

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA DIFUSIBILIDADE DE CAMPOS ACÚSTICOS  
REVERBERANTES USANDO A TÉCNICA DE DOIS MICROFONES**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

**JAIPE PACHECO CÉSPEDES**

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1988

**AVALIAÇÃO DA DIFUSIBILIDADE DE CAMPOS ACÚSTICOS  
REVERBERANTES USANDO A TÉCNICA DE DOIS MICROFONES**

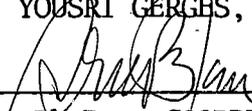
**JAIPE PACHECO CÉSPEDES**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

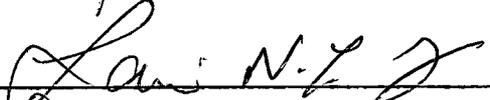
**M E S T R E   E M   E N G E N H A R I A**

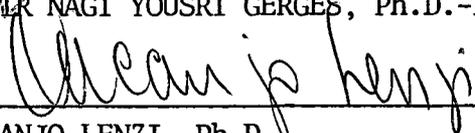
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
VIBRAÇÕES E ACÚSTICA E APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

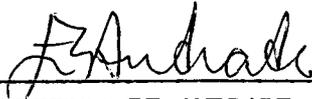
  
\_\_\_\_\_  
SAMIR NAGI YOUSRI GERGES, Ph.D.-ORIENTADOR

  
\_\_\_\_\_  
ARNO BLASS, Ph.D. - COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
SAMIR NAGI YOUSRI GERGES, Ph.D.-PRESIDENTE

  
\_\_\_\_\_  
ARCANJO LENZI, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
EDNARDO BEZERRA DE ANDRADE, M.Eng.

a Felipe meu filho

a minha esposa

a meus pais

a minhas irmãs

**AGRADECIMENTOS**

=====

- À Universidade do Chile e em especial a minha chefia direta, pelo fundamental apoio para a realização deste curso de pós-graduação.
- Ao Professor Samir N.Y. Gerges, pela orientação, ensinamentos e apoio prestado nesta pesquisa
- Ao Professor Arno Blass, coordenador do CPEM da UFSC pela colaboração prestada.
- Aos professores R. Brazzalle e R. Heidrich pela revisão do português e pela valiosa colaboração.
- Aos professores do Laboratório de Vibrações e Acústica pelos ensinamentos.
- A Vera e Adilton pela importante colaboração.
- A Zuleide pela esmerada datilografia.
- Ao CNPq pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

## Í N D I C E

=====

SIMBOLOGIA .....	viii
RESUMO EM PORTUGUÊS.....	xi
RESUMO EM INGLÊS (ABSTRACT) .....	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Revisão bibliográfica.....	1
1.2 Objetivo da pesquisa .....	5
1.3 Conteúdo do trabalho.....	7
CAPÍTULO 2 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	9
2.1 Técnica de dois microfones.....	9
2.2 Definição de função coerência.....	12
CAPÍTULO 3 - SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	14
3.1 Medição da diferença de fase da cadeia de instrumen- tação.....	15
3.2 Procedimento experimental e resultados.....	16
3.3 Seleção do espaçamento dos microfones, $\Delta r$ .....	19
3.4 Discretização no domínio da frequência.....	20
3.5 Programa para o cálculo do coeficiente de coerência $\gamma_{pu}^2$ .....	20
CAPÍTULO 4 - QUALIFICAÇÃO NORMALIZADA DE CÂMARAS REVERBE- RANTES .....	31
4.1 Considerações iniciais.....	31
4.2 Norma ISO 3741.....	31
4.3 Descrição geral da câmara reverberante grande.....	34

4.4	Descrição geral da câmara reverberante pequena.....	35
4.5	Medição do espectro de pressão sonora e do ruído de fundo.....	36
4.6	Tempo de reverberação e coeficiente de absorção.....	37
4.7	Cálculo da frequência de Schröeder.....	39
4.8	Qualificação normalizada da câmara reverberante grande e da pequena.....	40

## CAPÍTULO 5 - MEDIÇÃO DO CAMPO DIFUSO DAS CÂMARAS REVERBERANTES USANDO A TÉCNICA DE DOIS MICROFONES.....

	RANTES USANDO A TÉCNICA DE DOIS MICROFONES.....	54
5.1	Considerações iniciais.....	54
5.2	Medições de $\gamma_{pu}^2$ em câmara reverberante grande.....	55
5.2.1	Medição na região central da câmara.....	55
5.2.2	Medição perto de uma parede.....	57
5.2.3	Medição perto de uma aresta.....	58
5.2.4	Medição perto de um canto.....	59
5.2.5	Medição nas proximidades e perto da fonte sonora.....	60
5.2.6	Medição com duas fontes sonoras.....	61
5.3	Medições de $\gamma_{pu}^2$ em câmara reverberante pequena.....	61
5.3.1	Medição na região central da câmara.....	62
5.3.2	Medição perto de uma parede.....	63
5.3.3	Medição perto de uma aresta.....	63
5.3.4	Medição perto de um canto.....	63
5.3.5	Medição perto da fonte sonora.....	64
5.4	Análise dos Resultados.....	64

## CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE ERROS..... 111

6.1	Considerações gerais.....	111
6.2	Erro causado pela diferença de fase entre os dois	

canais de instrumentação.....	111
6.3 Erro causado pela aproximação do gradiente de pressão por diferença finita de pressões.....	112
6.4 Erro aleatório.....	113
6.5 Erro de cálculo digital.....	114
CONCLUSÃO.....	133
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	136
ANEXOS .....	139
Anexo 1: Programa de função coerência $\gamma_{pu}^2$ .....	140
Anexo 2: Programa de função coerência $\gamma_{pu}^2$ , modificado para o erro de cálculo digital....	143
Anexo 3: Frequências calculadas e medidas dos modos acústicos da câmara reverbe- rante grande e da pequena.....	146

## SIMBOLOGIA

=====

Os principais símbolos usados no decorrer do texto estão listados a seguir:

SÍMBOLO	DENOMINAÇÃO	UNIDADE
P	Pressão sonora	N/m <sup>2</sup>
p(t)	Pressão no domínio do tempo	N/m <sup>2</sup>
P(f)	Pressão sonora no domínio da frequência	
u	Velocidade de partícula	m/s
$\omega$	Frequência angular	rad/s
f	Frequência linear	Hz
$f_{Sch}$	Frequência de Schröder	Hz
$f_c$	Frequência central, Freq. de corte	Hz
$\Delta f$	Banda de frequência	Hz
$\rho$	Densidade do meio de propagação da onda	kg/m <sup>3</sup>
r	Distância	m
$\Delta r$	Espaçamento entre os dois microfones	m
d	Diâmetro	m
$\bar{r}$	Distância na direção de propagação da intensidade acústica	m
$\lambda$	Comprimento de onda sonora	m
$\gamma_{xy}^2$	Função de coerência (coeficiente)	adimensional
$G_{pu}$	Densidade espectral cruzada pressão/velocidade	
t	tempo	s

$G_{uu}$	Autoespectro da velocidade de partícula	
$G_{pp}$	Autoespectro de pressão	
L	Nível	dB
$\epsilon$	Erro	
$L_E$	Nível de erro	dB
$\phi_1 \phi_2$	Ângulos de fase	rad
K	Número de onda, $\omega/c$	$m^{-1}$
$X(t), Y(t)$		
$n(t), v(t)$	Funções variáveis no tempo	
$X(f), n(f)$	Funções no domínio da frequência	
c	Velocidade do som	m/s
$R(f)$	Resposta do sistema no domínio da frequência	
$E(f)$	Excitação do sistema no domínio da frequência	
$H_{xy}(f)$	Função de transparência ou resposta em frequência de um sistema	
NPS	Nível de pressão sonora	dB
I	Intensidade acústica	$W/m^2$
$\sigma$	Desvio padrão	
V	Volume	$m^3$
S	Área da superfície	$m^2$
$\alpha$	Coefficiente de absorção sonora	adimens.
$i = \sqrt{-1}$	Unidade imaginária	adimens.
$L_x, L_y, L_z$	Dimensões de uma sala retangular	m
$n_x, n_y, n_z$	Números inteiros	
$T_{60}, T$	Tempo de reverberação	s
%	Porcentagem	adimens.

$E[ ]$	Valor esperado do termo entre as chaves
$\underline{\quad}$	Média temporal
*	Complexo conjugado
$\langle \rangle$	Valor médio espacial
$\hat{\quad}$	Valor esperado
$ x $	Módulo do valor de x

**R E S U M O**  
=====

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo da di fusibilidade de campos acústicos, através da estimativa da função coerência entre a pressão sonora e a velocidade de partícula usando a técnica de dois microfones próximos e um analisador FFT de dois canais. Analizaram-se e mediram-se duas câmaras reverberantes usando este método, e compararam-se os resultados com os obtidos por métodos normalizados. Desta forma, quantifica-se a difusibili dade do campo acústico com precisão e boa resolução. Foi feito também, um estudo de erros sistemáticos das estimativas da função de coerência e as soluções usadas para minimizá-los.

**A B S T R A C T**

=====

The objective of this work is to present a study of sound fields in terms of its difusibility, through the estimation of the coherence function between the sound pressure and particle velocity, using the two microphone technique and a two channel FFT analyzer. Two reverberant chambers were investigated and the results show that the difusibility of the acoustic field can be qualified with precision and high resolution. The results obtained for reverberation room qualification were compared with ISO standards. Also a study on the sistematic errors of the coherence function estimation and the solutions used to minimize them were carried out.

## CAPÍTULO 1

### I N T R O D U Ç Ã O

= = = = =

Este capítulo apresenta uma introdução e revisão bibliográfica da pesquisa e os fundamentos do estudo realizado.

#### 1.1. Revisão Bibliográfica

Com o advento da tecnologia digital e sua aplicação na área da acústica desde os anos setenta até hoje, o processamento de sinais foi alvo de muitas pesquisas e descobertas conseguindo um notável desenvolvimento.

A técnica de dois microfones foi uma dessas descobertas que se transformou, nos últimos anos, em uma ferramenta eficiente e cada vez mais abrangente no campo da acústica aplicada.

Chung [6] e Fahy [7] apresentaram, separadamente, esta técnica no final da década passada que, baseia-se fundamentalmente na obtenção da densidade espectral cruzada dos sinais de dois microfones próximos, com a vantagem que as medições podem ser feitas numa contínua faixa de frequências usando um analisador FFT de dois canais.

O presente estudo é uma nova aplicação desta técnica com o objetivo de estudar campos acústicos.

É um fato conhecido que um campo sonoro numa sala qual-

quer está constituído pela presença simultânea de campos direto e reverberante. Considere-se o seguinte exemplo: dentro de uma sala é instalada uma fonte sonora que irradia energia em todas direções, nas proximidades da fonte sonora tem-se o denominado campo próximo, onde existe grande variação temporal da pressão sonora. Por outra parte, longe da fonte e perto das paredes da sala existe o denominado campo afastado também com variação da pressão sonora, e entre campo próximo e afastado tem-se campo livre onde a pressão decresce proporcionalmente com a distância à fonte [5]: portanto, dentro de uma sala qualquer pode-se ter campos sonoros de características diferentes. Em consequência, um campo sonoro qualquer é complexo e de difícil avaliação.

Mas o problema é crítico quando se deseja saber o grau de difusibilidade de uma câmara reverberante, ou o grau de campo livre numa câmara anecônica.

Estas questões são de grande importância se considerarmos que estes tipos de câmaras são utilizadas para diversos ensaios acústicos.

Hoje, a qualificação de campos sonoros anecônicos e reverberantes realiza-se através da medição espacial dos níveis de pressão sonora.

Na qualificação de câmaras anecônicas, onde é possível simular o campo livre, a norma ISO 3745 (1977) [13] estabelece que: na medição do decaimento do nível de pressão sonora com a distância à fonte, uma redução de 6 dB ao se dobrar a distância deveria ser obtida em qualquer direção, na faixa de frequência de interesse, se o campo acústico dentro da sala é um campo livre perfeito. Nesse caso, a energia acústica flui da fonte e é absorvida pelas superfícies da sala sem a presença de reflexões.

Para o caso de câmaras reverberantes, a norma ISO 3741 (1975) |12|, estabelece que a estimativa do desvio padrão da variação espacial dos níveis de pressão sonora deve estar abaixo de certos limites tabelados e a densidade de energia sonora uniformemente distribuída dentro do volume da sala. De igual forma, especifica percentagens limites de absorção por banda de frequência, além de outros aspectos tais como: dimensões da sala e da fonte, nível de ruído de fundo, temperatura e umidade ambiente, separação de meio comprimento de onda do microfone, das paredes e da fonte.

Desde a época dos primeiros experimentos de Sabine em Acústica Arquitetônica, a câmara reverberante tem sido uma importante ferramenta acústica, utilizada em medições de: potência sonora de máquinas e alto-falantes, coeficiente de absorção de materiais, perda de transmissão de estruturas de edifícios; recentemente começaram a ser utilizadas grandes câmaras em testes de ruído de alta intensidade, estudo de jatos e muitos outros.

Todas as aplicações exigem boa difusibilidade do campo reverberante, o qual deve cumprir certas condições gerais:

- ter amortecimento pequeno;
- densidade modal alta;
- boa distribuição dos modos acústicos;
- todos os modos serem excitados com igual amplitude.

Cabe lembrar, que um campo sonoro é considerado difuso ou perfeitamente reverberante quando em cada ponto tem-se energia sonora uniformemente distribuída, proveniente de todas as direções com igual probabilidade, e as amplitudes e fases das ondas incidentes com variação aleatória.

Schrøder |20|, no ano de 1962, apresenta o seguinte critério para avaliar o campo difuso: se os picos de ressonância

estão mais próximos que a largura de banda de meia potência associada com cada um dos picos, as ressonâncias são menos evidentes. Se a média espacial da largura de banda de meia potência do pico é igual ou menor que  $1/3$  da largura de banda da ressonância, pode-se considerar que a partir de certa frequência,  $f_{Sch}$ , não é mais possível distinguir ressonâncias, isto é, acima desta frequência o campo pode ser considerado difuso.

B. van Zyl et al. [21] considera de fundamental importância a análise da difusibilidade do campo sonoro e conclui ser surpreendente que ainda hoje, métodos e técnicas mais eficientes sejam virtualmente inexistentes, pois geralmente se acaba inspecionando o campo sonoro com o método convencional.

Continuando com esta análise, um campo sonoro consiste, em geral, de uma parte ativa e outra reativa, onde o campo livre se define como ativo e o campo idealmente difuso como reativo.

Segundo Gade [8,9], num campo sonoro perfeitamente difuso, onde não existe gradiente de amplitude de pressão nem de fase, pode-se considerar que em todos os pontos a amplitude da pressão é a mesma e a velocidade de partícula média é zero. Toda a energia acústica está estacionária e armazenada nesse campo, como é o caso de uma boa câmara reverberante nas altas frequências onde não existe propagação de energia de um ponto para outro. Para este tipo de campo sonoro, o coeficiente de correlação entre pressão sonora e velocidade de partícula é baixo, perto de zero.

Gade [9] também descreve que em um campo livre ou ativo, a pressão e a velocidade de partícula estão em fase; toda a energia acústica propaga-se de um ponto para outro. Neste caso, existe correlação entre a pressão acústica e a velocidade de partícula.

Para o caso particular de uma onda plana em campo livre, segundo Gade [8], existe gradiente de fase entre pressão sonora e velocidade de partícula mas não existe gradiente de amplitude de pressão, obviamente toda a energia propaga-se de um ponto para outro. Gade [9] discute ainda que, no caso da onda estacionária - campo sonoro reativo puro, a pressão sonora e a velocidade de partícula estão  $90^\circ$  fora de fase. Nesta situação existe gradiente de amplitude de pressão porém não existe gradiente de fase, toda a energia flutua entre as fontes e o meio; existe sim, correlação entre pressão sonora e velocidade de partícula.

Cabe mencionar e tomar cuidado, que existem pontos singulares num campo sonoro, onde o que foi exposto acima não pode ser aplicado. Por exemplo, num campo sonoro reativo puro como o caso de uma onda estacionária ideal, no ponto de pressão máxima a velocidade de partícula é igual a zero o que implica ter um campo de pressão puro; caso análogo é o ponto de máxima velocidade de partícula na onda estacionária, onde obviamente a pressão é zero e tem-se um campo de velocidade puro.

Portanto, considerando o exposto, a correlação entre pressão sonora "P" e a velocidade de partícula "U" pode ser usada para qualificar e quantificar as características acústicas de um campo sonoro.

## 1.2 Objetivo da pesquisa

Apresenta-se a seguir um método que tem como objetivo quantificar a difusibilidade de um campo acústico através da estimativa da função coerência entre a pressão sonora e a velocidade de

partícula, usando dois microfones próximos e um analisador FFT de dois canais.

A função coerência  $\gamma^2$ , assume valores entre 0 e 1. Se  $\gamma^2$  é igual a 1, pode-se afirmar que os sinais analisados estão altamente correlacionados; de outra forma, se  $\gamma^2=0$  os sinais não tem correlação entre si. Se  $\gamma^2$  está entre 0 e 1 define-se um grau de maior ou menor correlação.

Portanto, se os sinais correspondentes à pressão sonora e à velocidade de partícula estão altamente correlacionados, como ocorre em campo puramente ativo ou campo livre, também com ondas planas propagadas em campo livre e onda estacionária, a função de coerência terá valor unitário,  $\gamma^2=1$ .

Num campo sonoro perfeitamente difuso onde os parâmetros analisados não estão correlacionados a função de coerência terá valor  $\gamma^2=0$ .

Se o campo é semi-difuso a coerência terá valores entre zero e um.

Devem ser destacadas algumas vantagens deste método em relação ao normalizado.

Uma primeira vantagem é a possibilidade de se obter uma curva praticamente contínua na frequência, do coeficiente de coerência utilizado na medição do campo acústico. A discretização dos sinais implica numa alta resolução, da ordem de alguns Hz, isto permite conhecer o campo sonoro em toda a faixa de frequências escolhida.

Por outra parte, destaca-se a grande rapidez do método digital que permite realizar medições com um grande número de médias, em instantes e para toda a faixa de frequências selecionadas.

Precisa-se somente de um número entre 0 e 1 para identificar o campo acústico.

Outra vantagem é a obtenção de curvas de grande precisão, no domínio da frequência, que representam a característica do campo acústico nesse ponto de medição.

Finalmente, considerando o que foi exposto por van Zyl [21] e outros autores no sentido de ressaltar a importância da análise da difusibilidade de campos acústicos, e tomando também em consideração a demanda de tempo e dedicação que uma pesquisa abrangente neste assunto impõe, este trabalho se concentrará no estudo, análise e medição da difusibilidade de campos acústicos reverberantes.

### **1.3 Conteúdo do trabalho**

No Capítulo 1 - Apresenta-se a introdução, revisão bibliográfica e aspectos fundamentais deste estudo.

No Capítulo 2 - Apresenta-se a formulação matemática relacionada com a técnica de dois microfones e a estimativa da função coerência.

No Capítulo 3 - Realiza-se uma descrição do sistema utilizado, de seus ajustes e verificação mediante a medição da diferença de fase da cadeia de instrumentação.

No Capítulo 4 - Apresenta-se um estudo das características acústicas de uma câmara de grande tamanho e de outra pequena. Realizaram-se suas qualificações utilizando métodos normalizados.

No Capítulo 5 - Analisa-se duas câmaras reverberantes, grande e pequena, utilizando o método aqui desenvolvido com a técnica

de dois microfones. São apresentados e analisados os resultados obtidos nas medições.

O Capítulo 6 apresenta um estudo de erros sistemáticos presentes nas medições ao usar a técnica de dois microfones e a estimativa da função coerência. É estudada a influência de cada um desses erros e as considerações e métodos para minimizá-los. Finalmente, apresentam-se as conclusões gerais.

## CAPÍTULO 2

### FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos matemáticos dos aspectos principais que dão corpo a esta pesquisa: a técnica de dois microfones e a estimativa da função coerência.

#### 2.1 Técnica dos dois microfones

Considere-se um par de microfones exposto a uma onda incidente de frequência  $\omega$ , número de onda  $K$  e velocidade de onda  $c = \frac{\omega}{K}$ .

A pressão sonora captada por cada microfone num ponto do campo acústico, é dada por:

$$P(t, \omega, r, \theta, \psi) \quad (2.1)$$

onde a pressão sonora varia com o tempo, a frequência e as coordenadas, ver figura 2.1.

Chung [6] considerou que a pressão acústica resultante, no ponto central entre os dois microfones, é dada pela seguinte aproximação:

$$p(t) \approx 1/2(p_1(t) + p_2(t)) \quad (2.2)$$

onde  $p_1(t)$  e  $p_2(t)$  são as pressões dos microfones 1 e 2 no domínio do tempo.

Aplicando a Transformada de Fourier em  $p(t)$ , tem-se:

$$P(f) \approx 1/2(P_1(f) + P_2(f)) \quad (2.3)$$

onde  $P_1(f)$  e  $P_2(f)$  são as pressões dos microfones 1 e 2 no domínio da frequência.

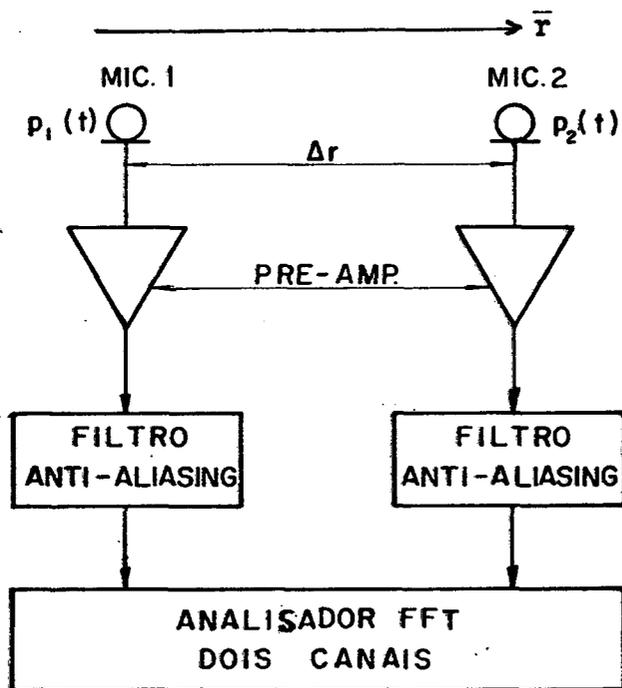


Fig. 2.1 - Esquema do sistema de medição

A velocidade de partícula é difícil de ser medida diretamente, por isto se utiliza um método indireto. O método, com o qual é possível medir o gradiente de pressão com dois microfones próximos, se baseia na equação de Euler:

$$\rho \frac{\partial u_{\vec{r}}}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (2.4)$$

onde:  $\rho$  é a densidade do ar, e  $u_{\vec{r}}$  é o vetor velocidade de partícula na direção  $r$ .

Nesta equação de Euler, que essencialmente é a segunda lei de Newton aplicada a fluidos, pode-se inferir que, como o gradiente de pressão é proporcional à aceleração de partícula, a velocidade de partícula pode ser obtida integrando o gradiente de pressão com relação ao tempo:

$$u_{\vec{r}} = - \frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial r} dt \quad (2.5)$$

Chung [6] afirma que, para estimar a velocidade de partícula, o gradiente de pressão pode ser obtido das pressões  $p_1(t)$  e  $p_2(t)$ , considerados dois microfones idênticos e próximos, através da seguinte aproximação por diferenças finitas.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} (\Delta p / \Delta r) \approx \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\Delta r} \quad (2.6)$$

onde  $\Delta r$  é a distância que separa os centros acústicos dos microfones. Em consequência, a velocidade de partícula na direção  $\vec{r}$  será:

$$u_{\vec{r}} \approx - \frac{1}{\rho \Delta r} \int [p_2(t) - p_1(t)] dt \quad (2.7)$$

Esta aproximação é válida se  $\Delta r \ll \lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, e para dois microfones próximos  $\Delta r$  entre si na direção  $\vec{r}$ , tal que  $K \Delta r \ll 1$ , onde  $K$  é o número de onda.

Para sinais harmônicos onde  $p = p(r)e^{i\omega t}$  e aplicando

a transformada de Fourier na equação 2.7 tem-se:

$$U(f) \approx \frac{-1}{i\omega\rho\Delta r} \left[ p_2(f) - p_1(f) \right] \quad (2.8)$$

onde  $p_1(f)$  e  $p_2(f)$  são as pressões acústicas correspondentes a sinais captados pelos microfones 1 e 2, no domínio da frequência.

### 2.3 Definição de Função Coerência

O autoespectro da pressão sonora captada pelos dois microfones é definida como:

$$G_{pp} = E \left[ P(f) \cdot P^*(f) \right] \quad (2.9)$$

onde: \* é o complexo conjugado,

$E[ ]$  é a estimativa ou valor esperado,

$P(f)$  é a pressão sonora no ponto médio entre os microfones, no domínio da frequência.

De modo análogo, o autoespectro da velocidade de partícula é:

$$G_{uu} = E \left[ U(f) \cdot U^*(f) \right] \quad (2.10)$$

onde:  $U(f)$  é a velocidade de partícula no domínio da frequência.

A densidade espectral cruzada entre a pressão sonora e a velocidade de partícula é:

$$G_{PU} = E \left[ P(f) \cdot U^*(f) \right] \quad (2.11)$$

Portanto, a estimativa da função de coerência entre a pressão sonora e a velocidade de partícula, usando dois microfones, próximos e um analisador FFT de dois canais, é definida pela seguinte expressão:

$$\hat{\gamma}_{pu}^2 = \frac{|G_{PU}|^2}{G_{PP} \cdot G_{UU}} \quad (2.12)$$

onde:  $\hat{\gamma}$  representa a estimativa ou valor esperado de  $\gamma^2$ ,  $0 \leq \hat{\gamma}^2 \leq 1$ .

Cabe-se destacar que tanto  $G_{PU}$ ,  $G_{PP}$ ,  $G_{UU}$  e  $\gamma_{pu}^2$  são funções do domínio da frequência, e são quantidades diretamente relacionadas com o fluxo de energia sonora num ponto do campo acústico.

A equação 2.12 é empregada para quantificar o campo difuso de duas câmaras reverberantes conforme relatado no item 1.2 deste trabalho.

### CAPÍTULO 3

#### SISTEMA DE MEDIÇÃO

=====

Neste capítulo, descreve-se o sistema de medição utilizado nesta pesquisa bem como seu ajuste e verificação, além dos programas de computação desenvolvidos e usados nas medições.

Para realizar as medições com a técnica de dois microfones, foi adquirido um conjunto com microfones casados com igual sensibilidade e diferença de fase pequena. Consiste num dispositivo sonda Brüel & Kjaer tipo 3519 com dois microfones tipo 4165 de meia polegada.

Os microfones são montados num suporte em arranjo "face a face" junto com os preamplificadores B&K 2633, este conjunto é ligado a uma fonte de polarização de microfones de dois canais tipo B&K 2807. O sistema de medição é completado com um Analisador Digital FFT de dois canais da Hewlett Packard 5451C, que possui filtro anti-aliasing.

Após a realização de vários testes e medições iniciais com o sistema, foram detectados problemas de contato elétrico nos conectores miniatura da sonda, trazendo instabilidade nas medições e diferenças de fase nos sinais.

Em consequência, os microfones e respectivos preamplificadores foram desmontados da sonda e usados em arranjo "lado a lado" com o que conseguiu-se uma excelente resposta, verificada continuamente com as medições de diferença de fase, descritas a seguir.

### 3.1 Medição da diferença de fase da cadeia de instrumentação

Na medição da diferença de fase deve-se garantir que os sinais de pressão sonora captados pelas duas membranas dos microfones, antes de passarem pela cadeia de instrumentação, estejam em fase na faixa de frequência de interesse.

Para conseguir isto, os microfones foram montados dentro de um tubo uniforme de seção transversal circular e de paredes rígidas, a igual distância do altofalante, ver figura 3.1.

A frequência de corte do tubo é dada por:

$$f_c = \frac{1,84 \cdot c}{\pi d} \quad (3.1)$$

onde  $c$  é a velocidade do som no ar e  $d$  o diâmetro interno do tubo. Abaixo desta frequência de corte, somente se propagam ondas planas, condição fundamental para que as membranas dos microfones sejam excitadas por sinais em fase.

A fase será determinada usando o programa Função de Transferência do computador HP5451C.

A Função de Transferência  $H(f)$  relaciona a Excitação e a Resposta de um sistema linear, da forma seguinte:

$$H(f) = \frac{R(f)}{E(f)} \quad (3.2)$$

onde  $R(f)$  e  $E(f)$  são a resposta e excitação do sistema.

Considerando que:

$$\begin{aligned} E(f) &= P_1(f) \\ R(f) &= P_2(f) \end{aligned} \quad (3.3)$$

então:

$$H(f) = \frac{P_2(f)}{P_1(f)} \quad (3.4)$$

Como  $P_1(f)$  e  $P_2(f)$  são grandezas complexas, tem-se:

$$\begin{aligned} P_1(f) &= |P_1(f)| \cdot e^{i(\phi + \phi_1)} \\ P_2(f) &= |P_2(f)| \cdot e^{i(\phi + \phi_2)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde  $\phi_1$  e  $\phi_2$  são as diferenças de fase dos canais 1 e 2 respectivamente.

Portanto, substituindo:

$$H(f) = \left| \frac{P_2(f)}{P_1(f)} \right| \cdot e^{i(\phi_2 - \phi_1)} \quad (3.6)$$

onde  $\left| \frac{P_2(f)}{P_1(f)} \right|$  é o Fator de Ganho do sistema. E  $(\phi_2 - \phi_1)$  é a Diferença de Fase entre os canais 1 e 2.

### 3.2 Procedimento experimental e resultados

Primeiramente, procedeu-se à verificação e a calibração de cada um dos instrumentos da cadeia, antes de medir a fase dos microfones.

A fonte de polarização dos dois microfones, B&K 2807, foi ajustada para obter igual amplitude nos sinais dos microfones 1 e 2; ou seja, 0 dB no Fator de Ganho entre os dois canais da cadeia de

instrumentação. Neste ajuste precisa-se tomar cuidado, pois a técnica de dois microfones é altamente sensível à diferença de fase; portanto foram utilizados um osciloscópio e dois voltímetros eletrônicos calibrados, para obter a melhor precisão possível.

Com o sistema de medição de fase ilustrado na figura 3.1, foi feita primeiramente a medição do ruído de fundo dentro do tubo, captado por um dos microfones. O espectro de pressão sonora do ruído de fundo permitirá, nas medições da diferença de fase, verificar a relação sinal-ruído, uma questão fundamental em toda medição. O espectro de pressão do ruído de fundo é mostrado na figura 3.2.

O tubo utilizado, B&K 4002, possui 3cm de diâmetro interno, portanto sua frequência de corte é 6696,4 Hz, o que nos garante onda plana e uma boa resposta até 5KHz, que será a frequência superior de interesse adotada.

Os microfones de 1/2 polegada de diâmetro foram montados numa tampa de madeira instalada no extremo do tubo. As membranas dos microfones estão voltadas para o altofalante e a igual distância deste.

Com o conjunto: gerador de sinal, amplificador de potência e altofalante é gerado ruído branco de banda larga na faixa de 2Hz a 20KHz linear. Os espectros de pressão sonora, captados na cavidade cilíndrica pelos microfones 1 e 2, são mostrados nas figuras 3.3 e 3.4 respectivamente.

Os espectros de pressão do ruído de fundo e do sinal foram medidos selecionando no computador: 4096 pontos de digitalização, 5KHz na frequência de corte do filtro anti-aliasing e 100 médias, portanto, a discretização de frequência é  $\Delta f=4,8\text{Hz}$ .

Os nós que aparecem nos espectros de pressão do sinal nas

frequências de 2886, 3423 e 3912 Hz, das ondas estacionárias dentro da cavidade cilíndrica, correspondem à posição do microfone. Ao mudar esta posição mudam as frequências correspondentes a estes nós, fato que verificou-se quando os microfones foram colocados a 7cm da tampa de madeira dentro do tubo e obteve-se o espectro mostrado na figura 3.5.

Aplicou-se finalmente o programa de Função Transferência para medir o Fator de Ganho e a diferença da fase dos microfones, as que são mostradas nas figuras 3.6 e 3.7 respectivamente.

Os nós analisados fizeram com que o nível do fator de ganho caísse, como se verifica na figura 3.6.

Comprovou-se que a diferença de fase da cadeia de instrumentação é inferior a 1 grau em toda a faixa de frequências de interesse.

A fase do sistema, incluindo microfones, foi continuamente verificada para cada conjunto de medições da coerência, a fim de dar segurança e total certeza nessas medições, pois o sistema é muito sensível ao ruído elétrico e mau contato de conectores.

Conclui-se que não foi necessário usar métodos especiais, tais como os apresentados por Chung [6] e Krishnappa [14] para compensar diferenças de fase dos microfones e demais instrumentos da cadeia de instrumentação, pois a diferença de fase medida resulta ser praticamente zero, na faixa de frequência usada.

Foi possível verificar a conclusão de Krishnappa [14] no sentido de que os erros por diferença de fase e ganho podem ser eliminados com uma cuidadosa calibração do sistema.

### 3.3 Seleção do espaçamento dos microfones, $\Delta r$

O espaçamento dos microfones  $\Delta r$  é um parâmetro muito importante o qual deve ser cuidadosamente escolhido. Este participa nas limitações do sistema tanto em medições de baixa como em alta frequência.

Os erros de diferença de fase, com a técnica de dois microfones, são críticos em baixas frequências, quando são usados pequenos espaçamentos de microfones.

Por outra parte, o principal erro sistemático desta técnica é o devido à aproximação do gradiente de pressão por uma diferença finita de pressões no cálculo da velocidade de partícula, como se mostra nas equações 2.6 e 2.7. Esta aproximação é válida se  $\Delta r$  é muito menor que o comprimento de onda, e  $K\Delta r \ll 1$ . Isto significa que o erro é mais severo em altas frequências onde o comprimento da onda sonora se aproxima do espaçamento entre os microfones.

Para microfones montados em arranjo "lado a lado", a mínima distância entre os centros acústicos dos microfones de 1/2 polegada é de aproximadamente 12mm. Segundo o fabricante, este valor de  $\Delta r$  permite medições com precisão de  $\pm 1$ dB, em medições de intensidade acústica, na faixa de frequências de 125 até 5000Hz. Ao aumentar o  $\Delta r$  a frequência de corte superior ~~diminui~~ de forma considerável.

Portanto, para microfones de 1/2 polegada foi escolhido o  $\Delta r$  de 12mm, considerando que 5000Hz é uma frequência de corte superior razoável e, para fins práticos, suficiente para analisar campos acústicos reverberantes.

### 3.4 Discretização no domínio da frequência

Uma vez escolhida a frequência superior de análise do sinal proveniente dos microfones, e antes de ser processada pelo analisador HP 5451C, esta deverá ser selecionada no filtro passa-baixa denominado "filtro anti-aliasing" a fim de evitar este efeito no processamento do sinal.

Logo o conversor analógico digital é ajustado no dobro da frequência do filtro, na frequência máxima de 10KHz, com o qual fica definida a frequência de amostragem em 20.000 amostras por segundo, o que garante um mínimo de 4 amostras em cada comprimento de onda do sinal analisado.

Na discretização do sinal no domínio da frequência, o intervalo de frequências  $\Delta f$  será, uma vez escolhida a frequência de amostragem, função do número total de pontos de discretização. Este parâmetro é selecionado no analisador digital HP 5451C, podendo-se processar o sinal com 64 pontos ou múltiplos até 4096 pontos.

O valor de  $\Delta f$  é calculado dividindo a frequência de amostragem pelo número total de pontos.

### 3.5 Programa para o cálculo do coeficiente de coerência

$$\gamma_{pu}^2$$

Foi desenvolvido um programa para o computador HP5451C, que calcula a pressão sonora e a velocidade de partícula no domínio da frequência, baseado nas equações 2.3 e 2.8. Calcula em seguida os autoespectros e espectro cruzado entre a pressão sonora

e velocidade de partícula baseado nas equações 2.9 , 2.10 e 2.11 para finalmente, obter a estimativa da função de coerência  $\gamma_{pu}^2$  entre a pressão sonora e a velocidade de partícula.

O programa completo é apresentado no anexo 1.

Este programa  $\gamma_{pu}^2$  foi testado primeiramente usando sinais simulados no computador, para o qual foram usados geradores de ruído branco nas entradas do filtro anti-aliasing, simulando os sinais de dois microfones.

Para simular sinais coerentes foi ligado só um gerador com ruído branco nas duas entradas do analisador, carregado com o programa  $\gamma_{pu}^2$ , obtendo-se coerência aproximadamente 1 em toda a faixa de frequências testada. De forma análoga, procede-se a ligação de um gerador de ruído branco independente em cada entrada do analisador, tentando simular entrada de sinal incoerente, e rodando o programa, obteve-se o valor de coerência aproximadamente igual a zero.

Feitos estes testes, o programa ficou pronto para ser usado com sinais acústicos, tais como os provenientes de dois microfones. Os resultados destes testes são mostrados nas fig. 3.8 e 3.9.

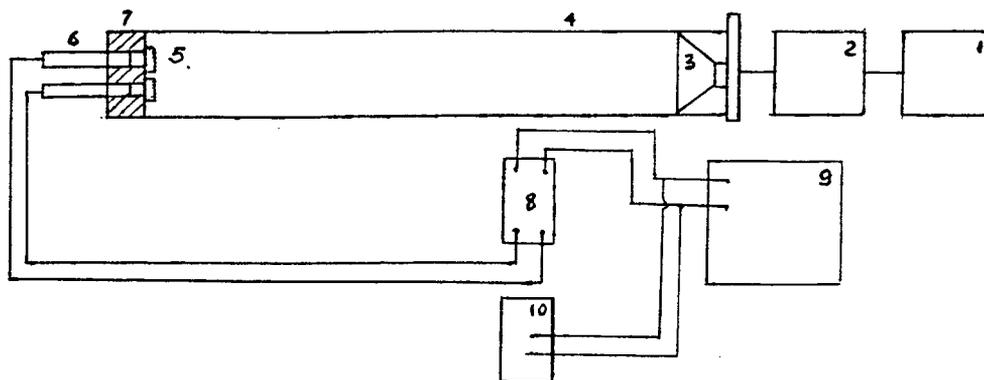


Fig. 3.1 - Esquema de medição da diferença de fase dos canais da cadeia de instrumentação

1. Gerador seno-aleatório B&K 1027
2. Amplificador de potência B&K 2706
3. Alto-falante
4. Tubo de onda estacionária B&K 4002, diâmetro interno 3cm.
5. Microfone 1/2" (dois) B&K 4165
6. Preamplificador de microfones B&K 2633
7. Tampa de madeira, terminação rígida
8. Fonte de polarização de dois canais B&K 2807
9. Analisador FFT de dois canais, HP 5451C
10. Osciloscópio de dois canais ou voltímetros eletrônicos

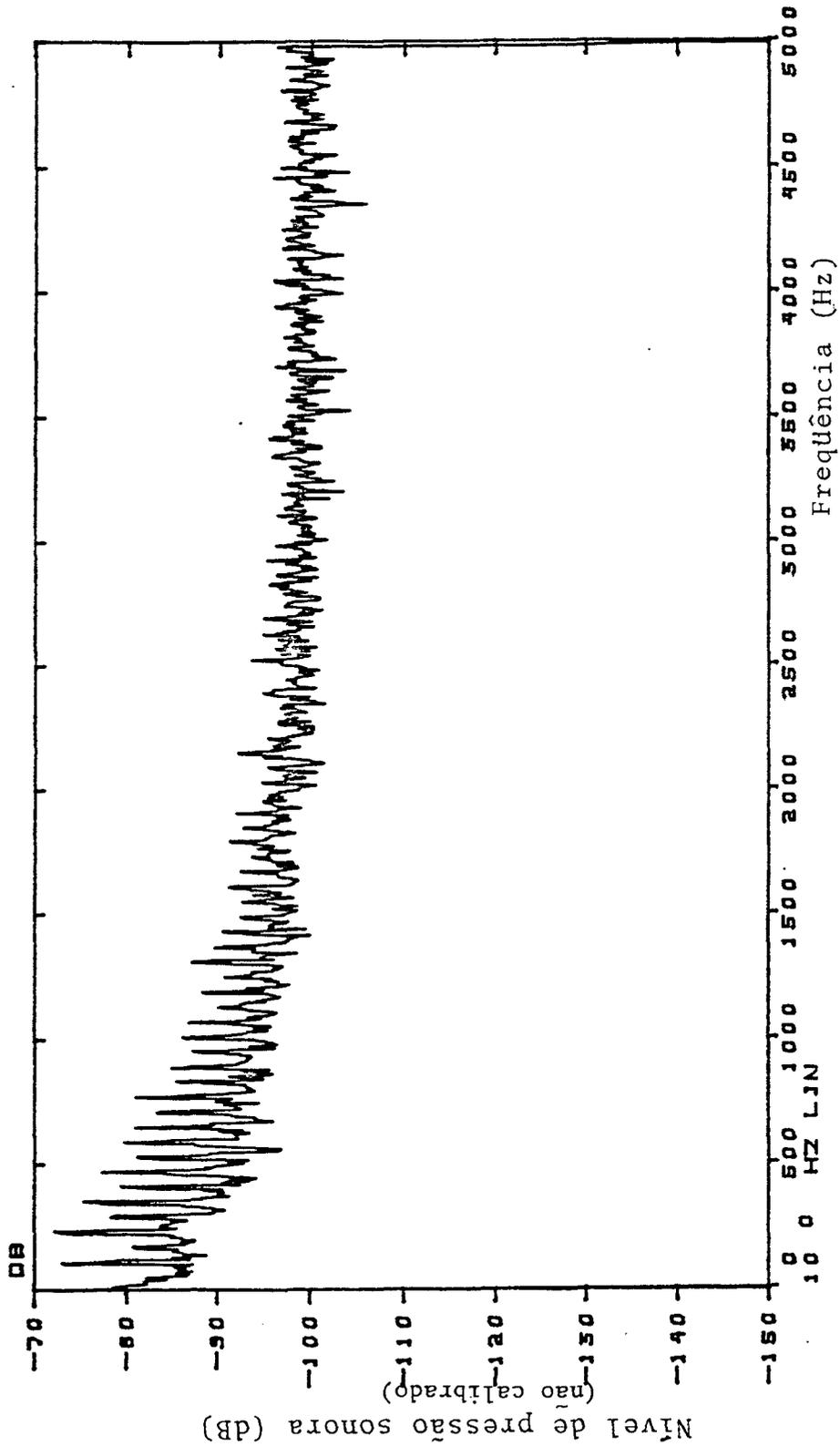


Figura 3.2 - Espectro de pressão do ruído de fundo no interior do tubo de ondas estacionárias.

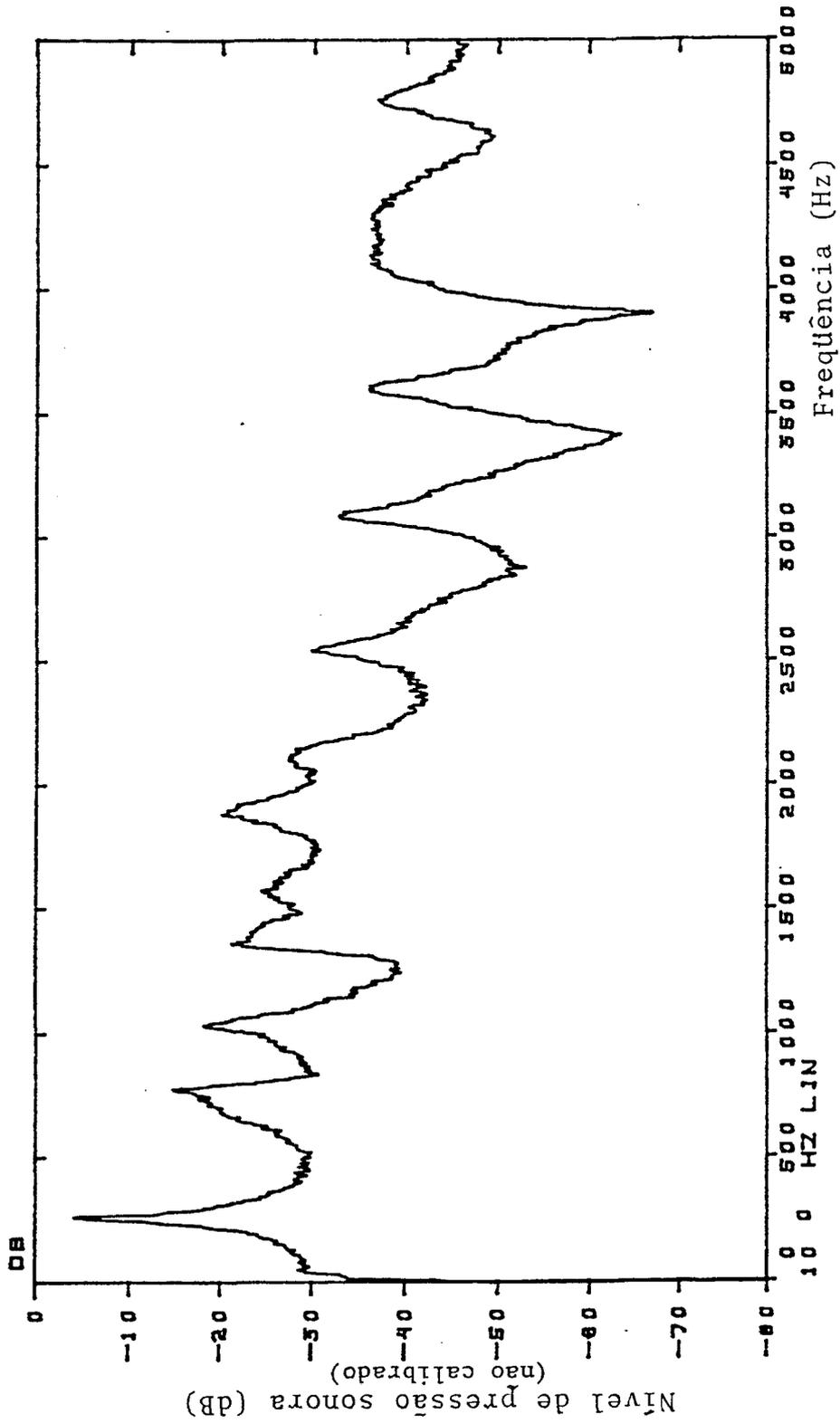


Figura 3.3 - Espectro de pressão sonora no interior do tubo de ondas estacionárias, microfone 1.

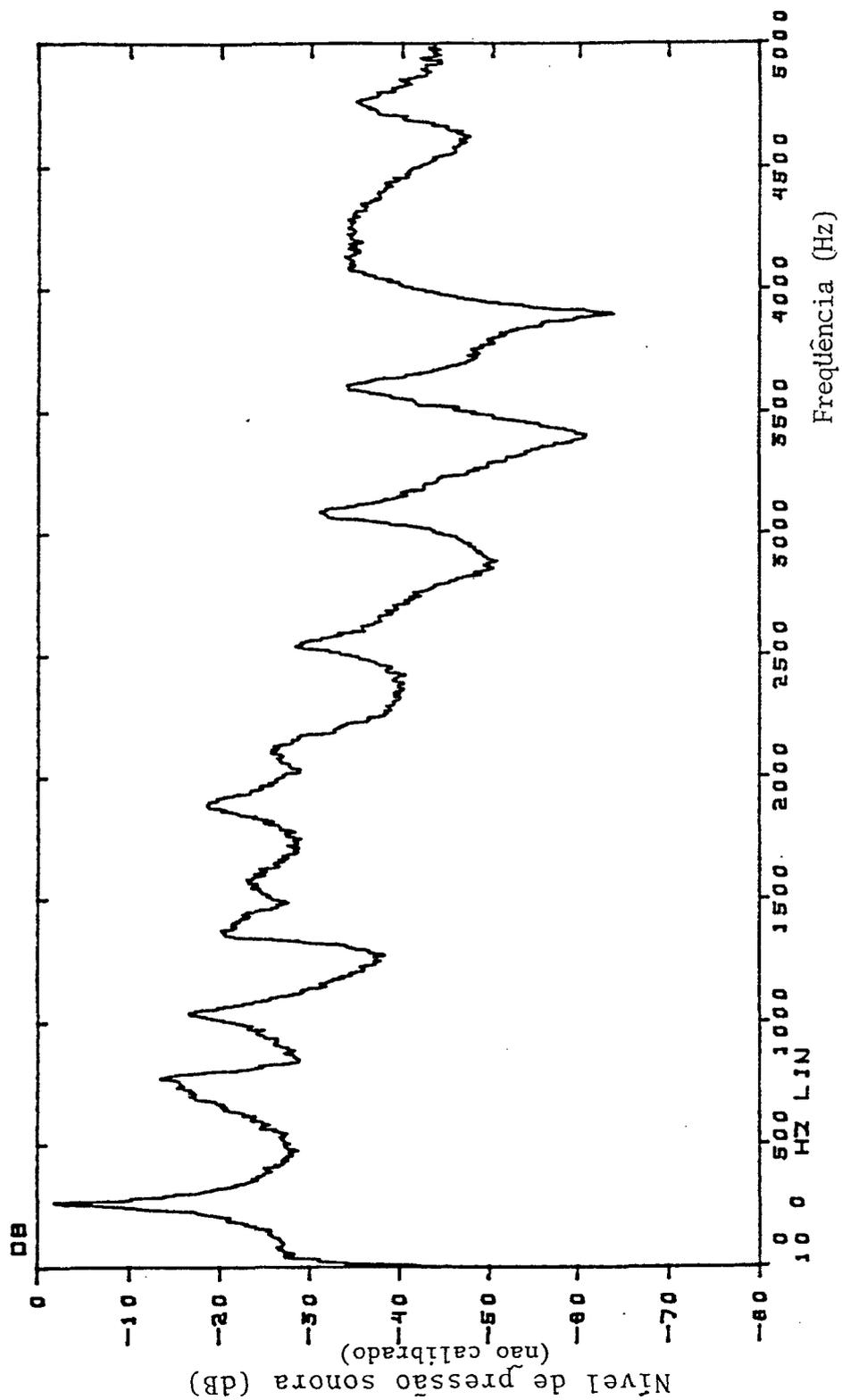


Figura 3.4 - Espectro de pressão sonora no interior do tubo de ondas estacionárias, microfone 2.

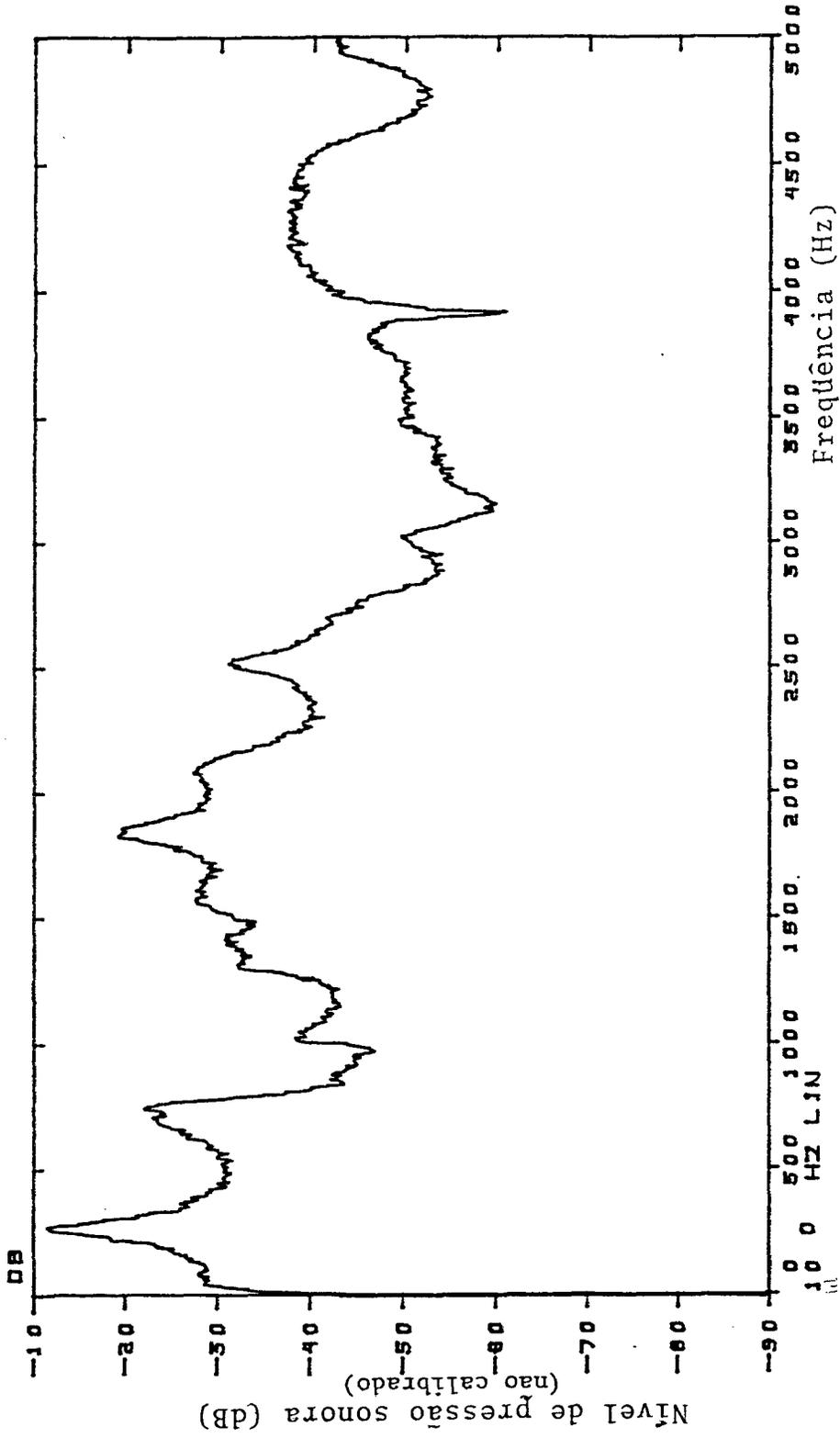


Figura 3.5 - Espectro de pressão sonora no interior do tubo de ondas estacionárias, com microfones colocados a 7cm da tampa.

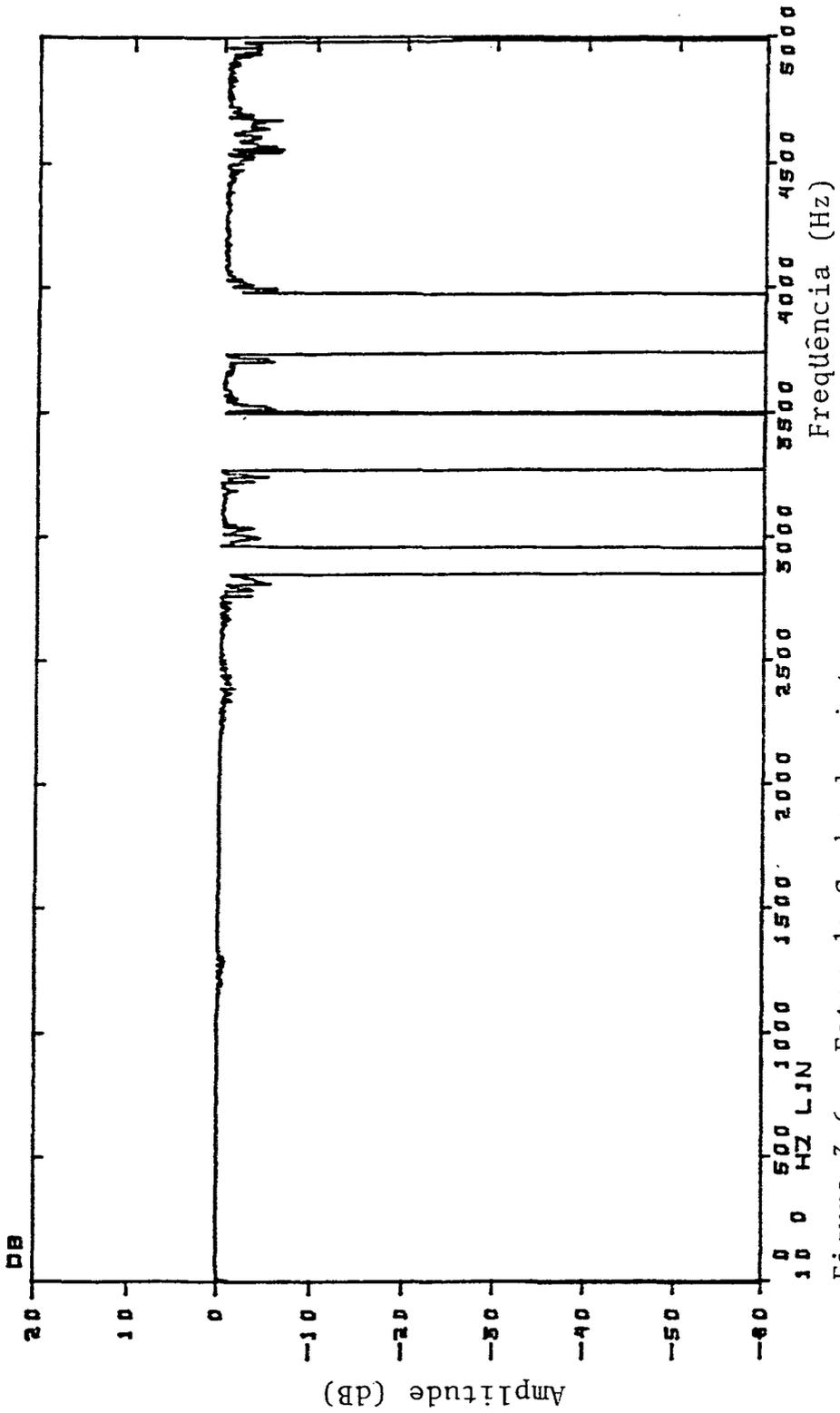


Figura 3.6 - Fator de Ganho do sistema

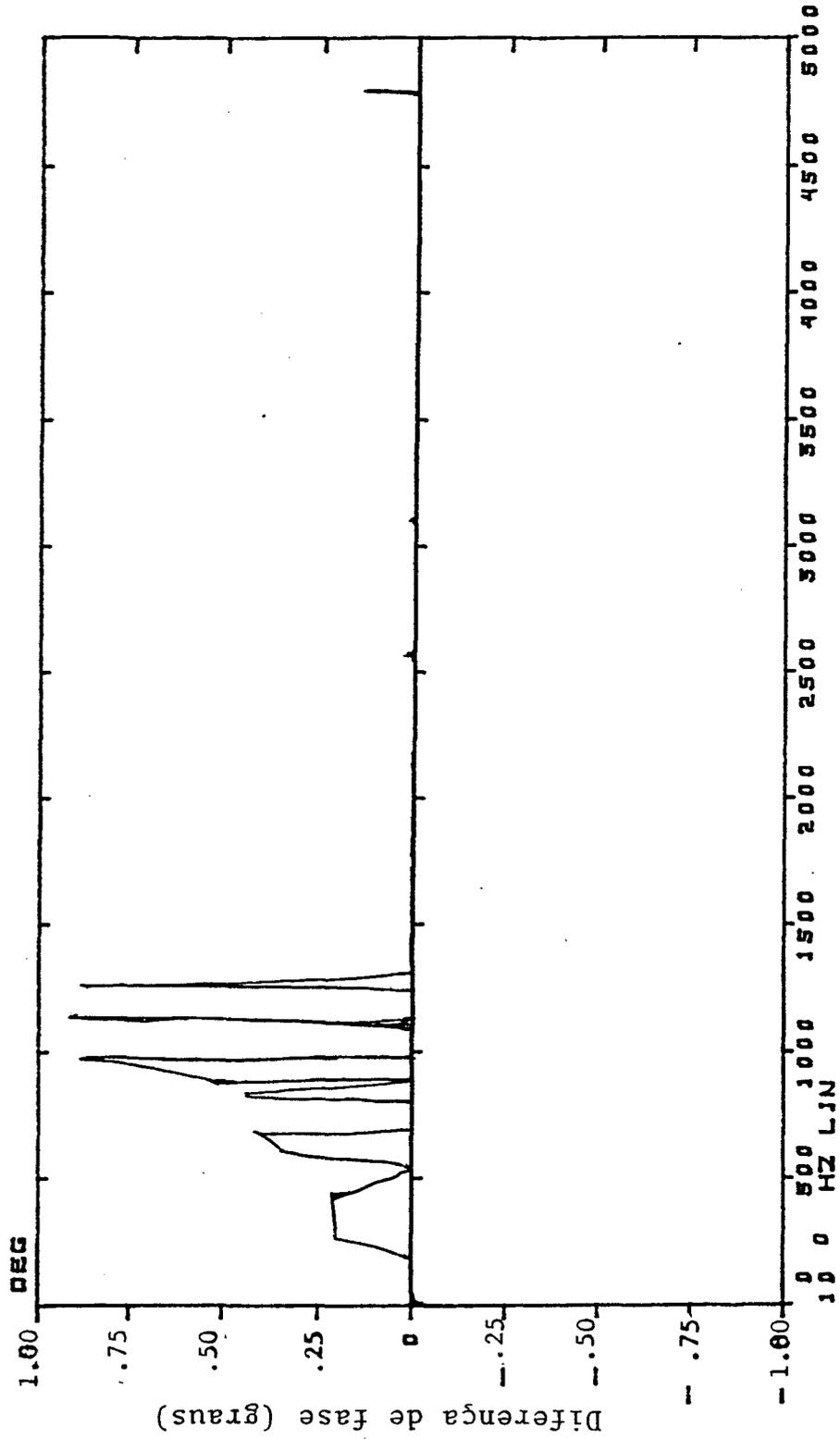


Figura 3.7 - Diferença de Fase da cadeia de instrumentação

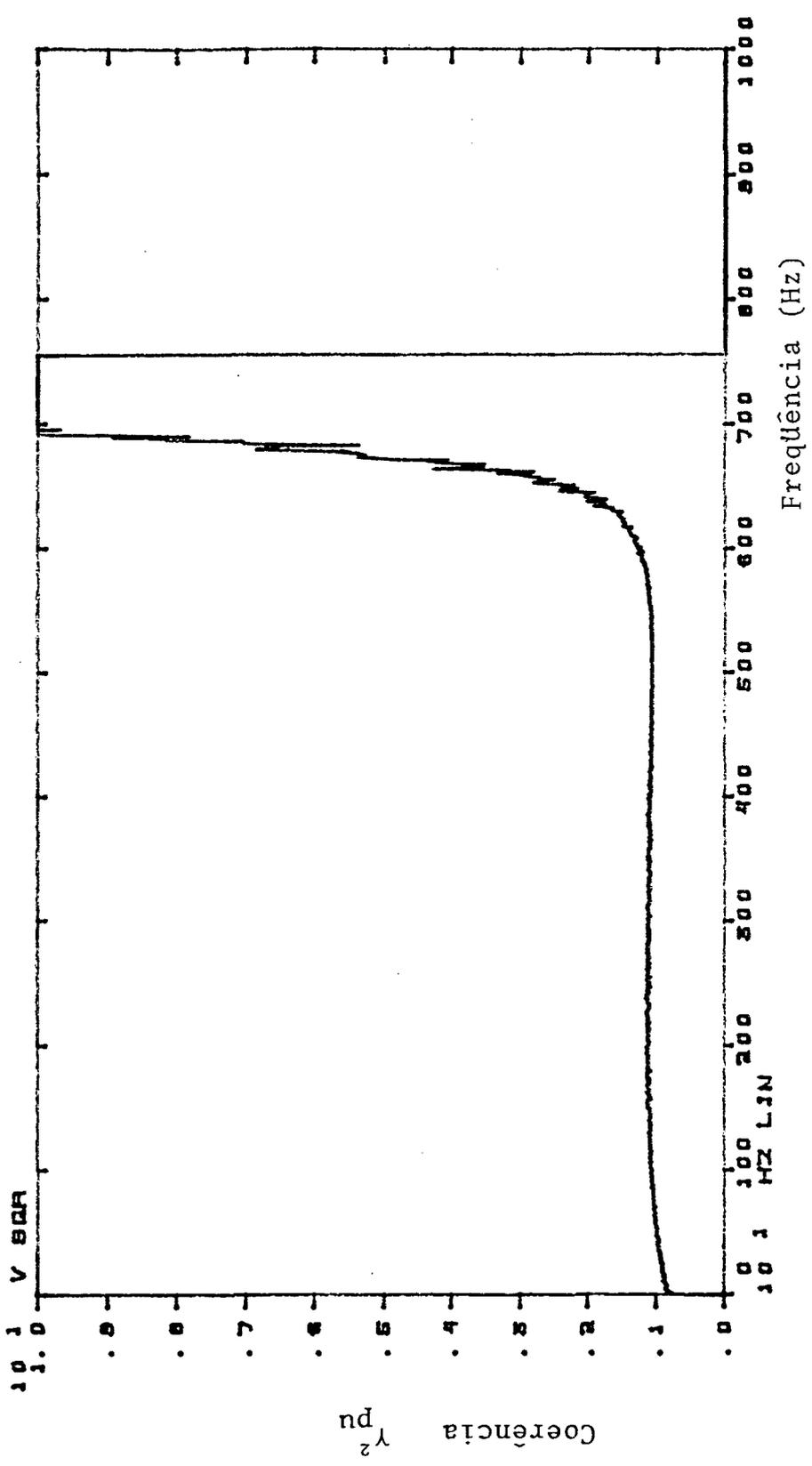


Figura 3.8 - Teste do programa  $\gamma_{pu}^2$  com um gerador de ruído branco às duas entradas do analisador FFT

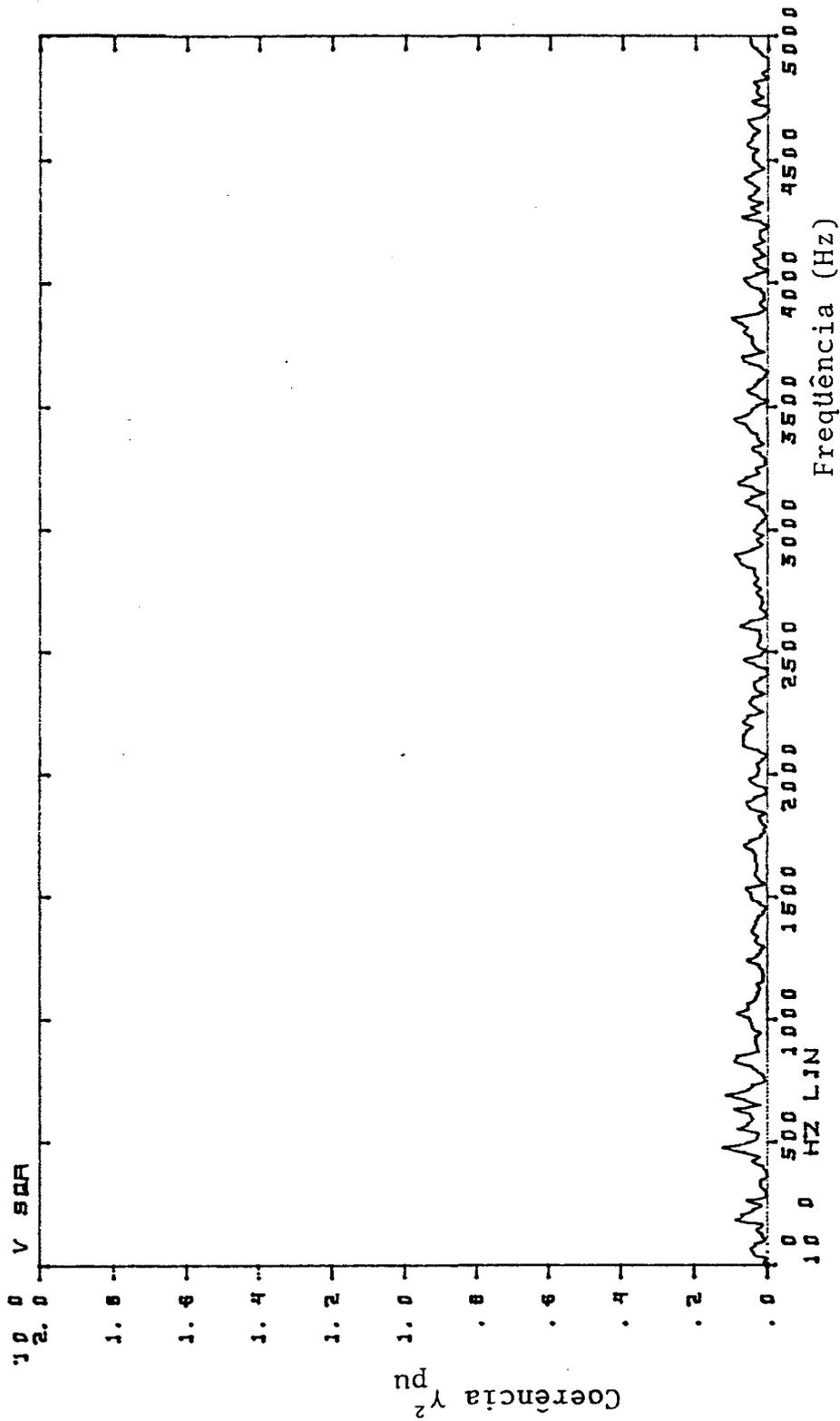


Figura 3.9 - Teste do programa  $\gamma^2$  com dois geradores de ruído branco, cada um ligado a uma entrada do analisador FFT

## CAPÍTULO 4

=====

### QUALIFICAÇÃO NORMALIZADA DE CÂMARAS REVERBERANTES

=====

#### 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, será feito um estudo das características acústicas do campo sonoro de duas câmaras acústicas reverberantes que pertencem ao Laboratório de Vibrações e Acústica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, e suas qualificações usando métodos normalizados.

Estas câmaras, uma grande e outra pequena, embora não cumpram com todas as exigências da norma ISO 3741 [12], são usadas atualmente em testes acústicos e em pesquisa, portanto sua qualificação é importante.

#### 4.2 Norma ISO 3741

Esta norma estabelece na qualificação de câmaras reverberantes, que a estimativa do desvio padrão da variação espacial dos níveis de pressão sonora dentro da câmara, excitada com ruído branco de banda larga, devem estar abaixo de certos valores máximos aceitáveis dados na tabela 4.1

Tabela 4.1 - Valores máximos do desvio padrão

Frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava, Hz	100   160	200   630	800   1500	3.15K   10K
Desvio padrão, dB	1.5	1.0	0.5	1.0

O cálculo do desvio padrão tem por objetivo avaliar os efeitos cumulativos das incertezas nas medições dos níveis de pressão sonora (NPS), devido à formação de ondas estacionárias no interior da câmara, considerando o número de posições dos microfones e as posições da fonte sonora.

O nível de pressão sonora (NPS) é uma grandeza física que varia com a distância entre o ponto de medida e a fonte sonora; também depende da orientação, diretividade da fonte e da característica do meio acústico onde a fonte está instalada.

É sabido que as sucessivas reflexões, produzidas pelas ondas incidentes sobre as paredes da sala, formam ondas estacionárias nas frequências de excitação. Devido a estas ondas estacionárias, o valor da pressão sonora quadrática varia aleatoriamente de ponto a ponto em uma sala reverberante. Ao ser colocado um microfone em vários pontos dentro da câmara, os valores medidos da pressão sonora quadrática variam em torno de um valor médio. É necessário quantificar este valor médio e a grandeza desta variação que depende do número de modos excitados pela fonte sonora, da frequência e da posição da fonte dentro da câmara. Teoricamente, para conseguir um valor preciso do valor médio seria necessário fazer medidas em infinitos pontos dentro da sala, mas como isto é

impossível, as medições são feitas só na região central da câmara e afastadas da fonte.

Perto das paredes, arestas e cantos, a energia sonora tem uma grande variação. Por tal motivo, a norma estabelece que os microfones sejam afastados das paredes e colocados a uma distância mínima de  $\lambda/2$  (1,5m), considerando o  $\lambda$  para a menor frequência central da banda de interesse. Por este motivo, é que se acrescenta o termo de Waterhouse |23| nas medições de nível de potência sonora (NWS) a partir de medições de nível de pressão sonora (NPS).

É necessário nas medições dos NPS tomar algumas precauções, tais como: que os pontos das amostras sejam independentes e que estejam suficientemente afastados para que sejam descorrelacionados; também o tempo de integração do circuito RC do amplificador de medição deve ser apropriado na medição do NPS e considera-se 100 segundos um tempo suficiente; também deve ser observada uma distância mínima entre duas posições da fonte.

A média dos NPS, medidos por banda de frequências, para duas ou três posições da fonte sonora é obtida pela fórmula |12|:

$$\bar{L} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (10^{0,1L_{pi}}) \right] \quad (4.1)$$

onde  $L_{pi}$  = NPS medido para cada posição do microfone e fonte sonora, em cada banda de frequência.

$N$  = número de medições de NPS

O cálculo do desvio padrão da pressão sonora  $\sigma$ , por banda de frequência, é feito utilizando a seguinte fórmula normalizada |12|:

$$\sigma = (N-1)^{-1/2} \left[ \sum_{i=1}^N (L_{pi} - \bar{L})^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

### 4.3 Descrição geral da câmara reverberante grande (C.R.G.)

A câmara utilizada nas medições é de concreto armado com paredes de 30cm de espessura, com forma cúbica devido ao projeto original que era de câmara anecônica; seu volume interno é de  $405\text{m}^3$ , ver figura 4.1. A forma cúbica da câmara dificulta a formação de um bom campo difuso, permitindo ondas estacionárias que aumentam a diferença entre os valores máximos e mínimos da pressão sonora. Para diminuir este erro, uma parede foi coberta parcialmente com uma placa inclinada de madeira rígida, mudando a forma cúbica da câmara e reduzindo o volume para  $401,3\text{m}^3$ ; sua superfície interna total é de  $328,56\text{m}^2$ .

Para melhorar o campo difuso dentro da câmara, foram suspensos no teto 25 difusores estacionários de madeira em diferentes alturas. São placas de compensado com 4mm de espessura que foram encurvados diferentemente. É recomendável que as dimensões da placa sejam comparáveis com o comprimento de onda da frequência mais baixa de interesse e, a área total dos difusores de aproximadamente 10% da área total da câmara, com isto cada difusor tem aproximadamente  $1,3\text{m}^2$  [15].

A câmara conta além disto, com 5 absorvedores de baixa frequência para cumprir com exigências da norma [12] em relação à absorção da sala, que estabelece: que até 500Hz a absorção pode alcançar valores de 16% e acima de 500 Hz de 6%. Estes absorvedores foram feitos com placas finas de madeira com camadas de lã de rocha entre elas. Foram encostados nas paredes apoiados no piso da câmara e distribuídos nas quatro paredes. As dimensões dos absorvedores correspondem aproximadamente ao comprimento de onda das frequências mais baixas de interesse.

A norma ISO 3741 estabelece que a câmara deve ter um volu

me acima de  $200\text{m}^3$  para atingir o limite inferior de frequência de 125 Hz e conseguir maior uniformidade do campo sonoro, e um volume máximo de  $300\text{m}^3$  para evitar a influência da absorção do ar nas frequências acima de 3 KHz. Pode-se ver que esta câmara cumpre só com a exigência do volume mínimo.

A câmara está apoiada sobre isoladores de vibrações, para evitar este tipo de interferências nas medições, e é envolvida por uma outra câmara de alvenaria que permite um melhor isolamento a cústico.

Uma porta tripla de madeira de 30cm de espessura, feita de chapas de 3cm de espessura, com lã de vidro no interior, desliza sobre trilhos e fecha a entrada da câmara.

Uma sala próxima recebe os cabos dos transdutores e demais instrumentos de medição a serem colocados no seu interior; nesta se encontra o computador HP 5451C e demais instrumentos de controle, processamento e registro de sinais.

#### **4.4 Descrição geral da câmara reverberante pequena (C.R.P.)**

A câmara pequena foi feita de concreto armado com paredes paralelas de aproximadamente 5cm de espessura e montada sobre uma estrutura metálica parafusada.

Uma pequena entrada é fechada com uma porta de madeira aglomerada colada a uma lâmina de chumbo, para um melhor isolamento acústico; esta entrada permite a instalação dentro da câmara de pequenos dispositivos que serão submetidos a teste acústico.

As dimensões internas da câmara são:

- comprimento:  $L_x = 1,41\text{m}$

- largura:  $L_y = 1,16\text{m}$

- altura :  $L_z = 0,93\text{m}$

As razões  $\frac{L_y}{L_x} = 0,83$  e  $\frac{L_z}{L_x} = 0,65$  conforme o estabelecido pela norma [12].

superfície total interna:  $8,05\text{m}^2$

volume :  $1,52\text{m}^3$

#### 4.5 Medição do espectro de pressão sonora e do ruído de fundo

No interior da câmara reverberante grande foi instalada a fonte sonora B&K 4204, que gera ruído branco na faixa de frequências de 100 Hz até 10 KHz segundo o fabricante. O campo acústico foi captado pelos dois microfones e seus sinais enviados ao analisador digital FFT de dois canais. Para o processamento do sinal foram escolhidos 4096 pontos, 100 médias, primeiramente 5 KHz e logo 1,25 KHz como frequência de corte do filtro anti-aliasing, portanto a resolução de frequências foi de  $\Delta f = 4,88$  Hz e  $\Delta f = 1,22$  Hz respectivamente. Os espectros de pressão sonora da câmara reverberante grande são apresentados nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

De forma análoga, foi gerado o campo acústico na câmara reverberante pequena, usando a fonte sonora B&K 4205 com ruído branco na faixa de 100 Hz até 10 KHz segundo o fabricante. Na captação do sinal foram escolhidos vários pontos tentando medir o maior número de frequências de ressonância; para o processamento do sinal foi escolhido o  $\Delta f = 1,22$  Hz. Os espectros de pressão so

nora da câmara reverberante pequena são apresentados nas figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

Para este conjunto de medições de espectros de pressão sonora, realizou-se com o computador a medição das frequências de ressonâncias da câmara reverberante grande e da pequena. Estas frequências de ressonância medidas são apresentadas no anexo 4 junto com as frequências dos modos acústicos calculados por métodos teóricos, para cada câmara.

A fim de verificar o nível de ruído de fundo no interior das câmaras reverberantes, este foi continuamente medido e comparado com o NPS do campo acústico, para cada conjunto de medições. Constatou-se que o NPS se encontra pelo menos 20 dB acima do ruído de fundo, o que é suficiente para evitar a interferência do ruído de fundo no processamento do sinal.

Na câmara reverberante grande, o espectro de ruído de fundo foi obtido selecionando 1024 pontos de discretização, 100 médias e 5 KHz como frequência de corte do filtro; o espectro do ruído é apresentado na figura 4.5.

Para o caso da câmara reverberante pequena foram selecionados 4096 pontos, 100 médias e 5 KHz como frequência de corte do filtro, obtendo-se o espectro de ruído de fundo apresentado na figura 4.10.

#### **4.6 Tempo de reverberação e coeficiente de absorção das câmaras**

O tempo de reverberação  $T_{60}$  é sem dúvida um dos parâmetros importantes na avaliação do comportamento acústico de uma sala. É

definido como o tempo em que o nível de pressão sonora NPS decresce em 60 dB após o desligamento da fonte sonora dentro da sala e é determinado através do decaimento do NPS.

Na medição espacial do decaimento do NPS foram utilizadas seis posições de microfones e obtidos os valores médios de  $T_{60}$  por bandas de oitava.

Com os valores médios espaciais do tempo de reverberação, foi calculado o coeficiente de absorção  $\alpha$  da câmara reverberante grande, e usando a fórmula de Sabine obteve-se os valores mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Tempo de reverberação e coeficiente de absorção da câmara reverberante grande

Frequência (Hz)	$T_{60}$ (s)	$\alpha$ (%)
125	3,65	5,4
250	3,93	5,0
500	4,31	4,5
1000	4,45	4,4
2000	3,85	5,1
4000	2,76	7,1
8000	1,70	11,5
LINEAR	4,31	4,5

Pode ser observado que os valores de  $\alpha$  da câmara reverberante grande estão abaixo dos valores máximos aceitados na norma [12] até a frequência de 2 KHz, acima desta frequência observa-

se um crescente aumento do  $\alpha$  que supera os máximos normalizados, o qual deve-se ao grande volume de ar contido na câmara; resultados similares foram obtidos por Viana [22].

Para o caso da câmara reverberante pequena, foi utilizado igual método na obtenção do tempo de reverberação  $T_{60}$  e do coeficiente de absorção  $\alpha$ , os que são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tempo de reverberação e coeficiente de absorção da câmara reverberante pequena

Frequência (Hz)	$T_{60}$ (s)	$\alpha$ (%)
125	1,60	1,9
250	1,88	1,6
500	1,60	1,9
1000	1,30	2,3
2000	1,00	3,0
4000	0,80	3,8
8000	0,65	4,6
LINEAR	1,75	1,7

#### 4.7 Cálculo da frequência de Schröder

Segundo o critério apresentado por Schröder [20] um campo sonoro pode ser considerado difuso a partir de uma certa frequência calculada com a seguinte expressão:

$$f_{Sch} > 2000 \left[ \frac{T_{60}}{V} \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

onde  $T_{60}$  é o tempo de reverberação da câmara e  
 $V$  é o volume da câmara.

Portanto, para a câmara reverberante grande a frequência de Schröder é 198 Hz e para a câmara reverberante pequena  $f_{Sch} = 1622$  Hz.

#### 4.8 Qualificação normalizada da câmara reverberante grande e da pequena

A qualificação normalizada de câmaras reverberantes é representada principalmente pela estimativa do desvio padrão da variação espacial dos níveis de pressão sonora em função da frequência.

Considerando que a câmara reverberante grande foi qualificada por vários pesquisadores durante os últimos anos, apresentaram-se as duas mais recentes nas figuras 4.11 e 4.12 correspondentes às estimativas do desvio padrão obtidos por Sangoi [19] e por Viana [22] respectivamente, considerando que houve mudanças na câmara entre uma e outra estimativa.

A câmara reverberante pequena, embora não cumpra com as exigências da norma ISO 3741 para qualificar-se foi realizada a medição dos níveis espaciais da pressão sonora e o cálculo do desvio padrão em bandas de frequências de 1/3 de oitava, aplicando os procedimentos estabelecidos pela norma. O objetivo foi conhecer o comportamento acústico da câmara pequena e poder comparar este resultado, que se apresenta na figura 4.13, com o obtido nas medições feitas na câmara grande.

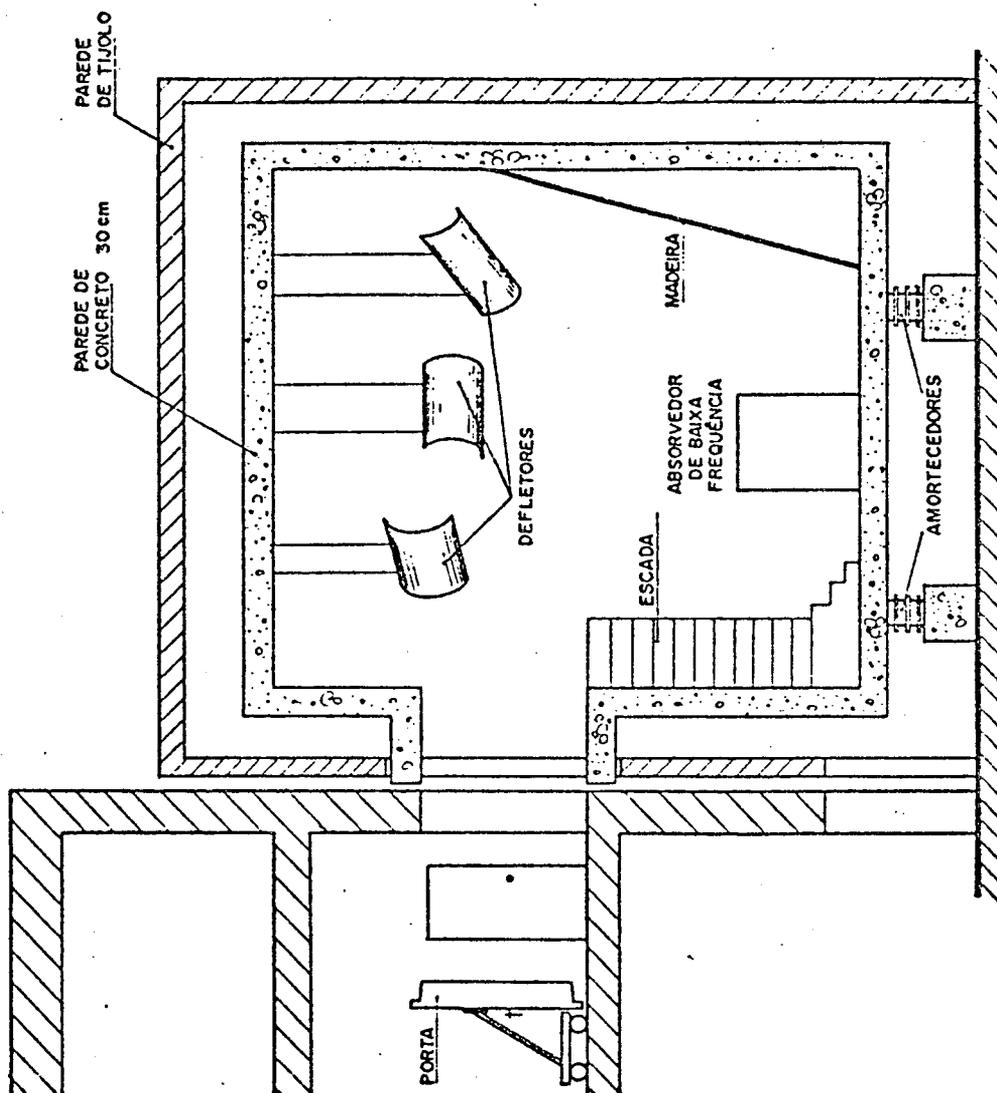


Fig. 4.1 - Vista da Câmara Reverberante grande

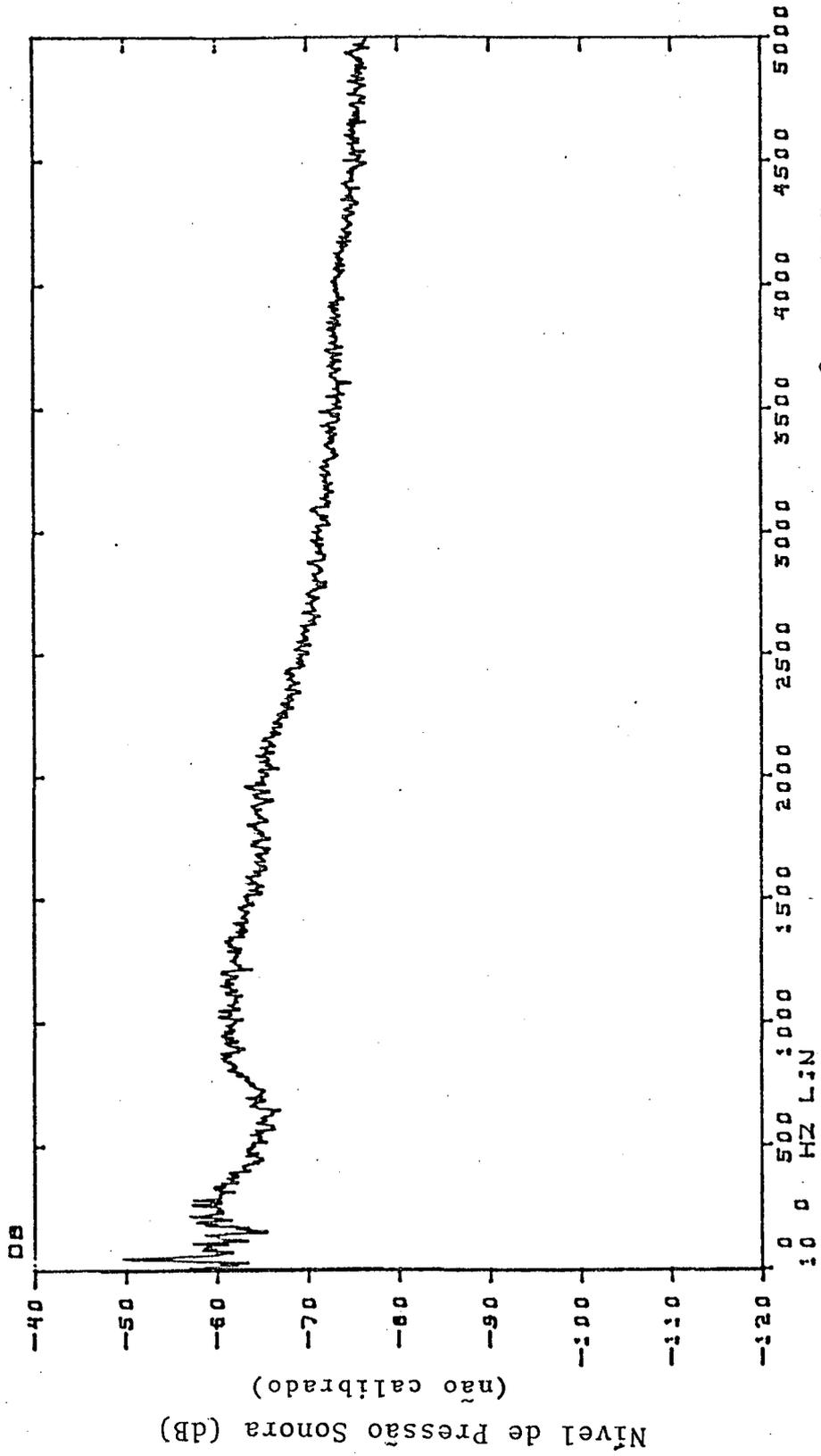


Figura 4.3 - Espectro de pressão sonora C.R.G. captado por microfone 2

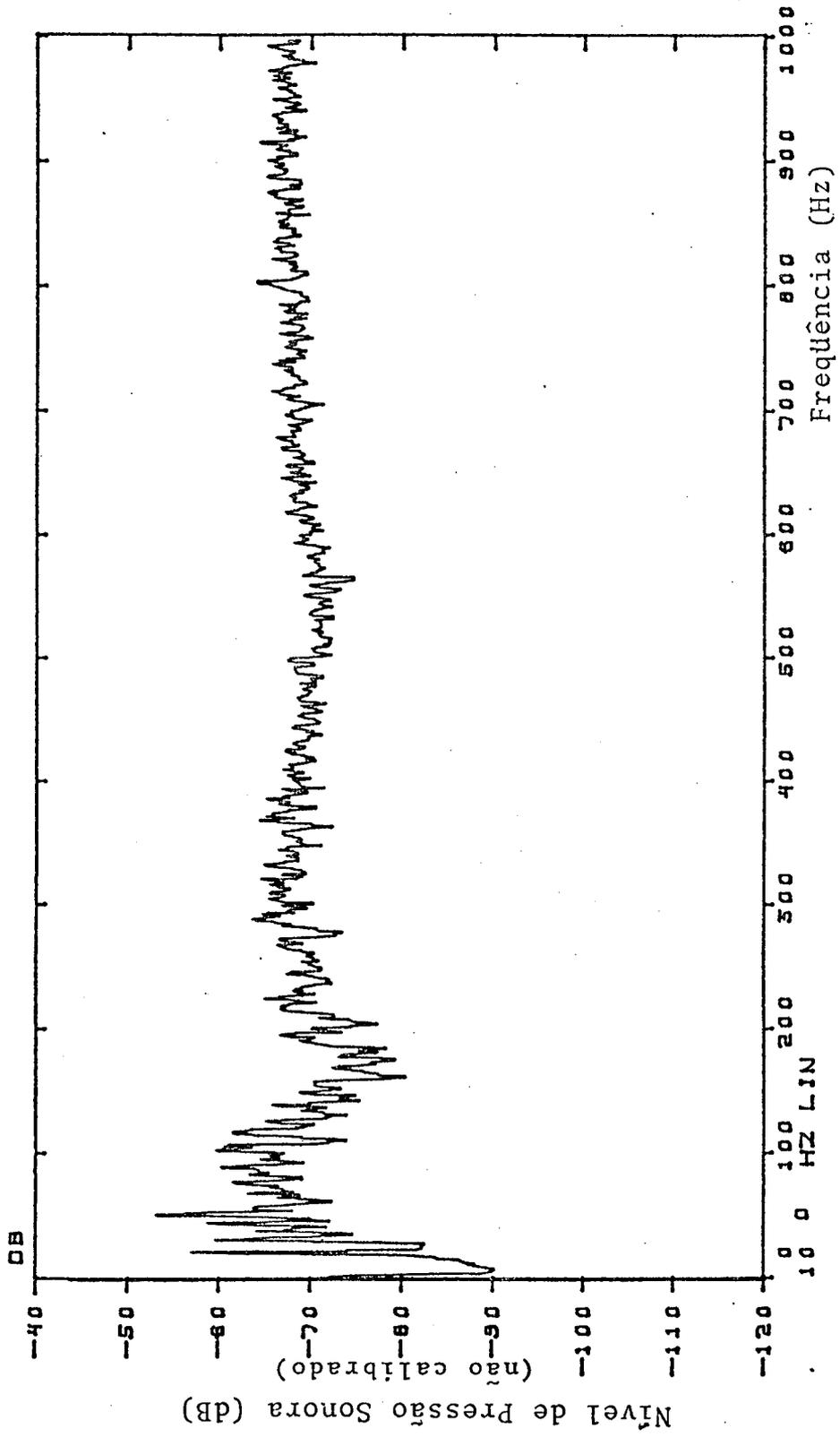


Figura 4.4 - Espectro de pressão sonora C.R.G. até 1 KHz

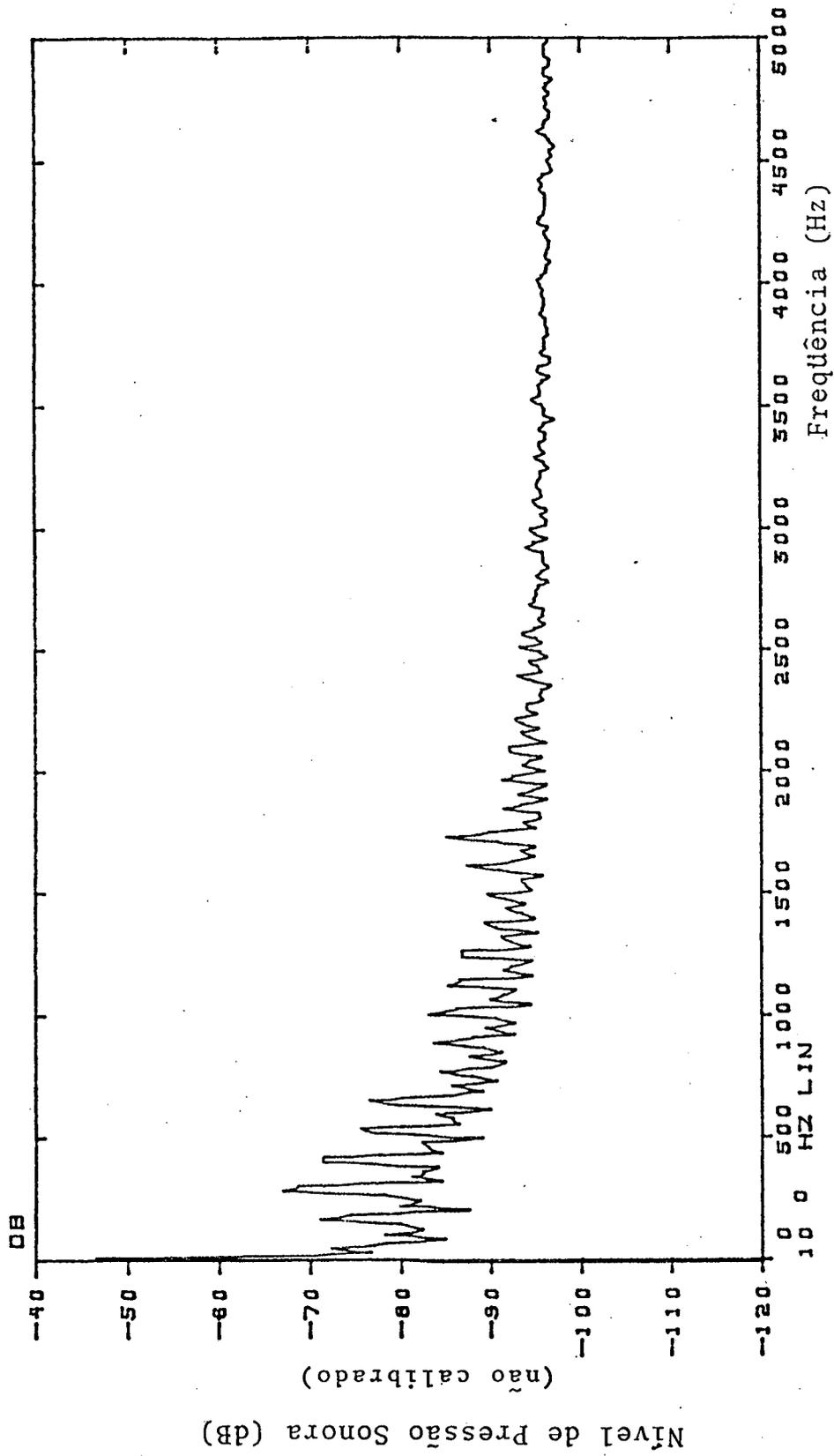


Figura 4.5 - Espectro do ruído de fundo C.R.G.

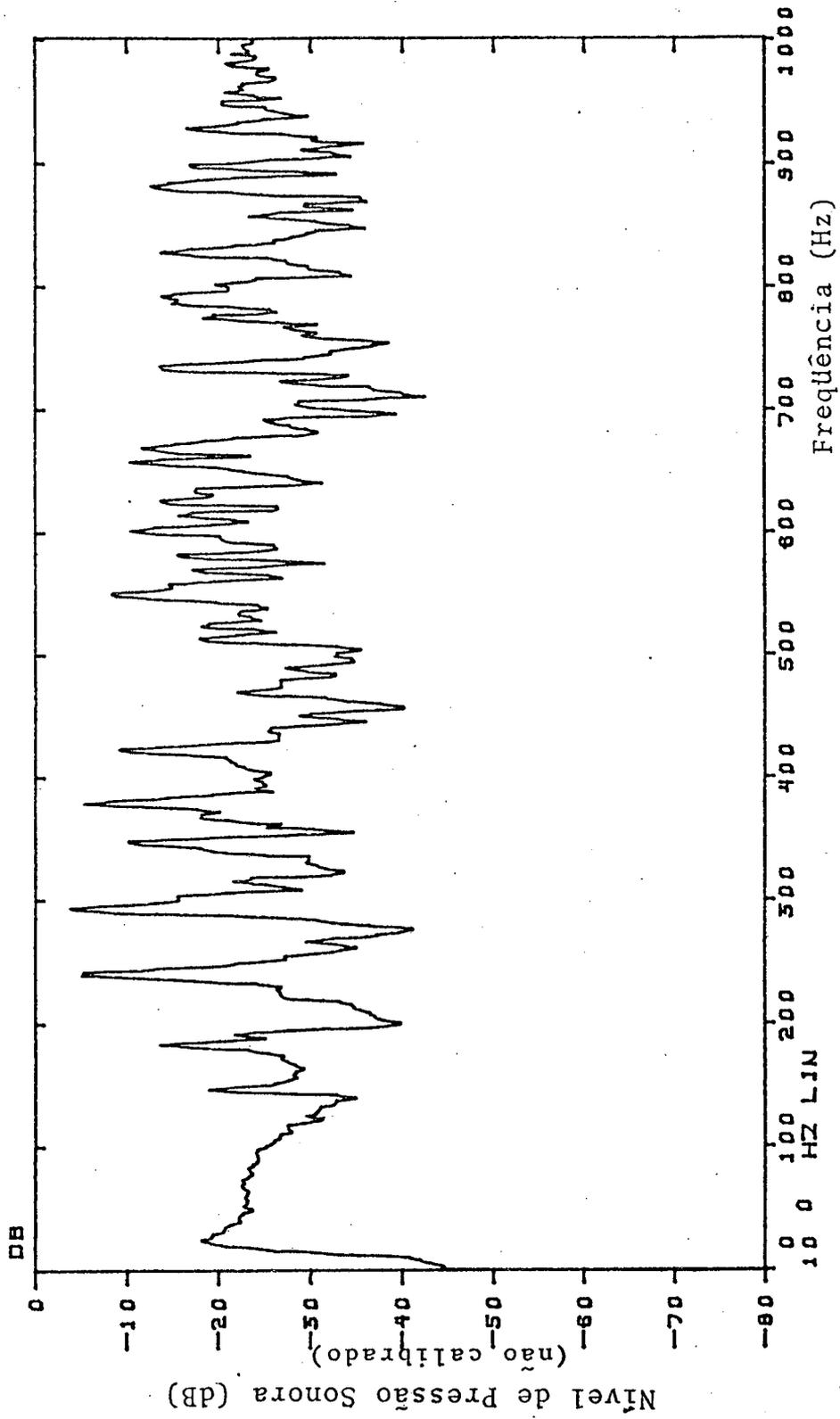


Figura 4.6 - Espectro pressão sonora C.R.P; ponto 1

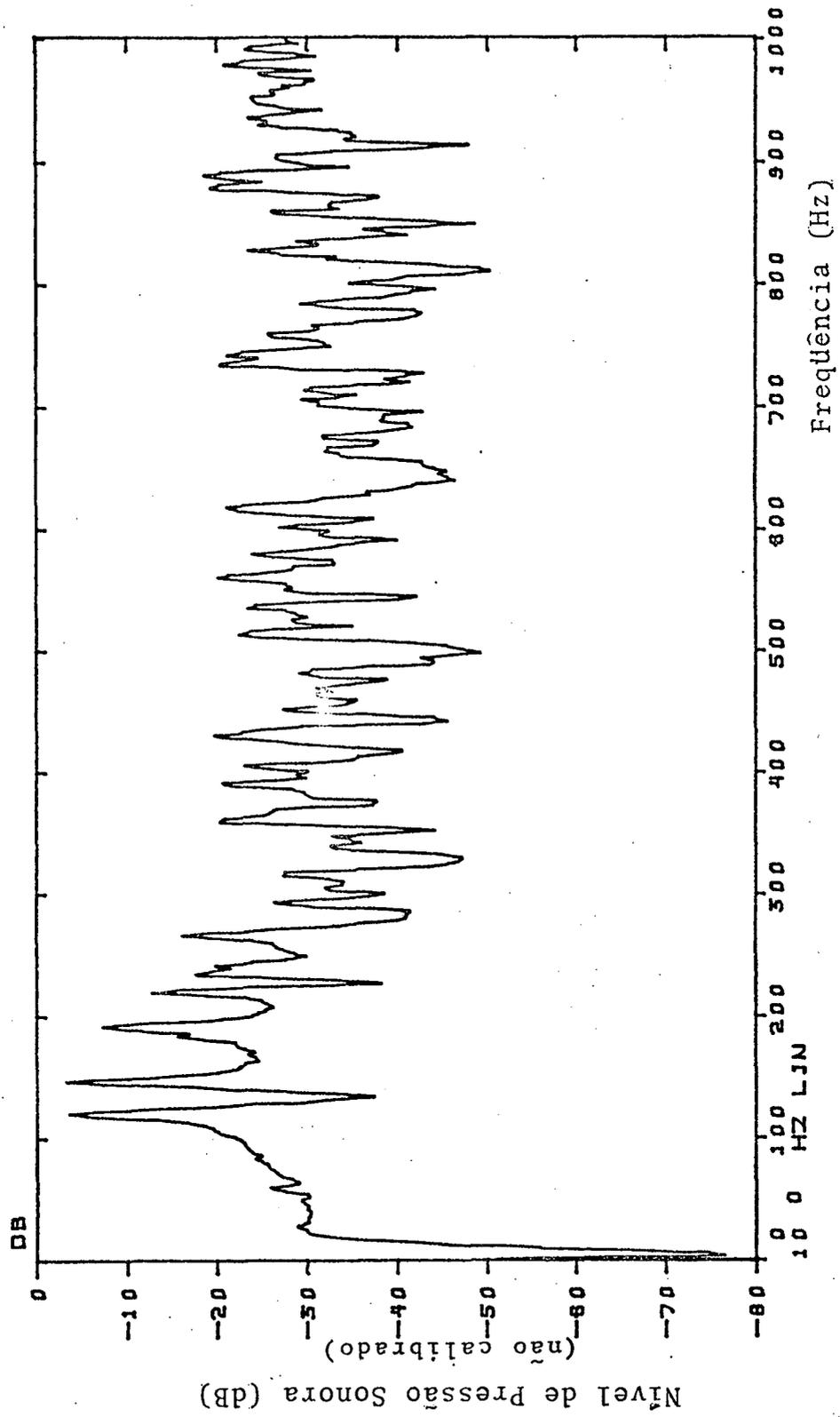


Figura 4.7 - Espectro pressão sonora C.R.P; ponto 2

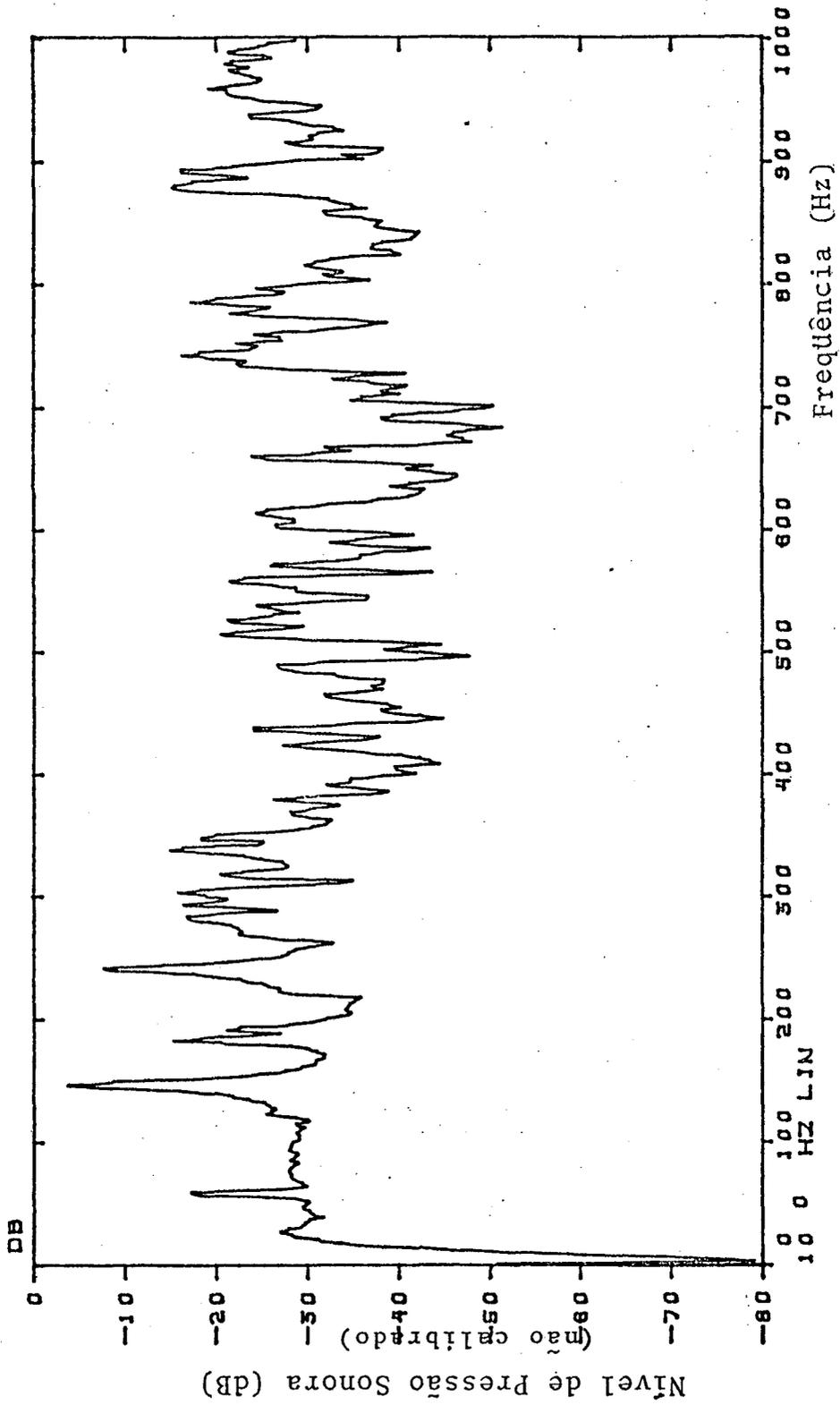


Figura 4.8 - Espectro de pressão sonora C.R.P; ponto 3

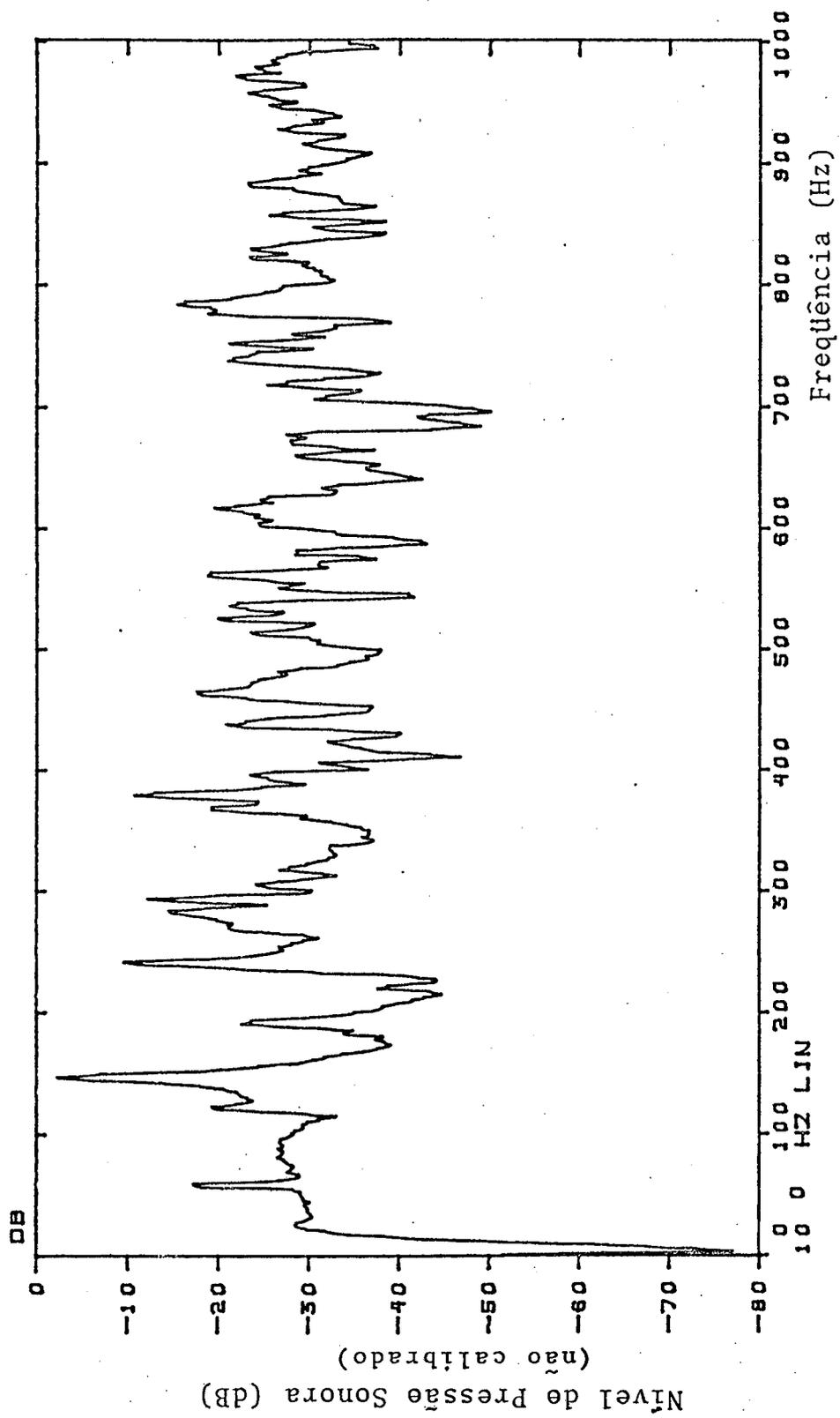


Figura 4.9 - Espectro pressão sonora C.R.P; ponto 4

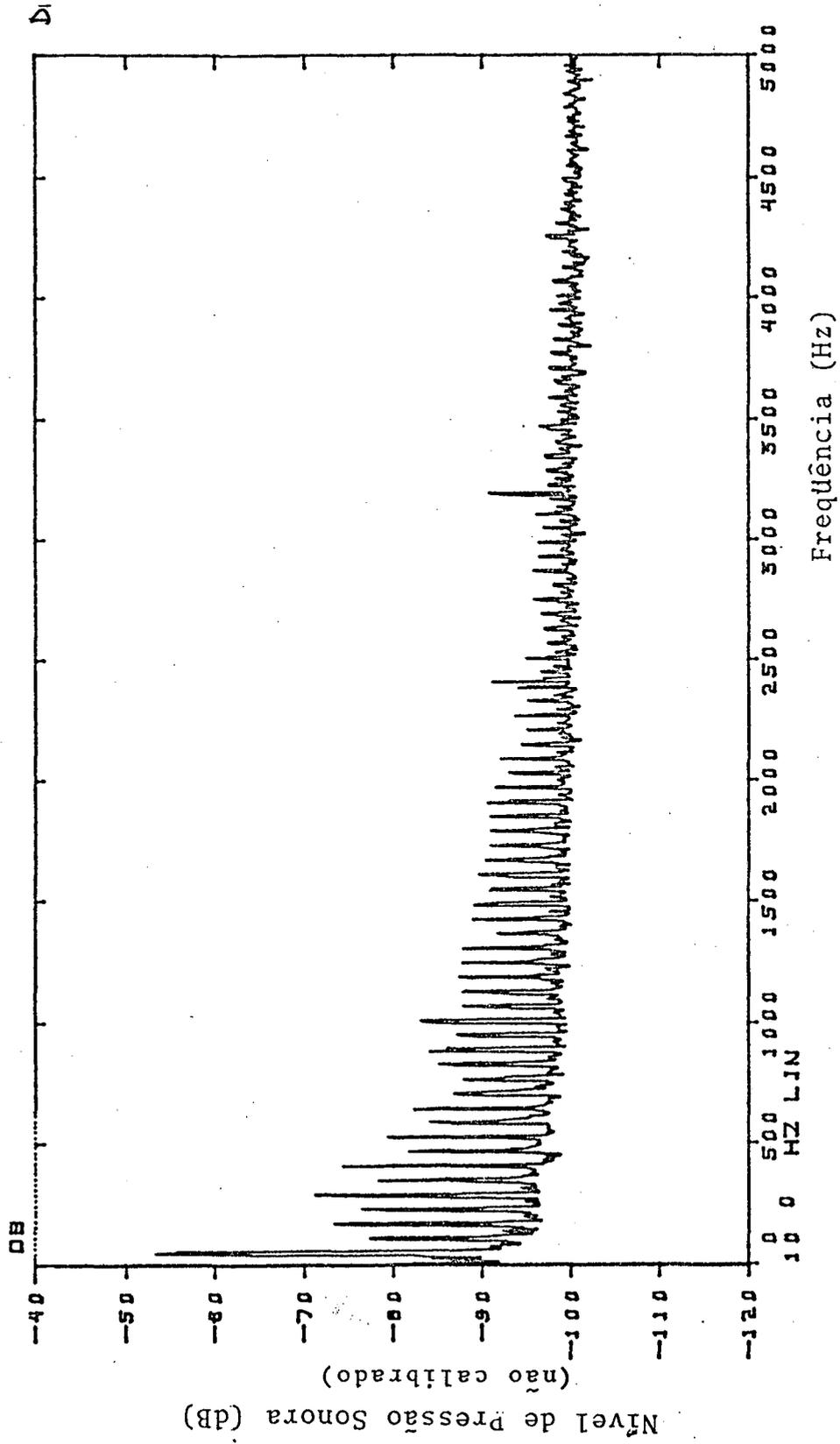


Figura 4.10 - Espectro do ruído de fundo C.R.P.

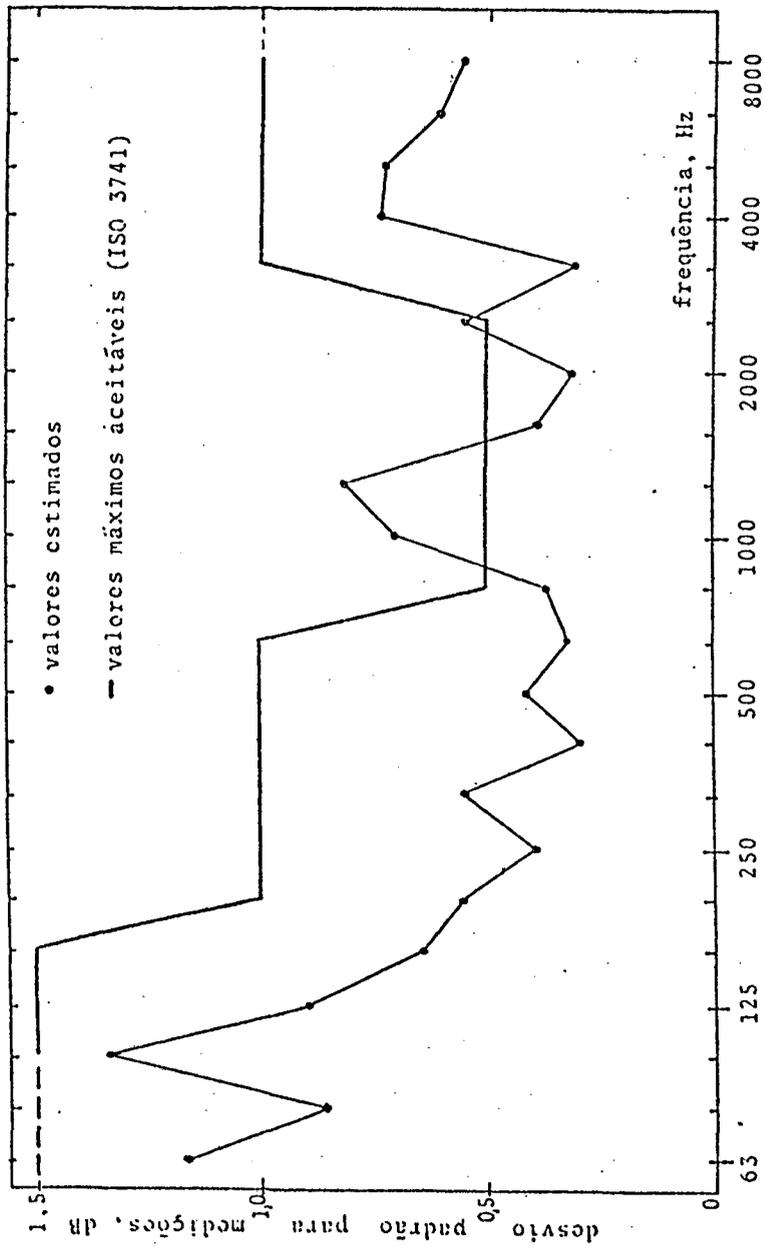


Fig. 4.11 - Qualificação Câmara Reverberante grande efetuada

por Sangoi |19|

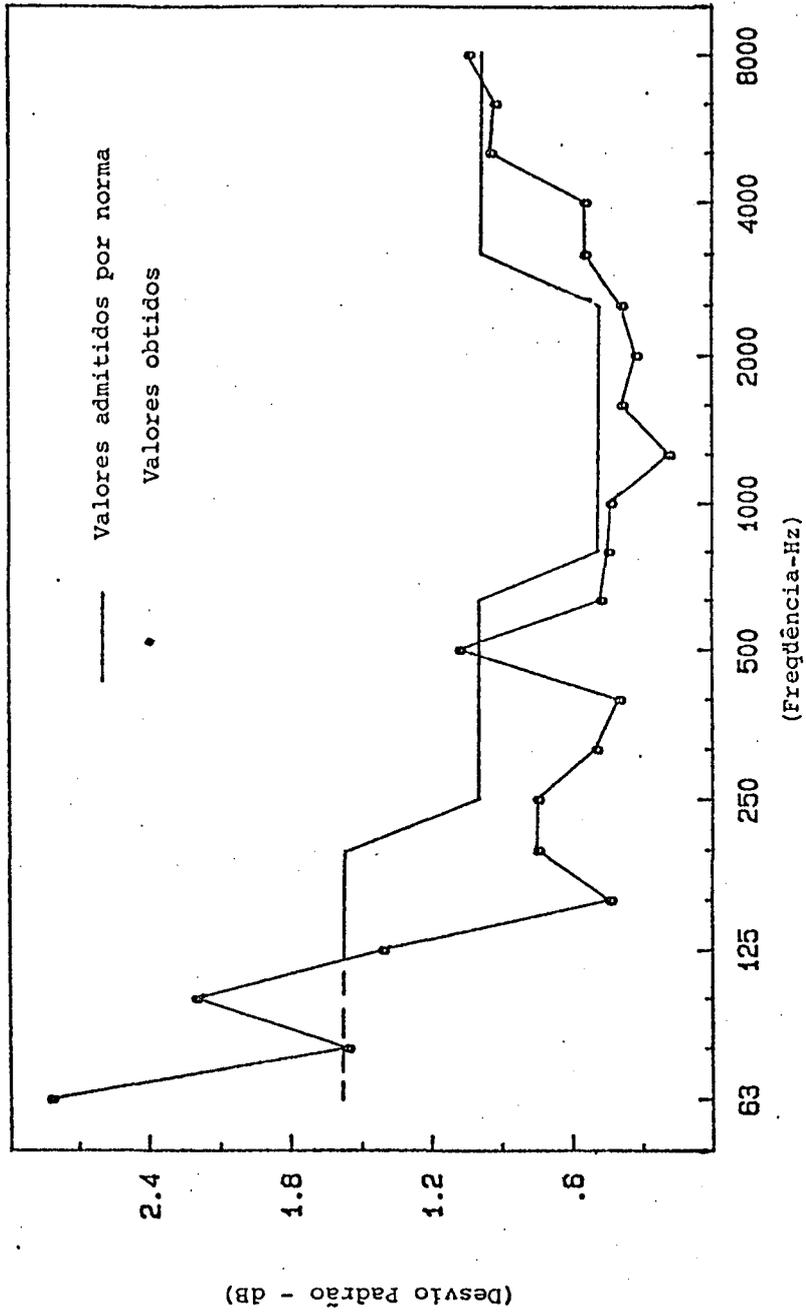


Figura 4.12 - Qualificação Câmara Reverberante grande efetua  
 da... por Viana | 22 |

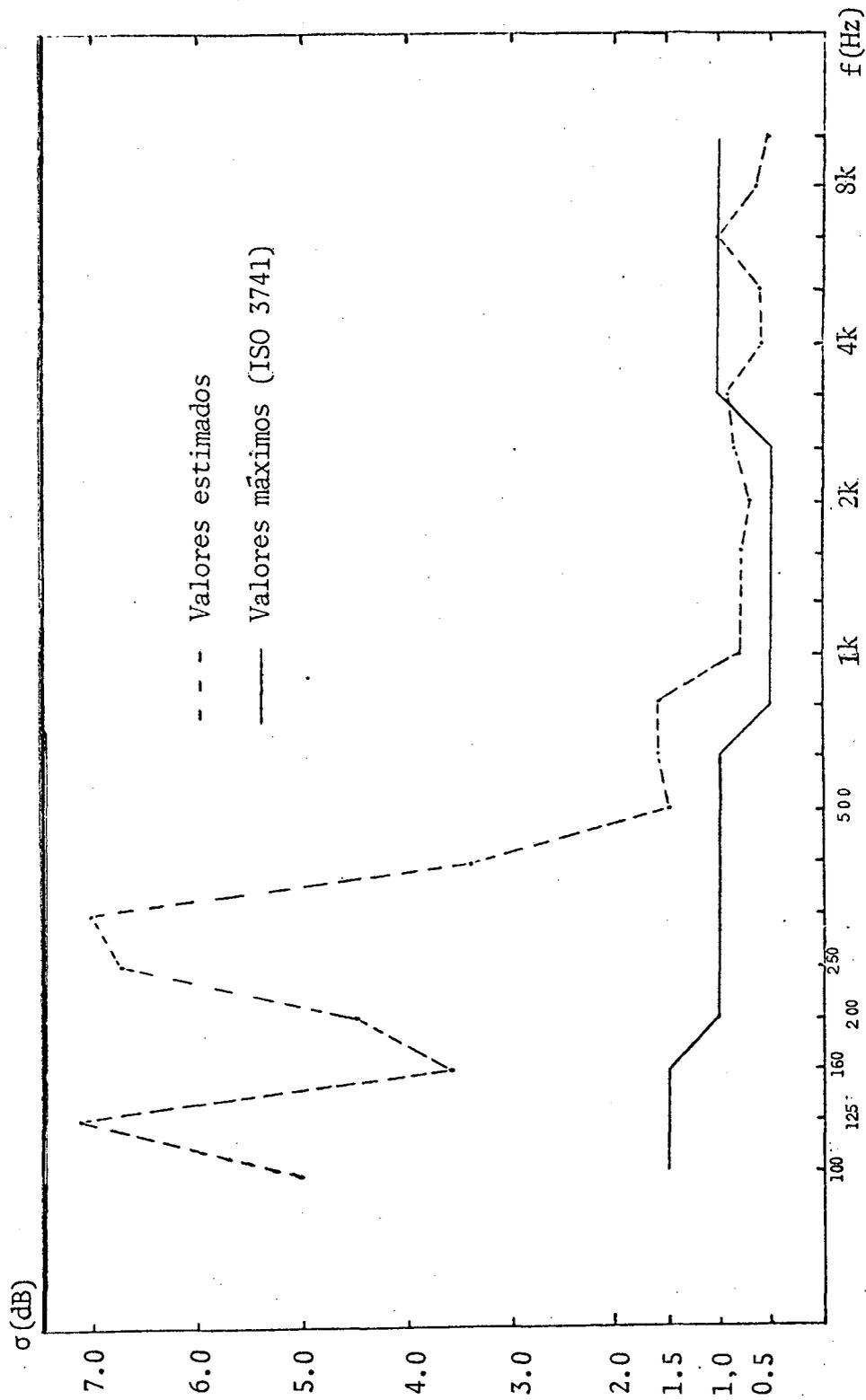


Fig. 4.13 - Qualificação Câmara Reverberante pequena realizada pelo autor.

## CAPÍTULO 5

### MEDIÇÃO DO CAMPO DIFUSO DAS CÂMARAS REVERBERANTES USANDO A TÉCNICA DE DOIS MICROFONES

#### 5.1 Considerações iniciais

O principal objetivo desta pesquisa foi medir e quantificar o campo difuso de uma câmara reverberante grande e de outra pequena.

Neste capítulo, apresentam-se os resultados das medições de coerência  $\gamma_{pu}^2$  realizadas nas câmaras reverberantes, que visam quantificar seu campo difuso mediante o método desenvolvido neste estudo, que usa a técnica de dois microfones.

Foram realizadas medições de  $\gamma_{pu}^2$  na região central de cada câmara, também perto de uma parede, de uma aresta, de um canto e da fonte sonora, para estudar o efeito de aproximação que estas produzem na difusibilidade do campo acústico.

Analisa-se o efeito de orientação dos microfones nas medições de  $\gamma_{pu}^2$ , como também a posição das fontes no interior das câmaras.

Para ter um padrão de referência e comparação, foram escolhidos e fixados para todos as estimativas digitais de coerência  $\gamma_{pu}^2$ : 1024 pontos de discretização e 5 KHz na frequência de corte do filtro anti-aliasing, em consequência a resolução foi  $\Delta f = 19.5$  Hz.

O sinal do gerador usado para produzir o campo acústico no interior das câmaras, foi ruído branco de banda larga dentro da faixa de frequências de interesse.

Optou-se por um máximo de 50 médias em cada medição, para evitar o efeito do erro de cálculo digital que será analisado no próximo capítulo.

Finalmente, realizou-se uma análise e discussão dos resultados obtidos.

Para efeito destas medições considera-se que:

- direção dos microfones é aquela dada pela linha que une os dois microfones e o sentido é do microfone 1 para o microfone 2.
- orientação é dada pela paralela aos eixos dos microfones.

## 5.2 Medições de $\gamma_{pu}^2$ na Câmara Reverberante Grande

### 5.2.1 Medição na Região Central da C.R.G.

Mediu-se, principalmente, na região central por ser esta fundamental em sua qualificação e por representar adequadamente o campo difuso próprio da câmara.

O resultado do conjunto de medições realizadas na região central, apresentadas nas figuras 5.1 até 5.8, será comparado mais adiante com o obtido na estimativa do desvio padrão espacial do método normalizado, como também, com o critério de Schröder.

A figura 5.1 mostra uma das medições de  $\gamma_{pu}^2$  feitas na região central da C.R.G. Os microfones foram orientados aleatoriamente na captação do campo acústico e a fonte sonora colocada na

região central. Esta curva mostra uma forte queda em 200 Hz com valores tendentes a 1 abaixo desta frequência. Esta curva obtida com 50 médias, mostra também que os pequenos picos presentes acima de 200 Hz tendem rapidamente a diminuir a afastar-se para frequências maiores, mostrando um claro comportamento do campo difuso.

A figura 5.2 apresenta outra medição feita na região central. Os microfones foram colocados a 1,5m da fonte sonora e orientados aleatoriamente. Tomou-se o cuidado de não mudar a posição da fonte sonora B&K 4204 da região central, para uma melhor análise comparativa das medições. A curva mostra 4 picos decrescentes, na banda de frequências abaixo dos 400 Hz, onde a queda do segundo pico se produz em 200Hz aproximadamente. Esta medição realizada com 50 médias, mostra um comportamento similar ao obtido na medição apresentada na figura 5.1 o que representa uma tendência de caracterizar campo difuso nesta região acima de 200 Hz, onde  $\gamma_{pu}^2 \leq 0.3$ .

Na figura 5.3 apresenta-se a medição onde os microfones foram colocados, com orientação aleatória, a 1,2m da fonte sonora, com proteção paravento. A fonte sonora B&K 4204 gera ruído branco devido à alta rotação do ventilador axial, isto produz um forte fluxo de ar nas proximidades, motivo pelo qual, colocou-se a proteção paravento nos microfones. Nesta curva se constata os maiores picos abaixo de 200 Hz aproximadamente, mostrando acima desta frequência só alguns picos pequenos.

Em outro ponto, a 1,2m da fonte, mediu-se também a coerência  $\gamma_{pu}^2$  com microfones com paravento, não mostrando notáveis diferenças, como se constata na figura 5.4.

A medição de  $\gamma_{pu}^2$  apresentada na figura 5.5 foi realizada

com a fonte tipo B&K 4205, que gera ruído branco mediante um gerador de sinal e um altofalante; os microfones sem paravento foram colocados a 30cm da fonte na região central. A curva mostra altos valores de coerência até aproximadamente 200 Hz, onde novamente tem-se uma forte queda, e acima de 200 Hz alguns picos cada vez mais afastados. Nas frequências superiores a 250 Hz a coerência  $\gamma_{pu}^2$  apresenta o valor zero.

Utilizando novamente a fonte sonora B&K 4204, colocada na região central, mediu-se com os microfones na região central, aproximando-se a uma parede, mantendo a direção dos microfones paralela a esta e a 1,9m do solo. Pode-se ver que a queda do nível se produz em aproximadamente 400 Hz o que significa que esta frequência que denominaremos frequência de corte, aumentou devido à proximidade da parede, como é apresentado na figura 5.6.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam outras medições de coerência em diferentes pontos da região central da câmara. Constata-se a mesma tendência até agora analisada, o campo acústico, na região central da câmara reverberante grande, pode ser considerado difuso acima da frequência de corte de 200 Hz.

### 5.2.2 Medição perto de uma parede na C.R.G.

A fim de estudar o efeito de aproximação que uma parede produz no campo difuso, realizaram-se medições de  $\gamma_{pu}^2$  que são apresentadas nas figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, com a fonte sonora B&K 4204 instalada na região central.

A figura 5.9 apresenta a medição onde os microfones foram colocados em direção perpendicular, a 20cm da parede e a 1,6m do

solo. Pode-se ver que a frequência de corte se desloca até aproximadamente 450 Hz, mostrando um claro efeito da parede no campo difuso. Neste caso, o campo pode ser considerado difuso acima de 500 Hz.

Em continuação, os microfones foram colocados a 20cm, em direção paralela à parede e a 1,65m do solo. A coerência apresentada na figura 5.10 mostra uma diminuição da frequência de corte.

A figura 5.11 apresenta uma medição de  $\gamma_{pu}^2$  que mostra picos até a frequência de 700 Hz, com os microfones também colocados perto da parede e em direção paralela a esta, em consequência o campo é difuso só acima desta frequência.

Finalmente, os microfones foram colocados perto de outra parede obtendo-se a coerência mostrada na figura 5.12, onde novamente constata-se uma mudança da frequência de corte.

Em consequência, as medições de  $\gamma_{pu}^2$  feitas perto de paredes mostravam não ter uma frequência de corte definida pelo que se conclui que o campo acústico é variável nos contornos da câmara, esta conclusão é confirmada pelos trabalhos publicados por Walterhouse [23] e vários outros pesquisadores, (veja referência 16).

### 5.2.3 Medição perto de uma aresta

São apresentadas duas medições perto de uma aresta (duas paredes), para analisar seu efeito na difusibilidade.

A figura 5.13 apresenta coerência perto de 0,9 abaixo de 500 Hz, quando os microfones foram colocados a 20cm e no plano da bissetriz e perpendicular à aresta e a 1,6m do solo. Este alto nível de coerência implica ter uma forte e clara diferença entre o

campo que é difuso e o que não é difuso, acima e abaixo de 500Hz respectivamente.

A coerência, mostrada na figura 5.14, apresenta a frequência de corte em aproximadamente 300 Hz constatando-se também uma clara e grande diferença de nível abaixo e acima desta frequência.

Os resultados mostram novamente a variação do campo sonoro nos contornos da câmara [23, 16].

#### 5.2.4 Medição perto do canto da C.R.G.

Apresentam-se nas figuras 5.15 até 5.19, medições de coerência pressão-velocidade realizadas na região perto do canto, com microfones colocados em direção diagonal a este e orientados ao centro da câmara.

As figuras 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam medições com coerência alta, abaixo de 600 Hz; com pequenos picos, cada vez mais afastados nas frequências superiores.

Em continuação, os microfones foram posicionados a 10 e 5cm do canto, mostrando as coerências apresentadas nas figuras 5.18 e 5.19 respectivamente. Constata-se que a frequência de corte continua entre 600 e 650 Hz, mas aparece nos dois casos, um pico na faixa entre 1000 Hz e 1400 Hz. Em consequência, pode-se considerar o campo acústico difuso só acima de 1500 Hz nas regiões perto do canto da câmara reverberante grande.

### 5.2.5 Medição nas proximidades e perto da fonte sonora

Apresenta-se, em continuação, um estudo do efeito de aproximação à fonte sonora e analisa-se a variação do campo acústico nesses pontos.

A coerência  $\gamma_{pu}^2$  apresentada na figura 5.20, com microfones colocados a 70cm acima da fonte sonora B&K 4204, instalada na região central, mostra um pequeno aumento de picos na faixa de frequências baixas até 1 KHz, em relação às coerências obtidas na região central anteriormente analisadas. Esta pequena diferença deve-se ao efeito de aproximação à fonte sonora.

A figura 5.21 apresenta uma medição realizada com os microfones orientados em direção horizontal à fonte sonora B&K 4205 e a 60cm de distância. A coerência obtida mostra um grande número de picos em toda a faixa de frequências medida.

Obteve-se uma coerência diferente ao mudar a fonte sonora como se aprecia nas figuras 5.20 e 5.21.

Utilizando novamente a fonte sonora B&K 4205, mediu-se a coerência pressão-velocidade colocando os microfones orientados em direção à fonte e a 30cm de distância; o resultado apresentado na figura 5.22 mostra um claro aumento da coerência, em toda a faixa de frequências medida.

A coerência aumentou consideravelmente quando os microfones foram colocados a 20cm da fonte B&K 4205 como é mostrado na figura 5.23.

Finalmente, aproximando os microfones a 10cm da fonte B&K 4205, a coerência, mostrada na figura 5.24, apresenta uma clara tendência a 1 na maioria das frequências da faixa medida.

Portanto, pode-se concluir que; quando os microfones se

aproximam a fonte sonora a coerência  $\gamma_{pu}^2$  tende rapidamente ao valor 1, em consequência mediu-se com clareza a presença do campo direto onde a energia sonora propaga-se de um ponto a outro.

### 5.2.6 Medição com duas fontes sonoras

Mediu-se também, a coerência  $\gamma_{pu}^2$  usando duas fontes sonoras, os tipos B&K 4204 e B&K 4205. Realizaram-se duas medições perto do centro da câmara e a 1.6m do solo, com os microfones orientados aleatoriamente e obteve-se os resultados apresentados nas figuras 5.25 e 5.26. O uso de duas fontes, colocadas nos cantos da câmara reverberante grande, deve garantir que o campo sonoro seja mais difuso. As curvas mostram que a tendência geral se manteve em relação às medições realizadas na região central com uma fonte, apresentando a mesma frequência de corte em 200 Hz com níveis de coerência similares, o que garante e confirma os resultados obtidos.

### 5.3 Medições de $\gamma_{pu}^2$ em Câmara Reverberante Pequena

Neste sub-capítulo, apresentam-se os resultados obtidos nas medições de coerência  $\gamma_{pu}^2$  realizadas na câmara reverberante pequena.

Cabe mencionar que foi necessário tomar muito cuidado com um conjunto de fatores que prejudicavam ou tornavam muito difícil as medições.

Por outro lado, o reduzido espaço interior da câmara não

permitiu medir o campo difuso com a posição da fonte sonora B&K 4205 na região central, pelo perigo da presença de campo direto nas medições; obrigatoriamente teve que se fixar sua posição no canto da câmara.

A fonte B&K 4204 foi descartada pelo vento que produz na sua geração de ruído branco.

Detectou-se uma forte presença do erro digital nas medições de  $\gamma_{pu}^2$ . Este erro, que é analisado no capítulo 6, teve que ser diminuído com o uso do programa de cálculo de coerência pressão-velocidade modificado que se apresenta no anexo 2.

### 5.3.1 Medição em Região Central da C.R.P.

Apresentam-se cinco medições realizadas na região central.

A figura 5.27 mostra que a coerência tem um nível alto nas frequências baixas, diminuindo gradualmente quando aumenta a frequência até os 2 KHz, acima desta frequência de corte a coerência apresenta valor zero; neste caso os microfones foram colocados na região central da câmara com orientação aleatória.

Os microfones foram posicionados a 50cm da fonte sonora com orientação aleatória apresentando a coerência mostrada na figura 5.28. Esta mostra nível alto abaixo de 400 Hz e níveis menores até 1600 Hz, entre 2200 e 2600 Hz apresenta um conjunto de picos que, constata pouca difusibilidade nesta faixa tanto como nas frequências abaixo de 1600 Hz; acima de 2600 Hz a coerência novamente é zero.

A figura 5.29 apresenta a coerência  $\gamma_{pu}^2$  quando os microfones que estão na região central, se aproximam a uma aresta, mas orientados para a região central. Manteve-se aproximadamente a

mesma tendência na coerência obtida na região central.

As coerências que se apresentam nas figuras 5.30 e 5.31, também são medidas na região central, mostram um grande número de picos em quase toda a faixa de frequências de medições, pelo que resulta difícil descobrir a frequência de corte, mais identificável nas coerências mostradas nas figuras anteriores.

### **5.3.2 Medição perto de uma Parede**

As coerências medidas perto de uma parede com os microfones orientados aleatoriamente são apresentados nas figuras 5.32, 5.33 e 5.34; mostram um grande número de picos em toda a banda de medição, em consequência o campo não é difuso nesta região.

### **5.3.3 Medição perto de uma Aresta**

As coerências apresentadas nas figuras 5.35, 5.36 e 5.37, medidas perto de uma aresta e com microfones orientados aleatoriamente, mostram também um grande número de picos, constatando-se resultados similares aos obtidos perto de uma parede.

### **5.3.4 Medição perto do canto da C.R.P.**

Como se esperava, o campo sonoro perto do canto não é difuso em toda a banda de frequência até 5 KHz. A coerência  $\gamma_{pu}^2$ , apresentada nas figuras 5.38, 5.39 e 5.40, mostra muita similaridade com a obtida perto de uma aresta e de uma parede.

Portanto, nas regiões perto de paredes, aresta e canto, o

campo acústico não é difuso em toda a banda de frequências medida na câmara reverberante pequena.

### 5.3.5 Medição perto da fonte sonora

As figuras 5.41, 5.42, 5.43 e 5.44 mostram a coerência  $\gamma_{pu}^2$  quando os microfones aproximam-se à fonte sonora, colocados a 20, 15, 10 e 5cm respectivamente. De maneira similar à experiência realizada na câmara reverberante grande, a coerência tende ao valor 1 quando os microfones aproximam-se à fonte captando o campo direto.

## 5.4 Análise dos Resultados

As medições do campo difuso, através da função de coerência entre a pressão sonora e a velocidade de partícula, usando a técnica de dois microfones, foram feitas nas diversas regiões no interior das câmaras reverberantes e mostraram um claro e definido comportamento do campo acústico, permitindo quantificar o campo difuso com exatidão e certeza.

A coerência  $\gamma_{pu}^2$ , medida na região central da câmara reverberante grande, mostrou claramente que 200 Hz aproximadamente é a frequência de corte da câmara acima da qual  $\gamma_{pu}^2 \leq 0.3$ , o que sugere um limite a partir do qual o campo acústico pode considerar-se difuso. No caso da câmara reverberante pequena a frequência de corte não está tão claramente definida como na câmara grande, encontrando-se na faixa de 1500 até 2000 Hz.

Por outra parte, perto de uma parede, de uma aresta e de um canto das câmaras grande e pequena, a coerência mostrou o efeito da aproximação que estas produzem no campo acústico e a notável mudança que a difusibilidade sofre nestas regiões, conclusão que é confirmada pelos trabalhos publicados por Waterhouse [23] e seus pesquisadores.

Se os microfones estão colocados perto de uma parede, as ondas sonoras que chegam a este ponto de medição são substancialmente aleatórias, salvo aquela parcela correspondente à incidência normal à parede, onde o microfone capta a onda incidente e sua reflexão, apenas na direção normal à parede. Portanto, como ondas estacionárias tem altas coerências, a difusibilidade do campo acústico nesta região diminui, fazendo com que a frequência de corte da câmara se desloque para uma frequência mais alta.

No caso dos microfones colocados perto de duas paredes (arestas), têm-se duas normais. Portanto, diminui mais ainda a difusibilidade do campo acústico nesta região, e por isto a frequência de corte é deslocada para frequências mais altas.

Analogamente, no caso de três paredes (canto), a parcela é ainda maior, em vista da existência das reflexões nas direções das três normais às paredes; isto diminui a difusibilidade do campo nesta região, e desloca a frequência de corte da câmara.

Estes resultados são mostrados nas medições correspondentes a cada uma das regiões citadas.

Destaca-se o fato que a orientação dos microfones, colocados nas regiões centrais das câmaras, não teve influência nas medições de coerência, mas quando os microfones foram colocados perto de uma parede, ou aresta ou canto, a orientação dos microfones teve influência no valor da coerência  $\gamma_{pu}^2$ .

Por outra parte, perto de uma parede, de uma aresta e de um canto das câmaras grande e pequena, a coerência mostrou o efeito da aproximação que estas produzem no campo acústico e a notável mudança que a difusibilidade sofre nestas regiões, conclusão que é confirmada pelos trabalhos publicados por Waterhouse [23] e seus pesquisadores.

Se os microfones estão colocados perto de uma parede, as ondas sonoras que chegam a este ponto de medição são substancialmente aleatórias, salvo aquela parcela correspondente à incidência normal à parede, onde o microfone capta a onda incidente e sua reflexão, apenas na direção normal à parede. Portanto, como ondas estacionárias tem altas coerências, a difusibilidade do campo acústico nesta região diminui, fazendo com que a frequência de corte da câmara se desloque para uma frequência mais alta.

No caso dos microfones colocados perto de duas paredes (arestas), têm-se duas normais. Portanto, diminui mais ainda a difusibilidade do campo acústico nesta região, e por isto a frequência de corte é deslocada para frequências mais altas.

Analogamente, no caso de três paredes (canto), a parcela é ainda maior, em vista da existência das reflexões nas direções das três normais às paredes; isto diminui a difusibilidade do campo nesta região, e desloca a frequência de corte da câmara.

Estes resultados são mostrados nas medições correspondentes a cada uma das regiões citadas.

Destaca-se o fato que a orientação dos microfones, colocados nas regiões centrais das câmaras, não teve influência nas medições de coerência, mas quando os microfones foram colocados perto de uma parede, ou aresta ou canto, a orientação dos microfones teve influência no valor da coerência  $\gamma_{pu}^2$ .

O efeito de aproximação a fonte sonora se constata tanto na câmara grande quanto na pequena, medindo-se com clareza o campo direto, campo em que a energia sonora propaga-se de um ponto para outro.

Destaca-se, que os pequenos níveis de  $\gamma_{pu}^2$  que apresentam as medições na câmara reverberante grande acima da frequência de corte, devem-se principalmente ao erro de processamento do sinal, como se deduz da figura 3.9; pois o resultado do teste de simulação de sinais incoerêntes no computador, apresenta quase o mesmo patamar que o medido no campo difuso.

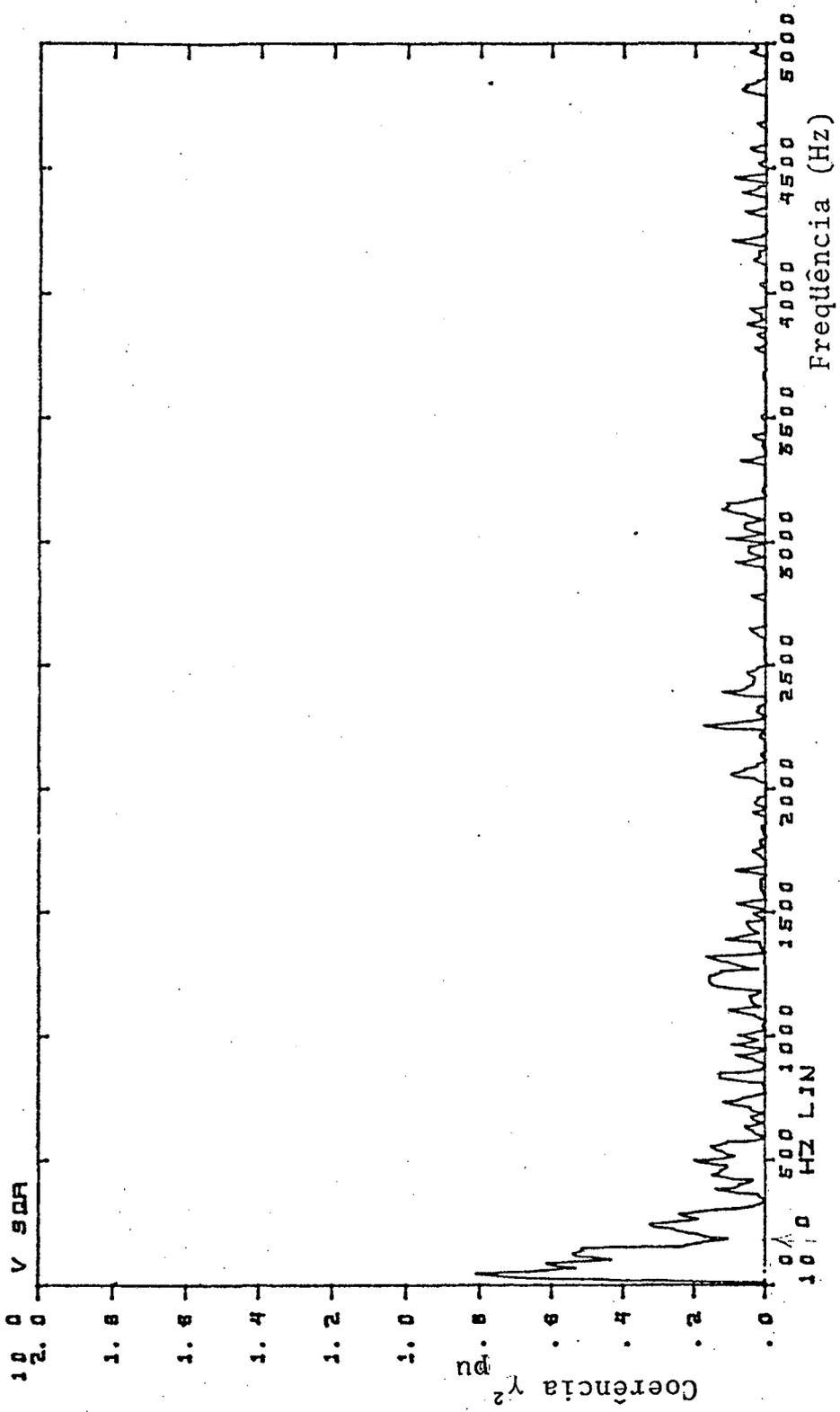


Figura 5.1 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central CAM. REVERB. GRANDE (C.R.G.)

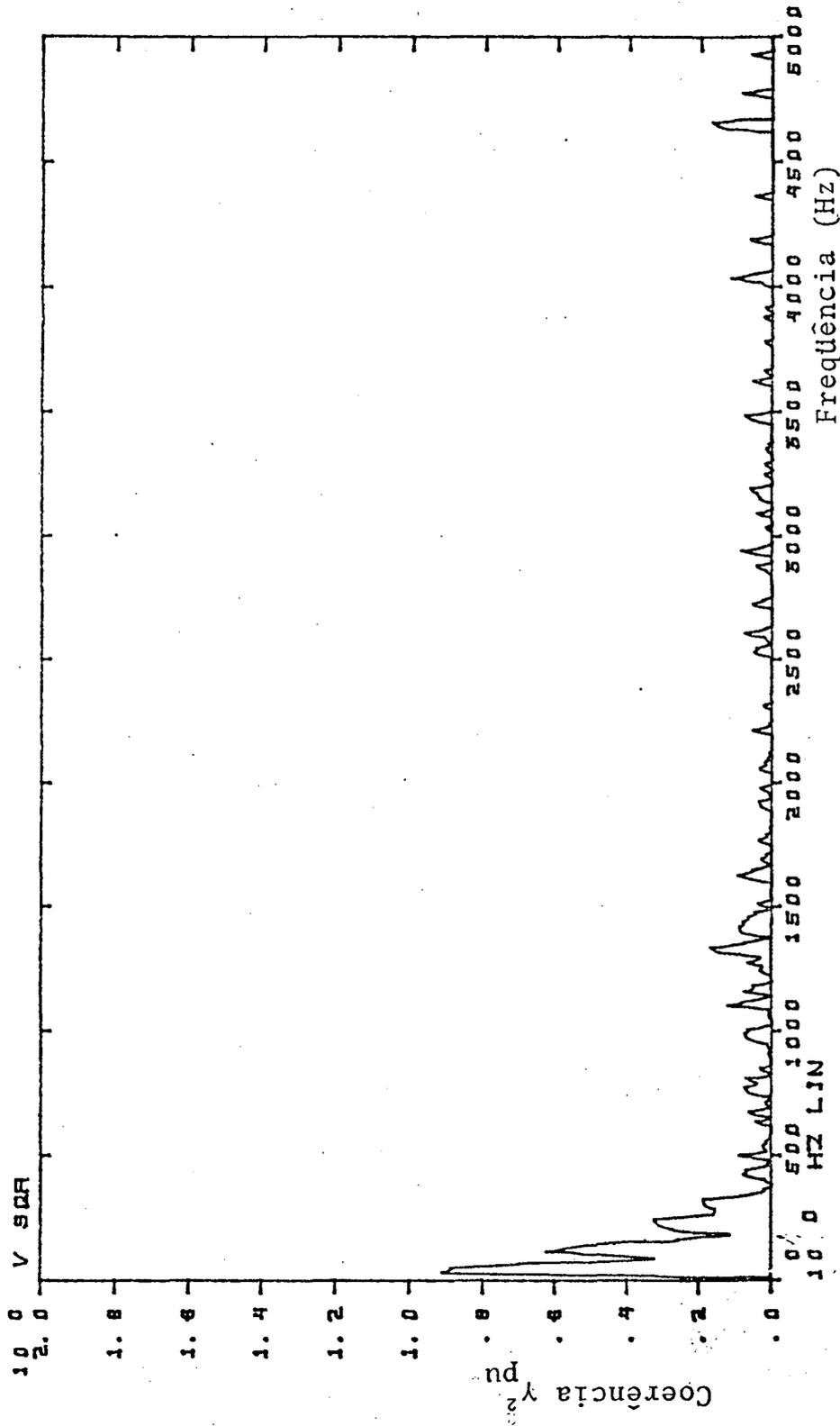


Figura 5.2 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central (C.R.G.); a 1,5m da fonte sonora.

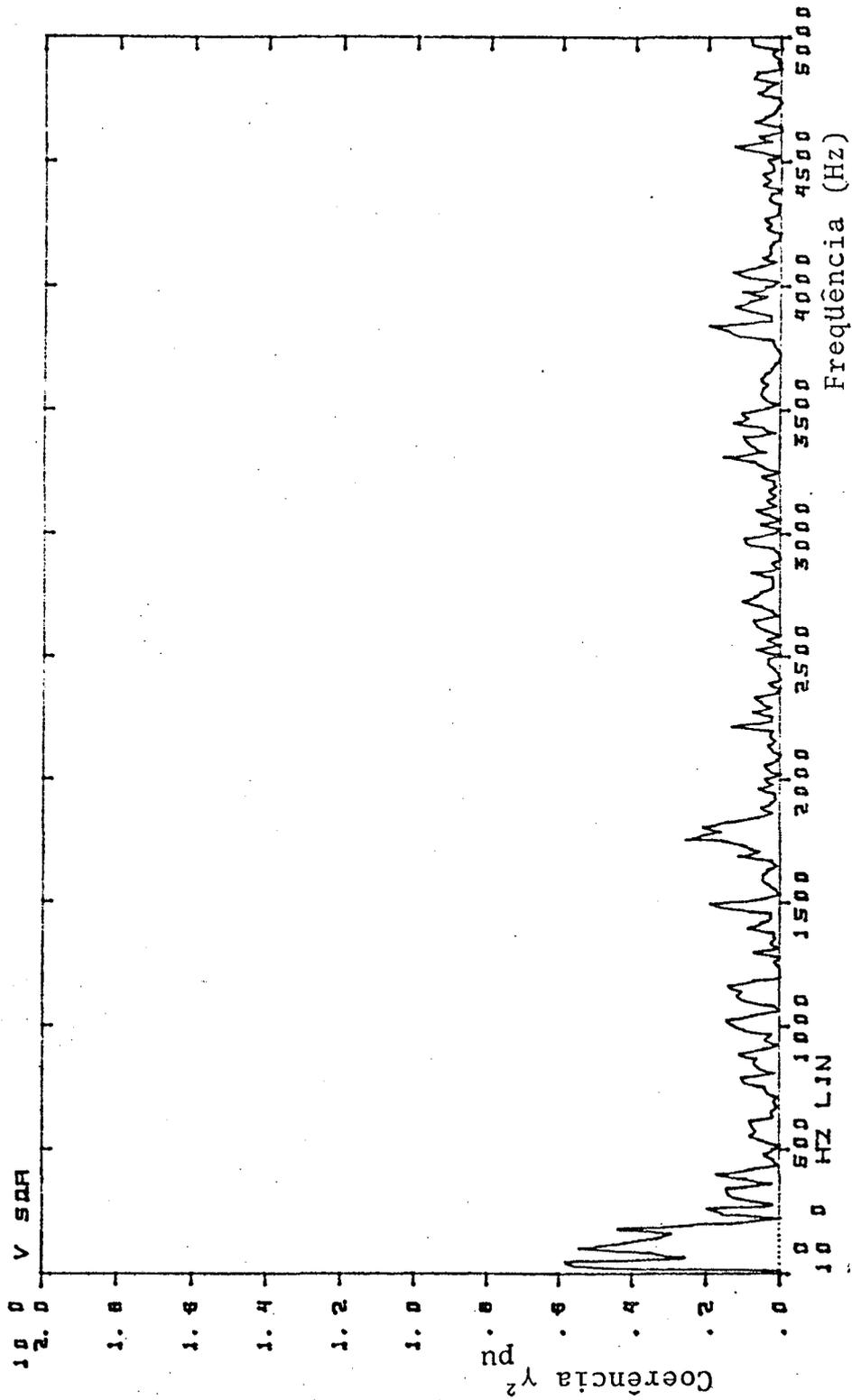


Figura 5.3 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central (C.R.G.); a 1,2m da fonte, Microfones com paravento, ponto 1.

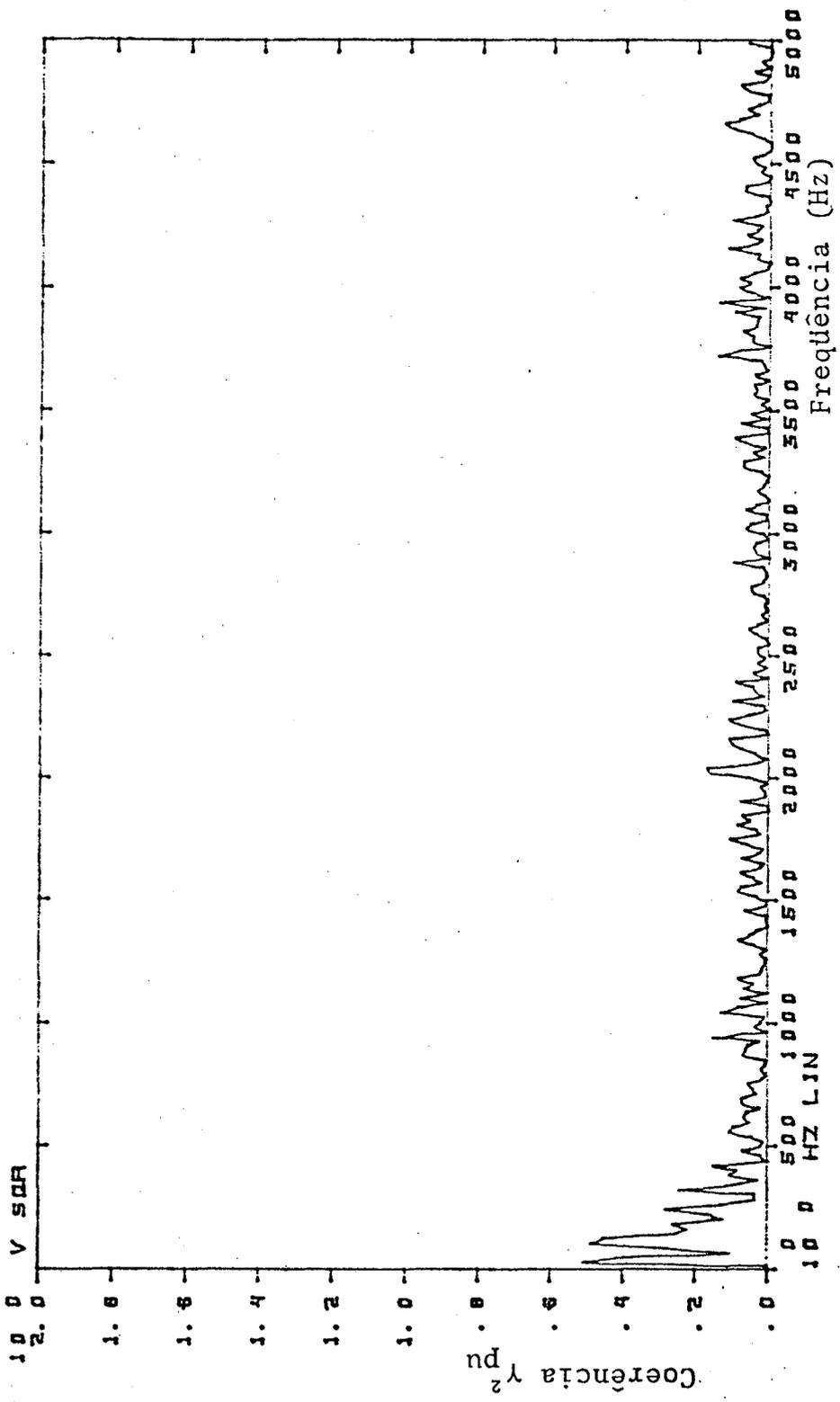


Figura 5.4 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central (C.R.G.); a 1,2m da fonte, microfones com paravento, ponte 2.

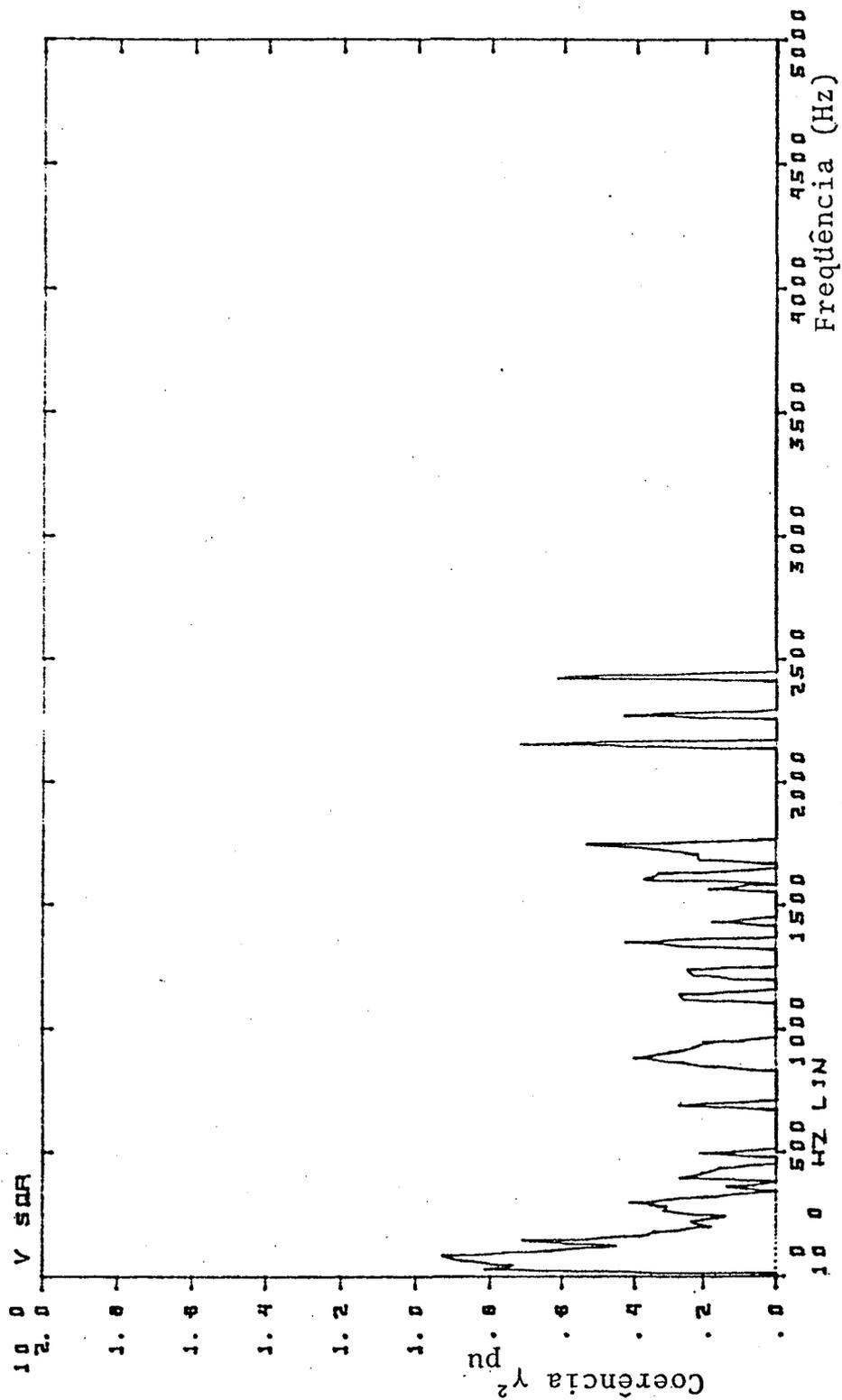


Figura 5.5 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central (C.R.G.); a 30cm da fonte, microfones sem paravento.

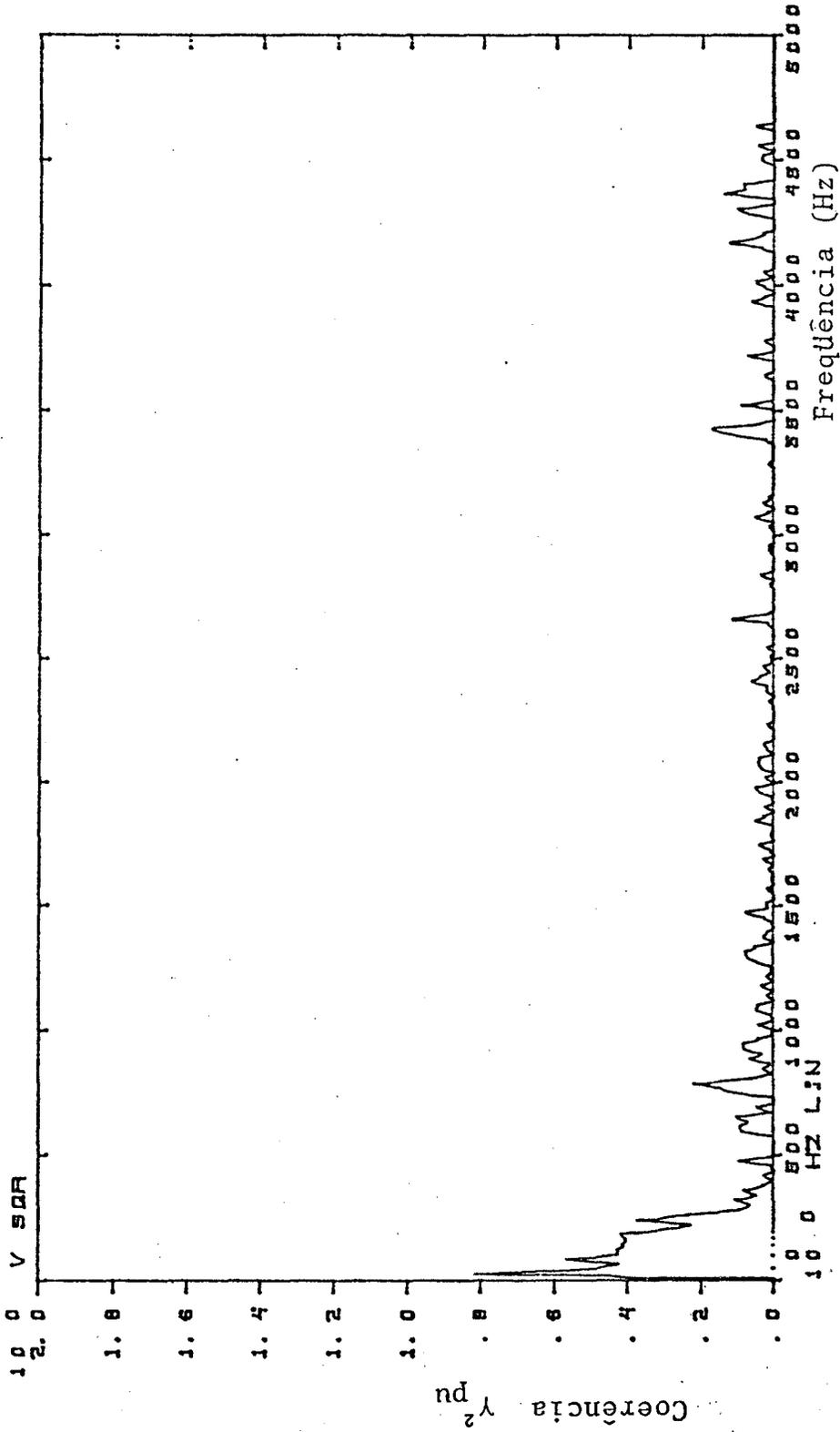


Figura 5.6 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central (C.R.G.); quando microfones aproximam-se a uma parede.

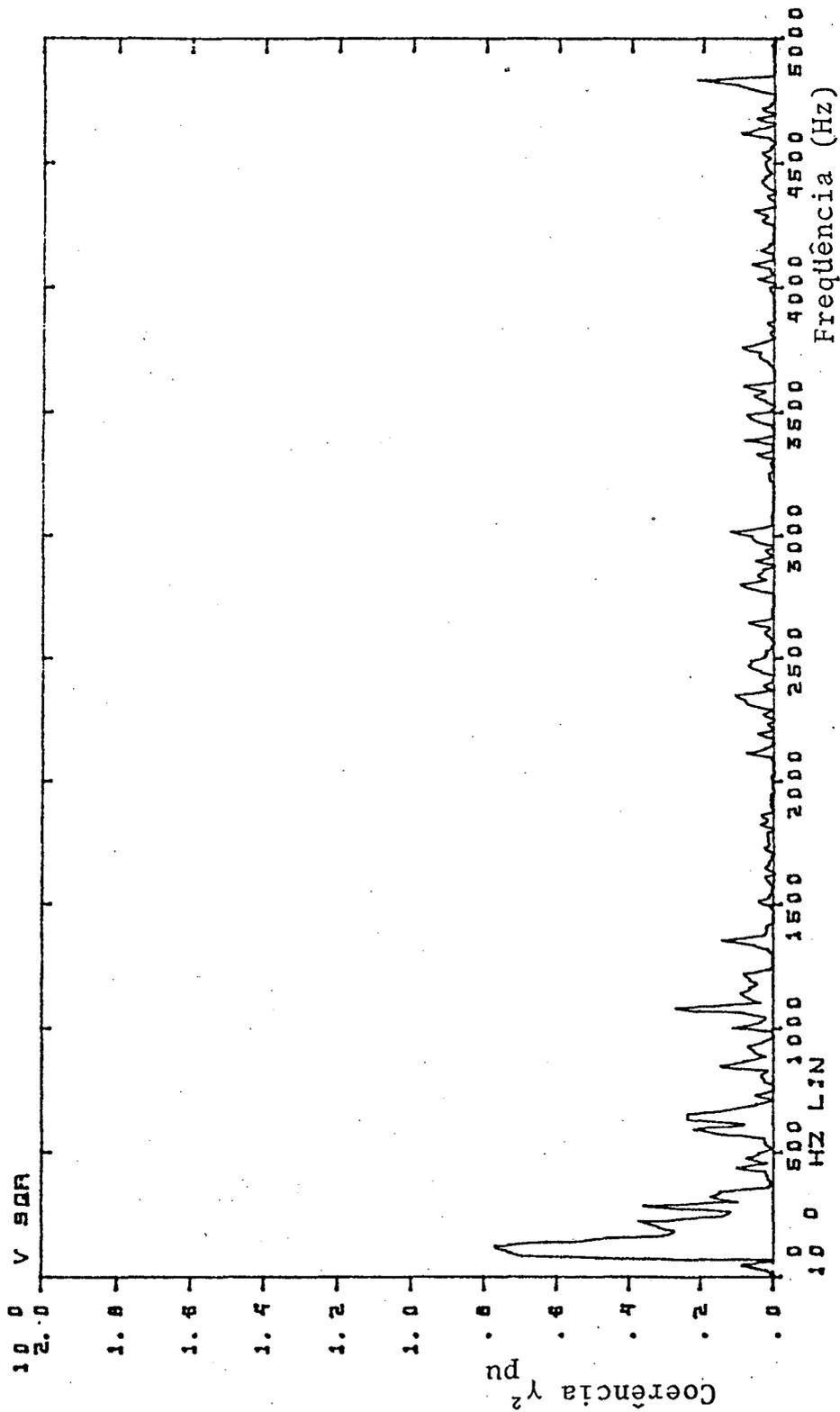


Figura 5.7 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central (C.R.G.).

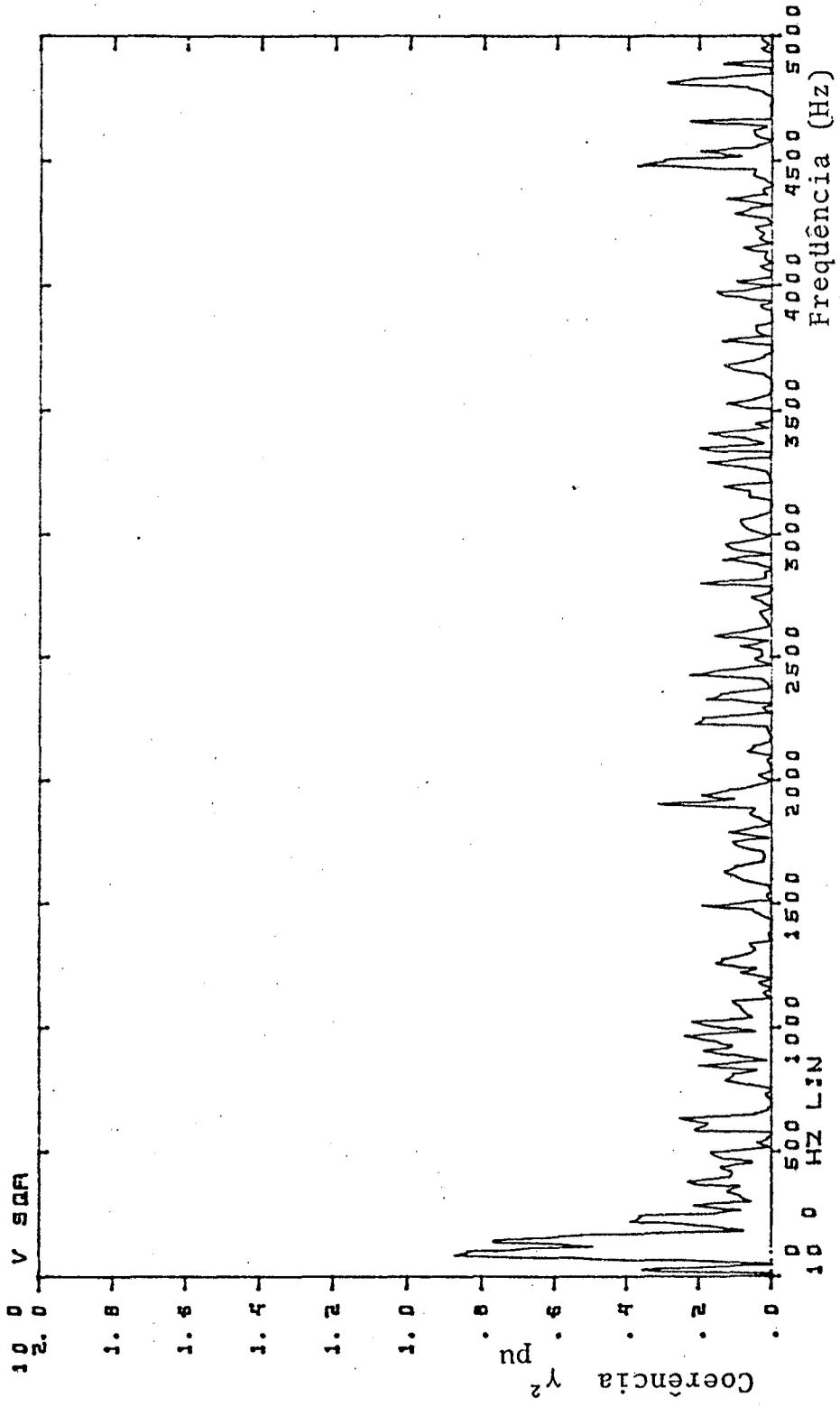


Figura 5.8 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição região central (C.R.G.).

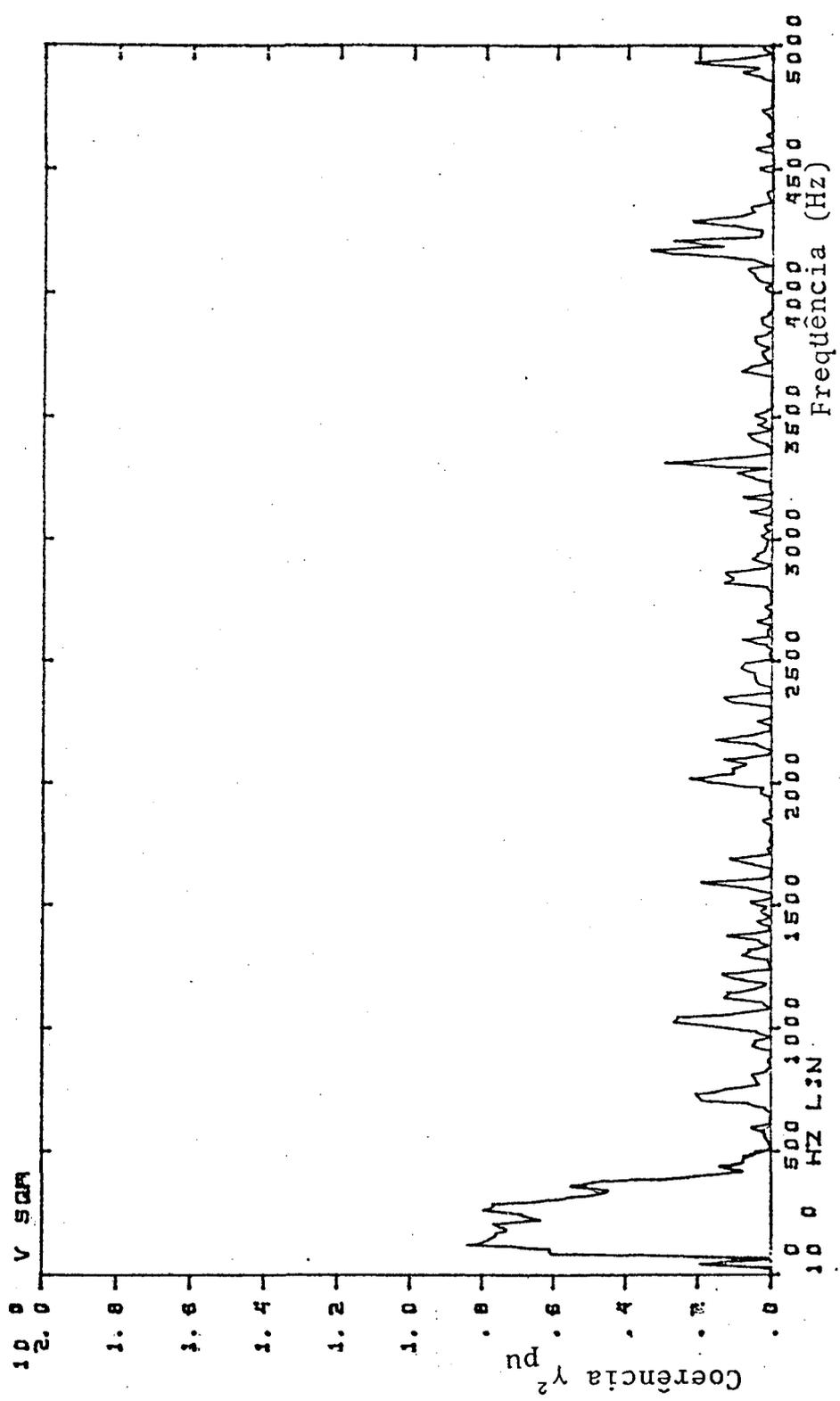


Figura 5.9 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
perto de parede. Microfones direção perpendicular e a  
20cm da parede.

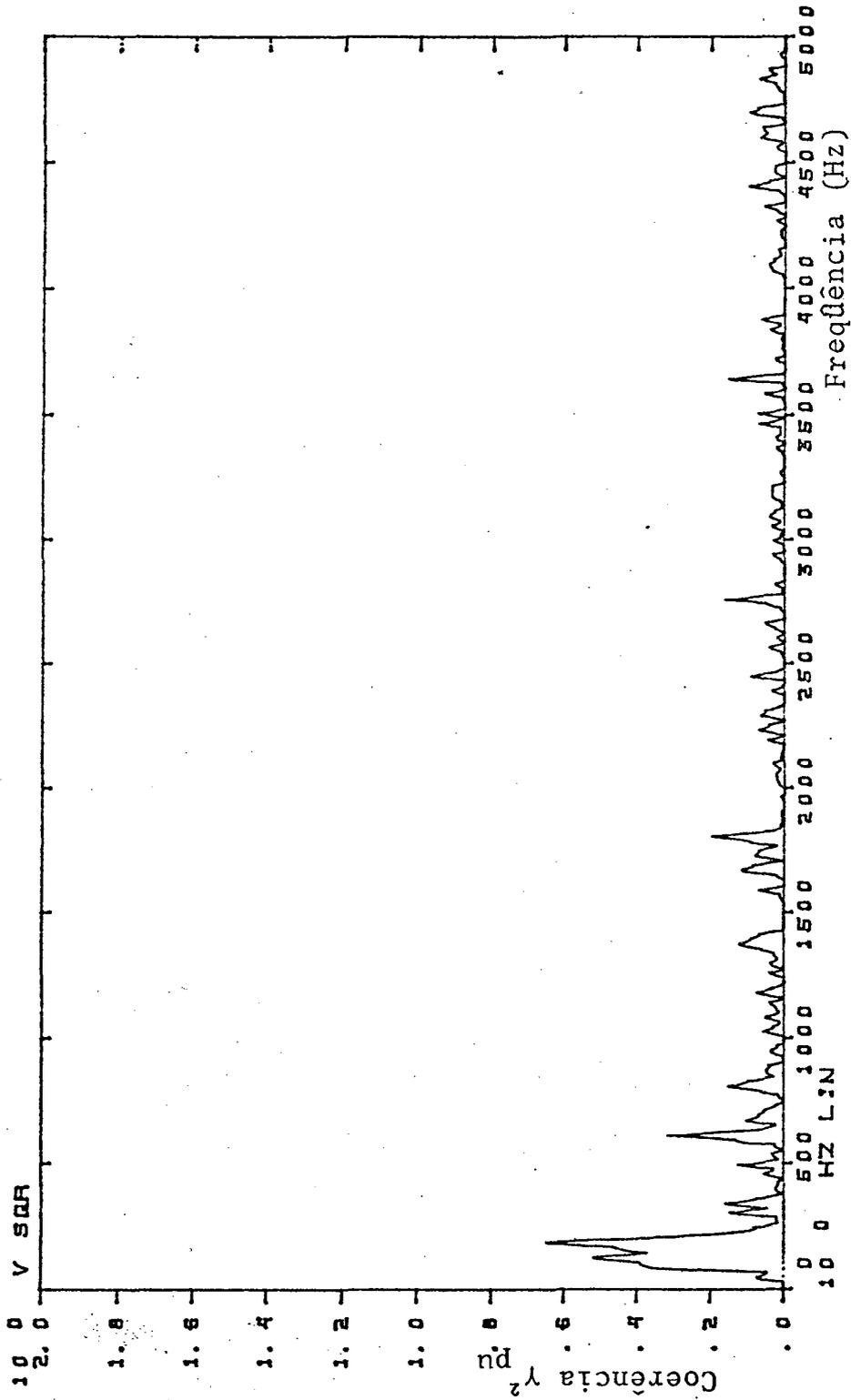


Figura 5.10 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da parede. Microfones direção paralela e a  
 20cm da parede; ponto 1.

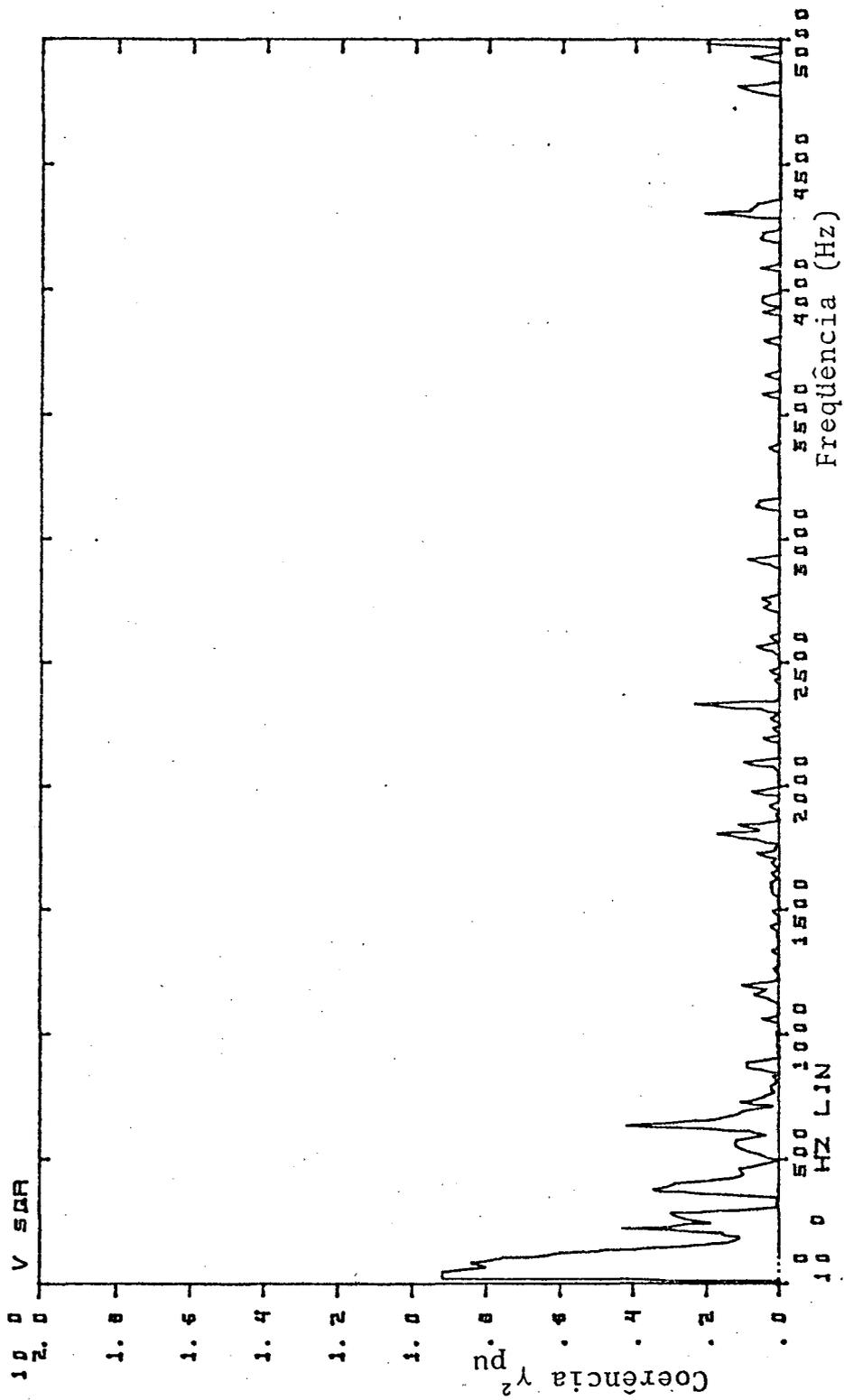


Figura 5.11 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da parede. Microfones direção paralela e a 20cm  
 da parede; ponto 2.

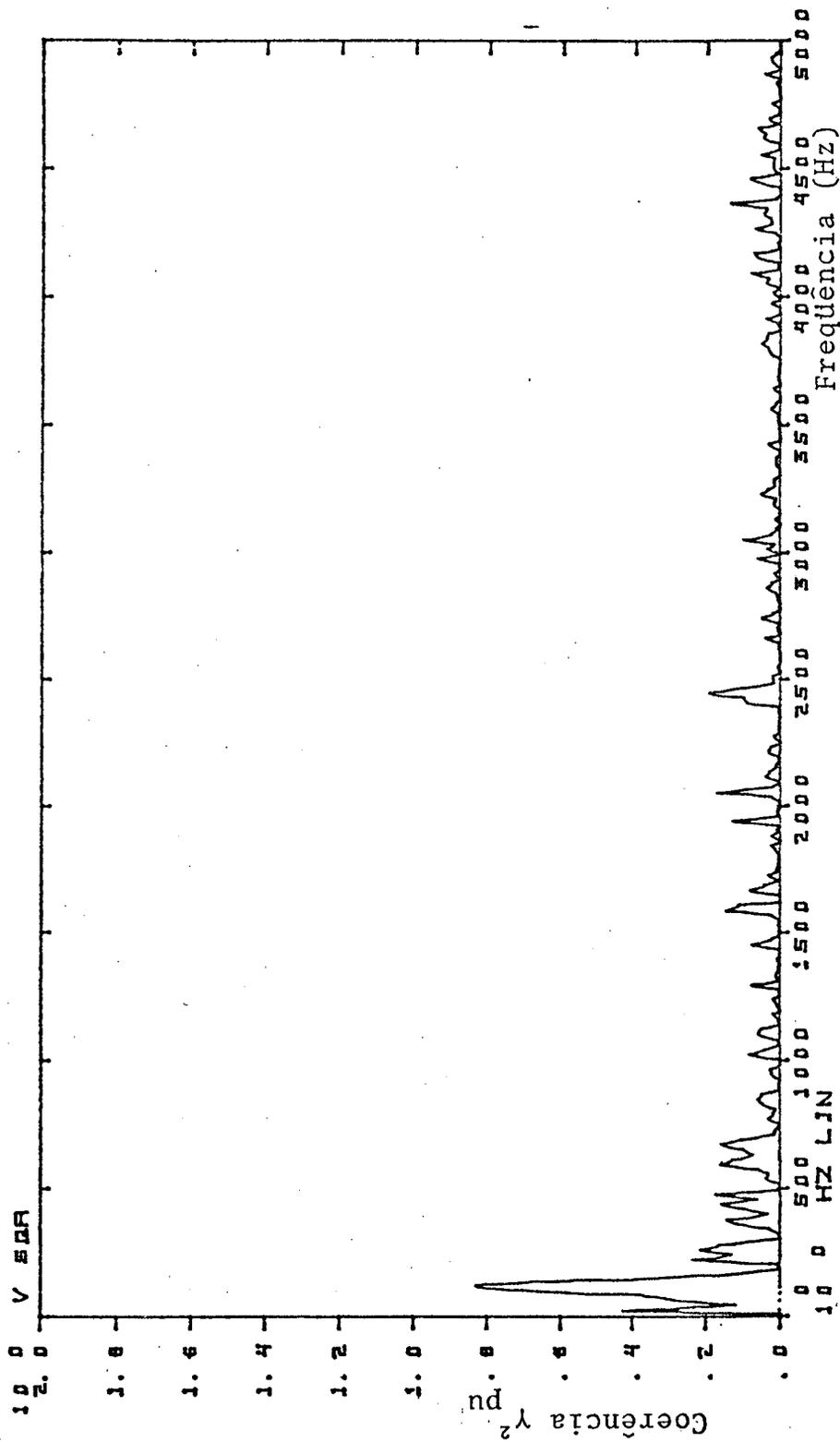


Figura 5.12 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
perto da parede

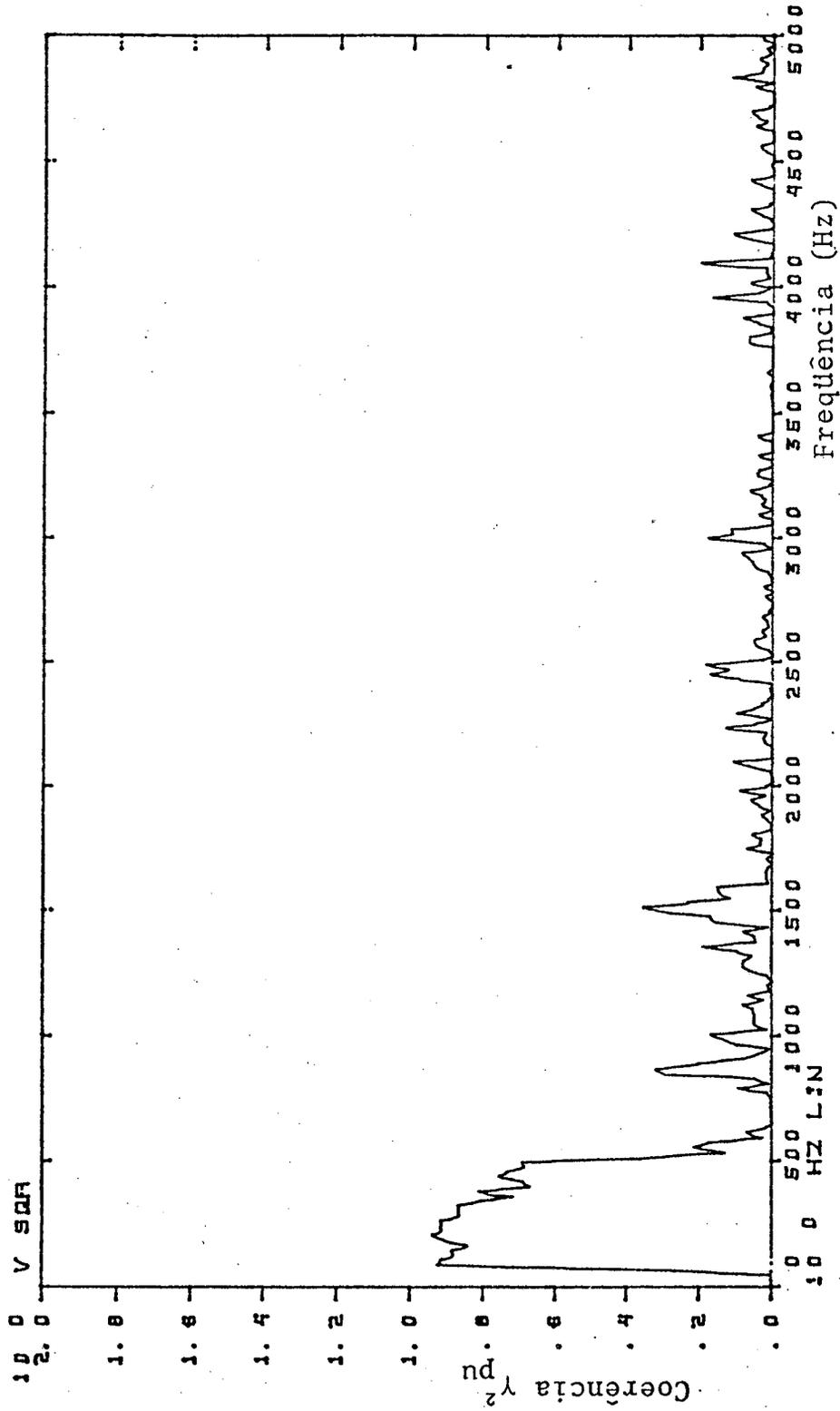


Figura 5.13 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da aresta. Microfones direção diagonal, a 20cm  
 da aresta e a 1,6m do solo.

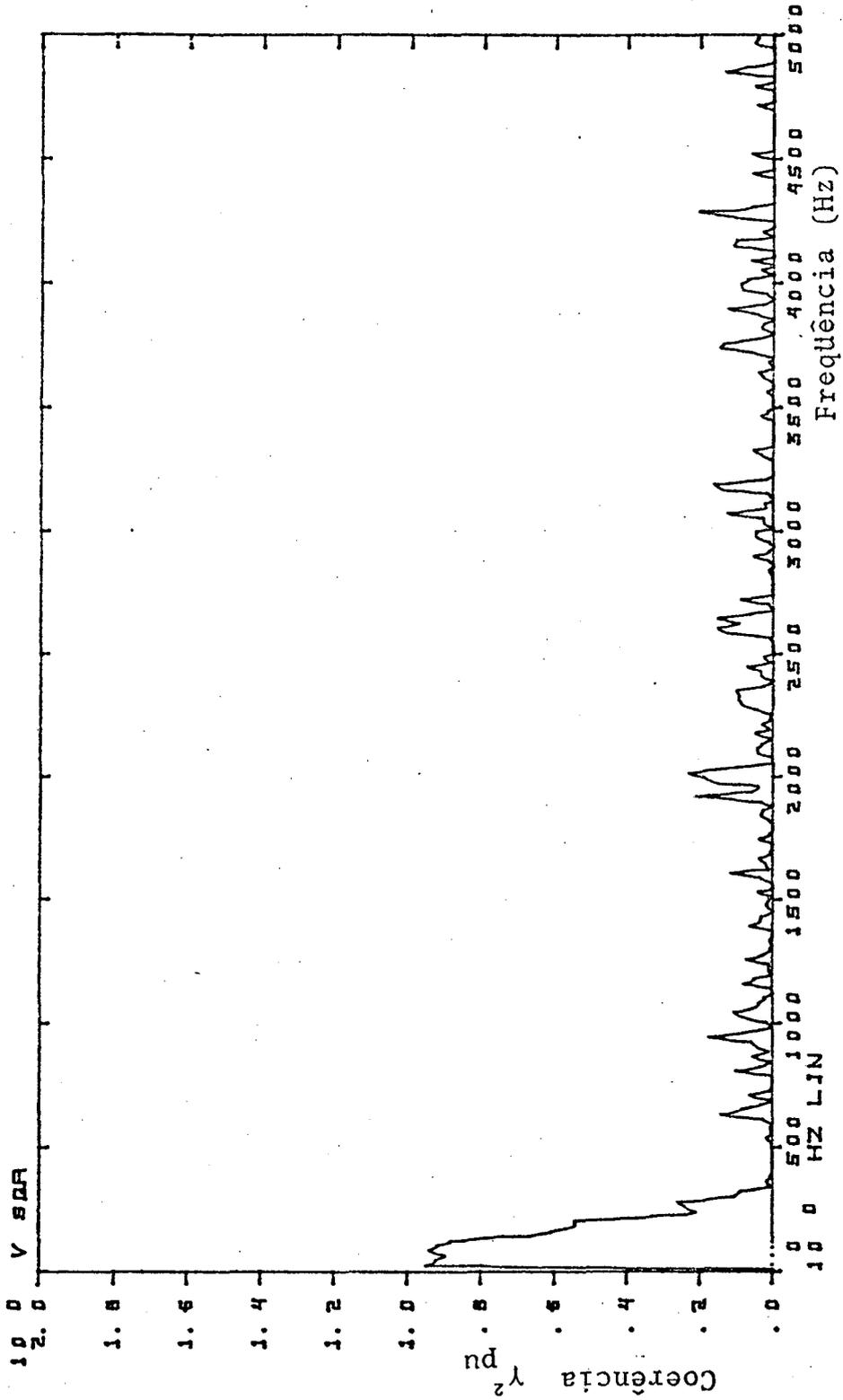


Figura 5.14 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da aresta.

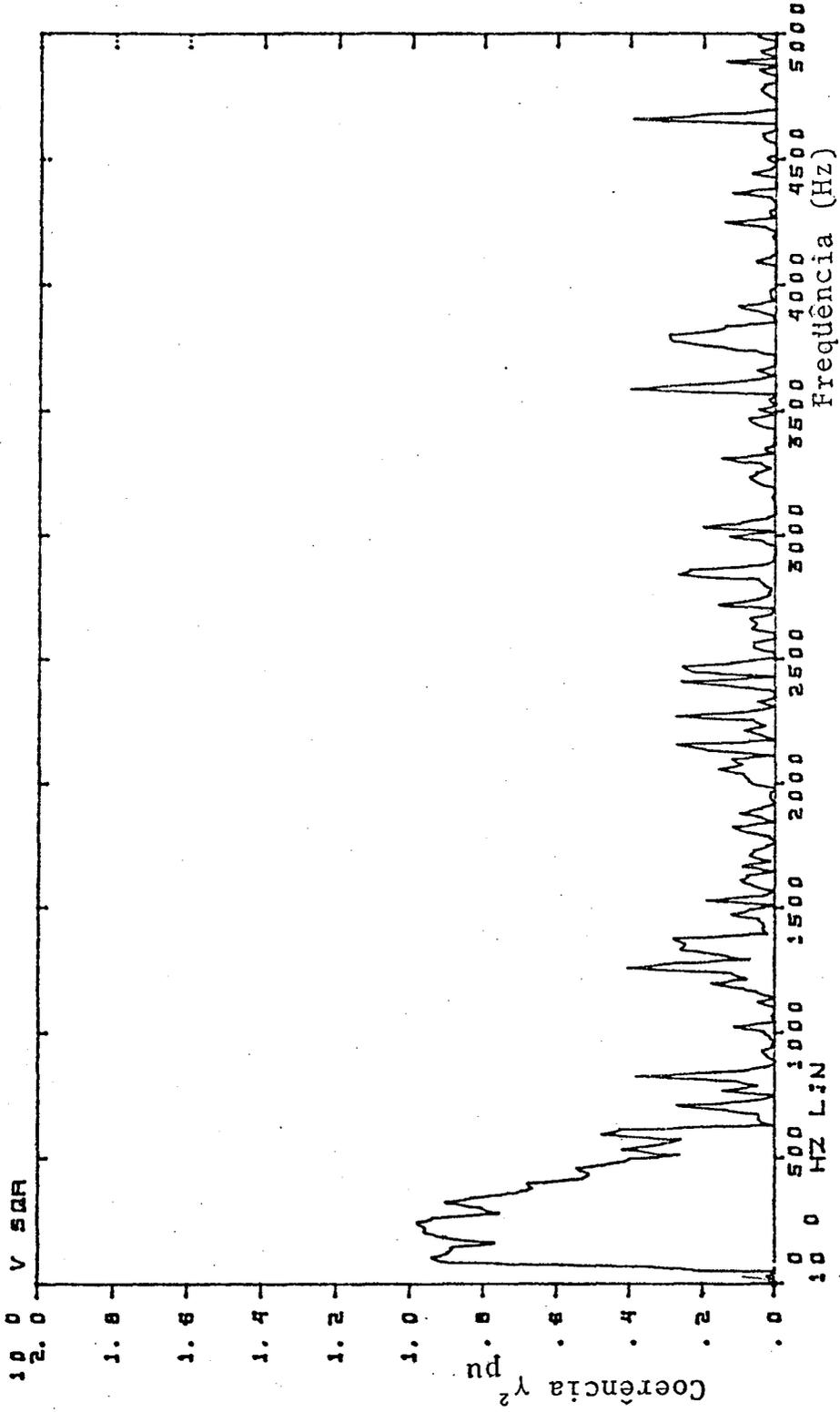


Figura 5.15 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto do canto. Microfones direção diagonal e a 20cm  
 do canto; ponto 1.

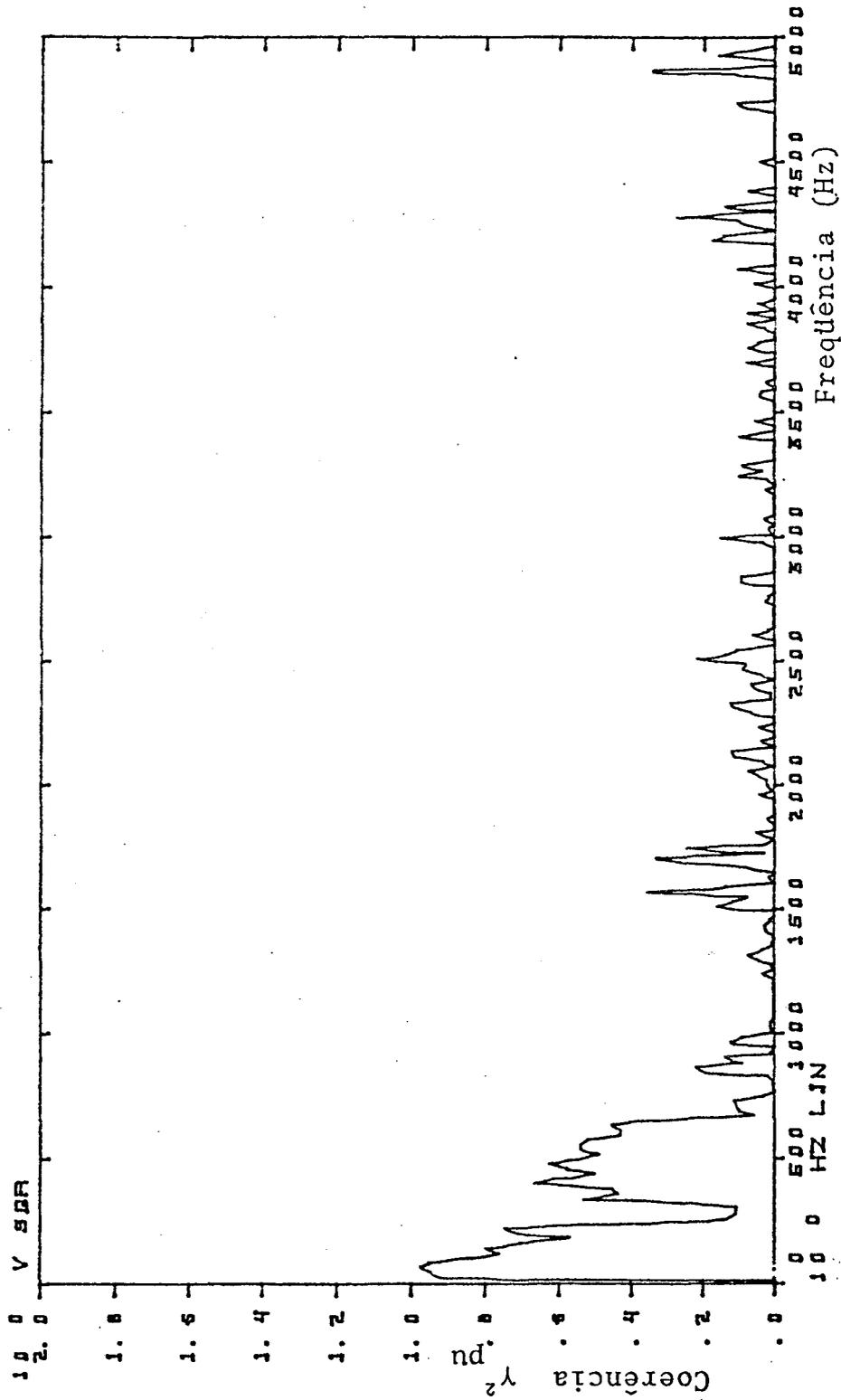


Figura 5.16 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto do canto; ponto 2.

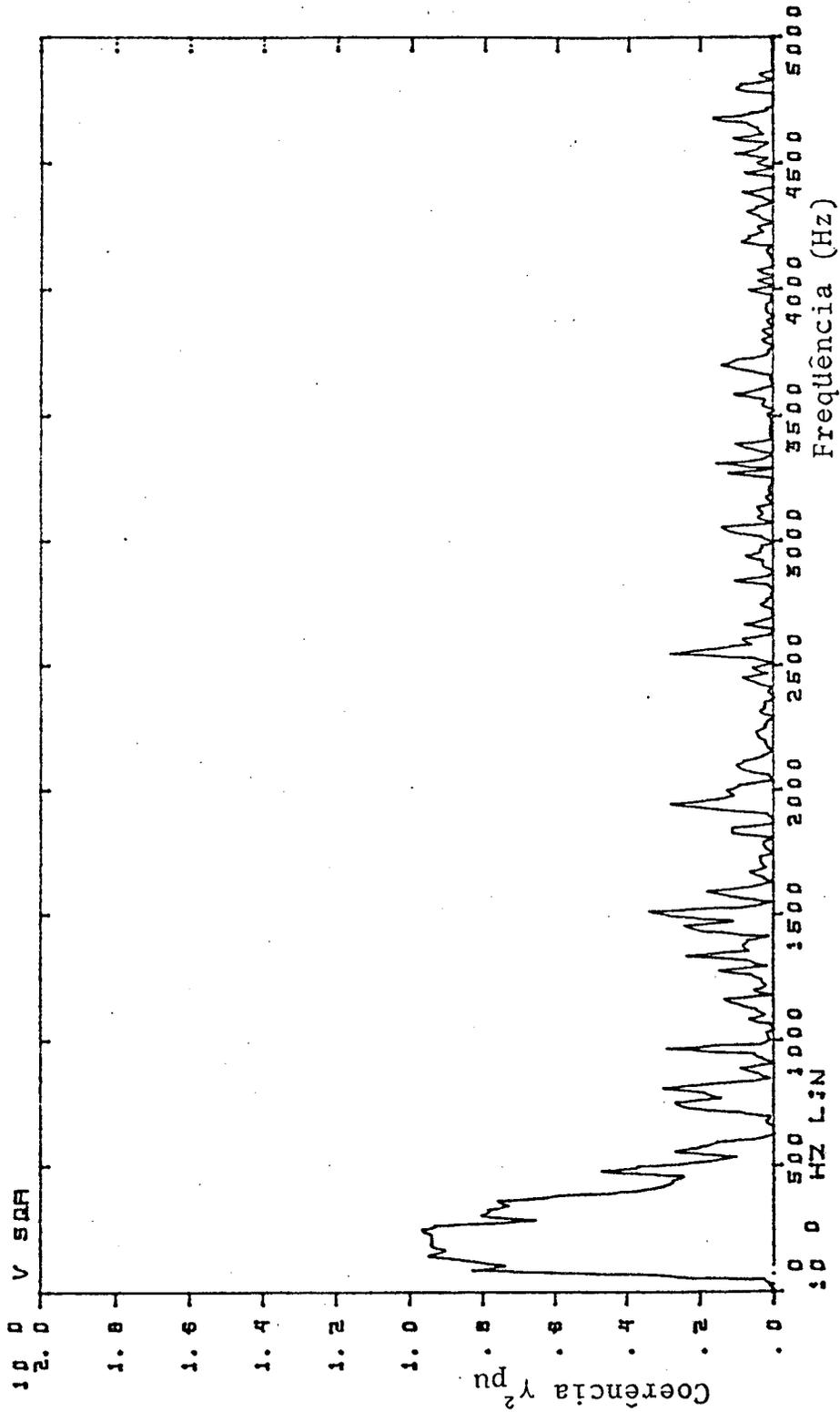


Figura 5.17 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto do canto; ponto 3.

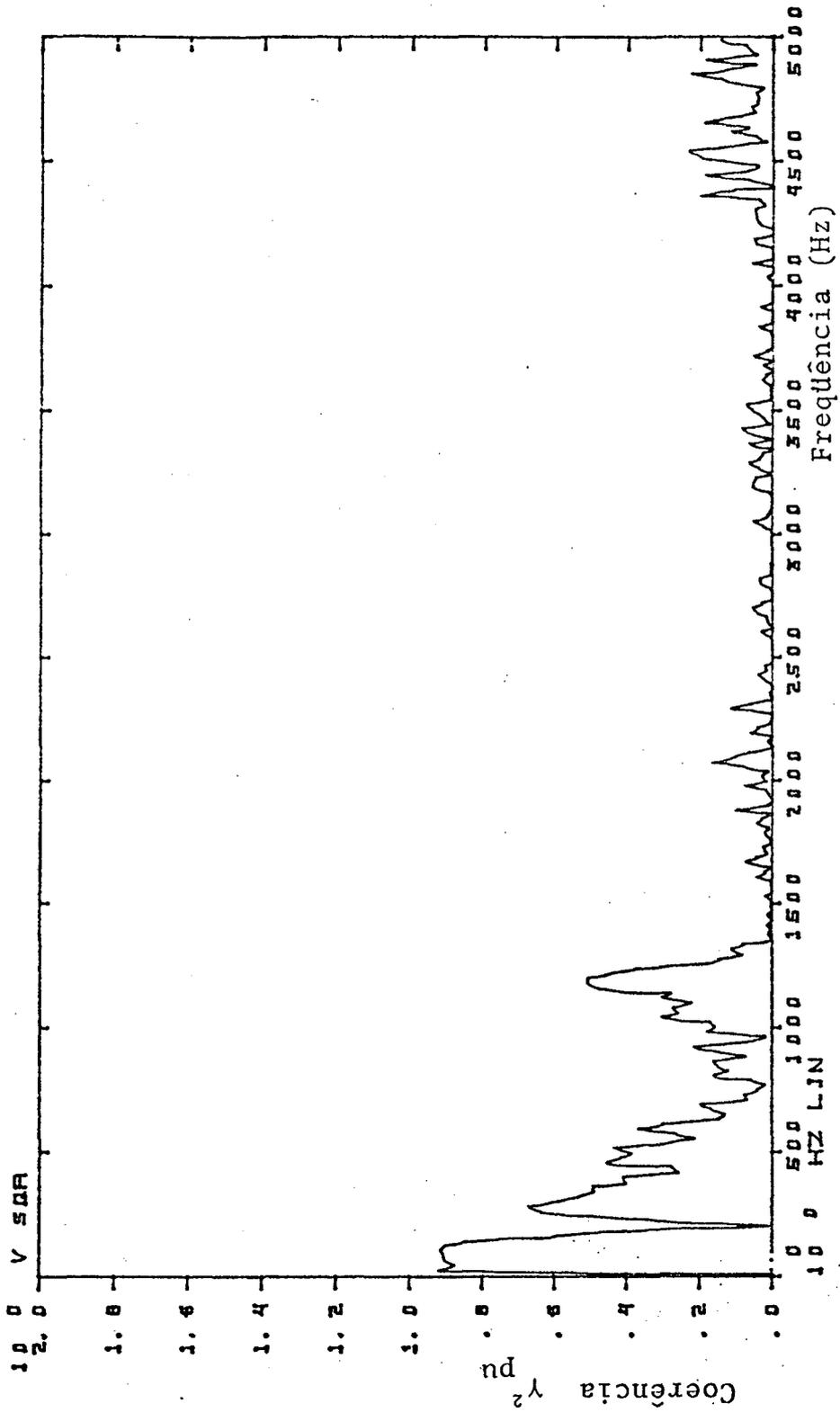


Figura 5.18 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto do canto. Microfones a 10cm do canto; ponto 4.

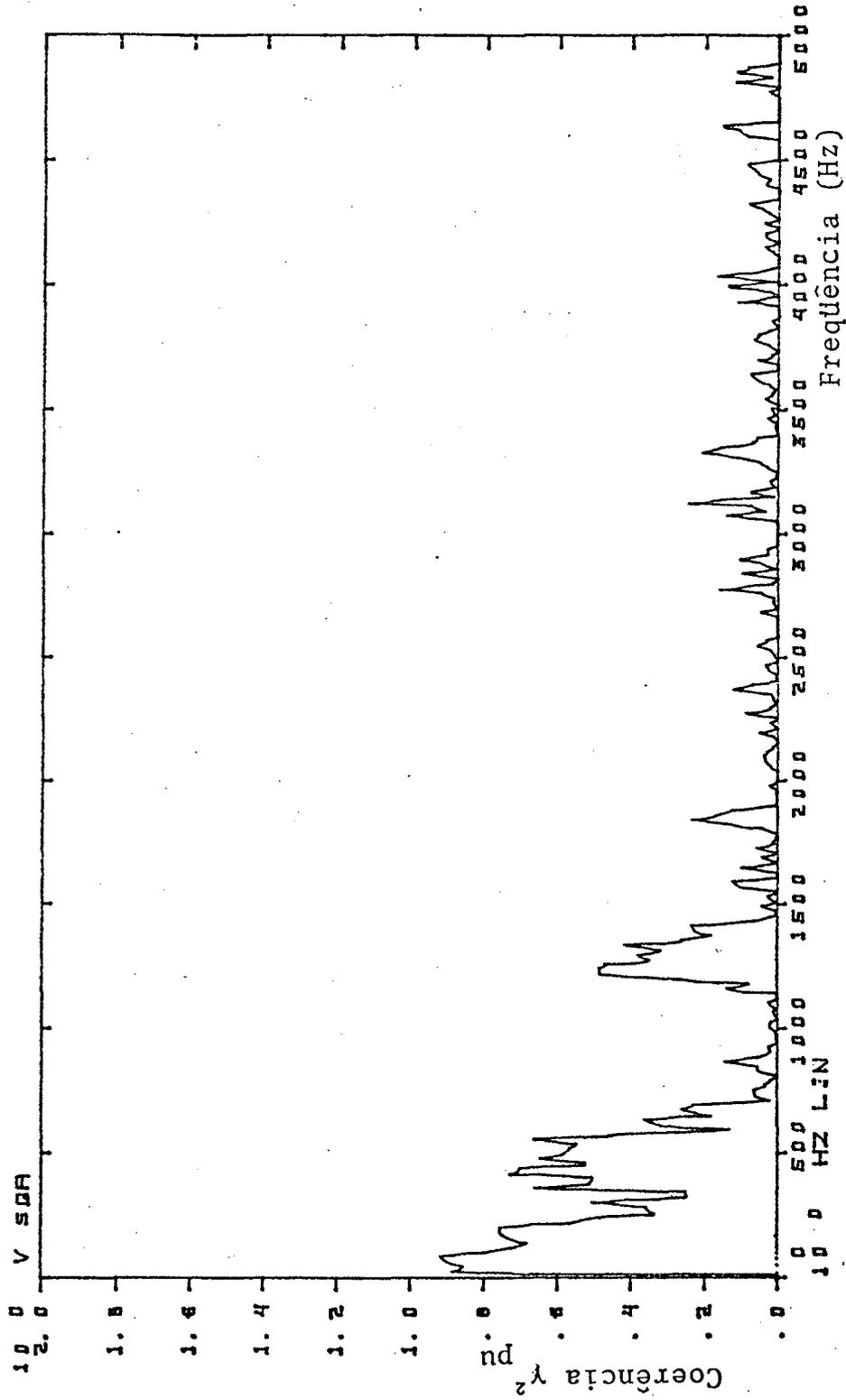


Figura 5.19 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto do canto. Microfones a 5cm do canto; ponto 5.

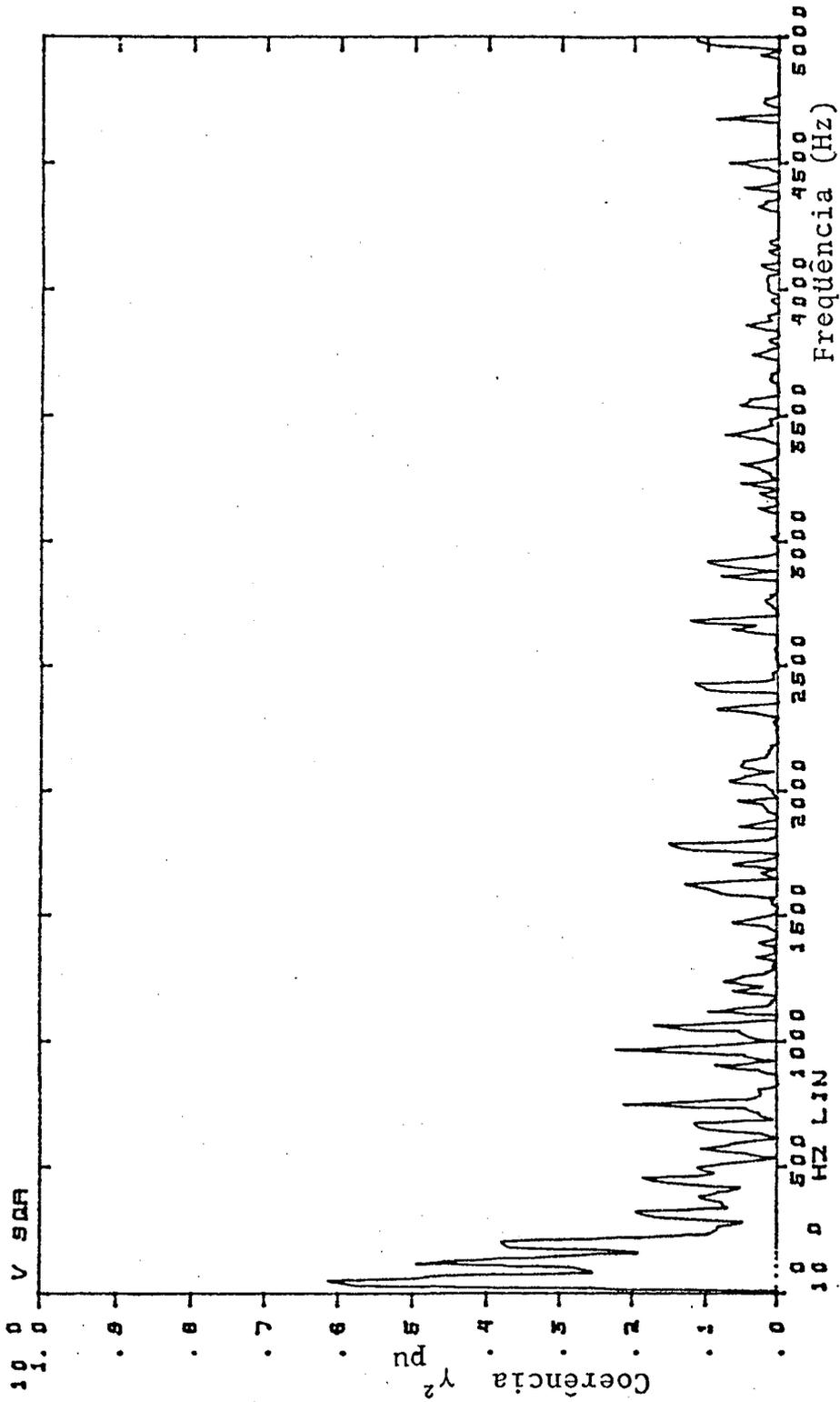


Figura 5.20 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da fonte sonora. Microfones colocados a 70cm  
 acima da fonte; ponto 1.

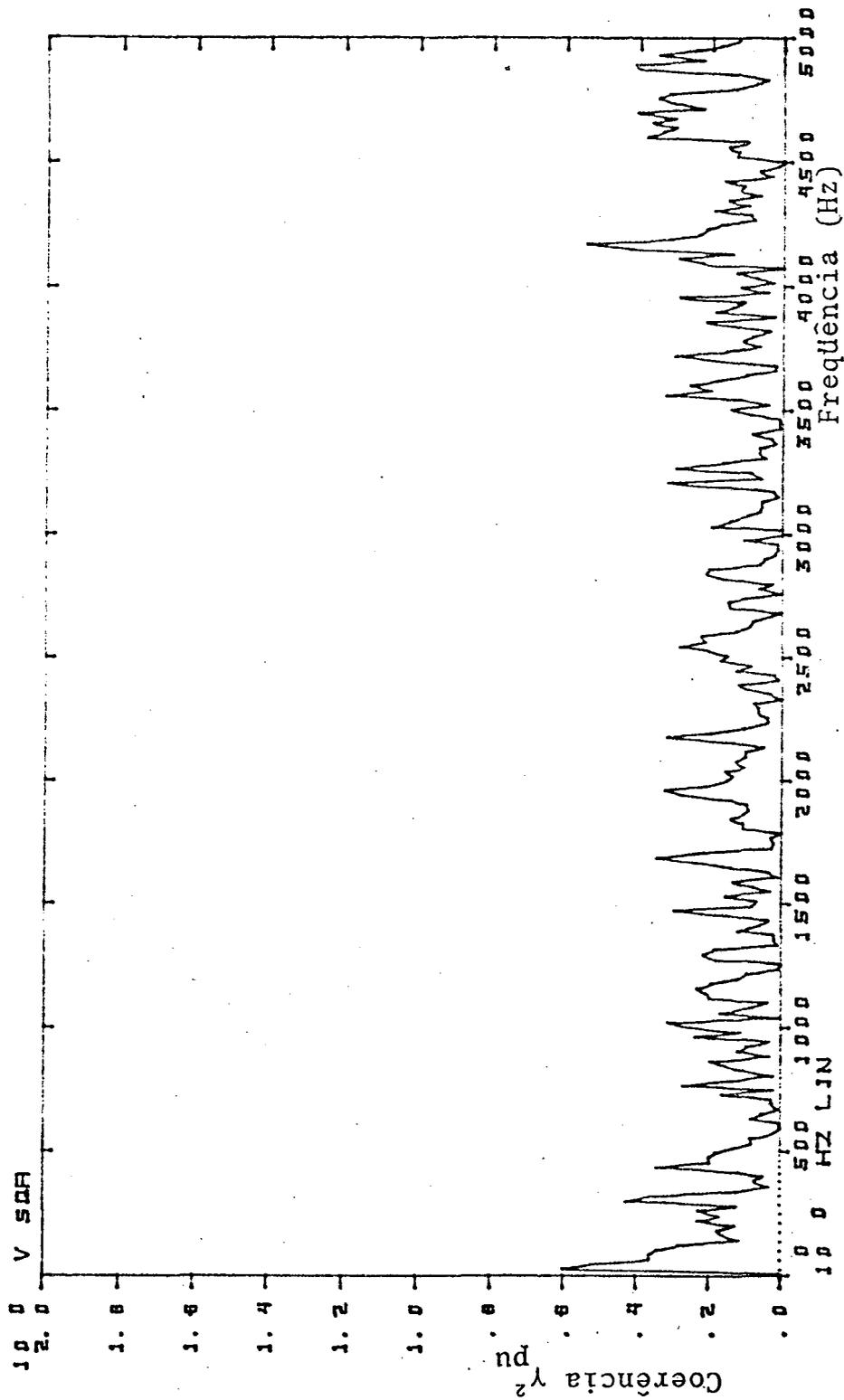


Figura 5.21 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da fonte sonora. Microfones colocados a 60cm da  
 fonte; ponto 2.

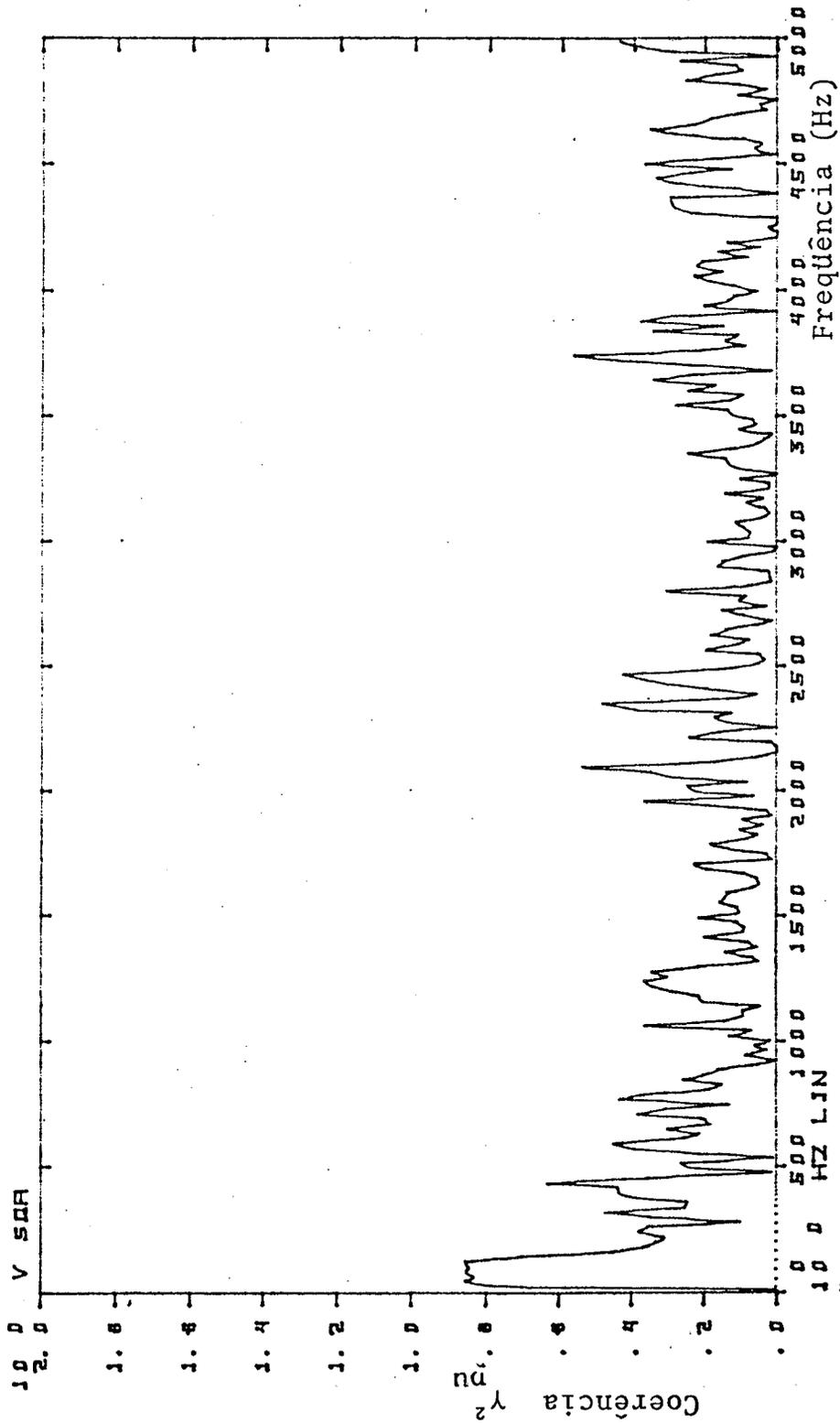


Figura 5.2.2 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da fonte sonora. Microfones a 30cm da fonte;  
 ponto 4.

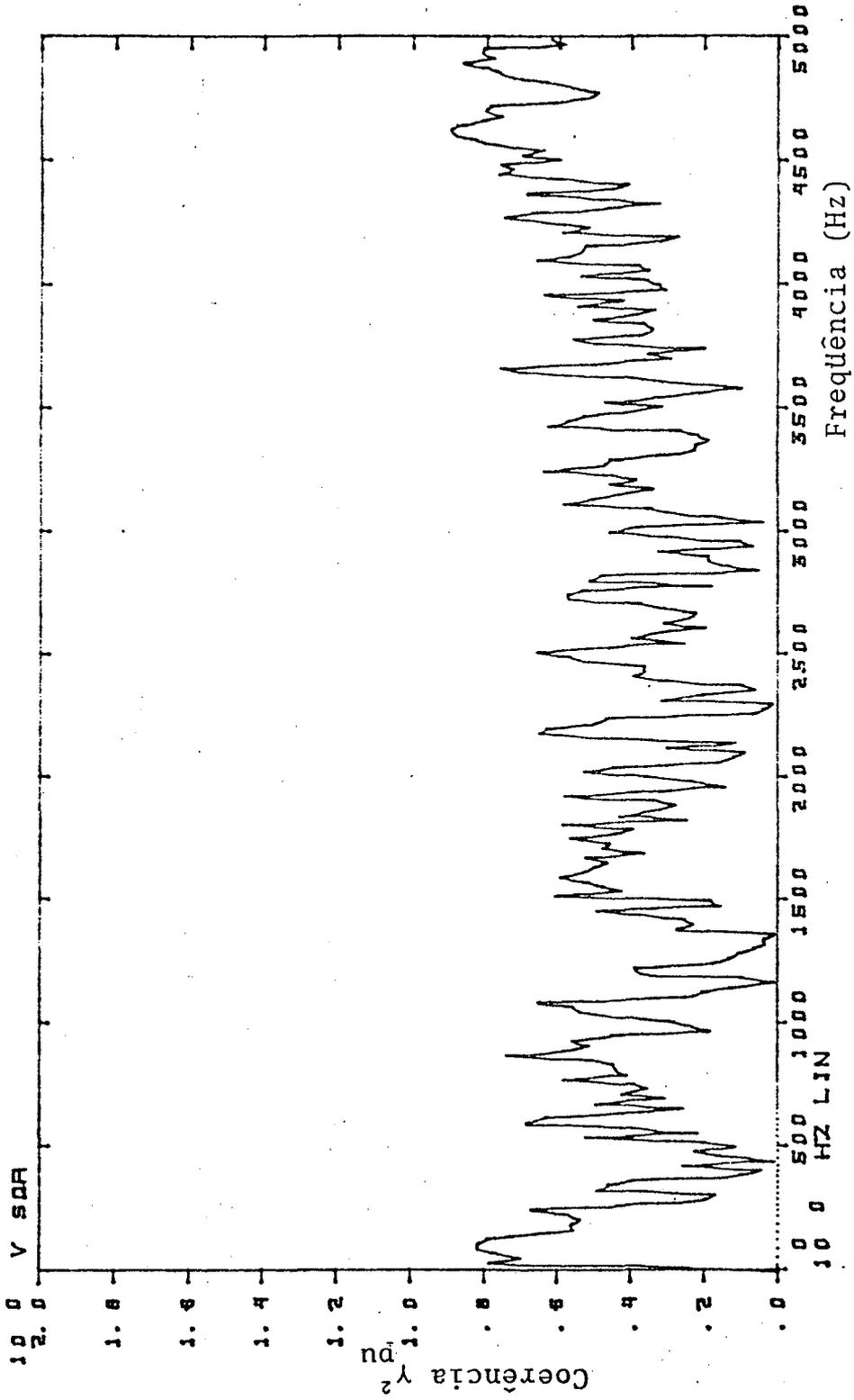


Figura 5.23 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da fonte sonora. Microfones a 20cm da fonte;  
 ponto 5.

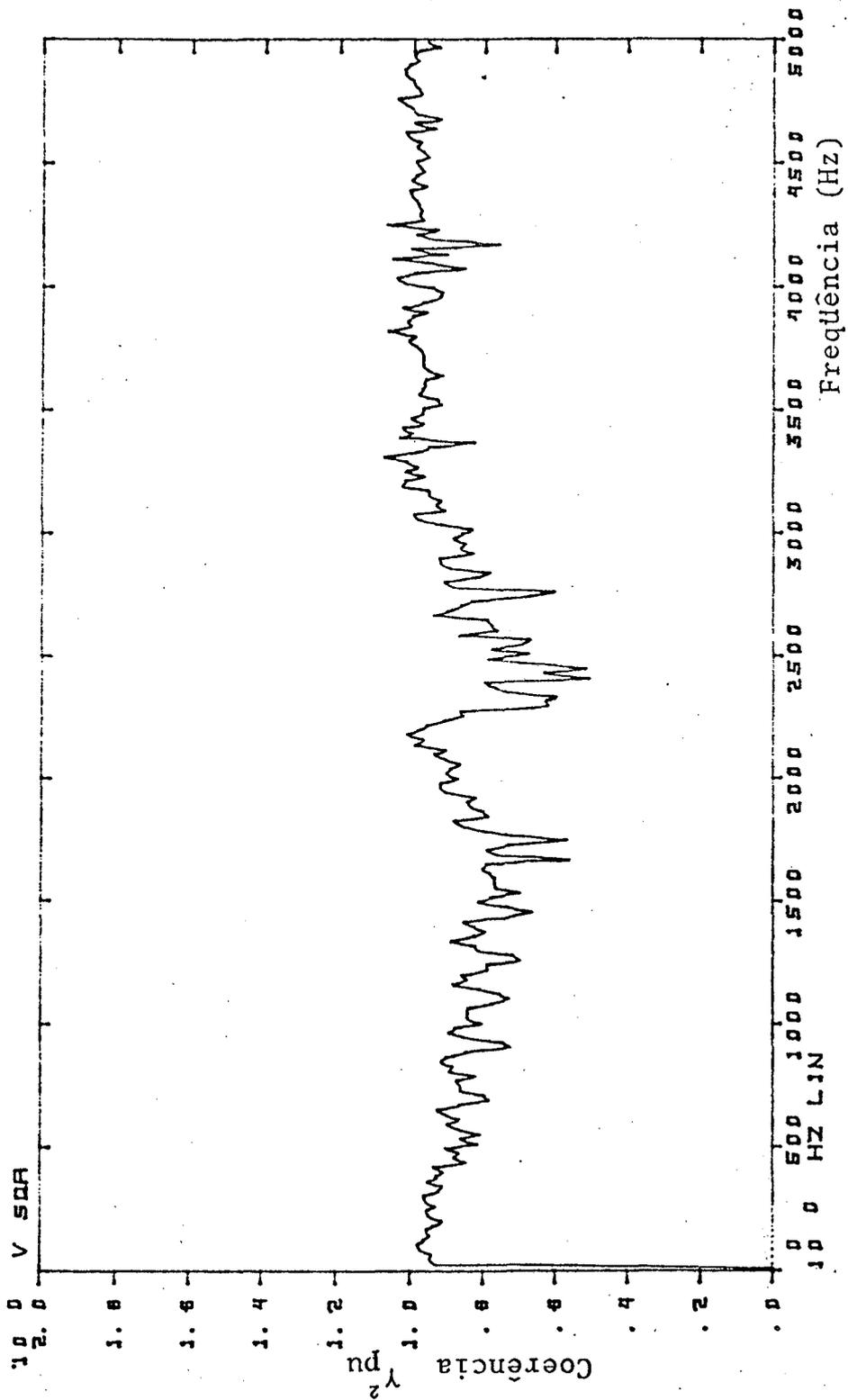


Figura 5.24 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.)  
 perto da fonte sonora. Microfones a 10cm da fonte;  
 ponto 6.

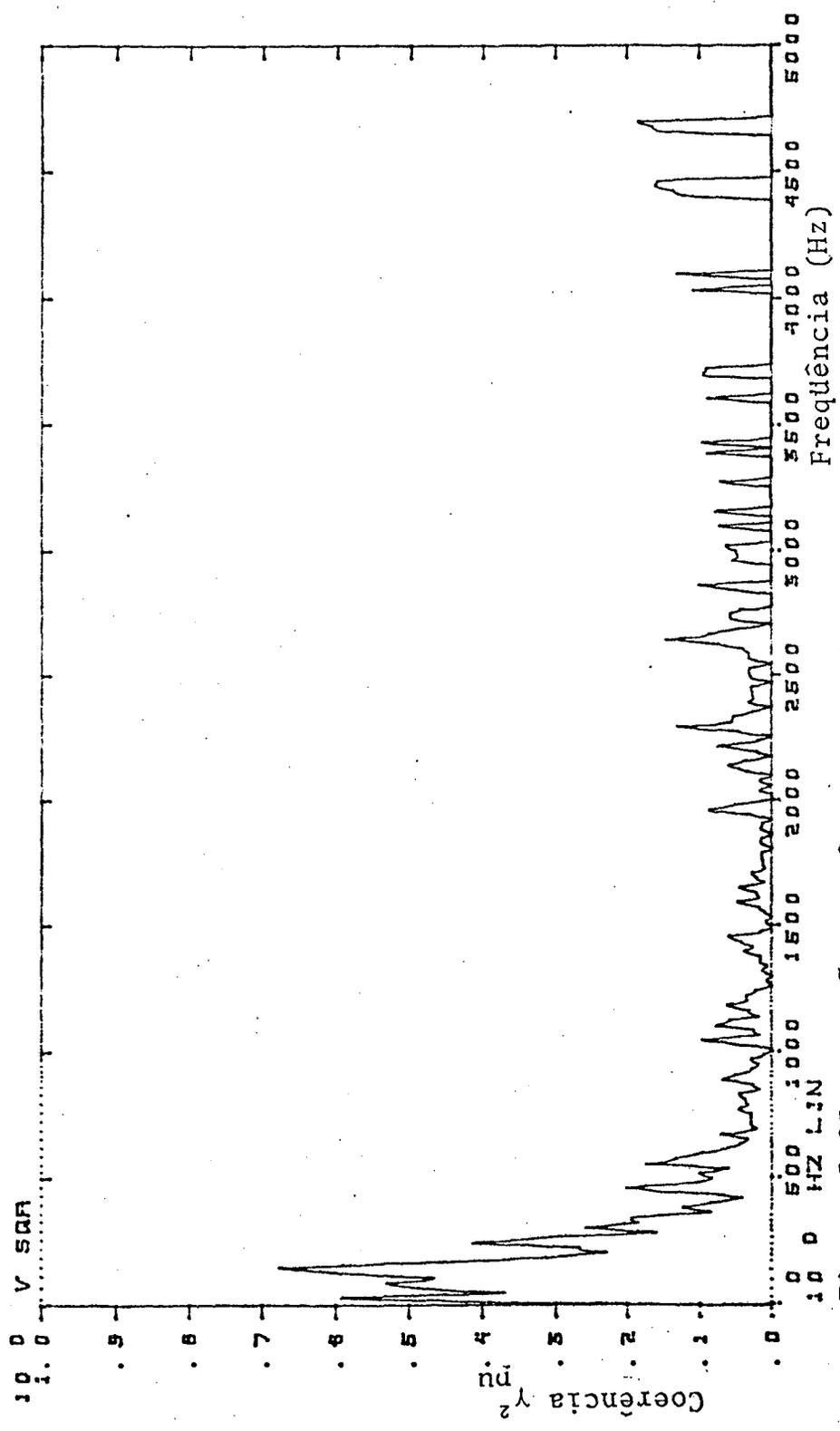


Figura 5.25 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.) em região central usando 2 fontes sonoras; ponto 1.

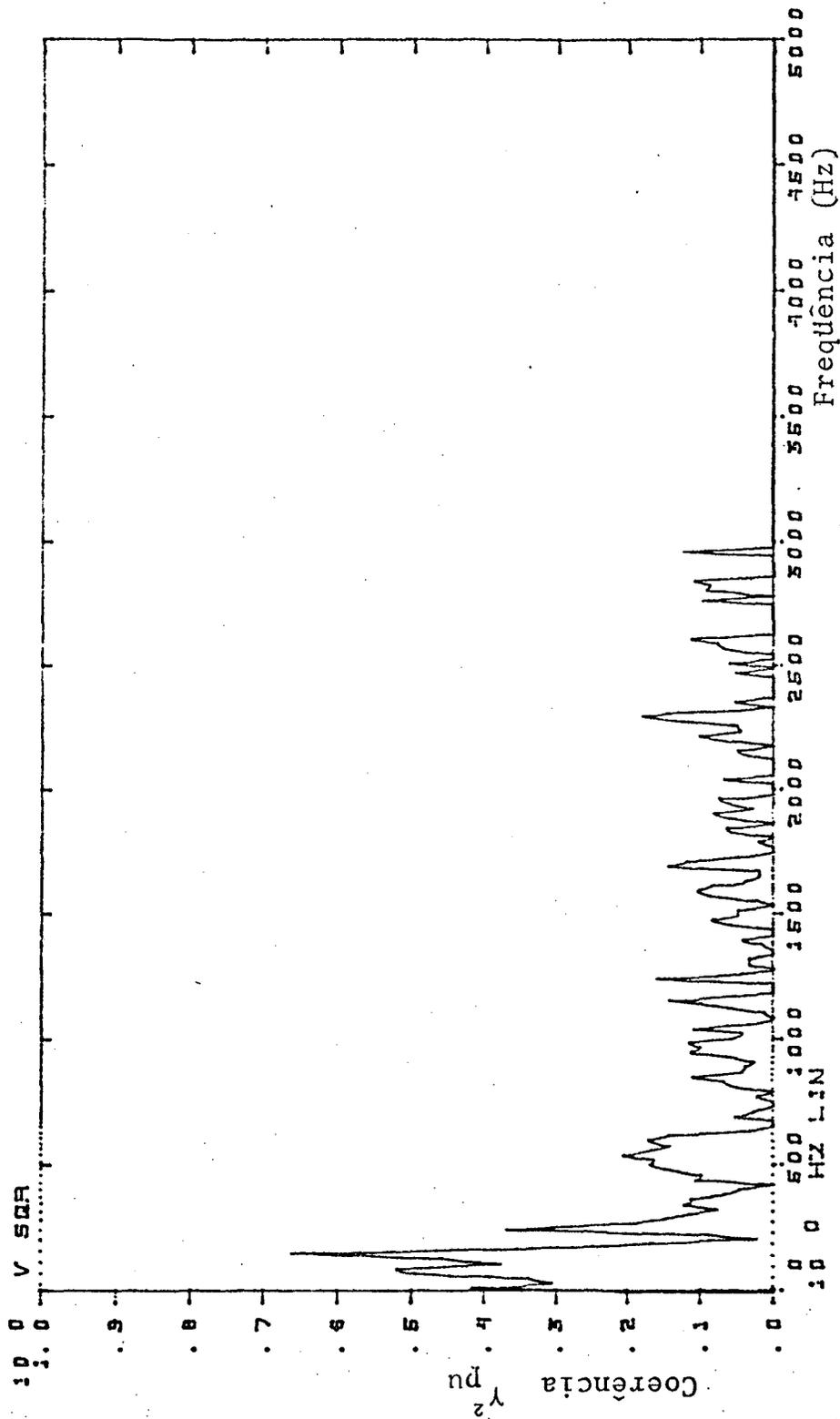


Figura 5.26 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição (C.R.G.) em região central usando 2 fontes sonoras; ponto 2.

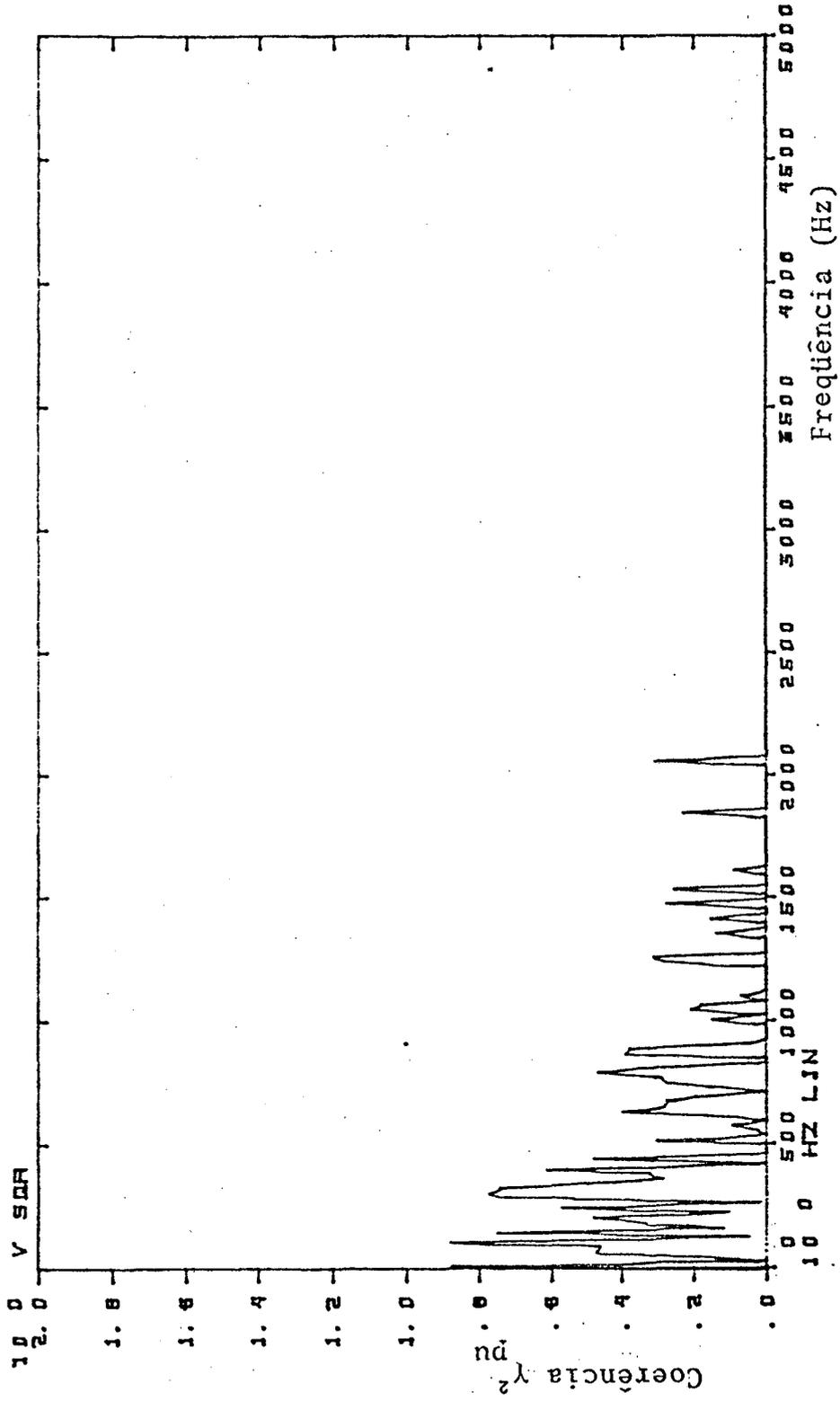


Figura 5.27 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição em região central da Câmara Reverberante Pequena (C.R.P.); ponto 1

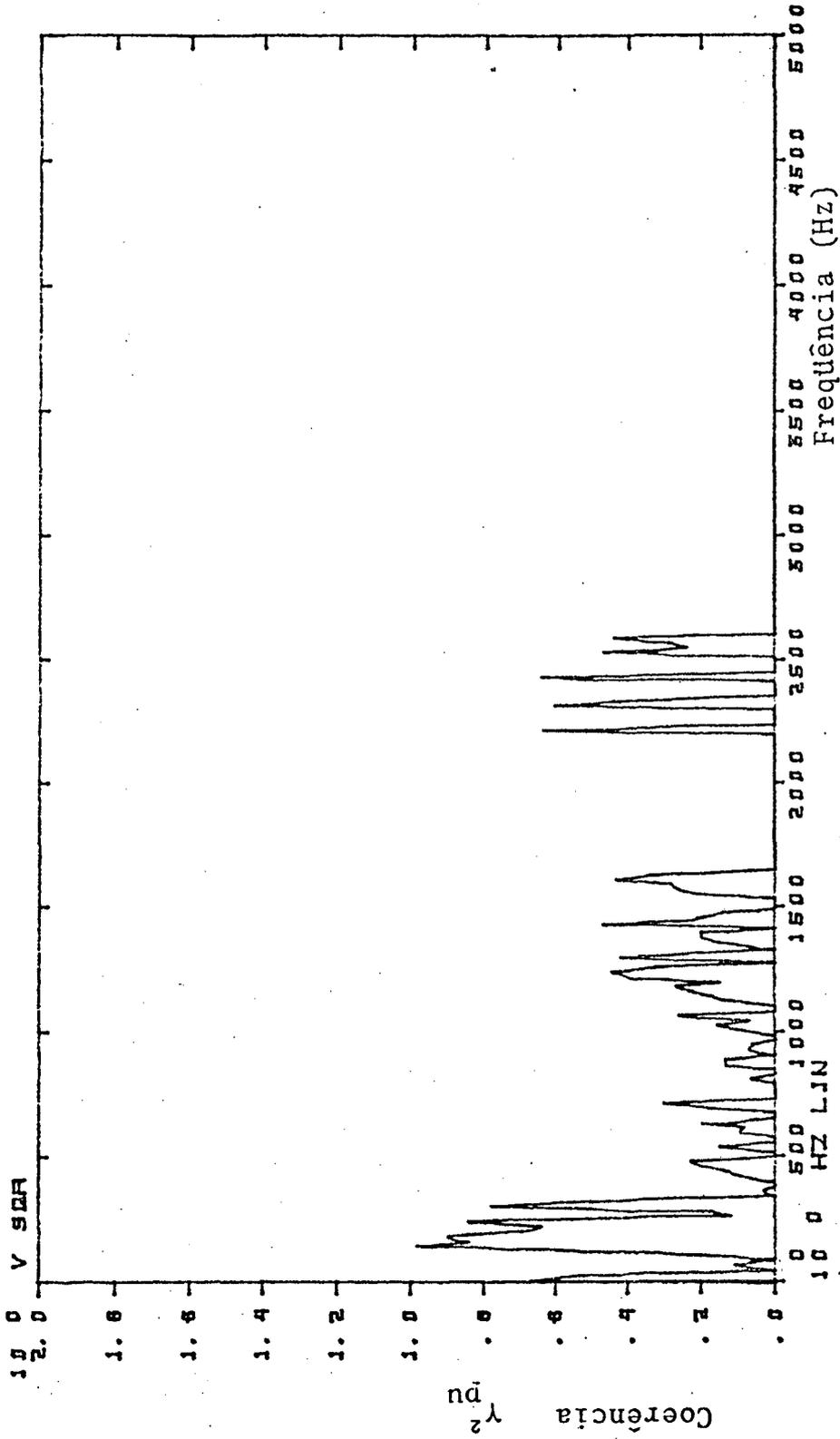


Figura 5.28 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição em região central da (C.R.P.); ponto 2

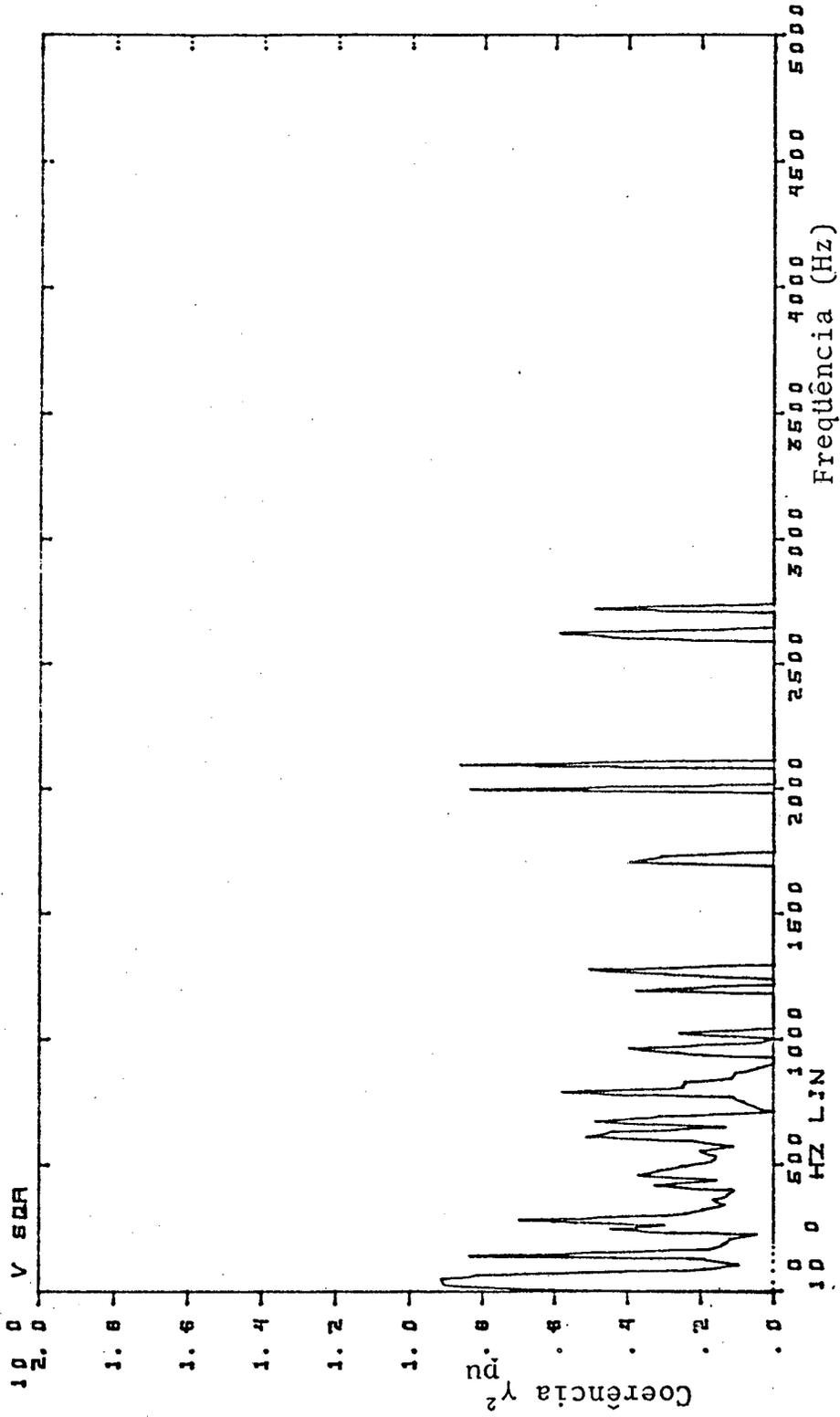


Figura 5.29 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição em região central da (C.R.P.); ponto 3

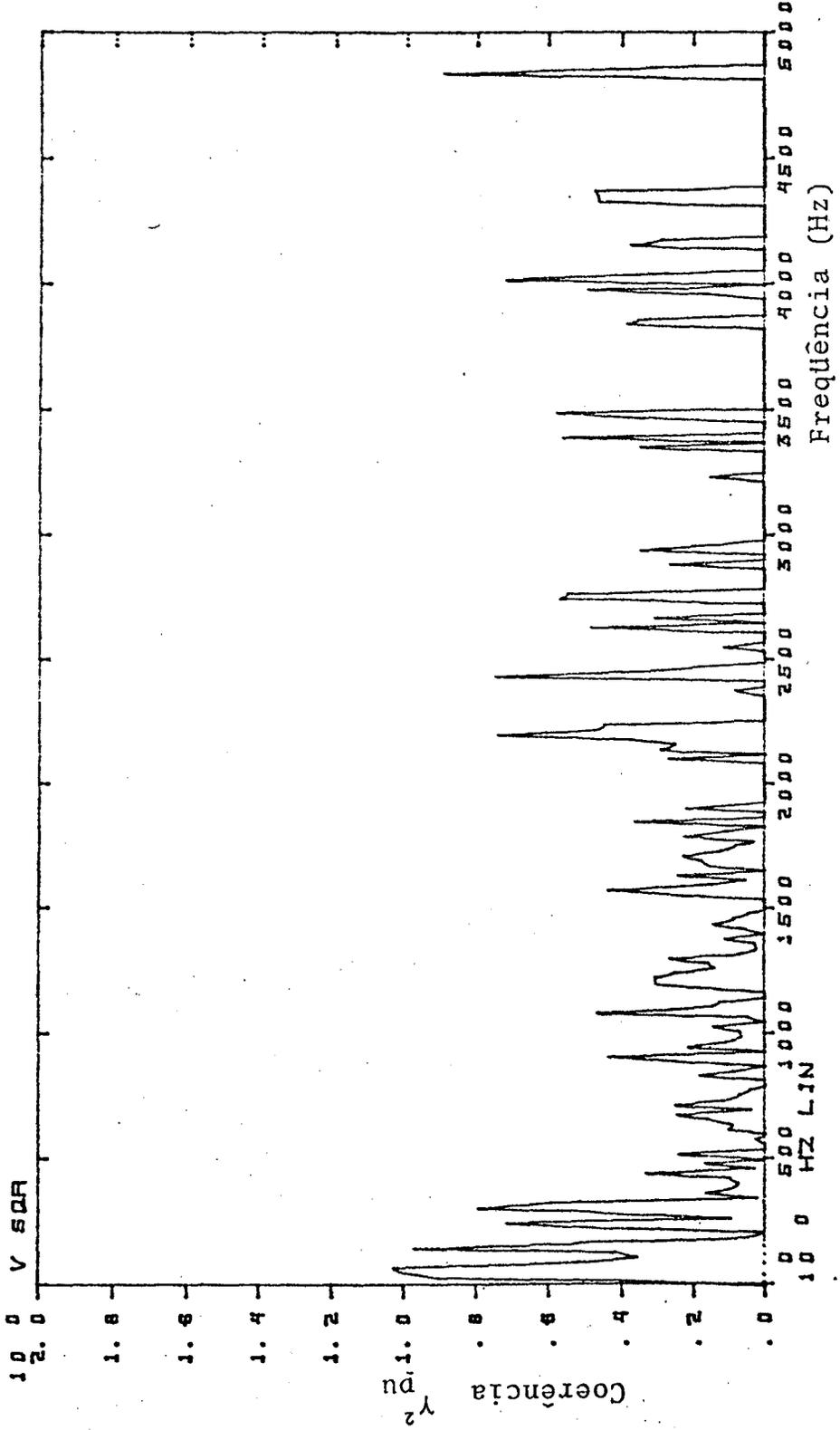


Figura 5.30 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição em região central da (C.R.P.); ponto 4

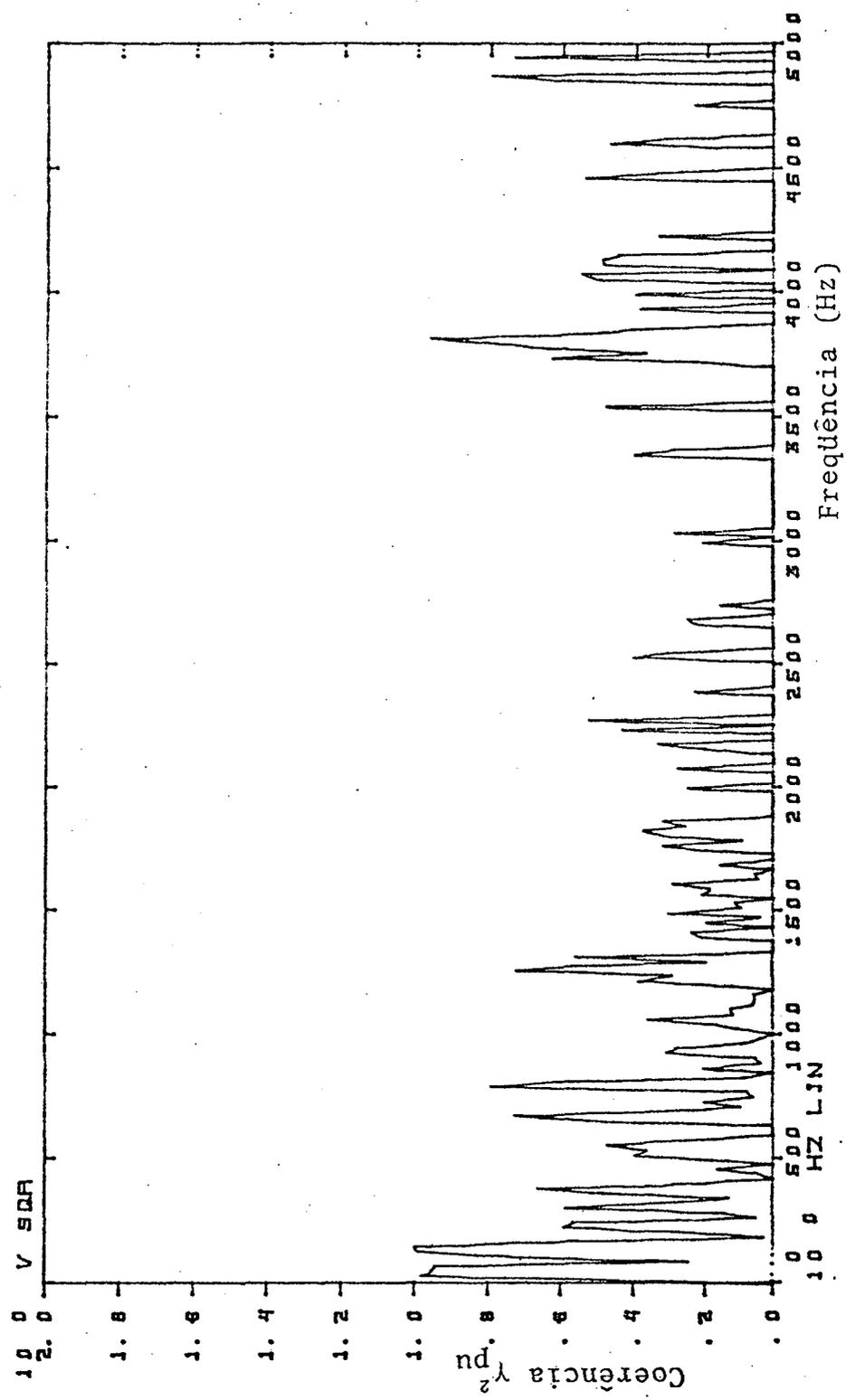


Figura 5.31 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição em região central da (C.R.P.); ponto 5 aproximando-se da parede

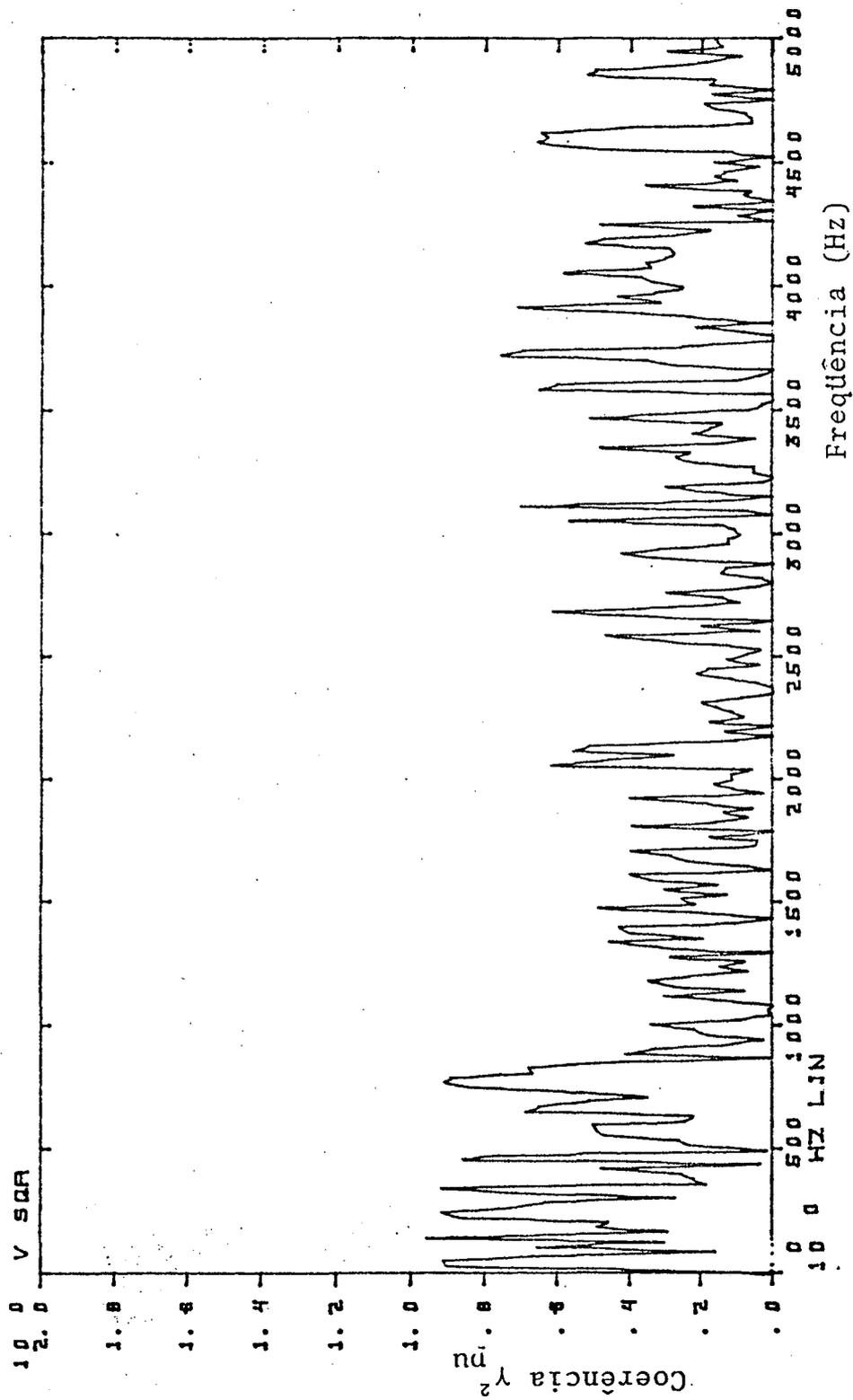


Figura 5.32 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da parede da (C.R.P.); ponto 1

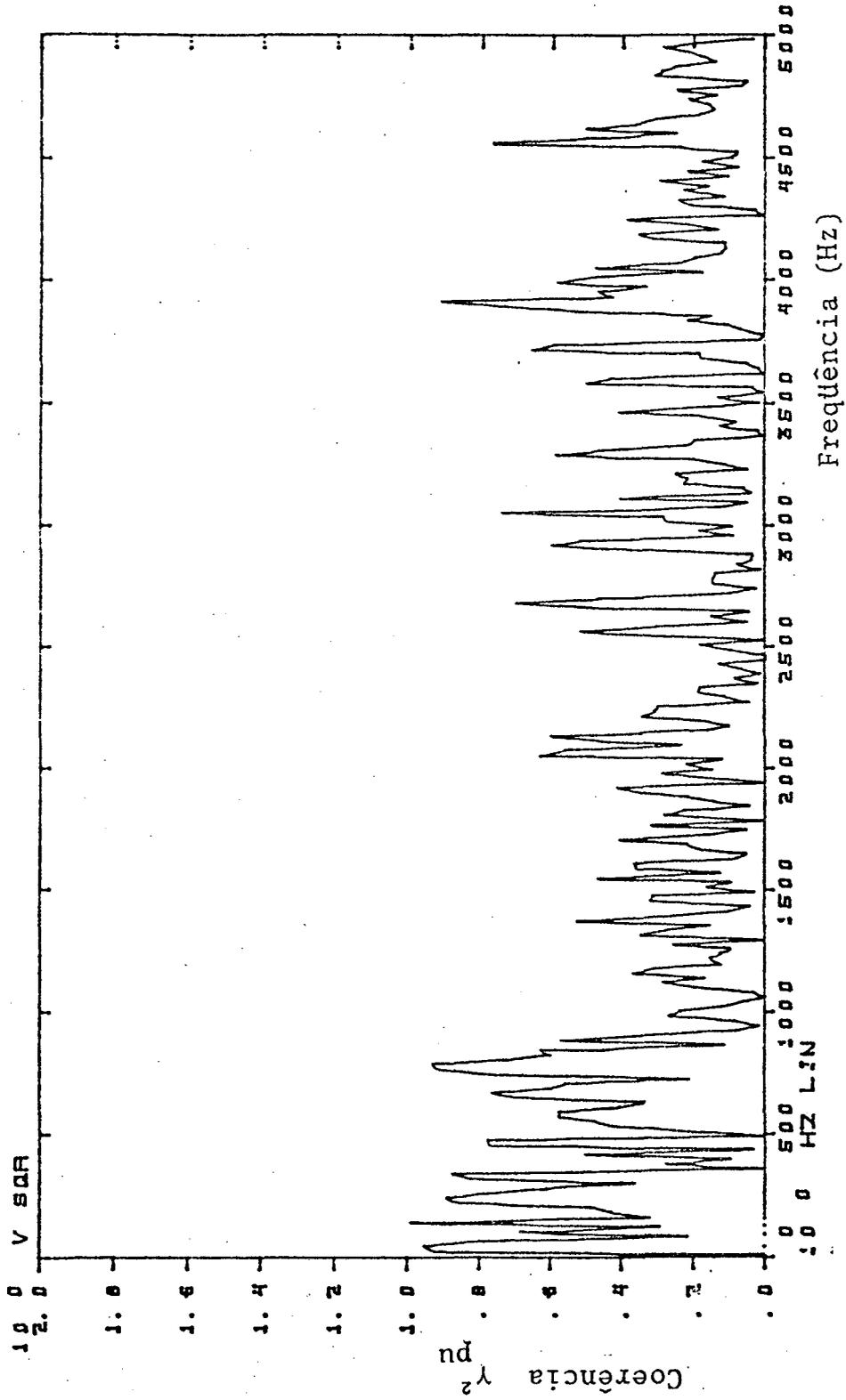


Figura 5.33 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da parede da (C.R.P.); ponto 2

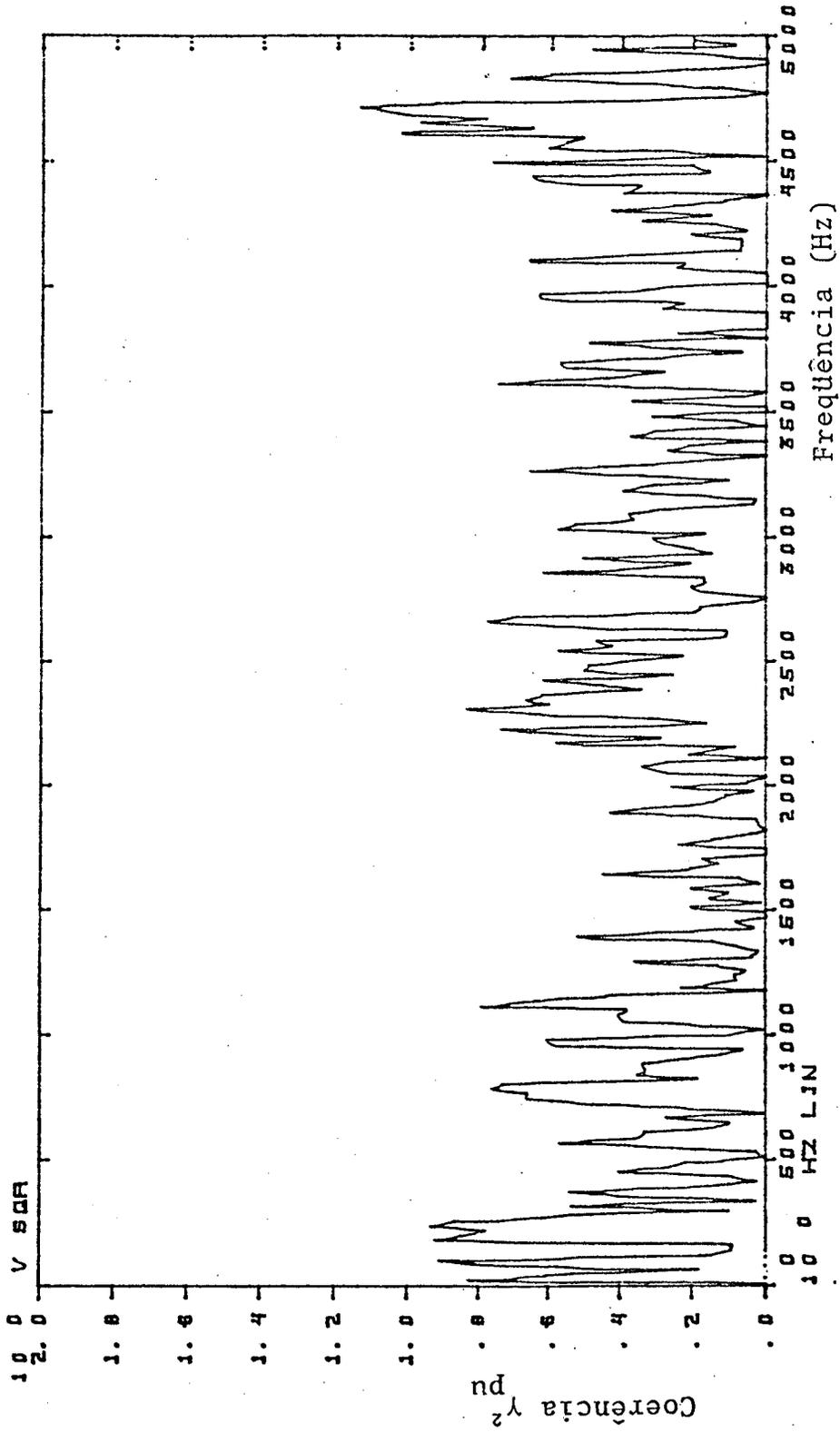


Figura 5.34 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da parede da (C.R.P.); ponto 3

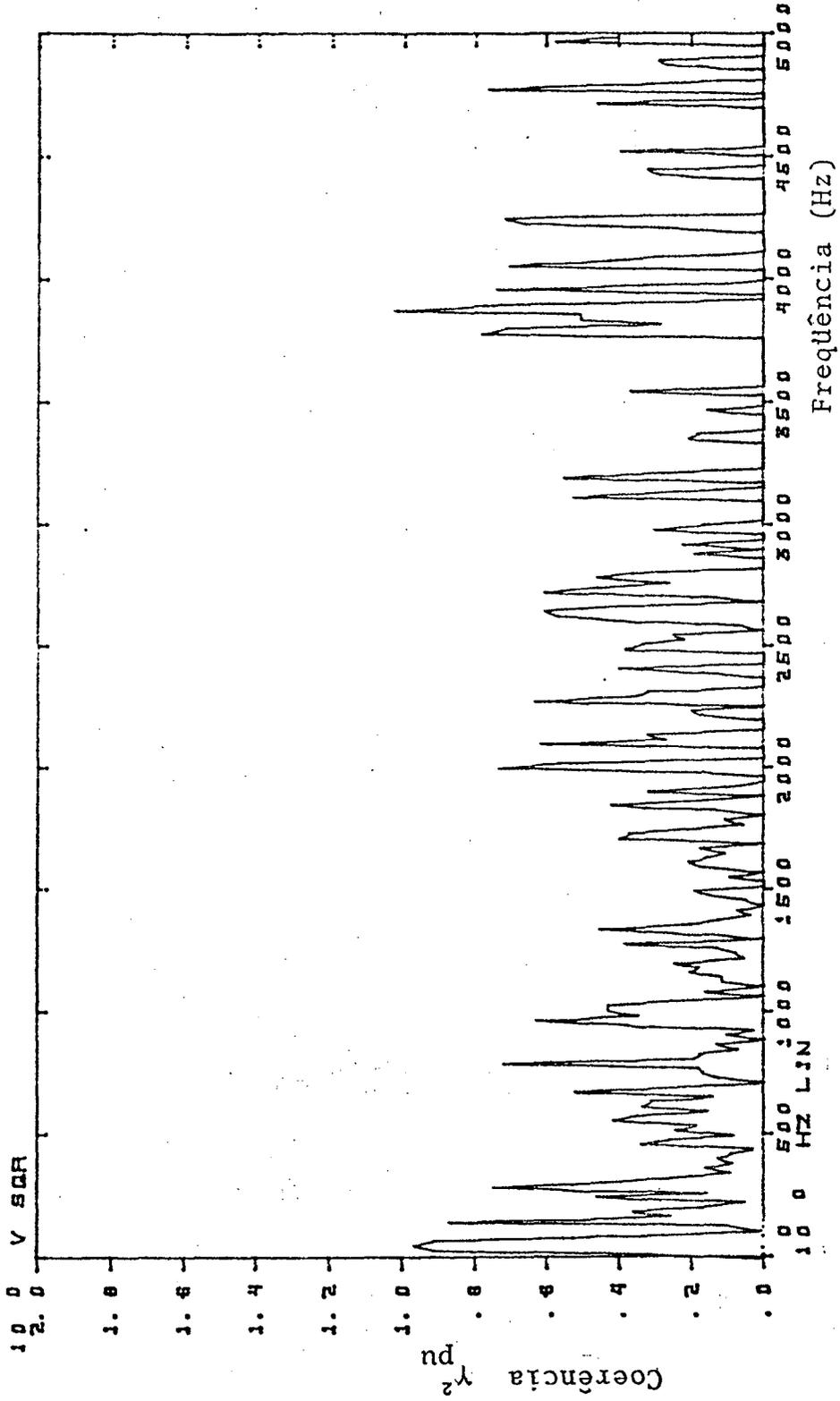


Figura 5.35 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da aresta da (C.R.P.); ponto 1

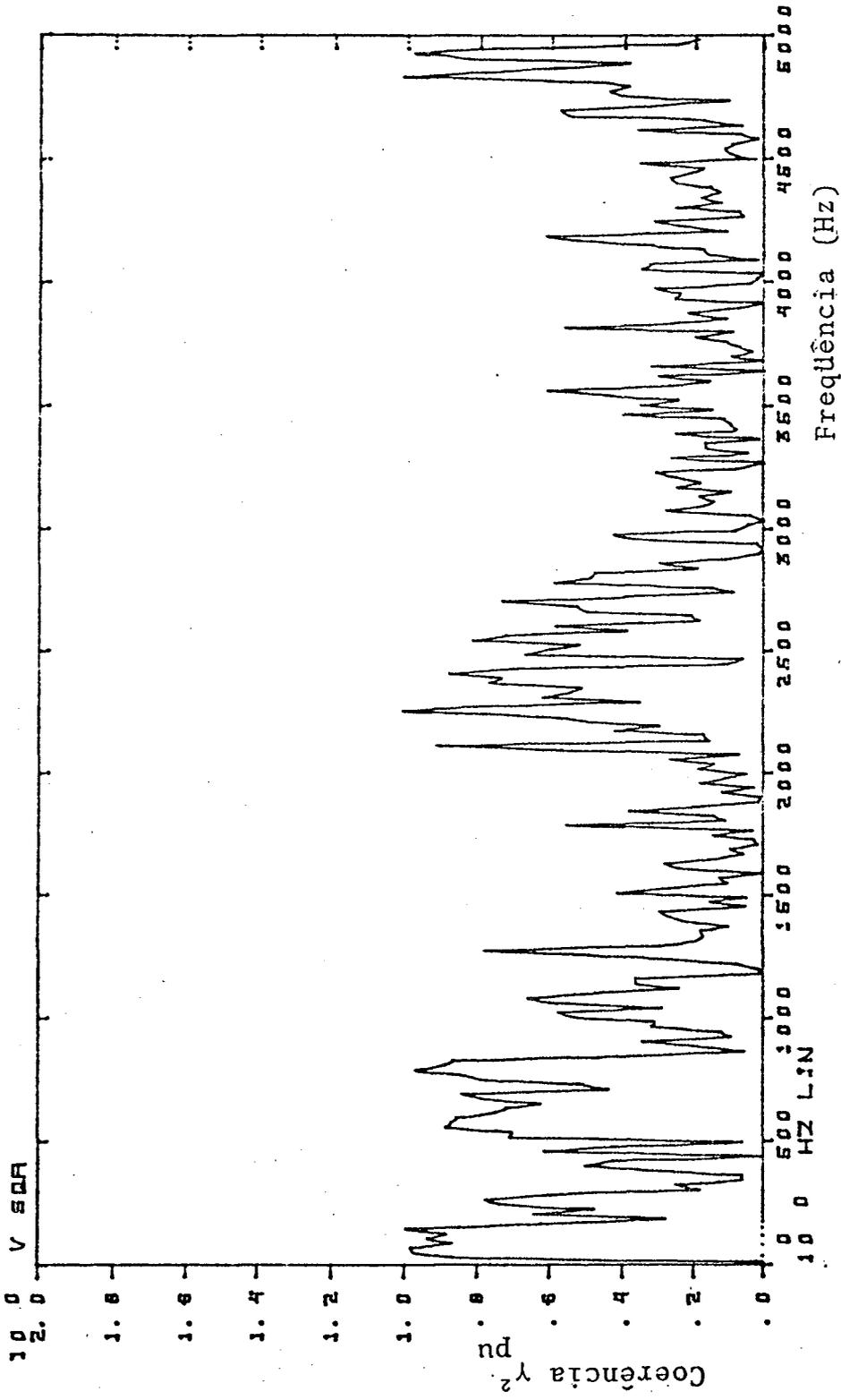


Figura 5.36 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da aresta da (C.R.P.); ponto 2

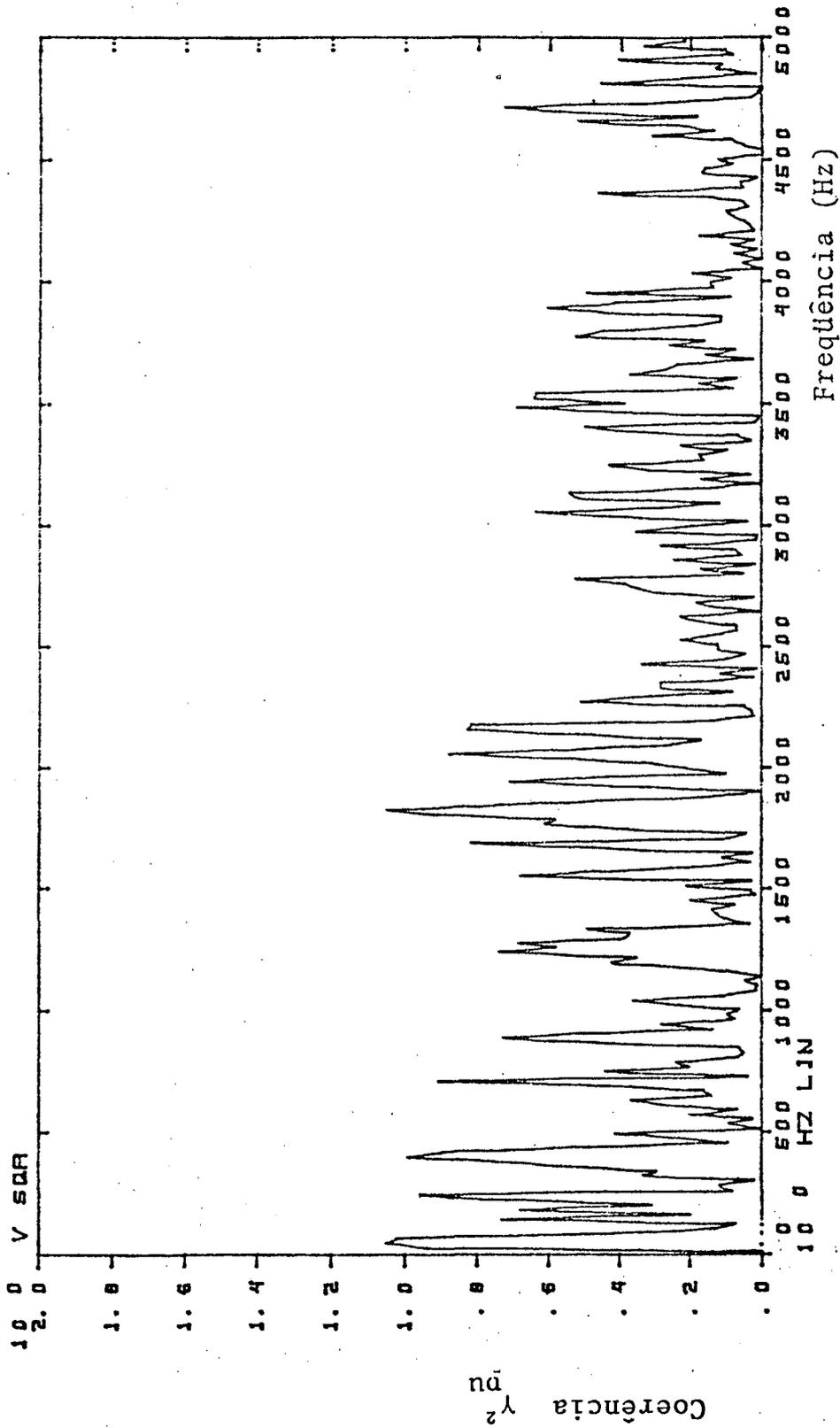


Figura 5.37 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da aresta da (C.R.P.); ponto 3

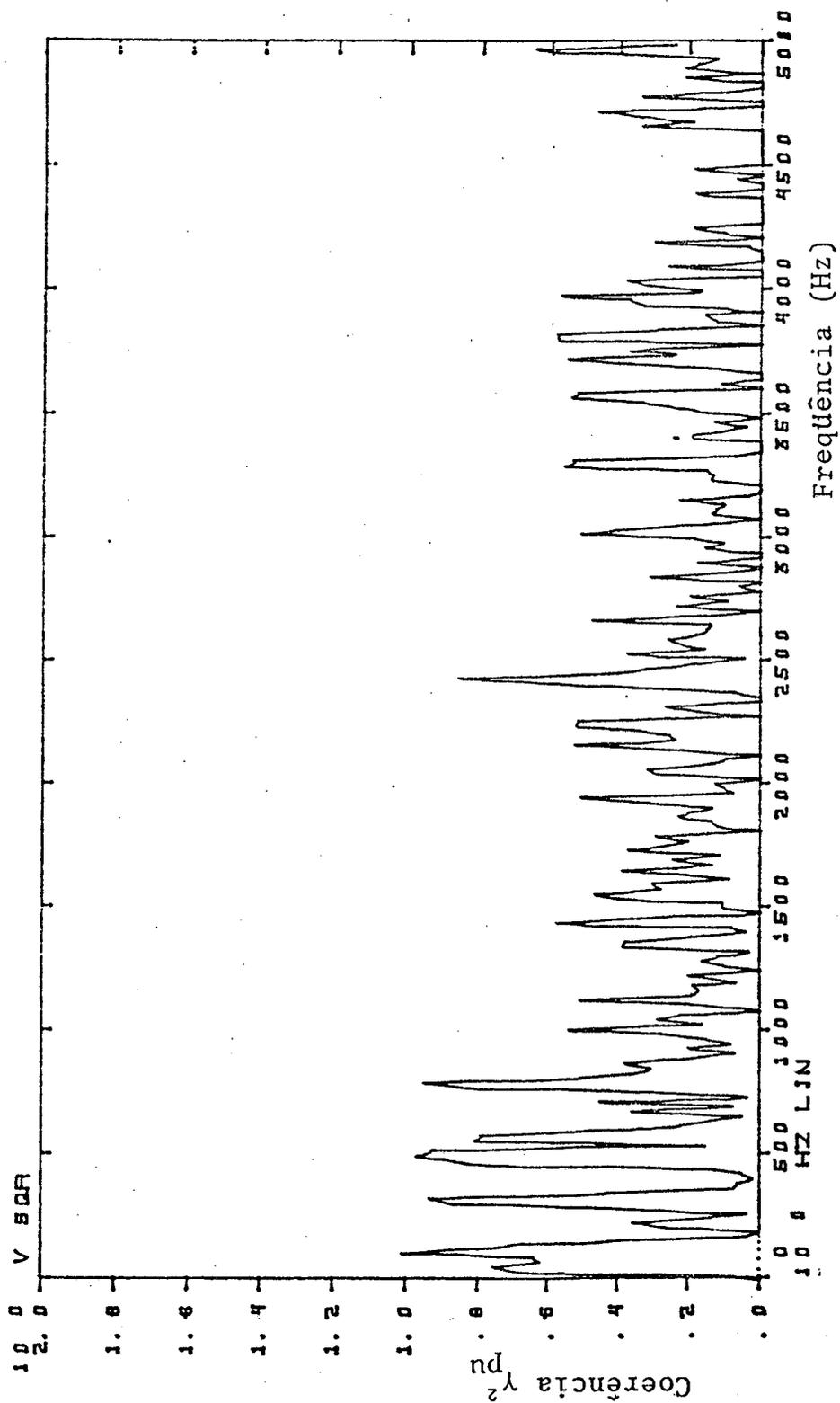


Figura 5.38 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto do canto da (C.R.P.); ponto 1

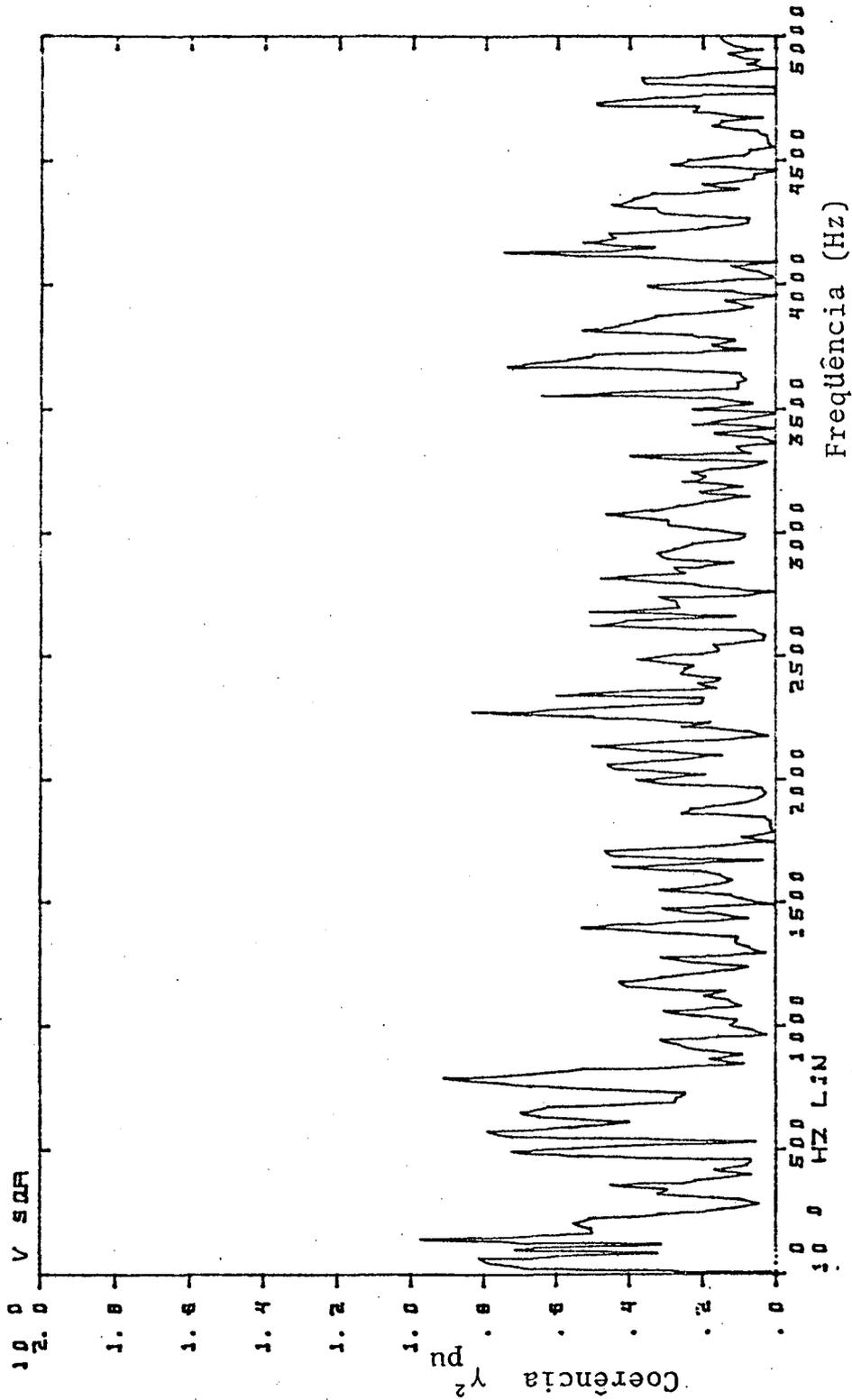


Figura 5.39 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto do canto da (C.R.P.); ponto 2

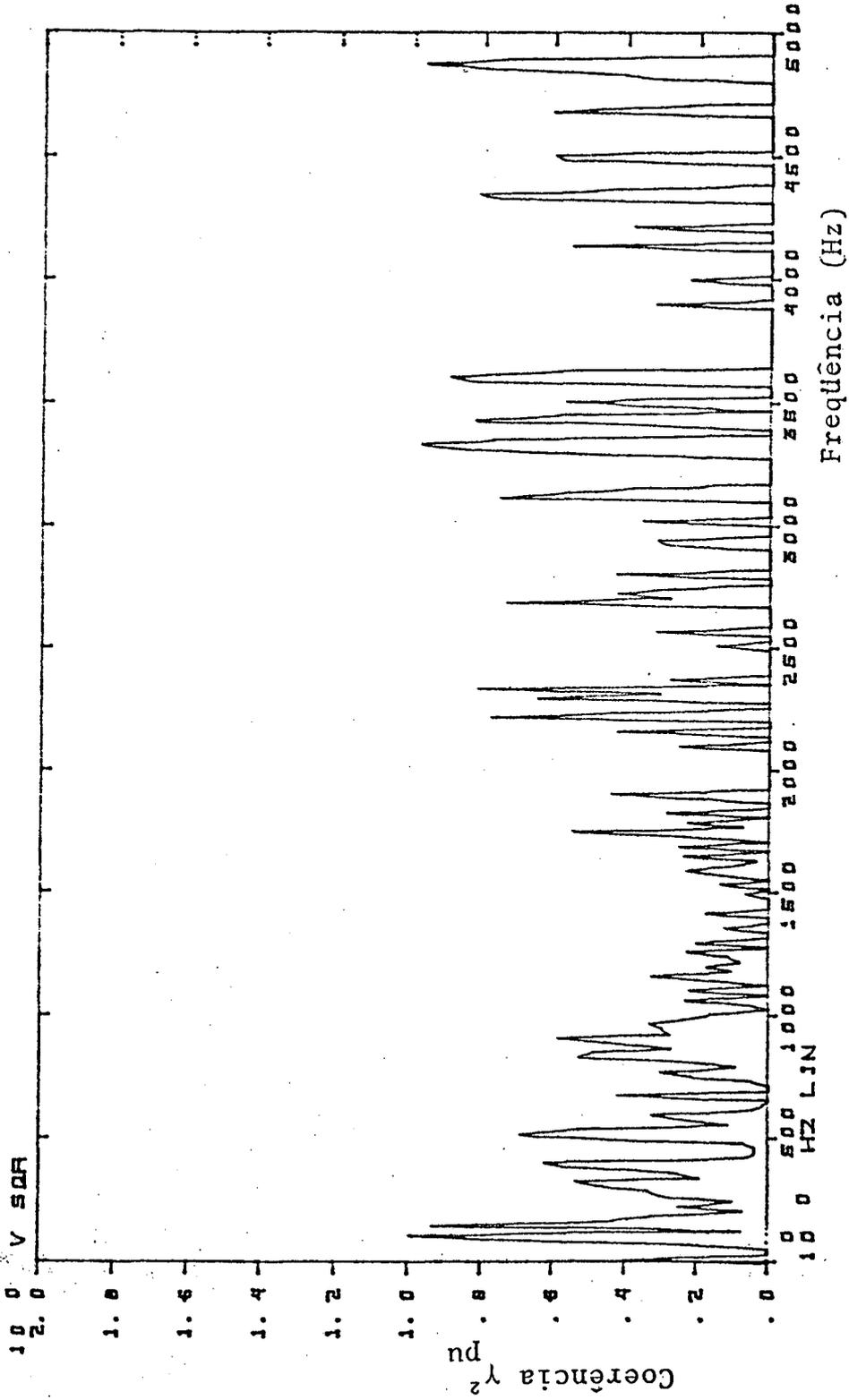


Figura 5.40 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto do canto da (C.R.P.); ponto 3

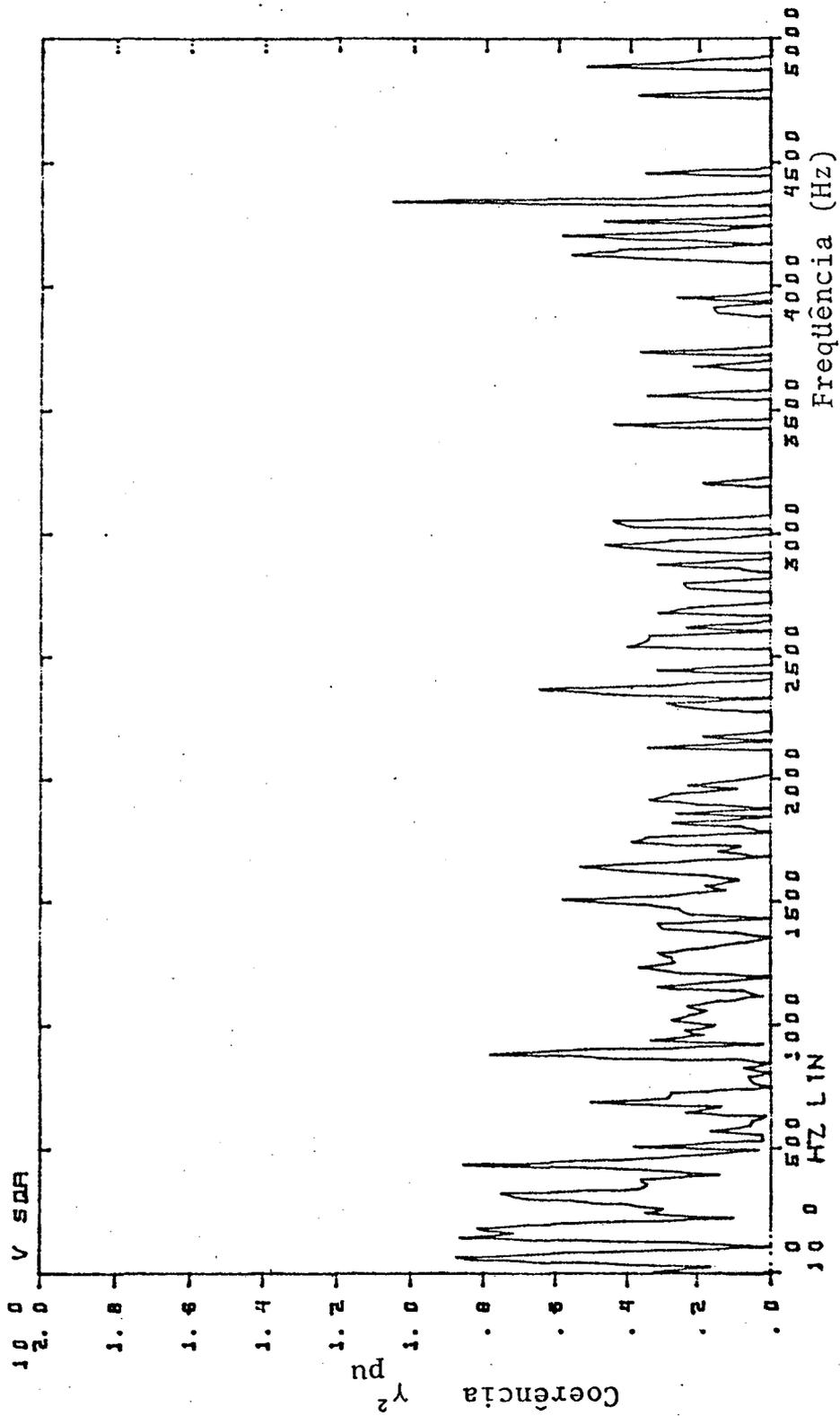


Figura 5.41 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da fonte (C.R.P.). Microfones a 20cm da fonte; ponto 1

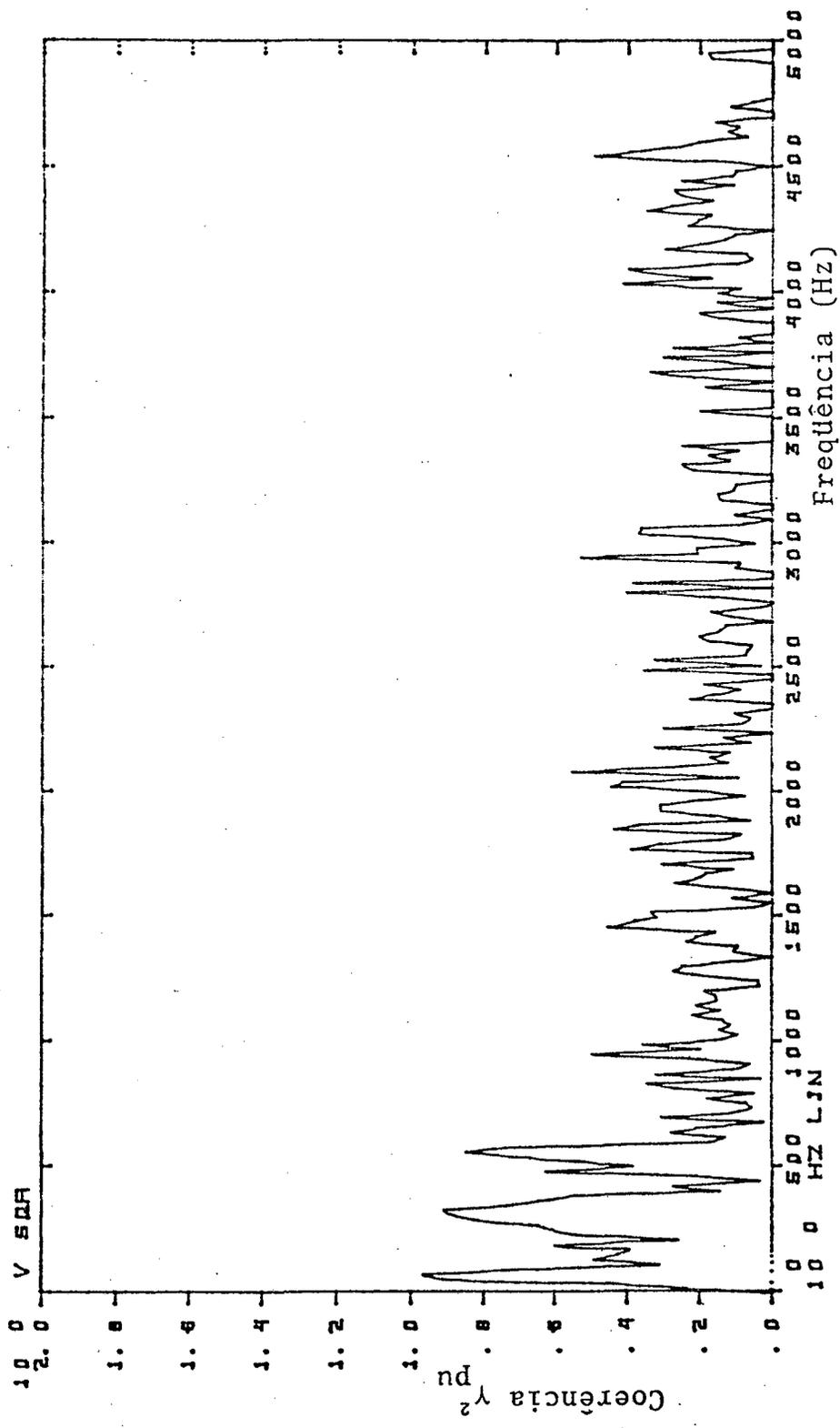


Figura 5.42 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da fonte (C.R.P.). Microfones a 15cm da fonte; ponto 2

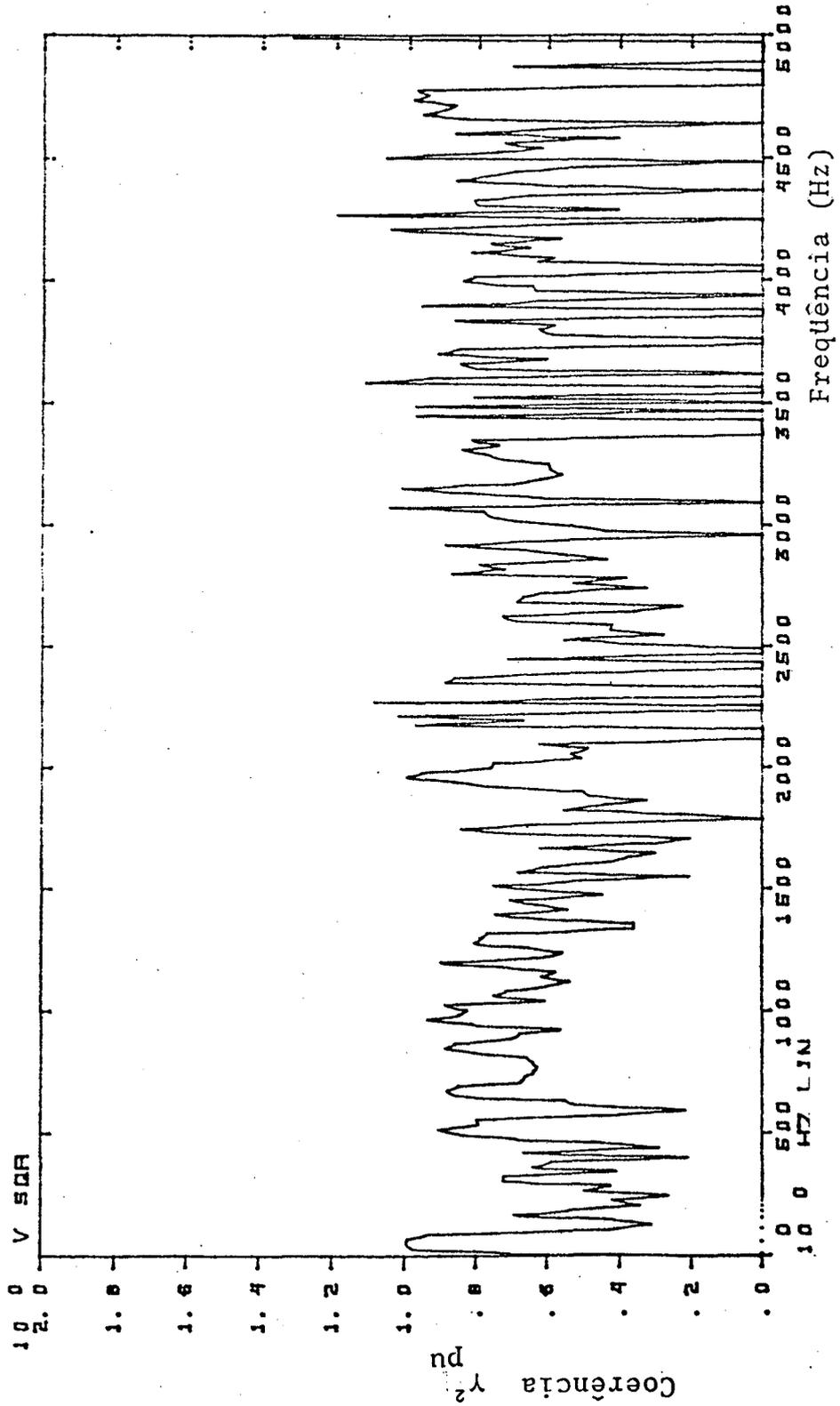


Figura 5.43 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da fonte (C.R.P.). Microfones a 10cm da fonte; ponto 3

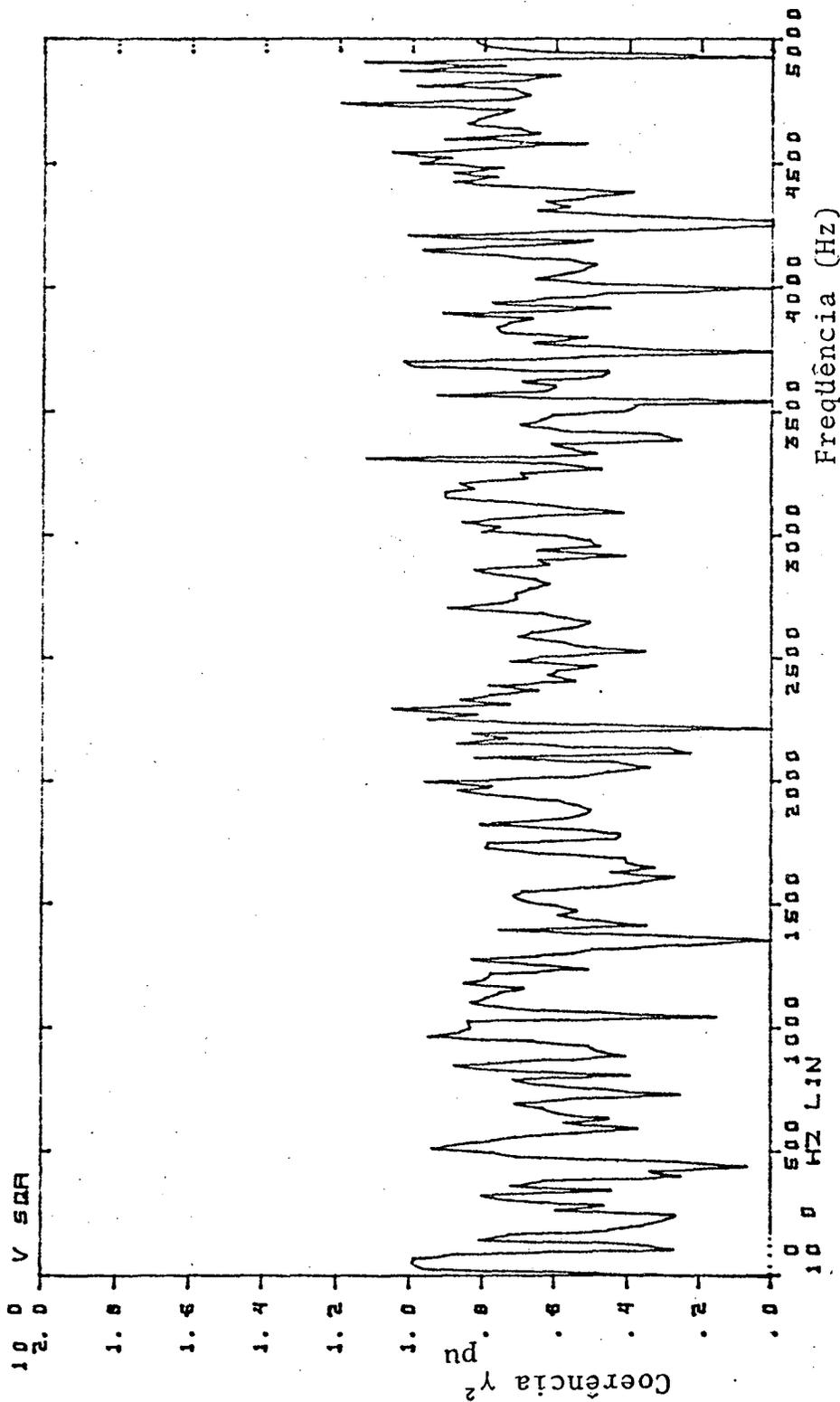


Figura 5.44 - Função Coerência PRESSÃO-VELOCIDADE. Medição perto da fonte (C.R.P.). Microfones a 5cm do altofalante; ponto 4

**CAPÍTULO 6**

=====

**ESTUDO DE ERROS**

=====

**6.1 - Considerações Gerais.**

Todas as medições da acústica aplicada estão sujeitas a erros, tais como: os inerentes à calibração imprecisa, presença de ruído de fundo, utilização de instrumentos com limitada potencialidade para a medição requerida, tempo de integração insuficiente, filtragem inadequada e outros.

No cálculo da estimativa da função coerência entre a pressão sonora e a velocidade de partícula, usando a técnica de dois microfones próximos, também estão presentes várias fontes de erros.

Neste capítulo, analisam-se estes erros e sua presença nas medições de  $\gamma_{pm}^2$

**6.2 - Erro causado pela diferença de fase entre os dois canais de instrumentação.**

A técnica de dois microfones é altamente sensível às diferenças de fase entre os canais do sistema de medição. Em consequência, devem ser tomados alguns cuidados, pois para obter uma medição com um bom grau de precisão, a diferença de fase deve ser nula em toda a banda de frequências de interesse.

Um aspecto fundamental para alcançar este objetivo, é utilizar dois microfones casados na fase e com igual ganho, para assim minimizar este erro que se torna mais crítico nas baixas frequências e para pequenos valores de  $\Delta r$  [9].

Também é indispensável um cuidadoso ajuste de cada instrumento da cadeia de medição. As figuras 6.1 e 6.2 mostram dois exemplos de erro no ganho e na fase por mau ajuste.

Como foi explicado no capítulo 3 sobre o sistema de medição, a diferença de fase obtida foi menor a 1 grau e o ganho ODB, na faixa de frequências de interesse.

### 6.3 - Erro causado pela aproximação do gradiente de pressão por diferença finita de pressões.

Este é considerado um dos principais erros sistemáticos presentes no uso da técnica de dois microfones, que impõe limitações na faixa de frequência utilizável do sistema de medição. Este erro é mais severo nas altas frequências e depende do termo  $K\Delta r$ , onde o comprimento de onda se aproxima do espaçamento dos microfones [9].

Este erro está presente no cálculo da velocidade de partícula (eq. 2.6, 2.8) e no cálculo da estimativa da função de coerência  $\gamma_{pu}^2$  (eq. 2.12).

Portanto, foi escolhida  $\Delta r = 12\text{mm}$  para a faixa de frequência até 5KHz para evitar este erro.

#### 6.4 Erro aleatório

Bendat [1] determinou que o erro aleatório na estimativa da função de coerência pode ser avaliado pela expressão 6.1.

$$\varepsilon \left| \gamma_{xy}^2 \right| = \frac{\sqrt{2}(1 - \gamma_{xy}^2)}{\left| \gamma_{xy} \right| \sqrt{nm}} \quad (6.1)$$

onde este depende fundamentalmente do número de médias  $nm$ .

Bendat [1] propõe também que para uma estimativa normalizada de 10% de erro aleatório se precisam 640 médias para uma coerência de  $\gamma^2=0,2$ , 327 médias para  $\gamma^2=0,3$ , apenas 16 médias para  $\gamma^2=0,8$ .

Em consequência este erro se torna grande quando a coerência medida é pequena.

Por ter utilizado o número de médias igual a 50, que reduziu bastante o erro de cálculo digital, e considerando que pode-se assumir que o campo acústico seja difuso para  $\gamma^2 < 0,3$ , apresentamos o valor do erro aleatório presente nas medições para estes parâmetros, o qual é igual a 0,2556.

## 6.5 - Erro de cálculo digital

Este resultou ser um dos erros sistemáticos mais complexos e de difícil avaliação, pois pode facilmente confundir-se com outros, como a substituição do gradiente de pressão pela diferença finita de pressões, pois sua presença também ocorre nas frequências altas.

Para entender a origem deste, foi feito o seguinte teste acústico.

As paredes internas da câmara reverberante pequena foram revestidas com espuma de poliuretano, material de alta absorção acústica nas altas frequências, tentando obter um campo acústico com características semi-anecóicas. Logo, com os microfones colocados na região central da câmara, foi realizada a medição de coerência  $\gamma^2_{pu}$  com 1024 pontos de discretização, 50 médias e 5 KHz de frequência de corte do filtro anti-aliasing, obtendo-se a curva apresentada na figura 6.3.

Pode-se ver que a coerência abaixo de 2000 Hz apresentou valores altos em relação a  $\gamma^2_{pu}$  obtida nas medições realizadas com câmara reverberante sem revestimento. Estes valores altos devem-se à presença do material absorvente no interior da câmara, que altera o campo difuso. Acima de 2.500 Hz a coerência  $\gamma^2_{pu}$  apresenta valores errados, superiores a 1.

Para analisar a origem deste erro na medição apresentada na figura 6.3, foram registrados:  $P(f)$  na figura 6.4,  $\mu(f)$  na figura 6.5,  $G_{uu}$  na figura 6.6,  $G_{pp}$  na figura 6.7 e  $|\Sigma G_{pu}|^2$  mostrado na figura 6.8.

Constatou-se que o nível da velocidade de partícula é pequeno, decrescendo ainda mais em frequências acima de 2000 Hz. No caso de  $G_{uu}$  o nível de sinal é também pequeno acima de 500 Hz e praticamente zero acima de 2000 Hz. Situação similar, se constata

Portanto o erro de cálculo digital na estimativa da coerência  $\gamma_{pu}^2$  deve-se a que o computador realiza operações de divisão com valores muito pequenos, perto de zero, tantas vezes quanto o número de médias, motivo pelo qual a coerência medida apresenta valores errados, maiores que 1, acima de 2,5 KHz.

Em consequência, ao aumentar o número de médias, aumenta o erro digital, situação inversa à apresentada pelo erro aleatório  $|1|$ , o qual diminui ao aumentar o número de médias. Apresenta-se em continuação um teste que envolve estes dois erros.

Na câmara reverberante pequena, neste caso sem material absorvente, foram colocados os microfones na região central e mediu-se a coerência  $\gamma_{pu}^2$  com a frequência do filtro selecionada em 5 KHz, com 1024 pontos de discretização e mudou-se o número de médias.

A figura 6.9 apresenta uma medição de  $\gamma_{pu}^2$  com 2 médias, mostrando uma marcada presença de erro aleatório.

Mudando o número de medidas para 10, a coerência apresenta uma diminuição do erro aleatório, como se observa na figura 6.10.

Aumentando o número de médias para 50, ver figura 6.11, a coerência mostra vários picos com valores maiores que 1, na região de frequências acima de 2200 Hz, o que constata a presença de erro de cálculo digital.

Na medição de  $\gamma_{pu}^2$  realizada com 100 médias, apresentada na figura 6.12, aumentou o erro digital nas frequências acima de 2000 Hz, com valores muito maiores que 1.

Considerando que o erro digital analisado deve-se principalmente ao baixo nível do sinal correspondente à velocidade de partícula que é processado para obter a estimativa da coerência  $\gamma_{pu}^2$ , optou-se por adicionar no programa um fator de amplificação do sinal no domínio da frequência, que evita a divisão por valores muito pequenos.

A figura 6.13 apresenta a medição de  $\gamma_{pu}^2$  no mesmo ponto empregado nas medições mostradas nas figuras 6.9 até 6.12, mas o programa foi modificado aplicando um fator de amplificação de  $10^6$ . Pode-se ver que o erro digital diminui levemente, considerando que o número de médias também foi de 100.

Com 100 médias mediu-se novamente, mudando o fator para  $10^{30}$  e constata-se uma notável diminuição do erro, como é mostrado na figura 6.14

Apresenta-se na figura 6.15 a coerência medida com o fator  $10^{30}$ , mudando o número de médias para 50, comprova-se que o erro diminui notavelmente desaparecendo em algumas faixas de frequências.

Diminui-se então o número de médias para 40 e o erro devido ao cálculo digital desaparece, tal como é mostrado na figura 6.16.

Conclui-se então que é possível diminuir o erro digital presente em algumas estimativas de coerência  $\gamma_{pu}^2$ , aplicando o programa modificado apresentado no anexo 2, e também escolhendo um número adequado de médias, onde as experiências realizadas mostraram que usando entre 40 e 50 médias, os erros sistemáticos em seu conjunto, estão sob controle.

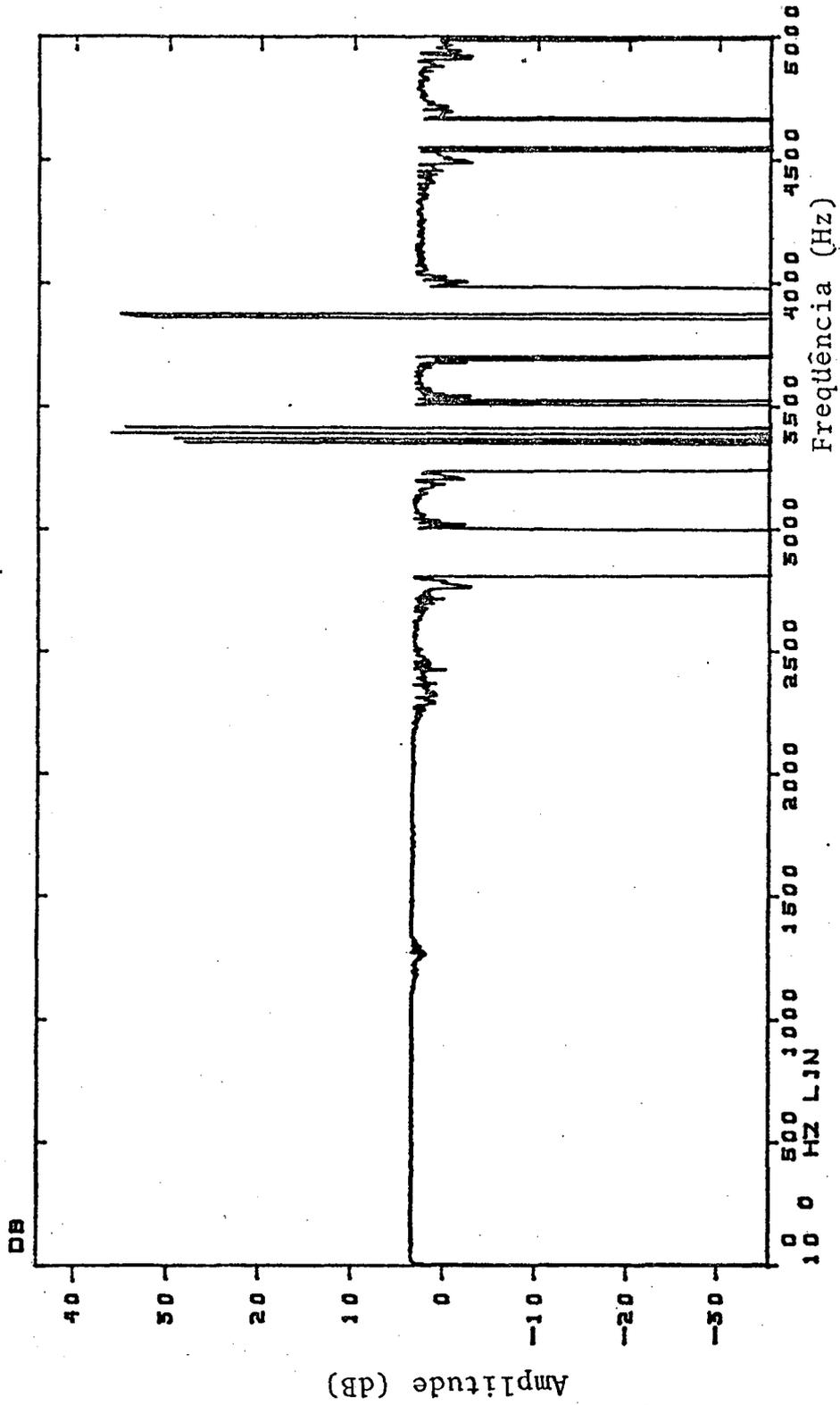


Figura 6.1 - Fator de ganho com erro devido ao mau ajuste da fonte de polarização de microfones.

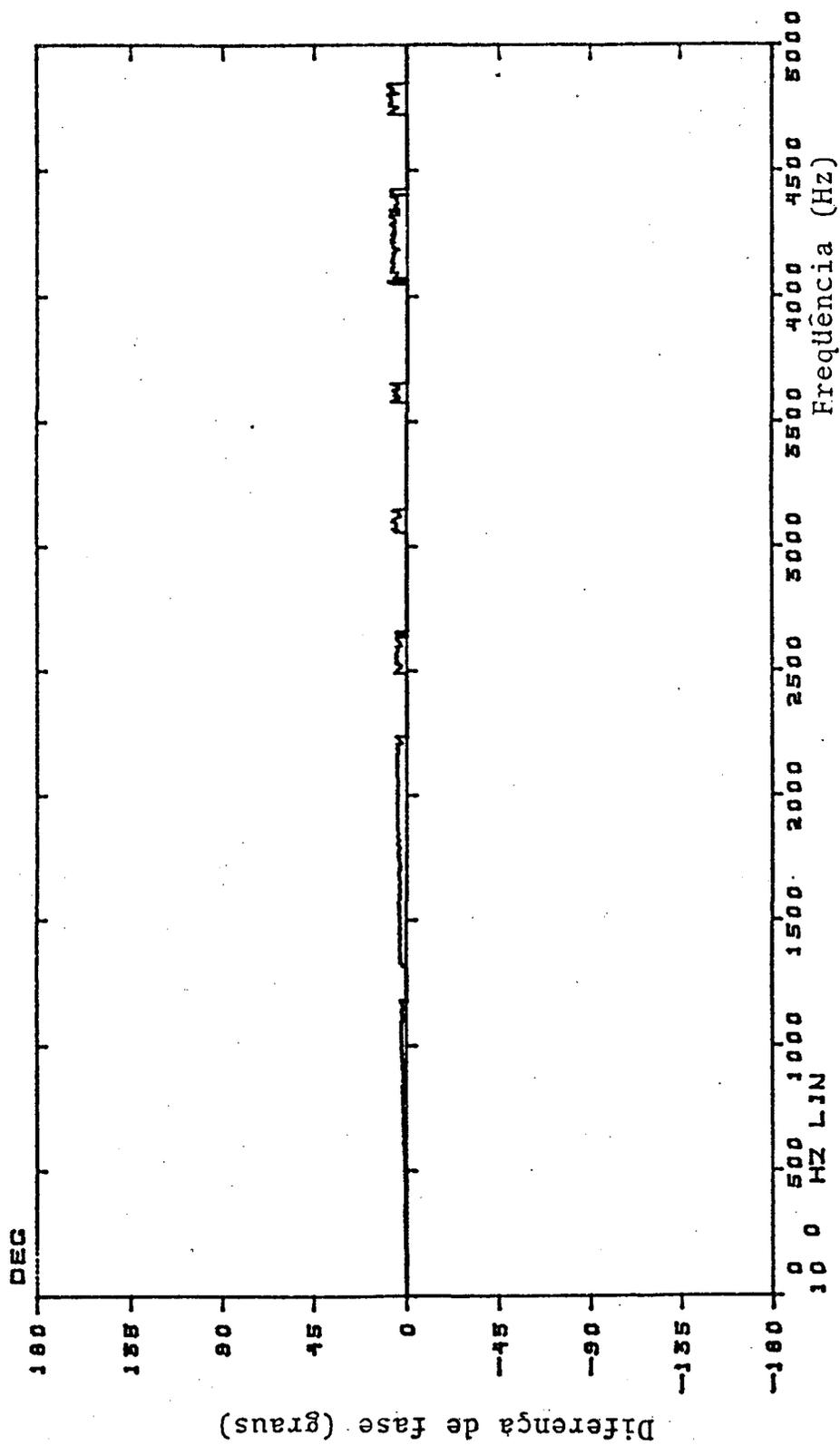


Figura 6.2 - Diferença de fase com erro por ajuste mau feito

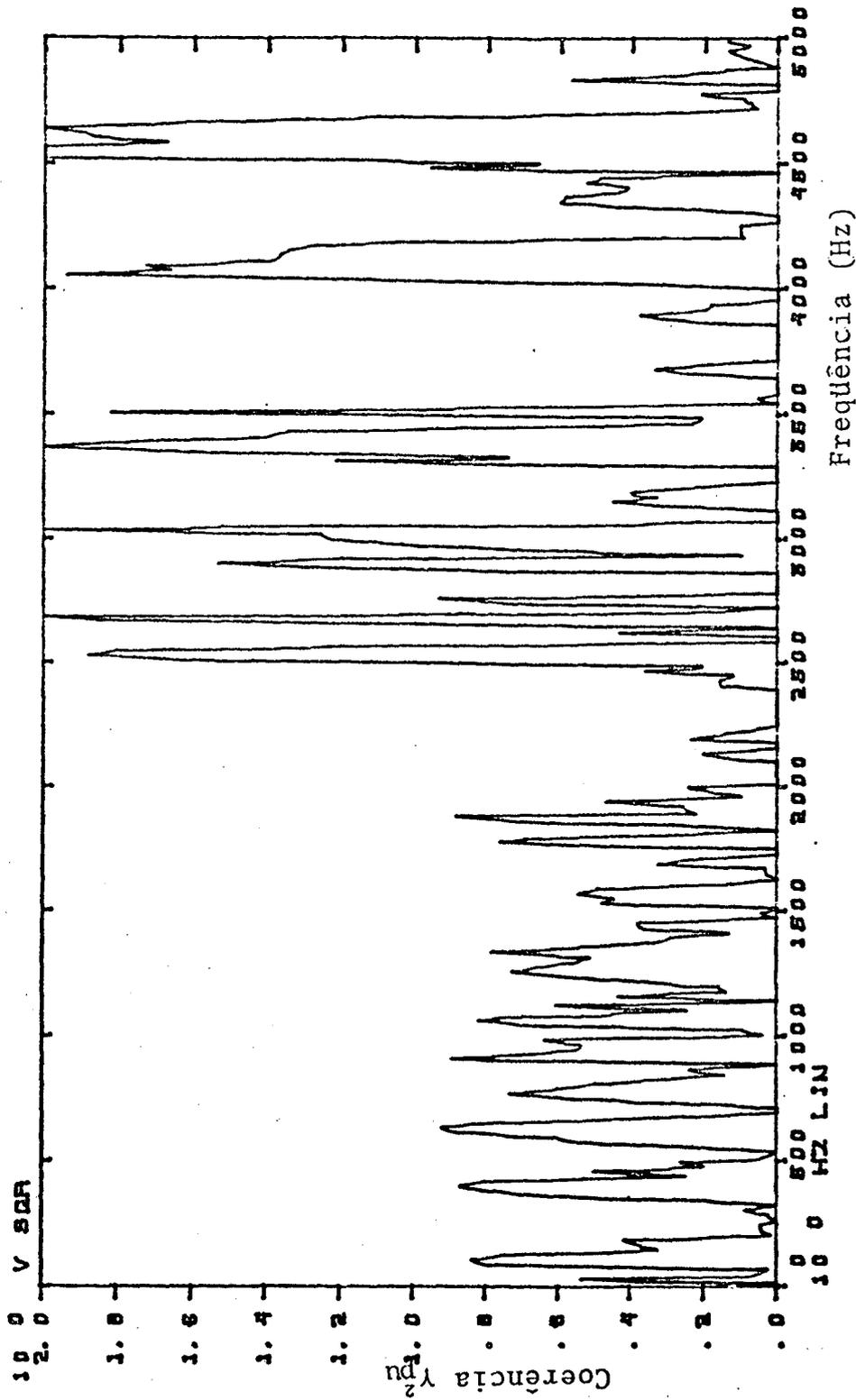


Figura 6.3 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em (C.R.P.) com revestimento das paredes internas com espuma de poliuretano. Teste erro digital; 50 médias.

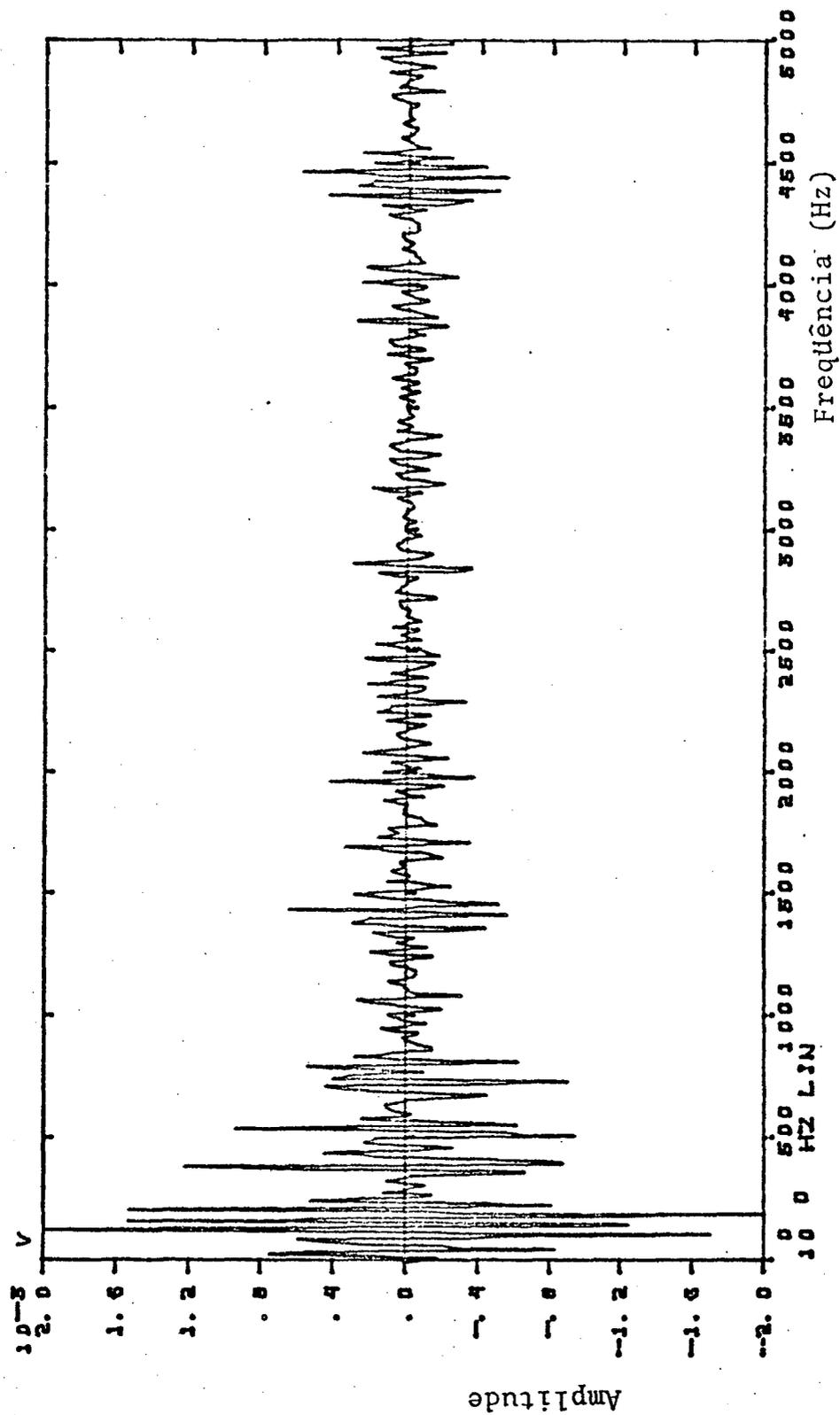


Figura 6.4 - Espectro da pressão sonora para o caso da figura 6.3  
(parte real da Transformada de Fourier)

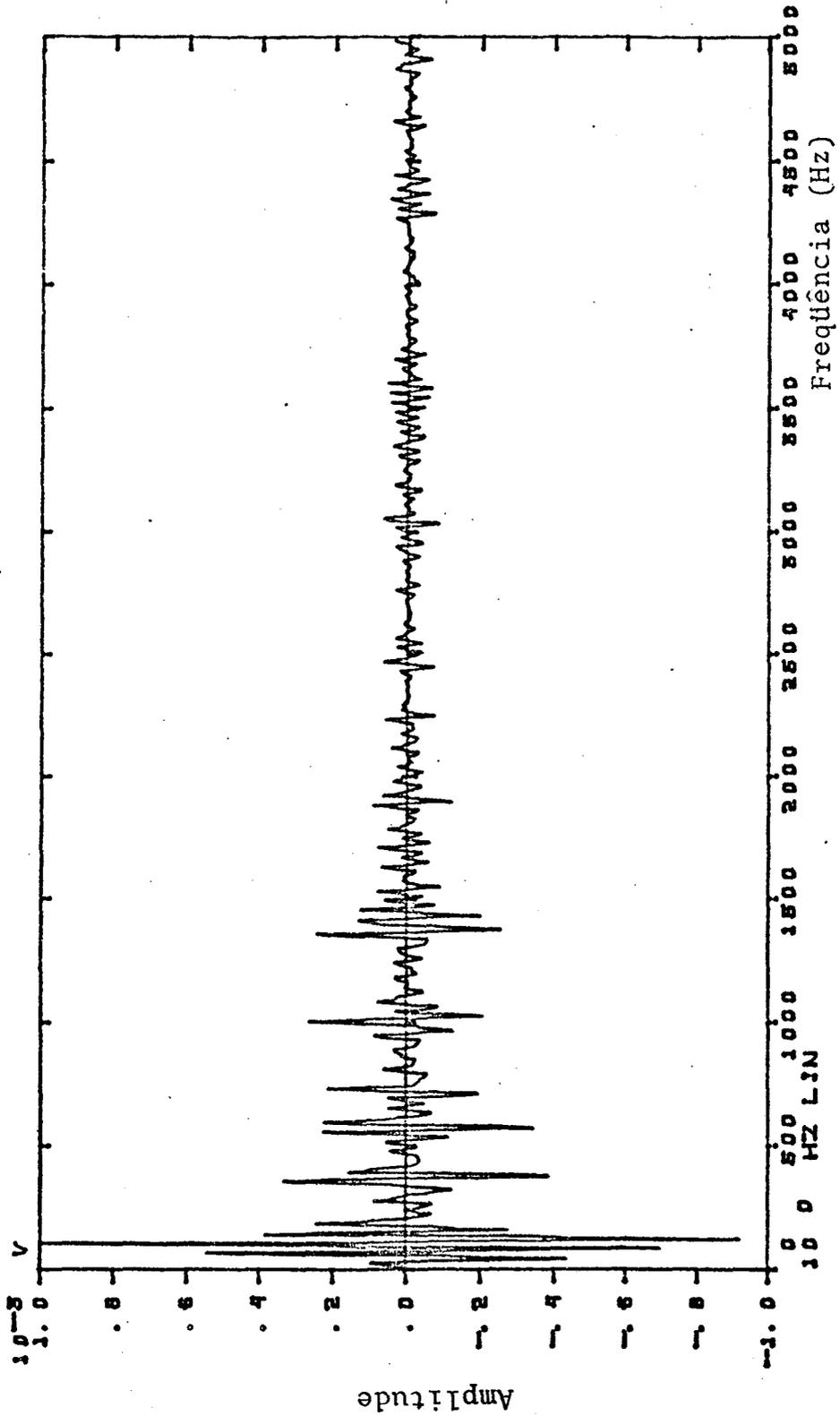


Figura 6.5 - Espectro da velocidade de partícula para o caso da figura 6.3 (parte real da Transformada de Fourier)

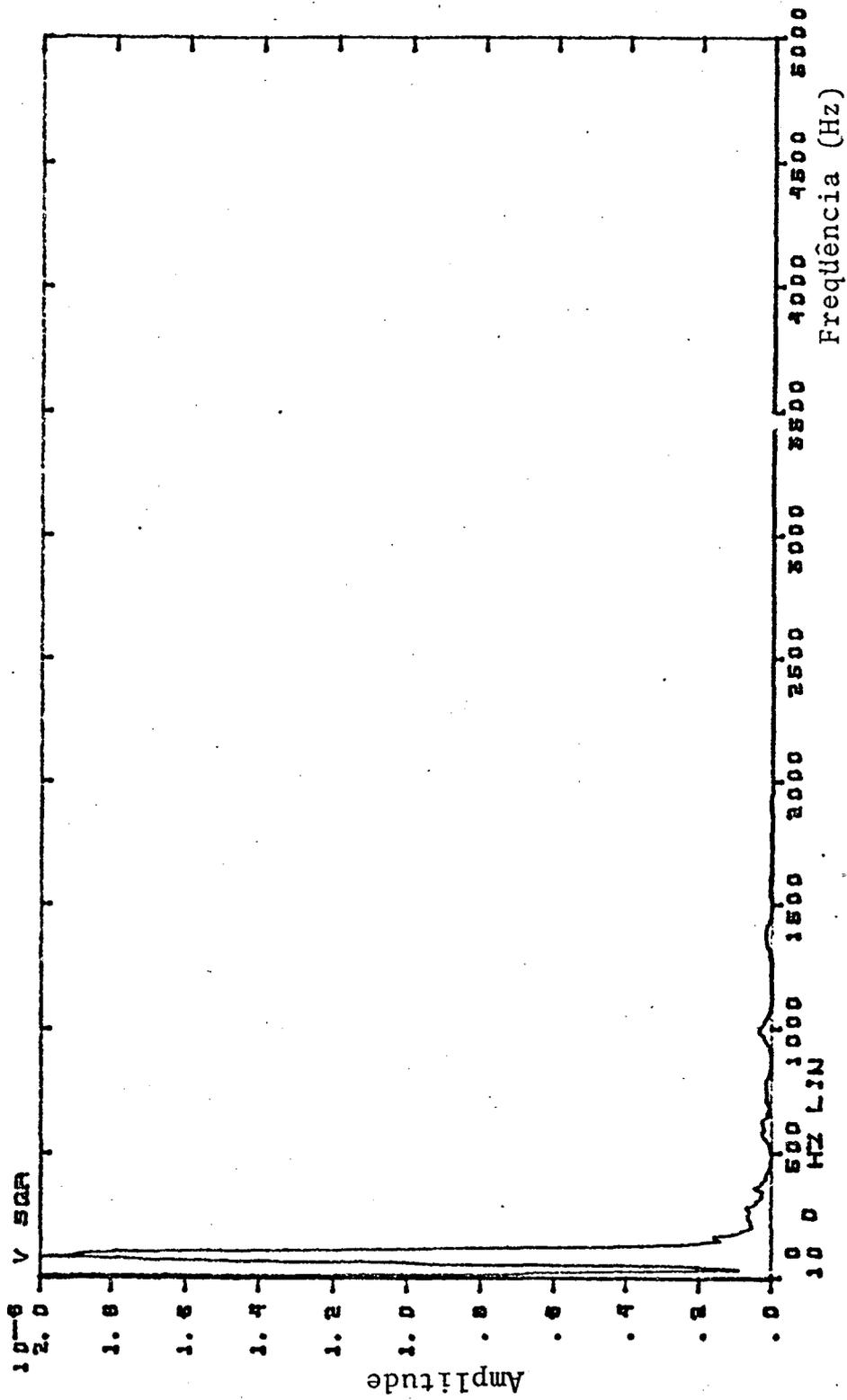
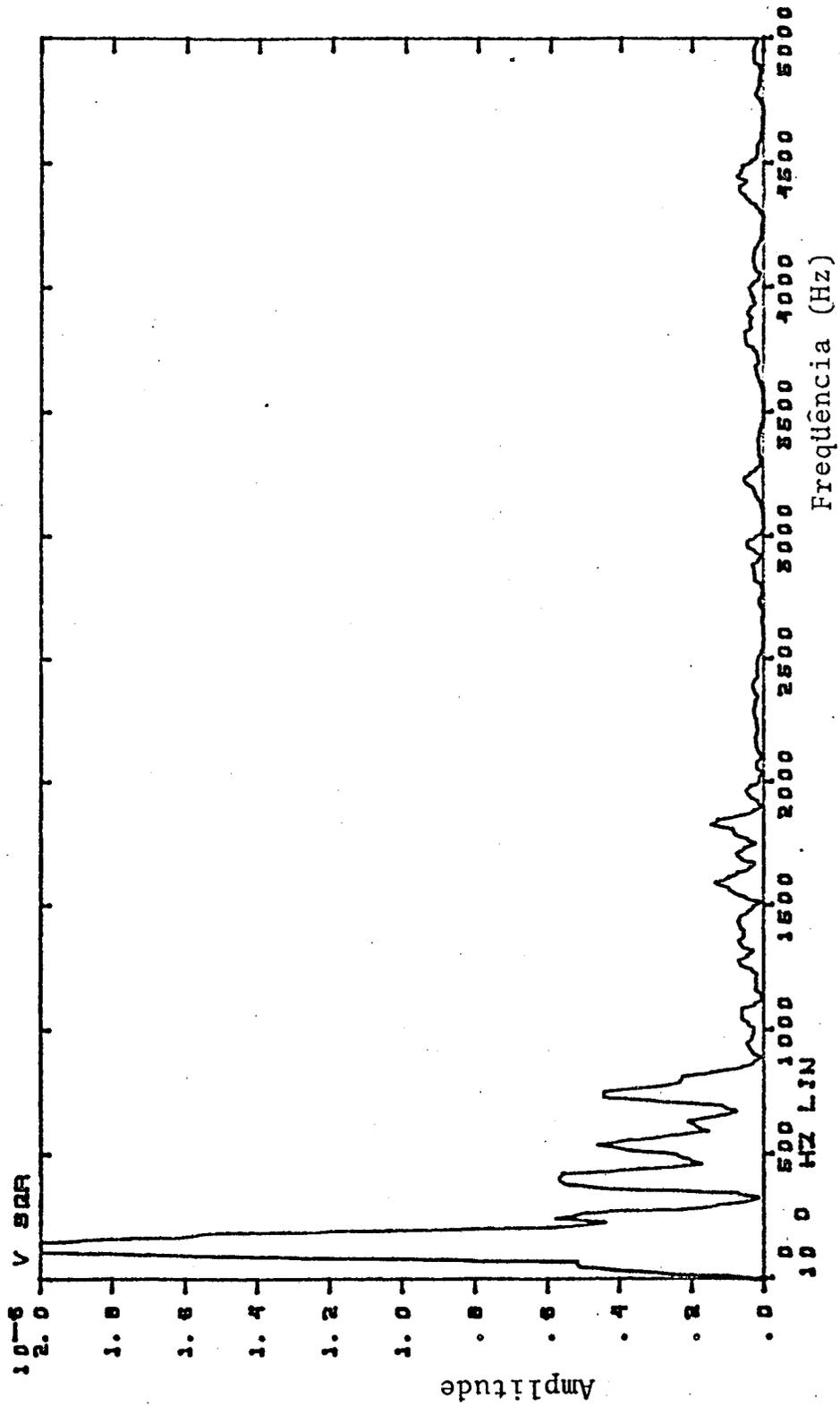


Figura 6.6 - G<sub>UU</sub> para o caso da figura 6.3

Figura 6.7 -  $G_{pp}$  para o caso da figura 6.3

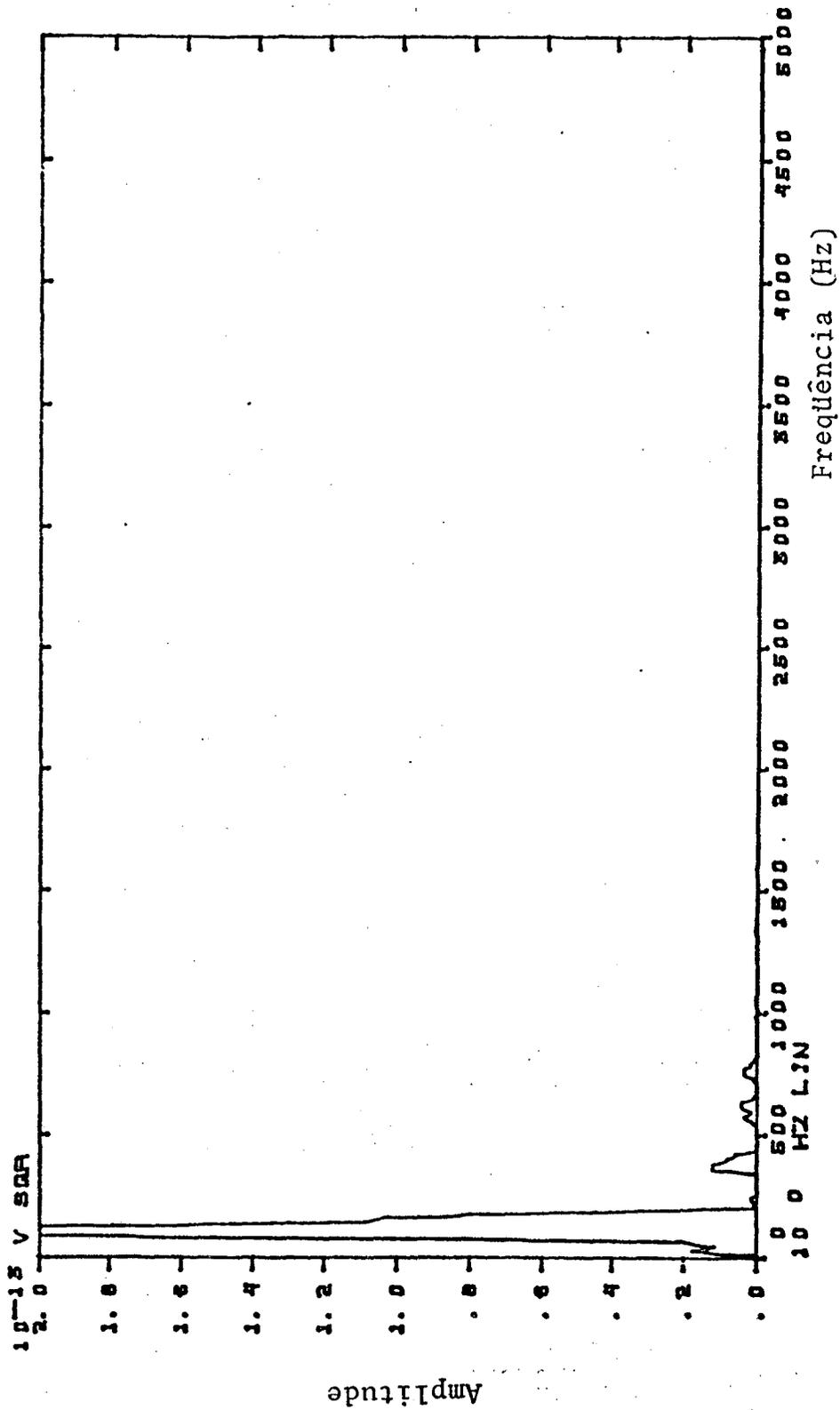


Figura 6.8 -  $|\Sigma G_{PU}|^2$  para o caso da figura 6.3.

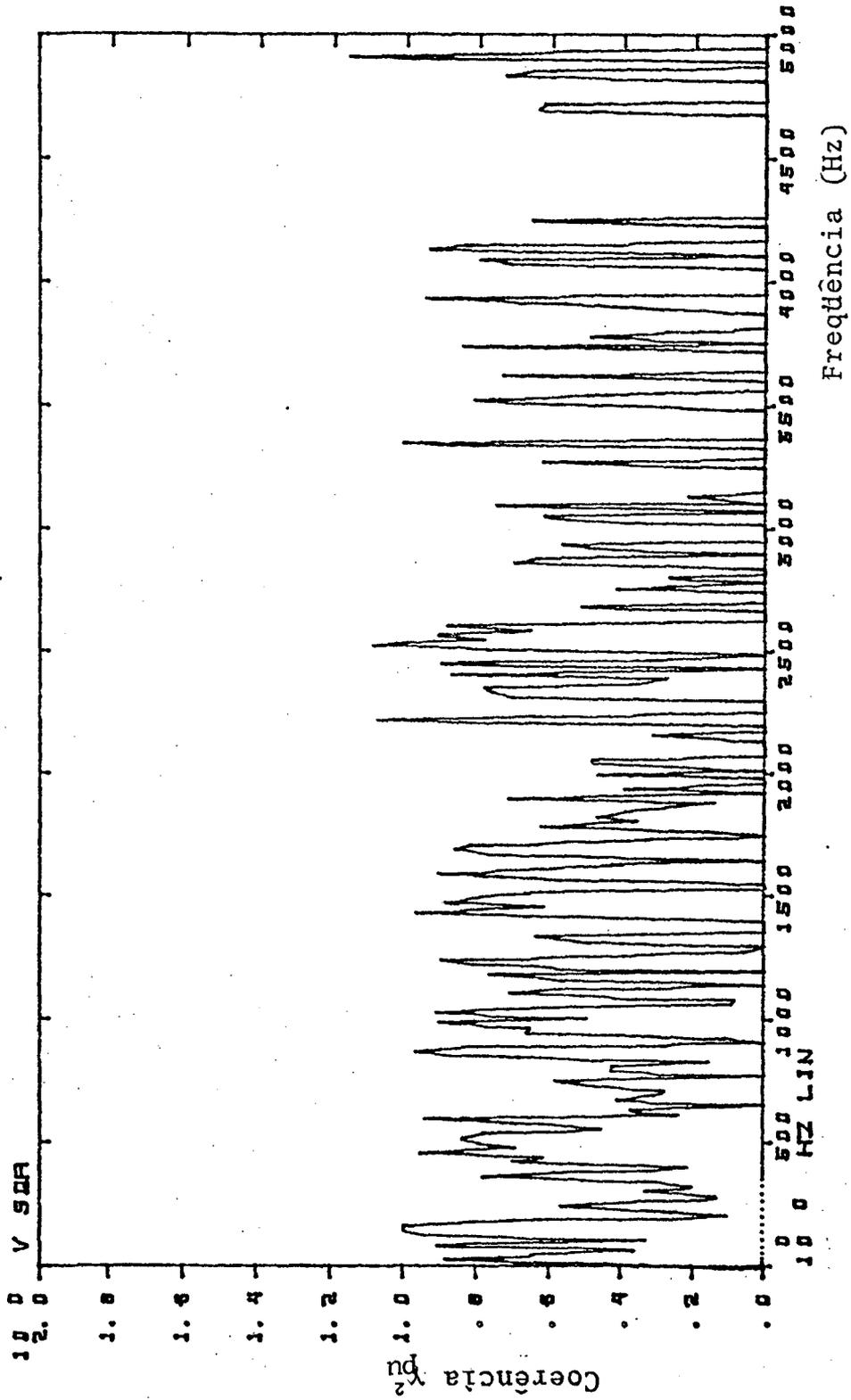


Figura 6.9 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em (C.R.P.). Teste de erro digital variando com o número de médias; 2 médias

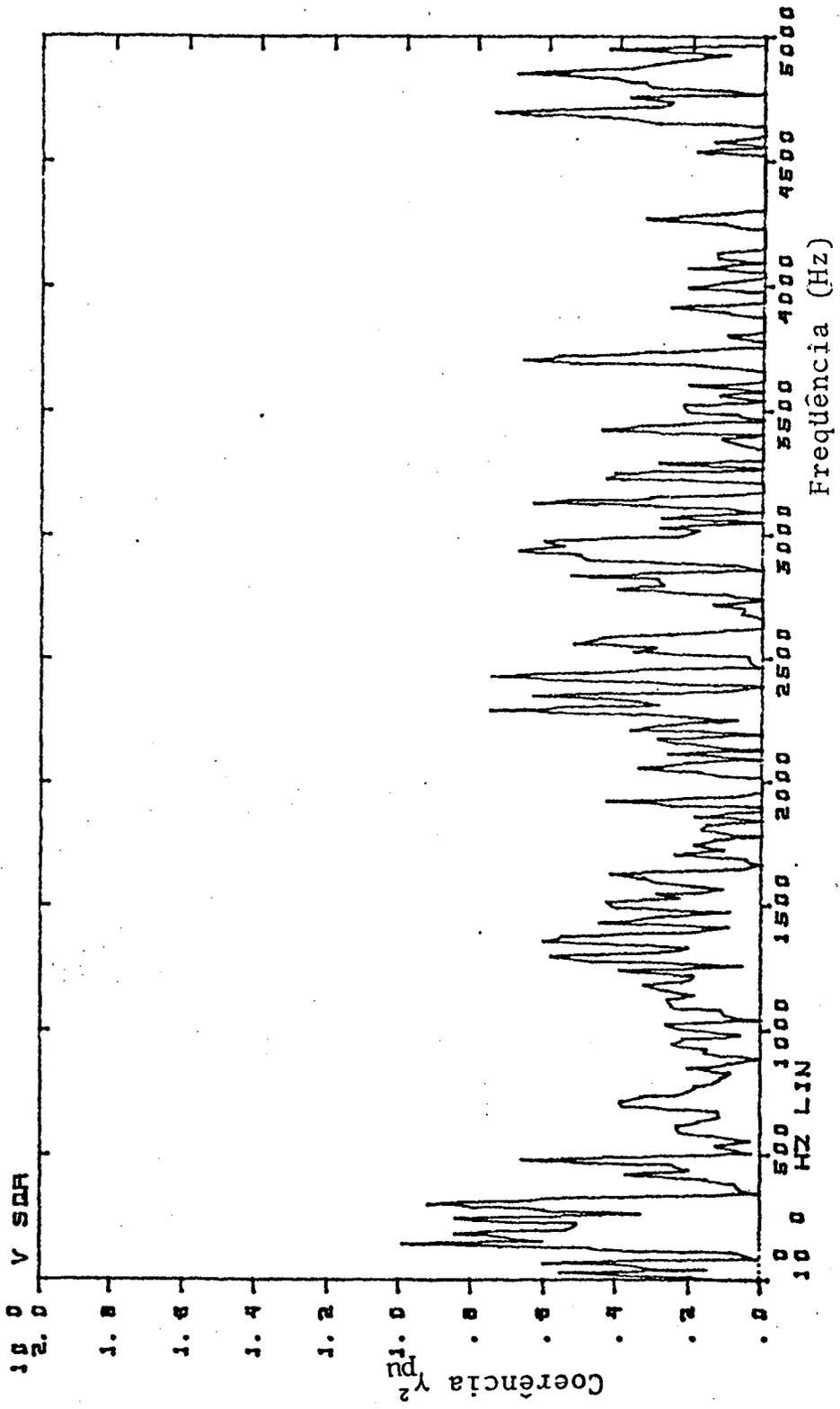


Figura 6.10 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em (C.R.P.). Teste de erro digital variando com o número de médias; 10 médias.

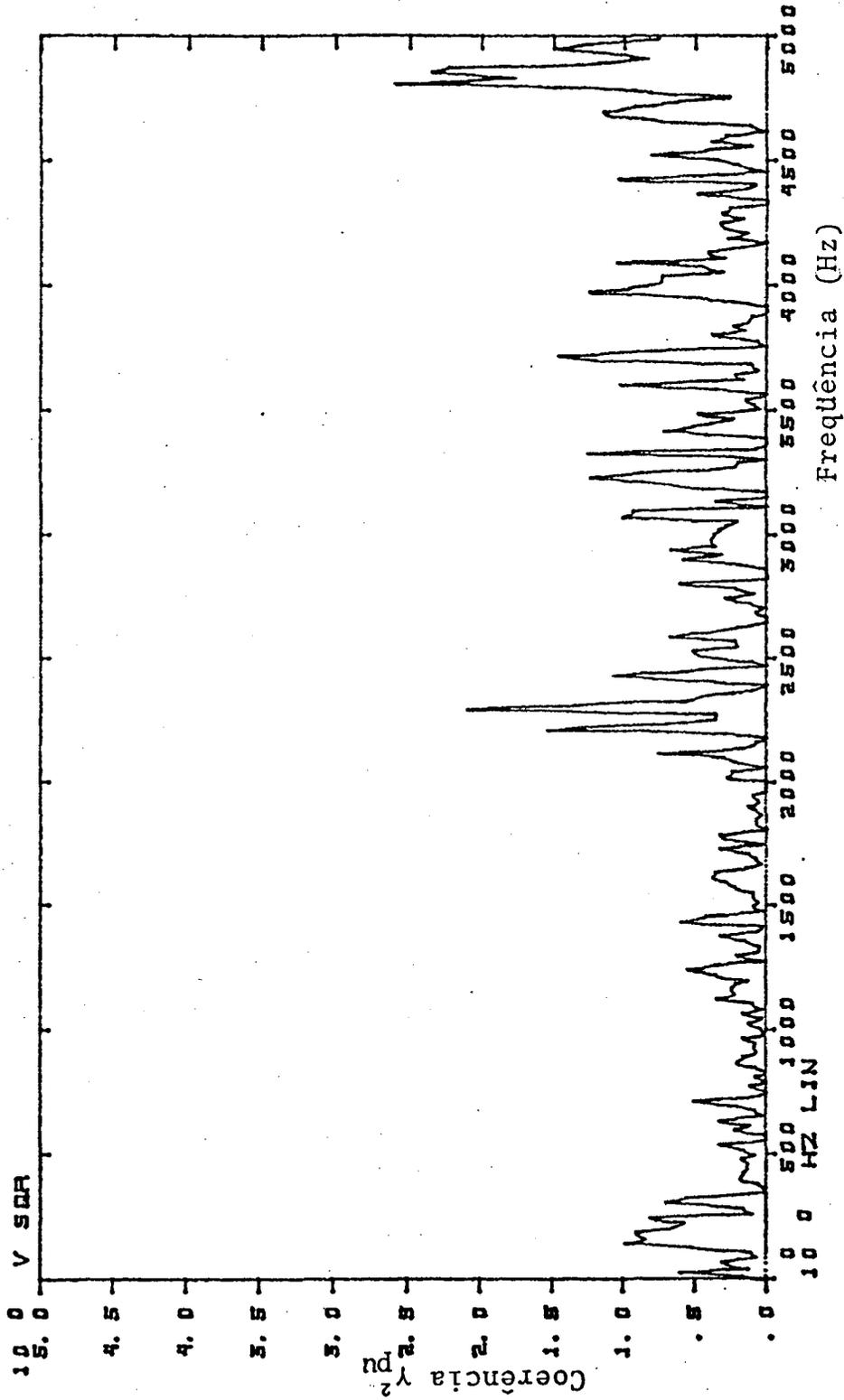


Figura 6.11 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em (C.R.P.). Teste de erro digital variando com o número de médias; 50 médias.

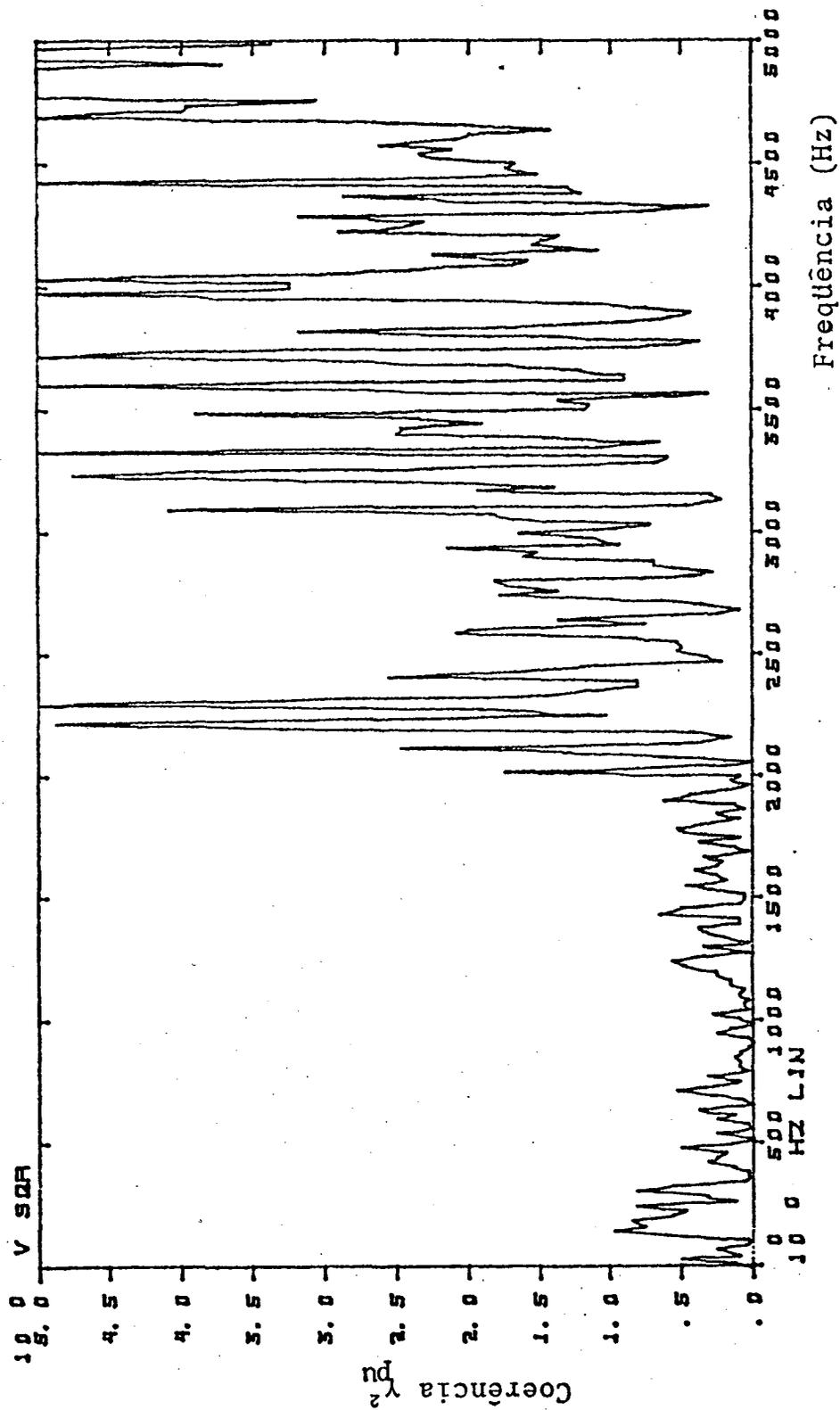


Figura 6.12 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em (C.R.P.). Teste de erro digital variando com o número de médias; 100 médias

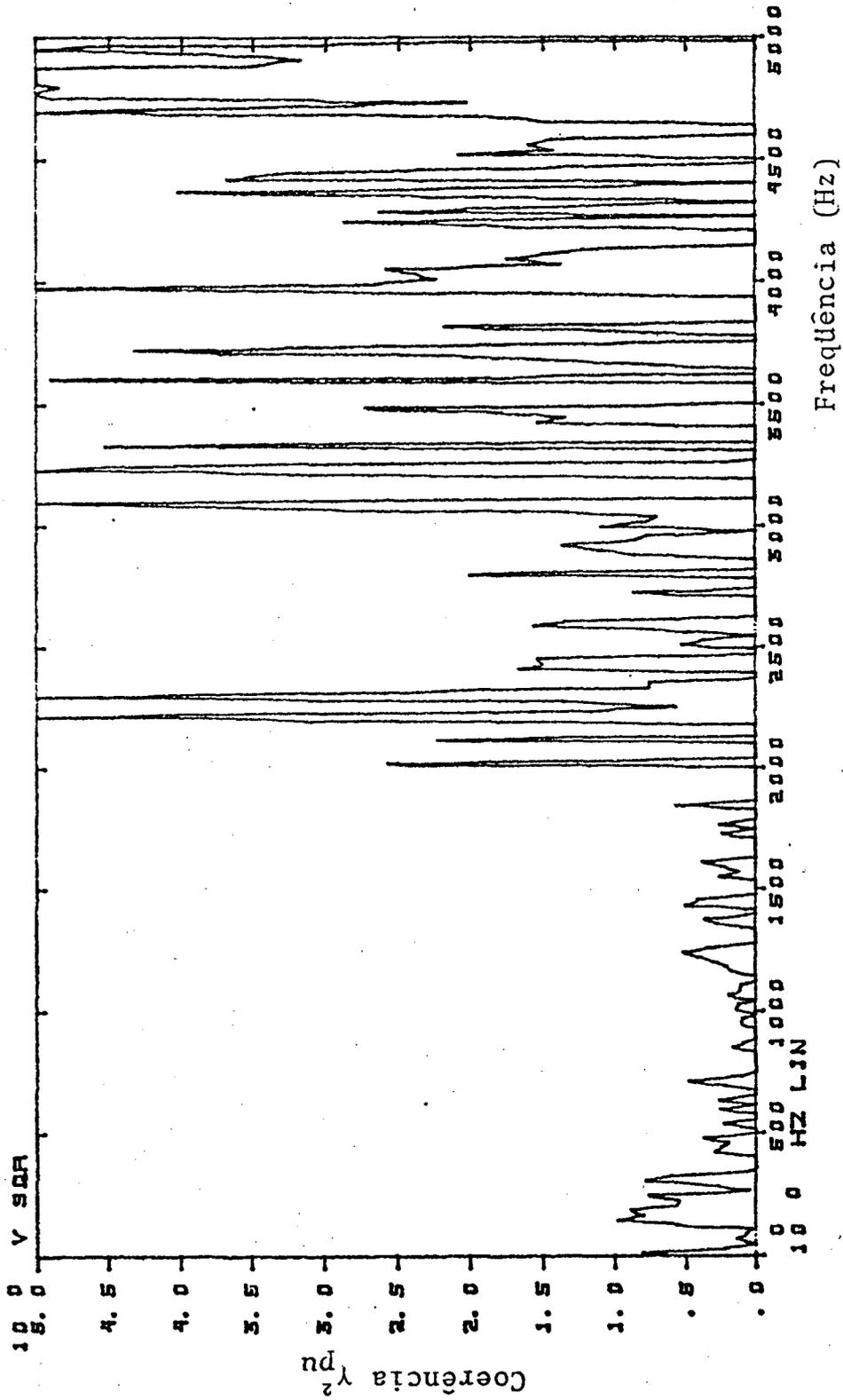


Figura 6.13 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em C.R.P. Teste de erro digital variando com o número de médias; 100 médias. Medição com programa modificado, fator de amplificação  $10^6$  no domínio da frequência.

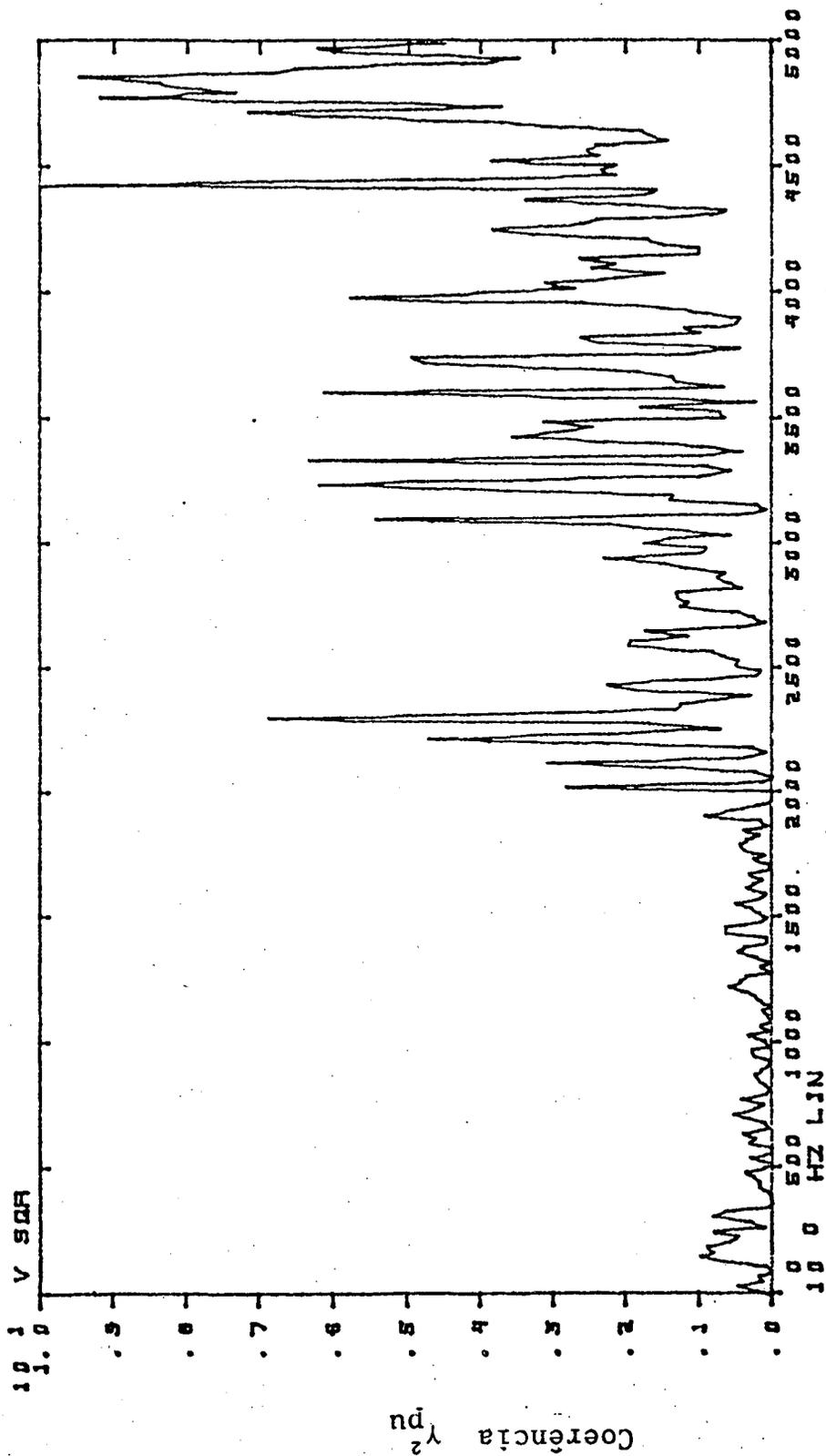


Figura 6.14 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em C.R.P. Teste de erro digital variando com o número de médias; 100 médias. Medição com programa modificado, fator de amplificação  $10^{30}$  no domínio da frequência

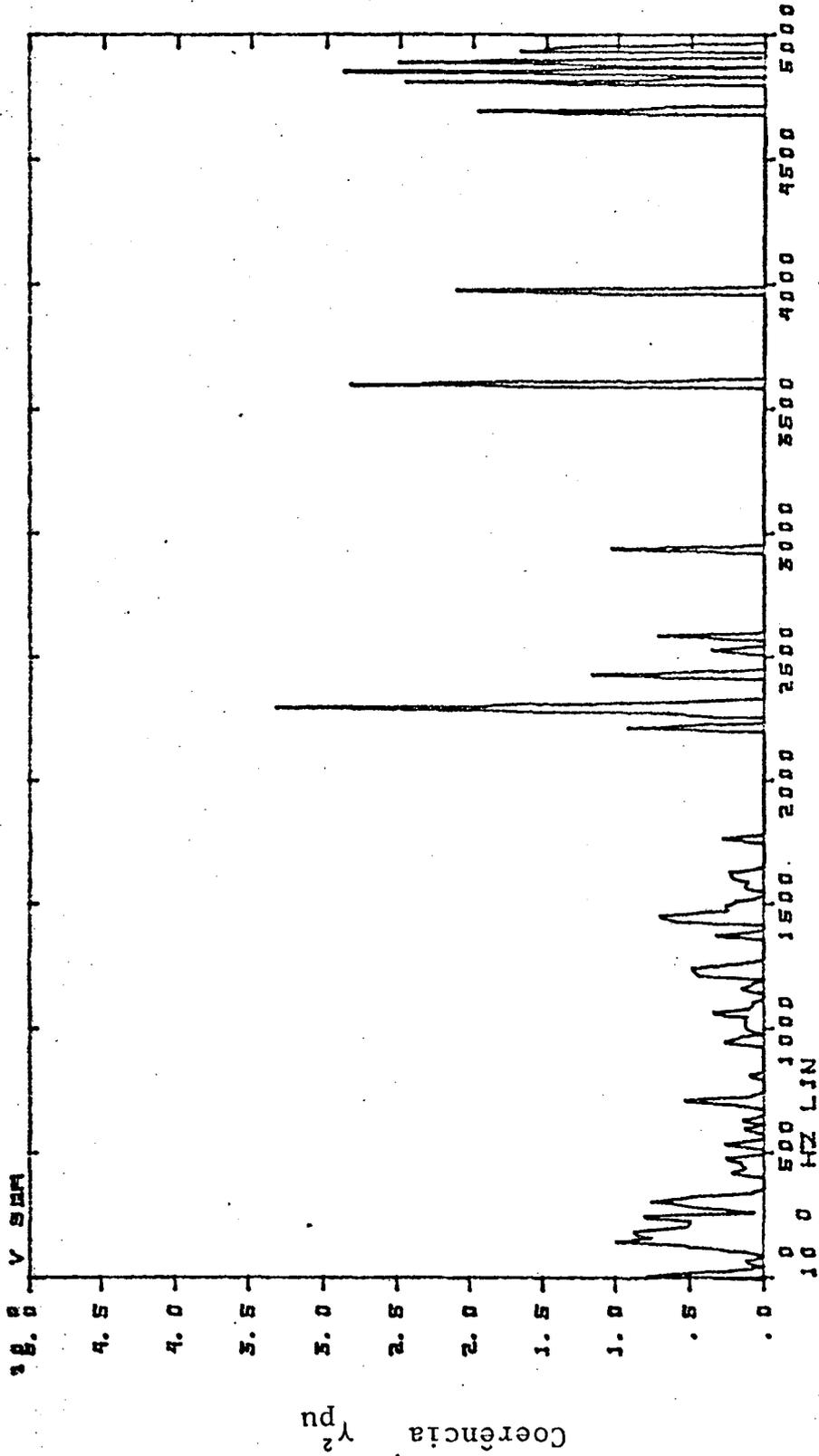


Figura 6.15 - Coerência  $\gamma_{pu}^2$  em C.R.P. Teste de erro digital variando com o número de médias e usando programa modificado; fator de amplificação  $10^3$ , 50 médias

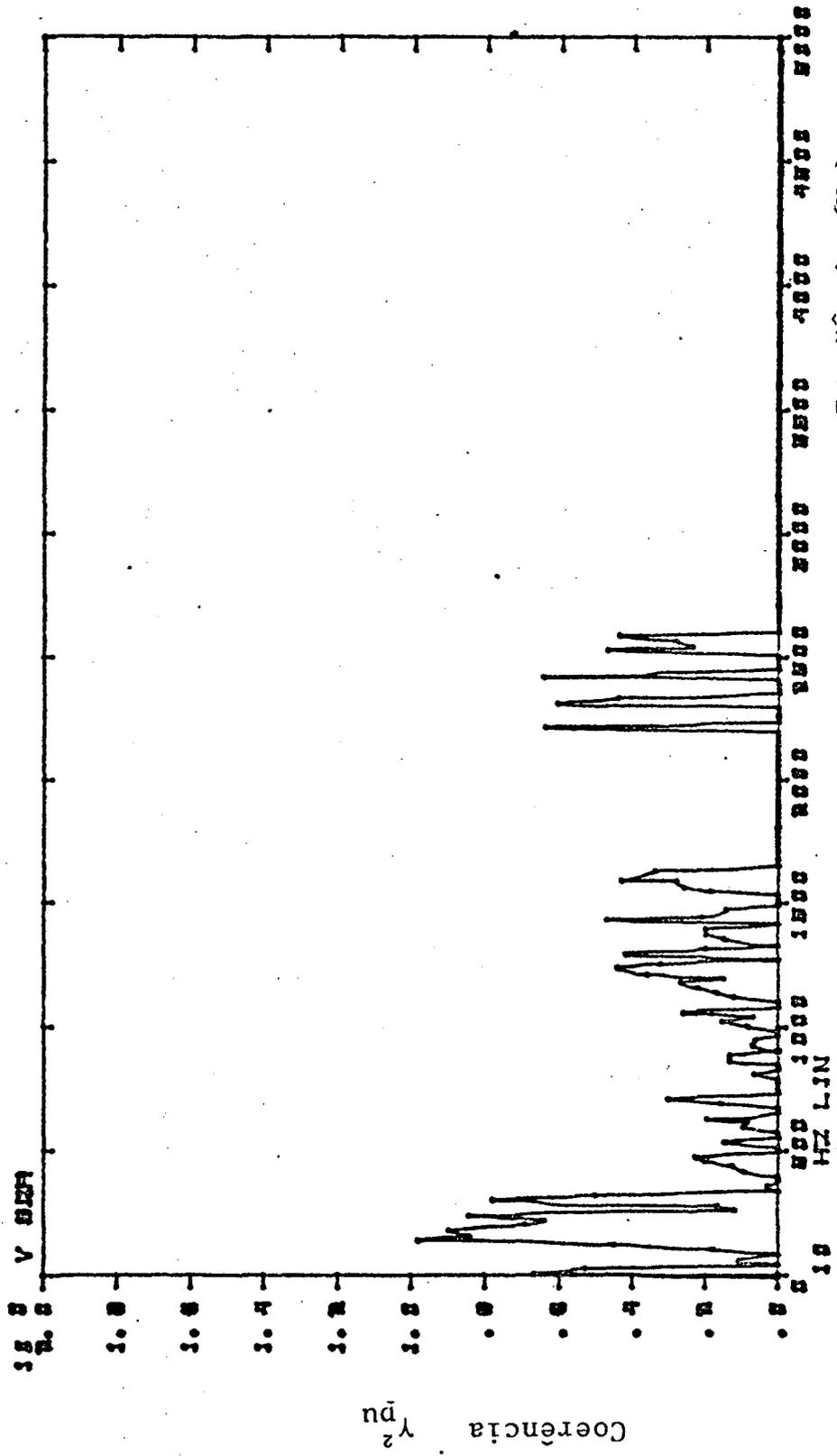


Figura 6.16 - Coerência  $Y^2$  em C.R.P. Teste de erro digital variando com o número de médias e usando programa modificado; fator de amplificação  $10^{30}$ , 40 médias. Medição em região central, igual figura 5.30

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nas diversas medições realizadas nesta pesquisa, é possível tirar importantes conclusões.

Neste estudo foi desenvolvido um método para medir a difusibilidade de um campo acústico através da estimativa da função coerência entre a pressão sonora e a velocidade de partícula usando a técnica de dois microfones próximos e um analisador FFT de dois canais. Com este foi estudada e quantificada a difusibilidade do campo acústico de duas câmaras reverberantes obtendo-se resultados com precisão e boa resolução.

Os resultados das medições de coerência  $\gamma_{pu}^2$  obtidos na região central da câmara reverberante grande e da pequena, mostraram claramente as frequências de corte de cada câmara, acima da qual  $\gamma_{pu}^2 \leq 0,3$ , o que sugere um limite a partir do qual o campo acústico pode considerar-se difuso. Esta frequência de corte foi de aproximadamente 200 Hz na câmara grande e de 2000 Hz na câmara pequena.

As medições da coerência  $\gamma_{pu}^2$  perto de uma parede, de uma aresta e de um canto realizadas nas duas câmaras reverberantes, mostraram com clareza o efeito de aproximação que estas produzem no campo acústico e a notável mudança que a difusibilidade sofre nestas regiões, fato que é confirmado pelos trabalhos publicados por Waterhouse [23].

O estudo para qualificar através da medição das características acústicas da câmara reverberante grande e da pequena, foi realizado usando métodos convencionais e normalizados, a fim de comparar estes resultados com os obtidos nas medições de coe-

rência  $\gamma_{pu}^2$ . A estimativa do desvio padrão da variação espacial dos níveis de pressão sonora é a medição fundamental na qualificação normalizada das câmaras reverberantes. Apresentaram-se duas estimativas do desvio padrão para a câmara grande, onde se constata que a obtida por Viana [22], figura 4.12, mostra que nas frequências abaixo de 125 Hz a câmara não está qualificada, sendo esta frequência de corte algo inferior à obtida com as medições da coerência  $\gamma_{pu}^2$  na região central da câmara. A estimativa do desvio padrão realizada na câmara pequena, apresentada na figura 4.13, mostra que a câmara é qualificada só acima dos 3000 Hz onde esta frequência de corte resulta ser algo superior à obtida com  $\gamma_{pu}^2$  que é perto de os 2,0 KHz, como se apresenta no capítulo 5.

Foi calculada a frequência de corte de Schröder obtendo o valor de 198 Hz para a câmara reverberante grande e 1622 Hz para a câmara pequena. Comparando estas frequências de corte com as obtidas no método normalizado e na coerência  $\gamma_{pu}^2$ , constata-se que estas estão muito próximas para a câmara grande e levemente afastadas para a câmara pequena. Portanto pode concluir-se que;

- 1 - A qualificação usando  $\gamma_{pu}^2$  é feita em banda de frequências estreita com alta resolução, enquanto a qualificação usando ISO é realizada em bandas de 1/3 de oitava.
- 2 - A qualificação usando  $\gamma_{pu}^2$  é feita por um número com valor entre 0 e 1 fornecendo o grau de difusibilidade, enquanto a norma ISO [12] só estabelece o limite onde o campo acústico pode ser considerado difuso.

O erro de cálculo digital, analisado no capítulo 6, resulta ser um dos erros sistemáticos mais complexos e difícil de avaliar, pois pode facilmente confundir-se com outros erros tais como o da substituição do gradiente de pressão pela diferença fini-

ta de pressões, considerando que os dois têm presença nas frequências altas. Este erro, devido ao baixo nível do sinal correspondente à velocidade de partícula, aumenta com o número de médias; em consequência, estas devem ser cuidadosamente escolhidas nas medições. A inclusão de um fator de amplificação no programa de cálculo da estimativa de coerência  $\gamma_{pu}^2$  resultou ser uma boa solução, pois ao lograr uma adequada relação entre o valor do fator e o número de médias conseguiu-se praticamente diminuir sua presença nas medições de  $\gamma_{pu}^2$ .

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

=====

- [1] BENDAT, J. and A. Piersol, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis", Wiley-Interscience Publication, New York, 1980.
- [2] BENDAT, J. "Statistical Errors in Measurement of Coherence Functions and Input/Output Quantities", Journal of Sound and Vibration, (1978), 59(3).
- [3] BENDAT, J. and A. Piersol, "RANDOM DATA: Analysis and Measurement Procedures", Wiley-Interscience Publications, New York, 1971.
- [4] BEZERRA, E. "Desenvolvimento de um Medidor de Intensidade Acústica com Aplicações", 1985 (Tese-dissertação de Mestrado UFSC).
- [5] BRUJEL, P. "The Enigma of Sound Power Measurement at Low Frequencies", B&K Technical Review, nº 3, 1978.
- [6] CHUNG, J.Y. "Cross-Spectral Method of Measuring Acoustic Intensity Without Error Caused by Instrument Phase Mismatch", J. Acoust. Soc. Am; 64(6), 1613-1616 (1978).
- [7] FAHY, F. "Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross-Spectral Density of Two Microphone Signal", J. Acoustic, Soc. Am. 62, 1057-1059 (1977).
- [8] GADE, S. "Sound Intensity (Theory, Instrument and Applications)", B&K Technical Review nº 3-4, 1982.
- [9] GADE, S. "Validity of Intensity Measurements", B&K Technical Review nº 4, 1985.

- |10| GADE, Svend, "Sound Intensity and its Application in Noise Control", Sound and Vibration, march 1985.
- |11| GERGES, S. "Diffuse Field Qualification by the Two Microphone Technique", ICA 12 E7-7, 1986.
- |12| ISO 3741 (1975). Determination of Sound Power Levels of Noise Source-Precision Methods for Broad-Band Sources in Reverberation Rooms.
- |13| ISO 3745 (1977). Determination of Sound Power Levels of Noise Sources-Precision Methods for Anechoic and semianechoic Rooms.
- |14| KRISHNAPPA. G. "Cross-Spectral Method of Measuring Acoustic Intensity by Correcting Phase and Gain Mismatch Errors by Microphone Calibration", J. Acoust. Soc. Am. 69(1), pp. 307-310, jan. 1981.
- |15| NOCETTI, H. "Qualificação de Câmara Reverberante para Medida de Potência Sonora e Avaliação da Qualidade Acústica de um Aparelho de Ar Condicionado", 1983 (Tese-dissertação de Mestrado-UFSC).
- |16| MALING, G. "Determination of Sound Power in Reverberant Rooms", Noise Control Engineering Journal, volume 25, nº 2, 1985.
- |17| MORSE, P. "Vibration and Sound", McGraw-Hill Publication, N.Y., 1948.
- |18| PACHECO, J. e S. Gerges, "Qualificação de Campos Sonoros usando a Técnica dos Dois Microfones Próximos", IX Congresso de Engenharia Mecânica, COBEM 87, Dezembro 1987.

- [19] SANGOY, R. "Estudo de Identificação de Fontes de Ruído e Vibrações em um Compressor Hermético". 1983 (Tese-dissertação de Mestrado-UFSC).
- [20] SHRÖEDER, M. "Frequency-Correlation Function of Frequency Responses in Rooms", The Journal of the Acoustical Society of America, 34, nº 12, 1962.
- [21] van ZYL, B. et al. "Sound Intensity in Diffuse Sound Fields", J. Acoust. Soc. Am. 78(2) 1985.
- [22] VIANA, M. "Redução de Ruído em Motores Elétricos". 1985 (Tese-dissertação de Mestrado-UFSC).
- [23] WATERHOUSE, R. "Interference Patterns in Reverberant Sound Fields", J. Acoust. Soc. Am. 27, 247-258, (1955).

**A N E X O S**  
**= = = = =**

## Anexo 1

Programa de Função Coerência  $\gamma_{pu}^2$ 

1	L	10			
5	CL	0			
9	CL	1			
13	CL	2			
17	CL	3			
21	CL	4			
25	CL	5			
29	CL	6			
33	CL	7			
37	CL	8			
41	CL	9			
45	L	15			
49	Y	100	5000		1
55	Y	100	5000		2
61	Y	5838	51		
66	Y W			6	1
72	Y R			1	
77	Y	5838	52		
82	Y W			11	1
88	Y R			1	
93	Y	6			2
98	L	20			
102	RA	4	5		
107	Y	5	4		
112	H1	4			
116	H1	5			
120	F	4	5		
125	X<	4			
129	A+	5			
133	*	11			
137	X>	8			
141	X<	5			
145	A-	4			
149	*	12			
153	:	10			
157	X>	9			
161	CL	0			

## Continuação Anexo 1

165	X<	8		
169	*-	9		
173	A+	1		
177	X>	1		
181	X<	8		
185	*-			
188	A+	2		
192	X>	2		
196	X<	9		
200	*-			
203	A+	3		
207	X>	3		
211	#	20	1D	0
217	:	1	1D	
222	:	2	1D	
227	:	3	1D	
232	X<	1		
236	*-			
239	X>	6		
243	:	2		
247	:	3		
251	X>	7		
255	Y	5838	54	
260	Y W	23		1
266	Y R	1		
271	.			

## Continuação Anexo 1

BS 1024

K 0 0 1023

K -4 4 46

0  $\nabla$  10.000

}

X &gt; 10

CL 0

K 0 0 1023

K -1 4 46

5  $\nabla$  0

X &gt; 11

CL 0

K 0 0 1023

K -2 4 46

-6887  $\nabla$  0

X &gt; 12

CL 0

## Anexo 2

Programa de Função Coerência  $\gamma^2_{pu}$ ,  
 modificado para o erro digital.

1	L	10			
5	CL	0			
9	CL	1			
13	CL	2			
17	CL	3			
21	CL	4			
25	CL	5			
29	CL	6			
33	CL	7			
37	CL	8			
41	CL	9			
45	L	15			
49	Y	100	5000		1
55	Y	100	5000		2
61	Y	5838	51		
66	Y W		6		1
72	Y R		1		
77	Y	5838	52		
82	Y W		11		1
88	Y R		1		
93	Y	6		2	
98	L	20			
102	RA	4		5	
107	Y	5		4	
112	H1	4			
116	H1	5			
120	F	4		5	
125	X<	4			
129	*	13			
133	X>	4			
137	X<	5			
141	*	13			
145	X>	5			
149	X<	4			

## Continuação Anexo 2

153	A+	5		
157	*	11		
161	X>	8		
165	X<	5		
169	A-	4		
173	*	12		
177	:	10		
181	X>	9		
185	CL	0		
189	X<	8		
193	*-	9		
197	A+	1		
201	X>	1		
205	X<	8		
209	*-			
212	A+	2		
216	X>	2		
220	X<	9		
224	*-			
227	A+	3		
231	X>	3		
235	#	20	1D	0
241	:	1	1D	
246	:	2	1D	
251	:	3	1D	
256	X<	1		
260	*-			
263	X>	6		
267	:	2		
271	:	3		
275	X>	7		
279	Y	5838	54	
284	Y W	23		1
290	Y R	1		
295	.			

## Continuação Anexo 2

BS 1024

K 0 0 1023

K -4 4 46

0 ∇ 10.000

J

X &gt; 10

CL 0

K 0 0 1023

K -1 4 46

5 ∇ 0

X &gt; 11

CL 0

K 0 0 1023

K -2 4 46

-6887 ∇ 0

X &gt; 12

CL 0

K 0 0 1023

K 30 4 46

1 ∇ 1

X &gt; 13

CL 0

### A N E X O 3

#### Frequências dos modos acústicos de câmaras reverberantes

Os modos acústicos de uma sala são caracterizados pelas suas respectivas frequências de ressonâncias. Isto significa que se um som, com a frequência de um determinado modo acústico, for injetado na sala, esta irá responder de maneira mais forte do que se excitada fora da frequência de ressonância.

As frequências de ressonância podem ser calculadas a partir da seguinte expressão [17]:

$$f_n = \frac{c}{2} \left[ \frac{n_x^2}{L_x} + \frac{n_y^2}{L_y} + \frac{n_z^2}{L_z} \right]^{1/2}$$

onde:  $c$  é a velocidade do som

$n_x, n_y, n_z$  são números inteiros positivos

$L_x, L_y, L_z$  são as dimensões da sala

São apresentados os valores de  $f_n$  para Câmara Reverberante Grande e Câmara Reverberante Pequena e comparados com os valores medidos (ver figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9).

## CÂMARA REVERBERANTE GRANDE

Dimensões da câmara:  $L_x = L_y = L_z = 7,4\text{m}$

$n_x$	$n_y$	$n_z$	freqüências calculadas (Hz)	freqüências medidas (Hz)
0	0	1		
0	1	0	23,2	23,2
1	0	0		
0	1	1		
1	0	1	32,8	33,0
1	1	0		
1	1	1	40,1	40,3
0	0	2		
0	2	0	46,4	46,4
2	0	0		
1	2	0		
1	0	2		
0	1	2		
0	2	1	51,8	52,5
2	1	0		
2	0	1		
2	1	1		
1	2	1	56,8	57,4
1	1	2		
0	2	2		
2	0	2	65,6	66,0
2	2	0		
2	2	1		
2	1	2		
1	2	2		
3	0	0	69,5	69,7
0	3	0		
0	0	3		

$n_x$	$n_y$	$n_z$	freqüências calculadas (Hz)	freqüências medidas (Hz)
0	3	1		
0	1	3		
3	0	1		
3	1	0	73,3	74,5
1	3	0		
1	0	3		
3	1	1		
1	3	1	76,9	78,1
1	1	3		
2	2	2	80,3	
0	2	3		
0	3	2		
2	3	0		
2	0	3	83,6	84,2
3	2	0		
3	0	2		
1	2	3		
1	3	2		
3	2	1		
3	1	2	86,7	
2	3	1		
2	1	3		
0	0	4		
0	4	0		
4	0	0	92,7	90,3
3	2	2		
2	3	0		
2	2	3		
4	0	1		
4	1	0	95,6	96,4
1	0	4		
1	4	0		
0	1	4		
0	4	1		
3	0	3		
3	3	0		
0	3	3		
4	1	1	98,3	
1	4	1		
1	1	4		
3	3	1		
3	1	3	101,0	100,0
1	3	3		

$n_x$	$n_y$	$n_z$	freqüências calculadas (Hz)	freqüências medidas (Hz)
4	2	0		
4	0	2		
2	4	0		
2	0	4	103,6	103,8
0	4	2		
0	2	4		
4	1	2		
4	2	1		
1	2	4	106,2	107,5
1	4	2		
2	4	1		
2	1	4		
3	3	2		
3	2	3	108,7	
2	3	3		
4	2	2		
2	4	2	113,5	
2	2	4		
4	0	3		
4	3	0		
3	4	0		
3	0	4	115,9	
0	3	4		
0	4	3		
0	0	5		
0	5	0		
5	0	0		
4	1	3		
4	3	1		
1	3	4		
1	4	3		
3	4	1		
3	1	4	118,2	119,7
5	0	1		
5	1	0		
1	0	5		
1	5	0		
0	1	5		
0	5	1		
3	3	3		
5	1	1	120,4	
1	5	1		
1	1	5		

$n_x$	$n_y$	$n_z$	frequências calculadas (Hz)	frequências medidas (Hz)
3	4	2		
3	2	4		
2	3	4		
2	4	3		
4	2	3		
4	3	2		
5	0	2	124,8	
5	2	0		
2	0	5		
2	5	0		
0	2	5		
0	5	2		
5	1	2		
5	2	1		
1	2	5	126,9	127,0
1	5	2		
2	5	1		
2	1	5		
0	4	4		
4	0	4	131,1	
4	4	0		
4	4	1		
4	1	4		
1	4	4	133,1	
5	2	2		
2	5	2		
2	2	5		
4	3	3		
3	4	3		
3	3	4		
5	0	3	135,1	135,5
5	3	0		
0	3	5		
0	5	3		
3	0	5		
3	5	0		
5	1	3		
5	3	1		
1	3	5	137,1	
1	5	3		
3	1	5		
3	5	1		
4	4	2		
4	2	4		
2	4	4	139,1	
0	0	6		
0	6	0		
6	0	0		

$n_x$	$n_y$	$n_z$	frequências calculadas (Hz)	frequências medidas (Hz)
6	0	1		
6	1	0		
1	6	0		
1	0	6	141,0	141,7
0	1	6		
0	6	1		
5	2	3		
5	3	2		
2	3	5		
2	5	3		
3	2	5	142,9	
3	5	2		
6	1	1		
1	6	1		
1	1	6		
6	0	2		
6	2	0		
0	2	6		
0	6	2	146,6	145,3
2	0	6		
2	6	0		
4	4	3		
4	3	4		
3	4	4		
5	0	4		
5	4	0		
0	4	5		
0	5	4	148,4	
4	0	5		
4	5	0		
6	1	2		
6	2	1		
1	2	6		
1	6	2		
2	1	6		
2	6	1		
5	1	4		
5	4	1		
1	4	5	150,2	150,2
1	5	4		
4	5	1		
4	1	5		
5	3	3		
3	5	3	152,0	
3	3	5		
6	2	2		
2	2	6	153,7	
2	6	2		

$n_x$	$n_y$	$n_z$	frequências calculada (Hz)	frequências medida (Hz)
5	2	4		
5	4	2		
2	4	5		
2	5	4		
4	5	2		
4	2	5	155,5	
6	0	3		
6	3	0		
0	3	6		
0	6	3		
3	0	6		
3	6	0		
6	1	3		
6	3	1		
1	3	6	157,2	156,3
1	6	3		
3	1	6		
3	6	1		
4	4	4	160,6	
6	2	3		
6	3	2		
2	3	6		
2	6	3	162,2	
3	2	6		
3	6	2		
0	5	5		
5	0	5		
5	5	0		
5	3	4		
5	4	3	163,9	
3	4	5		
3	5	4		
4	3	5		
4	5	3		
5	5	1		
5	1	5	165,5	
1	5	5		
6	0	4		
6	4	0		
4	0	6		
4	6	0	167,1	
0	4	6		
0	6	4		

$n_x$	$n_y$	$n_z$	frequências calculadas(Hz)	frequências medidas (Hz)
6	1	4		
6	4	1		
1	4	6		
1	6	4	168,7	
4	1	6		
4	6	1		
5	5	2		
5	2	5		
2	5	5	170,3	169,7
6	3	3		
3	6	3		
3	3	6		
6	2	4		
6	4	2		
2	4	6		
2	6	4	173,4	
4	2	6		
4	6	2		
5	4	4		
4	5	4	175,0	
4	4	5		
5	5	3		
5	3	5	178,0	179,5
3	5	5		
6	3	4		
6	4	3		
3	4	6		
3	6	4		
4	3	6		
4	6	3	181,0	
6	0	5		
6	5	0		
0	5	6		
0	6	5		
5	6	0		
5	0	6		
6	1	5		
6	5	1		
1	5	6		
1	6	5	182,5	
5	1	6		
5	6	1		

$n_x$	$n_y$	$n_z$	freqüências calculadas(Hz)	freqüências medidas (Hz)
6	2	5		
6	5	2		
2	5	6		
2	6	5	186,8	184,4
5	2	6		
5	6	2		
5	5	4		
5	4	5	188,3	
4	5	5		
6	4	4		
4	4	6	191,1	191,7
4	6	4		
6	3	5		
6	5	3		
3	5	6		
3	6	5	193,9	
5	3	3		
5	3	6		
0	6	6		
6	0	6	196,7	196,6
6	6	0		
6	6	1		
6	1	6	198,0	
1	6	6		
5	5	5	200,7	
6	6	2		
6	2	6	202,0	201,5
2	6	6		
6	4	5		
6	5	4		
4	5	6	203,4	
4	6	5		
5	4	6		
5	6	4		
FREQUÊNCIA DE SCHRÖEDER			207,0	
6	6	3		
6	3	6	208,6	
3	6	6		

## CÂMARA REVERBERANTE PEQUENA

Dimensões da câmara:  $L_x = 1,41\text{m}$      $L_y = 1,16\text{m}$      $L_z = 0,93\text{m}$

$n_x$	$n_y$	$n_z$	frequência calculada (Hz)	frequência medida (Hz)
1	0	0	121,6	122,0
0	1	0	147,8	149,0
0	0	1	184,4	185,6
1	1	0	191,4	193,0
1	0	1	220,9	222,2
0	1	1	236,4	237,0
2	0	0	243,3	244,2
1	1	1	265,8	268,6
2	1	0	284,7	285,7
0	2	0	295,7	295,5
2	0	1	305,3	305,2
1	2	0	319,7	319,9
2	1	1	339,2	339,4
0	2	1	348,5	349,2
3	0	0	364,9	361,4
0	0	2	368,8	368,7
1	2	1	369,1	371,1
2	2	0	382,9	381,0
1	0	2	388,4	
3	1	0	393,7	393,1
0	1	2	397,3	398,0
3	0	1	408,8	407,8
1	1	2	415,5	
2	2	1	425,0	425,0
0	2	2	427,7	
3	1	1	434,8	432,2
2	0	2	441,8	439,5
0	3	0	443,5	
1	3	0	459,9	
2	1	2	465,9	466,4
3	2	0	469,7	471,2
0	3	1	480,3	483,4
4	0	0	486,5	
1	2	2	488,1	490,8
1	3	1	495,5	
3	2	1	504,6	
2	3	0	505,9	
4	1	0	508,5	
3	0	2	518,8	515,2
4	0	1	520,3	
2	2	2	531,6	527,4
2	3	1	538,4	537,2
3	1	2	539,5	539,6

$n_x$	$n_y$	$n_z$	frequência calculada(Hz)	frequência medida (Hz)
4	1	1	540,9	
0	0	3	553,2	551,8
1	0	3	566,4	561,6
4	2	0	569,3	
0	1	3	572,6	571,3
3	3	0	574,3	
0	3	2	576,8	
1	1	3	585,4	582,0
1	3	2	589,5	
0	4	0	591,4	591,0
3	2	2	597,2	
4	2	1	598,5	
3	3	1	603,2	603,1
1	4	0	603,8	604,0
2	0	3	604,3	605,5
5	0	0	608,2	
4	0	2	610,5	
0	4	1	619,5	617,7
2	1	3	622,2	620,2
5	1	0	625,9	
2	3	2	626,0	
0	2	3	627,3	
4	1	2	628,2	
1	4	1	631,3	
5	0	1	635,5	
1	2	3	639,0	
2	4	0	639,5	
5	1	1	652,5	
4	3	0	658,4	659,2
3	0	3	662,7	661,7
2	4	1	665,5	
2	2	3	672,8	671,4
5	2	0	676,2	
4	2	2	678,4	678,2
3	1	3	679,0	
3	3	2	682,6	
4	3	1	683,7	
3	4	0	694,9	693,4
0	4	2	697,0	
5	2	1	700,9	
1	4	2	707,5	708,1
0	3	3	709,1	
5	0	2	711,3	
3	4	1	718,9	
1	3	3	719,4	720,3
3	2	3	725,7	725,1
5	1	2	726,5	
6	0	0	729,8	
4	0	3	736,7	
0	0	4	737,6	737,4
2	4	2	738,2	
0	5	0	739,2	739,5
6	1	0	744,6	744,7
1	0	4	747,6	
1	5	0	749,2	
2	3	3	749,6	
4	1	3	751,4	