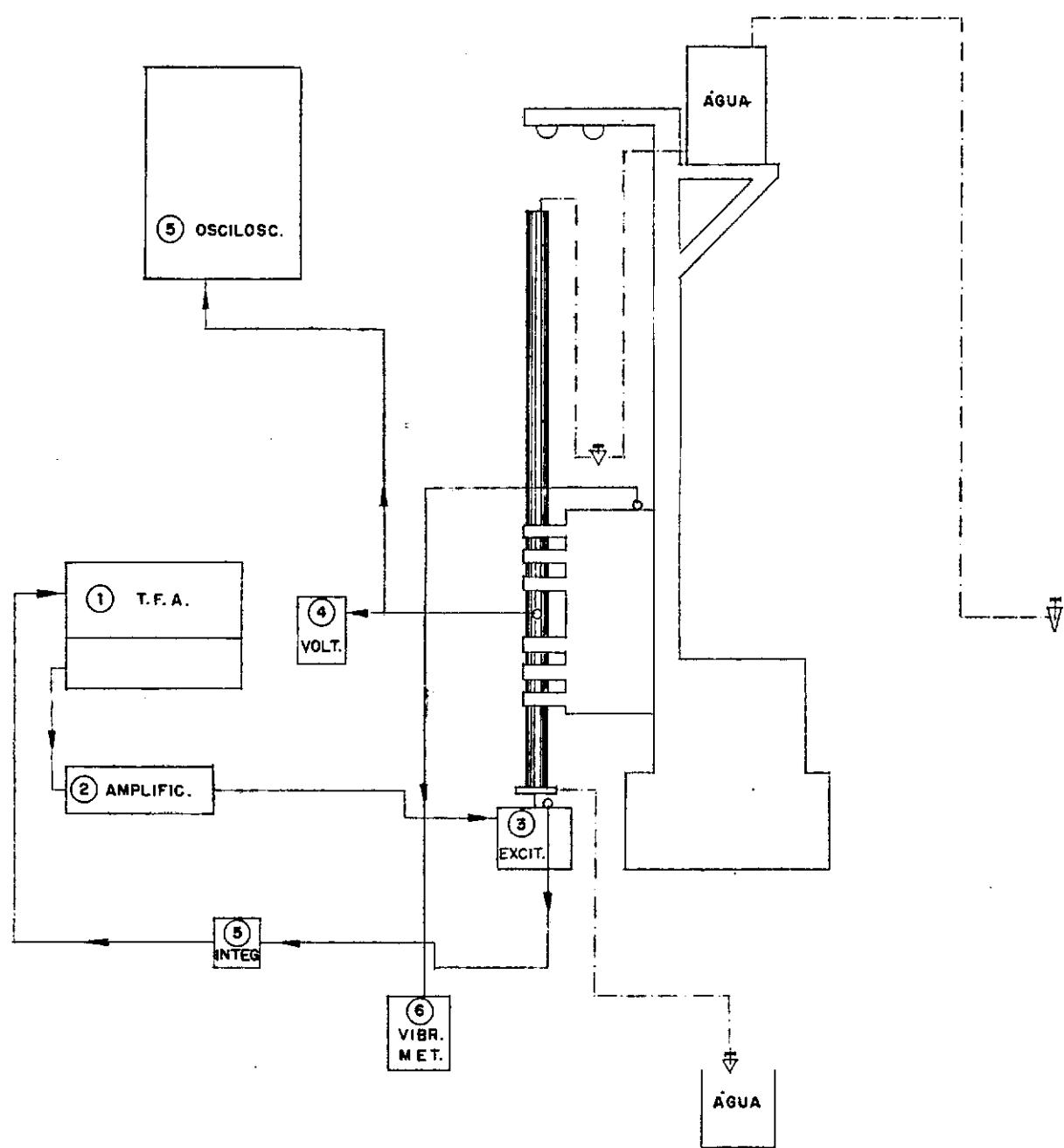
A escolha das frequências de funcionamento, obedem a um critério de mínimas vibrações da estrutura e máximos SWR, e foram dezesseis as frequências escolhidas, para o funcionamento do tubo na experiência com os corpos porosos. As frequências são em Herzts.

1.000, 1.300, 1.400, 1.000, 2.000, 2.100,  
2.600, 2.800, 3.000, 3.600, 4.000, 4.930,  
5.030, 5.200, 5.600

A escolha da primeira e última frequências de funcionamento provêm da geometria do tubo:

A menor e a maior frequências, correspondem ao maior e ao menor comprimentos de onda de emissão na água, que podem ser medidos na escala de níveis de líquido, os menores devendo ser maiores que o dobro do diâmetro do tubo ( $\lambda/4 > \text{raio}_{\text{tubo}}$ )

Esta última exigência provêm de não se desejar que o tubo de impedância funcione como guia de onda, com formação de sistemas estacionários transversais.



—	ÁGUA
—	MEDICAÇÃO E CONTROLE
○	TRANSDUTOR

FIGURA 6

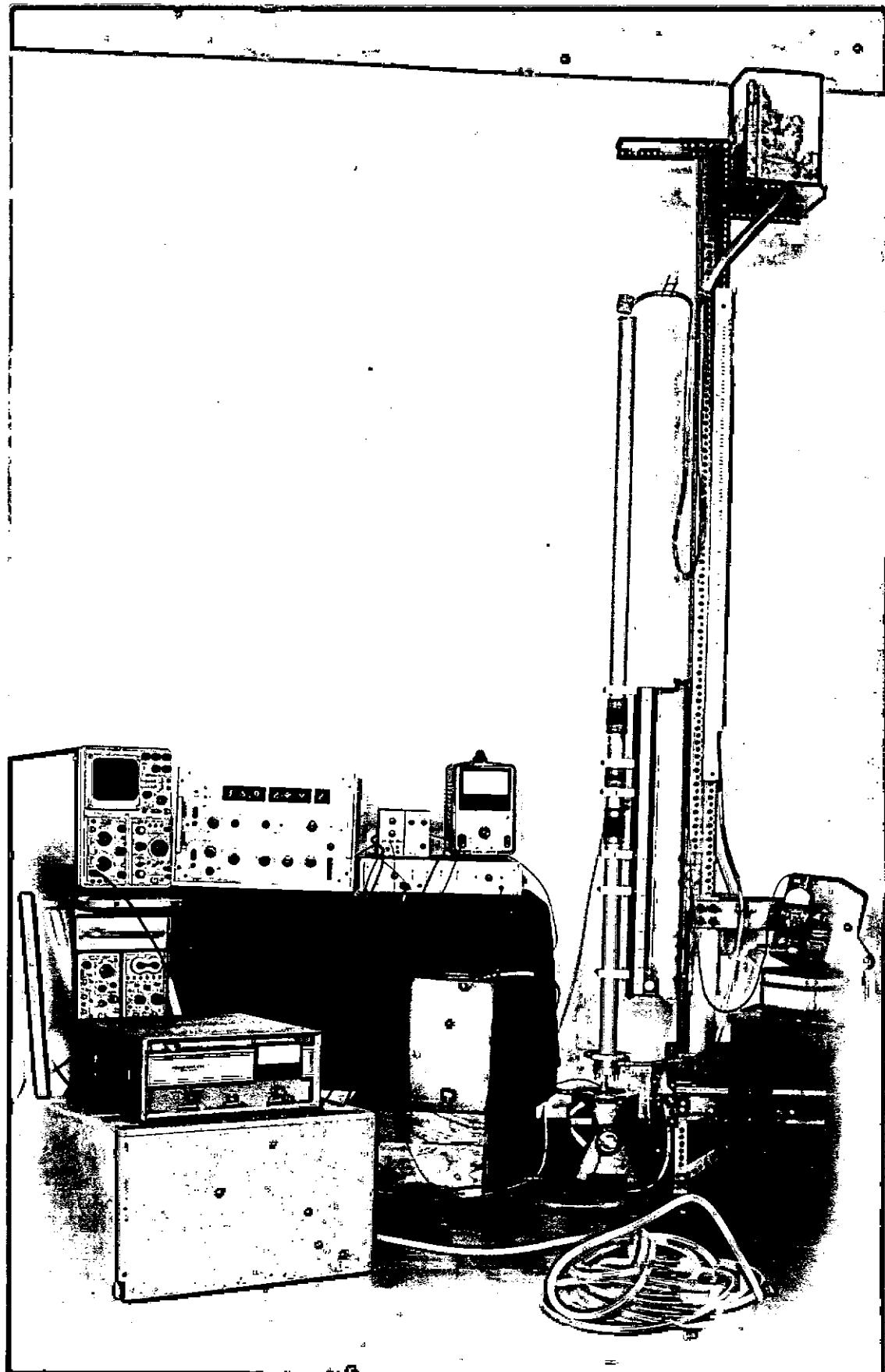


FOTO 2

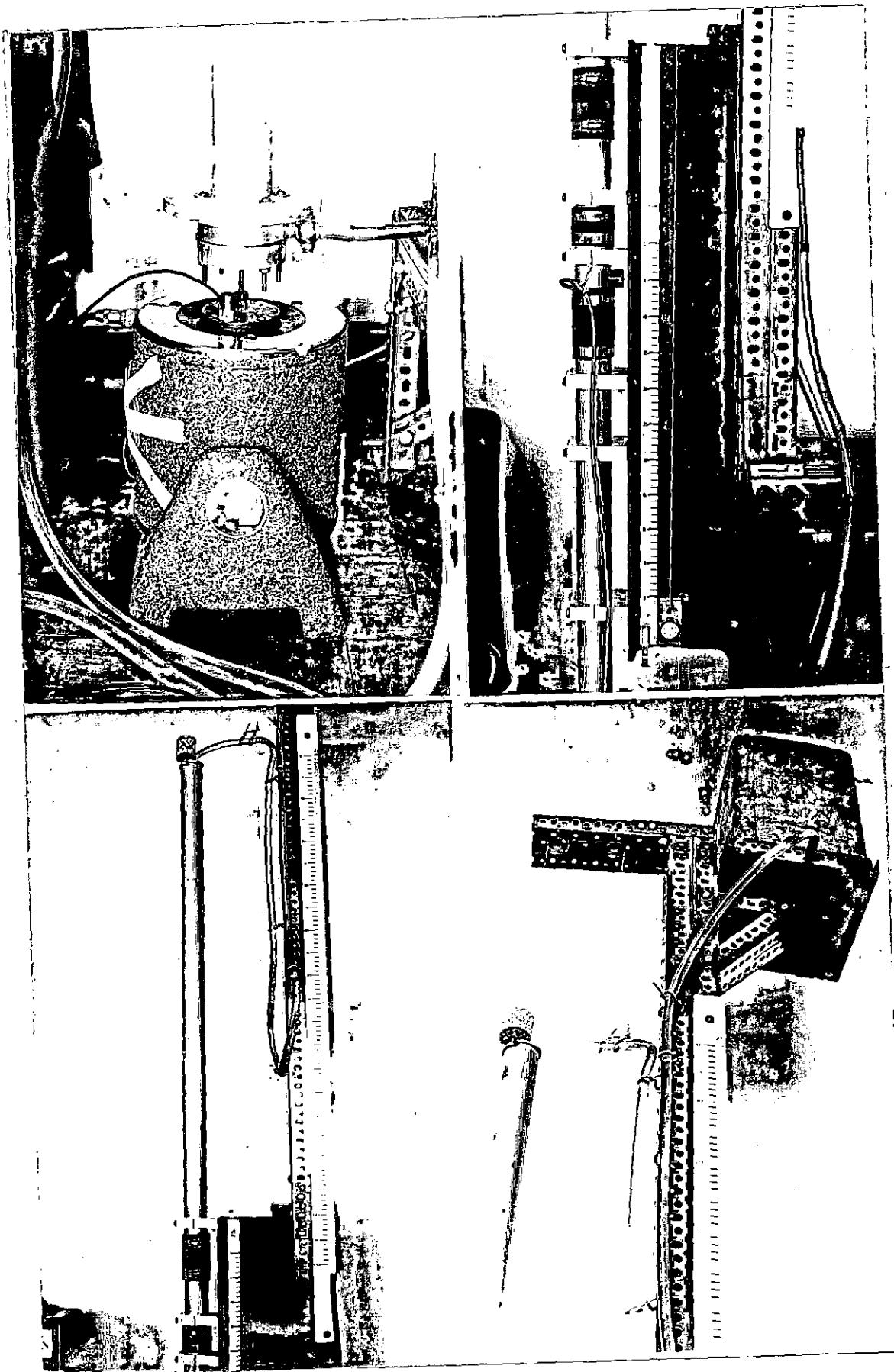


FOTO 3

### II.3.5. Método

Compreende a calibração do tubo sem amostra e a determinação da impedância acústica das amostras.

#### 1. Calibração:

Consiste na amarração do funcionamento do conjunto sem amostra, para as dezesseis frequências e seus ótimos níveis de emissão, escolhidos na pesquisa de funcionamento.

A amarração do funcionamento é feita por dois blocos de instrumentação: o de excitação e controle, e o de medição.

O controle da excitação é feita por dois acelerômetros (B e C do diagrama de blocos, Fig. 6), um colocado na membrana do excitador, e outro num ponto estratégico da estrutura.

O sinal de aceleração da membrana, passa por um integrador (5, Fig. 6) e é transformado em velocidade RMS. O TFA (1, Fig. 6) mede digitalmente a amplitude e o ângulo de fase deste sinal em relação ao sinal gerado.

O nível vibratório da estrutura é medido em aceleração PK a PK ( $m/s^2$ ) no vibration meter (6, Fig. 6).

O Bloco de medições acústicas é realizado esvaziando-se o tubo para cada frequência, situando-se os níveis de ocorrência de máximos e mínimos de pressão na escala de níveis da água, e medindo-se as correspondentes amplitudes de pressão, num voltímetro em decibels.

Volts de Saída(TFA)	Freq. (Hz)	MEDIÇÕES ACÚSTICAS						vel (TFA) R(mv)	$\theta^{\circ}$	Vibration Meter acel PK/PK( $m/s^2$ )
		0	1	2	3	4	5			
0,8	2.000	0 37,5	6 -48,5	14,5 -25 <sup>+</sup>	29 -50,5 <sup>-</sup>	40 -25 <sup>+</sup>		21	99 <sup>o</sup>	0,24

nível(cm)  
pressão(dB)

muda-se a frequência, enche-se o tubo e repete-se o procedimento

0,7	5.200	0 -32,5	3,5 -22 <sup>+</sup>	7 -37 <sup>-</sup>	13 -21 <sup>+</sup>	16 -35,5 <sup>-</sup>	22 -21 <sup>+</sup>	12,1	115 <sup>o</sup>	0,55
-----	-------	------------	-------------------------	-----------------------	------------------------	--------------------------	------------------------	------	------------------	------

Desta forma calibra-se o tubo para as dezesseis freqüências e níveis de excitação pré-fixados.

O bloco de medições de controle da excitação, fornece informações relevantes para a avaliação da qualidade das medidas acústicas do sistema.

Com a colocação da amostra, regula-se o equipamento de forma a repetir-se o mesmo funcionamento do tubo para cada freqüência, e observar-se somente as modificações acústicas que a amostra introduz no sistema de ondas estacionário.

#### AMOSTRA AG-E-5 (comparar com calibração)

0,8	2.000	0 -47	11 -26,3 <sup>+</sup>	26 -51 <sup>-</sup>	36,5 -26,7 <sup>+</sup>	51,5 -50,7 <sup>-</sup>		21 <sup>o</sup>	99 <sup>o</sup>	0,30
-----	-------	----------	--------------------------	------------------------	----------------------------	----------------------------	--	-----------------	-----------------	------

## 2. Colocação da Amostra e o Sistema de Içamento

A amostra é colocada de forma a ficar constantemente imersa na água, com a face superior coincidente com a superfície ÁGUA-AR.

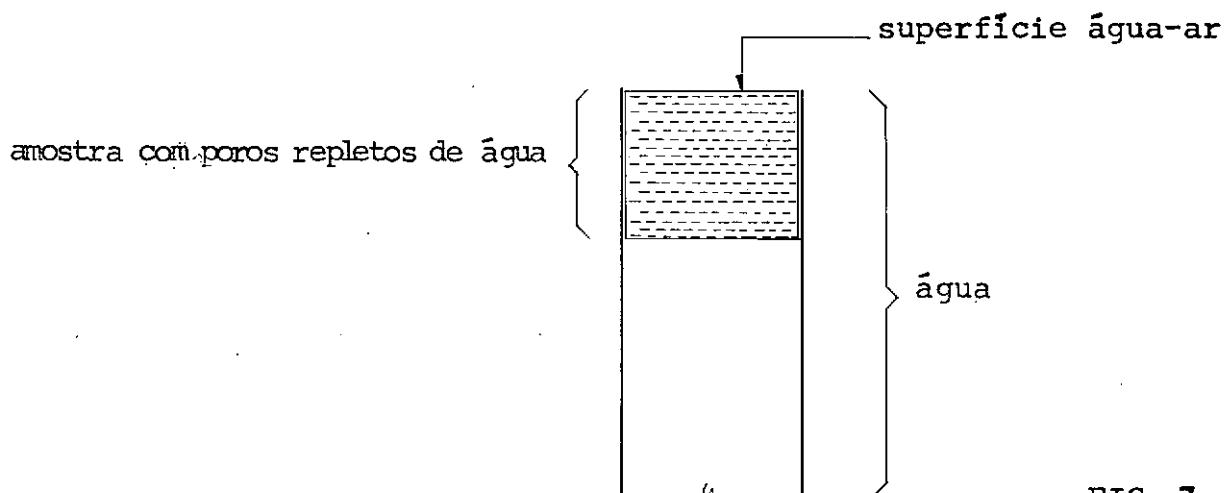


FIG. 7

Como duas das seis amostras, têm densidade duas vezes superior à da água, é necessário um sistema de fios e roldanas para fazê-las acompanhar o nível da água, durante o esvaziamento do tubo.

Para as outras quatro amostras, torna-se desnecessário o uso do sistema de içamento, já que elas flutuam com superfície superior coincidente com a superfície livre da água, e acompanham automaticamente a descida do nível.

### II.4. TUBO DE IMPEDÂNCIA PARA O AR

Trata-se de um tubo de Kundt, convencional nesta área de experimentação acústica. Envolveu na sua construção, somente a escolha dos materiais, dos parâmetros geométricos e da instru-

mentação a ser empregada nas medições acústicas.

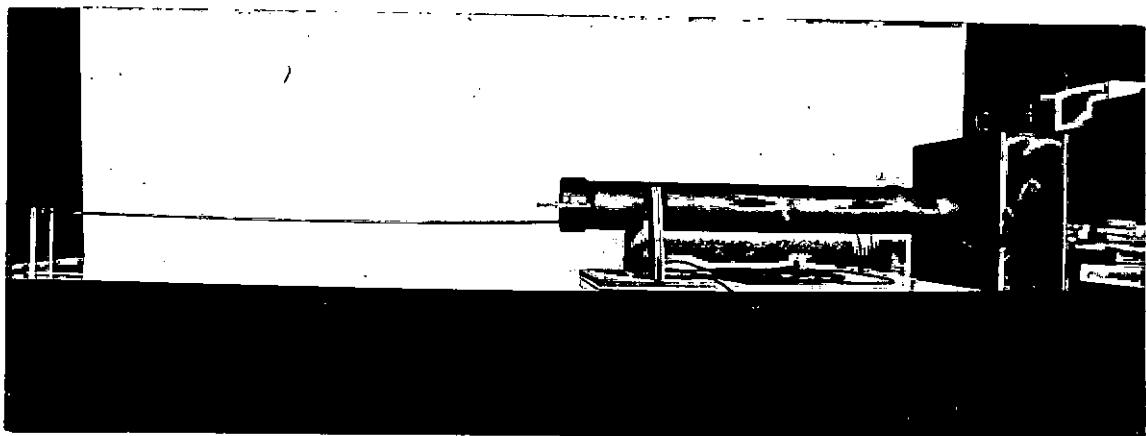


FIG. 8

O sistema no ar é formado pela emissão da onda acústica no interior de um tubo cilíndrico por um alto-falante coaxial, e pela reflexão na superfície do aço que forma o segurador da amostra na sua terminação.

As frequências de utilização definem o comprimento e o diâmetro do tubo: o comprimento deverá ser maior que  $\lambda/4$  da mais baixa frequência e com raio superior a  $\lambda/4$  da mais alta, sendo  $\lambda$  o comprimento de onda de emissão.

A geometria escolhida proporciona medições de 120Hz a 1.800 Hz, faixa que corresponde aproximadamente à divisão harmônica de um teclado de piano, que começa com um LÁ à 110 Hz, e termina com um DÓ à 2.100 Hz.

Entre 120 Hz e 1.800 Hz foram escolhidos quinze frequências, de forma a que ocorresse entre elas uma faixa de comprimentos de onda coincidente com as emitidas no tubo de propagação na

água, para efeito de comparação do mesmo fenômeno com a mudança de meio de propagação.

As frequências escolhidas foram em Hz:

120, 200, 250, 350, 400, 500, 700, 800,  
1.000, 1.300, 1.400, 1.500, 1.600, 1.700,  
1.800.

#### II.4.2. Instrumentação e Metodologia da Medição

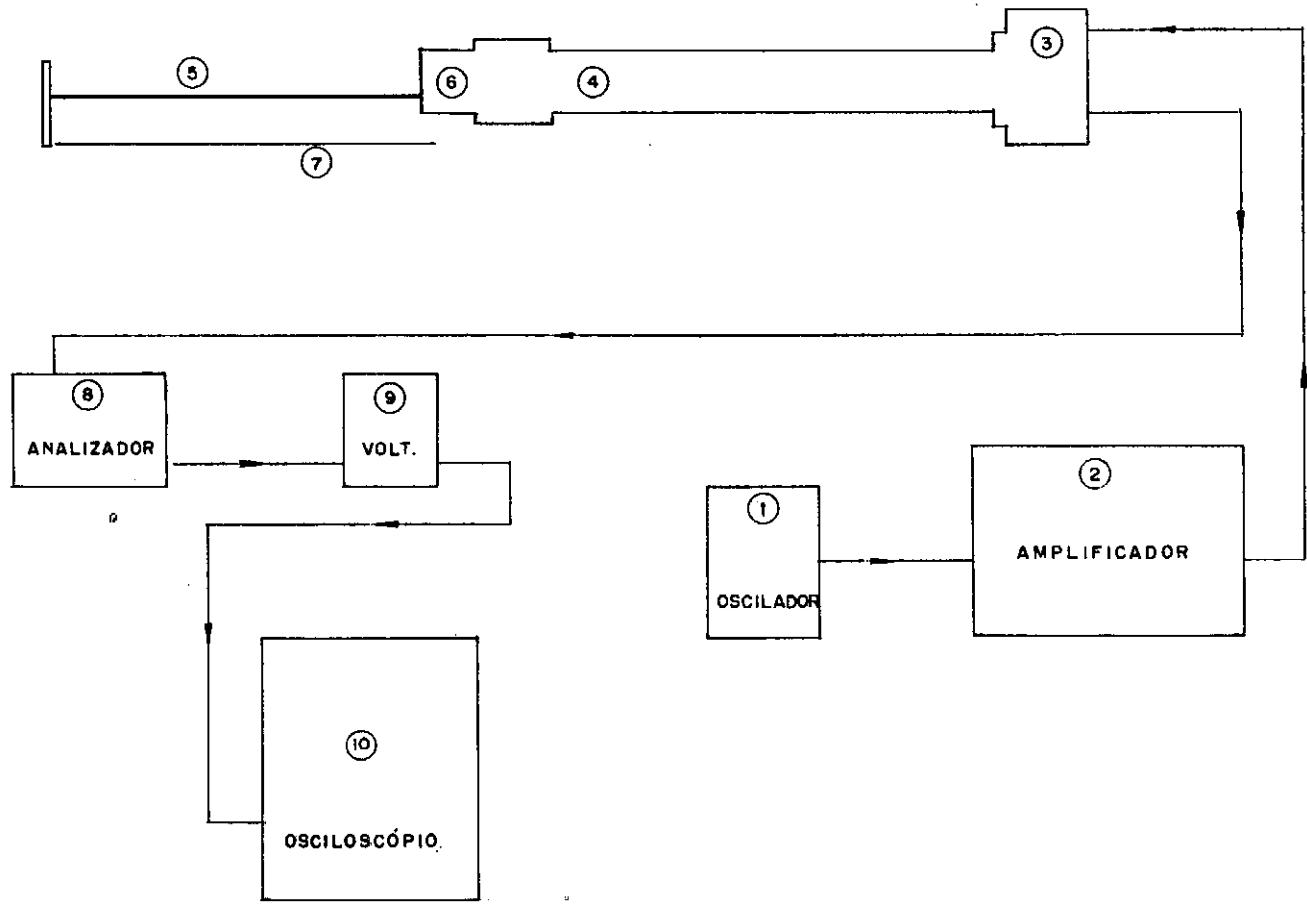
As diversas configurações do sistema onda de pressão-tubo de impedância, fornecem o comportamento do material acústico colocado na terminação do sistema estacionário, traduzido pela impedância acústica normal de fase da amostra.

A metodologia tem por objetivo a medição de  $d_1$ ,  $D$  e SWR do sistema estacionário, que são os parâmetros que entram diretamente na teoria matemática do sistema de ondas estacionário (capítulo I.4).

O funcionamento da experiência é o esquematizado no diagrama de blocos da Figura 9.

A geração do sinal senoidal para frequências puras realiza-se no oscilador (1), é amplificado (2) e aciona o alto-falante (3) dentro da caixa acústica de emissão.

Forma-se o sistema estacionário dentro do tubo definindo seus nós e níveis de pressão acústica. É nele, que o microfone (4) irá perscrutar a localização e amplitude das pressões mínimas e máximas, pelo seu deslocamento através do acionamento da haste



- (3) CAIXA ACUSTICA E ALTO - FALANTE
- (4) MICROFONE
- (5) HASTE
- (6) AMOSTRA
- (7) RÉGUA

FIGURA 9

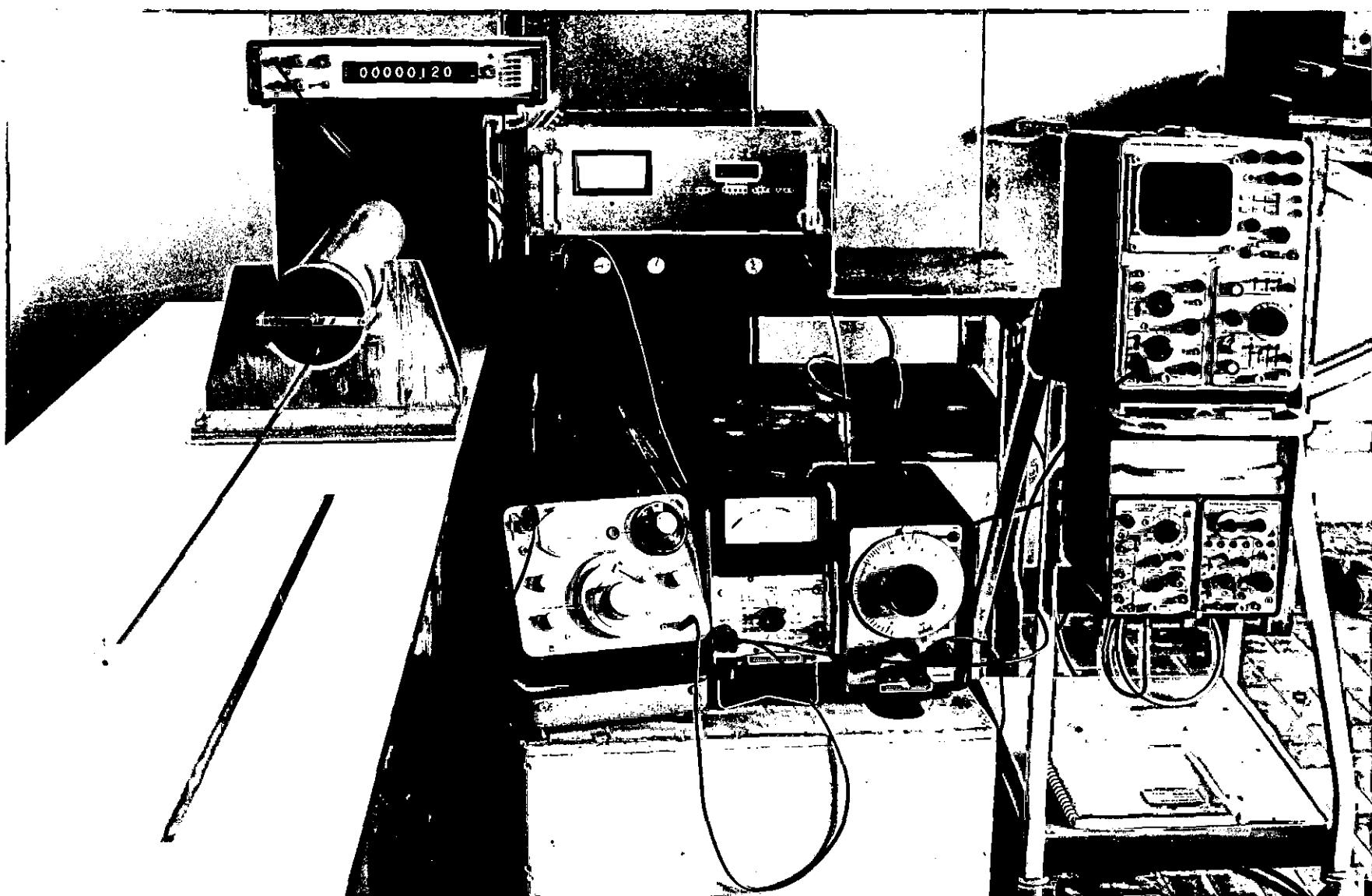


FOTO 4

te (5) e do medidor de distâncias (6). As distâncias são medidas na régua (7) e o sinal de pressão do microfone é filtrado no analizador (8) e medido no voltímetro (9), em decibels. A forma de onda é observada no osciloscópio (10) durante todo o processo.

Para ilustração são apresentados dois exemplos de medições.

Volts de Saída (Ampl)	Freq. (Hz)	MEDIÇÕES ACÚSTICAS						Banda de Nível (d/B)	Observações
		0	1	2	3	4	5		
.	.								
.	.								
30	400	0	22,6	43,5	65,5			110	Calibração
.	.	+2 <sup>+</sup>	-34 <sup>-</sup>	+2 <sup>+</sup>	-32 <sup>-</sup>				(s/Amostra)
50	1.000	0	9,2	18	26,5	35		100	
.	.	-4 <sup>+</sup>	-42 <sup>-</sup>	-4 <sup>+</sup>	-40 <sup>-</sup>	-4 <sup>+</sup>			
.	.								
30	400	0	15	34	58			110	Amostra
		-4	-22 <sup>-</sup>	-4 <sup>+</sup>	-22 <sup>-</sup>				AR-L-8
50	1.000	0	10,5	19	28	37		100	
		-5	-25 <sup>-</sup>	-4 <sup>+</sup>	-25 <sup>-</sup>	-4 <sup>+</sup>			

A amplitude de geração do sinal e a Banda de nível servem para controle do funcionamento do conjunto para cada frequência.

#### II.4.2. Segurador das Amostras

A variação de espessura das amostras no tubo de impedâncias envolve a construção de um segurador de amostras com profundidade variável. A profundidade precisa variar, pois é necessário que a fase de reflexão da amostra, não mude sua localização em relação ao plano definido no tubo como terminação do sistema estacionário. Fica clara a especificação desta condição lembrando-se que, no tubo de propagação na água, é justamente pela mudança de posição deste plano que altera-se a posição dos máximos e mínimos de pressão do sistema.

Para evitar os problemas de vedação e colocação de parafusos de regulagens, etc. cujas soluções tecnológicas tomariam muito tempo, foi adotada uma solução modular que permitisse com um mínimo de peças, o teste em amostras com espessuras, 8, 6, 5, 4, 3, 2, e 1 cm.

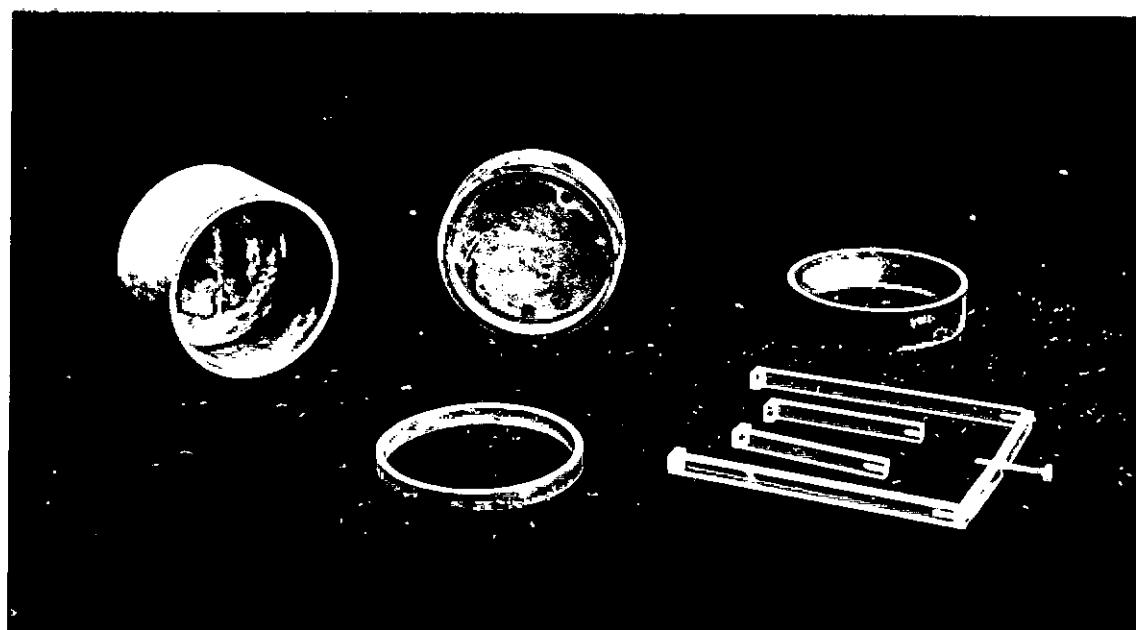
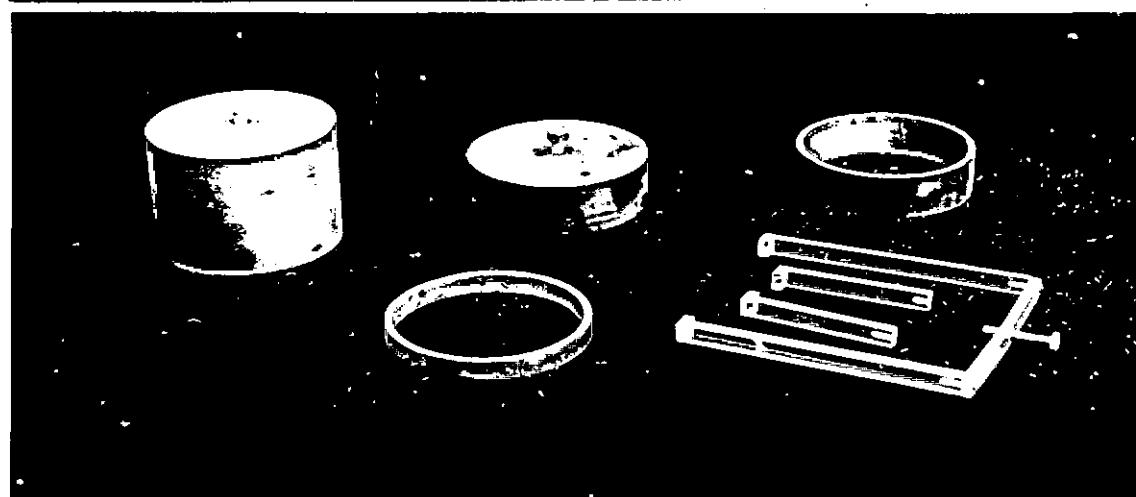
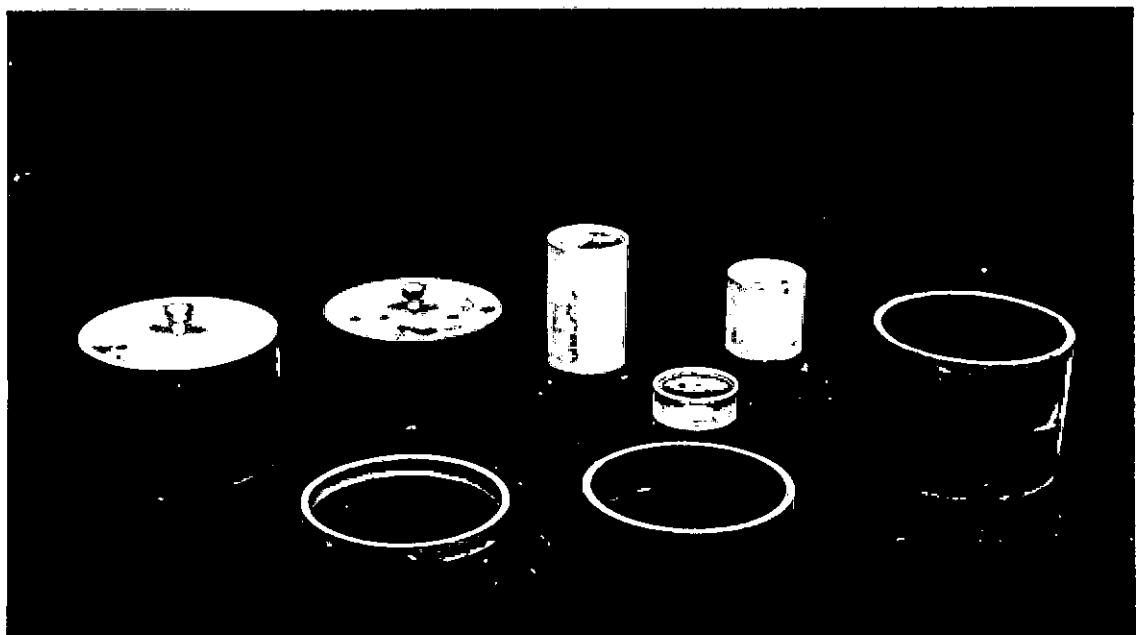


FOTO 5

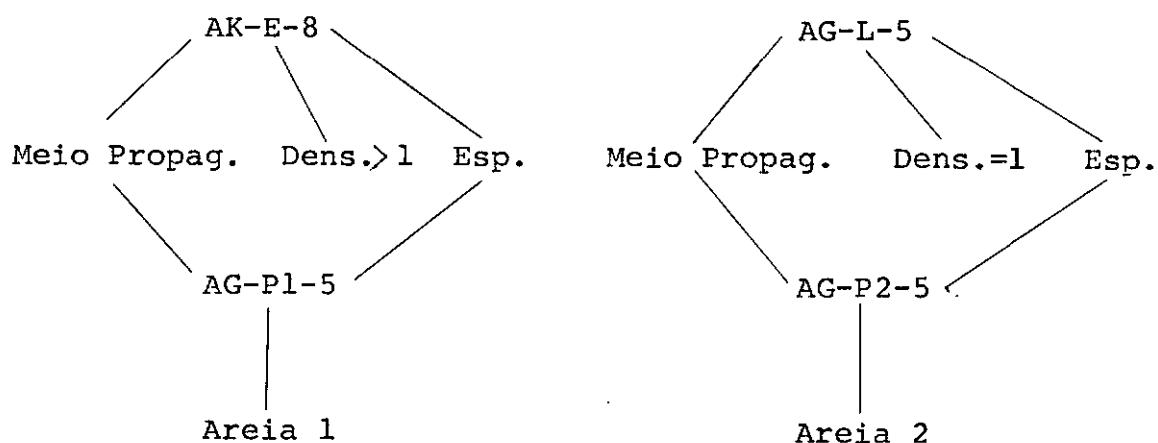
### II.4.3. Amostras

#### 1. Moldes e Materiais

Para a confecção das amostras porosas, foi usada a técnica desenvolvida por MASSARANI [16], empregando moldes de ferro e alumínio, utilizando como materiais, dois tipos de areia e dois tipos de peças de plástico furadas. Materiais acústicos usados comercialmente foram escolhidos, para comparações com o comportamento das amostras porosas. A escolha foi a lã de vidro, o eucatex acústico e o eucatex frigorífico.

Foram confeccionadas vinte e cinco amostras, seis para propagação na água e quinze para propagação no ar, distribuídas em sete famílias, quatro porosas e três acústicas (ver quadro Figura 8).

As famílias de amostras que aparecem no quadro foram caracterizadas por siglas (letras e números) que informam sobre o meio de propagação, densidade do esqueleto e espessura, como por exemplo:



PROPRIEDADE		F	A	M	I	L	I	A
NOME		E	L	P1	P2	LÂ	EXC	EXF
POROSIDADE (%)		0.48	0.48	0.44	0.41	—	—	—
DENSIDADE (— ÁGUA)		1.06	2.46	2.37	2.37	—	—	—
PERMEABILIDADE (cm <sup>2</sup> )		0.20	0.20	0.25	—	—	—	—
MÉTODO DE PROPAGAÇÃO	DIAMETRO (cm)	8	AR-E-8	AR-L-8	AR-P1-8	AR-LÂ-8	AR-EXC-8	
		5		AR-L-5	AR-P1-5	AR-LÂ-5	AR-EXC-4	AR-EXF-4
MÉTODO DE ESSAURAMENTO	DIAMETRO (cm)	8		AR-L-3		AR-LÂ-3	AR-EXC-2	AR-EXF-1
		5			AR-PT-1	AG-P2-1		
MÉTODO DE ÁGUA	DIAMETRO (cm)	8		AG-L-8				
		5	AG-E-5	AG-L-5	AG-P1-5	AG-P2-5		
		5	AG-E-2	AG-L-2	AG-P1-2	AG-P2-2		
		10		10	10	10	10	10

FIGURA 10

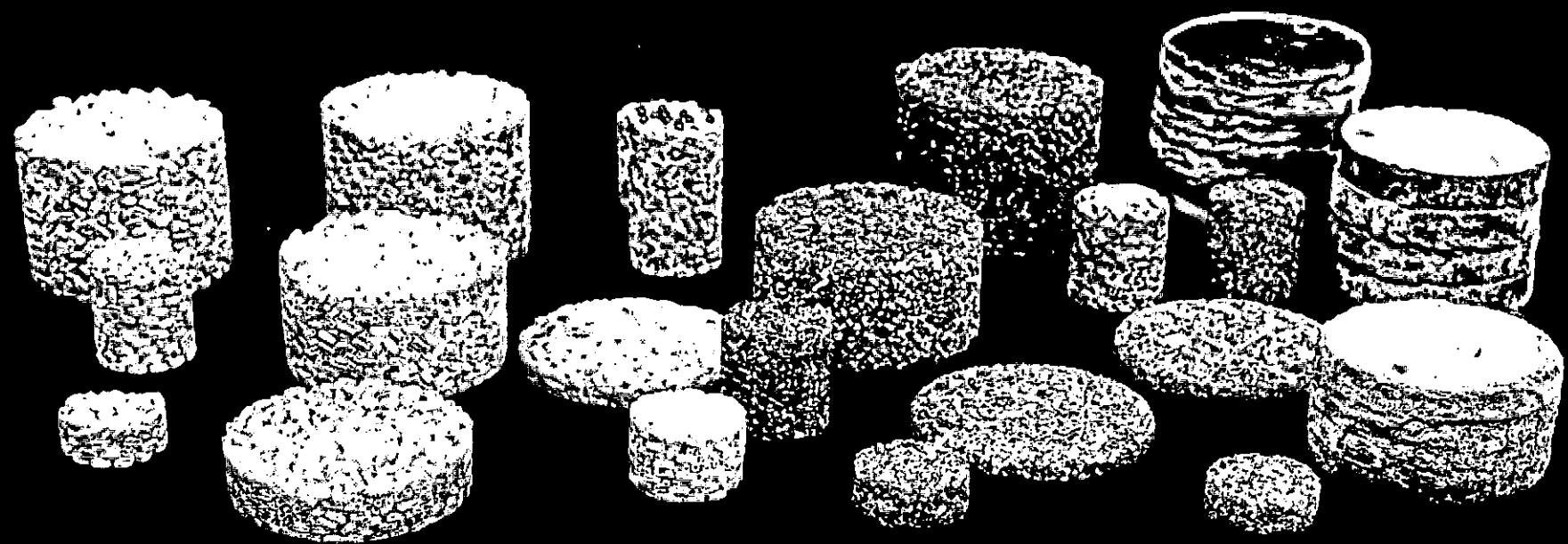


FOTO 6

2. Determinação da Porosidade, Densidade e Permeabilidade

(i) Permeabilidade:

Verifica-se o comportamento mais ou menos permeável de uma amostra porosa, por intermédio da queda de pressão ocasionada por ela, em um fluxo fluido de vazão conhecida; a experiência monitorada foi para o ar.

O ar é forçado por um circuito aberto dotado de (ver Fig. 9):

- (1) Um compressor com by-pass na saída da compressão, para controle de vazão,
- (2) Um dispositivo com 2 flanges de tomada de pressão,
- (3) Um cilindro, receptáculo da amostra, apertado pelos flanges por parafusos compridos, vedados por juntas de borracha,
- (4) Um rotametro que descarrega na atmosfera.

As tomadas de pressão localizam-se antes e depois da amostra e são ligadas a um tubo U de vidro (5) com água, calibrado em mm a H<sub>2</sub>O, que fornece diretamente a diferença de pressão ΔP.

A equação de Forchheimer liga a permeabilidade com as quedas de pressão e vazões,

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k} \left[ 1 + \frac{c \sqrt{k} q \rho}{\mu} \right] q ,$$

onde:

$$q = \frac{Q}{A} - \text{velocidade de volume}$$

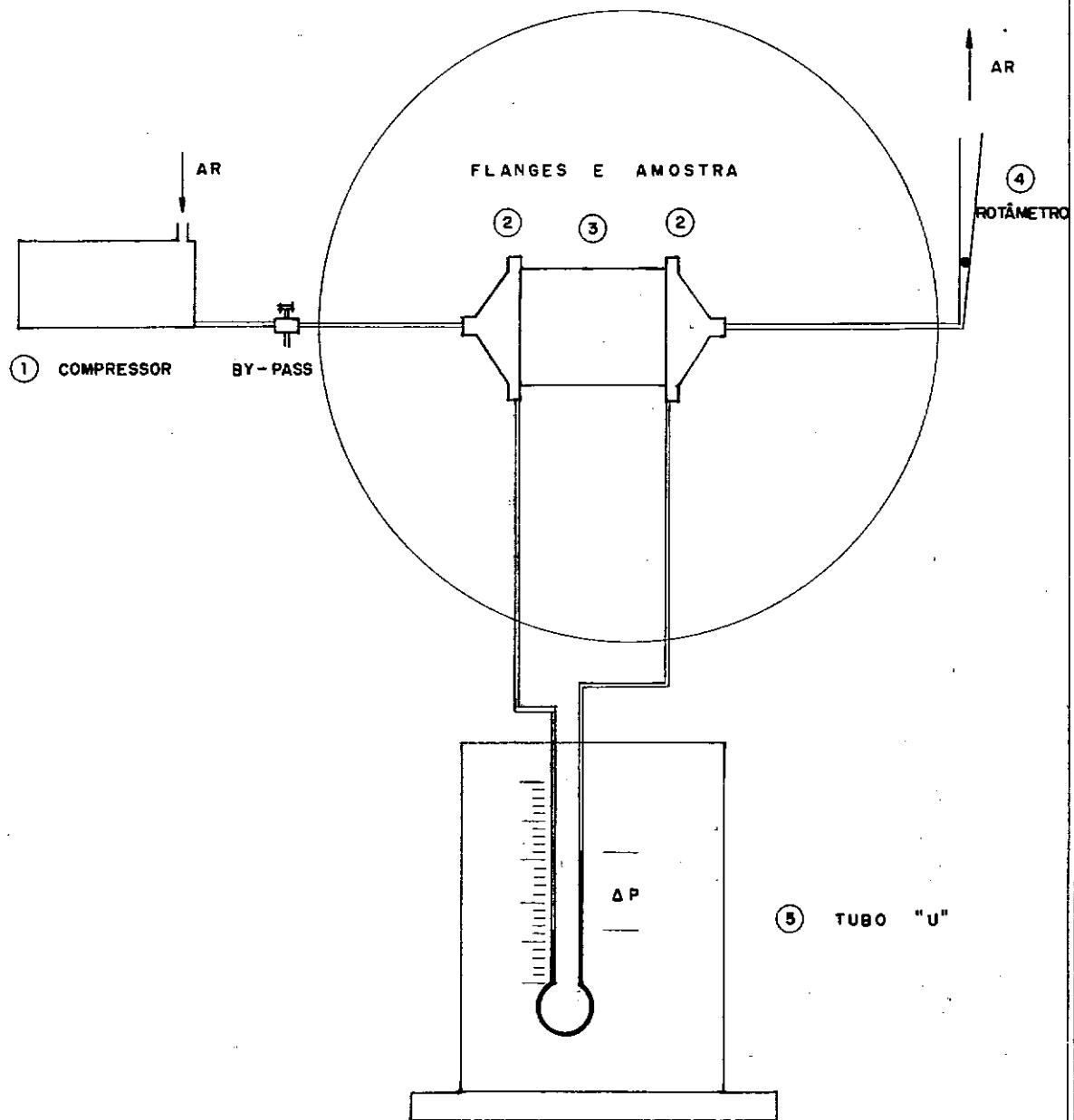


FIGURA 11

$Q$  - vazão volumétrica

$\mu$  - viscosidade do fluido utilizado

$k$  - permeabilidade

$c$  - constante

$\Delta p$  - queda de pressão

$L$  - comprimento da amostra

$\rho$  - densidade do fluxo

$$\frac{\Delta p}{qL} = \frac{\mu}{k} + \frac{c}{\sqrt{k}} \rho q$$

Esta equação representa uma variação linear de  $\frac{\Delta p}{qL}$  com  $q$ .

Medindo-se para quatro valores de vazão as quedas de pressão, constroi-se esta reta e onde ela cortar o eixo  $\frac{\Delta p}{qL}$ , a ordenada em relação a origem é uma extração para  $\frac{\mu}{k}$ . Descobre - se  $k$  (Fig. 10).

Duas amostras porosas foram pesquisadas, a AG-E-5 e a AG-P1-5 representantes das duas famílias de amostras mais importantes.

Os dados medidos foram,

#### AMOSTRA AG-E-5

$\Delta P$ (mm H <sub>2</sub> O)	vazão (cm <sup>3</sup> /min)
----------------------------------	------------------------------

1	16	42.000
2	22	65.000
3	29	84.000
4	32	97.400

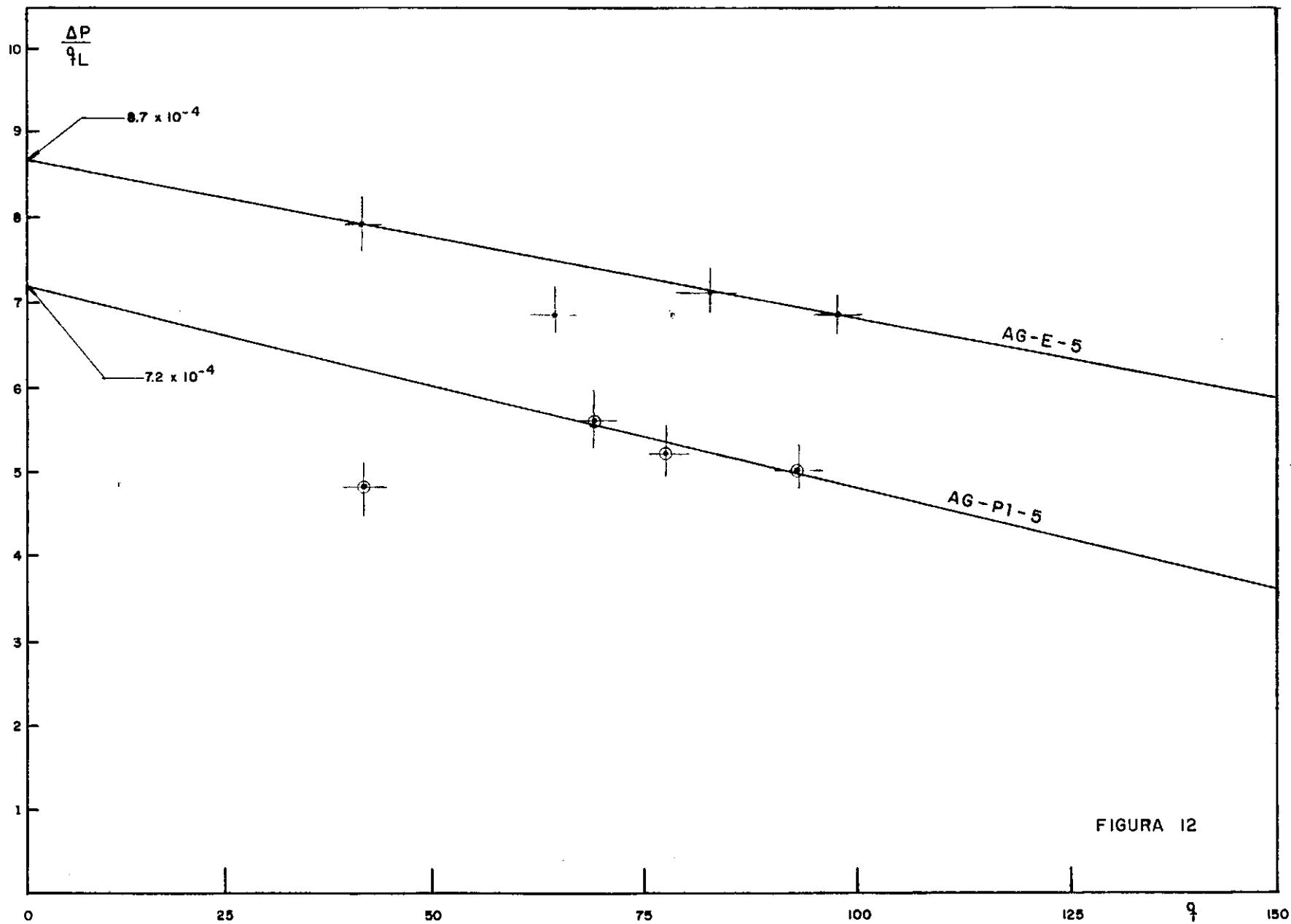


FIGURA 12

## AMOSTRA AG-P1-5

	P (mm H 0)	vazão (cm /min)
1	10	43.000
2	15	55.600
3	20	80.000
4	23	96.600

tira-se do gráfico (Fig. 12)

$$\frac{\mu}{K_{AG-E-5}} = 8,7 \times 10^{-4} \frac{d.s}{cm^4}$$

$$\frac{\mu}{K_{AG-P1-5}} = 7,2 \times 10^{-4} \frac{d.s}{cm^4}$$

$$\frac{\mu}{K_{AR}} = 0,000181 \frac{d.s}{cm^2}$$

$$K_{AG-E-5} = 0,20 \text{ cm}^2$$

$$K_{AG-P1-5} = 0,25 \text{ cm}^2$$

(ii) Porosidade e densidade:

As medições de porosidade efetiva e densidade do esqueleto são conseguidas com o uso convencional do picnômetro.

Determina-se o volume (V) das amostras por medições da geometria, e por pesagens sucessivas, a Massa do Meio Poroso Seco ( $m_s$ ), a Massa do Picnômetro + Água + Meio Poroso ( $m_t$ ) e a Massa do Picnômetro + Água ( $m_a$ ).

Sendo  $V_s$  o volume de espaços vazios:

$$m_t = m_{pic} + \text{massa da água} + m_s$$

$$m_a = m_{pic} + \text{massa da água} + V_s \rho$$

Obtem-se,

$$V_s = \frac{m_s + (m_a - m_t)}{\rho}$$

como  $\rho$  (densidade da água) = 1.00 g/cm<sup>3</sup>

$$V_s = m_s + (m_a - m_t)$$

A porosidade:

$$\Omega = \frac{V - V_s}{V} \quad \begin{array}{l} V \text{ - volume do meio poroso} \\ V_s \text{ - volume do esqueleto} \end{array}$$

$$\Omega = 1 - \frac{m_s + (m_a - m_t)}{V}$$

A densidade do esqueleto:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

As medições realizadas foram:

	AG-E	AG-L	AG-P1	AG-P2
$V$ (cm <sup>3</sup> )	33,56	32,52	34,72	26,95
$m_s$ (g)	18,5	17,3	48,0	38,0
$m_t$ (g)	398,0	397,0	425,5	419,0
$m_a$ (g)	397,0	397,0	397,0	397,0
$\Omega\%$	48%	48%	44%	41%
$\rho_s$	1,06	1,00	2,46	2,37

## II.5. TRATAMENTO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na experiência da propagação no ar, a metodologia proporciona exatamente as medições de  $(SWR)_{ij}$ ,  $(d_i)_{ij}$  e  $D_i$ , ( $i$  = cada frequência e  $j$  = cada amostra), e a aplicação da teoria matemática é direta, para a determinação das impedâncias e os coeficientes de absorção.

Na experiência de propagação na água, determinam-se posições da superfície de reflexão, para as quais ocorrem máximos e mínimos de pressão em um ponto fixo do tubo, fazendo-se necessário um esquema de transformação de dados para a obtenção das distâncias  $(d_i)_{ij}$  e  $D_i$ , aproveitando-se diretamente somente os  $(SWR)_{ij}$ .

### 1. Critério de Escolha das Distâncias $D_i = \lambda_i/2$

Os comprimentos de onda formados no tubo de propagação na água devem satisfazer a uma condição de contorno, isto é, que a pressão acústica na interface ÁGUA-AR seja um mínimo (capítulo I, 4).

Esta condição exige, que exista um número inteiro de comprimentos de onda entre o transdutor e um nível para o qual ocorre mínimo no transdutor.

Dispõe-se de quinze a vinte medições entre mínimos de pressão para cada frequência de emissão.

O critério consiste em ajustar a média aritmética das quinze medições para cada frequência, à condição de contorno. Faz-se o ajustamento para os níveis  $M_i$  mais baixos medidos, para assim

minimizar-se a propagação de erros com a multiplicação de fatores menores possíveis.

Resumindo o critério,

( i ) média aritmética das quinze medições das distâncias entre mínimos  $\bar{D}_i$

( ii) condição de contorno  $\bar{\bar{D}}_i = \frac{132 - M_i}{n}$ , n - inteiro

(iii) ajustamento de  $\bar{D}_i$  com  $\bar{\bar{D}}_i$

$$D_i$$

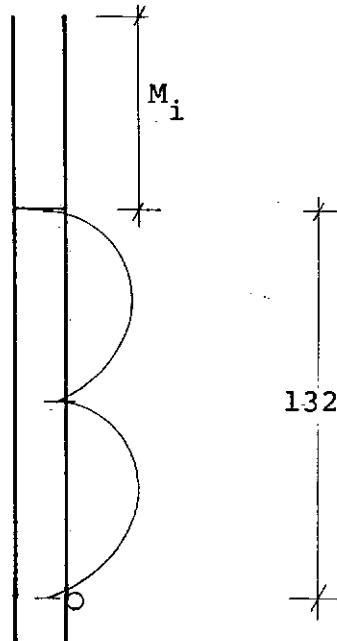


FIG. 13

## 2. As distâncias $(d_1)_{ij}$

A colocação das amostras significa a liberação da condição de contorno na superfície de reflexão e o mínimo de pressão que nela ocorria pode se deslocar, formando a distância  $d_1$  entre a face e o primeiro mínimo de pressão .

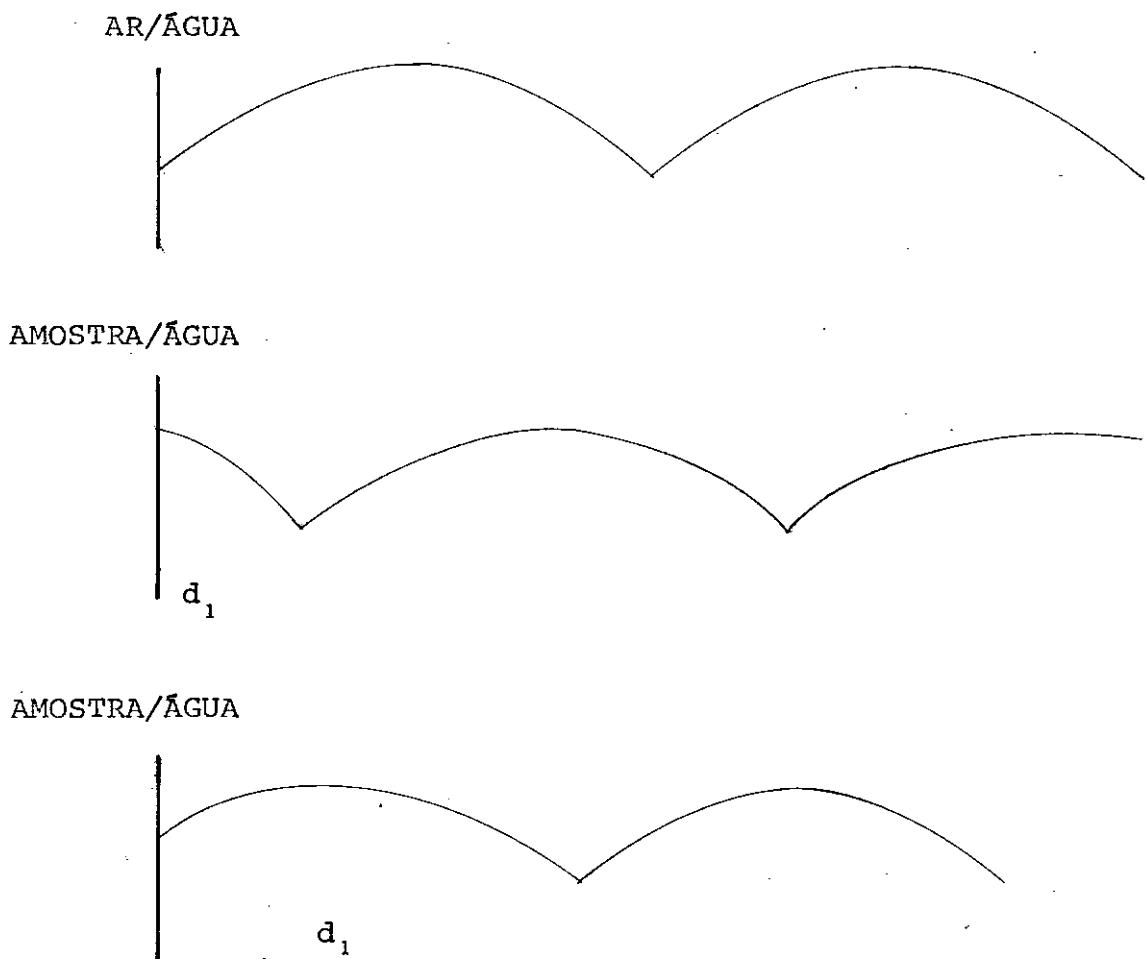


FIG. 14

A determinação dos  $(d_i)_{ij}$  a partir das medições dos níveis de ocorrência de mínimos no transdutor, faz-se facilmente observando que,

$$(d_i)_{ij} = [132 - (M_i + e_j)] - n \times D_i$$

$M_i$  - nível mais baixo de ocorrência de mínimo no transdutor para a frequência considerada.

$e_j$  - espessura da amostra

$n$  - inteiro

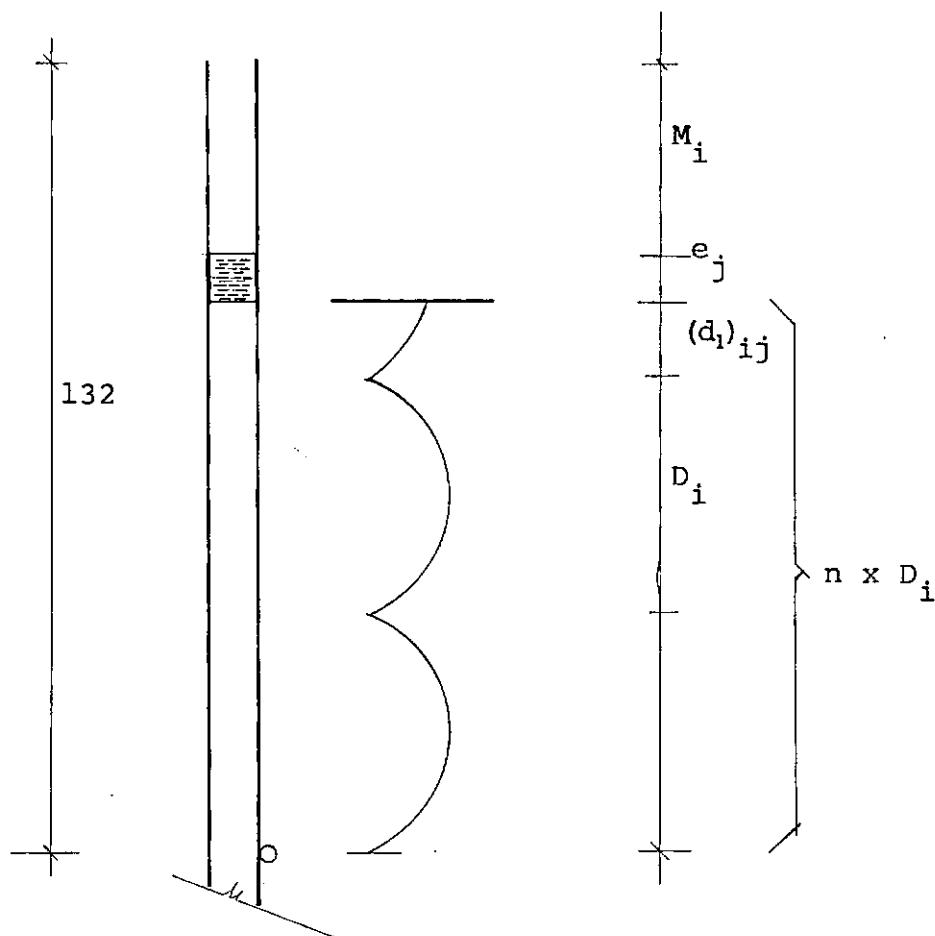


FIG. 15

Estas transformações possibilitam o uso da mesma estrutura matemática de tratamento do problema e o mesmo programa de computador para determinação das propriedades acústicas das amostras no AR e na ÁGUA.

## CAPÍTULO III

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

#### III.1. INTRODUÇÃO

Os resultados experimentais estão apresentados em gráficos de impedância complexa e coeficiente de absorção versus frequência.

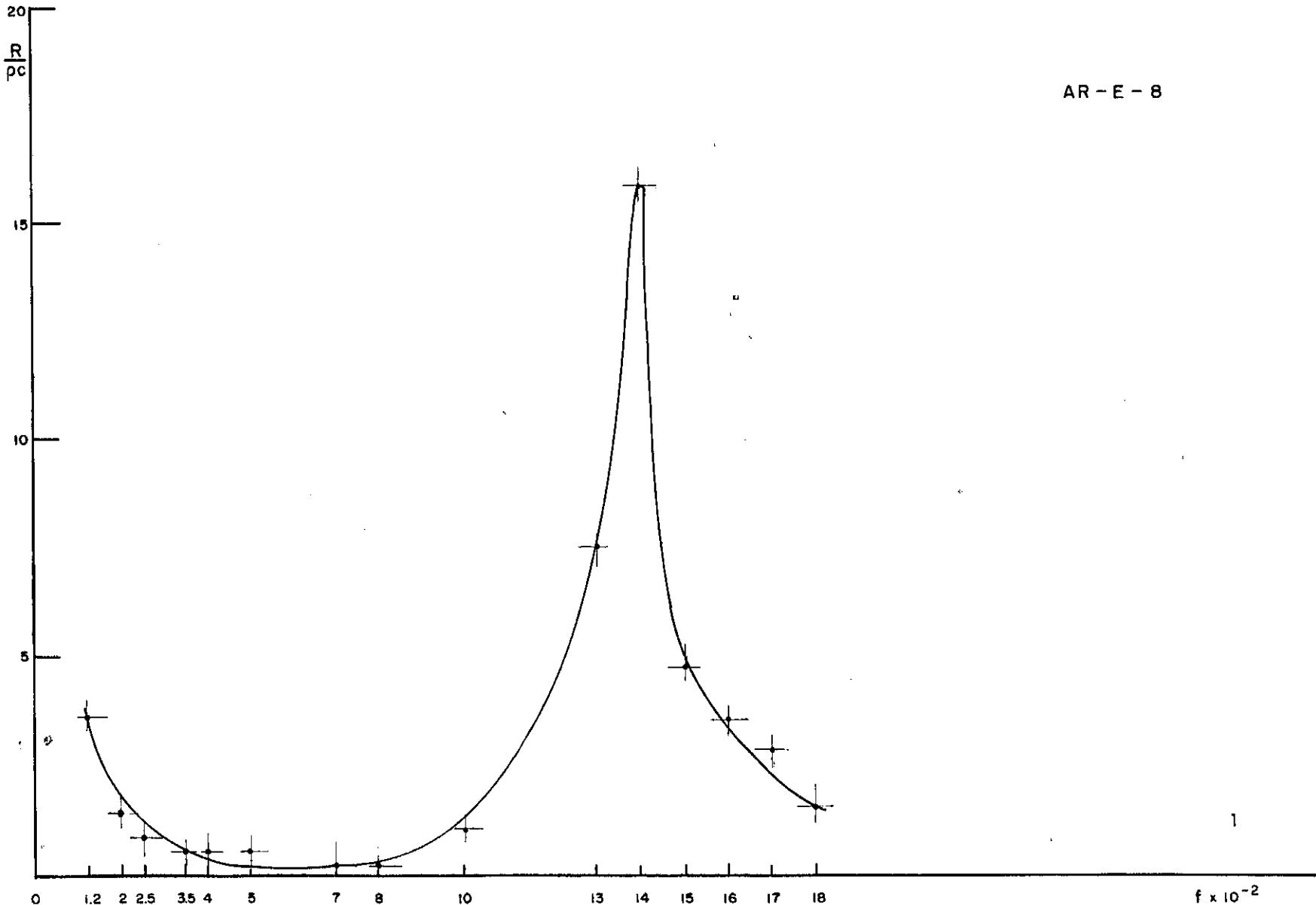
$R/\rho c$ ,  $X/\rho c$  e  $\alpha$  são respectivamente resistência, reatância e absorção acústica das amostras e o  $\rho c$  refere-se à impedância característica do meio de propagação considerado.

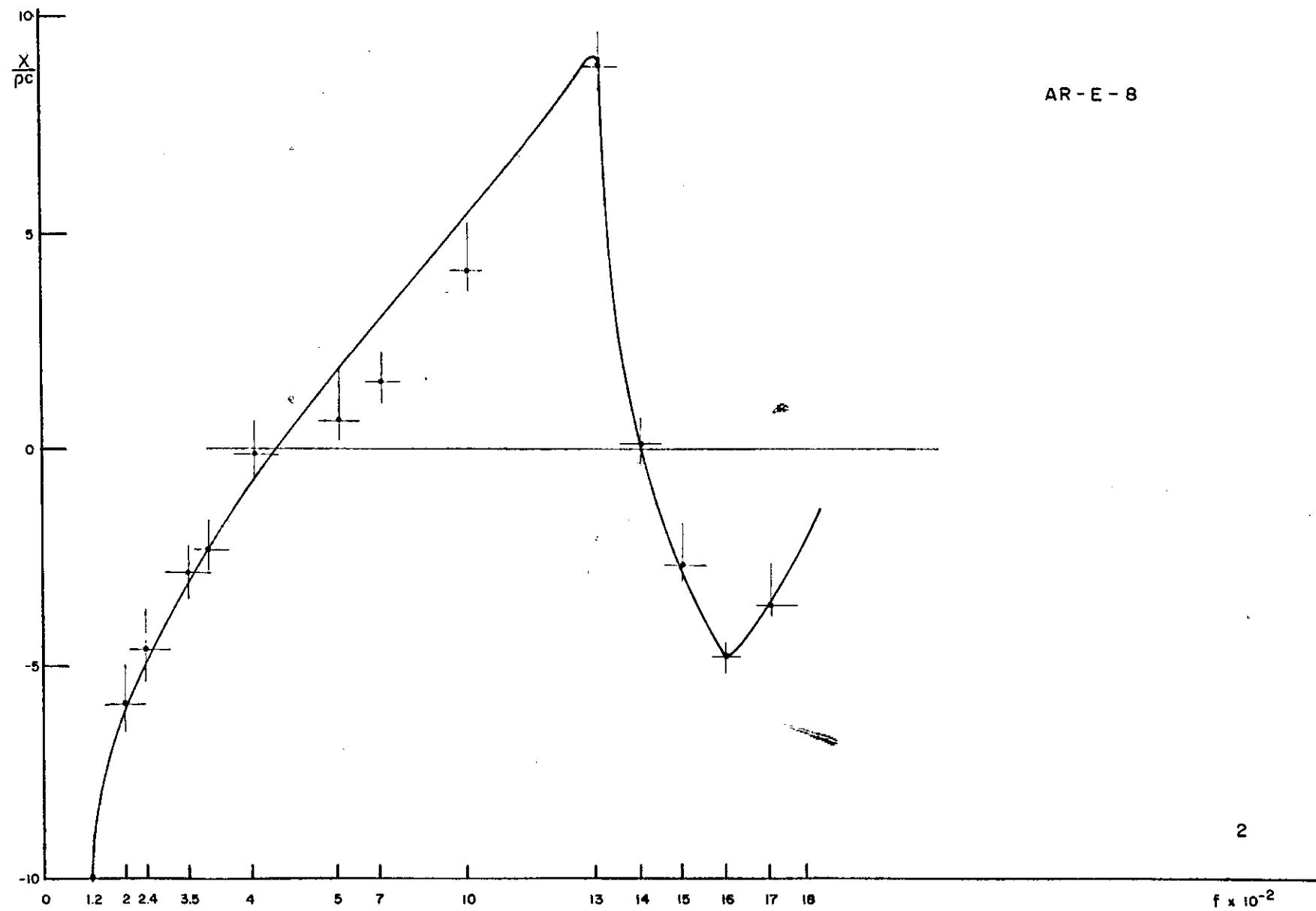
Estes gráficos estão numerados de 1 a 36 e caracterizam a informação experimental analisada.

#### III.2. GRÁFICOS

AR - E - 8

62

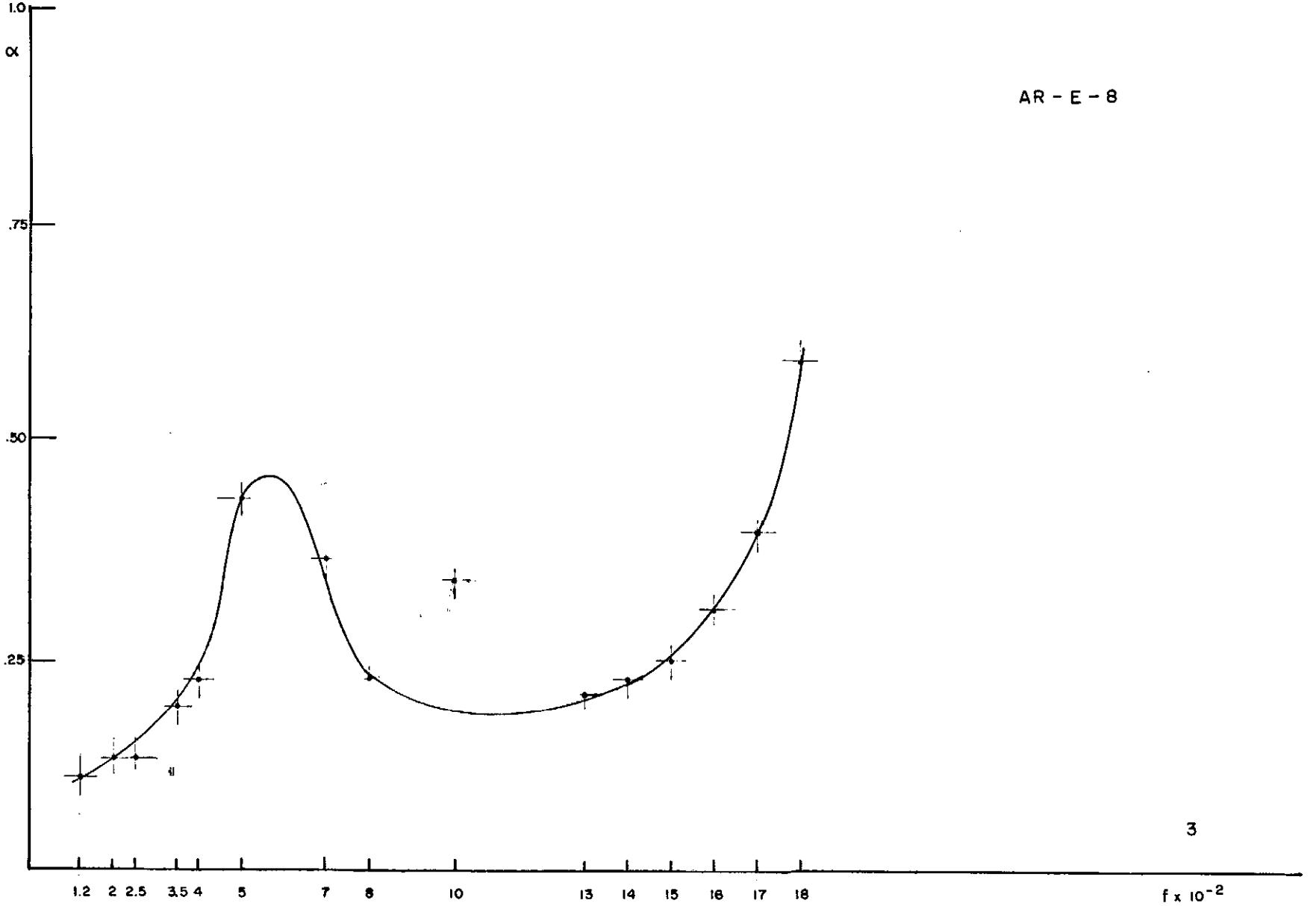




AR-E-8

63

2

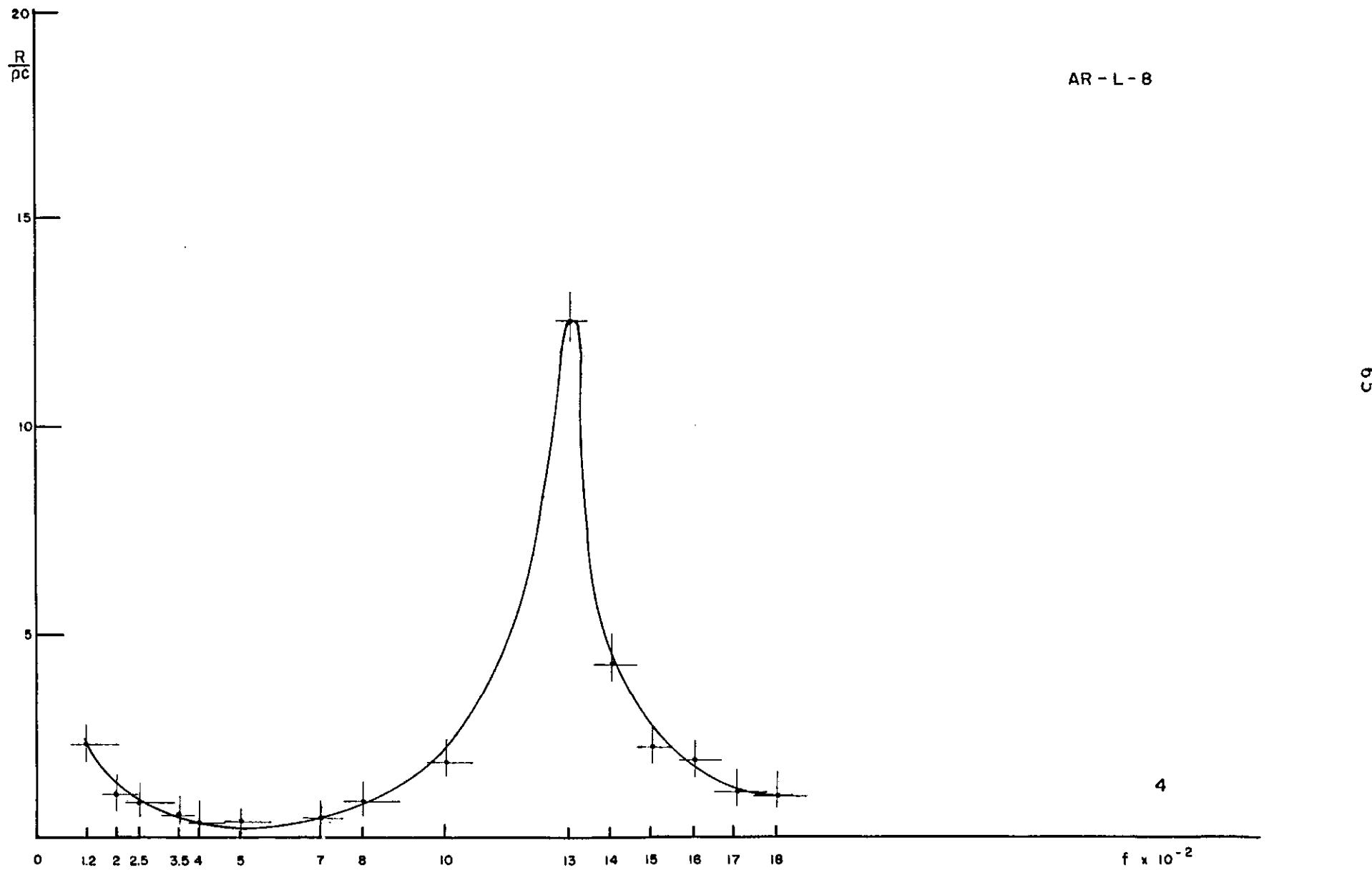


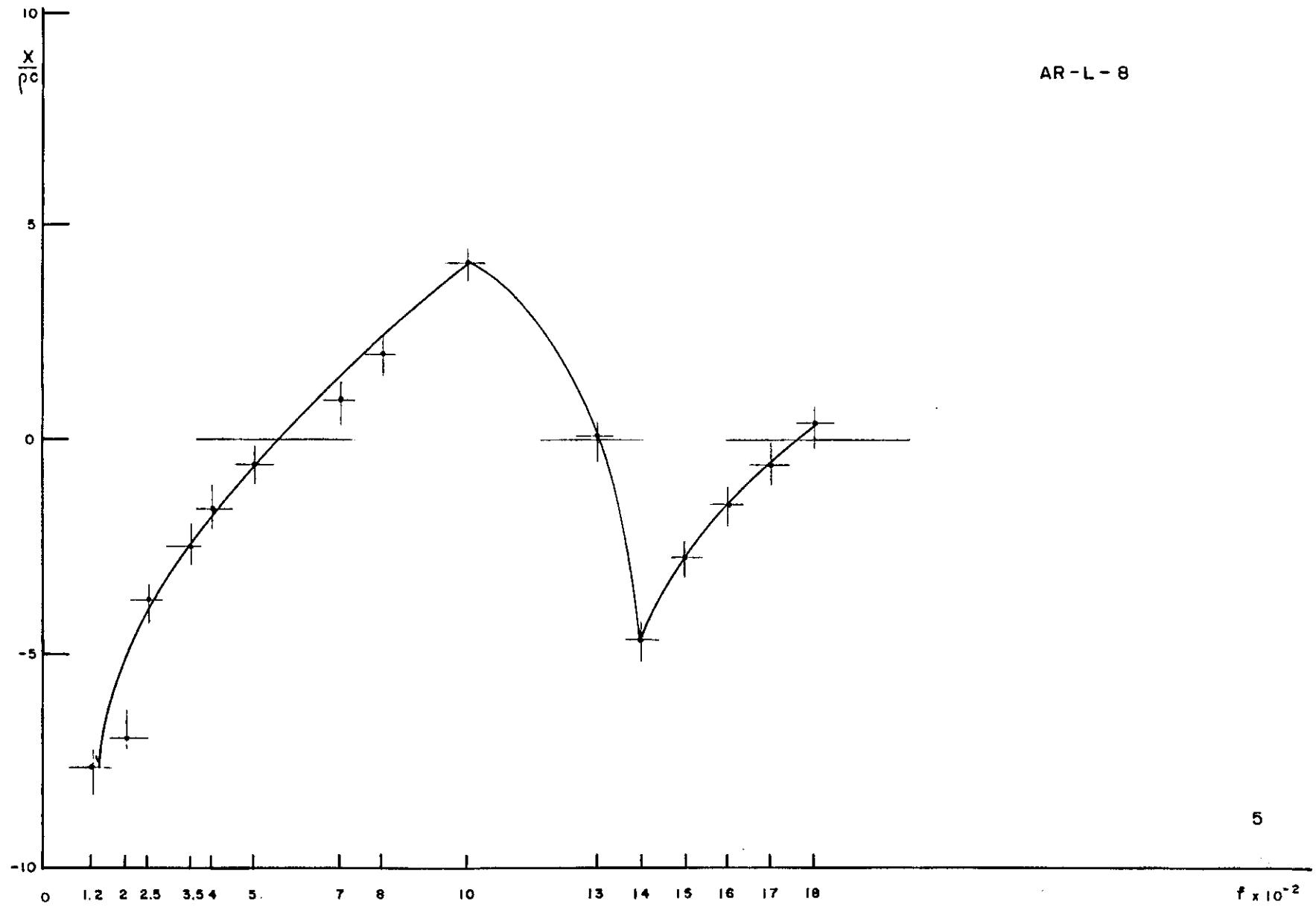
AR - E - 8

64

3

$f \times 10^{-2}$



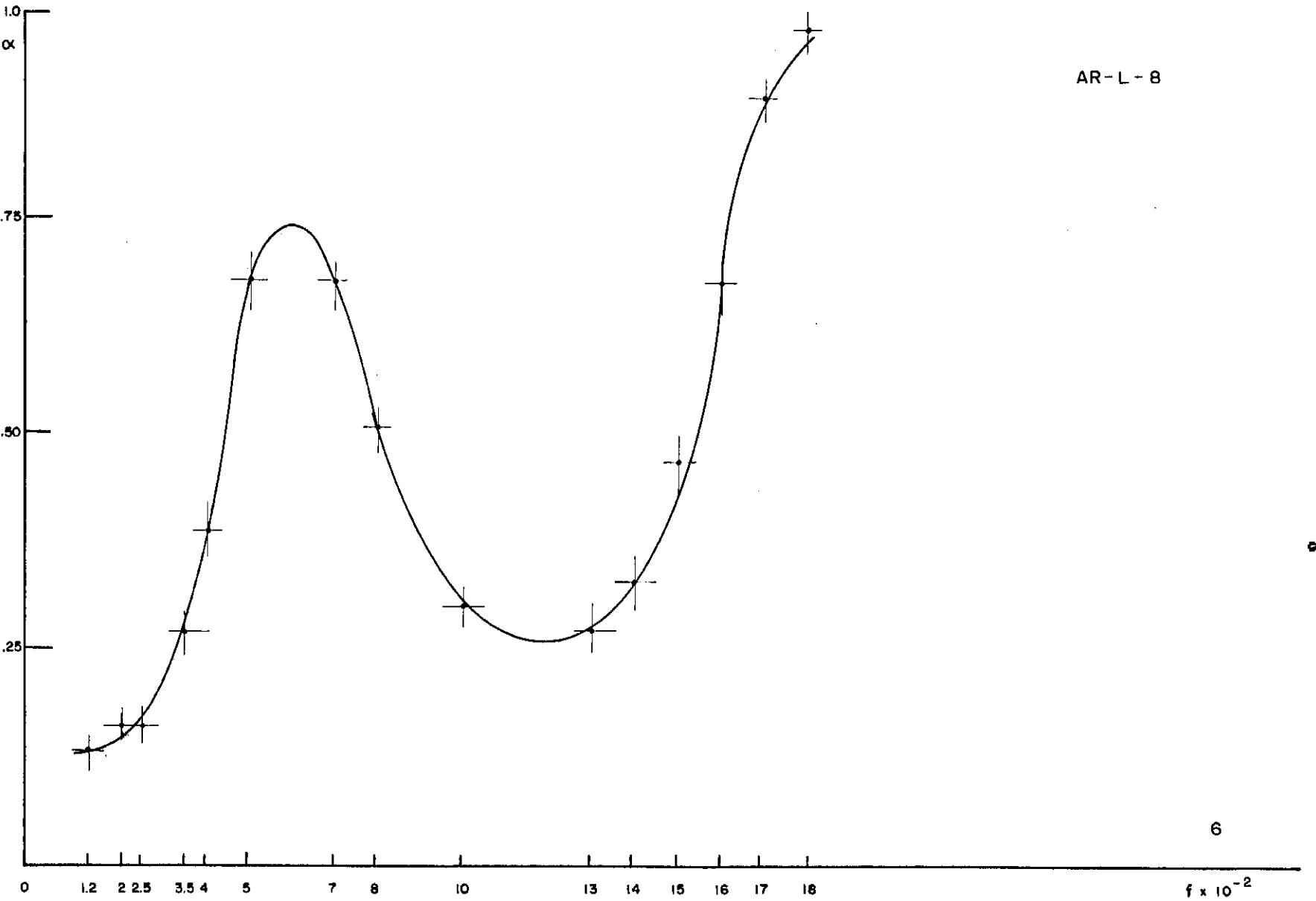


AR-L-8

96

5

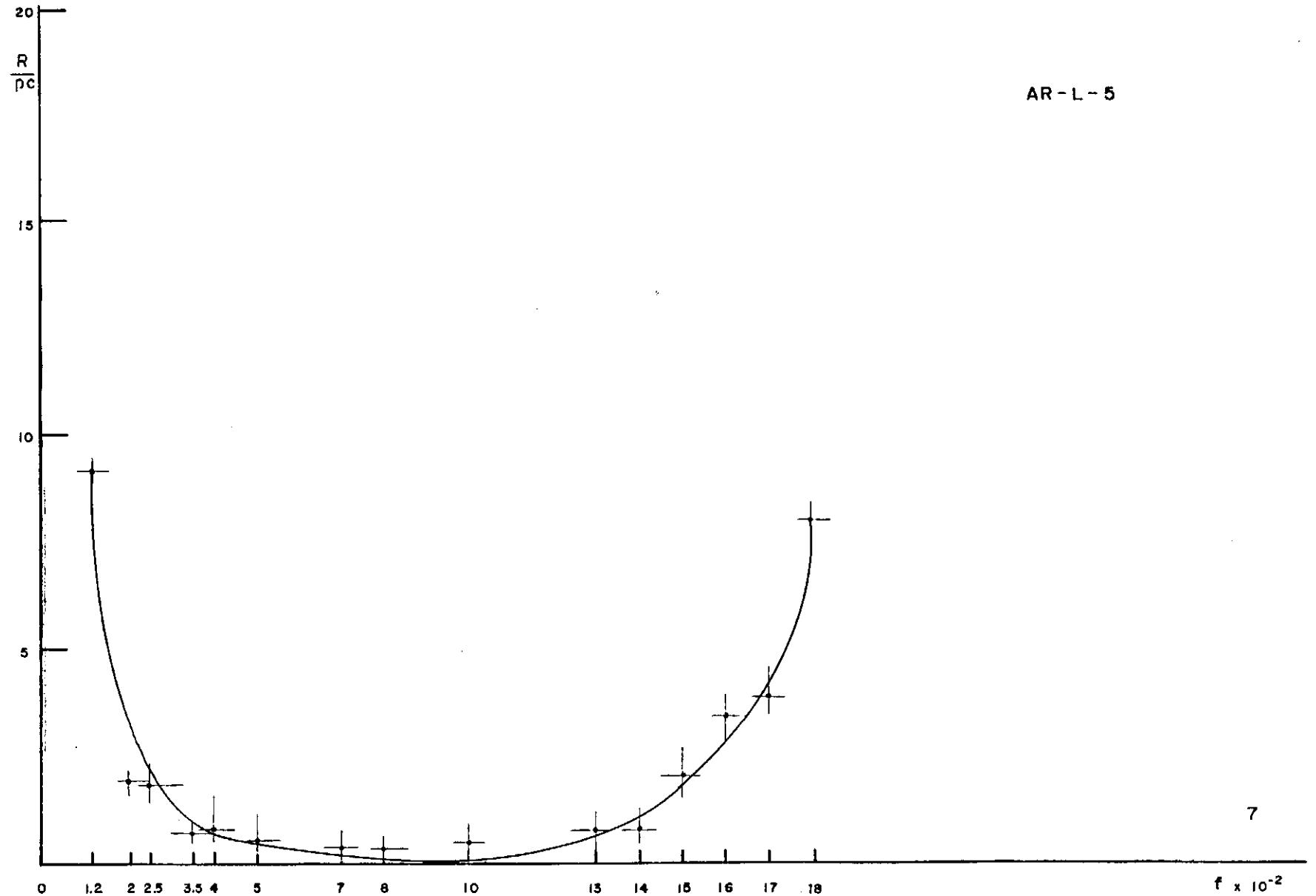
$f \times 10^{-2}$

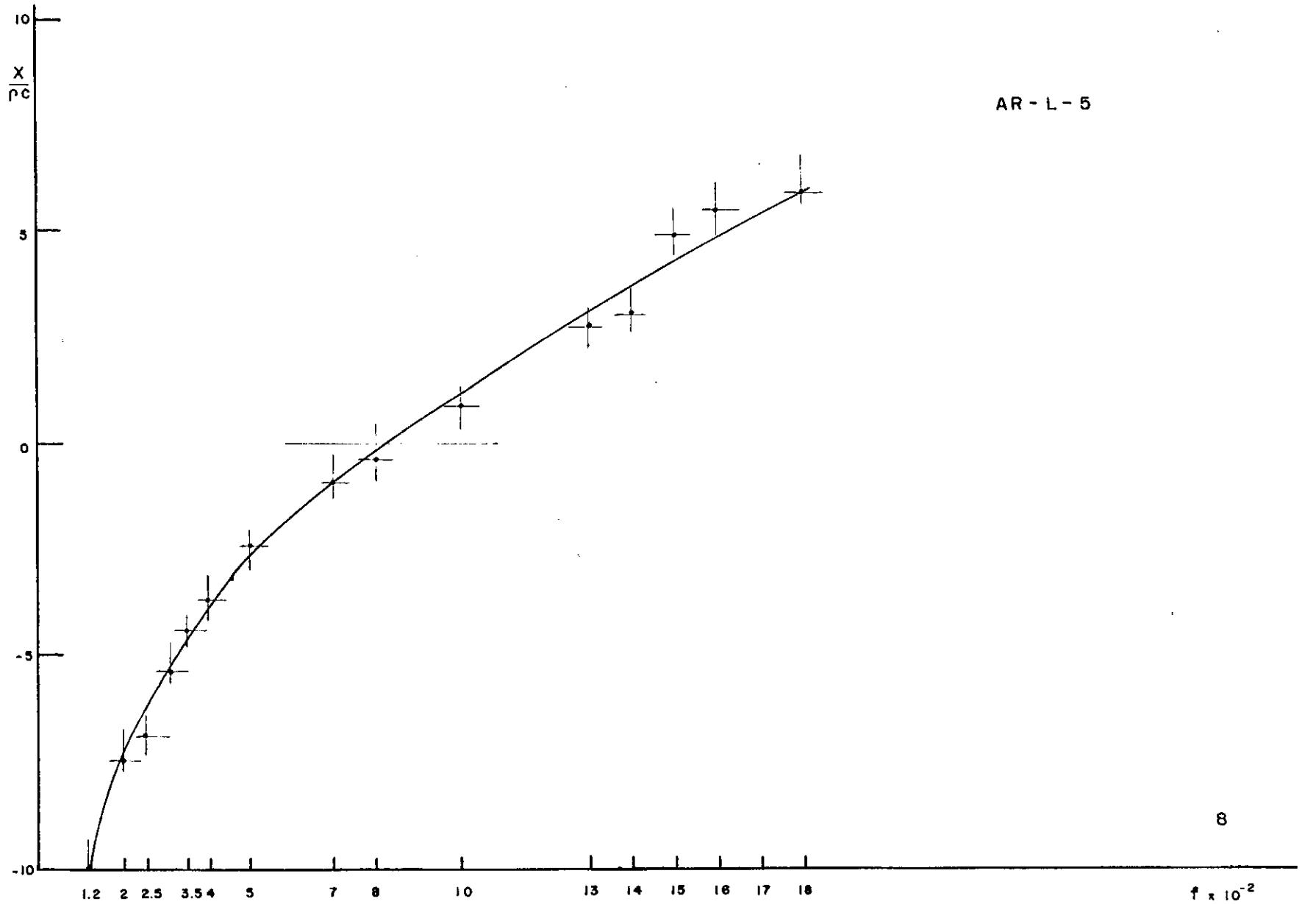


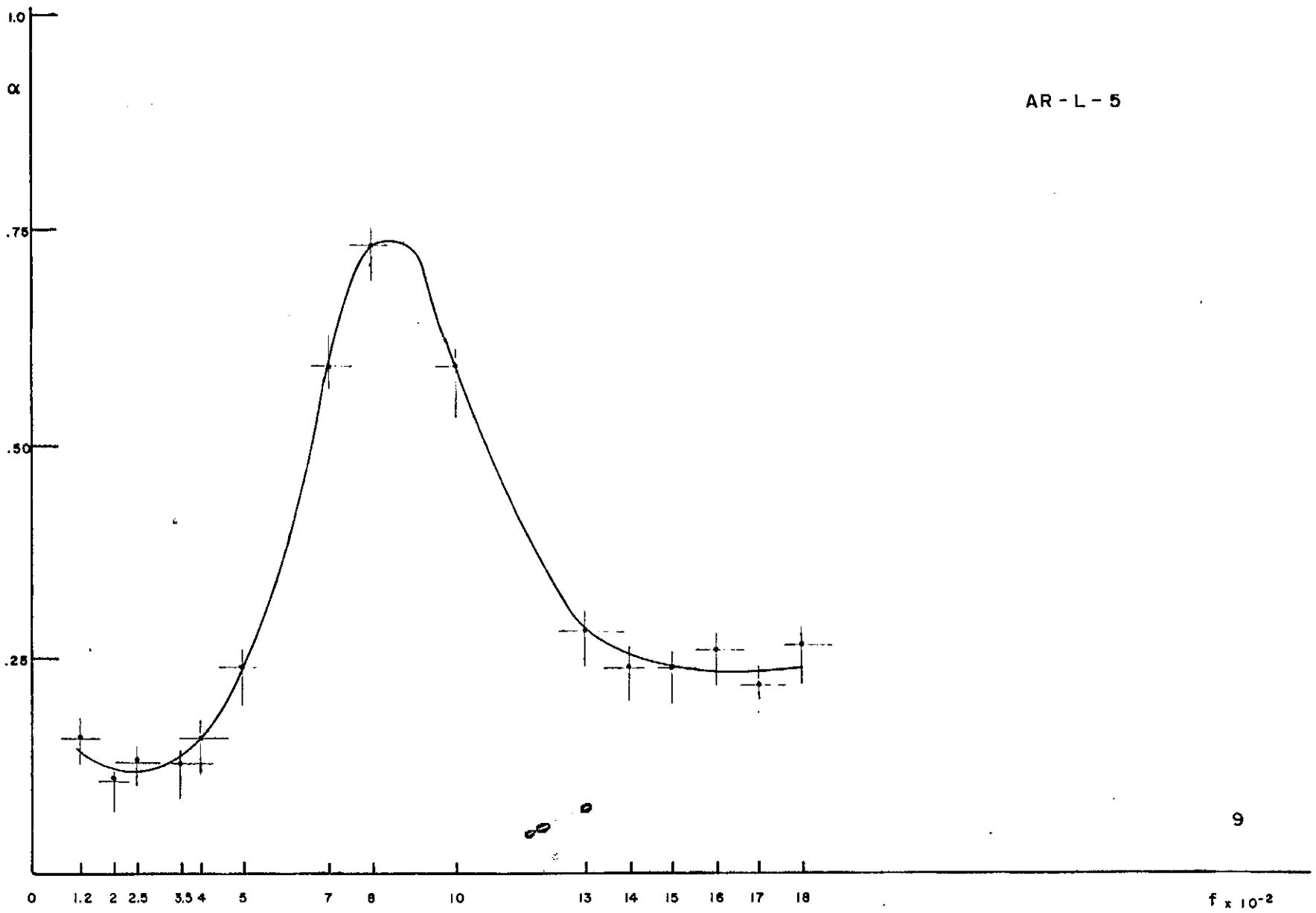
AR - L - 8

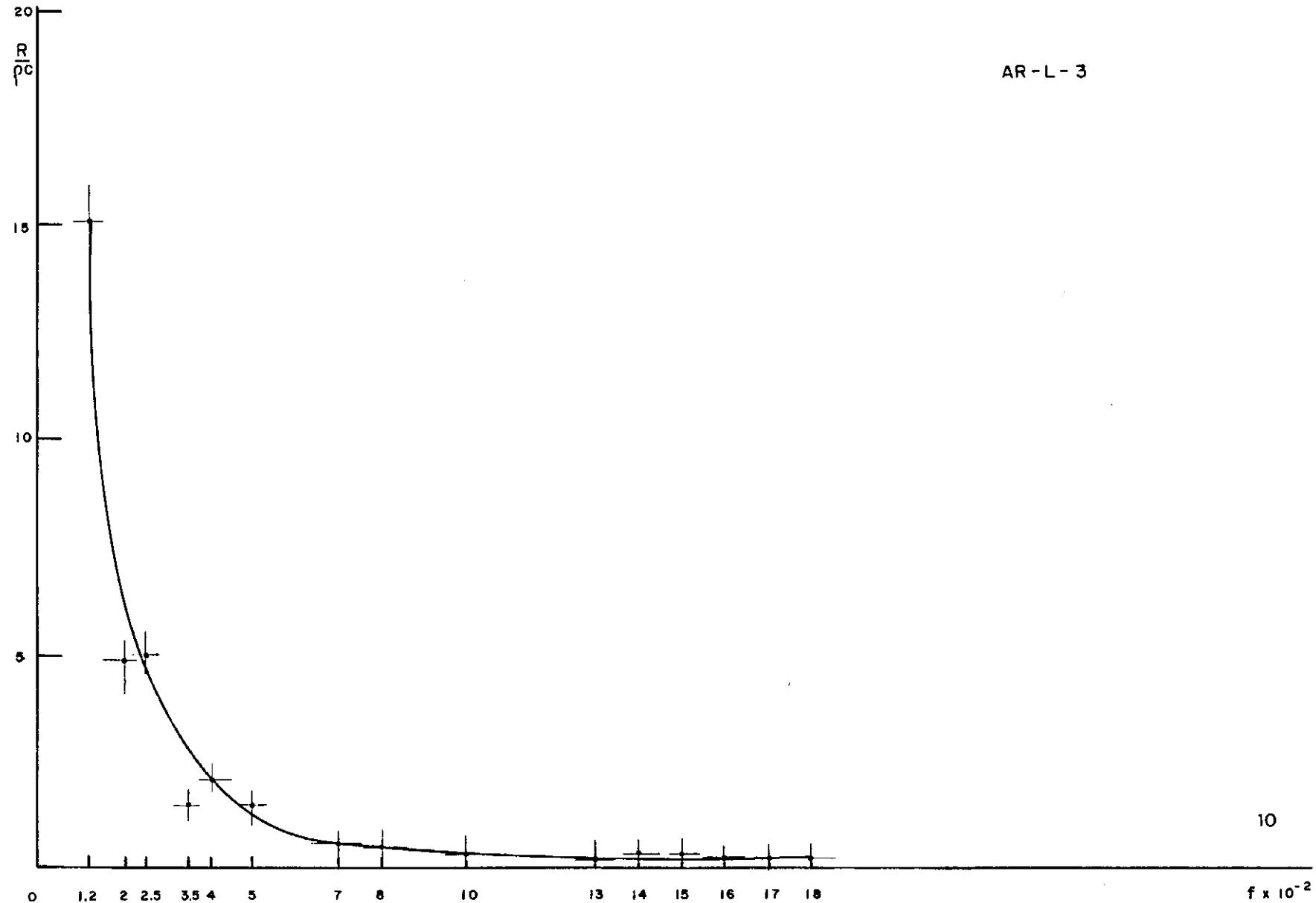
67

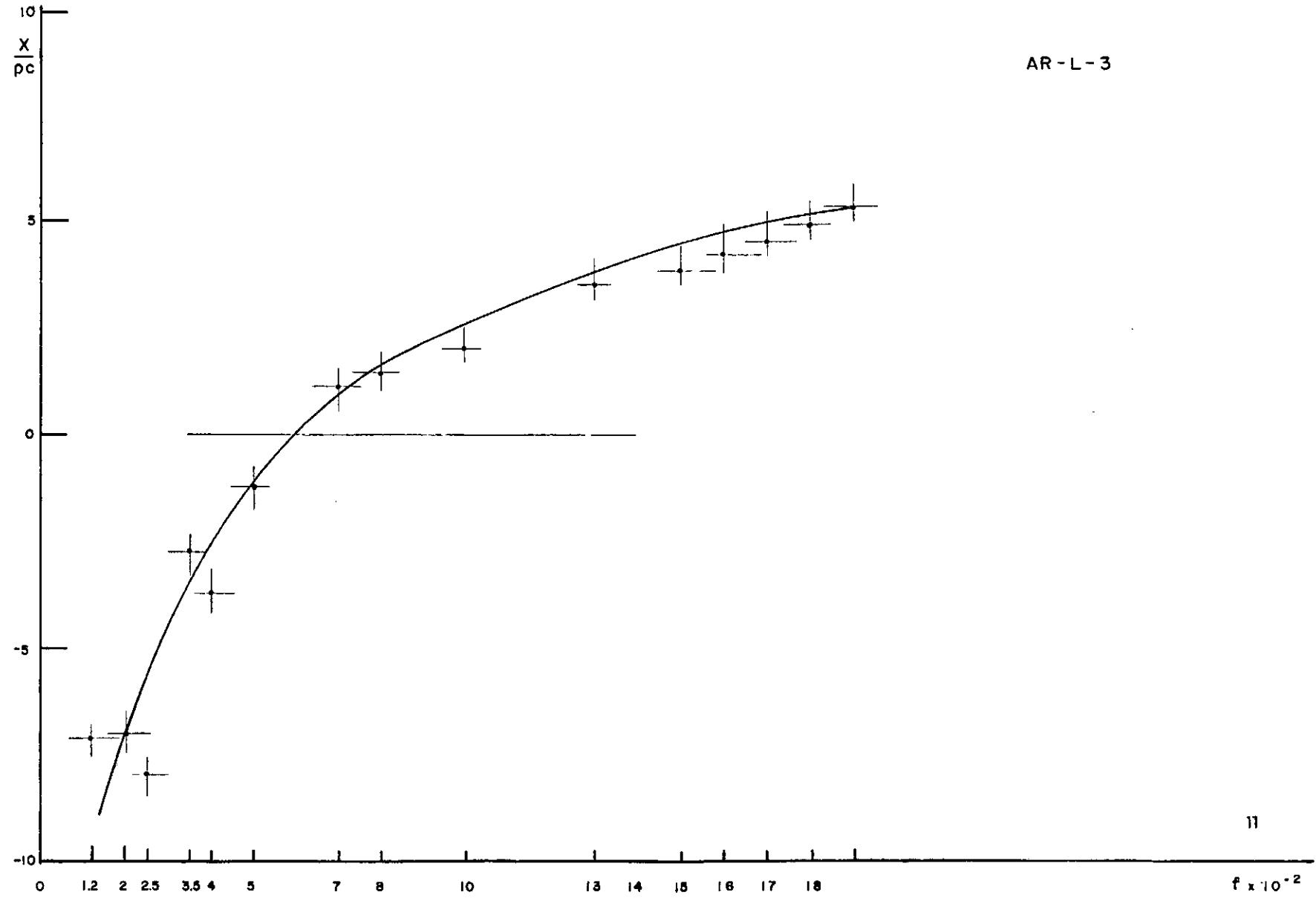
6









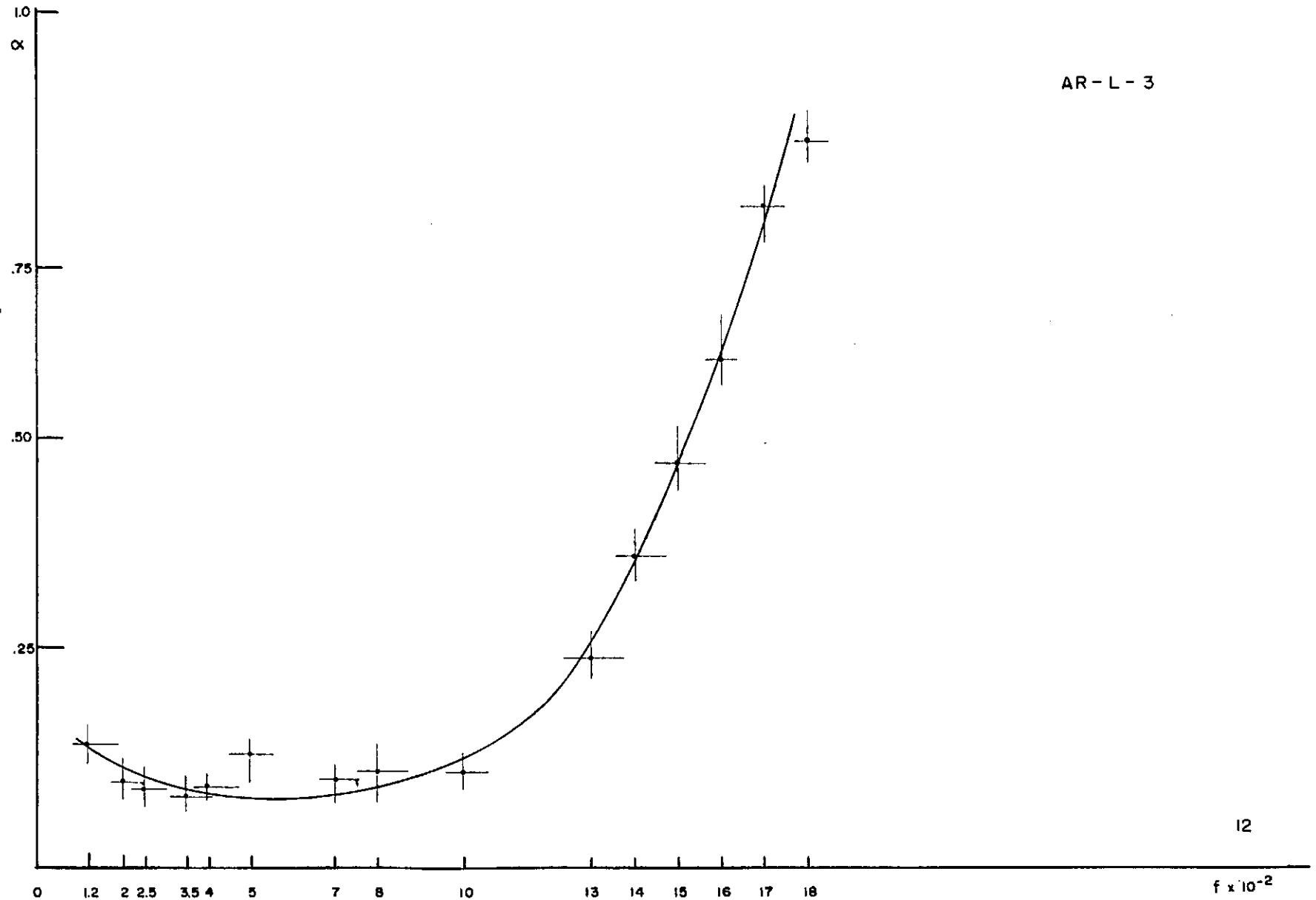


AR-L-3

72

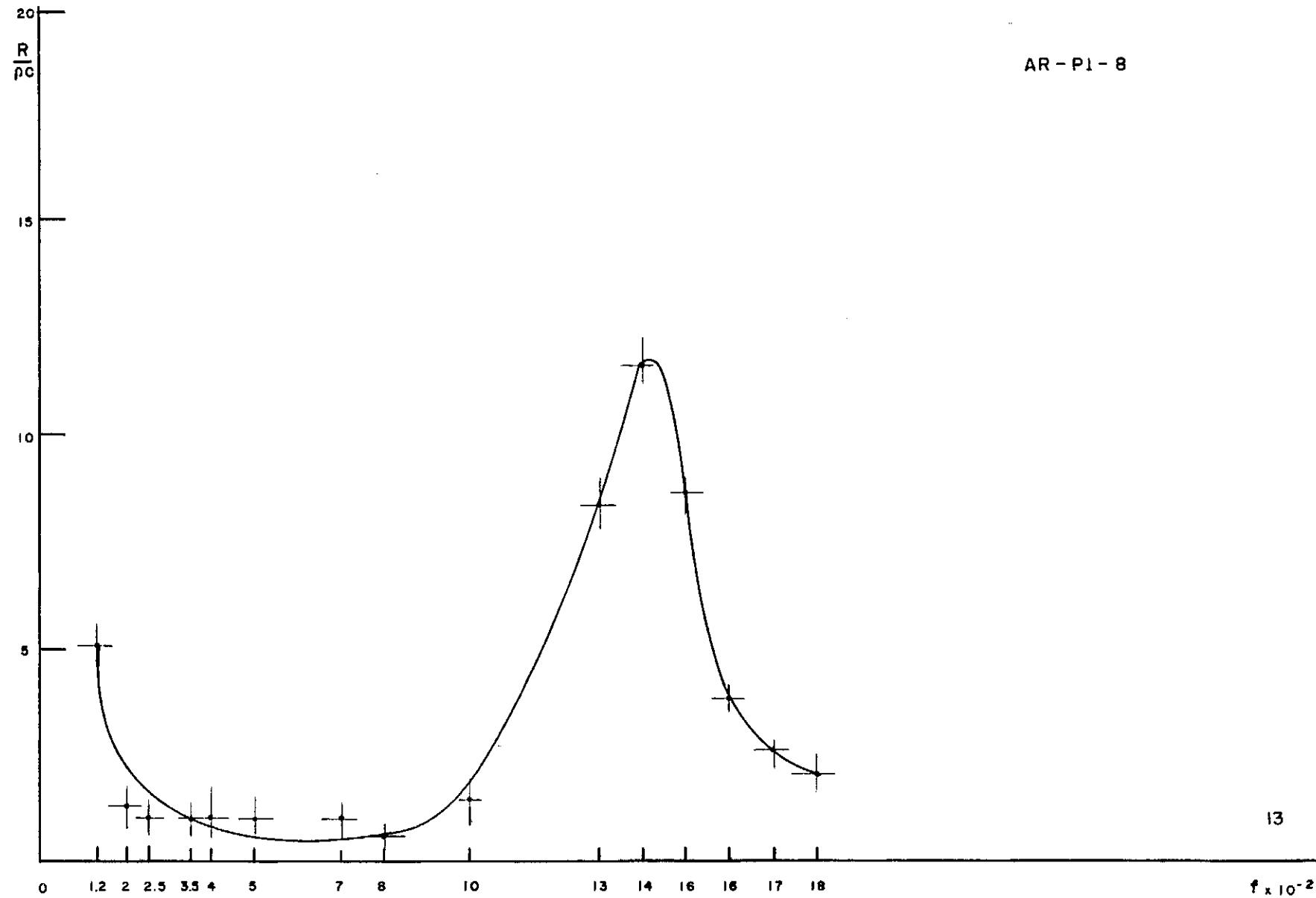
11

$f \times 10^{-2}$



12

73

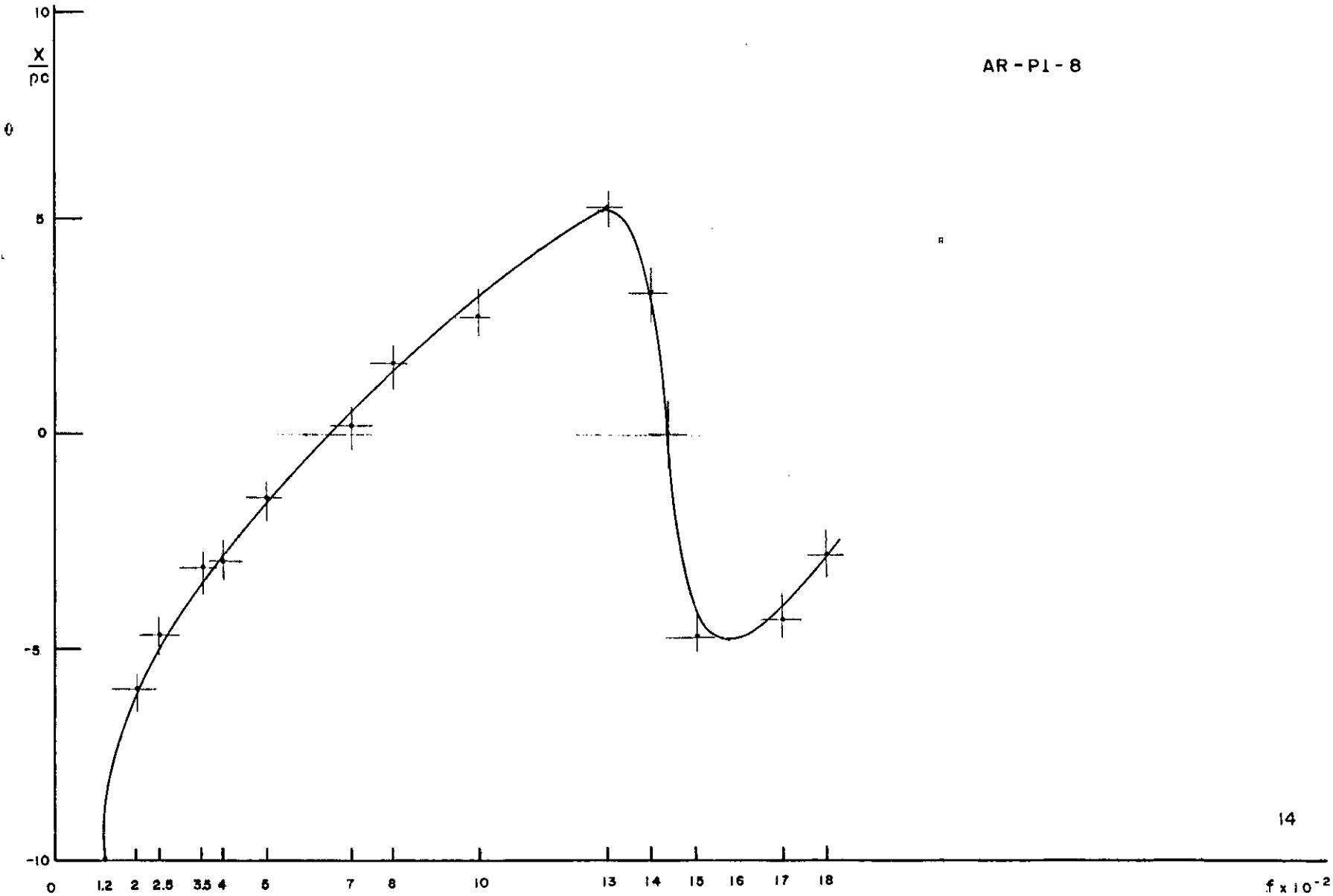


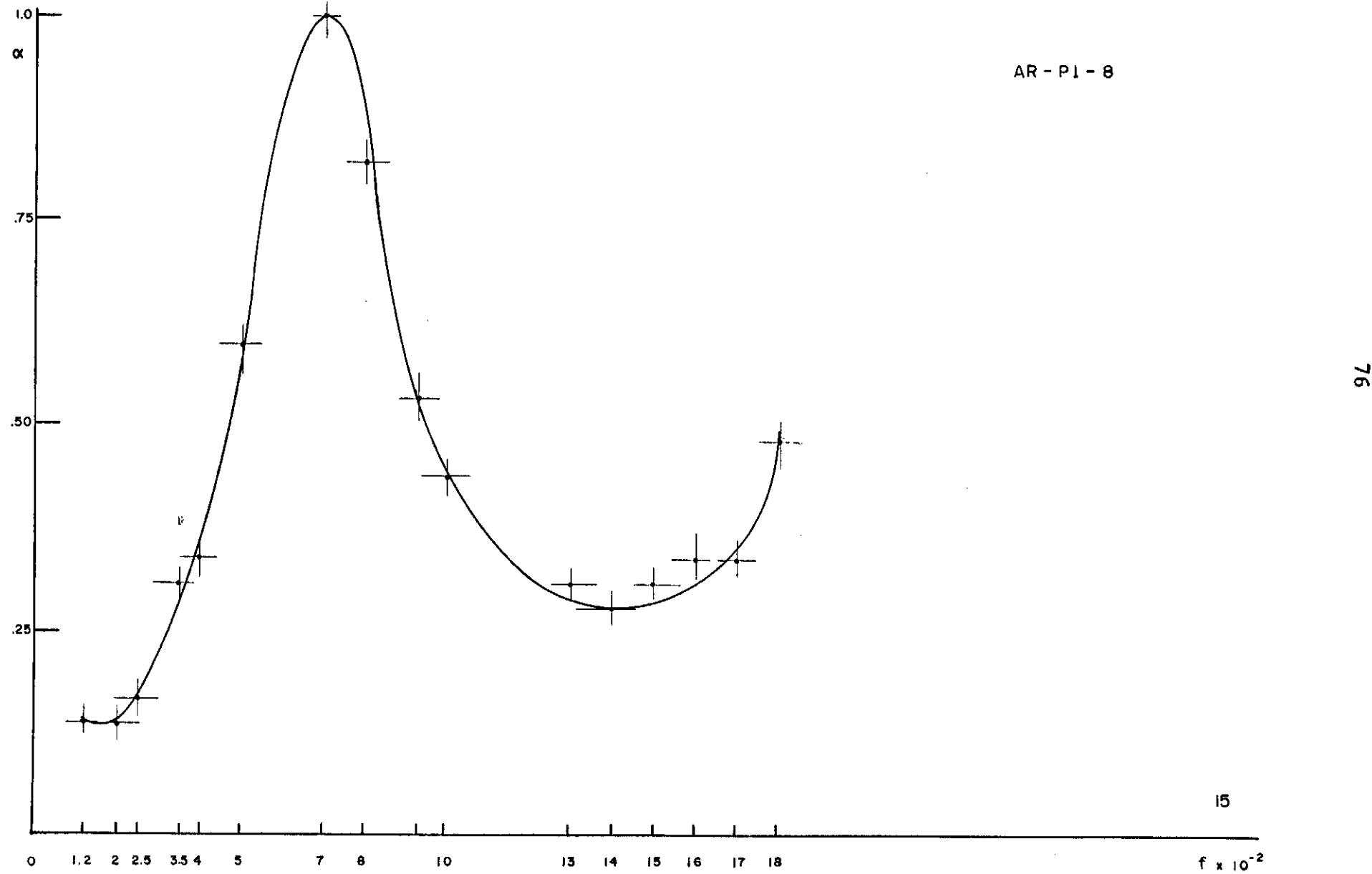
AR - PI - 8

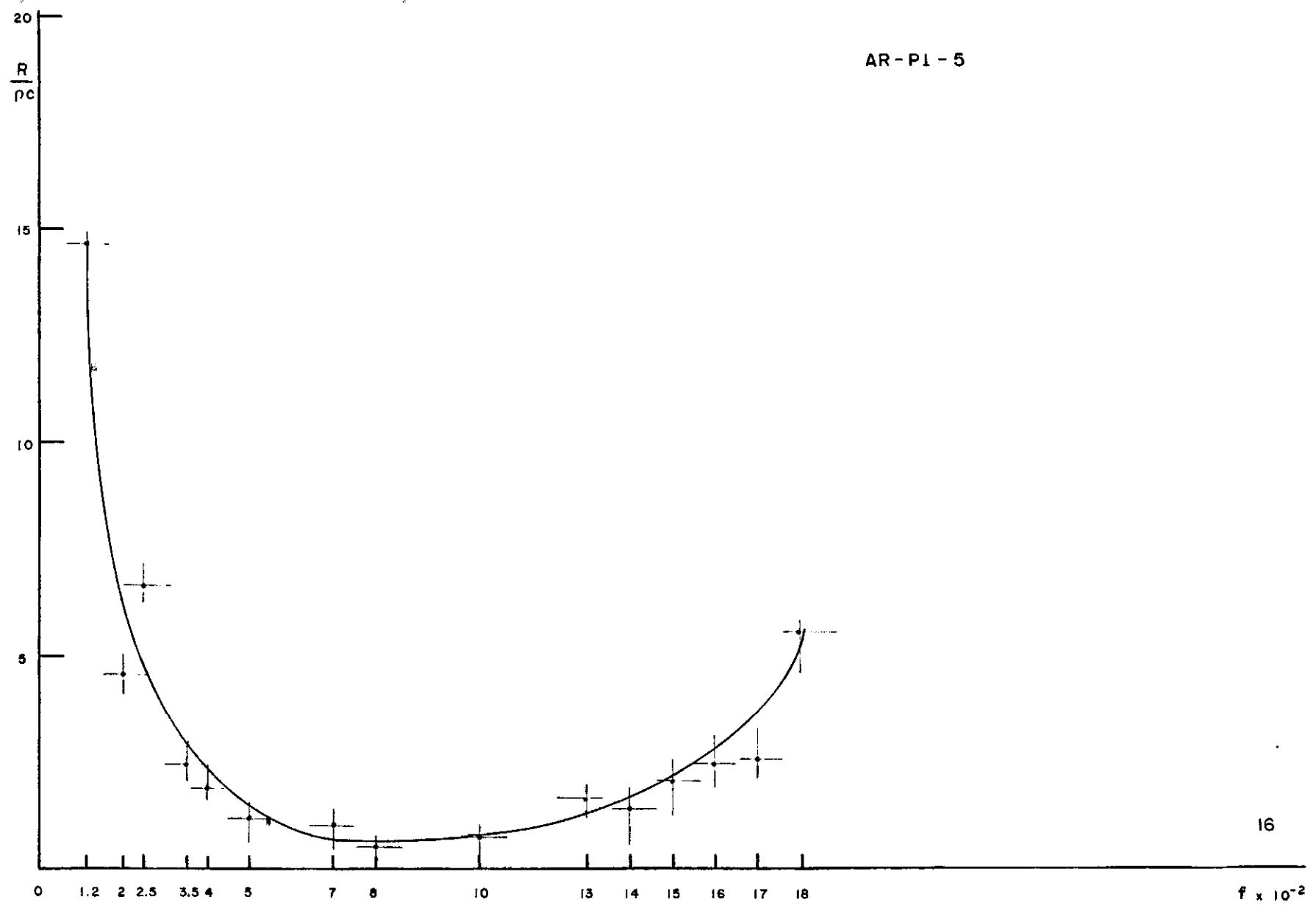
75

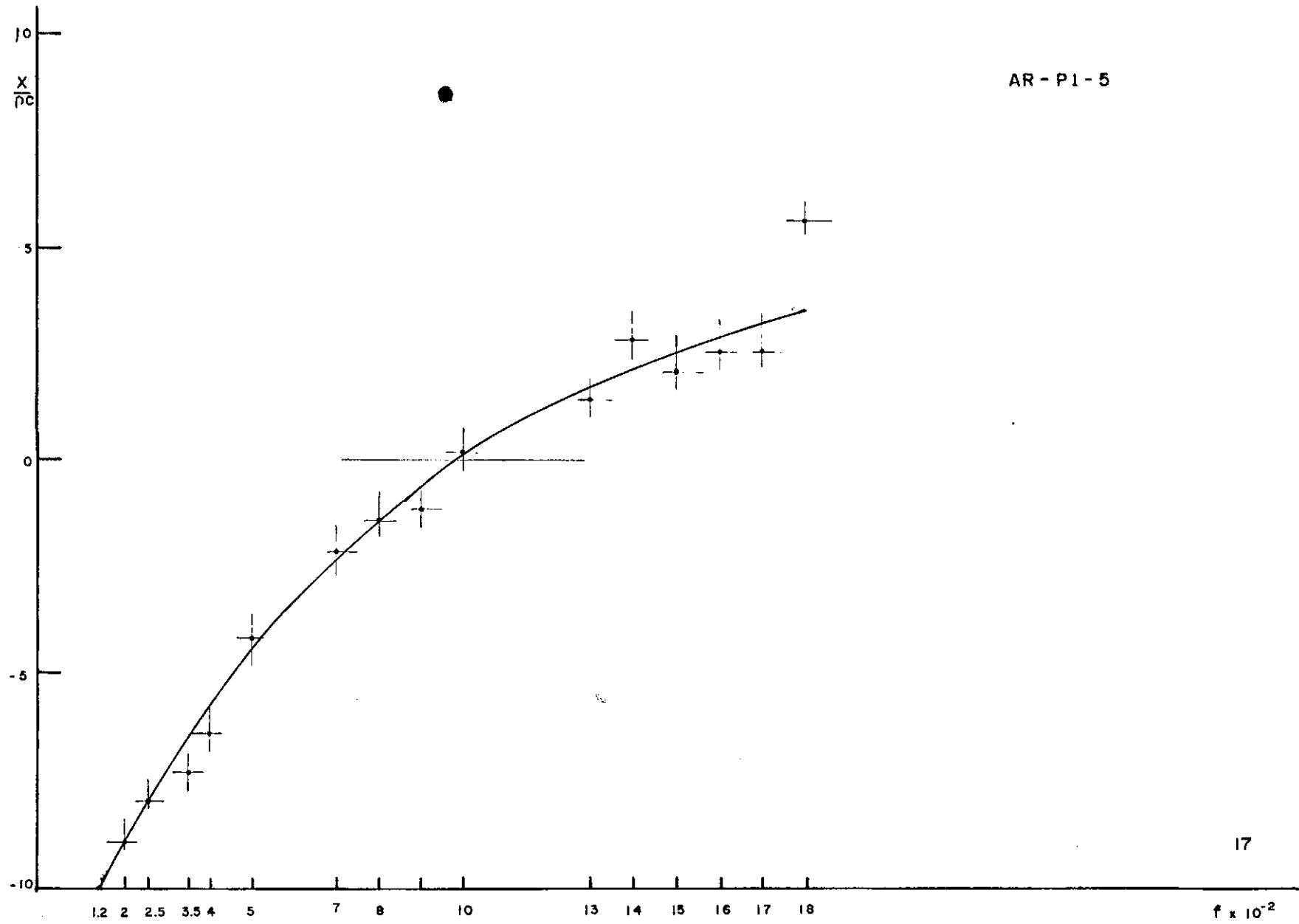
14

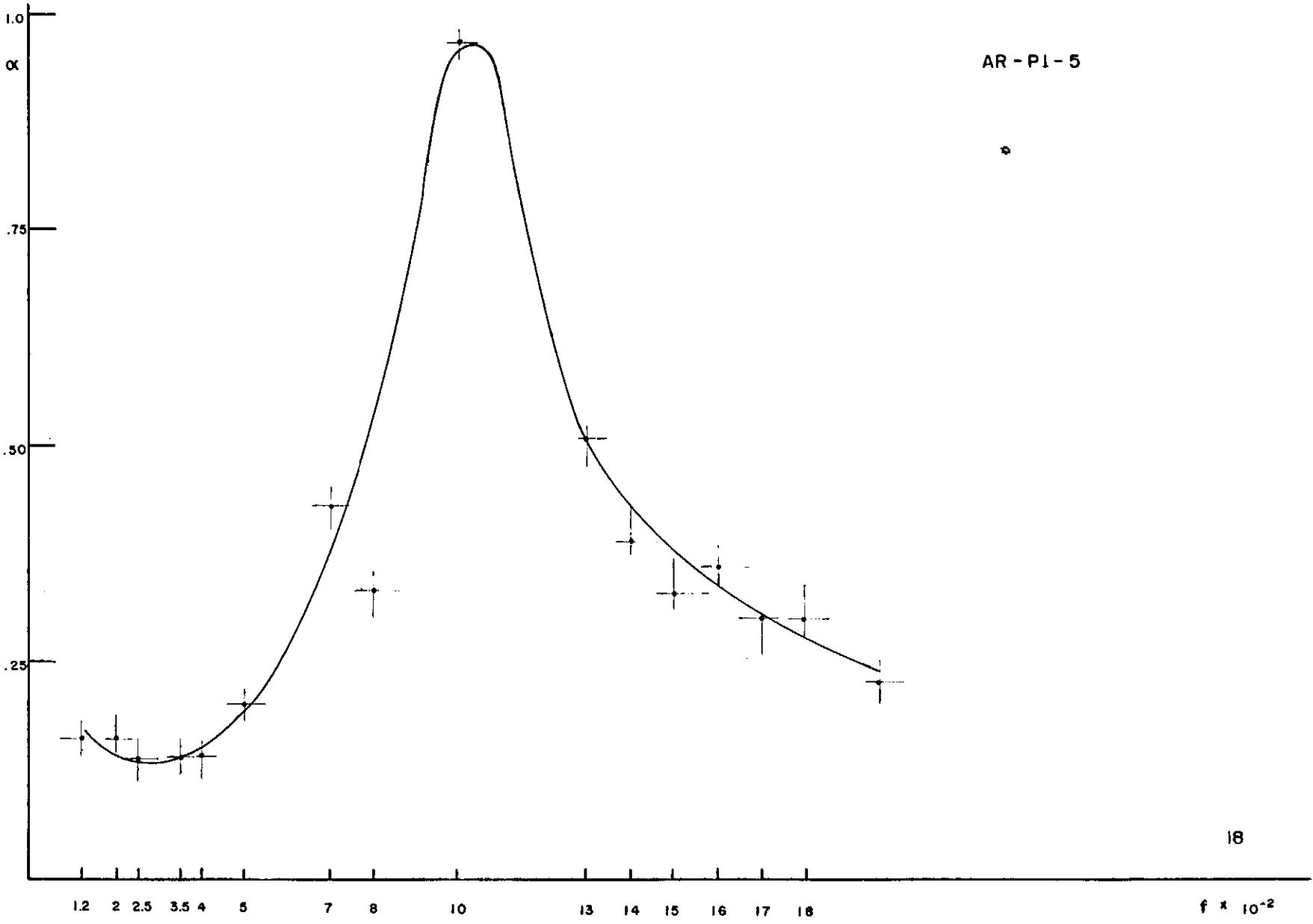
$f \times 10^{-2}$







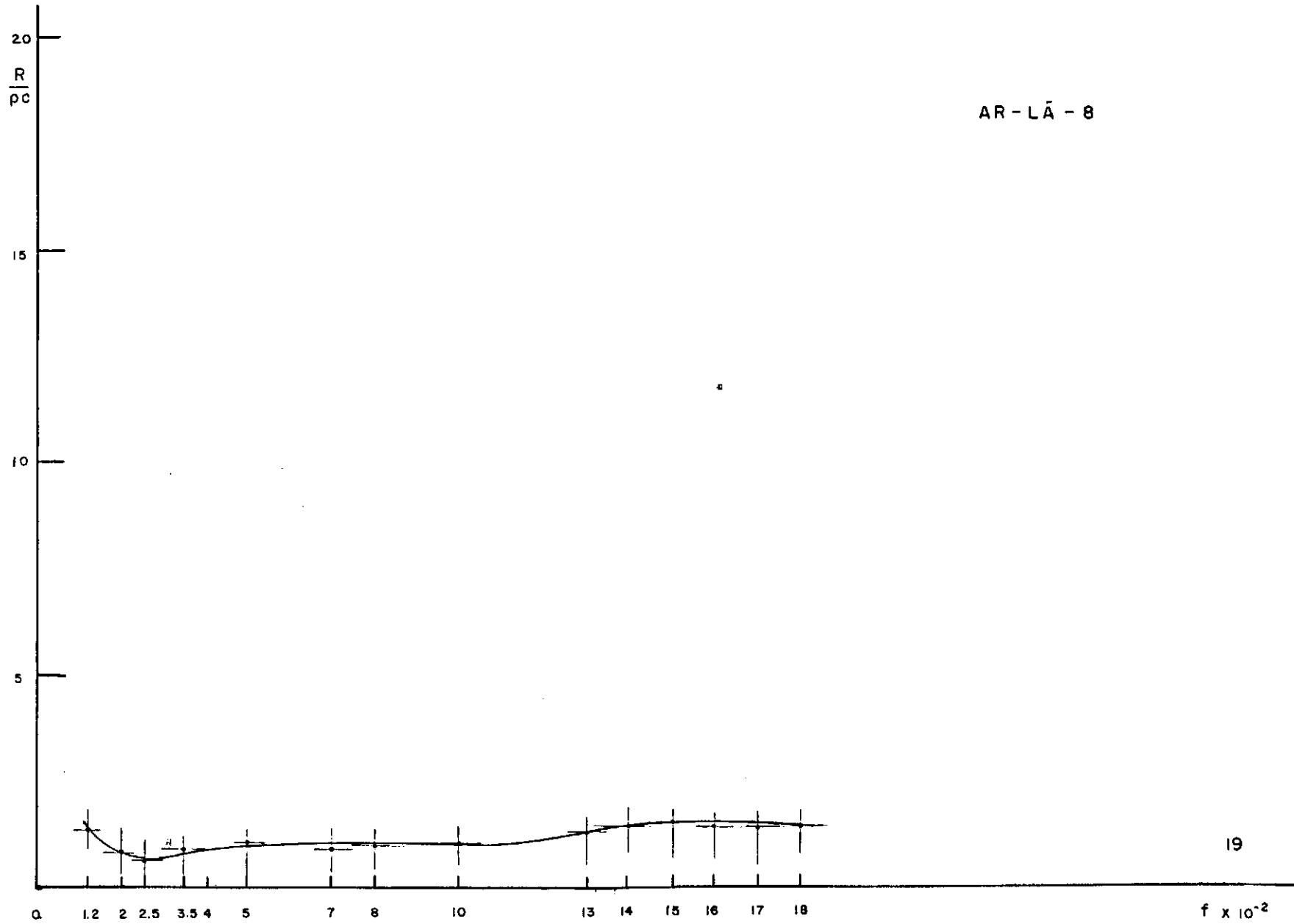


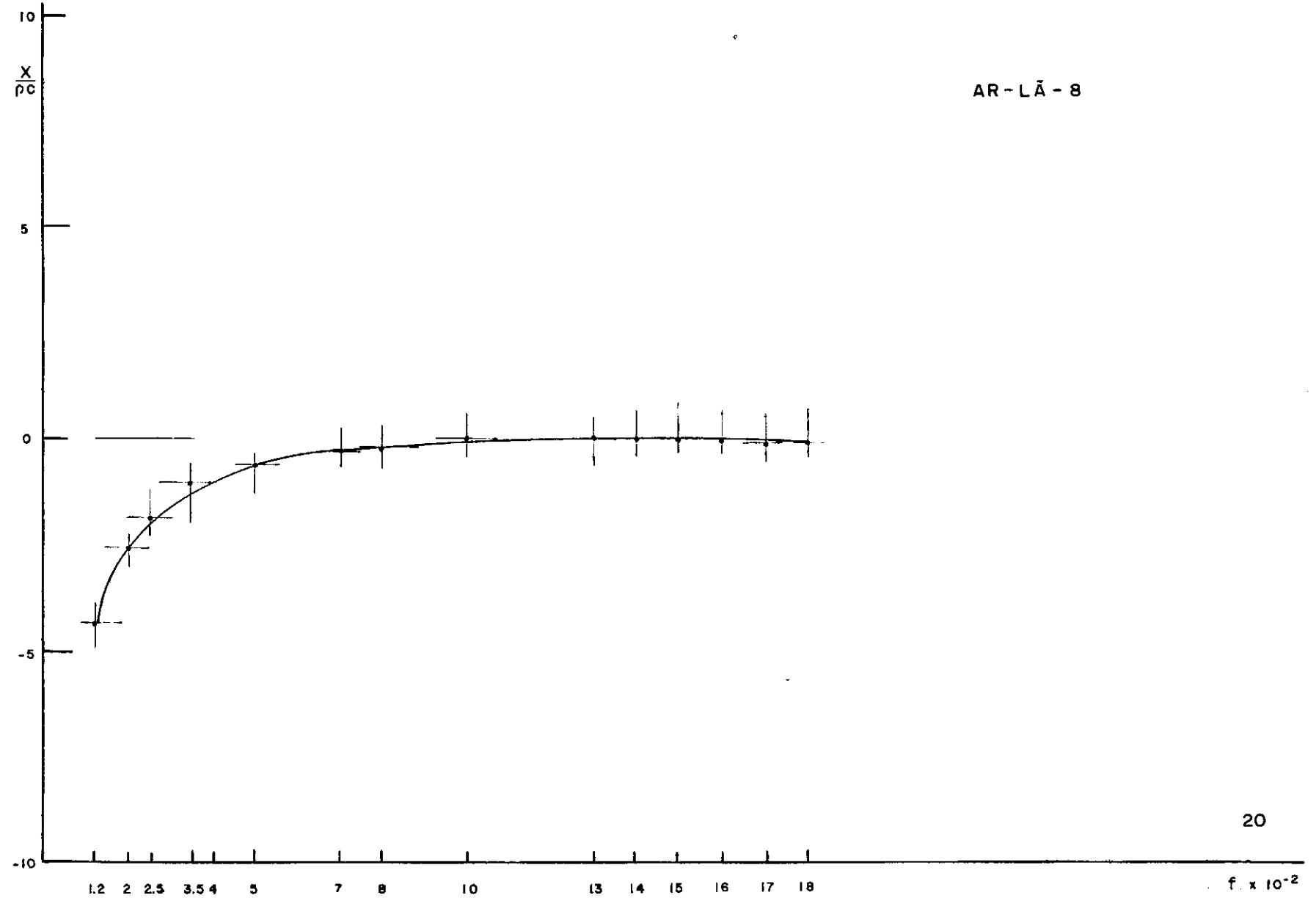


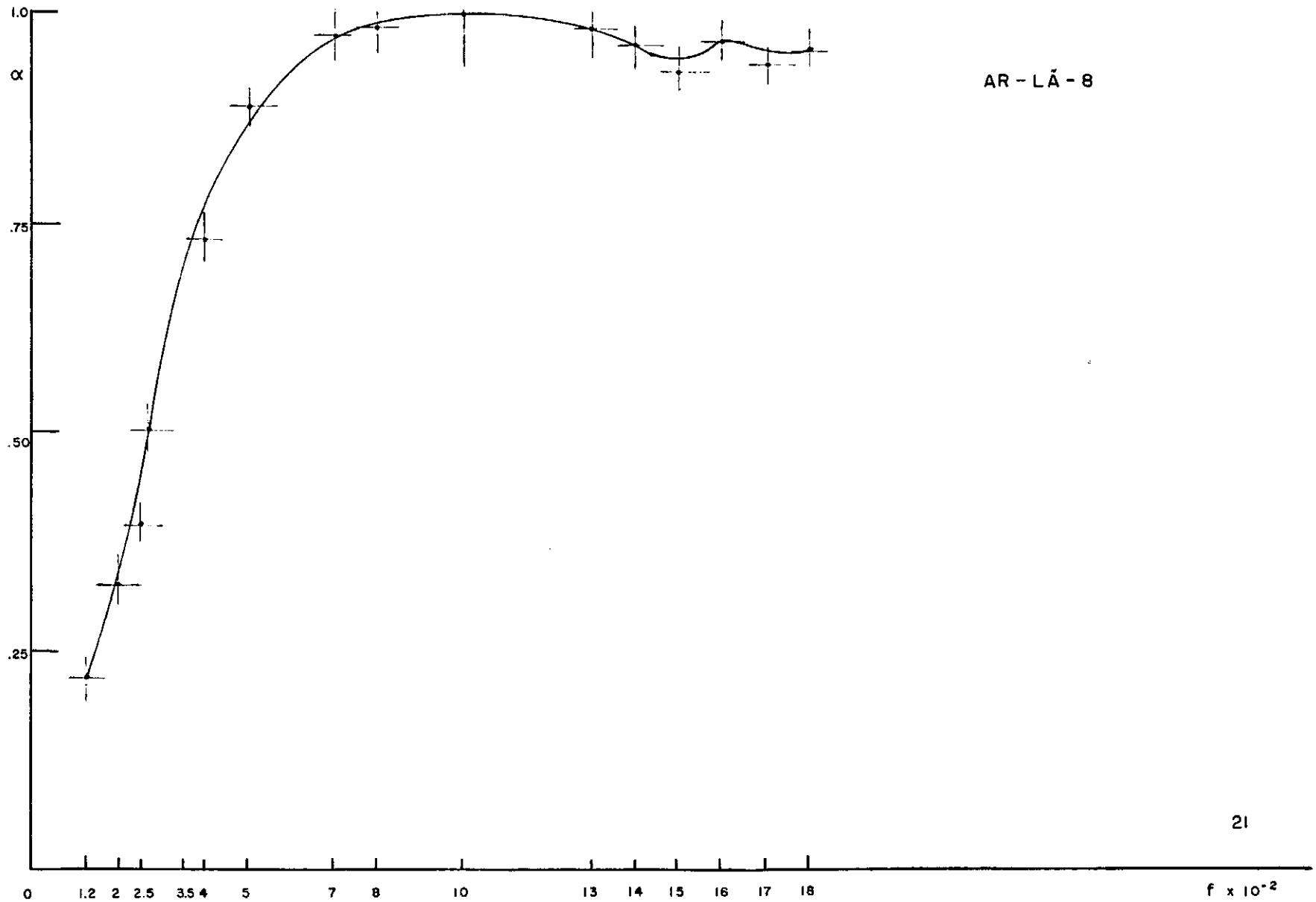
AR - P1 - 5

79

18



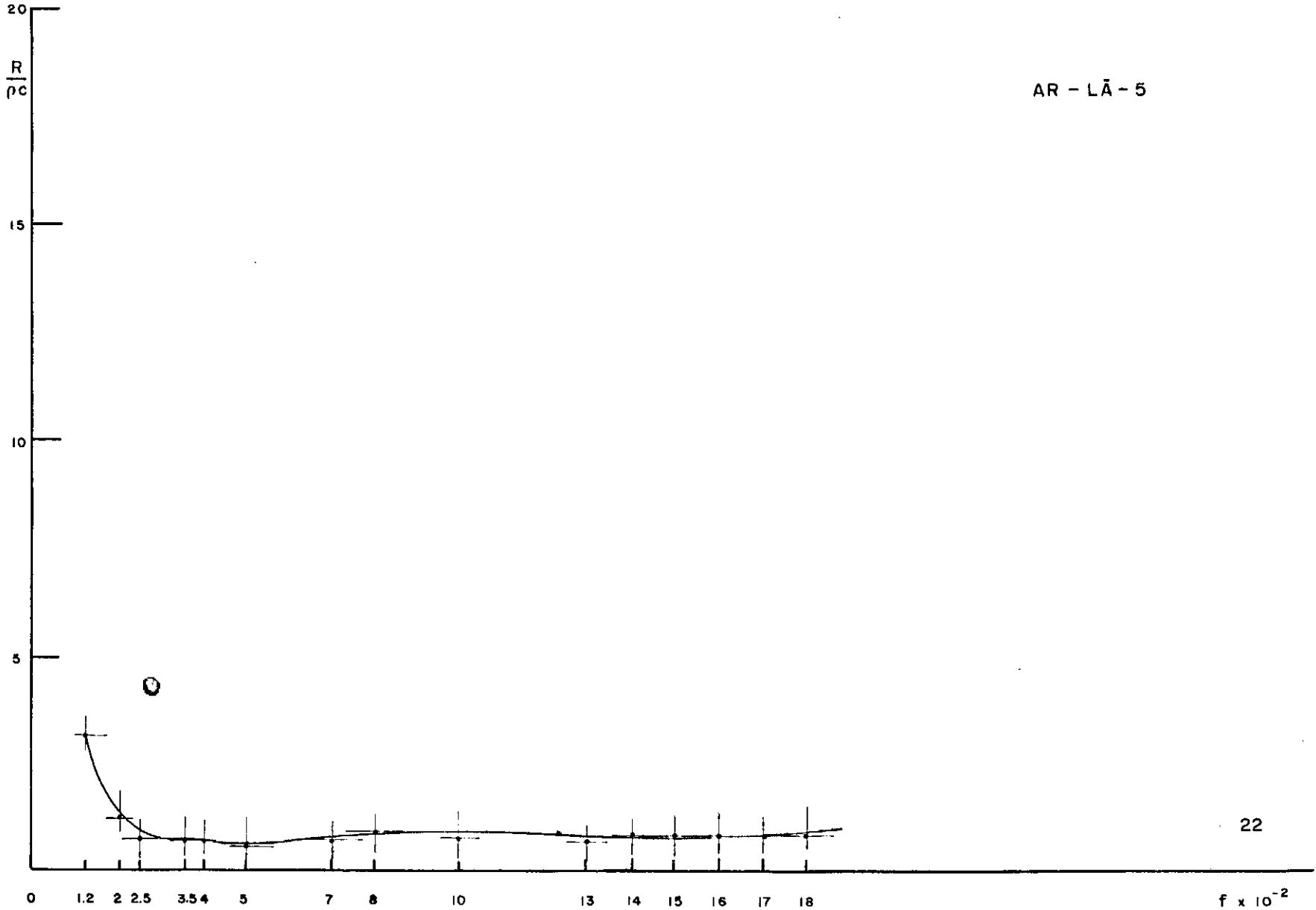




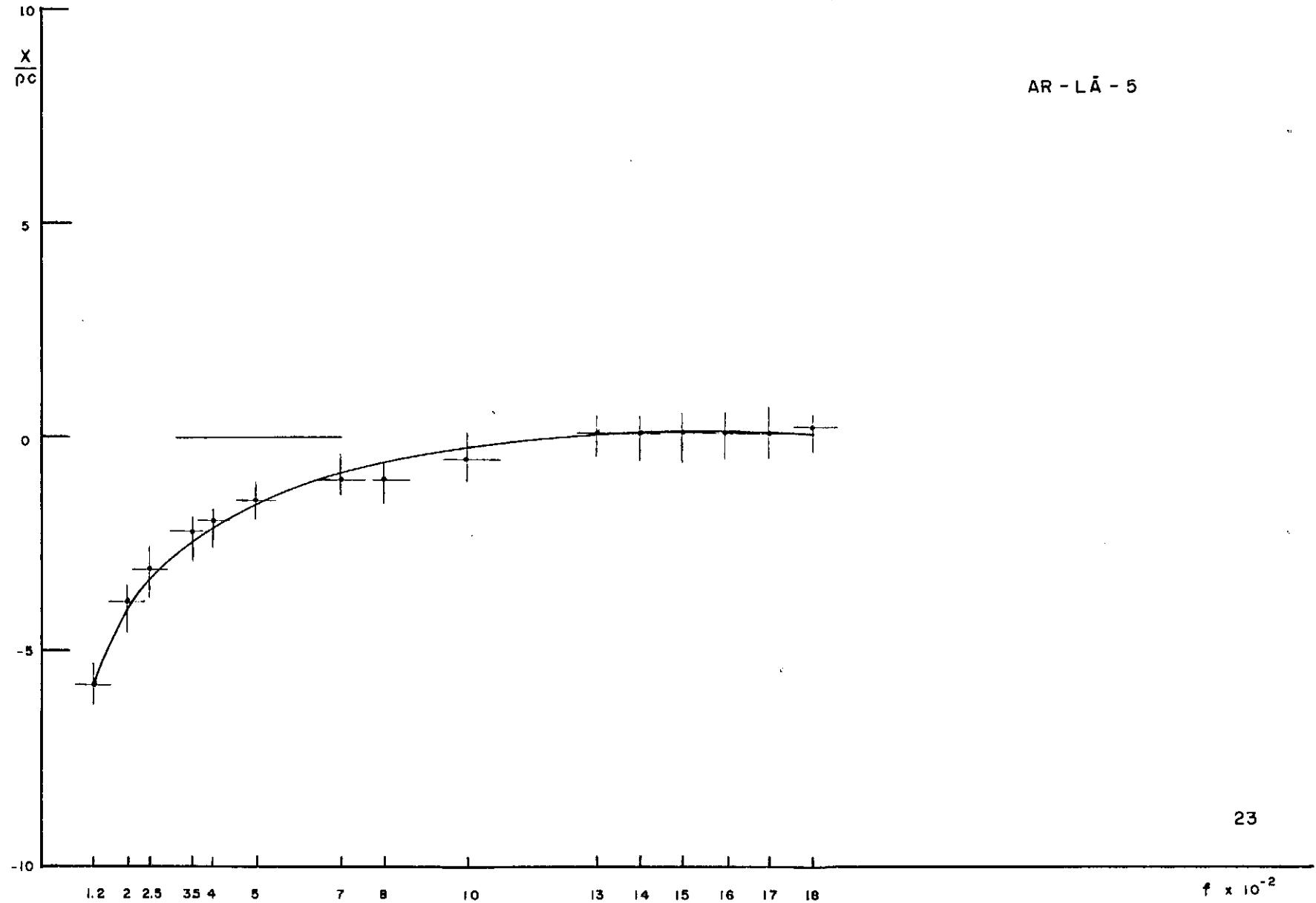
AR - LA - 8

82

21



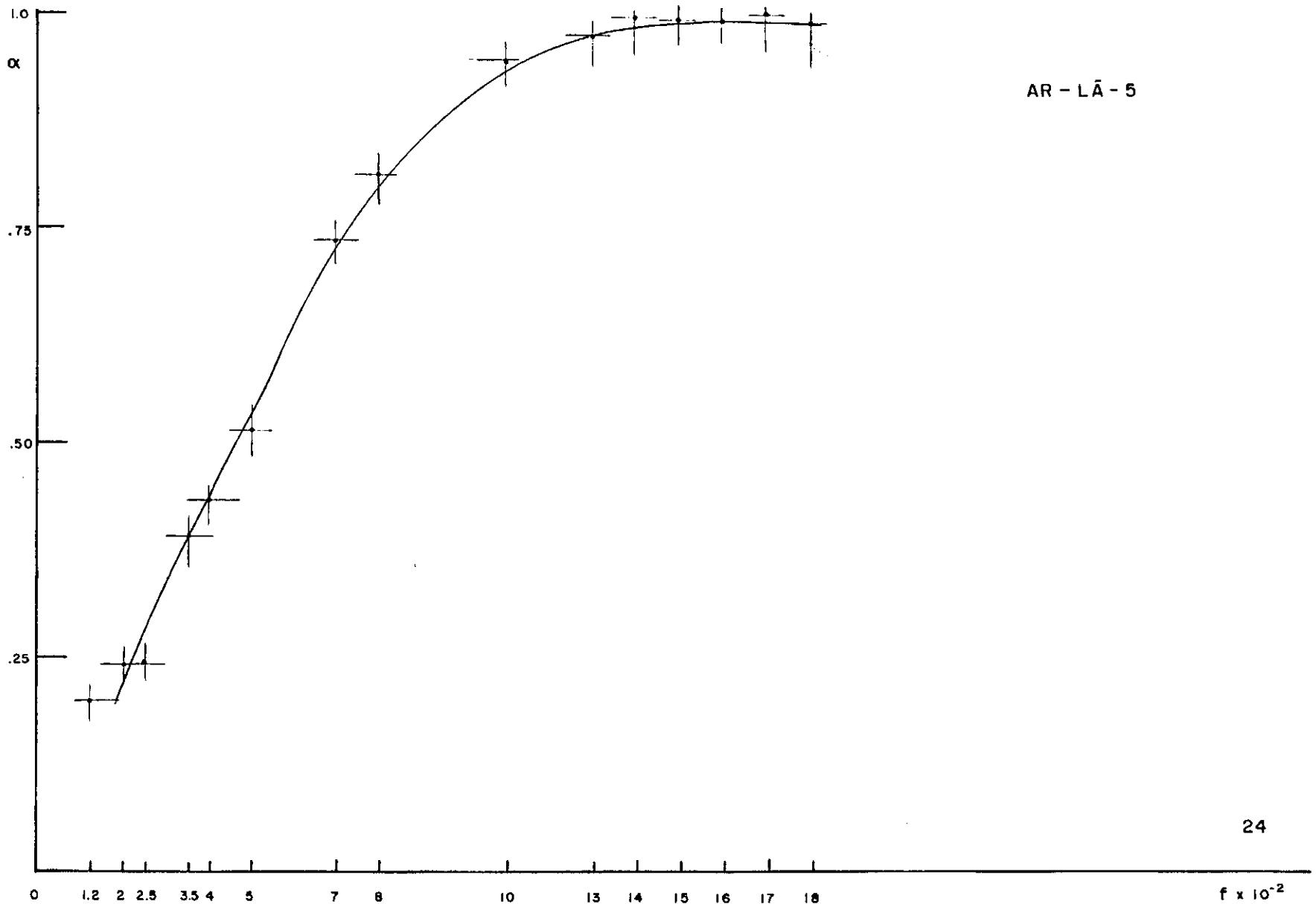
14



AR - LÅ - 5

84

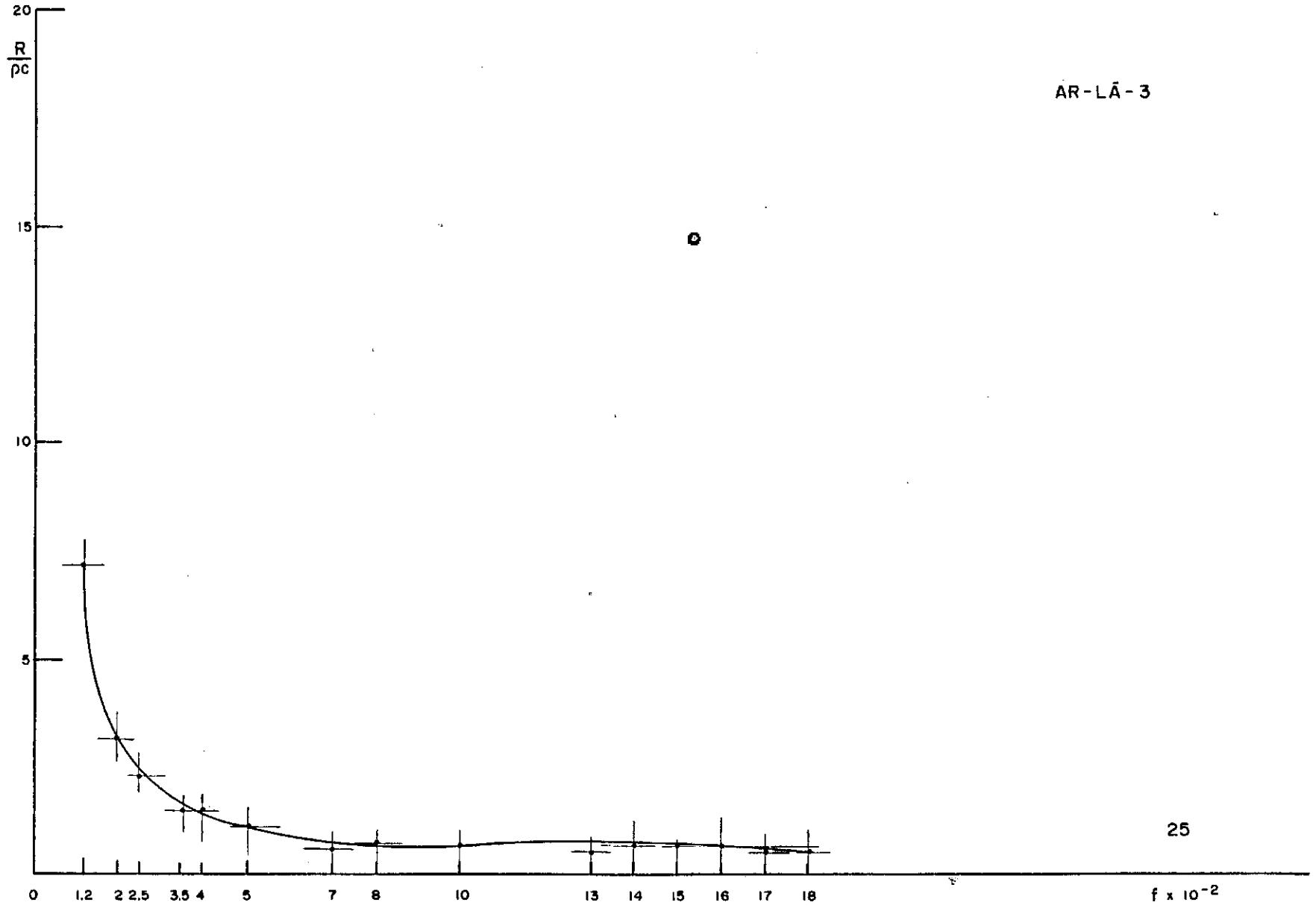
23

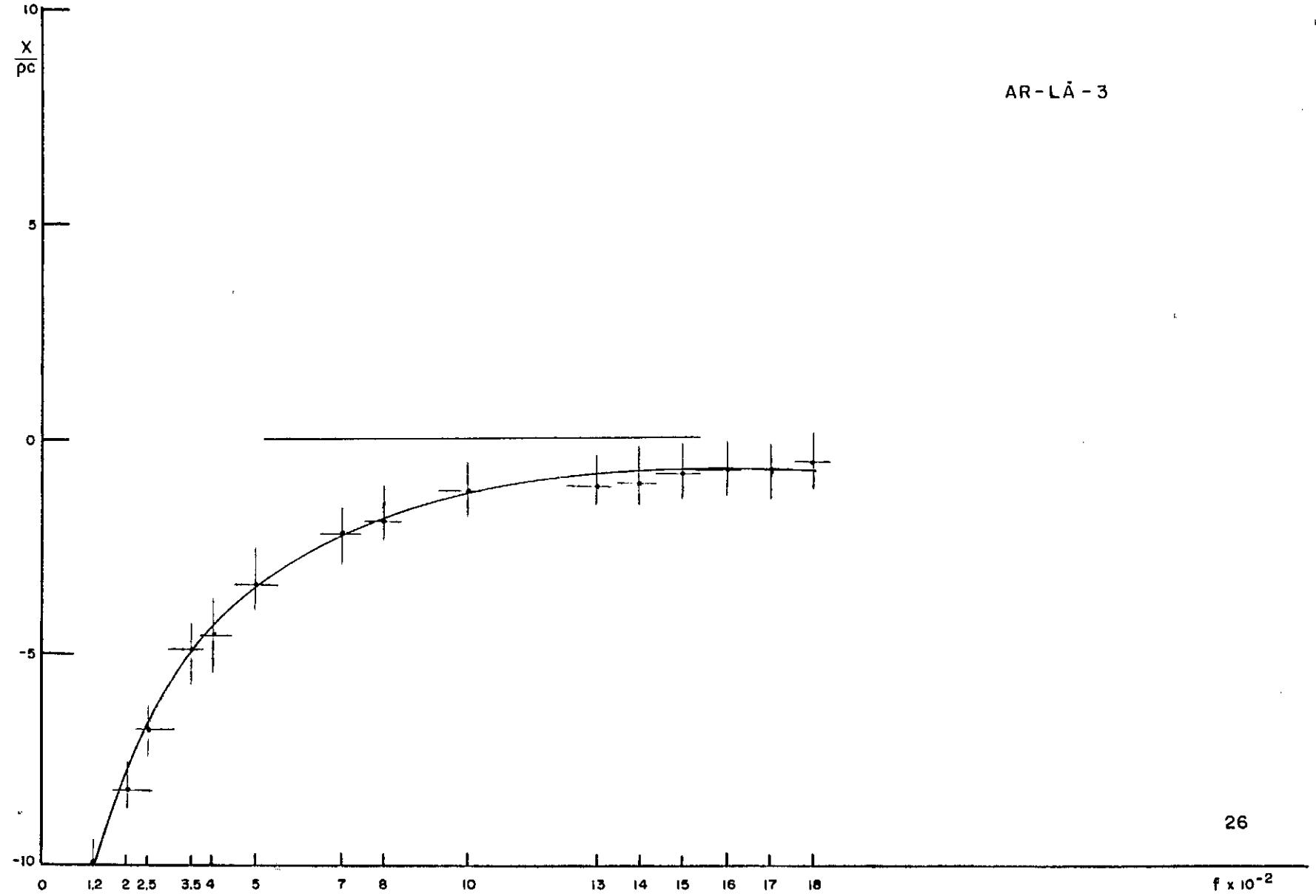


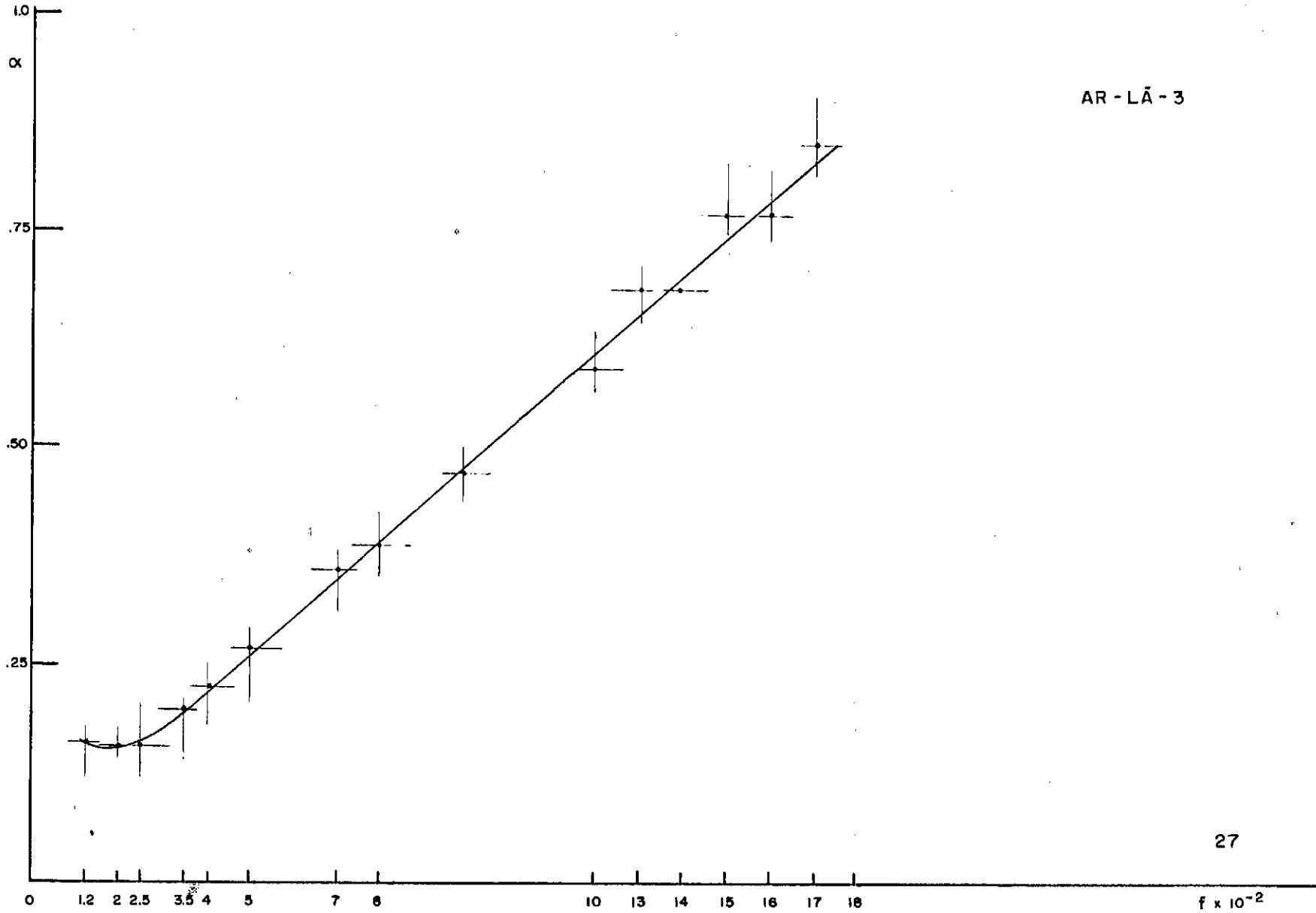
AR - L $\ddot{A}$  - 5

85

24



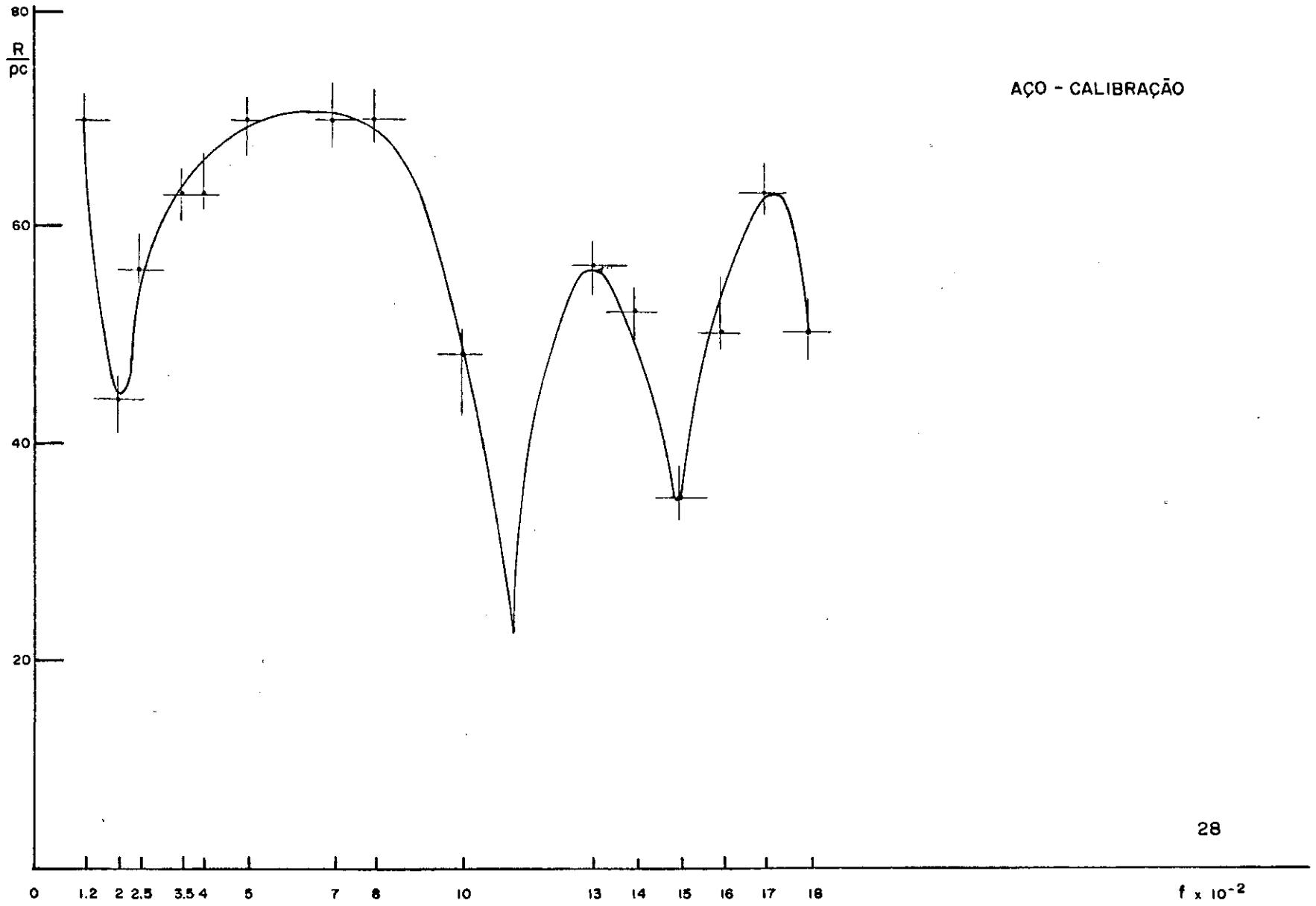




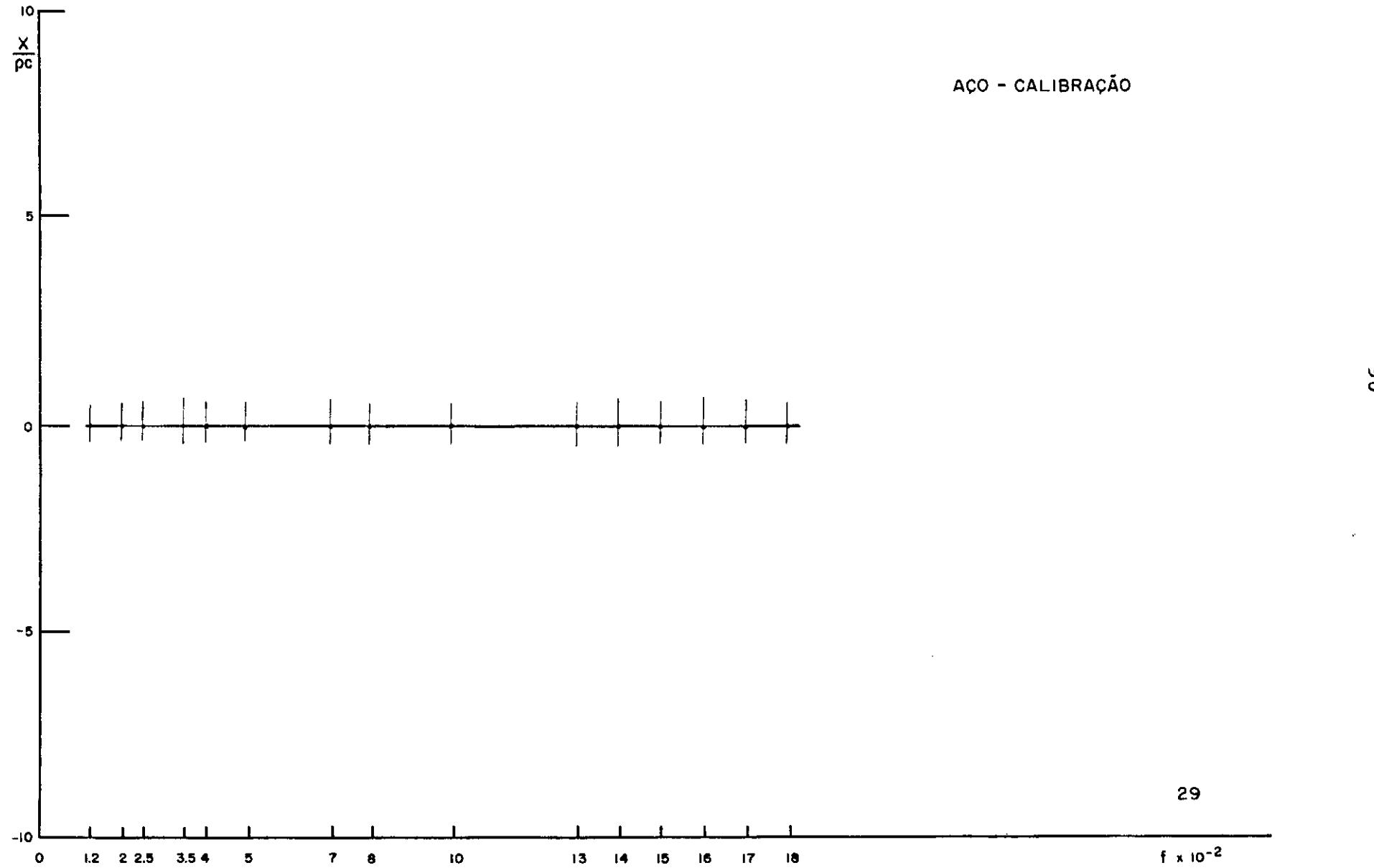
AR - LÄ - 3

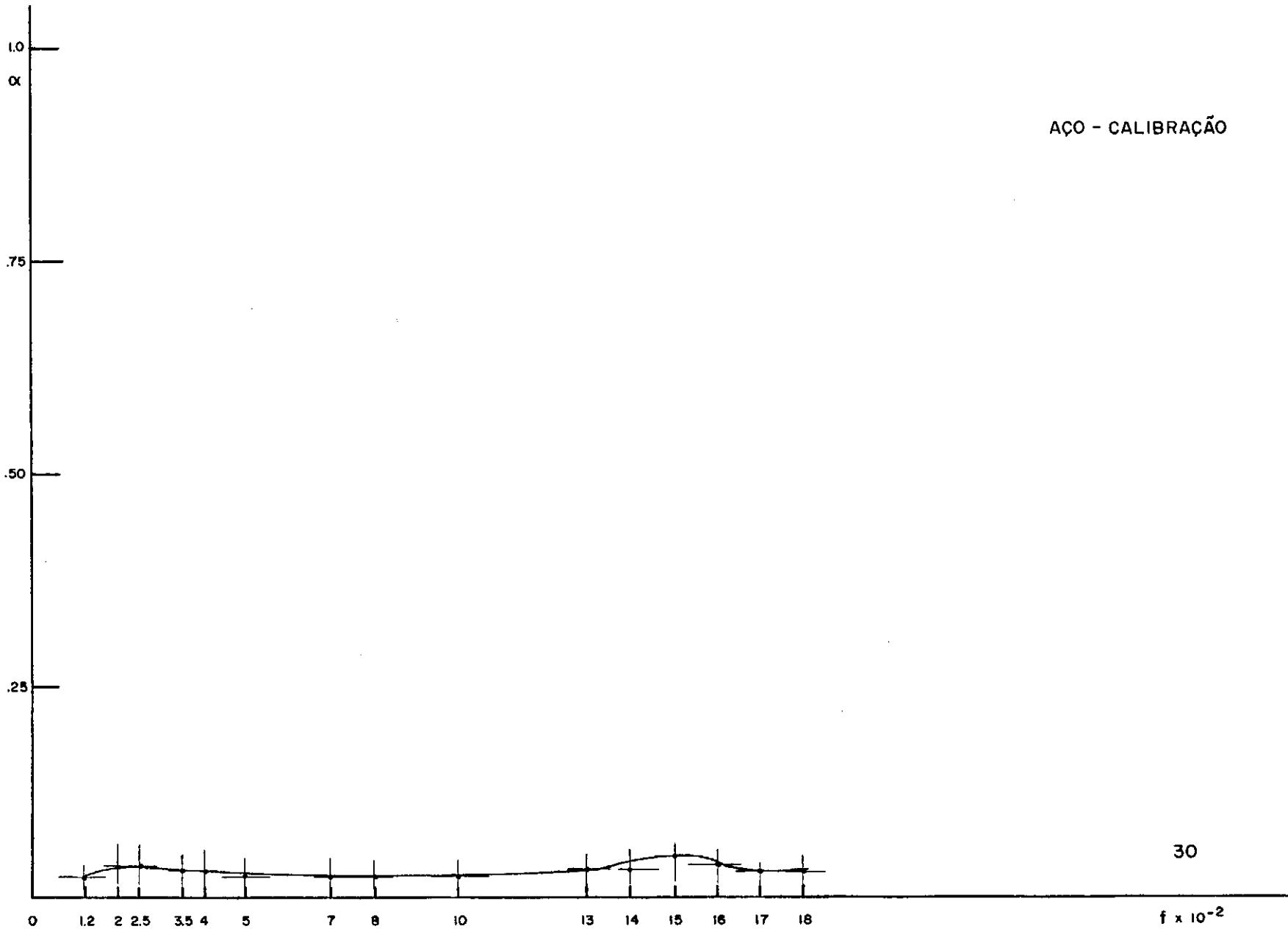
88

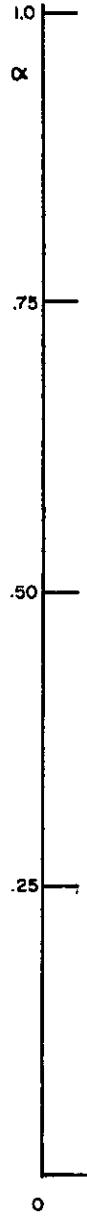
27



AÇO - CALIBRAÇÃO



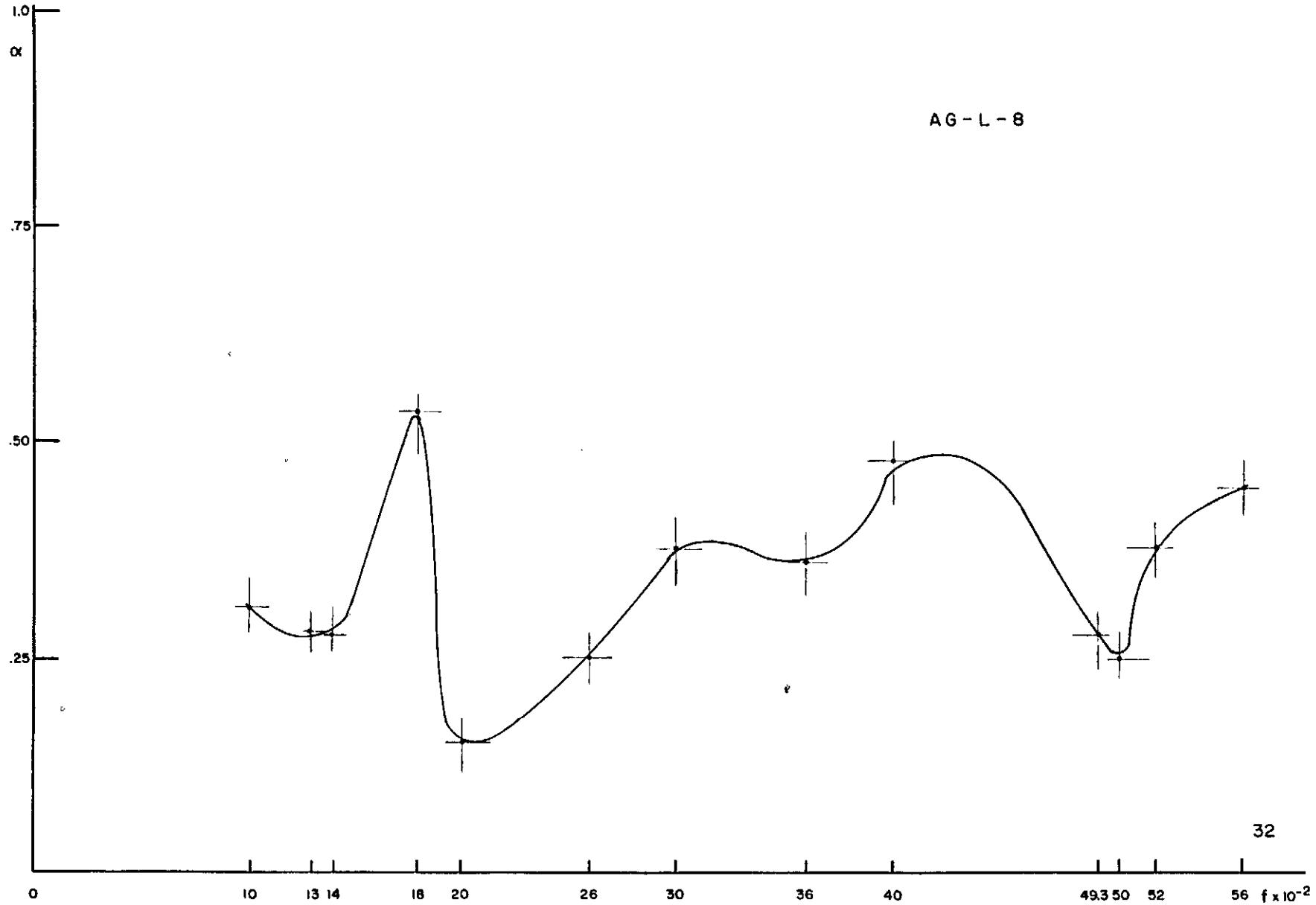


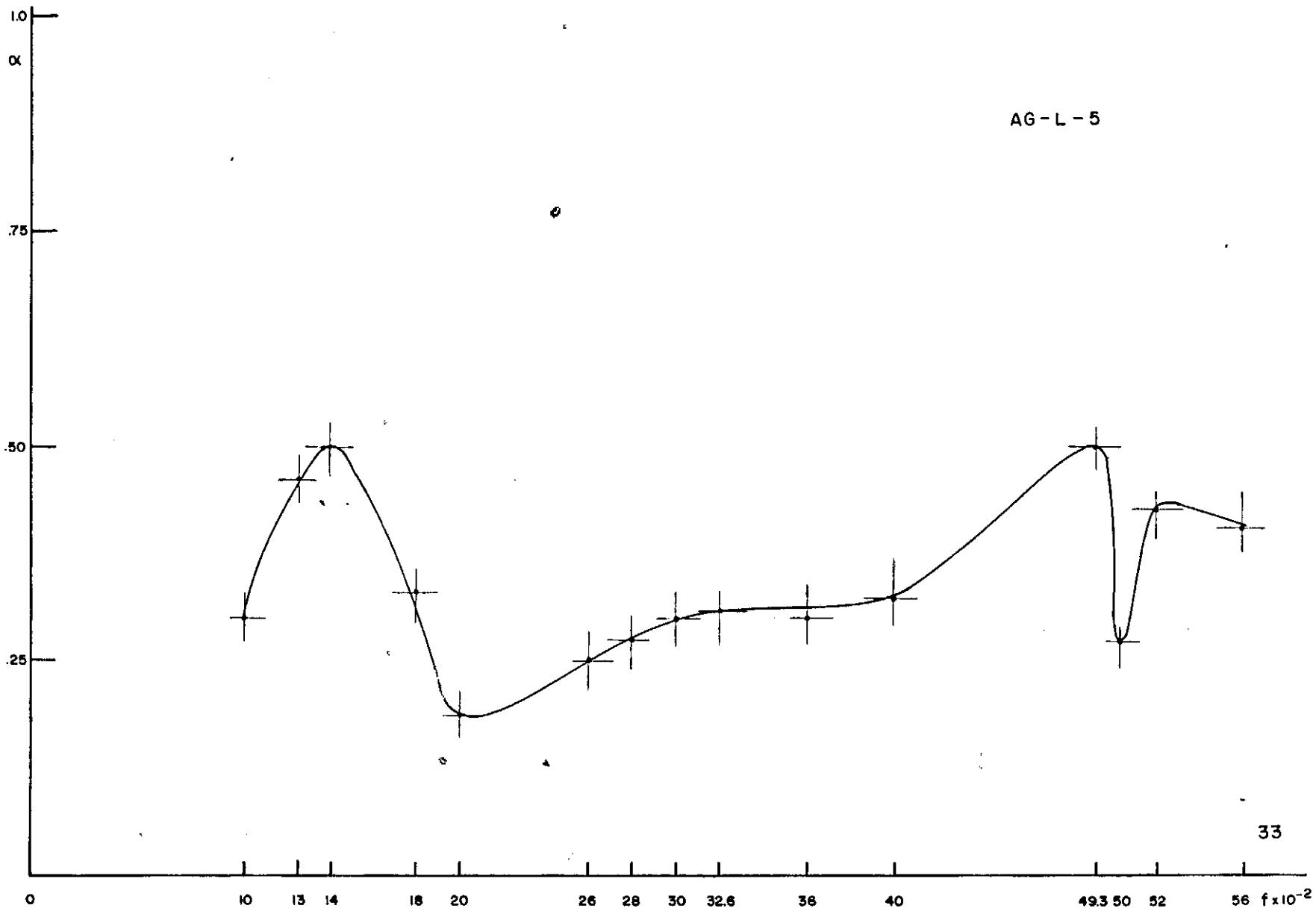


AG - E - 5

92

31

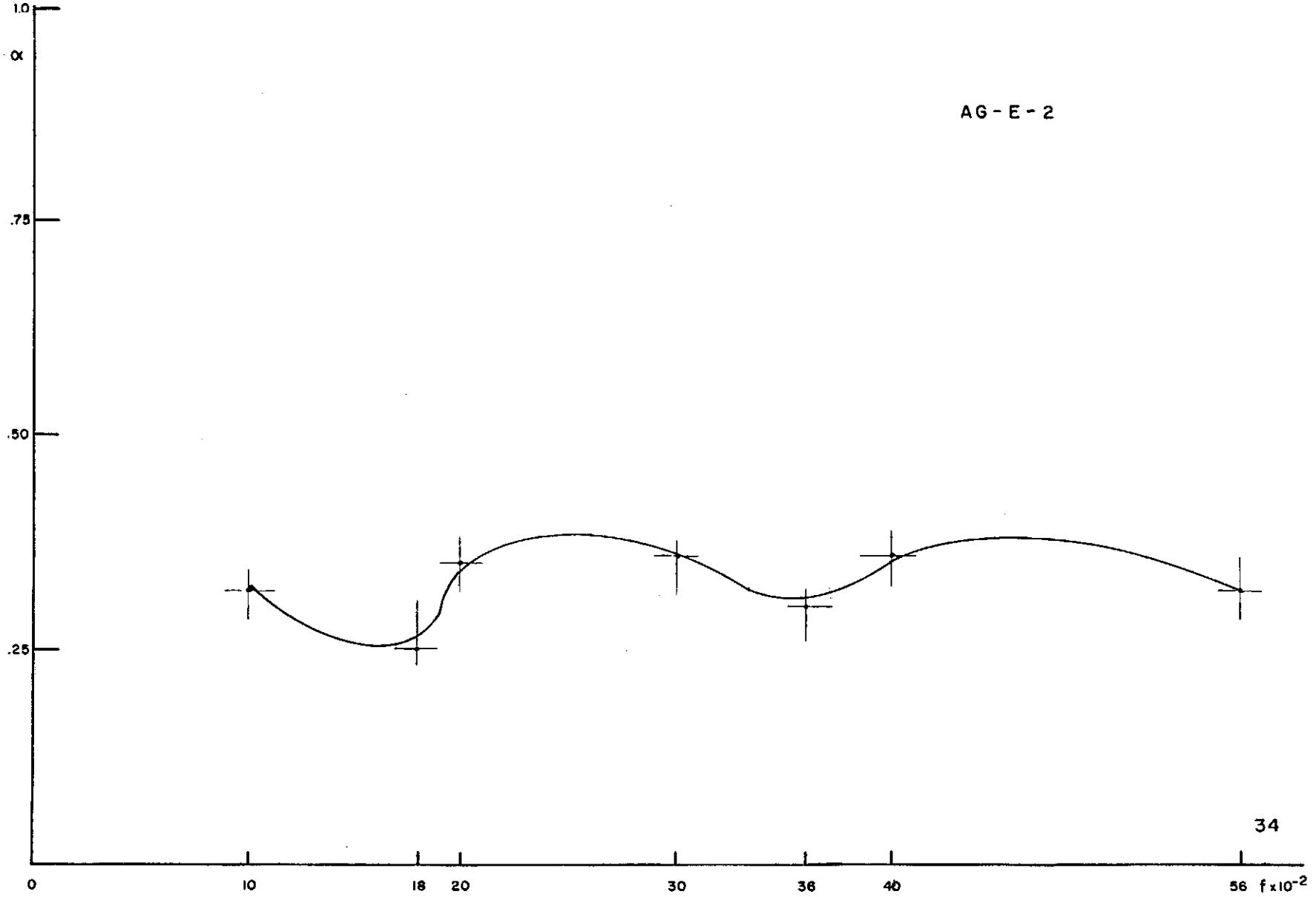




AG - L - 5

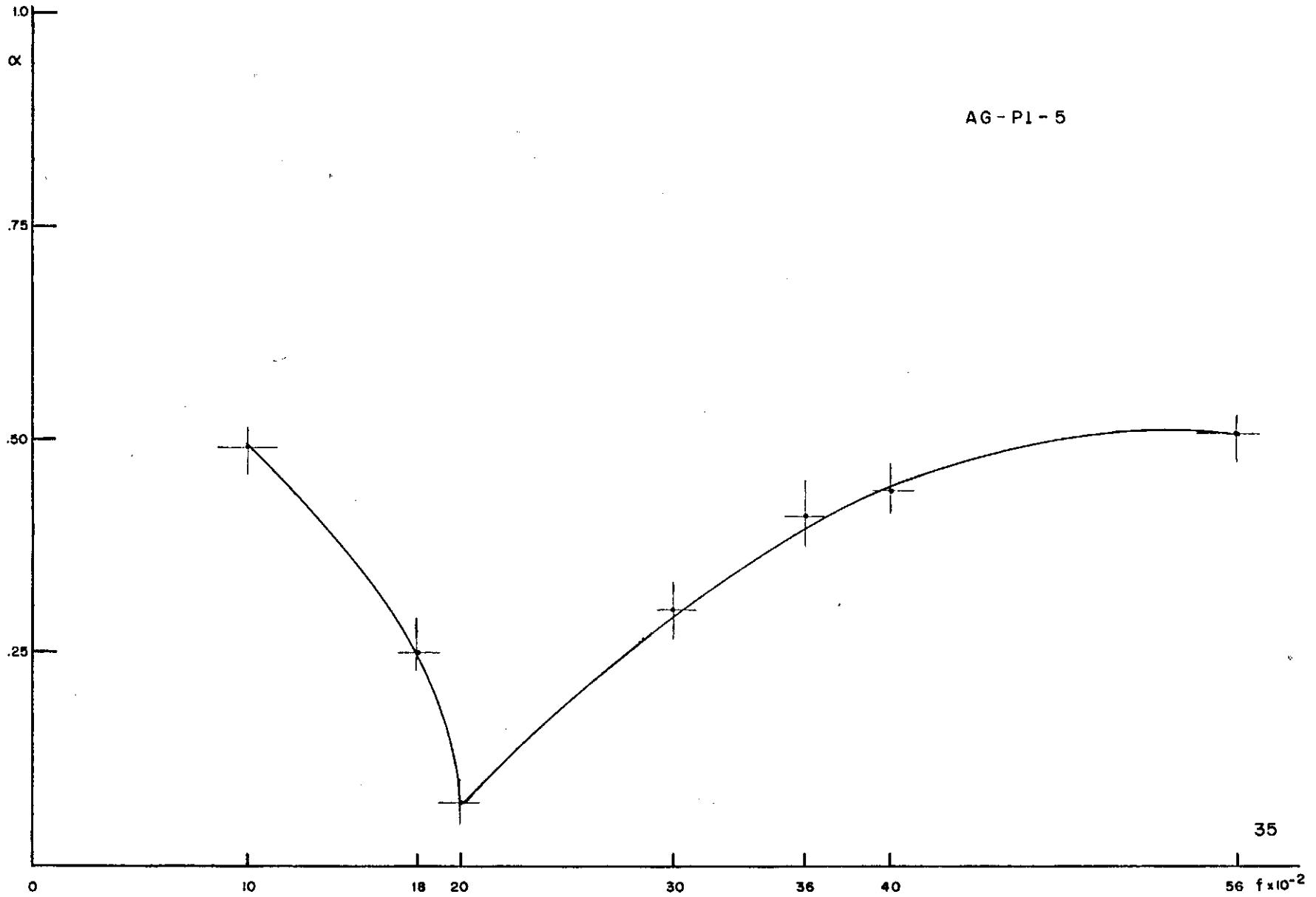
94

33



95

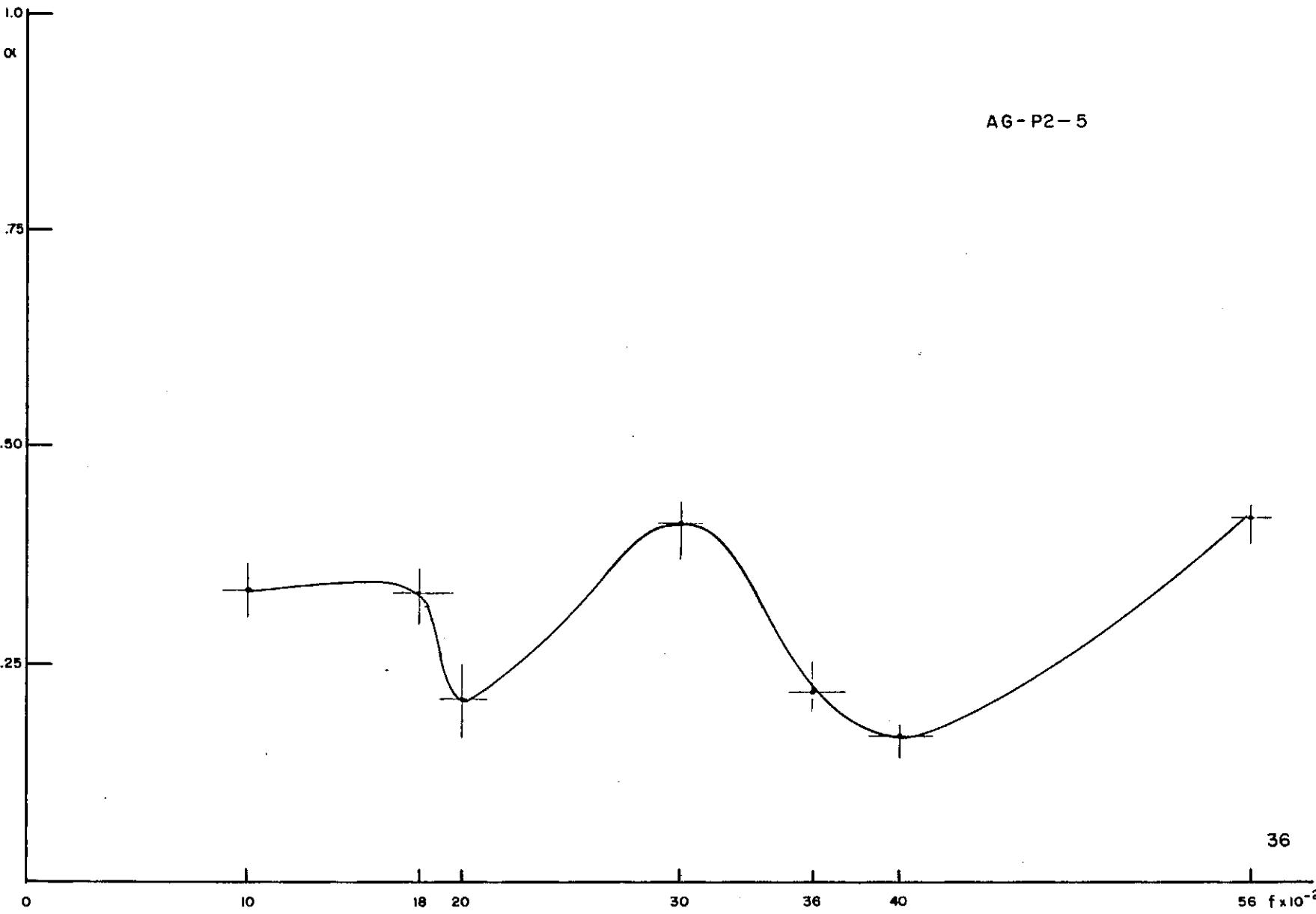
34



AG - P2 - 5

L7

36



## CAPÍTULO IV

### CONCLUSÕES

#### IV.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Fazendo a separação dos efeitos acústicos devido aos parâmetros da amostra (porosidade, densidade, permeabilidade e espessura), construiu-se gráficos comparativos de características acústicas dos esqueletos porosos.

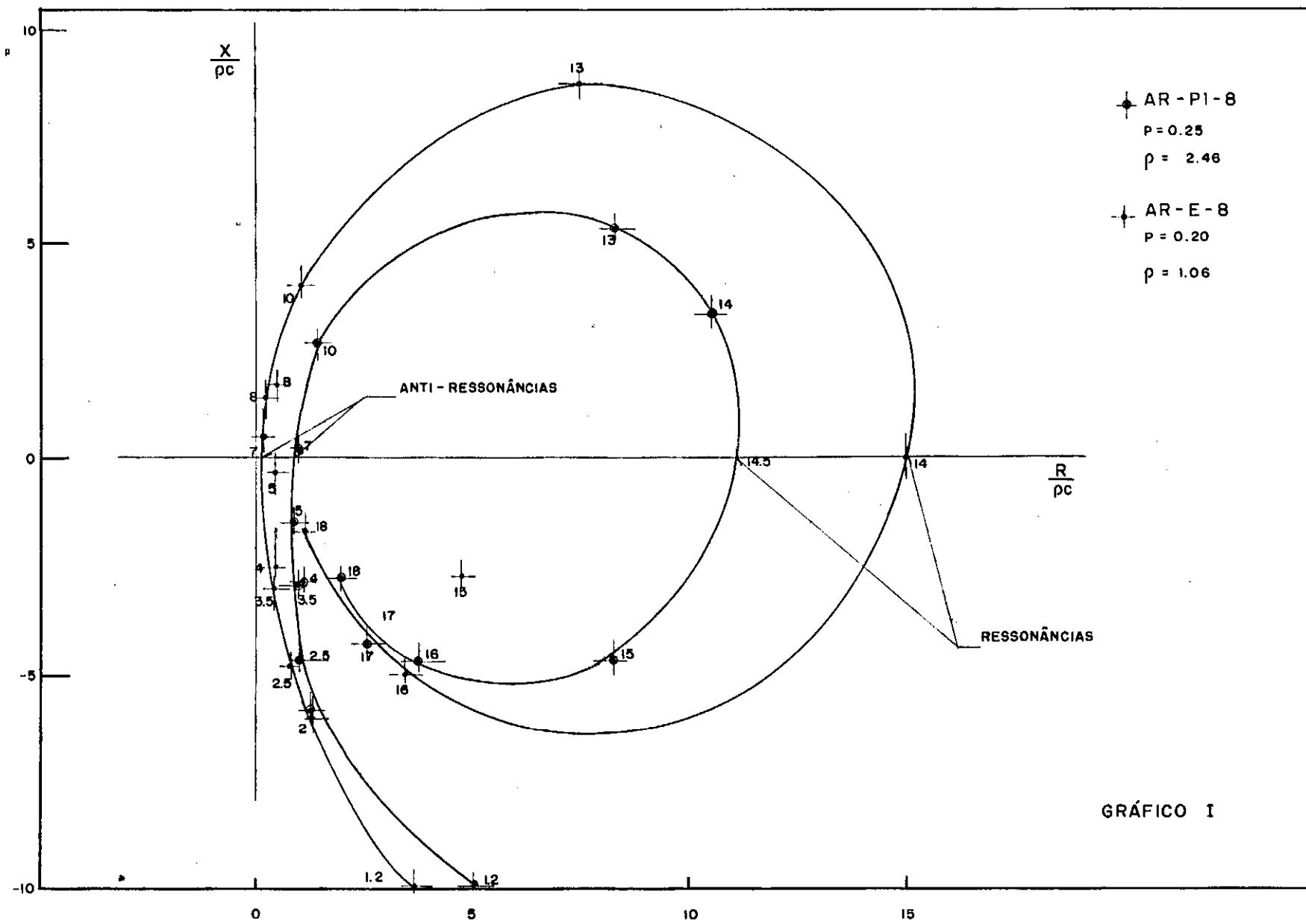
Pelo gráfico polar de impedância nº I, observa-se as alterações no comportamento dos esqueletos, com as variações de densidade e permeabilidade. As amostras têm ambas 8cm de espessura, densidades (1,06 e 2,48) e permeabilidades (0,20 e 0,25).

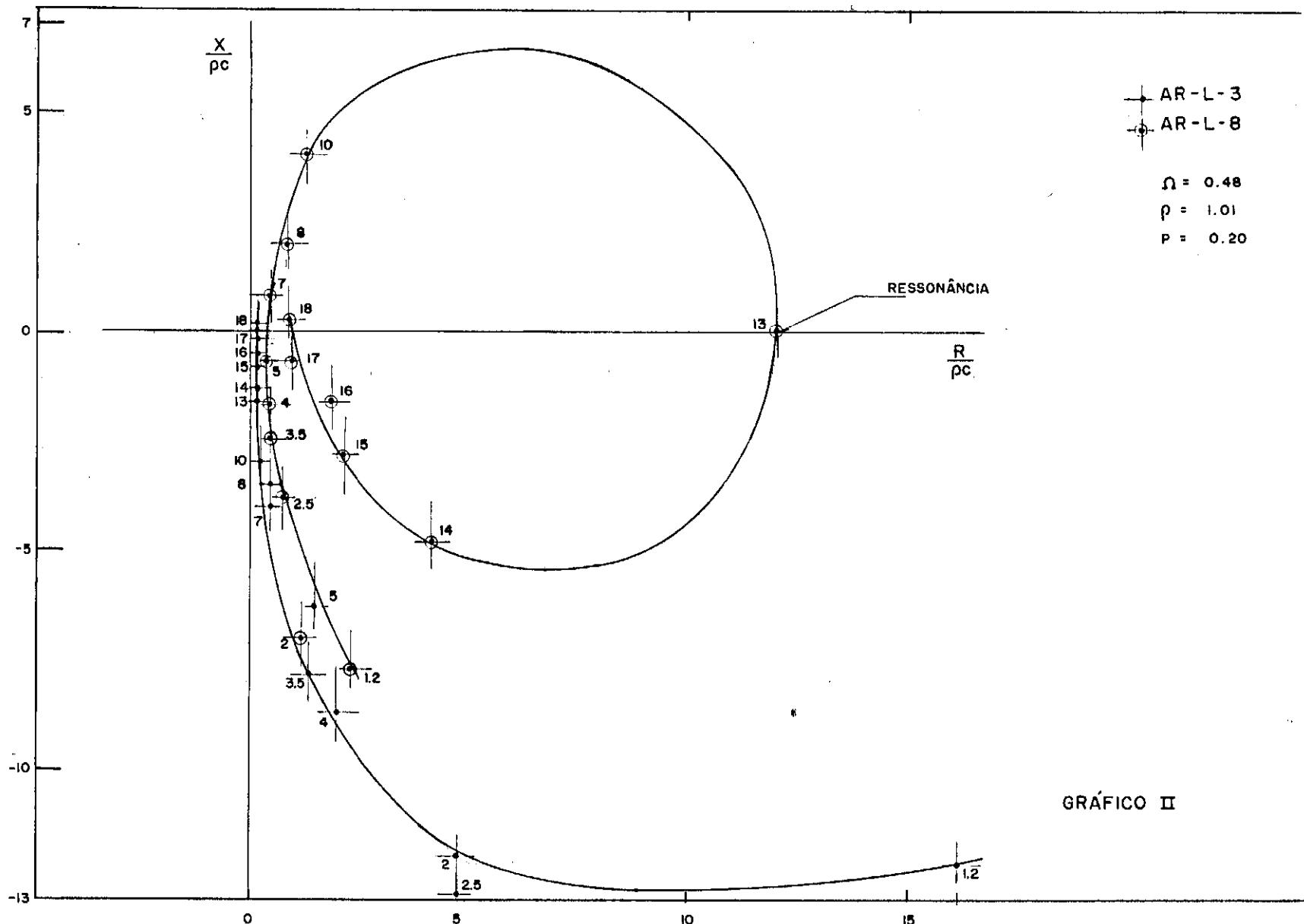
O gráfico II mostra a evolução da impedância acústica com frequência para amostras com espessuras 8 e 3cm e a mesma porosidade, densidade e permeabilidade.

No gráfico III, mantém-se a mesma espessura (5cm) e varia-se porosidade, densidade e permeabilidade.

A ligação entre os gráficos II e III é feita pela amostra AR-L-5, de espessura intermediária às do gráfico II, mas da mesma família de propriedades.

O gráfico IV representa o comportamento do coeficiente de absorção de três esqueletos porosos na água, utilizando o produto  $p\Omega$  como índice de variação da porosidade e densidade do esqueleto.





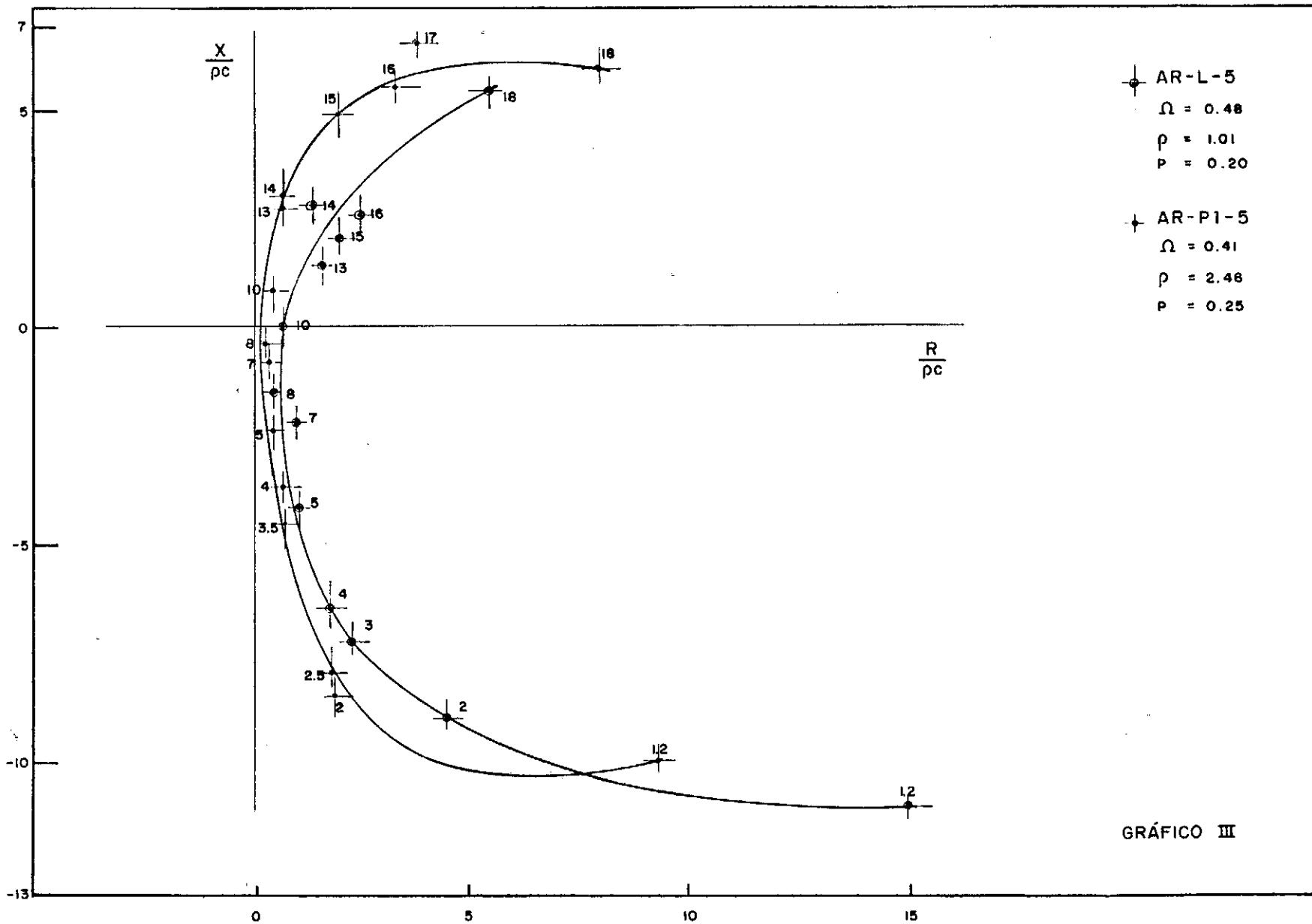
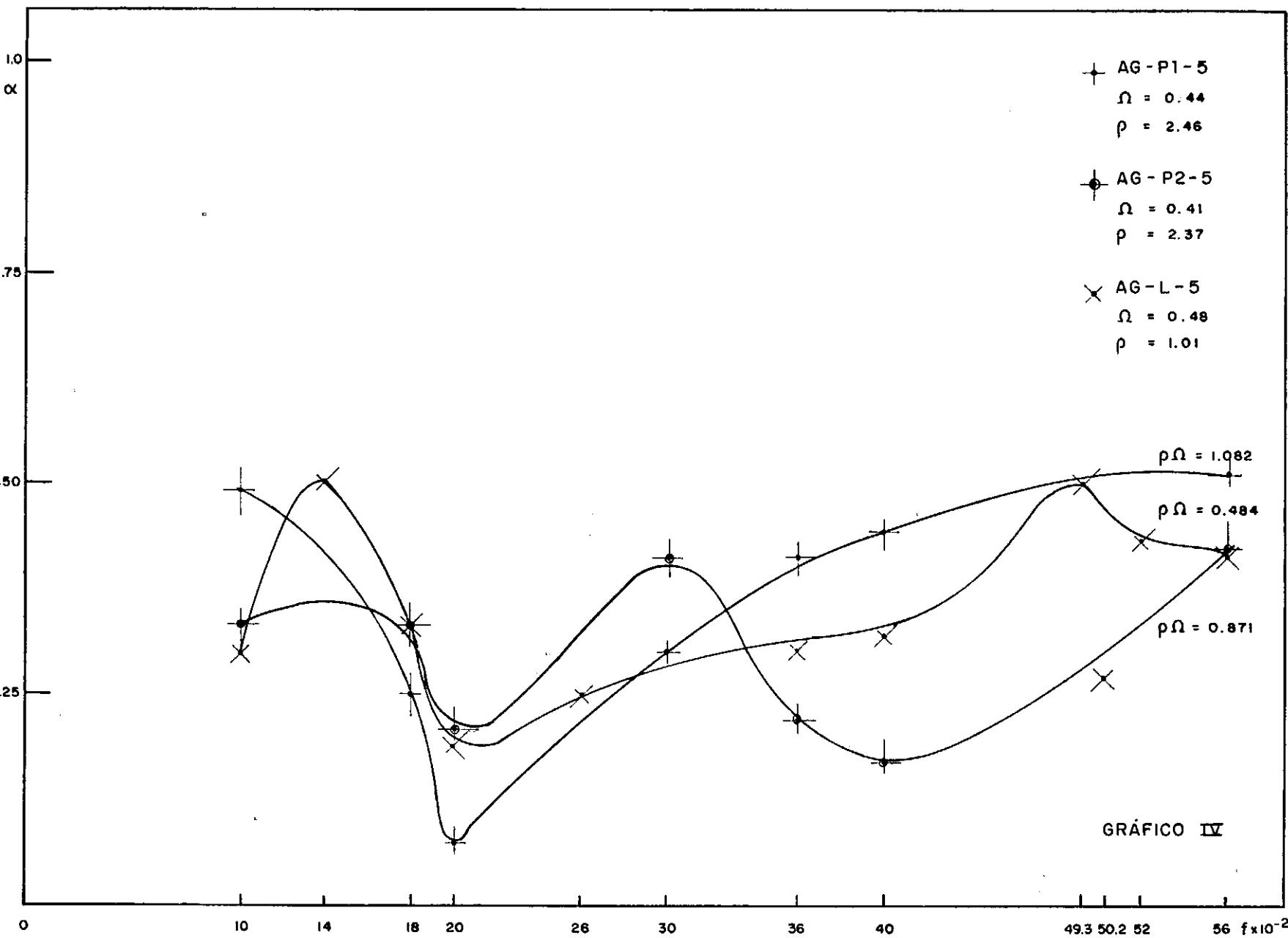


GRÁFICO III



## IV.2. OBSERVAÇÕES GERAIS SOBRE OS GRÁFICOS

### (i) Esqueletos Porosos no Ar

As amostras de maior volume (8cm de espessura) medidas no tubo de impedância para o ar, apresentaram o fenômeno de ressonância acústica em frequências situadas na faixa 1.300-1.450 Hz.

Observa-se nos gráficos de 1 a 18 o aparecimento das ressonâncias, caracterizadas pela anulação da parte reativa com um pico correspondente na parte resistiva da impedância acústica, e um mínimo na absorção. Diminuindo-se a espessura, nota-se o desaparecimento da ressonância, que passaria a ocorrer para frequências mais elevadas.

O mesmo pode ser observado nos gráficos polares de impedância I a III, que apontam as ressonâncias quando a espiral da impedância corta o eixo real, revelando o crescimento da resistência acústica com a diminuição da permeabilidade e sua ocorrência para frequências mais elevadas nas amostras mais densas.

A absorção é sensivelmente mais elevada para amostras de esqueleto menos denso.

O coeficiente de absorção dos esqueletos porosos no AR é bastante influenciado pela parte reativa da impedância destes materiais, que resulta em resposta em frequência com ressonâncias e anti-ressonâncias.

No gráfico polar de impedância, a anti-ressonância ocorre quando a parte ascendente da curva corta o eixo real e as ressonâncias quando este é cortado no ramo descendente do chamado

"Loup de ressonâncias" (gráficos I a III); nas anti-ressonâncias a absorção é máxima.

O aumento da permeabilidade diminui a resistência acústica na ressonância e a diminuição de densidade faz com que estas ocorram em frequências mais baixas.

### (ii) Materiais Acústicos Comerciais no Ar.

#### Quadro das Variações dos Parâmetros Acústicos

	EXC-8	EXC-4	EXC-2	EXF-4	EXF-1
$\frac{R}{(\rho c)}$ AR	6 a 13	6 a 12	7 a 16	3 a 9	2 a 12
$\frac{X}{(\rho c)}$ AR	0 a 12	-10 a +10	-8 a 0	-5 a 0	-10 a 0
$\alpha$					
$f < 1.000 \text{Hz}$	0,25 a 0,40	0,15 a 0,50	0,5 a 0,40	0,30 a 0,60	0,20 a 0,30
$f > 1.000 \text{Hz}$	0,25 a 0,40	0,30	0,5 a 0,40	0,60 a 0,65	0,50 a 0,60

TABELA I

EXC-8 : Eucatex acústico 8cm espessura

EXC-4 : Eucatex acústico 4cm espessura

EXC-2 : Eucatex acústico 2cm espessura

EXF-4 : Eucatex frigorífico 4cm espessura

EXF-1 : Eucatex frigorífico 1cm espessura

O Eucatex frigorífico apresenta características acústicas melhores que o Eucatex acústico, absorvendo quase o dobro pa-

ra a mesma frequência.

	LÃ-8	LÃ-5	LÃ-3
$\frac{R}{(pc)}_{AR}$	1 a 2	1 a 2	1 a 2
$\frac{X}{(pc)}_{AR}$	-5 a 0	-5 a 0	-10 a 0
$\alpha$	120 a 350Hz 0,25 a 0,75 350 a 1800Hz 0,75 a 0,98	120 a 700Hz 0,25 a 0,75 700 a 1800 0,75 a 0,95	120 a 1400Hz 0,25 a 0,75 1400 a 1800 0,75 a 0,85

TABELA II

A impedância acústica da Lã-de-vidro é quase que totalmente resistiva e o diagrama polar da impedância deste material apresentaria um loop de ressonância de diâmetro extremamente pequeno o que caracteriza o material com grande amortecimento.

Em todos os materiais comerciais testados foi encontrando a tendência a maiores absorções para as frequências mais elevadas. Na lã-de-vidro de 3 cm de espessura a variação da absorção com a frequência cresce linearmente (gráficos 19 a 27).

O eucatex frigorífico muda de comportamento acima de 1.000Hz, aumentando bastante a absorção para ambas as espessuras 1cm a 4cm (Tabela I).

Uma resistência acústica elevada, não significa grande absorção. A absorção é caracterizada principalmente por um pe-

queno diâmetro do loop de ressonância no diagrama polar.

Para que a onda acústica penetre no material acústico no qual ela deverá ser absorvida, é necessário que haja antes de mais nada um casamento de impedância entre o meio livre e o meio de absorção. Uma terminação em aço, por exemplo, é unicamente resistiva mas o descasamento de impedâncias causa uma reflexão praticamente que total, em todas as frequências examinadas (gráficos 28, 29 e 30).

As maiores absorções ocorrem para as pequenas resistências e reatâncias acústicas nulas, correspondendo ao comportamento da lá-de-vidro com grandes espessuras, para todas as frequências acima de 350Hz. Esta associação de parâmetros corresponde nos esqueletos porosos no ar, ao que ocorre na frequência de anti-ressonância na qual a absorção é máxima, concluindo-se que a lá-de-vidro responde ao campo acústico constantemente em estado de anti-ressonância e daí a elevada absorção.

Os coeficientes de absorção dos materiais acústicos comerciais examinados no ar, não apresentam características de máximos e mínimos, isto é, simpatias por determinadas frequências, como acontece com os esqueletos porosos no ar. Nestes materiais a absorção tem duas características marcantes: comportamento plano em frequência ou comportamento crescente com a frequência.

### (iii) Esqueletos Porosos na Água

Observa-se o pequeno efeito reativo dos esqueletos porosos imersos na água, devido ao casamento de impedâncias entre

fluido de propagação - esqueleto poroso + fluido.

A reatância acústica toma frequentemente valores nulos e é a resistência acústica que rege o fenômeno de reflexão.

Cabe aqui salientar certas dificuldades encontradas na determinação das impedâncias acústicas dos esqueletos porosos na água. A expectativa era de deslocamentos de 4cm a 5cm nos nós de pressão do sistema estacionário, ou pelo menos que isto ocorresse para os maiores comprimentos de onda (de 30 a 60cm) emitidos nas frequências mais baixas. No entanto, mesmo estes nós deslocam-se muito pouco (1 a 3cm no máximo), ficando difícil medir com 1cm (a precisão da escala de distância é  $\pm 0,5\text{cm}$ ), deslocamentos de 1 a 2cm , com a devida precisão.

Assim é que os resultados obtidos para impedância acústica dos esqueletos porosos na água acusam certas variações na impedância de terminação do sistema estacionário, sendo entretanto de maior valia para a observação dos comportamentos acústicos, os gráficos de absorção que foram determinados a partir dos sinais de pressão obtidos no transdutor fixo, com precisão de  $\pm 0,1\text{dB}$ .

Estes coeficientes de absorção situam-se, com raras exceções, na faixa 0,25 a 0,50 para todos os meios porosos examinados na água, revelando para os dois esqueletos de areia com densidade duas vezes superior à da água, a existência também de ressonâncias, observadas por mínimos de absorção para frequências bem definidas (gráficos 31 a 36).

#### IV.3. COMPARAÇÃO TEÓRICA

A teoria de propagação em meios porosos (Capítulo I. 6) fornece-nos para a amplitude da onda plana progressiva em meios porosos a expressão

$$\psi = A e^{j(k_e x - \omega t)} e^{-\gamma_e x},$$

onde

$$k_e = w \sqrt{\rho_p k_p \Omega} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left( \frac{\Phi}{\rho_w} \right)^2} + \frac{1}{2} \right]^{1/2}$$

$$\gamma_e = w \sqrt{\rho_p k_p \Omega} \left[ \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\Phi}{\rho_p w}} - \frac{1}{2} \right]^{1/2}$$

$\gamma_e$  representa o decremento de amplitude da onda de pressão, e  $k_e$  o inverso da velocidade de fase para cada frequência.

Todos os parâmetros necessários para a determinação de  $k_e$  e  $\gamma_e$  foram medidos experimentalmente (Capítulo II.3.3 , item 2) e torna-se possível obtê-los para as amostras AR-E-8 e AR-P1-8, a primeira de plástico e a segunda de areia, ambas com 8cm de espessura. Os cálculos estão apresentados nas Tabelas III e IV e gráficos V e VI.

AR-E-8

$$\Phi = 0,87 \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2}$$

$$\Omega = 0,48$$

$$k_p = 0,705119 \times 10^{-5} \frac{m^2}{N}$$

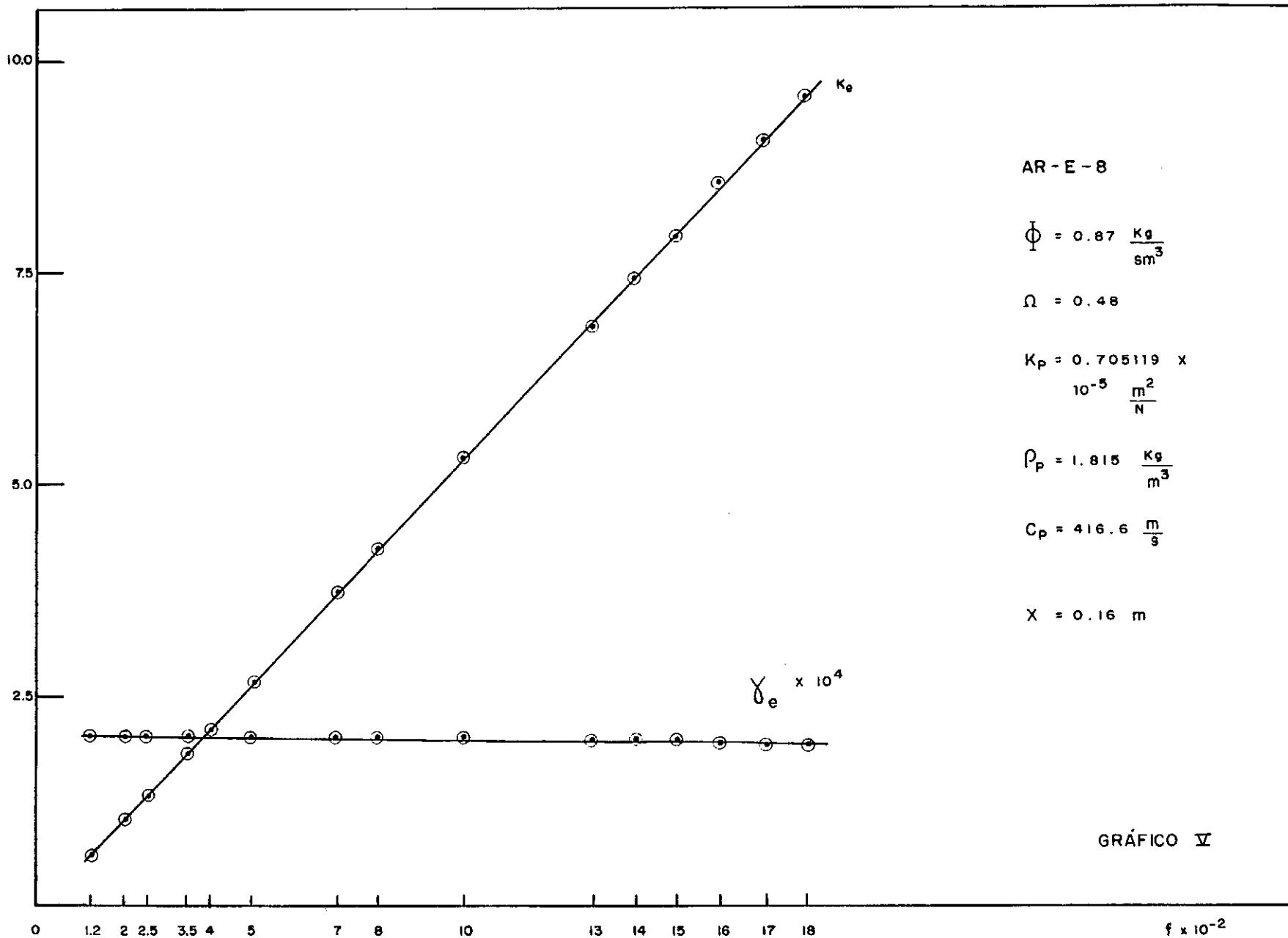
$$\rho_p = 1,5\rho_o = 1,815 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_p = 416,6 m/s$$

$$l = 0,08m$$

$f$	$k_e$	$\gamma_e$
120	0,639	0,0002032
200	1,066	0,0002031
250	1,332	0,0002030
350	1,866	0,0002027
400	2,132	0,0002028
500	2,665	0,0002021
700	3,732	0,0002009
800	4,265	0,0002000
1.000	5,331	0,0001994
1.300	6,930	0,0001960
1.400	7,464	0,0001974
1.500	7,997	0,0001958
1.600	8,530	0,0001907
1.700	9,063	0,0001922
1.800	9,596	0,0001919

TABELA III



## AR-PI-8

$$\Phi = 0,72 \frac{\text{kg}}{\text{Sm}^3}$$

$$\Omega = 0,44$$

$$k_p = 0,705119 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{N}}$$

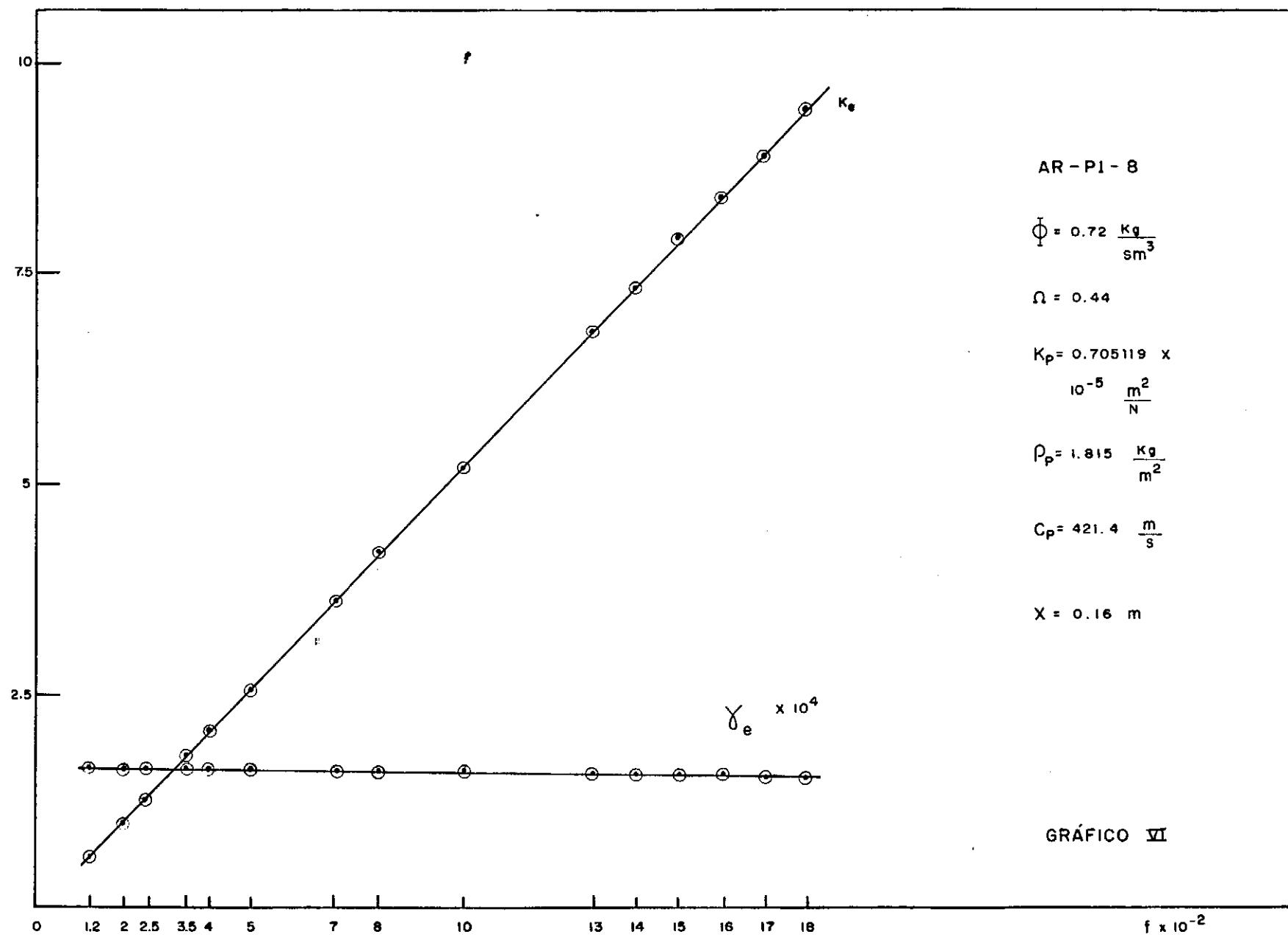
$$\rho_p = 1,815 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_p = 421,4 \text{ m/s}$$

$$l = 0,08 \text{ m}$$

$f$	$k_e$	$\gamma_e$
120	0,6325	0,0001663
200	1,0542	0,0001661
250	1,3178	0,0001661
350	1,845	0,0001660
400	2,1085	0,0001660
500	2,6357	0,0001655
700	3,690	0,0001650
800	4,2171	0,0001633
1.000	5,2714	0,0001624
1.300	6,8529	0,0001667
1.400	7,3800	0,0001565
1.500	7,9072	0,0001581
1.600	8,434	0,0001577
1.700	8,961	0,0001552
1.800	9,488	0,0001500

TABELA IV



Pelos valores de  $k_e$  e  $\gamma_e$  observa-se que a teoria de propagação em meios porosos não considera todos os efeitos dinâmicos envolvidos nesta propagação. Baseando-se em dados não-acústicos para chegar ao comportamento da queda de amplitude e velocidade de fase, a teoria leva a valores de absorção determináveis somente para grandes distâncias de propagação.

No entanto, é de grande interesse a variação de  $k_e$  com a frequência, isto é, a "constante de onda" para a propagação no meio poroso no ar.

Referindo-se a Figura 2 do Capítulo I.5, substitui-se o meio I pelo ar, o meio II pelo esqueleto poroso e o meio III pela terminação aço+ar do tubo de impedâncias. Utiliza-se as expressões I.5.1 e I.5.2 fazendo  $k_2 = k_e$ ,  $\rho_2 c_2 = \rho_p c_p$  (do meio poroso) e

$$\left( \frac{\rho_3 c_3}{\rho_1 c_1} \right)_{\text{terminação}} = \left( \frac{R_n}{\rho_1 c_1} \right)_{\text{calibração}} = (Z_n)_{\text{III}}$$

isto é, considerando-se a impedância da interface dos meios II e III, os valores para cada frequência da impedância acústica de terminação aço+ar obtidos na calibração do tubo sem amostra, e calcula-se  $\alpha_r$  e  $\alpha_t$ . Os resultados estão apresentados nas Tabelas V e VI.

## AMOSTRA AR-E-8

$f$	$\frac{\rho_3 C_3}{\rho_1 C_1}$	$k_2 = k_e$	$\alpha_r$	$\alpha_t$	$\alpha_n$
120	70	0,639	0,944	0,0556	0,0004
200	44	1,066	0,901	0,0873	0,0117
250	56	1,332	0,913	0,0694	0,0176
350	63	1,866	0,936	0,0624	0,0016
400	63	2,132	0,936	0,0627	0,0013
500	70	2,665	0,943	0,0572	0,0002
700	70	3,732	0,940	0,0590	0,0010
800	70	4,265	0,939	0,0601	0,0009
1.000	22	5,331	0,813	0,186	0,0010
1.300	56	6,930	0,915	0,084	0,0010
1.400	52	7,464	0,905	0,094	0,0010
1.500	35	7,997	0,858	0,141	0,0010
1.600	50	8,530	0,894	0,1105	0,0045
1.700	63	9,063	0,912	0,0875	0,0005
1.800	50	9,596	0,886	0,1136	0,0004

TABELA V

AR-P1-8

$f$	$\frac{\rho_3 c_3}{\rho_1 c_1}$	$k_2 = k_e$	$\alpha_r$	$\alpha_t$	$\alpha_n$
120	70	0,6325	0,943	0,0556	0,0014
200	44	1,0542	0,912	0,087	0,001
250	56	1,3178	0,930	0,069	0,017
350	63	1,845	0,937	0,062	0,006
400	63	2,1085	0,937	0,063	0,000
500	70	2,6357	0,942	0,057	0,001
700	70	3,690	0,940	0,058	0,002
800	70	4,2171	0,939	0,060	0,001
1.000	22	5,2714	0,813	0,186	0,001
1.300	56	6,8529	0,918	0,084	0,002
1.400	52	7,380	0,905	0,093	0,002
1.500	35	7,9072	0,847	0,140	0,013
1.600	50	8,434	0,894	0,104	0,002
1.700	63	8,961	0,912	0,0872	0,0008
1.800	50	9,488	0,885	0,1132	0,0018

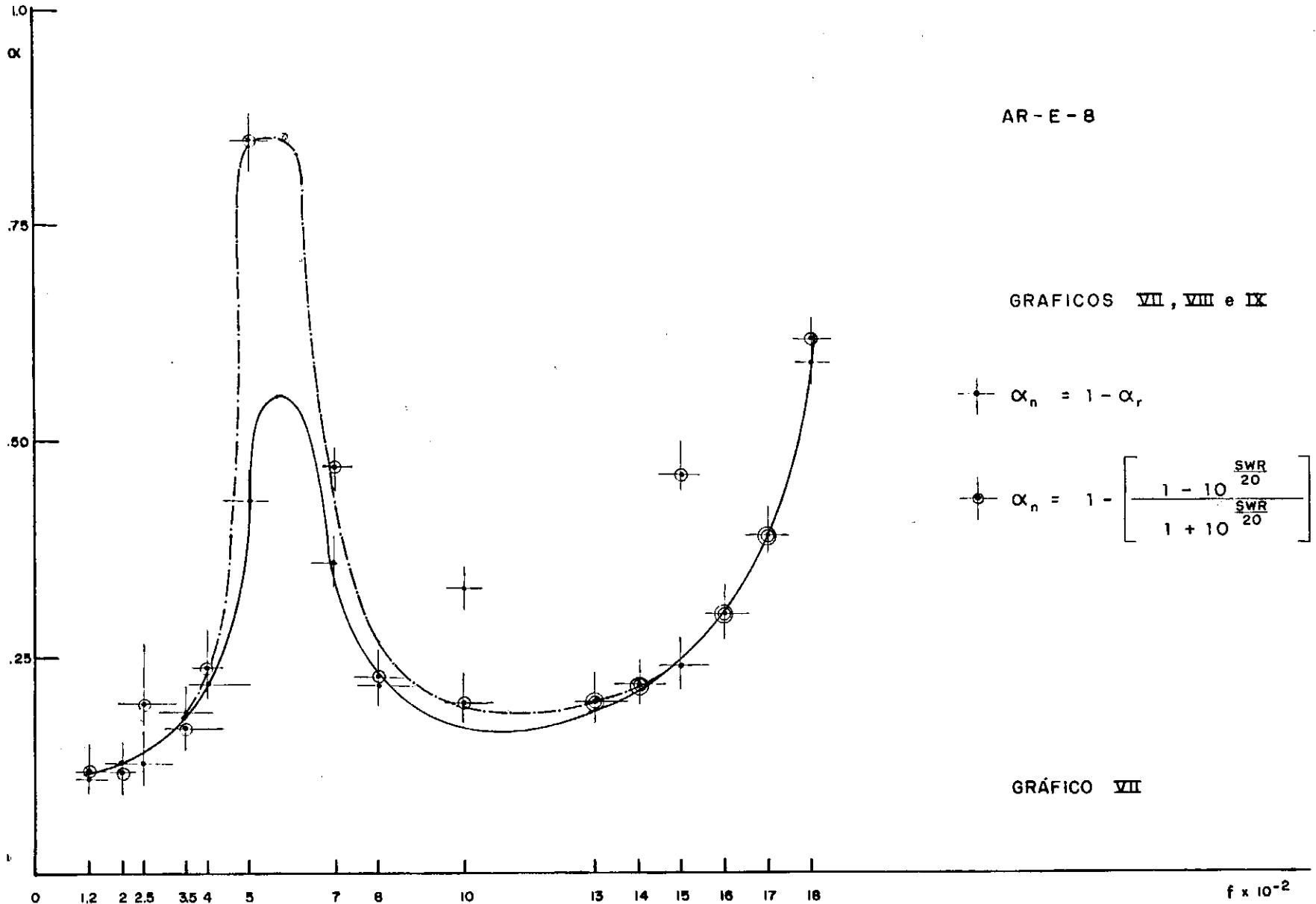
TABELA VI

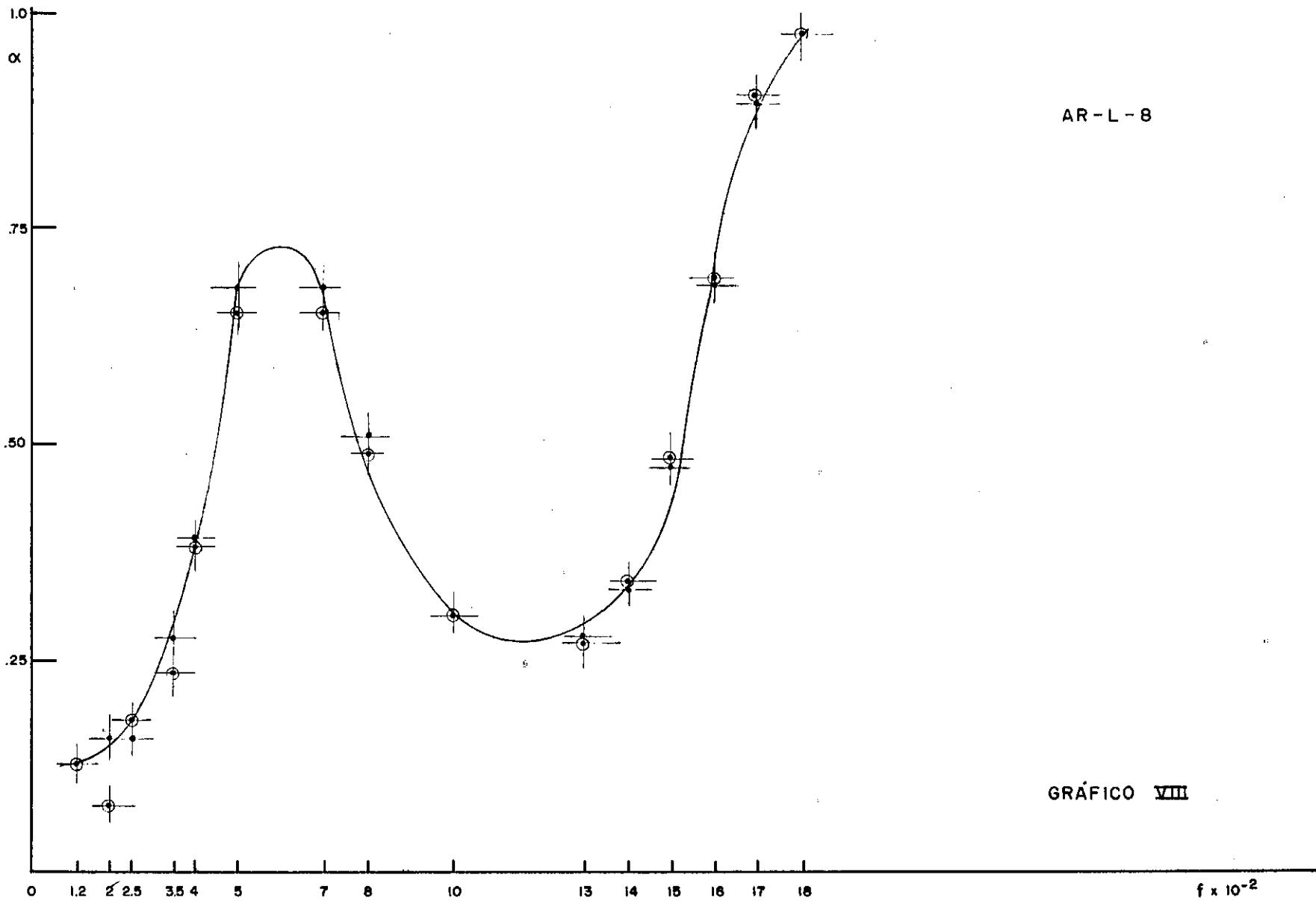
Os coeficientes de absorção ( $\alpha_n$ ) calculados a partir da teoria de propagação em meios porosos e da teoria de transmissão entre três meios (Tabelas V e VI), prevêm pequenos valores de absorção dos esqueletos porosos no ar, diferindo dos resultados experimentais das medições em tubo de impedância.

Observa-se a mesma previsão de pequenas absorções, pelos reduzidos valores de  $\gamma_e$  da expressão da amplitude da onda acústica no meio poroso (Tabelas III e IV), mostrando a coerência dos dois resultados encontrados. Esta teoria é uma tentativa de previsão do fenômeno acústico nos meios porosos a partir de medições não-acústicas da amostra ( $\rho$ ,  $\Omega$ ,  $P$  e  $\ell$ ) com simplificações na dinâmica de propagação.

Os resultados porém estão dissociados das medições experimentais, que constatam absorções bastante elevadas para determinadas frequências, nos esqueletos porosos de 8cm de espessura, para os quais a comparação foi realizada (AR-E-8 e AR-Pl-8).

Referindo-se ao Capítulo I, a expressão I.4.3 permite o cálculo do coeficiente de reflexão ( $\alpha_r$ ) a partir da impedância da face da amostra e por conseguinte do coeficiente de absorção  $\alpha_n = 1 - \alpha_r$ . Os gráficos VII, VIII e IX comparam estes coeficientes de absorção com aqueles determinados a partir das medições dos SWR do sistema estacionário no tubo de impedância (gráficos 1 a 6 e 13 a 15), com a finalidade de verificar o fechamento dos resultados da impedância acústica e dos coeficientes de absorção provenientes do processamento dos dados experimentais.





AR - L - 8

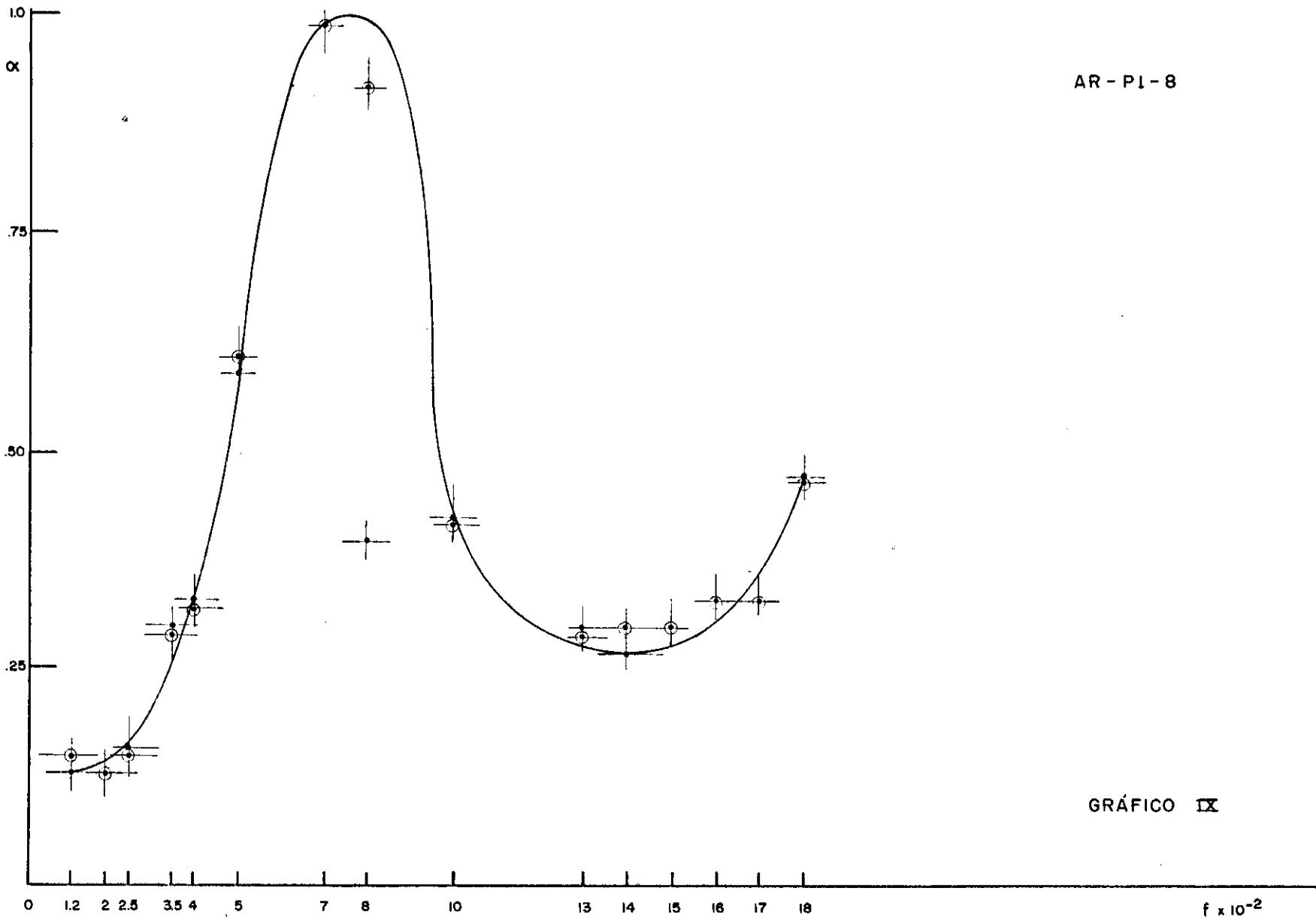
118

GRÁFICO VIII

AR - P1 - 8

119

GRÁFICO IX



#### IV.4. MODELO ACÚSTICO

Observa-se pelo comportamento da impedância dos esqueletos porosos no ar, características acústicas semelhantes a dos ressonadores, e camaras de expansão. Estes elementos respondem ao campo acústico com inertância, elastância e resistência acústicas, análogos aos efeitos de inércia, mola e resistência mecânicas, indutância, capacitância e resistência elétricas.

Estes efeitos estão interligados pela impedância do elemento acústico,

$$Z = R + j \left[ wM - \frac{1}{wC} \right] , \text{ onde}$$

R - resistência

M - inertância

C - elastância

A ressonância ocorrerá quando a reatância for nula ( $w = \sqrt{\frac{1}{MC}}$ ), e esta é também a frequência de oscilação livre sem amortecimentos devido à radiação do som e à forças de viscosidade.

Os esqueletos porosos constituem uma malha complexa e aleatória de pequenos elementos acústicos como estes, apresentando exatamente este tipo de comportamento na evolução do coeficiente de absorção e da impedância acústica com a frequência (gráficos I a 30 e I a III).

Os poros repletos de fluido acumulam a energia de pressão do campo acústico (elastância), os canais resistem ao fluxo ocasionado por este campo (resistência), e o esqueleto com o flu-

do nos canais e poros respondem com inercia aos deslocamentos (inertância).

Assim é que se pode relacionar as influências principais dos parâmetros de amostra ( $\rho$ ,  $\Omega$ ,  $P$  e  $\ell$ ) com estes efeitos acústicos,

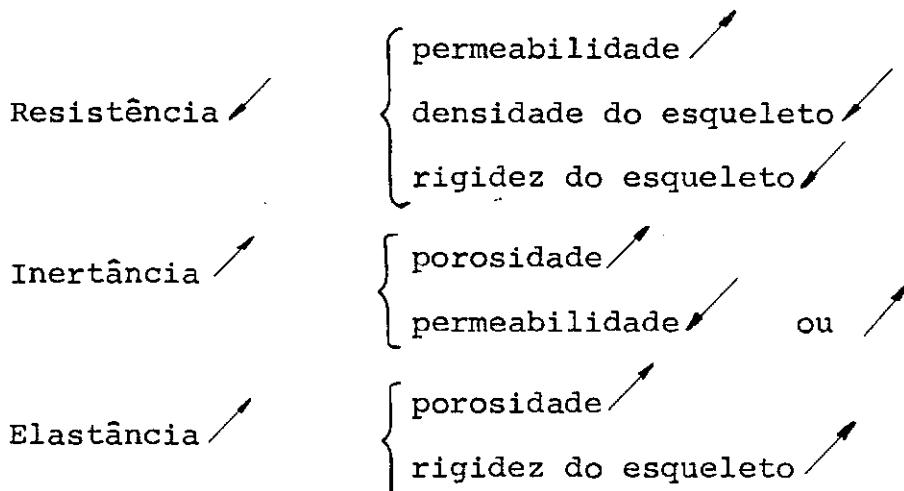
( i ) A resistência acústica é principalmente influenciada pela permeabilidade, rigidez e densidade do esqueleto.

( ii) A elastância é alterada pela porosidade e a rigidez do esqueleto.

( iii) A inertância varia principalmente com a porosidade e a permeabilidade da amostra.

( iv) A espessura da amostra e o meio de propagação modificam globalmente a impedância acústica do esqueleto poroso.

Resumindo num quadro de influências,



APENDICE

SOLARTRON Digital TFA JM 1.600 A.

SOLARTRON HF Extension Unit JX 1.639

Sound and Vibration Analyser GR 1.564-A

350 Watt Power Amplifier McIntosh MC 3.500

Wide Range Oscillator Model 200 CD Hewlett and  
Packard

Storage Oscilloscope Tektronix Type 564B

Vibration Pick-up Preamplifier Type 2625 Brüel &  
Kjaer

Power Suply Type 2805 Brüel & Kjaer

Vacum Tube Voltmeter Model 400L Hewlett and Packard

Vibration Meter Type 1.553 AK General Radio Co.

BIBLIOGRAFIA

- [ 1] KIUSLER-FREY, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, N.Y., 1962.
- [ 2] MORSE and INGARD, "Theoritical Acoustics", MacGraw-Hill, N.Y., 1968.
- [ 3] FUNG, "Foundations of Solid Mechanics", Prentice-Hall, N.Y. , 1965.
- [ 4] BERANEK, "Noise and Vibration Control", MacGraw-Hill, N.Y. , 1971.
- [ 5] HUETER and BOLT, "Sonics", John Wiley & Sons, N.Y., 1965.
- [ 6] HALL and MATHEWS, "Sound", Bulter & Tanner, Londres, 1965.
- [ 7] T.H.MELLING, "An Impedance Tube for Precision Measurements of Acoustic Impedance and Insertation Loss at High Sound Pressure Levels", J. of Sound and Vibration, Inglaterra, 1973.
- [ 8] BERANEK, "Acoustical Properties of Homogeneous Isotropic Rigid Files and Flexible Blankets", J.Acou.Soc.Am, 1947.
- [ 9] L.HSIEH, C.H.YEN, "Wave Motions in a Fluid Saturated Porous Medium", J. of Applied Mech., 1973.
- [10] R.N.MORSE, "Acoustic Propagation in Granular Media", J.Acou.Soc. Am., 1952.
- [11] M.A.BIOT, "Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid", I.Low-frequency range, II. Higher frequency range, J.Acou.Soc.Am., 1955.

- [12] SIMONE L.YANIV, "Impedance Tube Measurement of Propagation Constant and Characteristic Impedance of Porous Acoustical Material", J.Acou.Soc.Am, 1973.
- [13] M.MONGY, "Acoustical Properties of Porous Materials", National Institute of Standards, Sh. El-Tahrir, Dokki-Cairo, Egypto Acústica, Londres, 1973.
- [14] A.COPS and H.MYNCKE, "Determination of Sound Absorption Coefficients using a Tone-Burst Technique", Acustica, Londres, 1973.
- [15] DANIEL MACKRAKEN, "Fortran IV", John Wiley & Sons, N.Y., 1970.
- [16] MASSARANI, referência pessoal.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Arthur Palmeira Ripper Neto pela orientação e ricas contribuições durante o desenvolver e término do trabalho.

À equipe de arquitetos da FONDREM, Milton e Angela.

Ao fotografo Carlos Eduardo Nunes Pereira.

Aos funcionários da COPPE.

Aos amigos Ligia e Marcos pela presença inestimável.

A meus pais, Simone e Hanns pelo incentivo e colaboração.

Impreensão de sempre.