

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Flávio Ramos
Torres e aprovada
pela comissão julgadora em 21/12/1992

Eugênio Spanó Rosa
orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

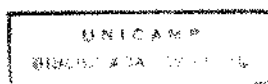
Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia de Campinas
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

CARACTERIZAÇÃO DA INTERFACE E
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO FATOR DE ATRITO INTERFACIAL
EM ESCOAMENTOS HORIZONTAIS ESTRATIFICADOS
VOLUME - I

58/92

AUTOR: FLÁVIO RAMOS TORRES
ORIENTADOR: EUGÊNIO SPANÓ ROSA
CO-ORIENTADOR: FERNANDO DE ALMEIDA FRANÇA

DEZEMBRO, 1992

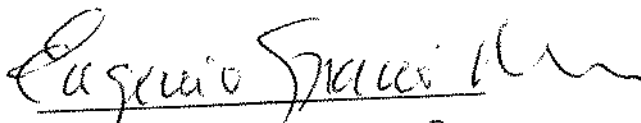


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

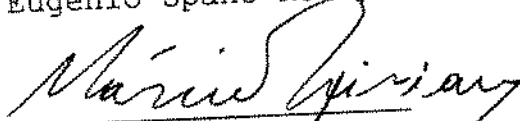
A dissertação "Caracterização da Interface e Determinação Experimental do Fator de Atrito Interfacial em Escoamentos Horizontais Estratificados", elaborada por Flávio Ramos Torres e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 21 de dezembro de 1992

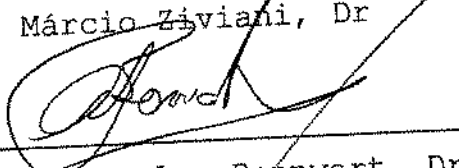
Banca Examinadora



Eugênio Spanó Rosa, Dr.



Márcio Ziviani, Dr



Antônio Carlos Bannwart, Dr

Aos meus pais, Mário e Maria Rosa

AGRADECIMENTOS

Aos técnicos da oficina do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Sílvio de Souza, Edimur Lopes Antunes, José Carlos Camargo Junior e Geraldo Jurandir Vialta, pela montagem do aparato experimental e pela assistência prestada durante a realização dos experimentos.

Aos colegas e amigos da PETROBRÁS, pelo apoio recebido.

Aos colegas e amigos Marcos Pedras e Guilherme Rodrigues Junior, cujas idéias muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos Drs. Márcio Ziviani e Antônio Carlos Bannwart pela gentileza de participarem da minha banca examinadora.

A PETROBRÁS, que permitiu a minha participação neste mestrado.

Aos orientadores Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa e Prof. Dr. Fernando de Almeida França, que por seu contagiante entusiasmo, por sua competência e dedicação, tornaram possível a realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura:

- 1.1 - Evolução da interface para crescentes velocidades do gás (pg. 2).
- 2.1 - Representação esquemática do escoamento (pg. 8).
- 2.2 - Geometrias usualmente adotadas para a interface (pg. 9).
- 4.1 - Aparato experimental (pg. 25).
- 4.2 - Tubulação bifásica (pg. 26).
- 5.1 - Sondas de espessura de filme (pg. 30).
- 5.2 - Sonda de condutância de fios paralelos (pg. 31).
- 5.3 - Sonda de condutância aflorante (pg. 32).
- 5.4 - Diagrama de blocos do circuito utilizado (pg. 33).
- 5.5 - Curvas de aferição das sondas de espessura de filme (pg. 36).
- 6.1 - Fluxograma simplificado do processamento de sinal (pg. 40).
- 7.1 - Localização dos pontos experimentais no mapa de Taitel & Dukler (pg. 49).
- 7.2 - Distribuição de filme para crescentes velocidades superficiais do gás (pg. 51, 52).
- 7.3 - Distribuição de filme para crescentes velocidades superficiais do líquido (pg. 54).

- 7.4 - Histograma de espessura de filme para crescentes velocidades superficiais do gás (pg. 56, 57).
- 7.5 - Histograma de espessura de filme para crescentes velocidades superficiais do líquido (pg. 59).
- 7.6 - Densidade espectral de potência para crescentes velocidades superficiais do gás (pg. 61, 62).
- 7.7 - Densidade espectral de potência para crescentes velocidades superficiais do líquido (pg. 63).
- 7.8 - Função de autocorrelação normalizada para crescentes velocidades superficiais do gás (pg. 65, 66).
- 7.9 - Função de autocorrelação normalizada para crescentes velocidades superficiais do líquido (pg. 68).
- 7.10 - Densidade espectral de potência para o ponto 30 (pg. 70).
- 7.11 - Função de correlação cruzada normalizada para o ponto 30 (pg. 72).
- 7.12 - Velocidade de onda em função da velocidade superficial do gás (pg. 73).
- 7.13 - Velocidade de onda em função da velocidade superficial do líquido (pg. 74).
- 7.14 - Relação entre a velocidade de onda e a velocidade média do líquido (pg. 74).
- 7.15 - Desvio padrão da espessura de filme (pg. 75).
- 7.16 - Fração de vazio (pg. 76).
- 7.17 - Relação entre o perímetro molhado e o perímetro do tubo (pg. 77).
- 7.18 - Relação entre o perímetro da interface gás-líquido e o perímetro do tubo molhado pelo líquido (pg. 78).
- 7.19 - Gradiente de pressão em função da velocidade superficial do gás (pg. 79).

7.20 - Gradiente de pressão em função da velocidade superficial do líquido (pg. 80).

7.21 - Relação entre a tensão de cisalhamento na interface e a tensão de cisalhamento no líquido, junto à parede (pg. 81).

7.22 - Relação f_i/f_g em função da velocidade superficial do gás (pg. 83, 84).

7.23 - Relação f_i/f_g em função da velocidade superficial do gás, usando o desvio padrão medido experimentalmente (pg. 87, 88).

LISTA DE TABELAS

Tabela:

- 5.1 - Constantes de aferição das sondas de espessura de filme (pg. 35).
- 7.1 - Resultados experimentais (pg. 47).

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice:	Página:
I - MEDIÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA	I.1
II - MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR	II.1
III - MEDIÇÃO DO GRADIENTE DE PRESSÃO	III.1
IV - DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	IV.1
V - TABELA DE RESULTADOS	V.1
VI - GRÁFICOS	VI.1

NOMENCLATURA

Alfabeto Romano:

A	área transversal do tubo
D	diâmetro interno do tubo
d	diâmetro interno do anel líquido
f	fator de atrito
g	aceleração da gravidade
H	altura do canal
J	velocidade superficial
K	rugosidade aparente do filme líquido
p	pressão
R	raio interno do tubo
r	raio interno do anel líquido
Re	número de Reynolds
S	perímetro
U	velocidade média
W	vazão mássica
z	comprimento

Letras Gregas:

α	fração de vazio
β	metade do arco molhado pelo líquido
Δ	variação

δ	espessura de filme
μ	viscosidade dinâmica
ν	viscosidade cinemática
ρ	massa específica
τ	tensão cisalhante

Subscritos:

g	fase gasosa
i	interface gás-líquido
l	fase líquida
w	parede da tubulação
s	superficial

Sobreescritos:

*	modificação
---	-------------

RESUMO

Foram realizados ensaios com ar e água em uma tubulação horizontal, de seção circular, nos regimes estratificado e anular.

O fator de atrito interfacial foi determinado a partir de um balanço de forças aplicado à corrente gasosa, assumindo-se a correlação de Blasius para o cálculo da tensão de cisalhamento no gás, junto à parede. Considerou-se a geometria real da interface, obtida através de sondas de condutância de fios paralelos.

Histogramas, densidades espectrais de potência e funções de auto-correlação dos sinais de espessura de filme foram usados na caracterização da interface. Também foram medidos o desvio padrão da espessura de filme e a velocidade de onda.

Foram feitas comparações entre as informações experimentais e correlações disponíveis na literatura. Algumas das hipóteses assumidas por estas correlações são questionadas.

ABSTRACT

Experiments were made with air and water in an horizontal circular pipe.

The interfacial friction factor was calculated from the one-dimensional momentum balance applied to the gas phase and the measurements of liquid hold-up and pressure drop. The actual geometry of the mean interface was considered, based on measurements of film thickness, made with parallel wire conductance probes.

Histograms, power spectral density functions and autocorrelation functions were plotted from the film thickness signals. The wave velocity and the standard deviation of the film thickness were also calculated.

The results are compared with some of the available correlations of literature. Some assumptions of these correlations are questioned.

SUMÁRIO

	Página:
PÁGINA TÍTULO	
PÁGINA DE APROVAÇÃO	i
DEDICATÓRIA	ii
AGRADACIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE APÊNDICES	viii
NOMENCLATURA	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
SUMÁRIO	xiii
CAPÍTULO - 1 : INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO - 2 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
CAPÍTULO - 3 : FATOR DE ATRITO INTERFACIAL	18
CAPÍTULO - 4 : APARATO EXPERIMENTAL	23
CAPÍTULO - 5 : ESPESSURA DE FILME	28
CAPÍTULO - 6 : PROCESSAMENTO DE SINAL	37
CAPÍTULO - 7 : RESULTADOS EXPERIMENTAIS	46
CAPÍTULO - 8 : CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

CAPÍTULO - 1

INTRODUÇÃO

Escoamentos bifásicos horizontais ou aproximadamente horizontais, caracterizados por uma pequena retenção de líquido, ocorrem frequentemente em dutos de gás natural, quando uma parcela dos hidrocarbonetos mais pesados condensa, devido a alterações de pressão ou temperatura. A determinação da perda de carga e da fração de líquido retida na linha é de grande interesse para o projeto e operação destas tubulações e sistemas correlatos.

Os padrões de escoamento usualmente encontrados em tais situações são o estratificado e o anular (figura 1.1).

Nas baixas velocidades do gás ocorre o padrão estratificado. Inicialmente, a interface se mostra plana e lisa (figura 1.1a).

Na medida em que a velocidade do gás aumenta, começam a aparecer ondas na interface (figura 1.1b).

Um novo incremento na velocidade do gás provoca o curvamento da interface e faz com que o filme comece a escalar a parede do tubo (figura 1.1c).

Um aumento ainda maior na velocidade do gás pode causar o fechamento do filme, caracterizando o escoamento anular. Nestas velocidades, gotas eventualmente são arrancadas do filme líquido, passando a escoar dispersas no núcleo gasoso. Devido à ação da gravidade, o filme se exhibe mais espesso na geratriz inferior (figura 1.1d).

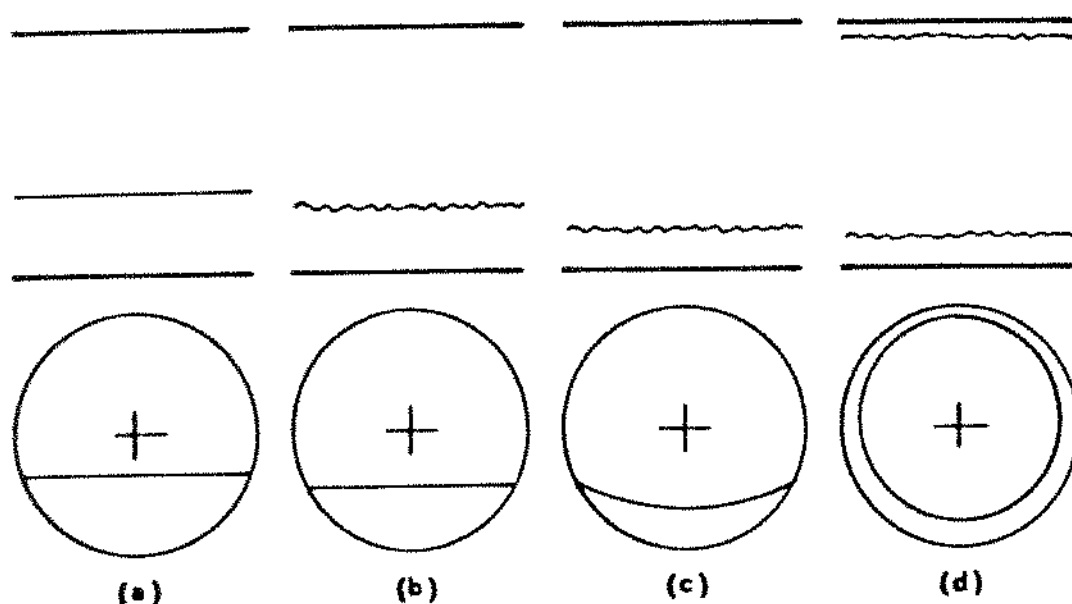


Figura (1.1) - Evolução da interface para crescentes velocidades do gás. Estratificado liso (a); estratificado ondulado (b) e (c); anular (d).

Um dos métodos de análise usados no tratamento de escoamentos bifásicos é aquele baseado em correlações empíricas desenvolvidas a partir de um banco de dados experimental. Algumas destas correlações são simplesmente exercícios matemáticos, outras envolvem análise dimensional e o agrupamento de variáveis de uma forma lógica. Embora fáceis de usar, podem conduzir a resultados bastante incorretos quando aplicadas indiscriminadamente em situações diferentes

daquelas em que foram desenvolvidas. As principais limitações destes métodos são, portanto, a grande dependência de bancos de dados experimentais e a pequena margem para extrapolação dos resultados. Este tipo de abordagem tem sido substituído por modelos que buscam refletir os aspectos físicos do fenômeno.

Tentando solucionar as limitações dos métodos empíricos, surgiram os modelos analíticos, dos quais o mais simples é o modelo homogêneo. Neste modelo, propriedades médias são convenientemente definidas, tratando-se a mistura como um pseudofluido, para o qual são aplicadas as técnicas dos escoamentos monofásicos. A principal limitação dos modelos homogêneos reside na hipótese de que as fases escoam com a mesma velocidade, o que, em algumas situações, conduz a resultados bastante incorretos.

Para incluir o deslizamento entre as fases foram desenvolvidos os modelos de fases separadas, onde se supõe o gás e o líquido escoando lado a lado, escrevendo-se equações separadas para cada uma das fases. A interação entre ambas também é considerada. Para o fechamento destes modelos são necessárias algumas correlações empíricas.

A vantagem das formulações mais complexas, mais próximas da realidade física do escoamento, reside na pouca necessidade de experimentação e no amplo espectro de utilização. Em contrapartida, os métodos empíricos demandam maciça experimentação e só podem ser aplicados com alguma segurança em situações muito próximas àquelas em que foram desenvolvidos.

Recentemente, vários modelos analíticos têm surgido na literatura tratando dos escoamentos horizontais estratificados e anulares. Na sua maioria, são modelos de fases separadas, fundamentados nos balanços de forças aplicados às correntes de gás e de líquido. As equações assim obtidas relacionam o gradiente de pressão com as áreas transversais das fases (retenção de líquido), perímetros e tensões de cisalhamento das interfaces gás-líquido, gás-parede e líquido-parede.

Para completar o modelo, são necessárias estimativas para as tensões cisalhantes, e estimativas ou suposições sobre a geometria da interface gás-líquido.

As tensões cisalhantes são usualmente determinadas em função de fatores de atrito, definidos convenientemente, e calculados por correlações empíricas. Alguns modelos mais complexos obtêm a tensão de cisalhamento no líquido, junto à parede, através de uma análise diferencial aplicada ao filme, reduzindo a dependência de correlações empíricas.

Quanto à geometria do escoamento, muitos autores assumem uma interface plana, obtendo assim as relações geométricas que completam o modelo. Outros assumem o líquido escoando como um anel concêntrico, obtendo um outro conjunto de relações geométricas que também completa o modelo. Outros ainda consideram o líquido escoando com a forma de um arco de anel, situação intermediária entre as duas anteriores.

Ao comparar as várias correlações disponíveis para o cálculo do fator de atrito interfacial, observa-se que estas diferem muito entre si, tanto nos resultados, como na forma, como na escolha dos parâmetros relevantes.

Outra dúvida que se coloca diz respeito à aplicabilidade das hipóteses geométricas simplificadoras. Por exemplo, para que faixa de velocidades do gás a suposição de interface plana representa razoavelmente a geometria do escoamento?

Estas questões, associadas à escassez de dados experimentais na literatura motivou a realização do presente trabalho, cujos principais objetivos são:

a) Obtenção de dados experimentais para o fator de atrito interfacial, determinado por um balanço de forças aplicado à corrente gasosa, tomando-se medidas de gradiente de pressão, e considerando-se a forma real da interface, medida através de sondas de condutância de fios paralelos.

b) Caracterização da estrutura da interface, mediante o processamento dos sinais de espessura de filme.

c) Comparação das medidas experimentais do fator de atrito interfacial com as correlações da literatura.

d) Verificação da aplicabilidade das hipóteses geométricas simplificadoras assumidas pelos modelos da literatura.

CAPÍTULO - 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Grande parte dos modelos analíticos disponíveis na literatura, para o cálculo da perda de carga e da retenção de líquido em escoamentos bifásicos horizontais estão fundamentados em balanços de forças unidimensionais aplicados ao líquido e ao gás. É o caso, por exemplo, dos modelos de Taitel & Dukler (1976), Kowalski (1987), Andritsos & Hanratty (1987), entre outros.

Para um escoamento horizontal, desenvolvido e estacionário, o balanço de forças no gás pode ser escrito como:

$$-\alpha A (dp/dz) = S_g \tau_{wg} + S_i \tau_i \quad (2.1)$$

E no líquido, como:

$$-(1-\alpha) A (dp/dz) = S_l \tau_{wl} - S_i \tau_i \quad (2.2)$$

onde α é a fração de vazio, A a área transversal da tubulação, dp/dz o gradiente de pressão, S o perímetro, τ a tensão de cisalhamento média, e os subscritos g , l e i referem-se, respectivamente, ao gás, líquido e interface (figura 2.1).

Este equacionamento não considera a troca de massa entre as fases ou a dispersão e redeposição de gotas no filme

líquido. A pressão é considerada uniforme na seção transversal e o gradiente de pressão é o mesmo para ambas as fases.

A solução para α e dp/dz , do sistema constituído pelas equações (2.1) e (2.2), depende de relações que permitam expressar os parâmetros geométricos S_g , S_i e S_l em função de α ; bem como, de expressões empíricas que permitam avaliar as tensões cisalhantes τ_g , τ_i e τ_l .

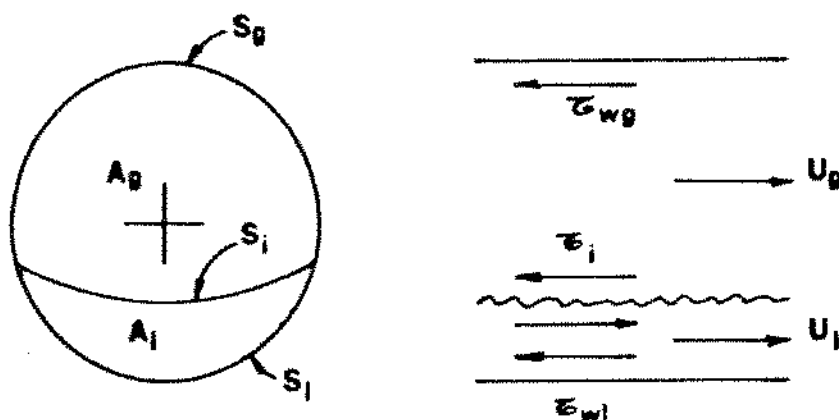


Figura (2.1) - Representação esquemática do escoamento.

A busca destas expressões para solucionar o sistema de equações (2.1) e (2.2), tem sido o objeto de estudo de diversos autores. Aparentemente, os esforços neste sentido tem sido dirigidos principalmente para a determinação das tensões cisalhantes, enquanto que os perímetros são obtidos, assumindo-se, para o líquido, uma interface plana ou uma geometria anular ou uma geometria em arco anular (figura 2.2).

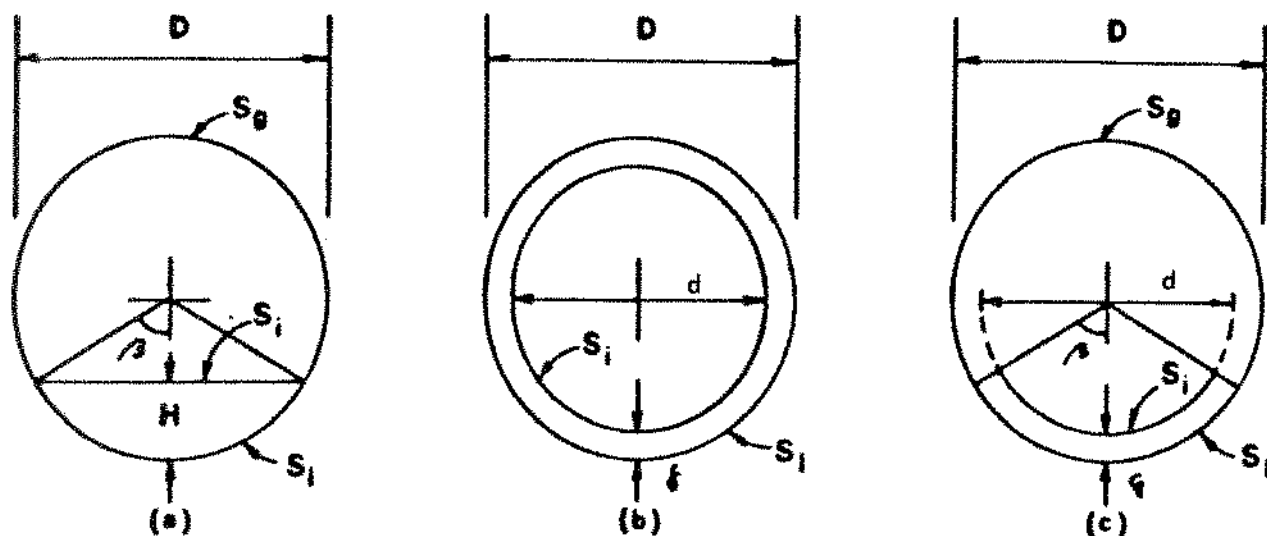


Figura (2.2) - Interface plana (a); geometria anular (b); geometria em arco anular (c).

Usualmente, as tensões cisalhantes são expressas em termos de fatores de atrito, calculados através de correlações empíricas. As tensões de cisalhamento e os fatores de atrito se relacionam por:

$$\tau_{wg} = (1/2) f_g \rho_g U_g^2 \quad (2.3)$$

$$\tau_{wl} = (1/2) f_l \rho_l U_l^2 \quad (2.4)$$

Onde f representa o fator de atrito, ρ a massa específica, U a velocidade média, e os subscritos g e l referem-se ao gás e ao líquido, respectivamente.

A seguir são apresentadas algumas das correlações empíricas usadas para o cálculo dos fatores de atrito.

Wallis (1969), considerando uma geometria anular, apresentou um modelo de fases separadas para os escoamentos horizontais estratificados e anulares.

Relações para geometria anular (figura 2.2b):

$$\alpha = (d/D)^2 \quad (2.5)$$

$$S_g = 0 \quad (2.6)$$

$$S_l = \pi D \quad (2.7)$$

$$S_i = \pi d \quad (2.8)$$

$$\delta = (D - d)/2 \quad (2.9)$$

O autor identificou, para elevadas velocidades do gás, um comportamento assintótico, onde o fator de atrito interfacial poderia ser aproximado por uma função linear da espessura média do filme. Para esta região, que denominou "escoamento anular rugoso" ("rough annular flow"), sugeriu o uso de:

$$f_i = 0,005 (1 + 300 \delta/D) \quad (2.10)$$

Com a tensão interfacial aproximada por:

$$\tau_i = (1/2) f_i \rho_g U_g^2 \quad (2.11)$$

Onde f_i é o fator de atrito, δ a espessura média do filme e D o diâmetro do tubo. Ao comparar a Eq.(2.10) com as correlações de Nikuradse e Moody para escoamento monofásico turbulento em tubos rugosos, concluiu que o filme líquido se

comporta como uma parede rugosa, com uma rugosidade equivalente de areia de quatro vezes a espessura média do filme. Ou seja:

$$K = 4 \delta \quad (2.12)$$

Onde K é a rugosidade de areia equivalente.

Taitel & Dukler (1976) desenvolveram um modelo fenomenológico para predição do padrão de escoamento em dutos bifásicos horizontais. Este modelo considera que inicialmente o padrão é o estratificado liso, aplicando então critérios de estabilidade para identificar o provável padrão de escoamento. A interface é considerada plana.

Relações para interface plana (figura 2.2a):

$$\alpha = (1/\pi) (\pi - \beta + \text{sen}\beta \cos\beta) \quad (2.13)$$

$$S_g = D (\pi - \beta) \quad (2.14)$$

$$S_l = D \beta \quad (2.15)$$

$$S_i = D \text{sen}\beta \quad (2.16)$$

$$H = (D/2) (1 - \cos\beta) \quad (2.17)$$

Os fatores de atrito são calculados pelas equações abaixo.

Gás (escoamento turbulento em tubo liso):

$$f_g = 0,046 \text{Re}_g^{-0,2} \quad (2.18)$$

Líquido (escoamento turbulento em tubo liso):

$$f_l = 0,046 \operatorname{Re}_l^{-0,2} \quad (2.19)$$

Líquido (escoamento laminar):

$$f_l = 16 \operatorname{Re}_l^{-1} \quad (2.20)$$

O fator de atrito na interface foi definido por:

$$\tau_i = (1/2) f_i \rho_g (U_g - U_i)^2 \quad (2.21)$$

Onde U_i é a velocidade da interface. Como $U_i \ll U_g$, a equação (2.21) foi aproximada por:

$$\tau_i = (1/2) f_i \rho_g U_g^2 \quad (2.22)$$

Interface (escoamento turbulento em tubo liso):

$$f_i = 0,046 \operatorname{Re}_g^{-0,2} \quad (2.23)$$

Com:

$$\operatorname{Re}_g = U_g D_g / \nu_g \quad (2.24)$$

$$\operatorname{Re}_l = U_l D_l / \nu_l \quad (2.25)$$

Onde Re é o número de Reynolds, ν a viscosidade cinemática e os subscritos g e l referem-se ao gás e ao líquido. Os diâmetros hidráulicos são definidos como:

$$D_g = 4 A_g / (S_g + S_i) \quad (2.26)$$

$$D_i = 4 A_i / S_i \quad (2.27)$$

Shoham & Taitel (1984) recomendaram, para o fator de atrito interfacial em dutos de seção circular, o uso do mesmo valor constante encontrado por Cohen & Hanratty (1968), para o escoamento em canais a baixas velocidades do gás.

$$f_i = 0,0142 \quad (2.28)$$

Com:

$$\tau_i = (1/2) f_i \rho_g U_g^2 \quad (2.29)$$

Kowalski (1987) obteve experimentalmente os fatores de atrito no gás, líquido e interface a partir de medições de gradiente de pressão, fração de vazio e tensão de cisalhamento no gás, junto à parede. Esta última, inferida pela extrapolação do perfil de tensões cisalhantes de Reynolds, levantado por um anemômetro de filme quente. Os resultados encontrados para o fator de atrito do gás junto à parede foram bem ajustados pela correlação de Blasius, desenvolvida para escoamento monofásico turbulento em tubos lisos:

$$f_g = 0,079 Re_g^{-0,25} \quad (2.30)$$

A correlação de Blasius, entretanto, não se mostrou satisfatória para o cálculo do fator de atrito no líquido, junto a parede. Ele sugeriu o uso de:

$$f_l = 0,263 [(1-\alpha) Re_l]^{-0,5} \quad (2.31)$$

Para o fator de atrito interfacial, foram propostas as seguintes equações:

$$\tau_i = (1/2) f_i \rho_g (U_g - U_l)^2 \quad (2.32)$$

Estratificado liso:

$$f_i = 0,96 (Re_{sg})^{-0,52} \quad (2.33)$$

Estratificado ondulado:

$$f_i = 7,5 \times 10^{-5} (1-\alpha)^{-0,25} (Re_g^*)^{-0,3} (Re_l^*)^{0,83} \quad (2.34)$$

$$22600 \leq Re_g^* \leq 430600$$

$$8800 \leq Re_l^* \leq 47800$$

Com:

$$Re_{sl} = J_l D / \nu_l \quad (2.35)$$

$$Re_{sg} = J_g D / \nu_g \quad (2.36)$$

$$Re_g^* = U_g D / \nu_g \quad (2.37)$$

$$Re_l^* = U_l D / \nu_l \quad (2.38)$$

Onde Re_s é o número de Reynolds superficial, Re^* o número de Reynolds modificado, J a velocidade superficial e os subscritos g e l identificam o gás e o líquido. As velocidades superficiais são definidas como $J_g = Q_g/A_g$ e $J_l = Q_l/A_l$, onde Q_g e Q_l são as vazões de gás e líquido; A_g e

As áreas transversais ocupadas pelo gás e pelo líquido, respectivamente.

Andritsos & Hanratty (1987) realizaram determinações experimentais do fator de atrito interfacial em escoamentos horizontais estratificados. Um balanço de forças foi aplicado à corrente gasosa, considerando-se as medidas de gradiente de pressão, e de altura de líquido. Assumiu-se uma interface plana e o fator de atrito no gás junto à parede foi calculado por:

$$f_g = 0,046 \text{ Re}_g^{-0,2} \quad (2.39)$$

Os autores sugeriram para o fator de atrito interfacial as seguintes relações:

$$\tau_i = (1/2) f_i \rho_g U_g^2 \quad (2.40)$$

Para $J_g \leq J_{gi}$

$$f_i/f_g = 1 \quad (2.41)$$

Para $J_g > J_{gi}$

$$f_i/f_g = 1 + 15 (H/D)^{1/2} [(J_g/J_{gi}) - 1] \quad (2.42)$$

Onde H é a espessura média na geratriz inferior e J_{gi} , o valor da velocidade superficial do gás que identifica o surgimento de grandes ondas irregulares, é calculado por:

$$J_{gi} = 5 \text{ m/s } (\rho_{g0}/\rho_g)^{1/2} \quad (2.43)$$

Sendo ρ_{g0} a massa específica do gás à pressão atmosférica e

ρ_g a massa específica do gás nas condições de escoamento.

Recentemente, Hart et al. (1989) desenvolveram um modelo fenomenológico para cálculo da perda de carga e fração de vazio em escoamentos horizontais ou aproximadamente horizontais com baixa retenção de líquido. Neste modelo o líquido foi considerado escoando com a forma de um arco de anel, de espessura uniforme. Esta geometria também foi adotada por Rodrigues (1991).

Relações para geometria em arco anular (figura 2.2c):

$$\alpha = 1 - (\beta/\pi) [1 - (r/R)^2] \quad (2.44)$$

$$S_g = D (\pi - \beta) \quad (2.45)$$

$$S_l = D \beta \quad (2.46)$$

$$S_i = d \beta \quad (2.47)$$

$$\delta = (D - d)/2 \quad (2.48)$$

Relações aproximadas para geometria em arco anular, com baixa retenção de líquido, conforme sugerido por Hart et al. (1989):

$$\alpha \approx 1 - 4 (\beta/\pi) (\delta/D) \quad (2.49)$$

$$S_g = (\pi - \beta) D \quad (2.50)$$

$$S_l = \beta D \quad (2.51)$$

$$S_i \approx S_l \quad (2.52)$$

Para velocidades moderadas do gás, esta geometria está mais próxima da realidade, quando comparada às hipóteses de interface plana ou de geometria anular. Neste modelo, o fator de atrito no gás, junto a parede, é calculado pela correlação de Eck (1973), desenvolvida para escoamento monofásico turbulento em tubos lisos:

$$f_g = \frac{0,07725}{\left[\log_{10} \left(\frac{Re_g}{7} \right) \right]^2} \quad (2.53)$$

Para o fator de atrito na interface é usada a correlação, também desenvolvida por Eck (1973), para escoamento monofásico turbulento em tubos rugosos:

$$f_i = \frac{0,0625}{\left[\log_{10} \left(\frac{15}{Re_g} + \frac{k}{3,715 D} \right) \right]^2} \quad (2.54)$$

Com:

$$\tau_i = (1/2) f_i \rho_g U_g^2 \quad (2.55)$$

Onde K, a rugosidade equivalente é calculada por (Hamersma & Hart 1987):

$$K = 2,3 \delta \quad (2.56)$$

Percebe-se uma certa unanimidade entre os autores, quanto ao uso de correlações desenvolvidas para escoamento monofásico turbulento em tubos lisos, para o cálculo do fator de atrito na interface gás-parede. Tais correlações, embora diferentes na forma, se expressam através do mesmo grupo adimensional (Re_g), e exibem resultados bastante semelhantes.

Esta unanimidade não se verifica para o cálculo do fator de atrito na interface líquido-parede. Alguns trabalhos recentes, como o de Rodrigues (1991), têm contornado o problema buscando diretamente a tensão de cisalhamento no líquido, junto à parede, através de análise diferencial aplicada ao filme.

Contudo, as maiores divergências ocorrem no cálculo do fator de atrito na interface gás-líquido. Estas diferem na forma, nos resultados e na escolha dos parâmetros relevantes. Por exemplo, Wallis (1969) relaciona o fator de atrito com o adimensional δ/D , Taitel & Dukler (1976) o relacionam com Re_g , Andritsos & Hanratty (1987) usam H/D e Re_g , Kowalski usa α , Re_g^* e Re_l^* , enquanto Hart et al. (1989) relacionam o fator de atrito interfacial com k/D e Re_g .

A incerteza quanto à seleção de uma correlação adequada para o cálculo do fator de atrito interfacial foi a principal motivação para o presente trabalho.

CAPÍTULO - 3

FATOR DE ATRITO INTERFACIAL

3.1 - DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ATRITO INTERFACIAL

A tensão de atrito interfacial foi determinada indiretamente a partir de um balanço de forças unidimensional aplicado à corrente gasosa, medindo-se o gradiente de pressão (dp/dz), a fração de vazio (α), bem como os perímetros reais das interfaces gás-líquido (S_i), e das fronteiras gás-parede (S_g) e líquido-parede (S_l). Estes últimos, obtidos a partir dos valores de espessura média do filme, tomados a cada 15° , usando-se sondas de condutância de fios paralelos. O equacionamento supõe regime permanente. Explicitando-se a tensão de cisalhamento interfacial na equação (2.1), resulta:

$$\tau_i = (1/S_i) [\alpha A (dp/dz) - S_g \tau_{wg}] \quad (3.1)$$

Onde τ_{wg} é obtida através de:

$$\tau_{wg} = (1/2) f_g \rho_g U_g^2 \quad (3.2)$$

Foi adotada a seguinte definição para o fator de atrito interfacial (Kowalski, 1987):

$$f_i = 2 \tau_i / [\rho_g (U_g - U_l)]^2 \quad (3.3)$$

Para o fator de atrito na interface gás-parede, foi adotada a correlação de Blasius:

$$f_g = 0,079 \text{Re}_g^{-0,25} \quad (3.4)$$

O uso desta correlação para o cálculo da tensão de cisalhamento na fronteira gás-parede foi comprovado experimentalmente por Kowalski (1987).

3.2 - ANÁLISE DE ERRO

A seguir é apresentada uma estimativa aproximada da incerteza envolvida na determinação do fator de atrito interfacial.

A tensão cisalhante na interface e a velocidade do gás são as principais fontes de erro no cálculo de f_i . Da equação (3.3), pode-se escrever:

$$\left| \frac{\Delta f_i}{f_i} \right| \approx \left[\left(\frac{\Delta \tau_i}{\tau_i} \right)^2 + \left(\frac{2 \Delta U_g}{U_g} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

Foram desprezadas as influencias de p_g e p_l na estimativa da incerteza do fator de atrito interfacial, dado que suas contribuições são pequenas: o erro na determinação de p_g é da ordem de $\pm 1,0 \%$, e a magnitude da velocidade média do líquido é muito inferior à do gás.

A equação (3.1) pode ser reescrita como:

$$\tau_i = B + C \quad (3.6)$$

Onde:

$$B = -\alpha A (dp/dz) (1/S_i) \quad (3.7)$$

$$C = -S_B \tau_{wg} (1/S_i) \quad (3.8)$$

Pode-se dizer que o erro em τ_i está limitado por:

$$|\Delta \tau_i| = |\Delta B| + |\Delta C| \quad (3.9)$$

Dividindo-se o primeiro termo da equação (3.9) por τ_i , o segundo termo por $(B + C)$ e reagrupando os termos, resulta:

$$\left| \frac{\Delta \tau_i}{\tau_i} \right| = \frac{|\Delta B| + |\Delta C|}{B + C} \quad (3.10)$$

$$\left| \frac{\Delta \tau_i}{\tau_i} \right| = \left| \frac{\Delta B}{B} \right| \left| \frac{B}{B+C} \right| + \left| \frac{\Delta C}{C} \right| \left| \frac{C}{B+C} \right| \quad (3.11)$$

Por sua vez, os erros relativos das variáveis A e B podem ser estimados através de:

$$\left| \frac{\Delta B}{B} \right| = \left[\left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\Delta (dp/dz)}{(dp/dz)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_i}{S_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

$$\left| \frac{\Delta C}{C} \right| = \left[\left(\frac{\Delta S_g}{S_g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau_{wg}}{\tau_{wg}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta S_i}{S_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.13)$$

Considerando-se uma incerteza de $\pm 2,0 \%$ para α , $\pm 7,0 \%$ para dp/dz (pior caso), $\pm 8,0 \%$ para S_i , $\pm 8,0 \%$ para S_g , $\pm 5,0 \%$ para τ_{wg} , encontra-se:

$$\left| \frac{\Delta B}{B} \right| = (0,020^2 + 0,070^2 + 0,080^2)^{1/2} = 0,108$$

$$\left| \frac{\Delta C}{C} \right| = (0,080^2 + 0,050^2 + 0,080^2)^{1/2} = 0,124$$

Substituindo-se estes valores na equação (3.11), resulta:

$$\left| \frac{\Delta \tau_i}{\tau_i} \right| = 0,108 \left| \frac{B}{B+C} \right| + 0,124 \left| \frac{C}{B+C} \right|$$

Para qualquer combinação de valores das variáveis B e C, o valor absoluto do erro relativo no cálculo de τ_i está compreendido entre 0,108 e 0,124. No pior caso, pode-se dizer que:

$$\left| \frac{\Delta \tau_i}{\tau_i} \right| = 0,124$$

Ou seja, a incerteza no valor da tensão cisalhante na interface gás-líquido é de aproximadamente $\pm 12,4 \%$.

A velocidade média do gás é definida por:

$$U_g = Q_g / (\alpha A) \quad (3.14)$$

A incerteza no cálculo de U_g pode ser estimada como:

$$\left| \frac{\Delta U_g}{U_g} \right| = \left[\left(\frac{\Delta Q_g}{Q_g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

Assumindo-se uma incerteza de $\pm 2,8 \%$ para a vazão de gás e $\pm 2,0 \%$ para a fração de vazio, resulta:

$$\left| \frac{\Delta U_g}{U_g} \right| = \left[(0,028)^2 + (0,020)^2 \right]^{1/2} = 0,034$$

Portanto, a incerteza no valor da velocidade média do gás é de $\pm 3,4 \%$.

Substituindo estes valores na equação (3.5), finalmente encontra-se:

$$\left| \frac{\Delta f}{f} \right| = \left[(0,124)^2 + (2 \times 0,034)^2 \right]^{1/2} = 0,141$$

Ou seja, a incerteza na determinação do fator de atrito interfacial é de aproximadamente $\pm 14,1 \%$.

CAPÍTULO - 4

APARATO EXPERIMENTAL

As experiências foram realizadas com ar e água, em tubulação horizontal de 38.1 mm de diâmetro interno, a temperaturas e pressões próximas a ambiente. As velocidades superficiais de ar situaram-se entre 4,5 e 25,0 m/s, e as de água entre 0,01 e 0,07 m/s, aproximadamente.

4.1 - DESCRIÇÃO DO APARATO

O aparato, esquematizado na figura (4.1), foi montado no laboratório de pesquisa do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

A água é alimentada a partir de um reservatório elevado, mantido a nível constante. A vazão de água é ajustada na válvula V4. A medição é feita com duas placas de orifício, selecionadas pelas válvulas V5 e V6. Maiores informações sobre a medição de água podem ser encontradas no apêndice I. Após a medição, a água se dirige ao misturador.

O ar provém da rede de ar comprimido que abastece os laboratórios. Na sua medição são usadas duas placas de orifício, selecionadas pelas válvulas V2 e V3, as quais também respondem pelo ajuste da vazão de ar. O apêndice II detalha a medição de ar.

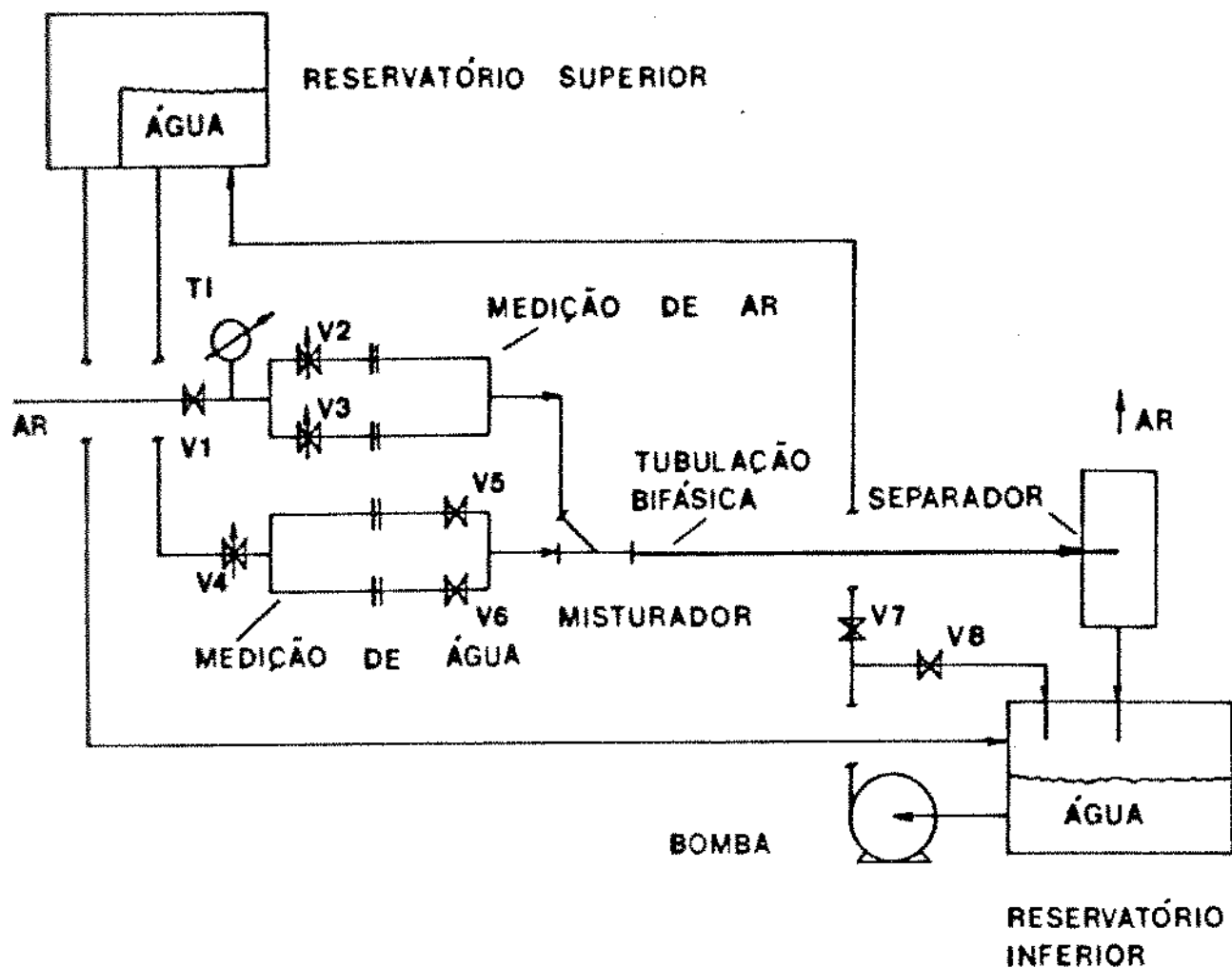


Figura (4.1) - Aparato experimental (cotas em mm).

Como misturador, é usado um "Y" assimétrico, onde a água é alimentada horizontalmente e o ar é alimentado por cima. Este procedimento visa facilitar o desenvolvimento do padrão estratificado. Uma chicana horizontal foi instalada no misturador para reduzir a turbulência na zona de mistura.

Seguindo o misturador, está a tubulação bifásica (figura 4.2), incluindo a seção de desenvolvimento, com 5,71 m de comprimento (150 diâmetros livres); a seção de teste, com 3,14 m ; e a seção de saída, com 0,28 m , totalizando 9,13 m.

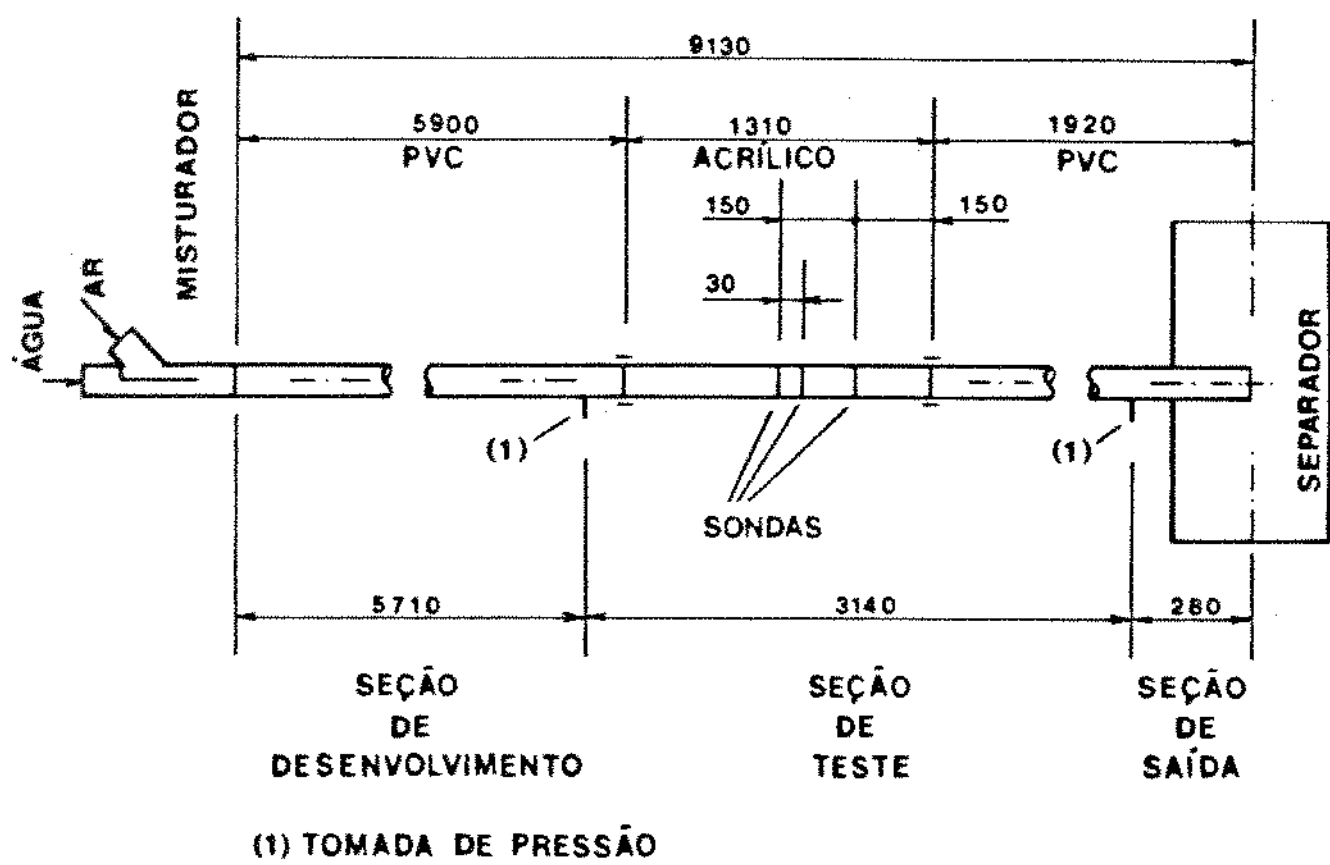


Figura (4.2) - Tubulação bifásica (cotas em mm).

A seção de teste inclui um trecho de acrílico transparente, para permitir a visualização do escoamento, onde estão localizadas três sondas de medição de espessura de filme: S1, S2, S3. Este trecho possui marcações de 15° em 15° e pode ser girado, possibilitando variar a posição das sondas de espessura com relação ao escoamento.

A queda de pressão na seção de teste é medida com sensores de relutância variável da marca VALIDYNE. Após o condicionamento, os sinais de queda de pressão são enviados ao micro-computador, para aquisição de dados. O apêndice III detalha a medição do gradiente de pressão.

Na medição de espessura de filme são usadas três sondas de condutância de fios paralelos, localizadas na mesma geratriz do tubo de acrílico e defasadas axialmente, conforme indica a figura (4.2). Para corrigir as variações de condutividade da água, motivadas por mudanças de temperatura ou salinidade, são usadas sondas de compensação, uma para cada sonda de medição. Estas sondas foram instaladas em três recipientes independentes, para evitar o acoplamento elétrico entre os canais. Os sinais de espessura de filme são condicionados e enviados ao micro-computador, para aquisição de dados. O capítulo 5 trata da medição de espessura de filme. Após a seção de saída o escoamento é descarregado em um separador aberto para a atmosfera.

4.2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para cada um dos trinta pontos experimentais, foi adotado o procedimento a seguir.

Inicialmente posicionavam-se as sondas de espessura na geratriz inferior (0°), em seguida eram ajustadas as vazões de ar e água nas válvulas correspondentes.

Estabelecido o regime permanente, eram anotadas as leituras de:

- (a) Pressão diferencial da placa de água,
- (b) Pressão diferencial da placa de ar,
- (c) Pressão a montante da placa de ar,
- (d) Temperatura a montante da placa de ar,
- (e) Pressão atmosférica.

Após a leitura destas variáveis, era acionada a aquisição de dados no computador, anotando-se o valor médio da espessura de filme correspondente à sonda 1. Estas leituras eram feitas em voltagem, pois o programa de aquisição de dados não incluía as curvas de aferição, as quais eram aplicadas posteriormente.

Este processo era então repetido girando-se as sondas de 15° em 15° até que estas se mostrassem secas, passando-se em seguida para um novo par de vazões de ar e água. Apenas as aquisições correspondentes à geratriz inferior (0°) foram armazenadas em disco para posterior processamento.

Para garantir uma adequada correção da condutividade da água, eram verificadas as temperaturas de saída da água e das sondas de compensação de condutividade. Quando a diferença entre as duas atingia $0,5^\circ\text{C}$, substituía-se a água das sondas de compensação de condutividade por água coletada no separador de saída.

CAPÍTULO - 5

ESPESSURA DE FILME

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas elétricas de medição de espessura de filme, detalhando-se a técnica de fios paralelos, usada no presente trabalho. As medidas de espessura de filme foram usadas para a caracterização da interface e para a determinação das variáveis geométricas.

Entre os métodos mais populares para medida de espessura de filme estão os métodos elétricos, também conhecidos como métodos de impedância, devido a sua relativa simplicidade, baixo custo e boa precisão.

Os métodos elétricos podem ser classificados em condutivos ou capacitivos. Os métodos condutivos estão baseados no contraste de condutividade elétrica entre as fases, enquanto que os capacitivos baseiam-se no contraste de constante dielétrica, podendo ser usados mesmo com fluidos isolantes.

Quanto a interferência com o escoamento, estes métodos podem ser classificados em intrusivos e não-intrusivos. Os métodos baseados em sonda de fios paralelos, e sonda de contato de agulha, são exemplos de métodos intrusivos. Os métodos baseados em sondas aflorantes são considerados não intrusivos. A figura (5.1) mostra alguns

tipos de sondas elétricas frequentemente utilizados.

Em princípio, estas sondas podem ser excitadas por corrente contínua, corrente alternada de baixa frequência ou corrente alternada de alta frequência, embora o uso de corrente contínua não seja recomendável, por causar a polarização dos eletrodos.

O comportamento de uma sonda não depende somente de fatores geométricos mas também das propriedades elétricas dos fluidos envolvidos e das características elétricas do circuito ao qual está acoplada. Por exemplo, uma sonda pode apresentar um comportamento condutivo quando excitada em baixa frequência e um comportamento capacitivo quando excitada em alta frequência.

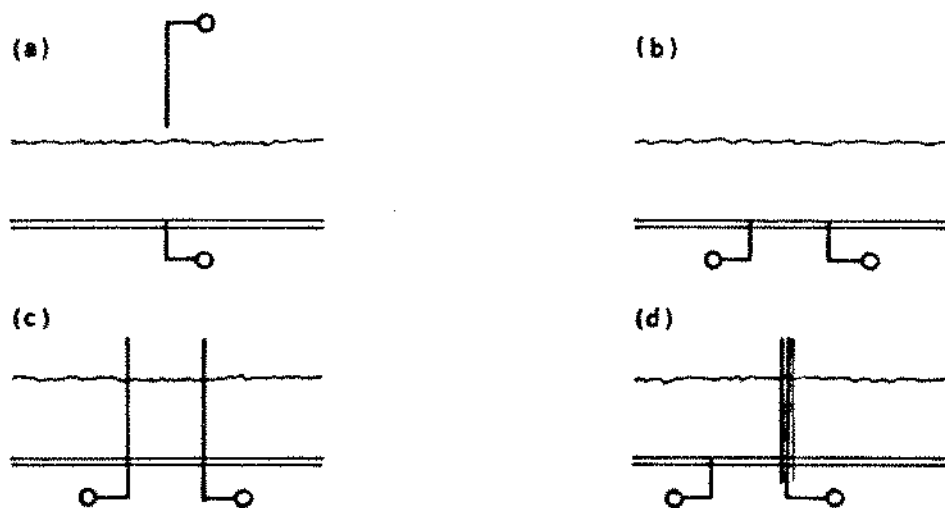


Figura (5.1) - Sondas de espessura de filme:

- (a) Sonda de contato de agulha;
- (b) Sonda de condutância aflorante;
- (c) Sonda de condutância de fios paralelos;
- (d) Sonda de capacitância.

5.2 - MEDIÇÃO DA ESPESSURA DE FILME

Na medição da espessura de filme foram usadas sondas de condutância de fios paralelos (figura 5.2). Este método foi escolhido por sua boa definição espacial (melhor resposta de frequência), quando comparado com sondas de condutância aflorantes. Sua principal limitação está no fato de ser um método intrusivo. Entretanto este problema pode ser atenuado empregando-se fios bastante finos. Foram usados fios de tungstênio de 0,10 mm de diâmetro, com distância entre centros de 2,5 mm, o que garante uma pequena interferência com o escoamento e uma resolução espacial compatível com as necessidades do experimento.

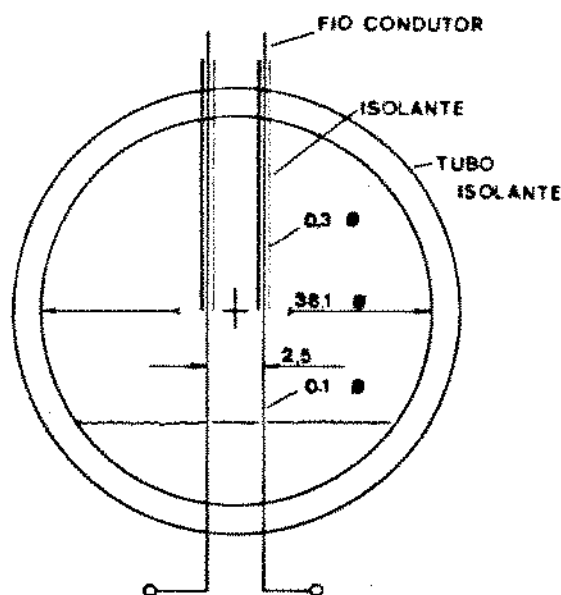


Figura (5.2) - Sonda de condutância de fios paralelos (dimensões em mm).

Para evitar a medição simultânea de filme em ambos os lados da tubulação, uma parte dos fios foi isolada, permanecendo o restante exposto ao escoamento. Para corrigir as variações na condutividade da água, devido a mudanças de temperatura ou de salinidade, foi incluída uma sonda aflorante, saturada, para compensação de condutividade (figura 5.3). Configuração semelhante foi adotada por Hagiwara et al. (1988).

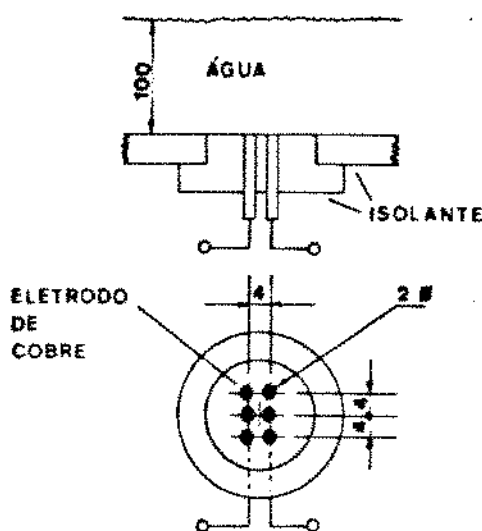


Figura (5.3) - Sonda de condutância aflorante saturada, usada para compensação de condutividade (dimensões em mm).

O circuito de medição é um divisor de tensão

resistivo, composto pela sonda de medição e pela sonda de compensação de condutividade, excitado por uma portadora quadrada de aproximadamente 10 KHz com 3,0 V pico a pico. O sinal proveniente do divisor de tensão, já modulado pela espessura de filme é então amplificado, retificado e filtrado, seguindo para a placa de conversão A/D. A filtragem analógica se faz necessária para remover a portadora e prevenir o fenômeno de "aliasing", evitando a presença de sinais com frequência próxima ou superior a frequência de amostragem (1000 Hz). Esta filtragem é realizada por um filtro ativo passa-baixa de segunda ordem, tipo Butterworth, com frequência de corte de 1000 Hz. Este filtro garante uma forte atenuação da portadora, praticamente eliminada, sem interferir nas frequências de interesse. A figura (5.4) apresenta o diagrama de blocos do circuito utilizado.

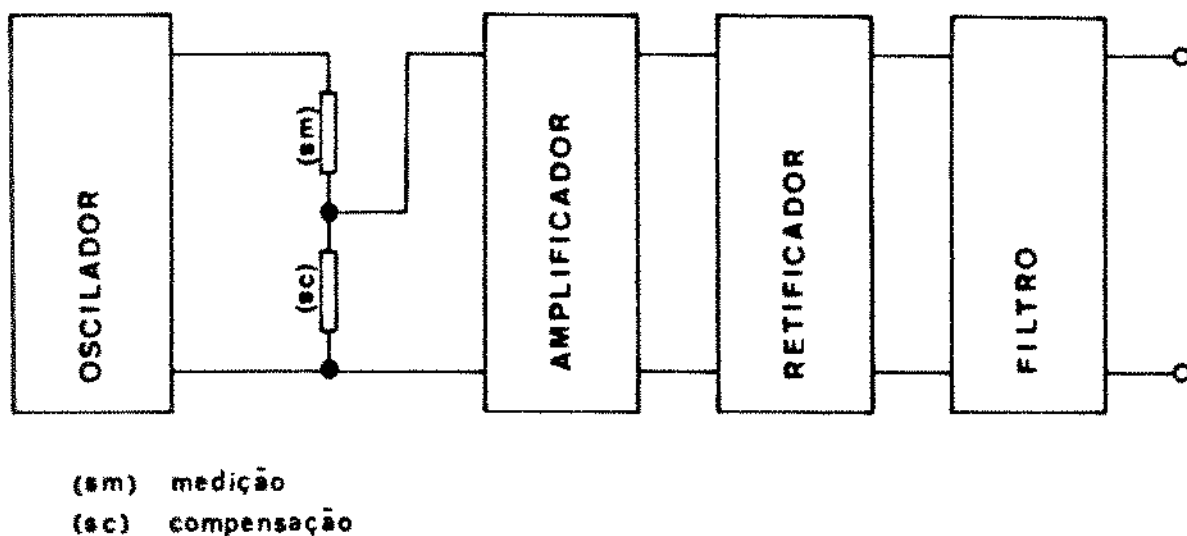


Figura (5.4) - Diagrama de blocos do circuito utilizado.

5.3 - APERIÇÃO DAS SONDAS

O comportamento de um divisor de tensão resistivo pode ser descrito pela equação:

$$(V_o/V_i) = R/(R + R_x) \quad (5.1)$$

onde V_i (V) é a tensão de entrada, V_o (V) a tensão de saída, R (Ω) a resistência da sonda de compensação e R_x (Ω) é a resistência da sonda de medição.

O valor de R_x é inversamente proporcional à espessura de filme, ou seja:

$$R_x = K/esp \quad (5.2)$$

onde K (mm Ω) é uma constante de proporcionalidade.

Reagrupando os termos das equações (5.1) e (5.2), obtém-se:

$$esp = [(R/K) (V_i/V_o) - (R/K)]^{-1} \quad (5.3)$$

Como as sondas não se comportam de maneira puramente resistiva, a equação (5.3) é apenas uma aproximação, que entretanto sugere o ajuste dos dados na forma:

$$esp = (A/V + B)^{-1} \quad (5.4)$$

onde A (V/mm) e B (1/mm) são constantes experimentais.

Os circuitos de condicionamento de sinal apresentam um pequeno desvio de zero na saída. Para levar em conta esta característica, foi acrescentado o termo OFFSET (V), resultando na equação:

$$\text{esp} = [A/(V-\text{OFFSET}) + B]^{-1} \quad (5.5)$$

A constante A está relacionada com o ganho da sonda, B com a linearidade e OFFSET com o desvio de zero.

A aferição das sondas consistiu na determinação das constantes A, B e OFFSET da equação (5.5).

Como referência para a medição de espessura de filme foi usada uma sonda de contato de agulha deslocada sobre um micrômetro. A seção de acrílico foi nivelada sobre uma bancada, fazendo-se leituras nas quatro sondas, para várias posições da interface. Os dados foram então ajustados pelo método dos mínimos quadrados. A tabela (5.1) apresenta as constantes de aferição assim obtidas.

TABELA (5.1)

	A	B	OFFSET
	(V/mm)	(1/mm)	(V)
SONDA 1	0,4103	-0,0709	-0,040
SONDA 2	0,4134	-0,0772	-0,117
SONDA 3	0,4615	-0,0385	-0,071

O resultado das aferições pode ser apreciado na figura (5.5). As discrepâncias entre as curvas de aferição das sondas 1, 2 e 3 pode ser atribuída a tolerâncias de fabricação, de natureza geométrica ou elétrica.

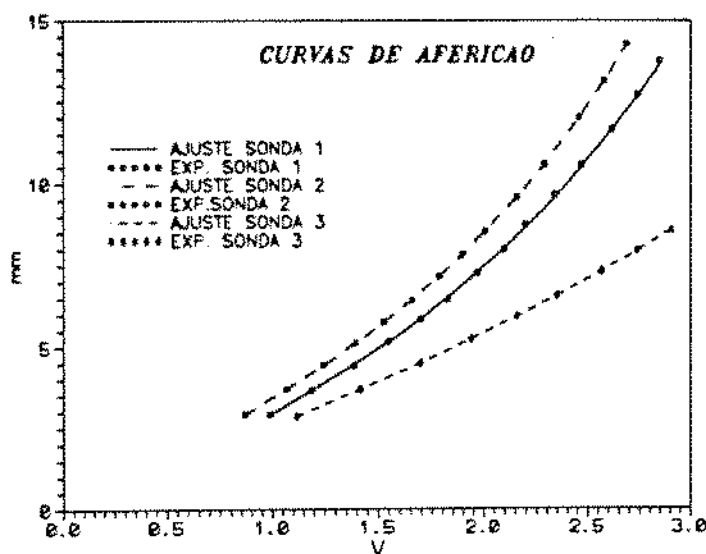


Figura (5.5) - Curvas de aferição das sondas de espessura de filme.

5.4 - ANÁLISE DE ERRO

A seguir é feita uma estimativa aproximada da incerteza envolvida na medição da espessura de filme.

As fontes de erro na determinação da espessura de filme são as incertezas na voltagem medida (V) e as incertezas nas constantes de aferição (A, B e OFFSET). Da equação de medição (5.5), pode-se escrever:

$$|\Delta \text{esp}/\text{esp}| = [(\Delta A/A)^2 + (\Delta V/V)^2]^{1/2} \quad (5.6)$$

onde as influências dos termos de linearidade (B) e desvio de zero (OFFSET) foram desprezadas. A influência deste último será incluída posteriormente.

Considerando uma incerteza de $\pm 1,7 \%$ para a constante de proporcionalidade (A) e $\pm 1\%$ para a leitura de voltagem na placa de aquisição de dados (V), encontra-se:

$$|\Delta_{\text{esp}}/\text{esp}| = [0,017^2 + 0,010^2]^{1/2} = 0,020$$

A incerteza no valor de OFFSET representa um erro constante de $\pm 10 \text{ mV}$ (resolução da placa de aquisição de dados), que pode ser traduzido em espessura de filme por:

$$\Delta_{\text{esp}} = \pm 10 \text{ mV/A} = \pm 0,025 \text{ mm}$$

Portanto, a incerteza nas medidas de espessura de filme é de $\pm 2,0 \%$, associada a um erro constante de $\pm 0,025 \text{ mm}$.

CAPÍTULO - 6

PROCESSAMENTO DE SINAL

6.1 - AQUISIÇÃO DE DADOS

Após condicionamento, os sinais provenientes das três sondas de espessura de filme e do sensor de pressão diferencial foram encaminhados a um micro-computador tipo PC-XT para aquisição de dados . Foi usada uma placa de conversão analógico-digital da marca LINX, modelo CAD10/26, juntamente com o programa AqDados, também da marca LINX. As principais características da placa são as seguintes:

(a) número de bits	10
(b) número de canais	16
(c) faixa de entrada	-5 a +5 V
(d) resolução	± 10 mV
(e) impedância de entrada	10,2 K Ω
(f) ruído	± 10 mV

Apenas quatro canais foram usados, três para espessura de filme e um para gradiente de pressão. Escolheu-se uma frequência de amostragem de 1000 Hz e uma duração de 8,192 s para cada ensaio, totalizando 8192 amostras por canal por ensaio. Esta combinação de frequência de amostragem e duração de ensaio mostrou-se satisfatória para praticamente todas as situações experimentadas. Ou seja, a frequência de amostragem

deve ser no mínimo duas vezes maior que a frequência mais alta do sinal de interesse e o tempo de amostragem duas vezes maior que o maior período presente no sinal em questão. As aquisições correspondentes à geratriz inferior foram armazenadas em disco, e posteriormente processadas. Estes arquivos são binários e seus valores estão em voltagem. As demais aquisições não foram salvas em disco, tendo sido anotado, em voltagem, o valor médio referente à sonda 1.

6.2 - PROCESSAMENTO DE SINAL

O processamento dos sinais foi executado em três etapas (figura 6.1). Inicialmente, o programa A converteia o arquivo binário, gerado pelo programa de aquisição de dados, em arquivo ASCII, composto por 4 colunas e 8192 linhas. Neste arquivo, os valores estão em voltagem.

Posteriormente, o programa B lia o arquivo anterior, aplicava as curvas de aferição e executava uma filtragem nos sinais, gravando os resultados em quatro arquivos diferentes, respectivamente para as sondas 1, 2, 3 e para o gradiente de pressão. A filtragem foi realizada tomando-se a média de cada quatro valores consecutivos, o que equivale a reduzir a frequência de amostragem de 1000 para 250 Hz e aumentar o intervalo entre amostras de 0,001 para 0,004 s, mantendo-se o tempo total da amostra em 8,192 s. Esta filtragem atendeu a dois objetivos básicos, a atenuação do ruído térmico dos circuitos e a redução do tamanho dos vetores de sinal de 8192 para 2048 pontos, visando a aplicação das rotinas de FFT ("Fast Fourier Transform").

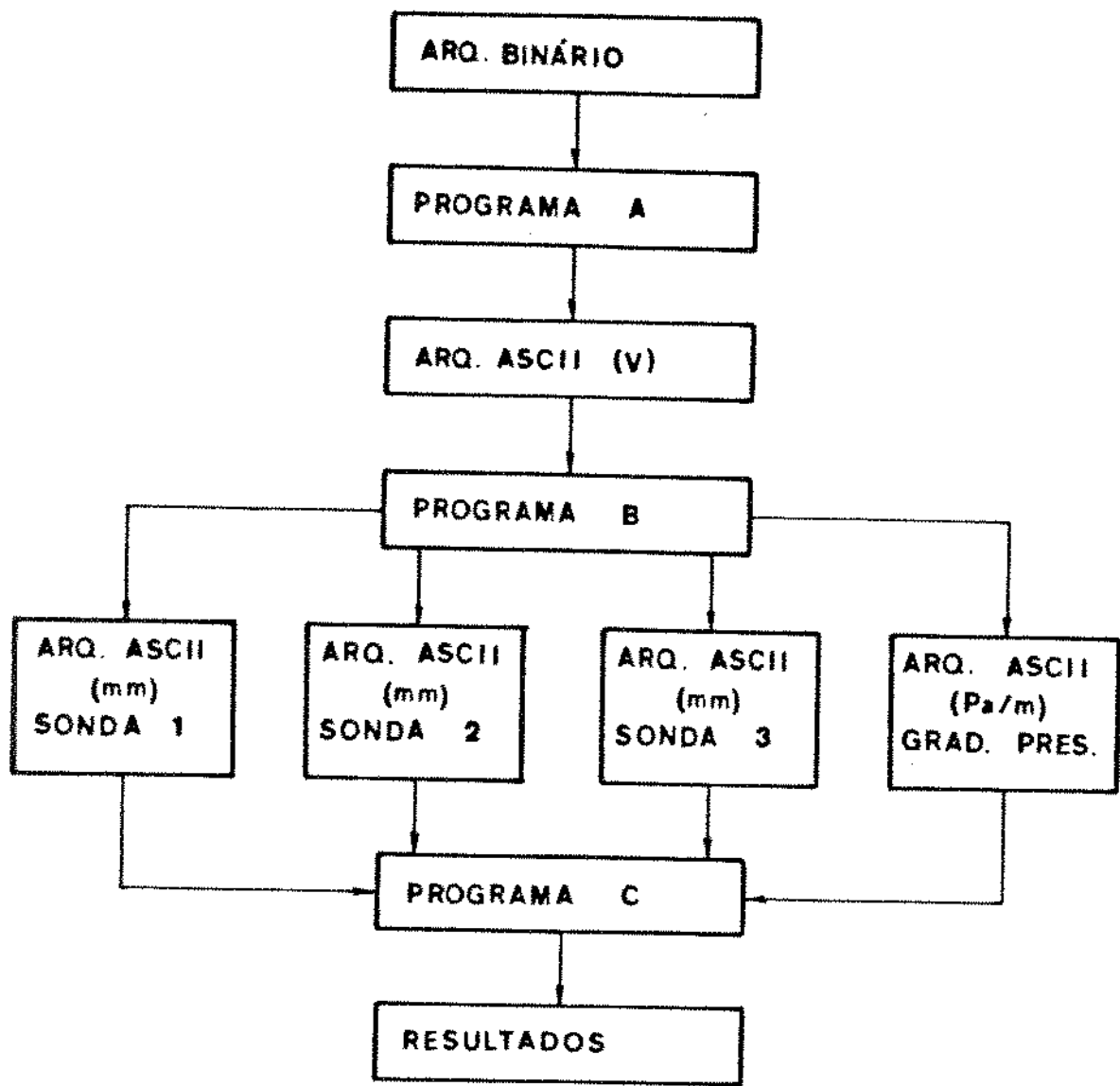


Figura (6.1) - Fluxograma simplificado do processamento de sinal.

O restante do processamento de sinal foi executado pelo programa C, que lê os arquivos filtrados e aferidos, calculando em seguida:

- (a) Valor médio da sonda 1 (mm),
- (b) Desvio padrão da sonda 1 (mm),
- (c) Histograma da sonda 1 (%),
- (d) Densidade espectral de potência da sonda 1 (mm².s),
- (e) Função de autocorrelação normalizada da sonda 1 (-),
- (f) Densidade espectral cruzada de potência entre as sondas 1 e 2 (mm².s),
- (g) Função de correlação cruzada normalizada entre as sondas 1 e 2 (-),
- (h) Velocidade de onda determinada pelas sondas 1 e 2 (m/s),
- (i) Densidade espectral cruzada de potência entre as sondas 1 e 3 (mm².s),
- (j) Função de correlação cruzada normalizada entre as sondas 1 e 3 (-),
- (k) Velocidade de onda determinada pelas sondas 1 e 3 (m/s).

A seguir são definidas as funções utilizadas na análise dos sinais de espessura de filme.

6.3 - FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO

A função de autocorrelação (ACF - "Autocorrelation Function") de um sinal $x(t)$ pode ser definida como (Bendat & Piersol, 1971):

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + \tau) dt \quad (6.1)$$

onde τ representa uma defasagem arbitrária. Quando $\tau = 0$, a função de autocorrelação resulta no valor médio quadrático de $x(t)$, ou seja:

$$R_{xx}(0) = \text{rms}^2 [x(t)] \quad (6.2)$$

onde rms é a raiz quadrada do valor médio quadrático ("root mean square"). A função de autocorrelação normalizada pode ser obtida dividindo-se a função de autocorrelação pelo valor médio quadrático de $x(t)$:

$$R_{xnn}(\tau) = R_{xx}(\tau) / \text{rms}^2 [x(t)] \quad (6.3)$$

Uma das aplicações destas funções é a identificação de períodos característicos em um determinado sinal de interesse.

6.4 - FUNÇÃO DE CORRELAÇÃO CRUZADA

Analogamente, a função de correlação cruzada entre dois sinais $x(t)$ e $y(t)$ é definida por (Bendat & Piersol 1971):

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t + \tau) dt \quad (6.4)$$

A função de correlação cruzada normalizada é obtida dividindo-se a função de correlação cruzada pelo produto dos valores rms de $x(t)$ e $y(t)$:

$$R_{xyn}(\tau) = R_{xy}(\tau) / \left[\text{rms} [x(t)] \text{rms} [y(t)] \right] \quad (6.5)$$

Estas funções são usadas para identificar o atraso entre dois sinais correlacionados, caracterizado por um pico positivo no gráfico da função.

6.5 - FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

A função densidade espectral de potência (PSD - "Power Spectral Density Function") de um sinal $x(t)$ é definida como (Bendat & Piersol, 1971):

$$Q_{xx}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt \right]$$

(6.6)

onde T pode ser entendido como sendo o tempo de observação e Δf como sendo a faixa de passagem de um filtro hipotético cuja frequência central é f . A função densidade espectral de potência é real e positiva por definição, conseqüentemente a informação de fase não está presente no resultado. Fisicamente, pode ser interpretada como a distribuição, em frequência, da variância do sinal $x(t)$.

6.6 - FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL CRUZADA DE POTÊNCIA

A função densidade espectral cruzada de potência (CSD - "Cross-Spectral Density Function") entre dois sinais $x(t)$ e $y(t)$ é uma função complexa, definida por (Bendat & Piersol, 1971):

$$G_{xy}(f) = C_{xy}(f) - j Q_{xy}(f) \quad (6.7)$$

onde $C_{xy}(f)$, a parte real de $G_{xy}(f)$, chamada espectro coincidente, é definida como:

$$C_{xy}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t, f, \Delta f) y(t, f, \Delta f) dt \right] \quad (6.8)$$

E $Q_{xy}(f)$, a parte imaginária de $G_{xy}(f)$, chamada espectro em quadratura, é definida como:

$$Q_{xy}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t, f, \Delta f) y_*(t, f, \Delta f) dt \right] \quad (6.9)$$

onde o simbolo "." significa uma defasagem de 90° . É conveniente expressar a função densidade espectral cruzada de potência na forma polar, onde o módulo é dado por:

$$|G_{xy}(f)| = [C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)]^{1/2} \quad (6.10)$$

E a fase por:

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} [Q_{xy}(f)/C_{xy}(f)] \quad (6.11)$$

As principais aplicações da função densidade espectral cruzada de potência são a determinação de funções resposta de frequência de sistemas físicos e a medição de atrasos de tempo entre dois sinais. Nesta última aplicação, o atraso pode ser discriminado em função da frequência, o que não é possível usando-se a função de correlação cruzada no domínio do tempo.

Todas estas funções foram calculadas de maneira aproximada, a partir de rotinas de FFT, utilizando-se vetores de sinal com 2048 pontos.

CAPÍTULO - 7

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1 - INTRODUÇÃO

Foram realizados experimentos com cinco vazões de líquido, que correspondem aproximadamente aos seguintes valores de J_L : 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 e 0,07 m/s. Para cada vazão de líquido, seis vazões de gás foram impostas, correspondendo aos seguintes valores aproximados de J_g : 4,5; 9,4; 12,2; 16,6; 20,6 e 25,0 m/s; totalizando trinta pares de condições experimentais diferentes. Ao longo do texto, as velocidades superficiais do gás e do líquido serão referidas pelos valores aproximados, mencionados acima. Todos os cálculos consideram os valores informados na tabela (7.1).

Através de observações visuais, quatro padrões de escoamento foram identificados:

- (a) Estratificado ondulado com ondas bidimensionais (SW2D),
- (b) Estratificado ondulado de transição (SWT),
- (c) Estratificado ondulado com ondas tridimensionais (SW3D),
- (d) Anular com ondas tridimensionais (A3D).

TABELA (7.1)

RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

PONTO	JL	JG	GRADPRES	ALFA	PADRAO
	m/s	m/s	Pa/m	-	
1	.0088	4.50	17.76	.9576	SW2D
2	.0088	9.27	38.42	.9745	SW2D
3	.0088	12.14	66.63	.9827	SWT
4	.0106	16.75	163.03	.9855	SW3D
5	.0128	20.53	245.82	.9841	SW3D
6	.0114	25.09	341.91	.9875	SW3D
7	.0209	4.47	17.99	.9188	SW2D
8	.0209	9.32	50.14	.9519	SW2D
9	.0209	12.33	104.71	.9702	SWT
10	.0190	16.65	185.00	.9780	SW3D
11	.0203	20.56	276.39	.9782	SW3D
12	.0213	24.87	419.86	.9828	SW3D
13	.0295	4.40	13.50	.8890	SW2D
14	.0299	9.45	63.17	.9410	SW2D
15	.0299	12.24	112.53	.9609	SWT
16	.0287	16.66	206.95	.9707	SW3D
17	.0306	20.63	312.01	.9712	SW3D
18	.0305	24.90	472.53	.9780	SW3D
19	.0397	4.49	14.41	.8647	SW2D
20	.0396	9.36	70.44	.9308	SW2D
21	.0396	12.29	129.58	.9520	SWT
22	.0411	16.39	232.54	.9617	SW3D
23	.0406	20.70	349.52	.9660	SW3D
24	.0402	24.99	524.91	.9713	A3D
25	.0711	4.46	25.40	.8002	SW2D
26	.0712	9.43	108.93	.9071	SW2D
27	.0718	12.17	174.88	.9311	SWT
28	.0721	16.35	291.07	.9441	SW3D
29	.0724	20.78	469.59	.9463	A3D
30	.0724	25.08	669.38	.9603	A3D

As ondas bidimensionais são facilmente identificadas, apresentando o mesmo perfil em toda a largura do canal. As situações que não apresentaram este tipo de onda foram classificadas como ondas tridimensionais. Situações que apresentaram ondas tridimensionais sobrepostas à ondas bidimensionais foram classificadas como transição.

Os padrões estratificado ondulado com ondas tridimensionais e anular com ondas tridimensionais possuem algumas características bastante semelhantes, como será visto adiante, podendo eventualmente ser tratados como um padrão único para efeito de modelagem. Estes dois padrões são muito comuns em gasodutos bifásicos, tendo em vista a faixa de velocidades do gás em que ocorrem.

Embora o reduzido número de pontos experimentais não permita um adequado mapeamento das fronteiras entre os padrões de onda bidimensional e tridimensional, verifica-se uma grande influência de J_g no tipo de onda presente no escoamento. Por outro lado, a influência de J_l no tipo de onda é praticamente nula, na faixa experimentada. Os pontos com J_g de 4,5 e 9,4 m/s exibem ondas bidimensionais, enquanto que ondas tridimensionais caracterizam os pontos com J_g de 16,6; 20,6 e 25,0 m/s. Os demais pontos, com J_g de 12,2 m/s, situam-se na transição entre os dois grupos anteriores.

A figura (7.1) situa os pontos experimentais no mapa de Taitel e Dukler.

A seguir será apresentada a caracterização da interface, incluindo a distribuição de filme, as características de onda e as variáveis geométricas do escoamento (α , S_l/S e S_i/S_l).

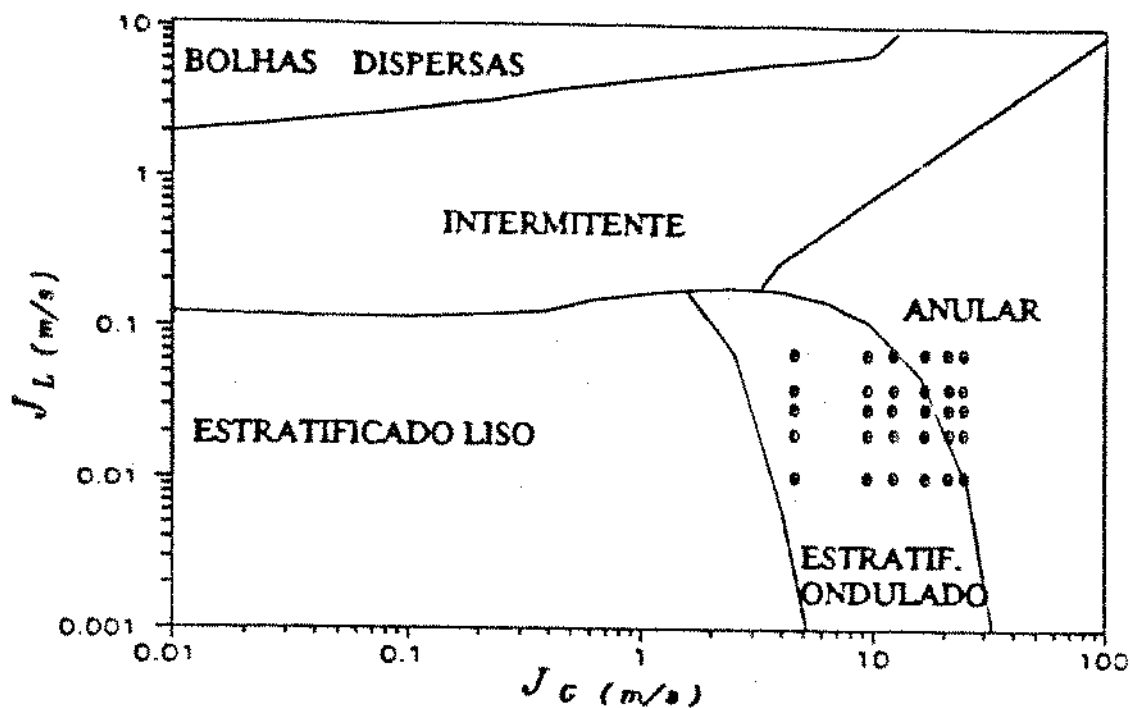


Figura (7.1) - Localizacão dos pontos experimentais no mapa de Taitel & Dukler.

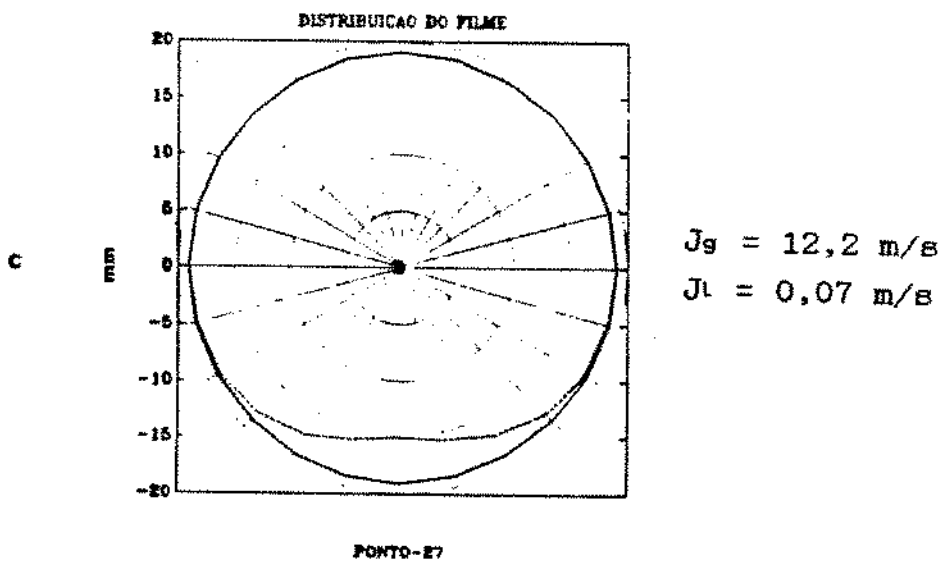
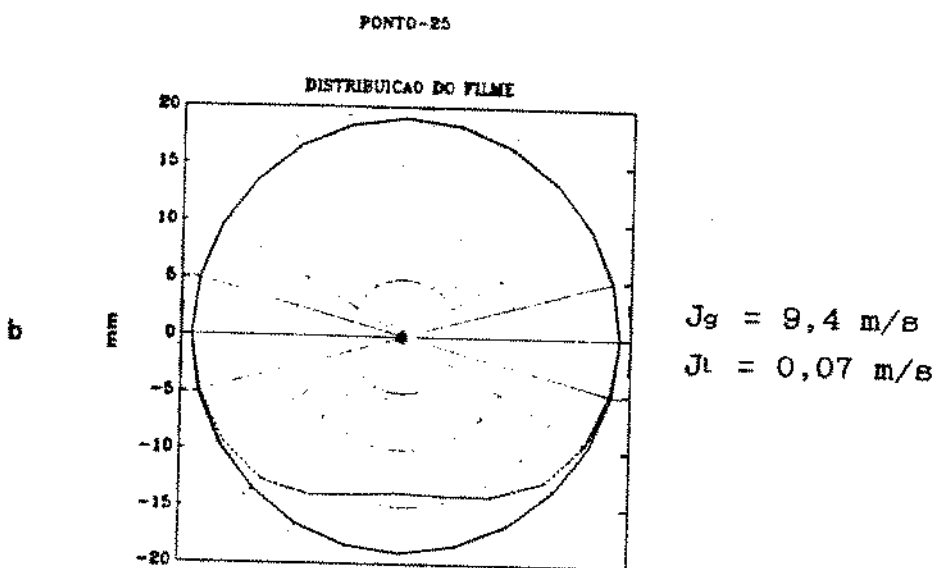
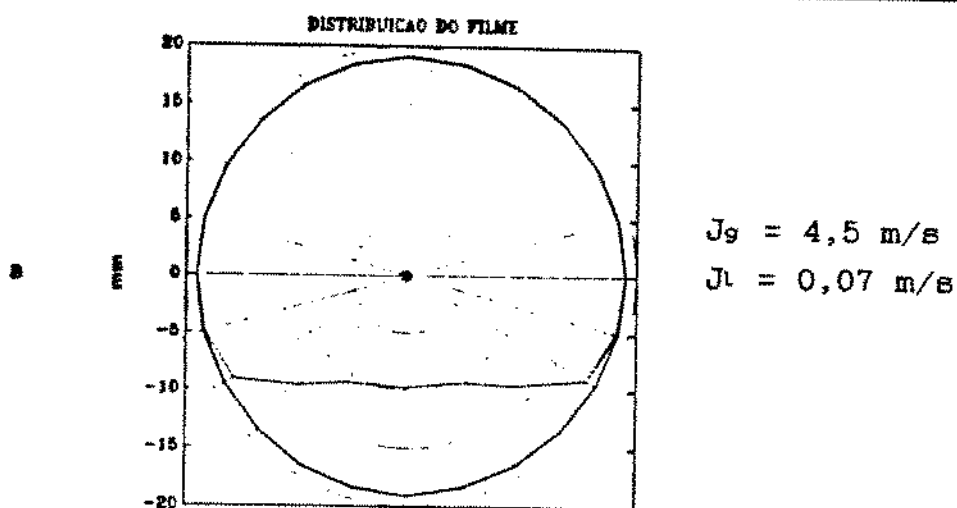
7.2 - DISTRIBUIÇÃO DO FILME

A figura (7.2) mostra a distribuição do filme para valores crescentes de J_g , com J_l de aproximadamente 0,07 m/s. Observa-se que, para baixos valores de J_g , a interface apresenta-se praticamente plana (pontos 25 e 26). Na medida em que J_g aumenta, a área transversal da tubulação ocupada pelo líquido diminui e ocorre um progressivo curvamento da interface (ponto 27). Para valores maiores de J_g , o filme começa a escalar a parede do tubo (ponto 28), chegando a ocorrer o fechamento do anel de líquido quando J_g atinge valores suficientemente altos (pontos 29 e 30). É interessante notar que os pontos 25 e 26, que apresentam interface plana, pertencem ao padrão de ondas bidimensionais. O ponto 27 pertence ao regime de transição, e sua interface já mostra alguma curvatura. Os pontos 28, 29, e 30 exibem ondas tridimensionais e interfaces curvadas. Esta concordância entre o tipo de onda e o grau de curvatura da interface foi observada para todos os 30 pontos.

A figura (7.3) apresenta a distribuição do filme para crescentes valores de J_l , com J_g de aproximadamente 25 m/s. Como esperado, o aumento de J_l provoca o aumento na área transversal ao líquido (A_l) e no perímetro molhado pelo líquido (S_l).

Figura (7.2) - Distribuição de filme para crescentes velocidades superficiais do gás (páginas 51 e 52):

- (a) Ponto 25; $J_g = 4,5$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (b) Ponto 26; $J_g = 9,4$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (c) Ponto 27; $J_g = 12,2$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (d) Ponto 28; $J_g = 16,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (e) Ponto 29; $J_g = 20,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (f) Ponto 30; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s



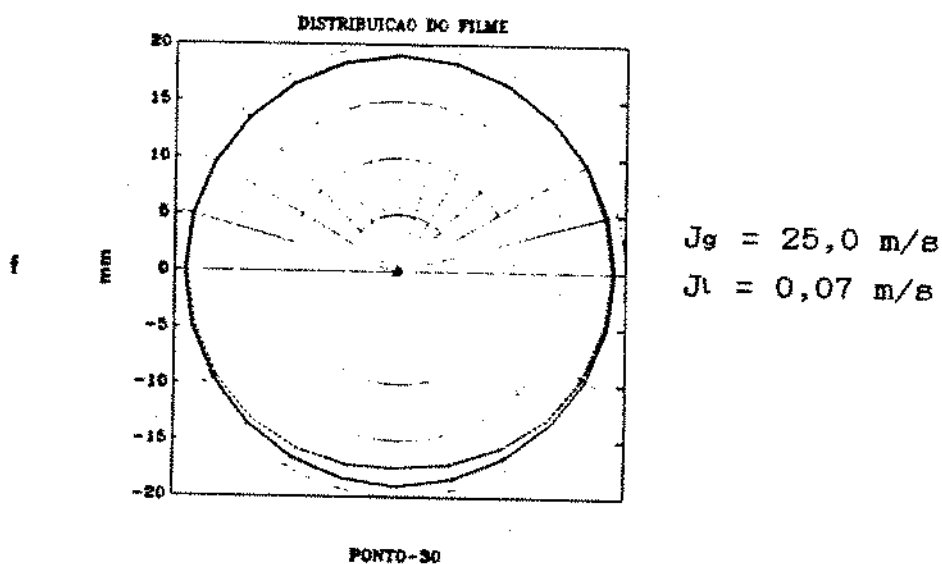
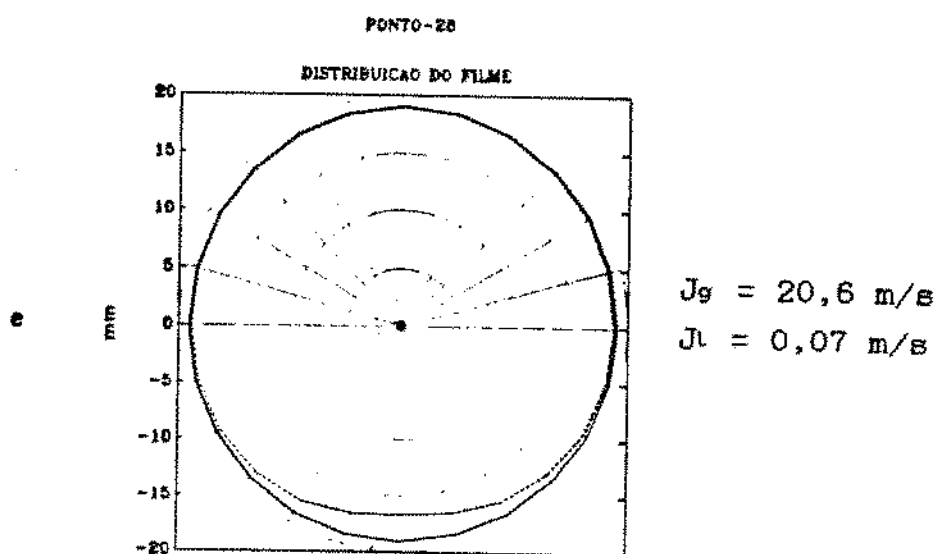
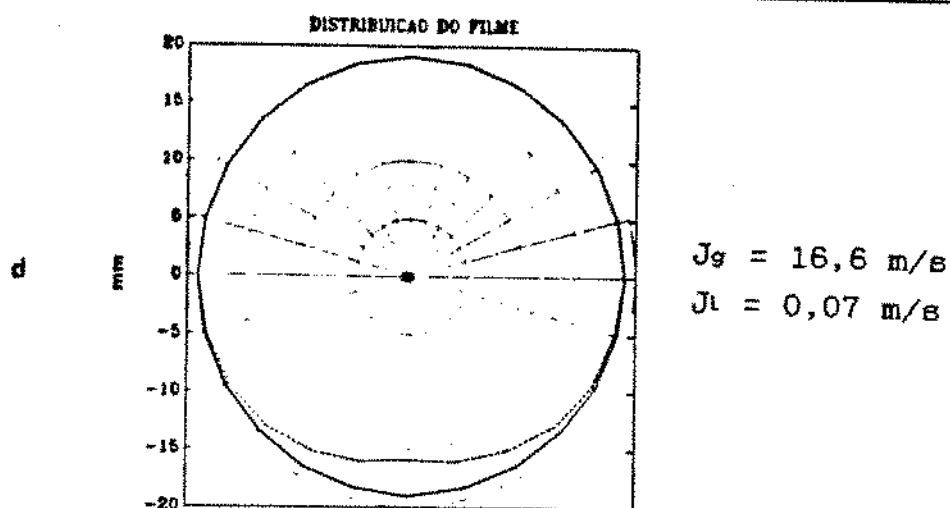
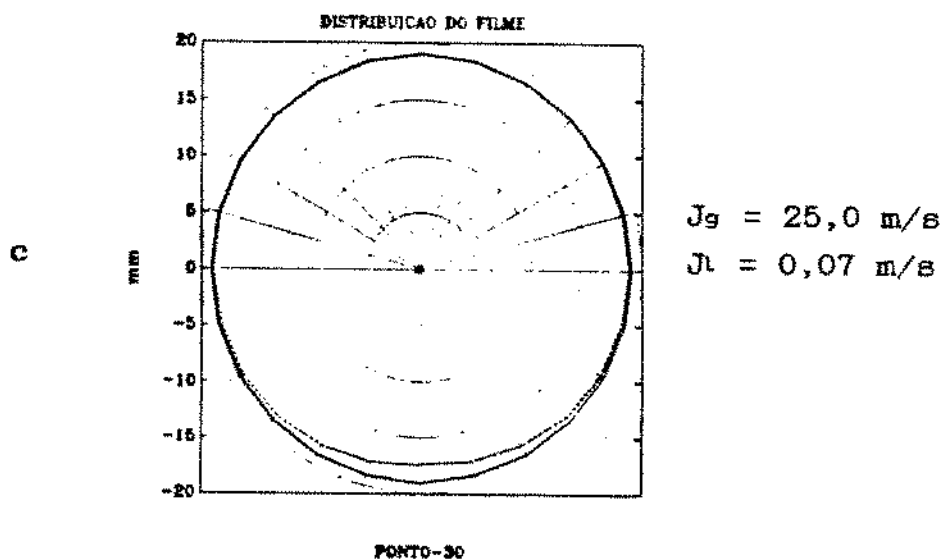
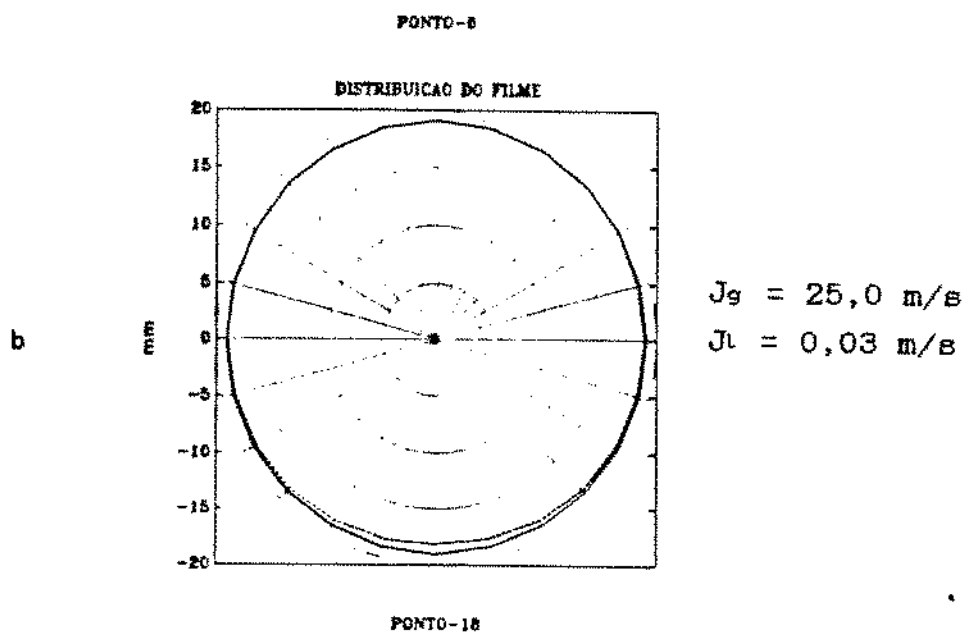
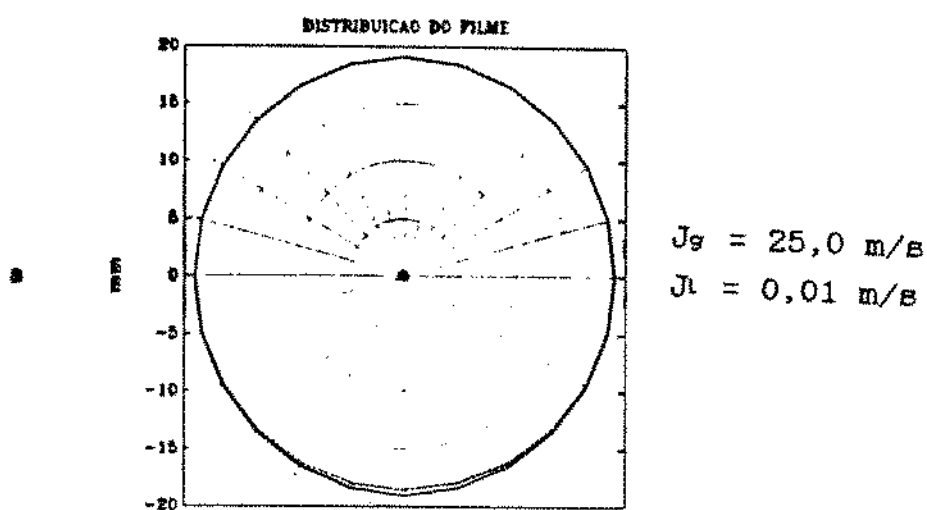


Figura (7.3) - Distribuição de filme para crescentes velocidades superficiais do líquido (página 54):

- (a) Ponto 6; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,01$ m/s
- (b) Ponto 18; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,03$ m/s
- (c) Ponto 30; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s



7.3 - HISTOGRAMA

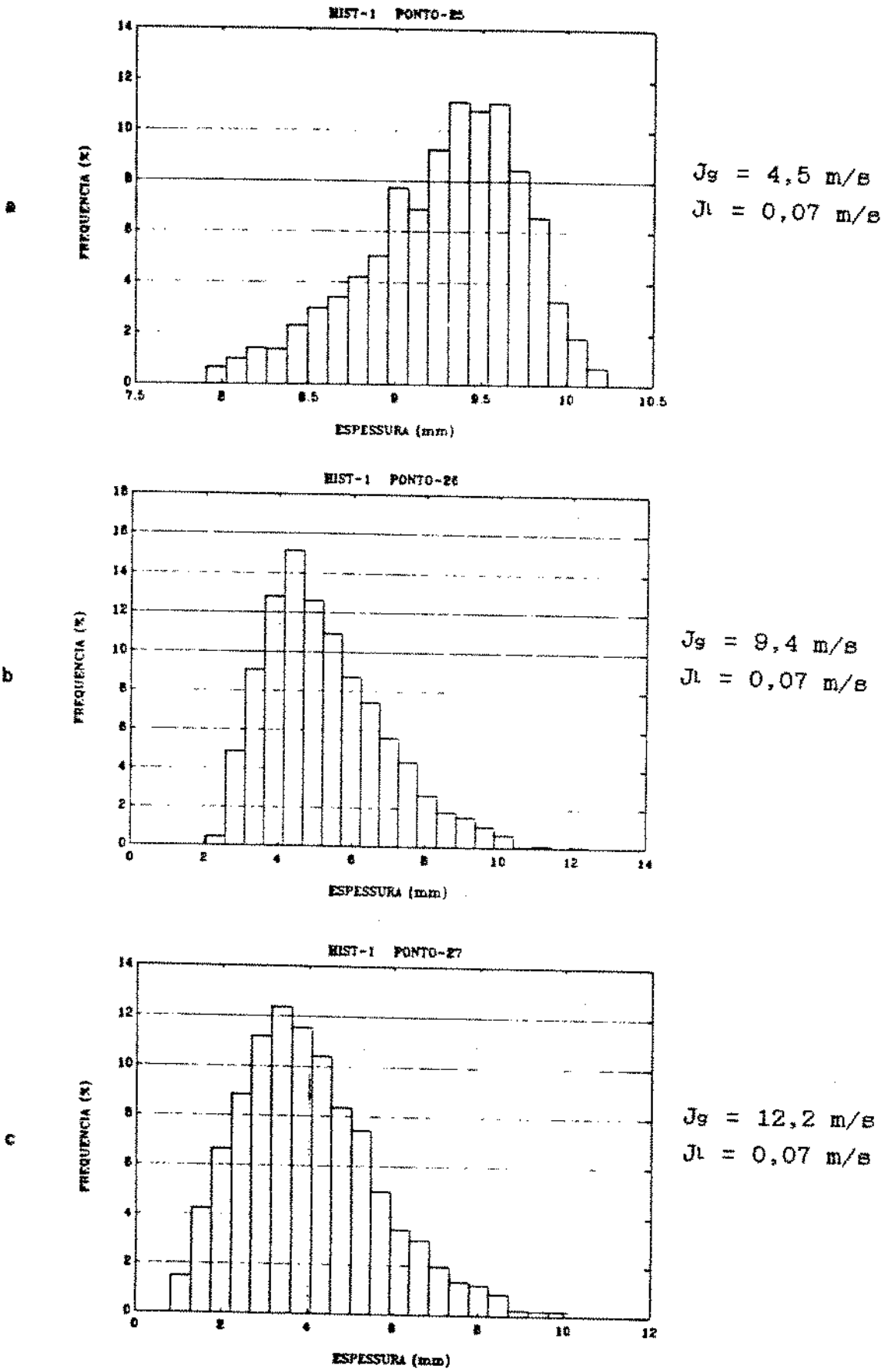
A figura (7.4) apresenta os histogramas de espessura de filme para crescentes valores de J_g , com J_l de aproximadamente 0,07 m/s. Observa-se que o aumento de J_g desloca o histograma para a esquerda. A espessura mínima diminui com o aumento de J_g . A espessura máxima inicialmente cresce com o aumento de J_g , atinge um máximo (ponto 26), decrescendo a partir de então. Nota-se também que a forma do histograma varia bastante com J_g , aproximando-se de uma distribuição log-normal para valores elevados de J_g .

A figura (7.5) mostra histogramas de espessura de filme para J_g de aproximadamente 25 m/s e crescentes valores de J_l . Observa-se que a forma dos histogramas varia muito pouco com J_l , para os pontos apresentados.

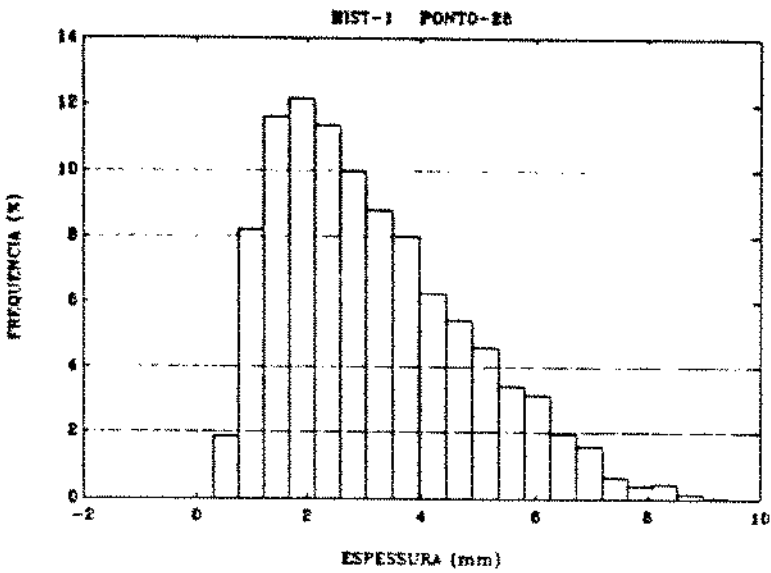
Comportamentos semelhantes foram constatados para os outros valores de J_l e J_g .

Figura (7.4) - Histograma de espessura de filme para crescentes velocidades superficiais do gás (páginas 56 e 57):

- (a) Ponto 25; $J_g = 4,5$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (b) Ponto 26; $J_g = 9,4$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (c) Ponto 27; $J_g = 12,2$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (d) Ponto 28; $J_g = 16,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (e) Ponto 29; $J_g = 20,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (f) Ponto 30; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s

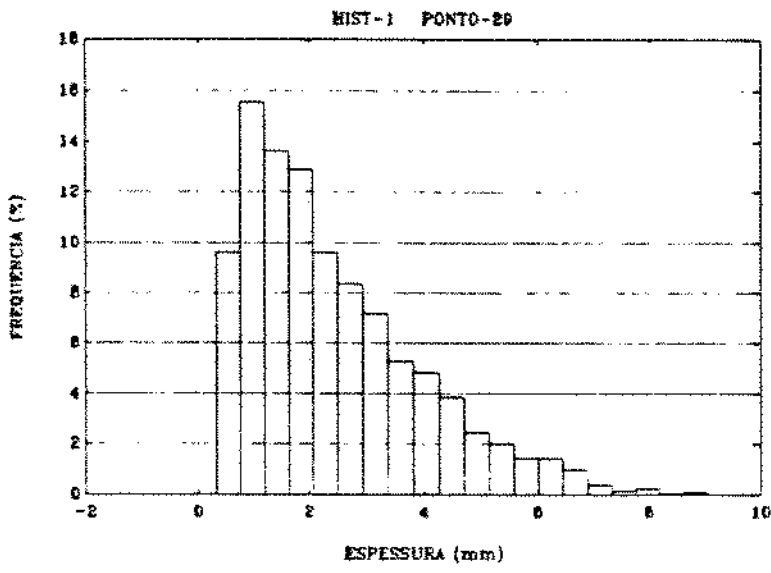


d



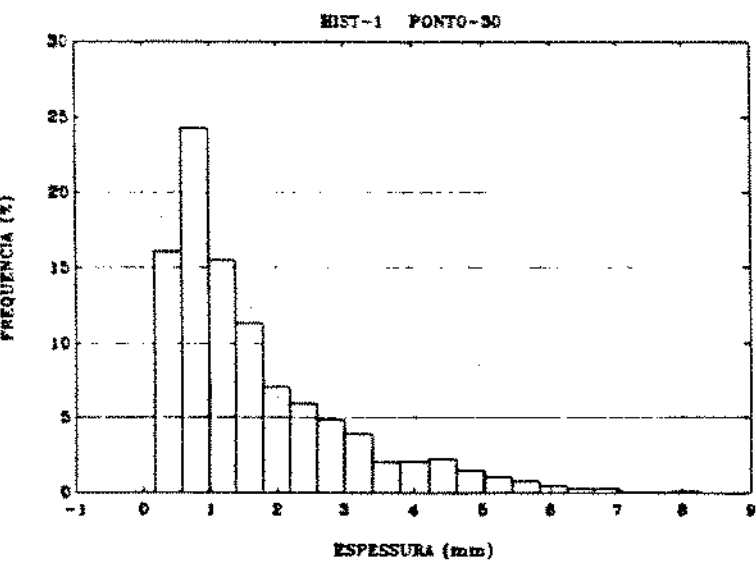
$J_g = 16,6 \text{ m/s}$
 $J_l = 0,07 \text{ m/s}$

e



$J_g = 20,6 \text{ m/s}$
 $J_l = 0,07 \text{ m/s}$

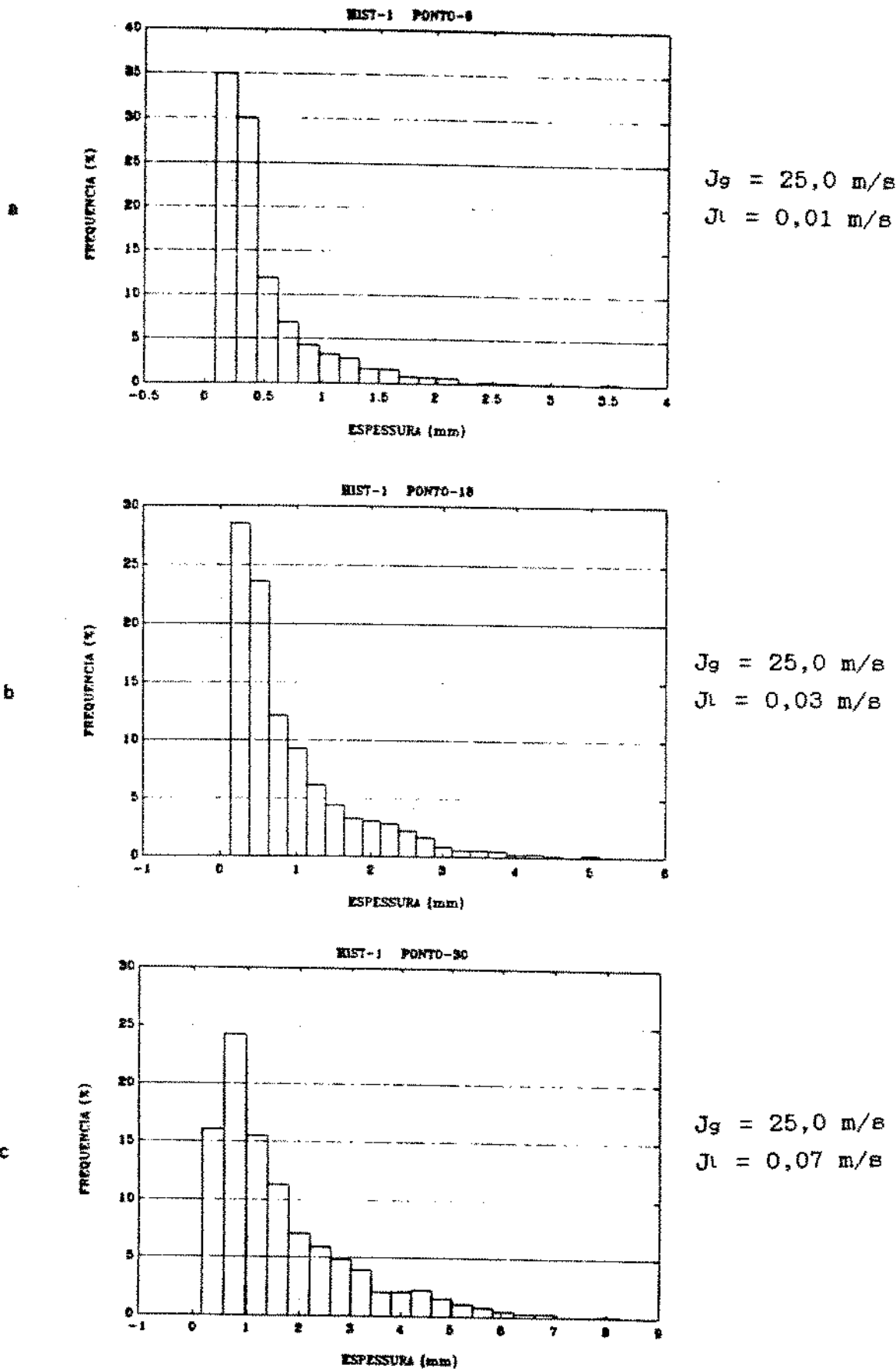
f



$J_g = 25,0 \text{ m/s}$
 $J_l = 0,07 \text{ m/s}$

Figura (7.5) - Histograma de espessura de filme para crescentes velocidades superficiais do líquido (página 59):

- (a) Ponto 6; $J_g = 25,0 \text{ m/s}$; $J_l = 0,01 \text{ m/s}$
- (b) Ponto 18; $J_g = 25,0 \text{ m/s}$; $J_l = 0,03 \text{ m/s}$
- (c) Ponto 30; $J_g = 25,0 \text{ m/s}$; $J_l = 0,07 \text{ m/s}$



7.4 - DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

Na figura (7.6) são apresentadas as funções densidade espectral de potência para valores crescentes de J_g , com J_l de aproximadamente 0,07 m/s. Nota-se que o aumento de J_g desloca o espectro para a direita, ou seja, no sentido das frequências mais altas. O pico de amplitude inicialmente aumenta com J_g , atinge um máximo (ponto 27), decrescendo a partir de então.

A figura (7.7) mostra as funções densidade espectral de potência para crescentes valores de J_l , com J_g de aproximadamente 25,0 m/s. Observa-se que o pico de amplitude cresce com J_l . Percebe-se também que uma redução em J_l desloca o espectro no sentido das altas frequências.

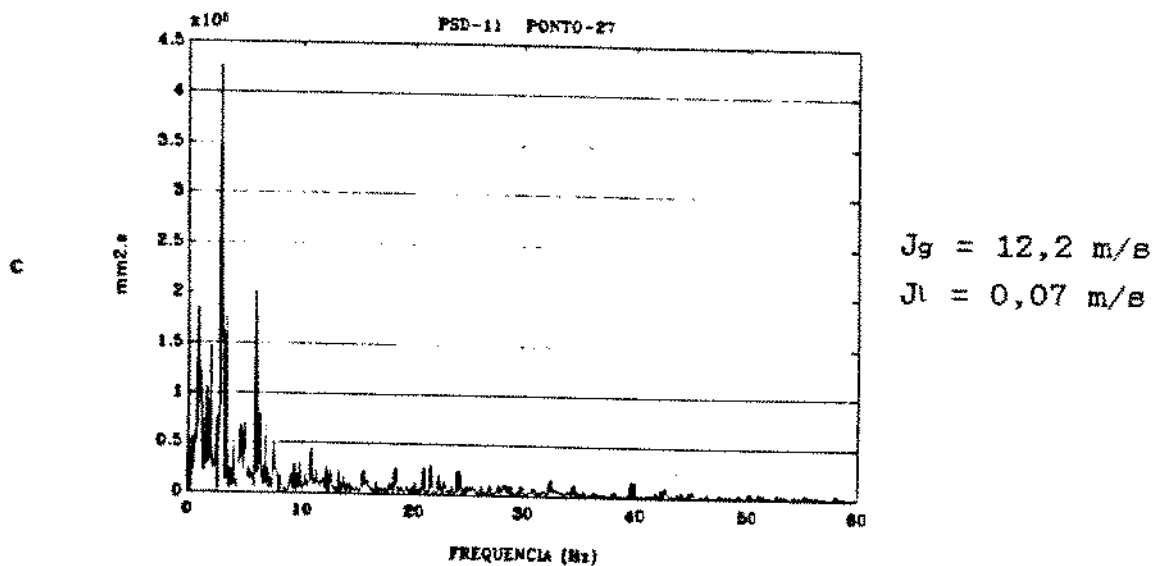
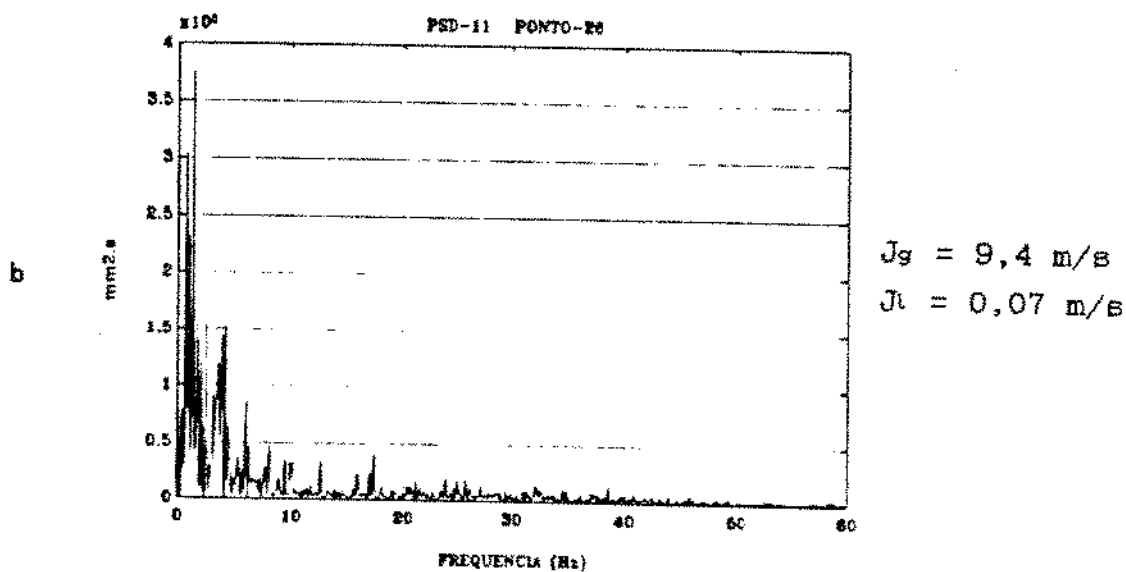
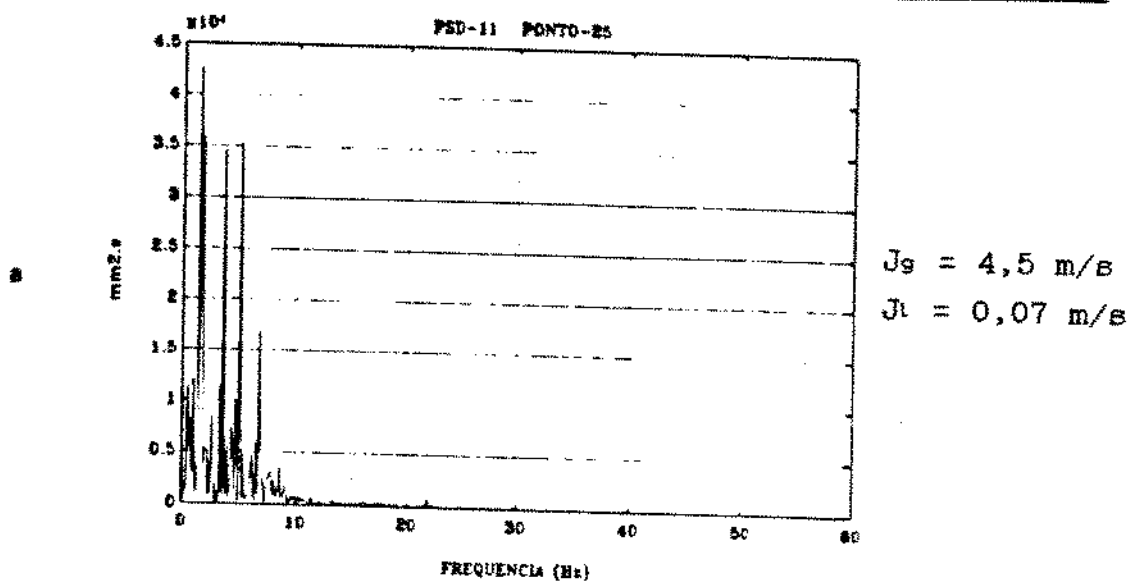
Para outros valores de J_l e J_g , foi observado um comportamento similar.

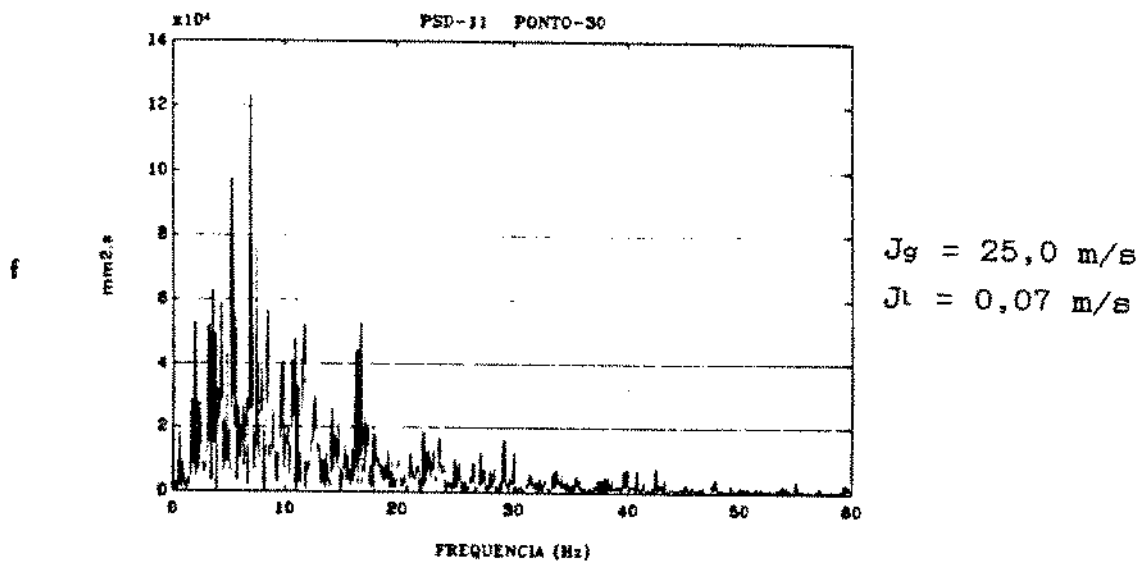
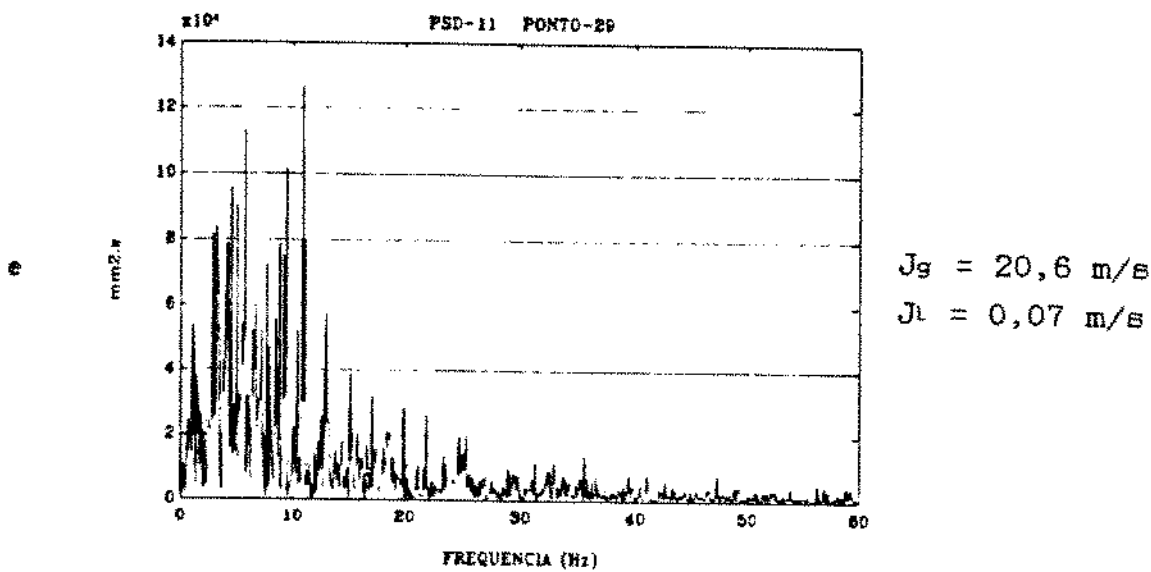
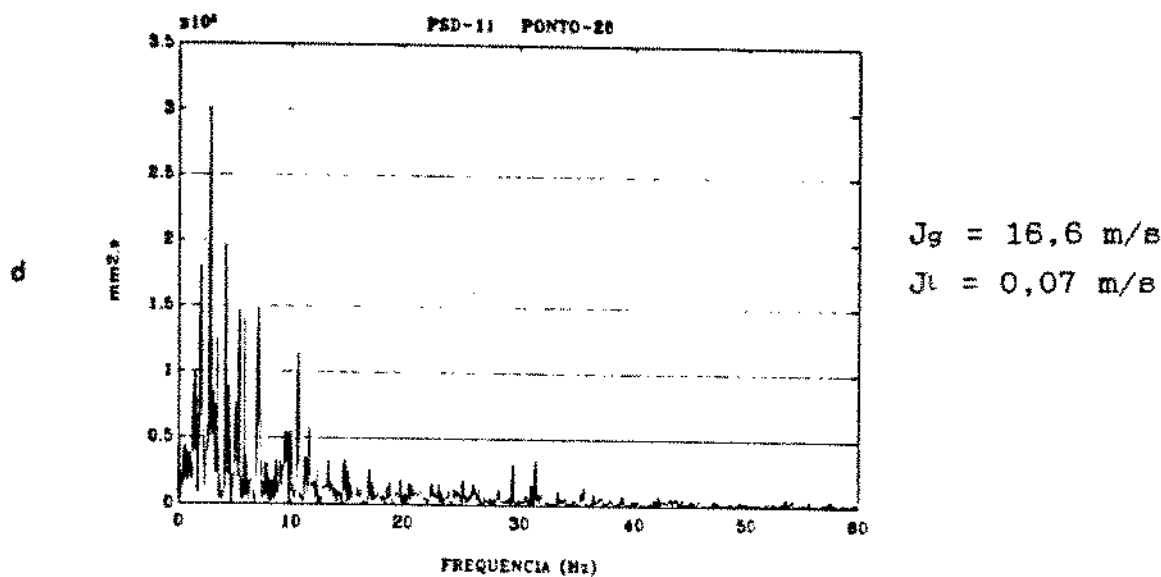
Figura (7.6) - Densidade espectral de potência para crescentes velocidades superficiais do gás (páginas 61 e 62):

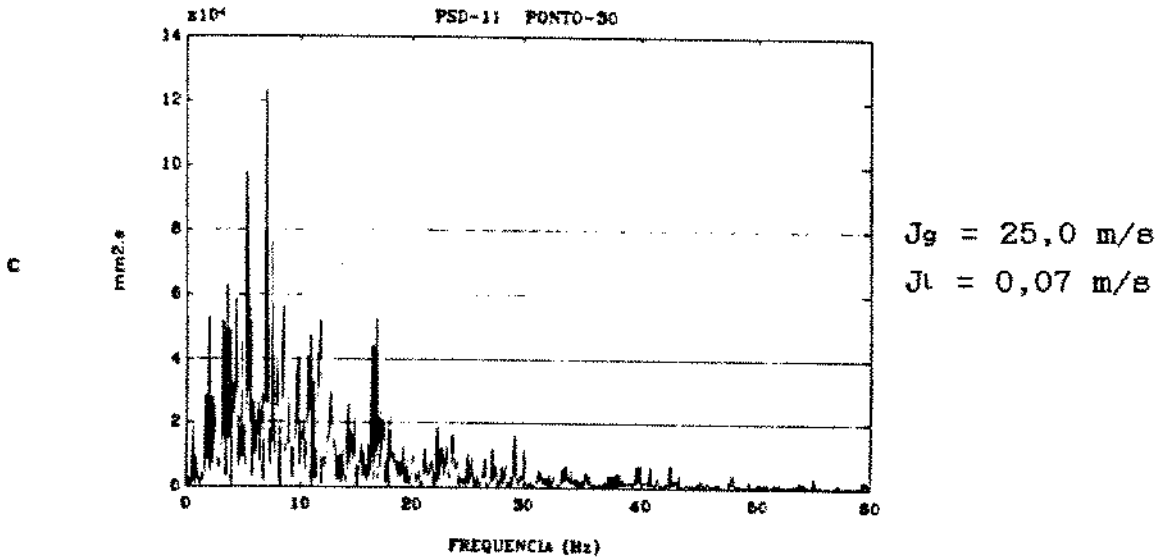
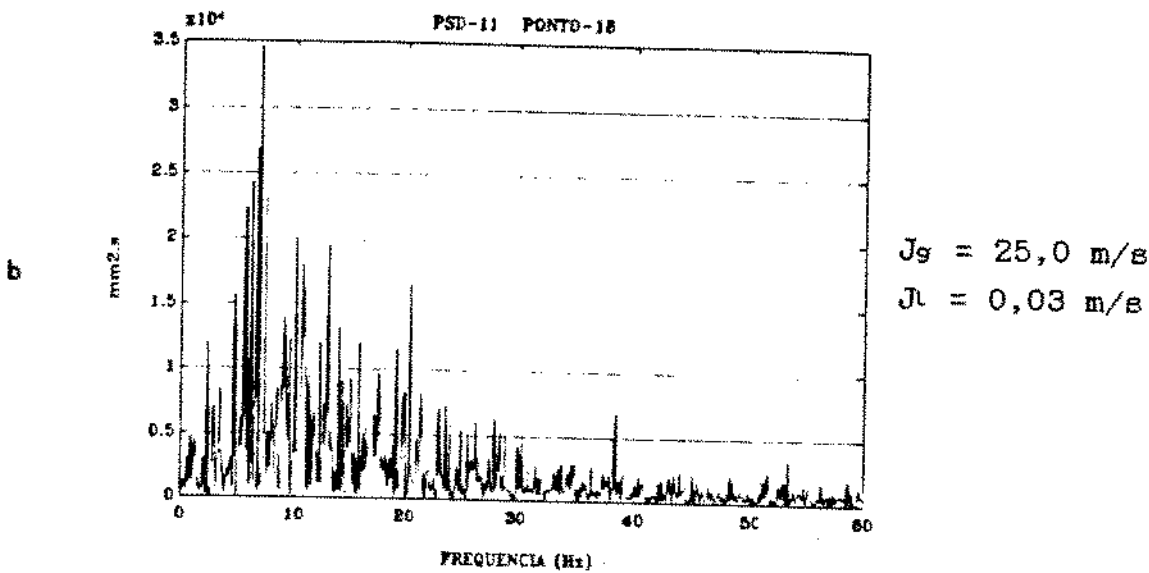
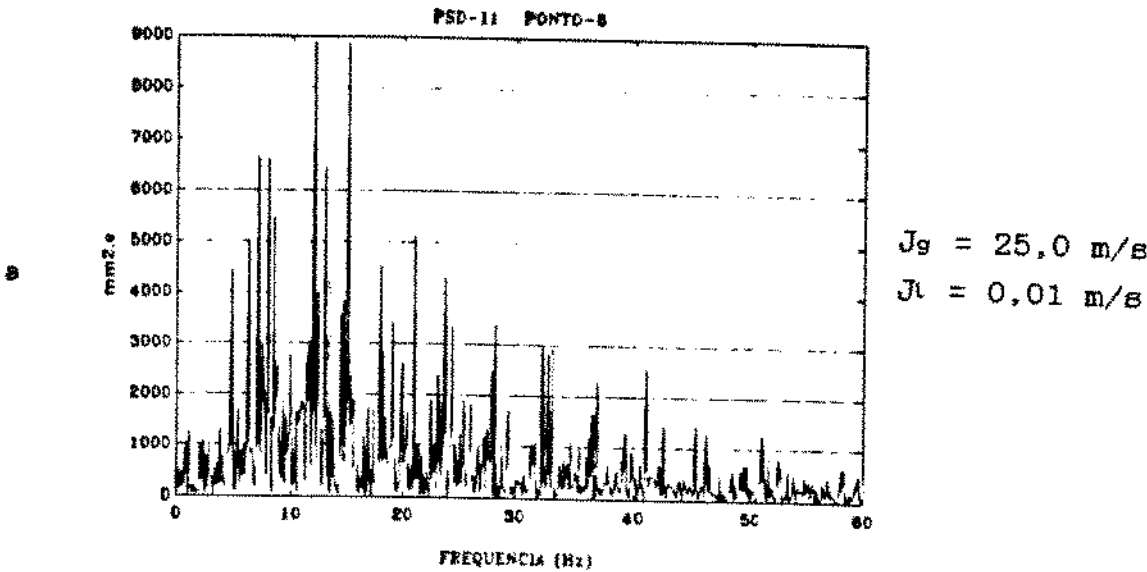
- (a) Ponto 25; $J_g = 4,5$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (b) Ponto 26; $J_g = 9,4$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (c) Ponto 27; $J_g = 12,2$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (d) Ponto 28; $J_g = 16,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (e) Ponto 29; $J_g = 20,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (f) Ponto 30; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s

Figura (7.7) - Densidade espectral de potência para crescentes velocidades superficiais do líquido (página 63):

- (a) Ponto 6; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,01$ m/s
- (b) Ponto 18; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,03$ m/s
- (c) Ponto 30; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s







7.5 - AUTOCORRELAÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, a principal aplicação da função de autocorrelação é a identificação de períodos característicos em um determinado sinal de interesse. Estes períodos podem ser traduzidos em comprimentos de onda, desde que se conheça a velocidade desta.

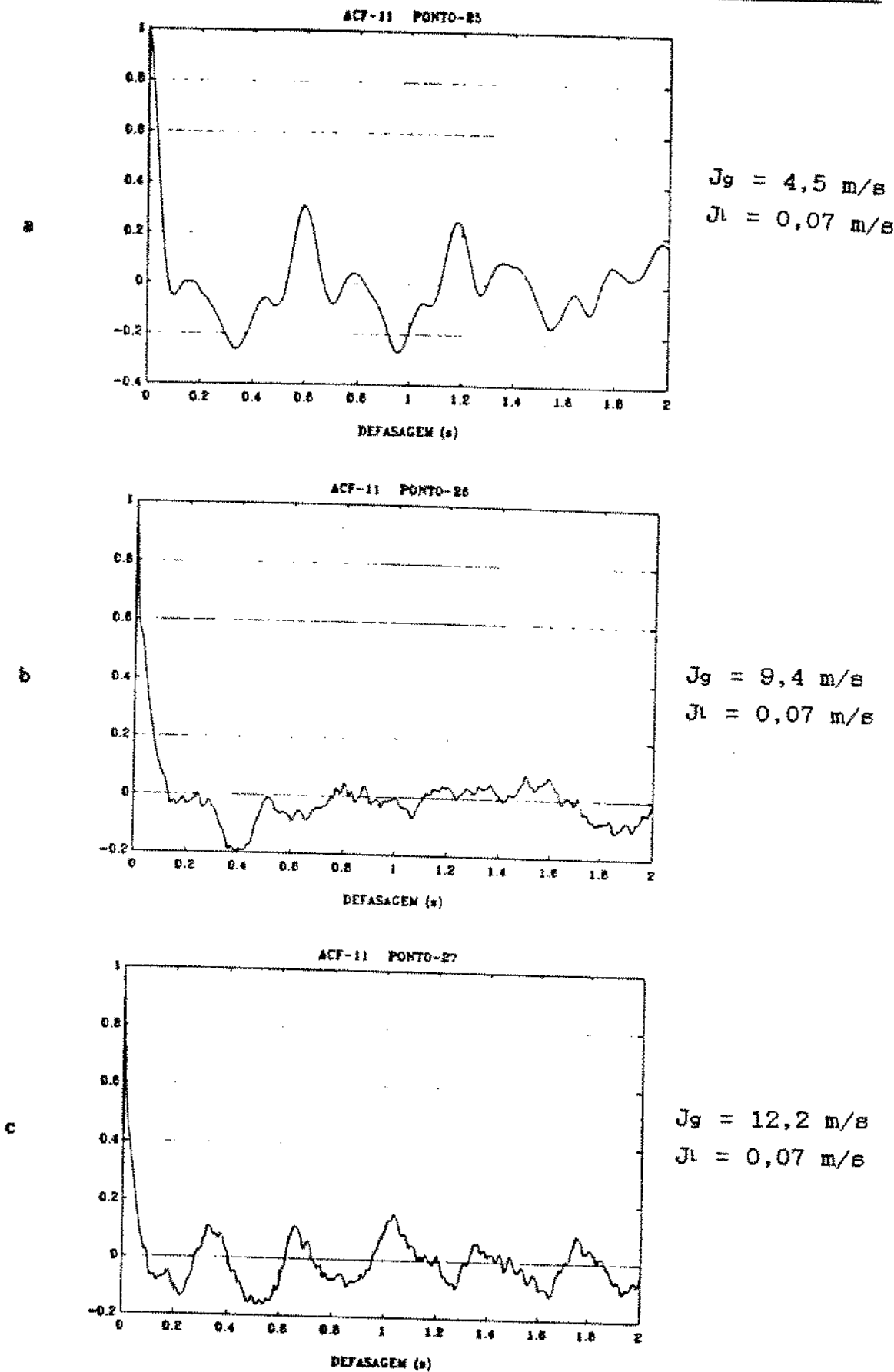
A figura (7.8) apresenta as funções de autocorrelação normalizadas para crescentes valores de J_g , com J_l de aproximadamente 0,07 m/s. Para o ponto 25, observa-se a nítida predominância de ondas de grande período (ondas bidimensionais), enquanto os pontos 26 e 27 exibem ondas de período curto e ondas de período longo. Já os pontos 28, 29 e 30 mostram uma progressiva ocorrência de ondas de pequeno período (ondas tridimensionais).

A figura (7.9) apresenta as funções de autocorrelação normalizadas para crescentes valores de J_l , com J_g de aproximadamente 25,0 m/s. Percebe-se que uma redução em J_l favorece o surgimento de ondas de período curto (alta frequência).

Comportamentos similares foram observados para outros valores de J_l e J_g .

Figura (7.8) - Função de autocorrelação normalizada para crescentes velocidades superficiais do gás (páginas 65 e 66):

- (a) Ponto 25; $J_g = 4,5$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (b) Ponto 26; $J_g = 9,4$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (c) Ponto 27; $J_g = 12,2$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (d) Ponto 28; $J_g = 16,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (e) Ponto 29; $J_g = 20,6$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s
- (f) Ponto 30; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s



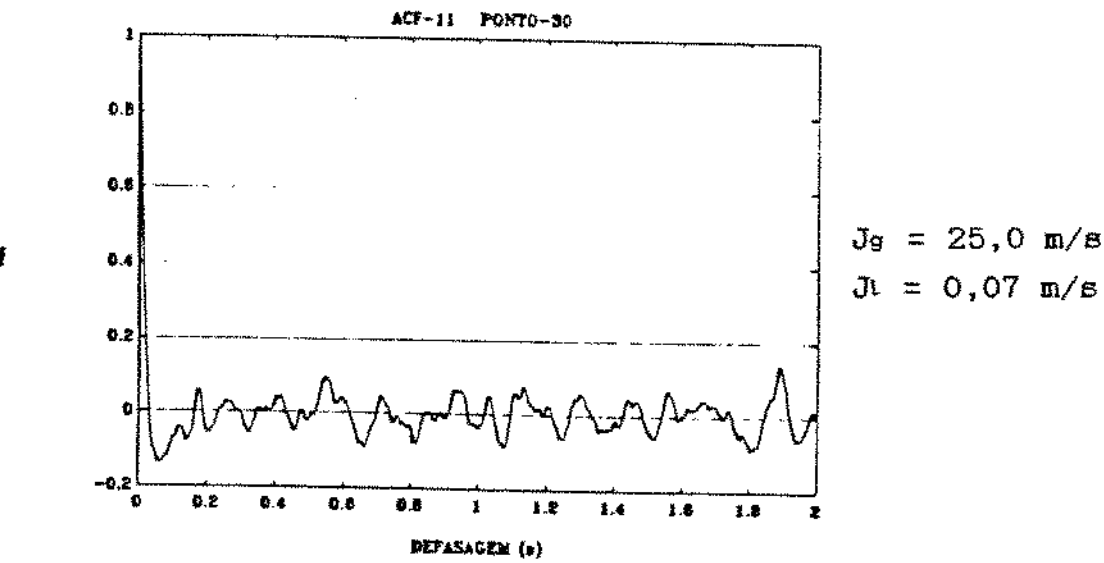
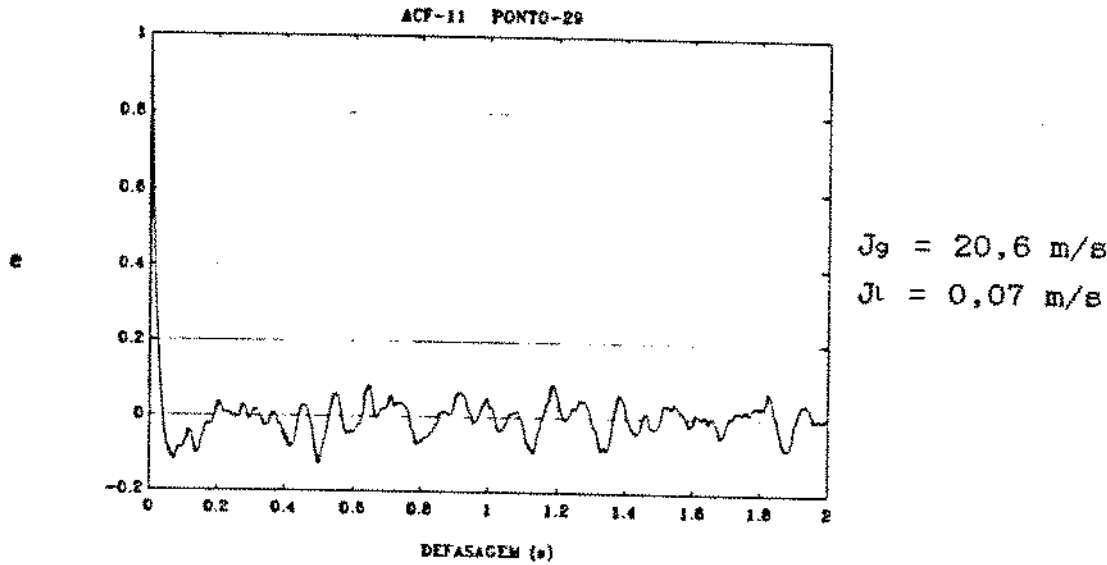
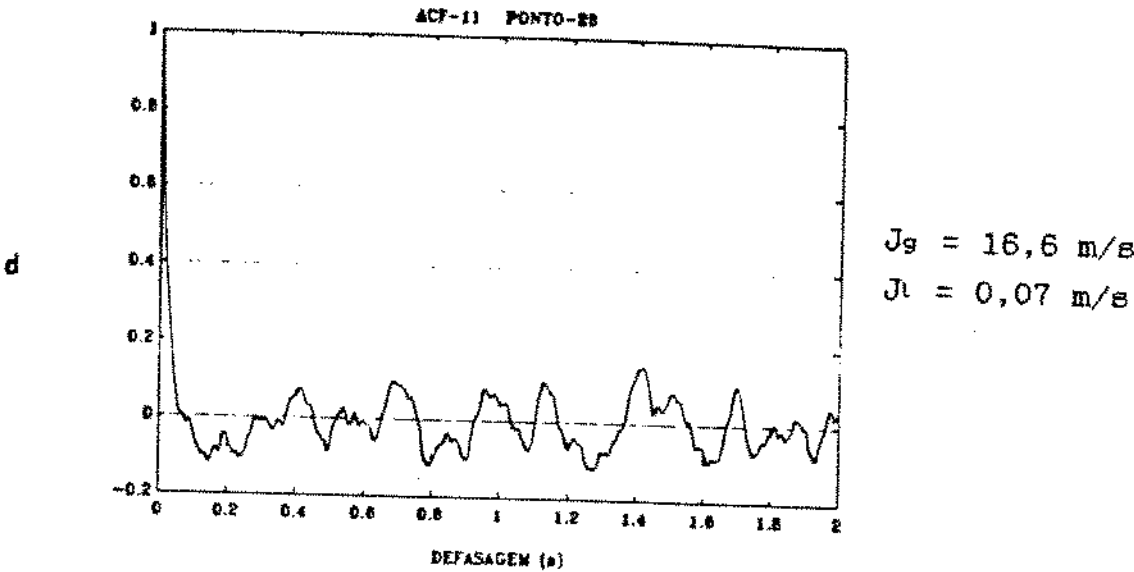
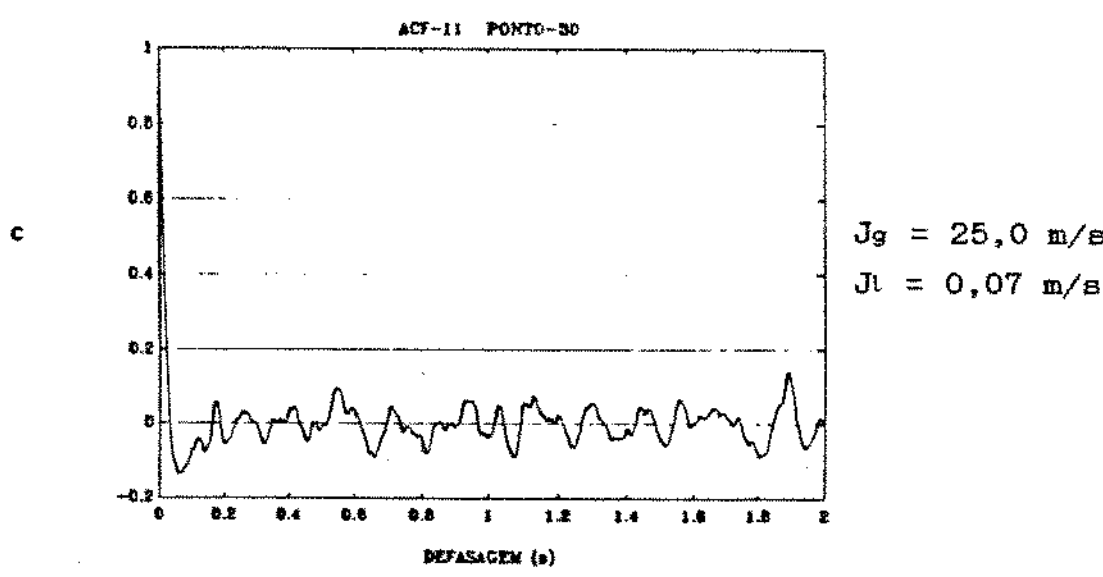
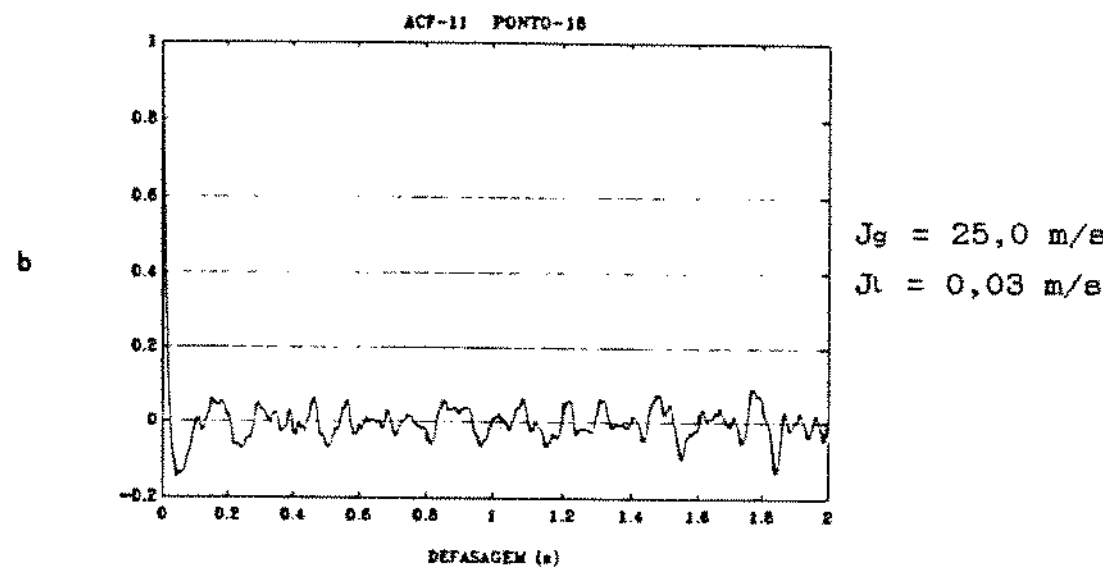
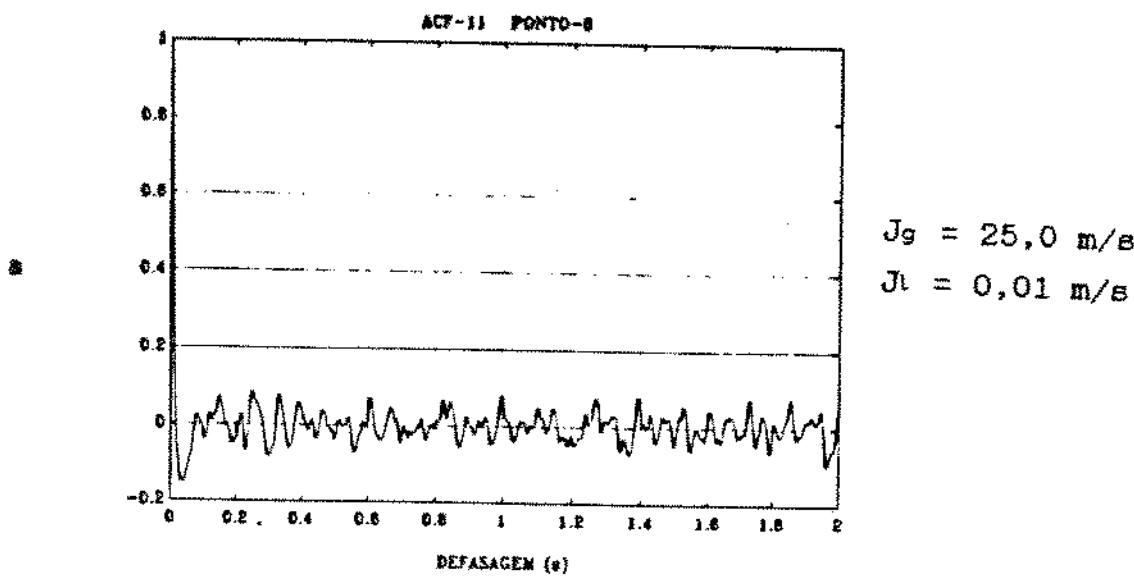


Figura (7.9) - Função de autocorrelação normalizada para crescentes velocidades superficiais do líquido (página 68):

- (a) Ponto 6; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,01$ m/s
- (b) Ponto 18; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,03$ m/s
- (c) Ponto 30; $J_g = 25,0$ m/s; $J_l = 0,07$ m/s



7.6 - DENSIDADE ESPECTRAL CRUZADA DE POTÊNCIA

Pretendia-se, inicialmente, usar o gráfico de fase da função densidade espectral cruzada de potência para a determinação das velocidades de onda das várias frequências presentes no escoamento, como apresentado por Jayanti et al. (1990). Entretanto, devido às grandes oscilações observadas no gráfico de fase, isto não foi possível, preferindo-se determinar a velocidade de onda através da função de correlação cruzada. Esta última não permite discriminar diferentes velocidades para diferentes frequências, calculando-se então um valor médio para todas as frequências presentes.

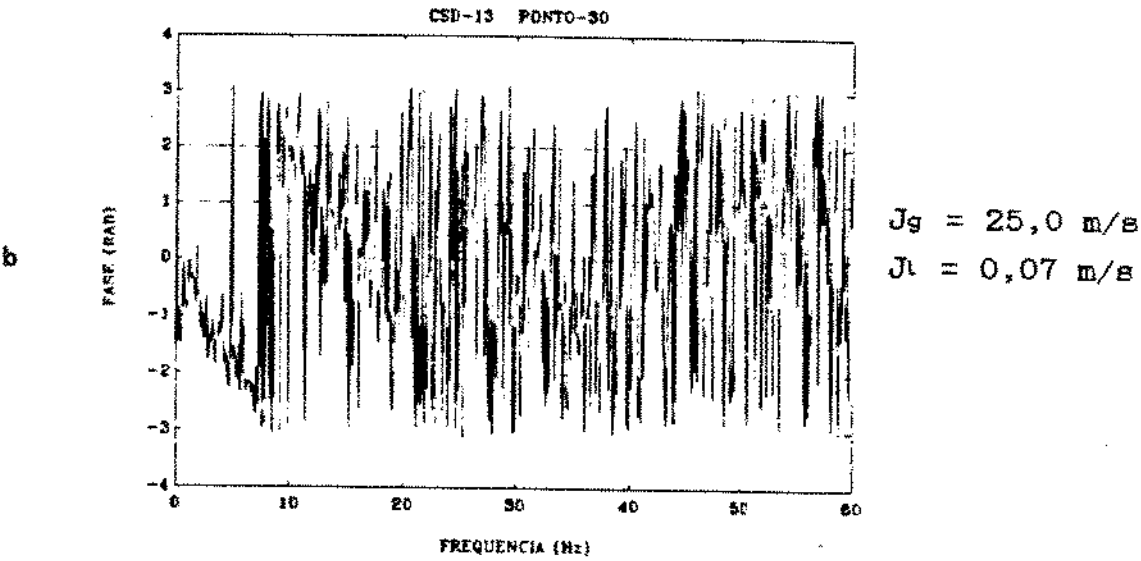
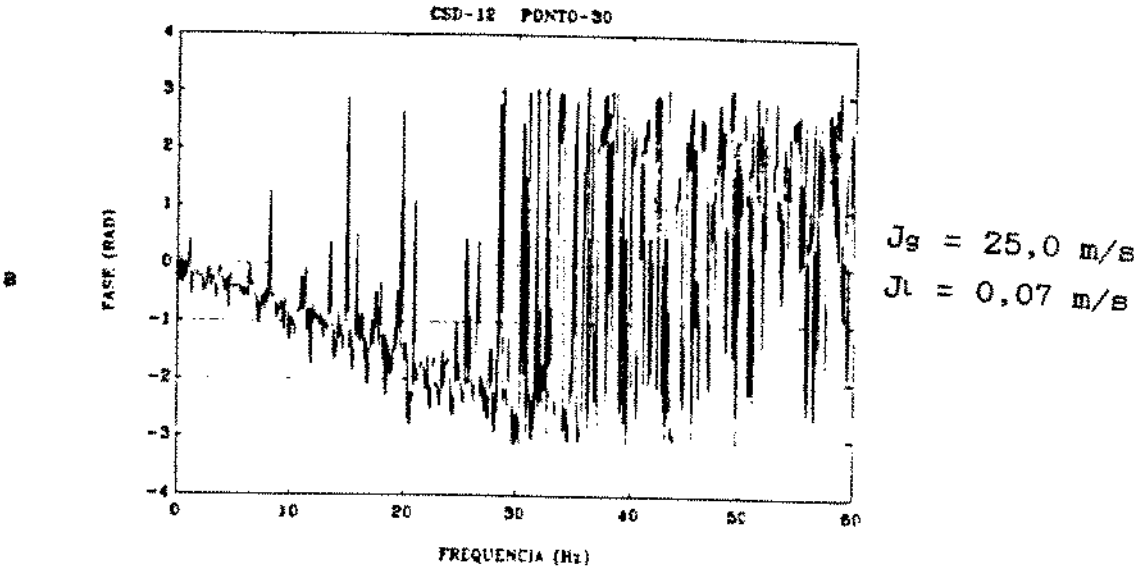
Possivelmente as grandes oscilações observadas no gráfico de fase da função densidade espectral cruzada de potência decorrem da não utilização de método de suavização do espectro, como a filtragem em frequência ou a média de vários espectros.

A figura (7.10) mostra o gráfico de fase da função densidade espectral cruzada de potência do ponto 30, tomada a partir dos sinais de espessura de filme das sondas 1, 2 (a) e 1, 3 (b). Percebe-se que, para o par 1, 2, existe uma coerência entre os sinais até uma frequência de aproximadamente 28 Hz, enquanto que para o par 1, 3 a coerência se observa até 7 Hz.

Figura (7.10) - Densidade espectral cruzada de potência para o ponto 30 ($J_s = 25,0$ m/s; $J_i = 0,07$ m/s; página 70):

(a) Sondas 1 e 2

(b) Sondas 1 e 3



7.7 - CORRELAÇÃO CRUZADA

As funções de correlação cruzada foram calculadas a partir da transformada inversa de Fourier das funções densidade espectral cruzada de potência. A principal aplicação destas funções é a identificação do atraso entre os sinais de duas sondas consecutivas, caracterizado como um pico positivo no gráfico. Conhecido o atraso e a distância entre as sondas, pode-se facilmente calcular a velocidade de onda.

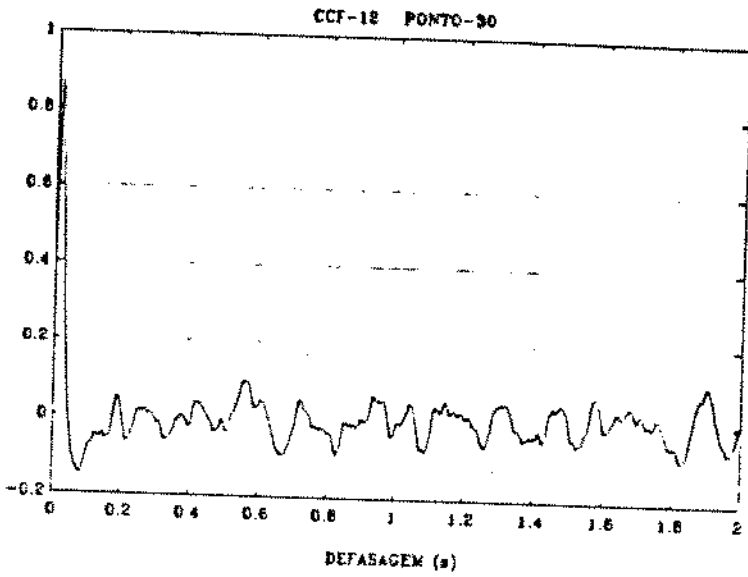
A figura (7.11) mostra a função de correlação cruzada normalizada do ponto 30, calculada a partir dos sinais das sondas 1, 2 e 1, 3.

Figura (7.11) - Função de correlação cruzada normalizada para o ponto 30 ($J_9 = 25,0$ m/s; $J_1 = 0,07$ m/s; página 72):

(a) Sondas 1 e 2

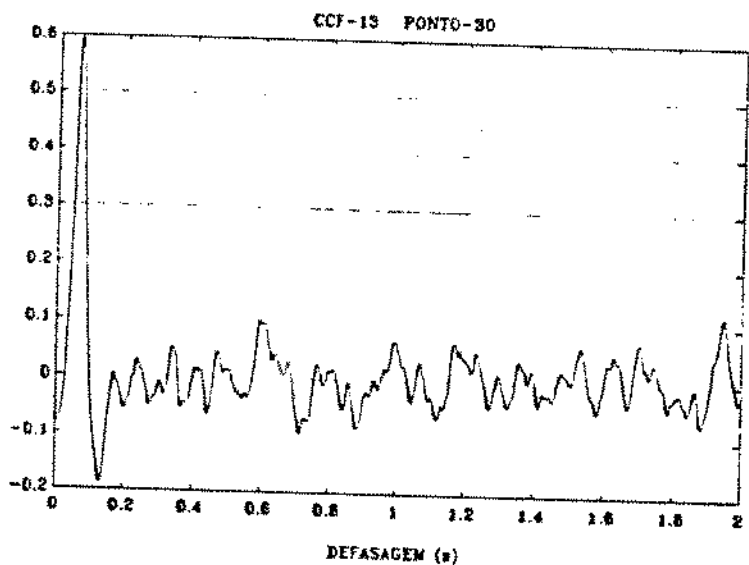
(b) Sondas 1 e 3

a



$J_g = 25,0 \text{ m/s}$
 $J_l = 0,07 \text{ m/s}$

b



$J_g = 25,0 \text{ m/s}$
 $J_l = 0,07 \text{ m/s}$

7.8 - VELOCIDADE DE ONDA

As velocidades de onda foram determinadas a partir das sondas 1 e 3, pois o atraso de tempo observado entre as sondas 1 e 2 mostrou-se muito pequeno, quando comparado com a taxa de amostragem, o que reduziria a precisão dos resultados.

As figuras (7.12) e (7.13) comparam a velocidade de onda na geratriz inferior com as velocidades superficiais J_1 e J_2 . Excetuando-se o ponto 7, para o qual o tempo de aquisição de 8,192 s não parece suficiente, a velocidade de onda cresce com o aumento de J_1 ou J_2 . Entretanto, a influência de J_2 é muito maior que a de J_1 . Comportamento semelhante foi observado por Jayanti et al. (1990).

A figura (7.14) compara a velocidade de onda com a velocidade média da fase líquida. Percebe-se que praticamente todos os pontos exibem uma velocidade de onda entre uma e duas vezes a velocidade média do líquido.

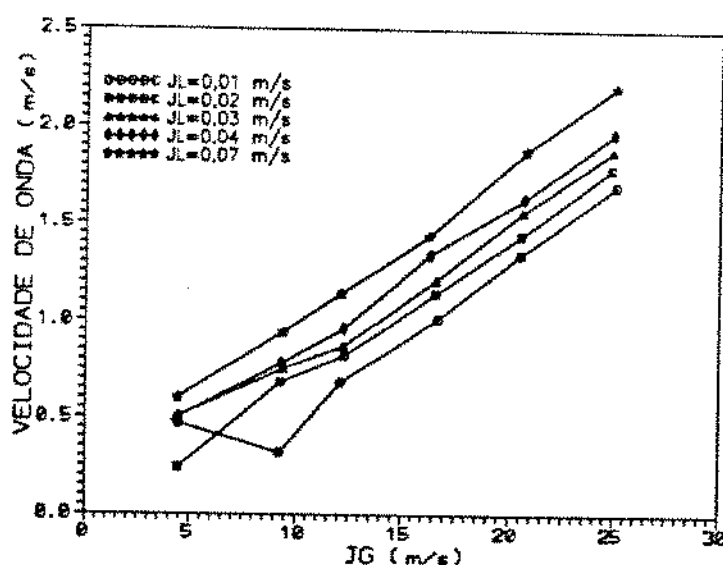


Figura (7.12) - Velocidade de onda em função da velocidade superficial do gás.

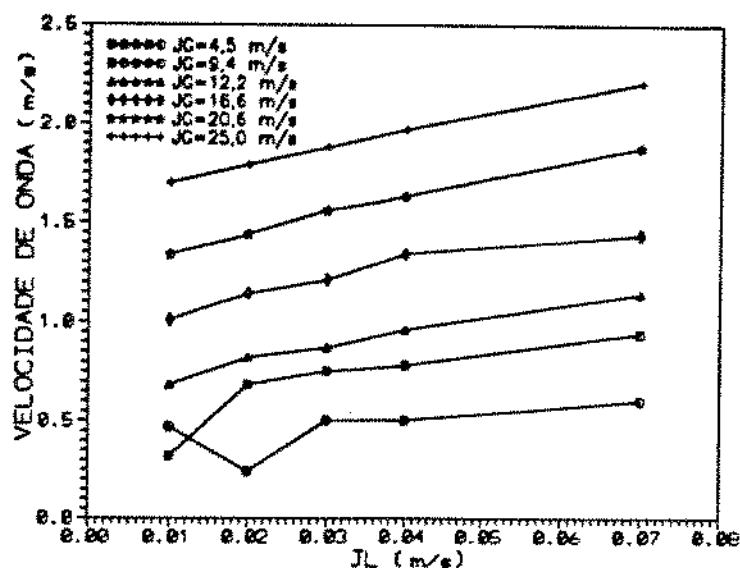


Figura (7.13) - Velocidade de onda em função da velocidade superficial do líquido.

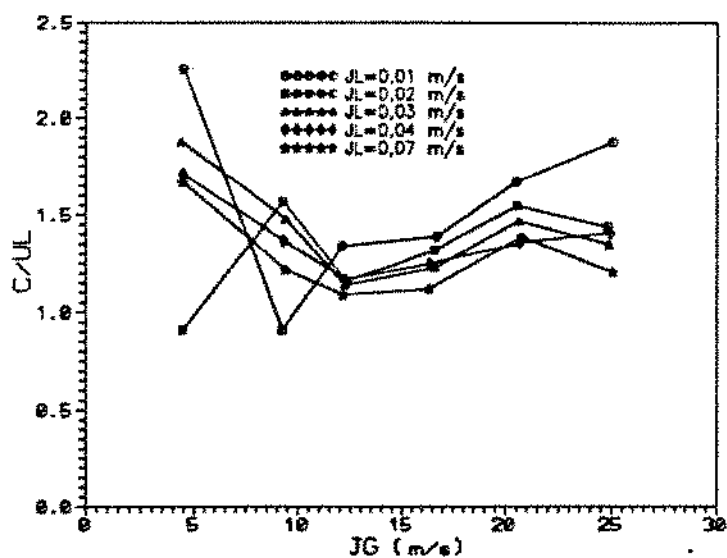


Figura (7.14) - Relação entre a velocidade de onda e a velocidade média do líquido, em função da velocidade superficial do gás.

7.9 - DESVIO PADRÃO DA ESPESSURA DE FILME

Uma das informações significativas deste trabalho é apresentada na figura (7.15), onde o desvio padrão da espessura de filme é plotado contra a espessura média, ambos tomados na geratriz inferior do tubo.

Verificam-se dois comportamentos distintos. Considerando-se uma família de pontos com J_1 constante, para baixos valores de J_g , um acréscimo em J_g causa um aumento no desvio padrão. Para elevados valores de J_g , ocorre o contrário, ou seja, um aumento em J_g é acompanhado por uma queda do desvio padrão.

Nota-se também, para altos valores de J_g , uma região de comportamento assintótico, onde o desvio padrão pode ser aproximado por uma função linear da espessura de filme, não dependendo significativamente de J_1 ou J_g .

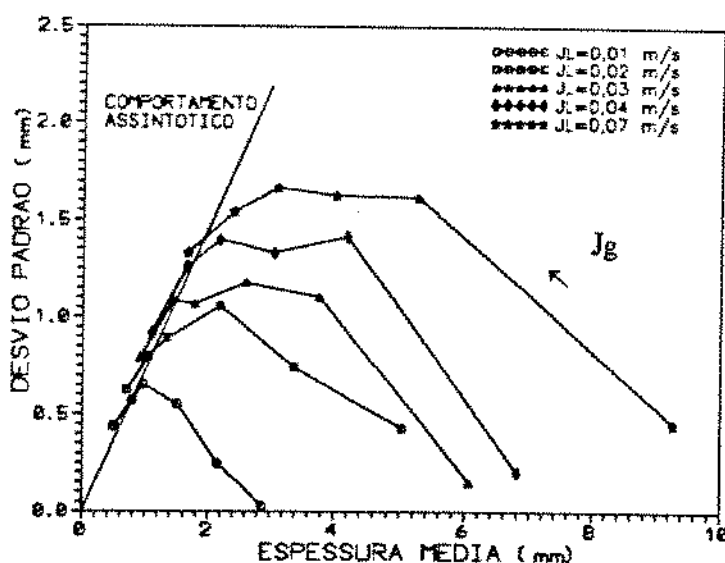


Figura (7.15) - Desvio padrão da espessura de filme, tomado na geratriz inferior do tubo.

7.10 - FRAÇÃO DE VAZIO

A figura (7.16) compara as medições de fração de vazio com os resultados experimentais de Rodrigues (1991), obtidos em situação semelhante, e com a correlação de Hart et al. (1989):

$$(1-\alpha)/\alpha = (J_1/J_2) \left[1 + 10,4 \text{ Resi}^{-0,363} (\rho_l/\rho_g)^{1/2} \right] \quad (7.1)$$

Percebe-se uma razoável concordância entre os três resultados.

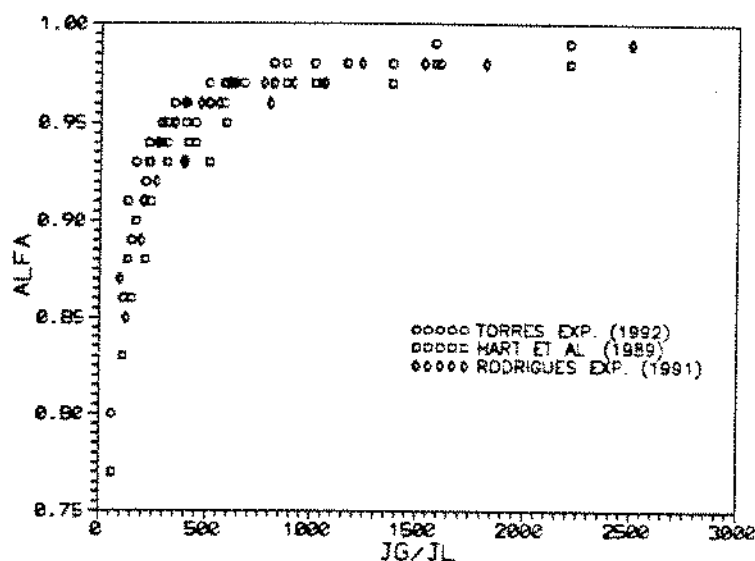


Figura (7.16) - Fração de vazio.

7.11 - PERÍMETRO MOLHADO

A figura (7.17) compara as medições de S_l/S com os resultados obtidos através da correlação de Hart et al. (1989):

$$(S_l/S) = (S_l/S)_0 + 0,26 Fr^{0,58} \quad (7.2)$$

Onde:

$$(S_l/S)_0 = 0,52 (1-\alpha)^{0,374} \quad (7.3)$$

$$Fr = [U^2 / (g D)] [\rho_l / (\rho_l - \rho_g)] \quad (7.4)$$

e α é calculada pela equação (7.1). Nota-se uma grande dispersão nos pontos experimentais, em parte explicada pela pouca resolução do processo de medição de S_l (incrementos em arcos de 15°). Percebe-se também que o fechamento do anel de líquido ocorre para valores mais baixos de Fr que aqueles previstos pela equação (7.2).

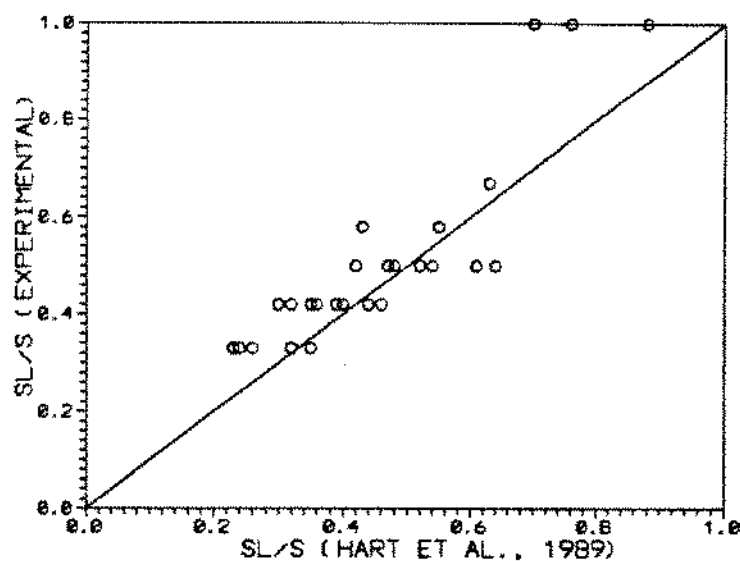


Figura (7.17) - Relação entre o perímetro molhado e o perímetro do tubo.

7.12 - PERÍMETRO DA INTERFACE

Uma forma interessante de apresentar os resultados das medições do perímetro da interface é aquela da figura (7.18), onde a relação S_i/S_l é plotada contra a fração de vazio. Neste gráfico também estão indicados os valores de S_i/S_l para as hipóteses de interface plana e geometria anular, obtidos analiticamente. Ela mostra que grande parte dos pontos experimentais apresenta uma interface com características intermediárias entre a hipótese de interface plana e o escoamento anular concêntrico. Este fato também pode ser observado no apêndice VI-1.

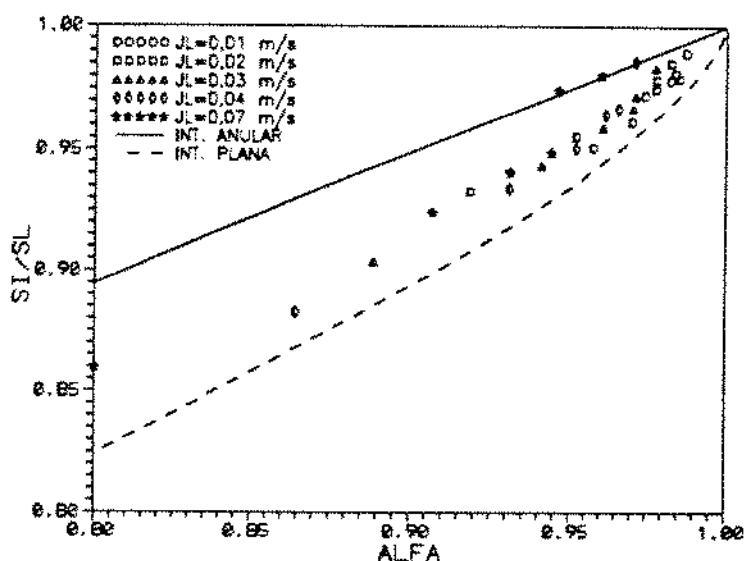


Figura (7.18) - Relação entre o perímetro da interface gás-líquido e o perímetro do tubo molhado pelo líquido.

7.13 - GRADIENTE DE PRESSÃO

As figuras (7.19) e (7.20) exibem os resultados das medições do gradiente de pressão.

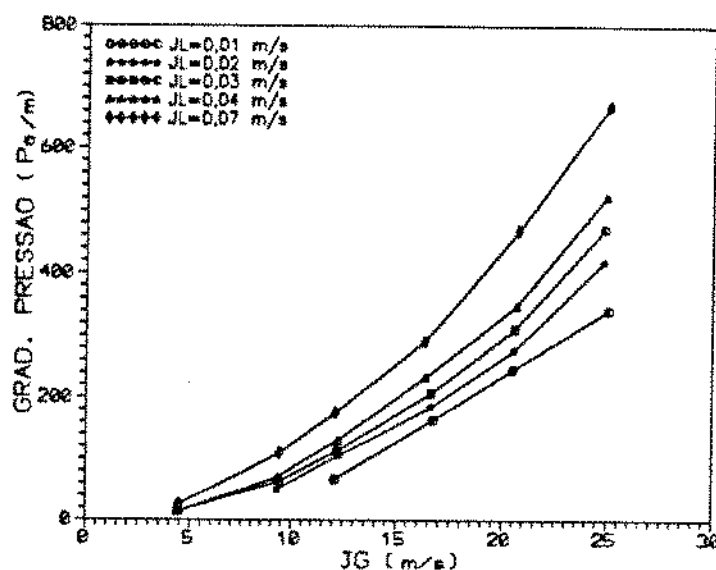


Figura (7.19) - Gradiente de pressão em função da velocidade superficial do gás.

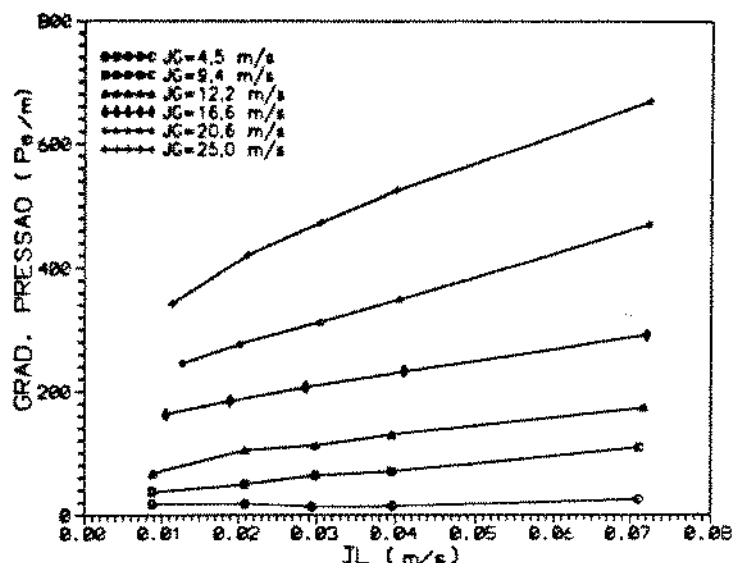


Figura (7.20) - Gradiente de pressão em função da velocidade superficial do líquido.

7.14 - TENSÃO CISALHANTE NO LÍQUIDO

A tensão cisalhante no líquido, junto à parede, pode ser obtida do balanço de forças aplicado à corrente líquida. Isolando τ_{wl} na equação (2.2), encontra-se:

$$\tau_{wl} = (1/S_l) [-(1-\alpha) A (dp/dz) + S_i \tau_i] \quad (7.5)$$

A relação entre a tensão de cisalhamento na interface e a tensão de cisalhamento no líquido, junto a parede é apresentada na figura (7.21). Conclui-se que, para a faixa experimentada, o perfil de tensões cisalhantes no líquido é praticamente uniforme.

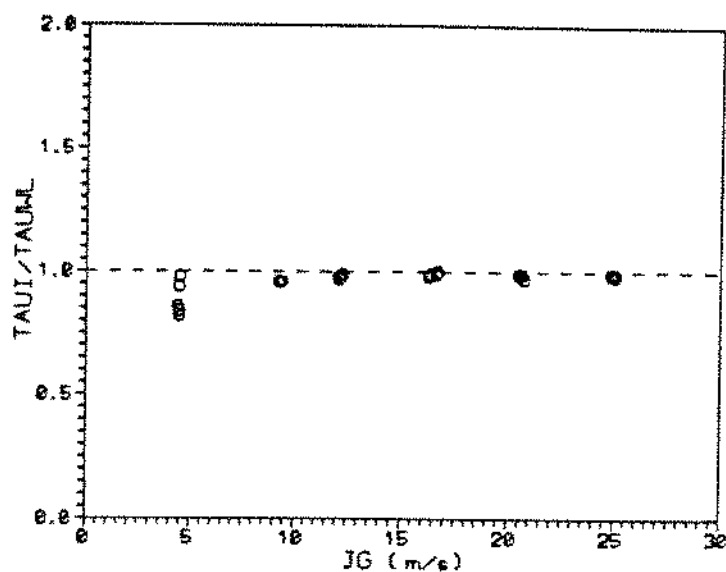


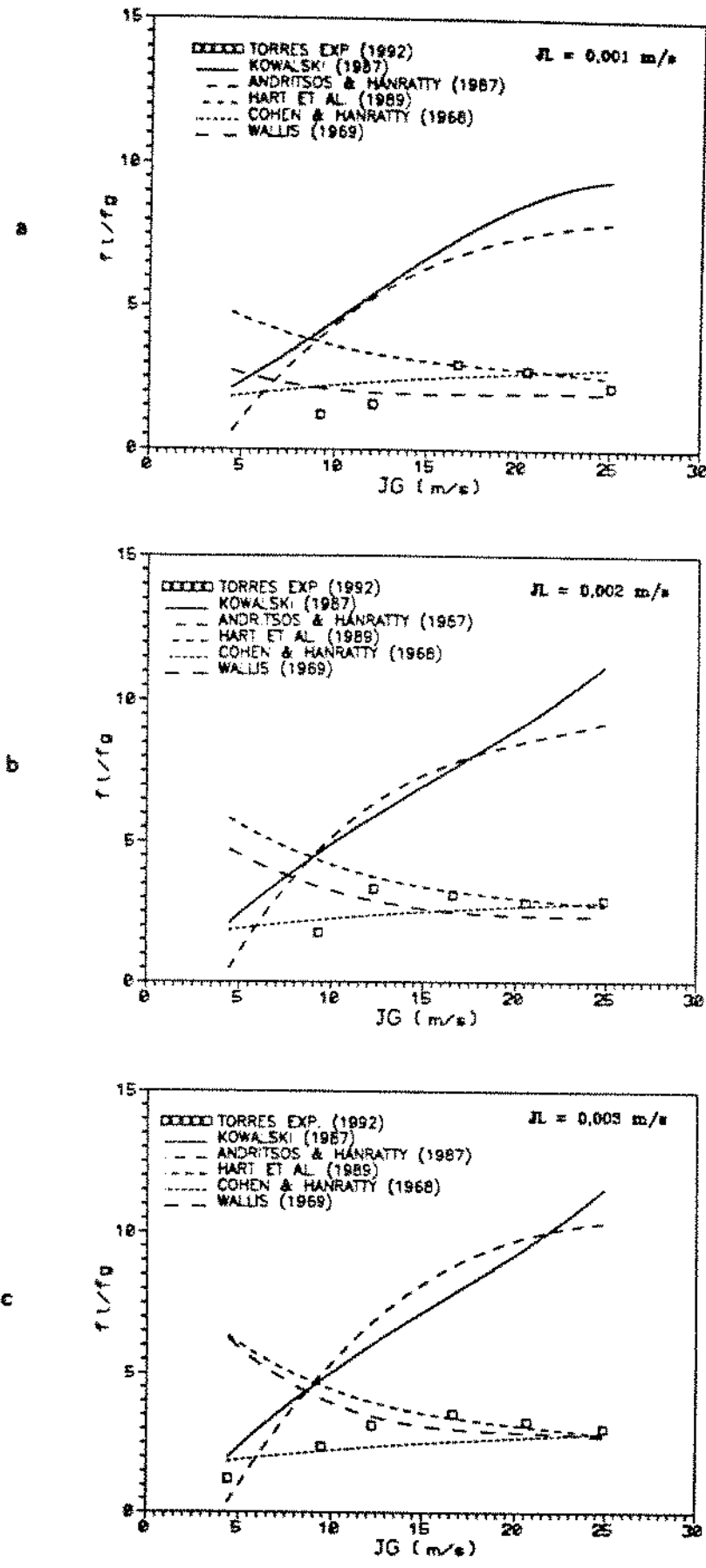
Figura (7.21) - Relação entre a tensão de cisalhamento na interface e a tensão de cisalhamento no líquido, junto a parede.

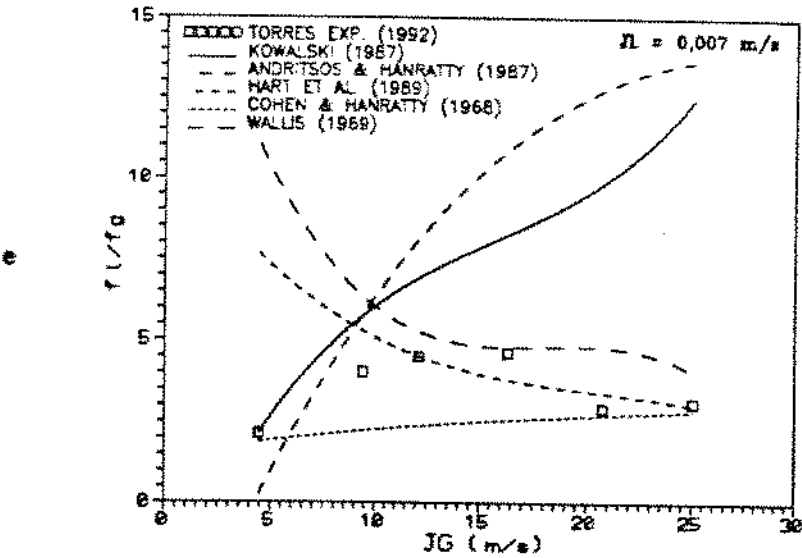
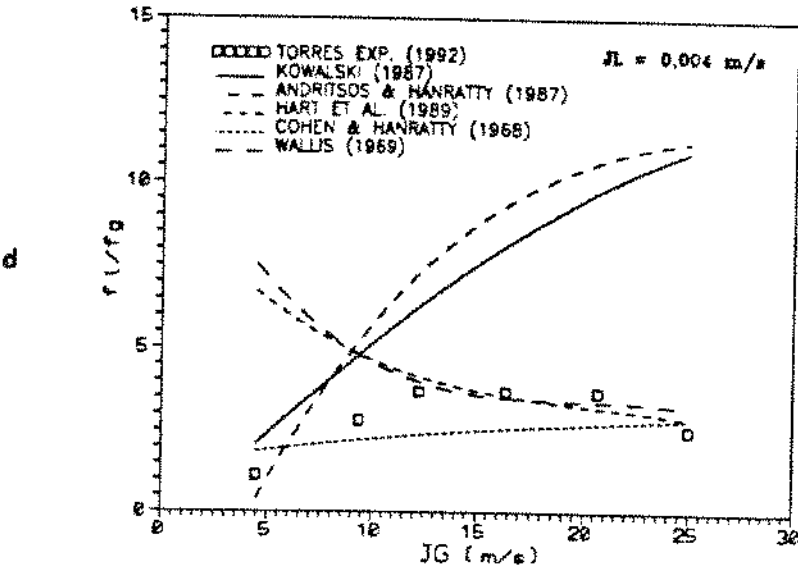
7.13 - FATOR DE ATRITO INTERFACIAL

Para a comparação dos valores experimentais do fator de atrito interfacial com as correlações da literatura, optou-se por apresentar os resultados através da razão f_i/f_g , conforme mostrado na figura (7.22). Os valores experimentais foram determinados pelas equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4); Kowalski (1987) pelas equações (2.34), (2.37), (2.38) e (3.4); Andritsos & Hanratty (1987) pelas equações (2.42) e (2.43); Hart et al. (1989) pelas equações (2.54), (2.56) e (3.4); Cohen & Hanratty pelas equações (2.28) e (3.4); Wallis pelas equações (2.10) e (3.4).

Figura (7.22) - Relação f_i/f_g em função da velocidade superficial do gás (páginas 83 e 84):

- (a) $J_1 = 0,01$ m/s
- (b) $J_1 = 0,02$ m/s
- (c) $J_1 = 0,03$ m/s
- (d) $J_1 = 0,04$ m/s
- (e) $J_1 = 0,07$ m/s





Examinando-se as várias curvas, nota-se uma tendência sempre crescente nas correlações de Kowalski (1987), Andritsos & Hanratty (1987) e Cohen & Hanratty (1968). E sempre decrescente nas correlações de Hart et al. (1989) e Wallis (1969). Já os valores experimentais de f_i/f_g , inicialmente crescem com J_g , atingem um máximo, decrescendo a partir de então.

O progressivo afastamento das correlações de Kowalski (1987) e Andritsos & Hanratty (1987) em relação aos pontos experimentais, para valores elevados de J_g , pode ser atribuído ao fato de que a hipótese de interface plana não se verifica nesta faixa de velocidades. Isto não significa, em princípio, que os valores de perda de carga calculados através dos modelos propostos por estes autores sejam incorretos, já que os valores superestimados de f_i são acompanhados por valores subestimados de S_i . Entretanto, desvios podem ser esperados, quando correlações que assumem interface plana são usadas para grandes velocidades superficiais do gás, fora das condições em que foram desenvolvidas.

O valor constante de 0,0142 para f_i , proposto por Cohen e Hanratty (1968) para canais retangulares, e, posteriormente adotado por Shoham e Taitel (1984) para tubos circulares, acompanha aproximadamente os dados experimentais ao longo de toda a faixa. Este fato sugere a semelhança entre os dois fenômenos, no que diz respeito à tensão de cisalhamento na interface.

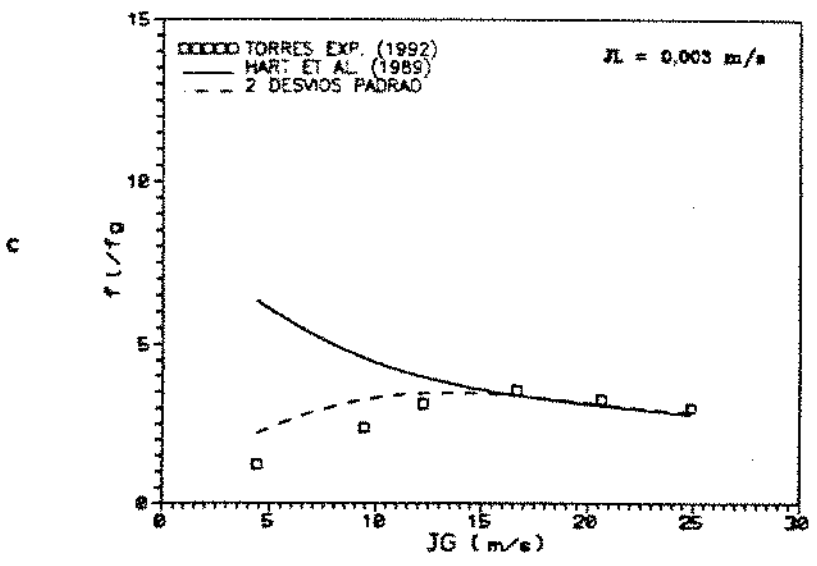
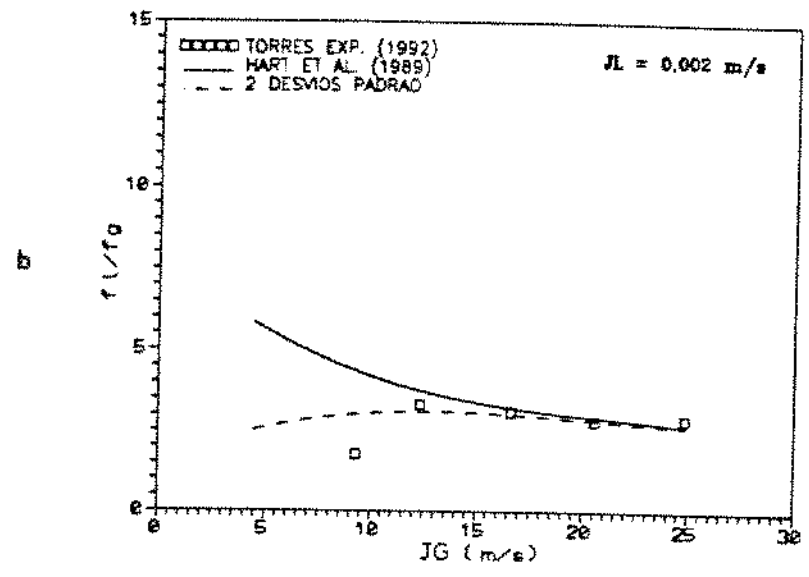
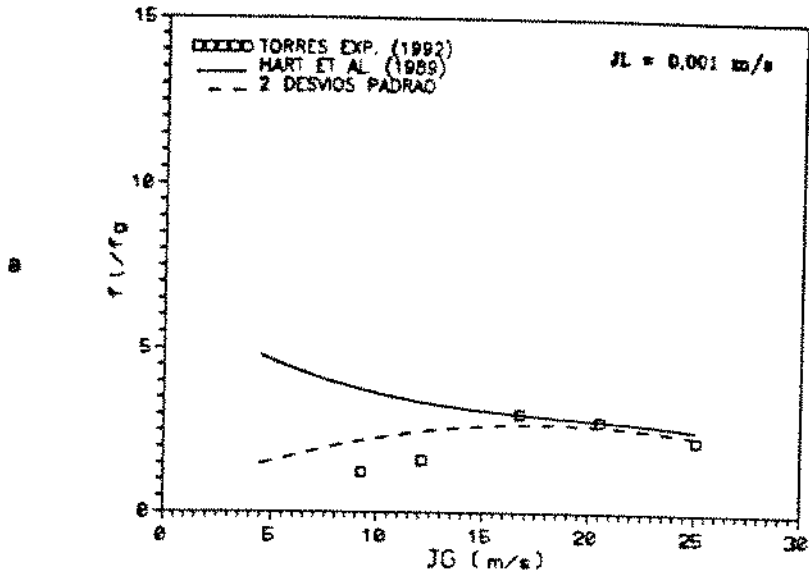
Para baixas velocidades superficiais do gás as correlações de Wallis (1969) e Hart et al. (1989) se afastam dos valores experimentais. Este afastamento já era esperado,

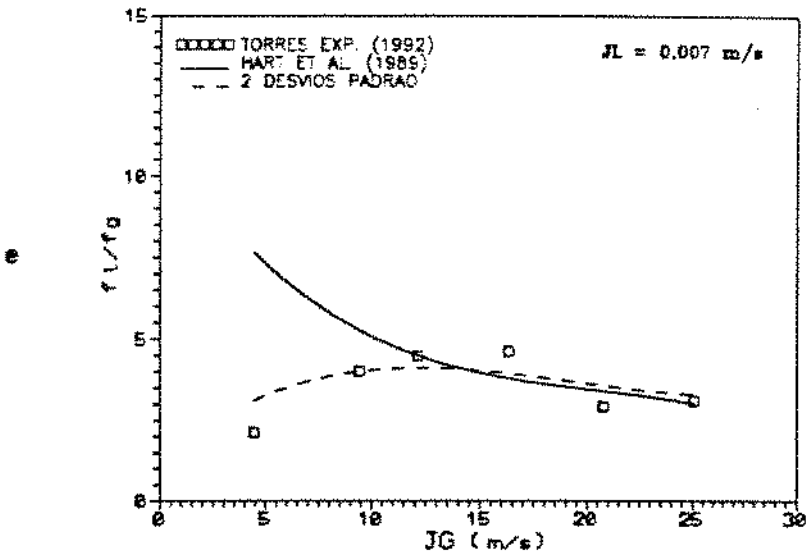
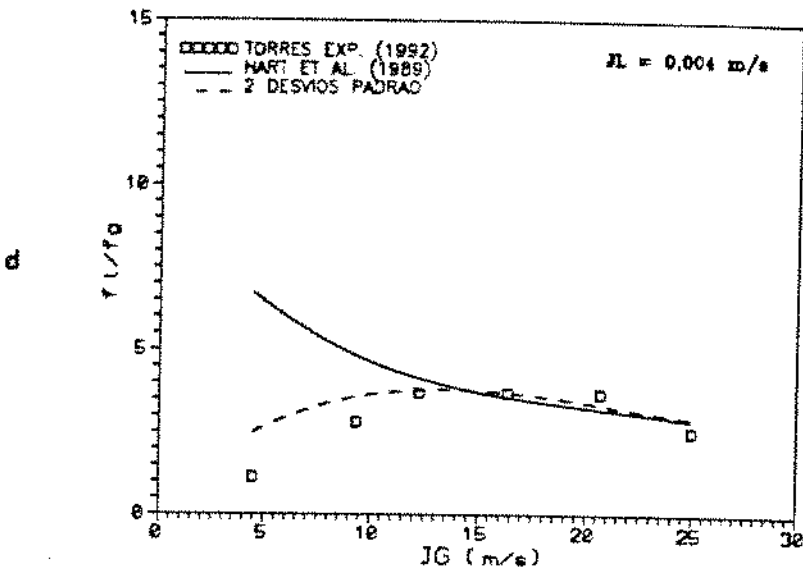
pois nesta faixa de velocidades a rugosidade do filme não pode ser assumida como uma função linear da espessura de filme (ver figura 7.15), premissa usada nestas correlações. Entretanto, na medida em que J_g aumenta, observa-se uma aproximação entre os valores medidos e os valores previstos por estas correlações, especialmente a correlação de Hart et al. (1989), cuja aderência aos dados experimentais é excelente para $J_g > 15$ m/s, em toda a faixa de J_l testada.

O bom desempenho dos modelos baseados em rugosidade aparente (Wallis, 1969; Hart et al., 1989), para grandes velocidades do gás sugere a necessidade de modelar o comportamento das ondas, caracterizado pelo desvio padrão da espessura de filme, também para baixas velocidades do gás. Um resultado muito interessante é obtido substituindo-se, na correlação de Hart et al. (1989) (equação 2.54), a rugosidade aparente de 2,36, por dois desvios padrão medidos experimentalmente (figura 7.15). Estes resultados são apresentados na figura (7.23). Fica evidente a conveniência e a necessidade de modelar o comportamento das ondas para toda a faixa de velocidades do gás.

Figura (7.23) - Relação f_i/f_g em função da velocidade superficial do gás, usando o desvio padrão medido experimentalmente (páginas 87 e 88):

- (a) $J_l = 0,01$ m/s
- (b) $J_l = 0,02$ m/s
- (c) $J_l = 0,03$ m/s
- (d) $J_l = 0,04$ m/s
- (e) $J_l = 0,07$ m/s





É conveniente salientar que a escolha de uma determinada correlação para o cálculo do fator de atrito interfacial está intimamente ligada a geometria considerada para a interface. Ou seja, o sucesso dos modelos analíticos de fases separadas baseados em balanços de forças depende da compatibilidade entre os valores de f_i e Si . Por exemplo, os modelos de Kowalski (1987) e Andritsos & Hanratty (1987) utilizam valores artificialmente elevados para o fator de atrito interfacial, para compensar os valores artificialmente baixos de Si , decorrentes da adoção de interface plana quando esta se apresenta curvada. Já os fatores de atrito das correlações de Hart et al. (1989), Cohen & Hanratty (1968) e Wallis (1969), não estão majorados, pois no seu desenvolvimento não estão presentes distorções provenientes da adoção de valores irreais para Si .

Um benefício adicional em adotar modelos que usam valores de f_i , τ_i e Si próximos da realidade física é a possibilidade de aplicar analogias entre transferência de quantidade de movimento e transferência de calor.

CAPÍTULO - 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 - CONCLUSÕES

Três padrões de onda foram identificados:

(a) Ondas bidimensionais, cujo perfil se estende por toda a largura do canal. Neste padrão a interface se apresenta relativamente plana, o desvio padrão da espessura de filme, e o fator de atrito interfacial aumentam com J_g . Foi observado para velocidades superficiais do gás de até aproximadamente 10 m/s.

(b) Ondas tridimensionais, em presença de velocidades superficiais do gás maiores que 15 m/s. Neste padrão, a interface se exhibe bastante curvada (podendo ocorrer o fechamento do anel de líquido), o desvio padrão da espessura de filme, bem como o fator de atrito interfacial, decrescem com o aumento de J_g , e dependem quase que exclusivamente da espessura média do filme. É o padrão denominado escoamento anular rugoso ("rough annular flow" - Wallis, 1969).

(c) Transição, onde ocorrem ondas tridimensionais sobrepostas a ondas bidimensionais. Este padrão foi observado para velocidades superficiais do gás entre 10 e 15 m/s. Corresponde a uma situação intermediária entre os padrões anteriores.

A velocidade das ondas superficiais é fortemente influenciada por J_g e fracamente influenciada por J_L .

A velocidade das ondas, para praticamente todas as situações testadas, está compreendida entre uma e duas vezes a velocidade média do líquido. Os casos em que isto não se verifica apresentam medição de velocidade de onda suspeita (tempo insuficiente de amostragem: pontos 1, 2 e 7).

Para velocidades superficiais do gás maiores que 15 m/s o desvio padrão da espessura de filme pode ser aproximado por uma função linear da espessura de filme, não dependendo significativamente de J_g ou J_L .

Os resultados experimentais obtidos para a fração de vazio (α), a partir de medições de espessura de filme, concordam razoavelmente com a correlação de Hart et al. (1989) e com as medidas de Rodrigues (1991), efetuadas em condições semelhantes.

A resolução de $\pm 15^\circ$ na determinação do perímetro molhado pelo líquido não se mostrou suficiente para confirmar ou questionar a validade da correlação de Hart et al. (1989).

O filme líquido apresentou um perfil de tensões cisalhantes aproximadamente uniforme para todas as situações testadas.

Os fatores de atrito interfaciais calculados pelas correlações de Kowalski (1987) e Andritsos & Hanratty (1987) são artificialmente elevados, para compensar o valor subestimado do perímetro da interface, decorrente da consideração de interface plana numa faixa de velocidades do gás onde esta já se apresenta curvada.

Os fatores de atrito interfaciais calculados pelas correlações de Hart et al. (1989), Cohen & Hanratty (1968) e Wallis (1969) não estão majorados, pois no seu desenvolvimento consideraram perímetros interfaciais próximos da realidade física dos experimentos.

Para baixas velocidades superficiais do gás o fator de atrito interfacial constante de 0,0142 sugerido por Cohen & Hanratty (1968) é o que mais se aproxima dos valores experimentais, embora tenha sido desenvolvido a partir de experimentos realizados em canais retangulares horizontais.

Para altas velocidades superficiais do gás as correlações de Wallis (1969) e Hart et al. (1989) são as que melhor representam o fator de atrito interfacial, principalmente esta última, cuja aderência aos dados experimentais a partir de 15 m/s é excelente.

Os resultados obtidos adotando-se, na equação (2.54), uma rugosidade aparente igual a duas vezes o desvio padrão da espessura de filme (geratriz inferior do tubo) foram muito animadores, acompanhando aproximadamente as medidas experimentais de f_i para todas as situações experimentadas.

8.2 - RECOMENDAÇÕES

Estender a aplicabilidade dos modelos baseados em rugosidade aparente, através da modelagem do desvio padrão da espessura de filme para baixas e moderadas velocidades superficiais do gás, já que para $J_g > 15$ m/s a rugosidade equivalente de $2,3 \delta$, sugerida por Hart et al.(1989), parece bastante adequada.

Realizar experimentos semelhantes em outras geometrias, como canais retangulares, dutos inclinados e dutos verticais.

Realizar experimentos que permitam a determinação de tensões e fatores de atrito interfaciais locais usando, por exemplo, as técnicas anemométricas de fio quente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andreussi, P. & Persen, L. N., "Stratified Gas-Liquid Flow in Downwardly Inclined Pipes", International Journal of Multiphase Flow, vol. 13, n. 4, 565-575, 1987.

Andritsos, N. & Hanratty, T. J., "Influence of Interfacial Waves in Stratified Gas-Liquid Flows", AIChE Journal, vol. 33, n. 3, 444-454, 1987.

Bendat, J. S. & Piersol, A. G., "Random Data: Analysis and Measurement Procedures", Wiley-Interscience, New York, 1971.

Biage, M., "Structure de la Surface Libre d'un Film Liquide Ruisselant sur une Plaque Plane Verticale et Soumis a un Contre-Courant de Gas: Transition vers l'Ecoulement Cocourant Ascendant", Tese de Doutorado, L'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1989.

Brophy, J. J., "Eletrônica Básica", Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1972.

Brown, R. C. et al., "The Use of Wire Probes for the Measurement of Liquid Film Thickness in Annular Gas-Liquid Flows", The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 56, 754-757, 1978.

Bruno, K. & McCready, M. J., "Processes which Control the Interfacial Wave Spectrum in Separated Gas-Liquid Flows", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 4,

531-552, 1989.

Chan, W. K. & Liu, C. Y., "Boundary Effects on Twin-Wire Depth Probes", Experiments in Fluids, vol. 7, 494-496, 1989.

Cheremisinoff, N. P. & Davis, E. J., "Stratified Turbulent-Turbulent Gas-Liquid Flow", AIChE Journal, vol. 25, n. 1, 48-56, 1979.

Fukano, T. et al., "Liquid Films Flowing Cocurrently with Air in Horizontal Duct - Characteristics of Two-Dimensional Wave and Disturbance Wave Regions", Bulletin of the JSME, vol. 24, n. 191, 781-789, 1981.

Fukano, T. et al., "Liquid Films Flowing Cocurrently with Air in Horizontal Duct - Interfacial Shear Stress", Bulletin of the JSME, vol. 28, n. 244, 2294-2301, 1985.

Fukano, T. & Ousaka, A., "Prediction of the Circunferential Distribution of Film Thickness in Horizontal and Near-Horizontal Gas-Liquid Annular Flows", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 3, 403-419, 1989.

Govan, A. H. et al., "Wall Shear Stress Measurements in Vertical Air-Water Annular Two-Phase Flow", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 3, 307-325, 1989.

Hagiwara, Y et al., "Simultaneous Measurement of Liquid Film Thickness, Wall Shear Stress and Gas Flow Turbulence of Horizontal Wavy Two-Phase Flow", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 3, 421-431, 1989.

Hart, J. et al., "Correlations Predicting Frictional Pressure Drop and Liquid Holdup During Horizontal Gas-Liquid

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pipe Flow with a Small Liquid Holdup", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 6, 947-964, 1989.
- Hewitt, G. F., "Measurement of Two Phase Flow Parameters", Academic Press, London, 1978.
- Hewitt, G. F. et al., "Structure of Thin Liquid Films in Gas-Liquid Horizontal Flow", International Journal of Multiphase Flow, vol. 16, n.6, 951-957, 1990.
- Hori, K. et al., "On Ripple of Annular Two-Phase Flow - Effect of Liquid Viscosity on Characteristics of Wave and Interfacial Friction Factor", Bulletin of the JSME, vol. 22, n. 169, 952-959, 1979.
- Jayanti, S. et al., "Time-Dependent Behaviour of the Liquid Film in Horizontal Annular Flow", International Journal of Multiphase Flow, vol. 16, n. 6, 1097-1116, 1990.
- Jurman, L. A. et al., "Periodic and Solitary Waves on Thin, Horizontal, Gas-Sheared Liquid Films", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n.3, 371-384, 1989.
- Jurman, L. A. et al., "Interfacial Mode Interactions in Horizontal Gas-Liquid Flows", Journal of Fluid Mechanics, vol. 238, 187-219, 1992.
- Karapantsios, T. D. et al., "Statistical Characteristics of Free Falling Films at High Reynolds Numbers", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 1, 1-21, 1989.
- Koskie, J. E. et al., "Parallel-Wire Probes for Measurement of Thick Liquid Films", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 4, 521-530, 1989.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kowalski, J. E., "Wall and Interfacial Shear Stress in Stratified Flow in a Horizontal Pipe", *AIChE Journal*, vol. 33, n. 2, 274-281, 1987.
- Lin, T. F. et al., "Film Thickness Measurements and Modelling in Horizontal Annular Flows", *Physico Chemical Hydrodynamics*, vol. 6, n. 1/2, 197-206, 1984.
- Mao, Z. & Dukler, A. E., "An Experimental Study of Gas-Liquid Slug Flow", *Experiments in Fluids*, vol. 8, 169-182, 1989.
- Pertence, A., "Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos", McGraw-Hill, São Paulo, 1990.
- Plimon, A., "Velocity Profiles in Shear Force Driven Wall Films", *Experiments in Fluids*, vol. 11, 339-340, 1991.
- Rodrigues Jr, G., "Fração de Vazio e Gradiente de Pressão nos Escoamentos Estratificados e Anulares Horizontais", Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1991.
- Sekoguchi, K. et al., "On Ripple of Annular Two-Phase Flow - Statistical Characteristics of Ripples", *Bulletin of the JSME*, vol. 20, n. 145, 844-851, 1977.
- Smith, T. N. & Tait, W. F., "Interfacial Waves in Horizontal Gas-Liquid Flow", *Aust. J. Appl. Sci.*, vol. 15, 247-260, 1964.
- Smith, T. N. & Tait, R. W. F., "Interfacial Shear Stress and Momentum Transfer in Horizontal Gas-Liquid Flow", *Chemical Engineering Science*, vol. 21, 63-75, 1966.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Streeter, V. L. & Wylie, E. B., "Mecanica dos Fluidos", McGraw-Hill, São Paulo, 1982.

Tobey, G. E. et al., "Operational Amplifiers - Design and Applications", McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1989.

Tso, C. P. & Sugawara, S., "Film Thickness Prediction in a Horizontal Annular Two-Phase Flow", International Journal of Multiphase Flow, vol. 16, n. 5, 867-884, 1990.

Zabaras, G. et al., "Vertical Upward Cocurrent Gas-Liquid Annular Flow", AIChE Journal, vol. 32, n. 5, 829-843, 1986.

Wallis, G. B., "One Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill Book Company, New York, 1969.

Wasden, F. K. & Dukler, A. E., "Insights into the Hydrodynamics of Free Falling Wavy Films", AIChE Journal, vol. 35, n. 2, 187-195, 1989.

Wasden, F. K. & Dukler, A. E., "Numerical Investigation of Large Wave Interactions on Free Falling Films", International Journal of Multiphase Flow, vol. 15, n. 3, 357-370, 1989.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

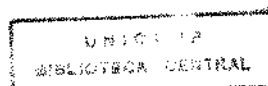
Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia de Campinas
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Titulo de Mestre em Engenharia de Petróleo

CARACTERIZAÇÃO DA INTERFACE E
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO FATOR DE ATRITO INTERFACIAL
EM ESCOAMENTOS HORIZONTAIS ESTRATIFICADOS
VOLUME - II
APÊNDICES

58/92

AUTOR: FLÁVIO RAMOS TORRES
ORIENTADOR: EUGENIO SPANÓ ROSA
CO-ORIENTADOR: FERNANDO DE ALMEIDA FRANÇA

DEZEMBRO, 1992



UNIDADE	70C
N.º CHAMADA:	
T/UNICAMP	
V. 02 E	T686c
T. 01/28576	
P. 01/96	
C ☐ D ☒	
P. 01/96 11,00	
DATA 13/09/96	
N.º CPD	

CM000918340

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

T686c

Torres, Flávio Ramos

Caracterização da interface e determinação experimental do fator de atrito interfacial em escoamentos horizontais estratificados / Flávio Ramos Torres. -- Campinas, SP: [s.n.], 1992.

Orientadores: Eugênio Spanó Rosa, Fernando de Almeida França.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Escoamento multifásico. 2. Escoamento bifásico. 3. Dinâmica dos fluidos. I Rosa, Eugênio Spanó. II. França, Fernando de Almeida. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

APÊNDICES

APÊNDICE - I

MEDIÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA

APÊNDICE - I

MEDIÇÃO DE VAZÃO DE ÁGUA

Para a medição de vazão de água foram usadas duas placas de orifício com diâmetros de 1/4" e 1/8", instaladas em tubulação de 1/2", e um manômetro diferencial do tipo tubo em "U". Como fluido manométrico foi escolhido o tetracloreto de carbono com massa específica de 1584 Kg/m³ a 25 °C. As placas foram aferidas por comparação com a vazão determinada com o auxílio de uma balança de contrapeso e um cronômetro. Os resultados obtidos estão resumidos nas tabelas (I.1) e (I.2). A seguinte equação foi escolhida para ajustar os dados experimentais:

$$W_l = C (h)^{1/2} \quad (I.1)$$

onde W_l é a vazão mássica de água (Kg/m³), C a constante de proporcionalidade (Kg/s)/(cm)^{1/2} e h o desnível no manômetro de tetracloreto (cm). Para a constante C , foi adotada a média dos valores calculados para os pontos de aferição, conforme indicado nas tabelas (I.1) e (I.2). Portanto, para a placa de 1/8", temos:

$$W_l = 0,007472 (h)^{1/2} \quad (I.2)$$

E para a placa de 1/4", temos:

$$W_l = 0,019145 (h)^{1/2} \quad (I.3)$$

As figuras (I.1) e (I.2) mostram a comparação entre as vazões calculadas pelas equações acima e as vazões medidas com balança e cronômetro.

ANÁLISE DE ERRO

A seguir será feita uma estimativa aproximada da incerteza na determinação da vazão de água através das placas de orifício.

Da equação (I.1) pode-se dizer que:

$$|\Delta W_l / W_l| = |\Delta C / C| + (1/2) |\Delta h / h| \quad (I.4)$$

Analisando as tabelas ou os gráficos de aferição, pode-se notar que todos os desvios se situam entre $\pm 1.5 \%$. Este valor será adotado para incerteza na determinação de C . A incerteza na leitura de h é de $\pm 2 \text{ mm}$, o que corresponde a uma incerteza de $\pm 1.0 \%$ para as vazões mais baixas. Portanto:

$$(\Delta C / C) = 0,015$$

$$(\Delta h / h) = 0,010$$

$$(\Delta W_l / W_l) = 0,015 + (1/2) 0,010 = 0,020$$

Ou seja, a incerteza na determinação da vazão de água através das placas de orifício é de aproximadamente $\pm 2,0 \%$.

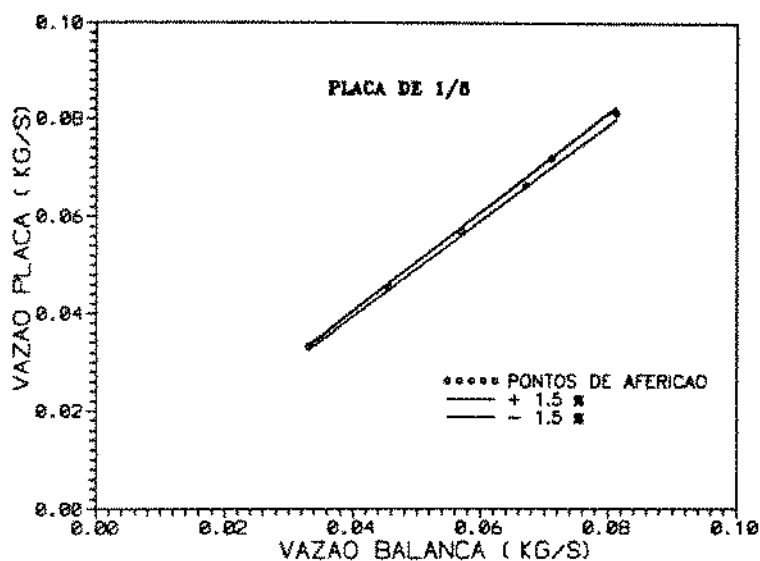


Figura (I.1) - Comparação entre a vazão calculada pela placa de 1/8" e aquela calculada através de balança e cronômetro.

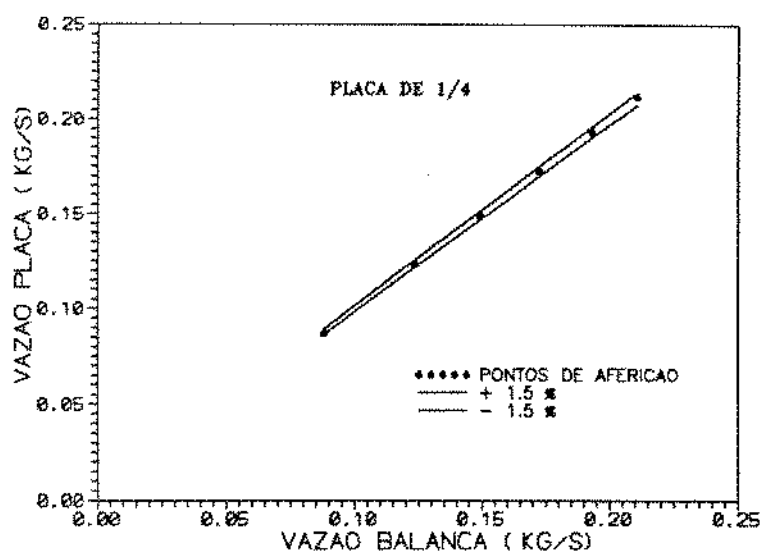


Figura (I.2) - Comparação entre a vazão calculada pela placa de 1/4" e aquela calculada através de balança e cronômetro.

TABELA (I.1)

MEDICAO DE VAZAO DE AGUA
TUBO DE 1/2"
PLACA DE 1/8"

PONTO	VAZAO BALANCA KG/S	C PLACA KG/S	VAZAO PLACA KG/S	DESVIO %
1	.033113	.007441	.033248	.41
2	.045558	.007510	.045327	-.51
3	.056980	.007469	.057002	.04
4	.067114	.007551	.066412	-1.05
5	.071174	.007388	.071979	1.13
6	.081301	.007472	.081303	.00
	MEDIA	.007472		

TABELA (I.2)

MEDICAO DE VAZAO DE AGUA
TUBO DE 1/2"
PLACA DE 1/4"

PONTO	VAZAO BALANCA KG/S	C	VAZAO PLACA KG/S	DESVIO %
1	.088300	.019361	.087316	-1.11
2	.123839	.019200	.123484	-.29
3	.149254	.019110	.149530	.18
4	.172414	.019087	.172945	.31
5	.193050	.019068	.193832	.40
6	.210970	.019046	.212073	.52
	MEDIA	.019145		

APÊNDICE - II

MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR

APÊNDICE - II

MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR

Na medição da vazão de ar foram usadas duas placas de orifício, com diâmetros de 1/2" e 3/4", instaladas em tubulação de 1". A pressão diferencial e a pressão a montante da placa foram medidas com manômetros de coluna de água. A temperatura de escoamento foi medida com um termômetro de mercúrio e a pressão atmosférica com um barômetro digital. A equação escolhida para medição com as placas de orifício foi (Streeter & Wylie 1980):

$$W_{\text{placa}} = (C Y A_0) (2 \rho_g \Delta P)^{1/2} \quad (\text{II.1})$$

onde W_{placa} é a vazão mássica de ar na placa (Kg/s), C o coeficiente de descarga (-), Y o fator de expansão (-), A_0 a área do orifício (m^2), ρ_g a massa específica do ar a montante (Kg/m^3) e ΔP a pressão diferencial (N/m^2). A massa específica do ar foi assumida como:

$$\rho_g = (1/287,05) P/(ZT) \quad (\text{II.2})$$

onde P é a pressão (N/m^2), Z o fator de compressibilidade (-) e T a temperatura (K). O fator de compressibilidade Z , foi considerado unitário, tendo em vista as baixas pressões envolvidas. Não foram consideradas correções na massa específica do ar causadas pela presença de umidade no mesmo.

Como referência para a aferição das placas de orifício foi usado um laminador de fluxo ("laminar flow element"), marca MERIAN INSTRUMENT, modelo 50MW20-2, cuja curva de aferição é fornecida pelo fabricante. A pressão a montante e a pressão diferencial do laminador de fluxo foram medidas com manômetros de coluna de água. Para a temperatura de escoamento foi considerado o mesmo valor medido para a placa de orifício. A seguinte equação, sugerida pelo fabricante, foi usada na medição de vazão com o laminador de fluxo:

$$W_{glf} = \frac{QLF}{1766 \text{ scfm/(Kg/s)}} \frac{PMLF}{101320} \frac{294,44}{TMLF} \frac{1,8187 \times 10^{-5}}{\mu_g}$$

(II.3)

onde W_{glf} é a vazão mássica de ar medida com o laminador (Kg/s), QLF a vazão lida na curva de aferição do fabricante em função da pressão diferencial no laminador de fluxo (scfm), $PMLF$ a pressão a montante do laminador (N/m^2), $TMLF$ a temperatura a montante do laminador (K) e μ_g a viscosidade dinâmica do ar ($N \cdot s/m^2$). Esta última, foi determinada pela equação:

$$\mu_g = 4,6120 \times 10^{-8} (TMLF - 294,44) + 1,8187 \times 10^{-5} \quad (II.4)$$

A aferição das placas de orifício consistiu na determinação de valores adequados para o grupo (CY) da equação (II.1). Para isso, a seguinte equação de aferição foi usada:

$$(CY) = (W_{glf}/A_o) (2 \rho_g \Delta P)^{-1/2} \quad (II.5)$$

Os valores experimentais de (CY) assim obtidos foram correlacionados com ($\Delta P/P$), como pode ser visto nas figuras (II.1) e (II.2). Por regressão linear foram então determinadas as equações:

PLACA DE 1/2"

$$(CY) = -0,3673 (\Delta P/P) + 0,7297 \quad (II.6)$$

PLACA DE 3/4"

$$(CY) = -1,0644 (\Delta P/P) + 0,8987 \quad (II.7)$$

O resultado final deste procedimento de medição e aferição pode ser apreciado nas tabelas (II.1) e (II.2). As figuras (II.3) e (II.4) comparam as medições feitas com as placas de orifício com aquelas feitas usando o laminador de fluxo.

ANÁLISE DE ERRO

A seguir será feita uma estimativa aproximada da incerteza na determinação da vazão de ar.

Da equação de medição (II.1), pode-se escrever:

$$\left| \frac{\Delta W_g}{W_g} \right| = \left[\left(\frac{\Delta CY}{CY} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_g}{2\rho_g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta (\Delta P)}{2(\Delta P)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (II.8)$$

E da equação de aferição (II.5):

$$\left| \frac{\Delta CY}{CY} \right| = \left[\left(\frac{\Delta W_g}{W_g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_g}{2\rho_g} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta P)}{2(\Delta P)} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(II.9)

Considerando-se uma incerteza de $\pm 2,0 \%$ na determinação da vazão mássica com o laminador de fluxo, $\pm 2,0 \%$ no cálculo da massa específica do ar a montante da placa, $\pm 2,0 \%$ na leitura da pressão diferencial, nas vazões mais baixas (pior caso), encontra-se:

$$\left| \frac{\Delta CY}{CY} \right| = [(0,020)^2 + (0,020/2)^2 + (0,020/2)^2]^{1/2} = 0,024$$

Ou seja, a incerteza na definição do gupo (CY) é de $\pm 2,4 \%$. Substituindo estes valores na equação (II.8), chega-se finalmente a:

$$\left| \frac{\Delta W_g}{W_g} \right| = [(0,024)^2 + (0,020/2)^2 + (0,020/2)^2]^{1/2} = 0,028$$

Consequentemente, as medições de vazão de ar foram calculadas com uma incerteza estimada em $\pm 2,80 \%$.

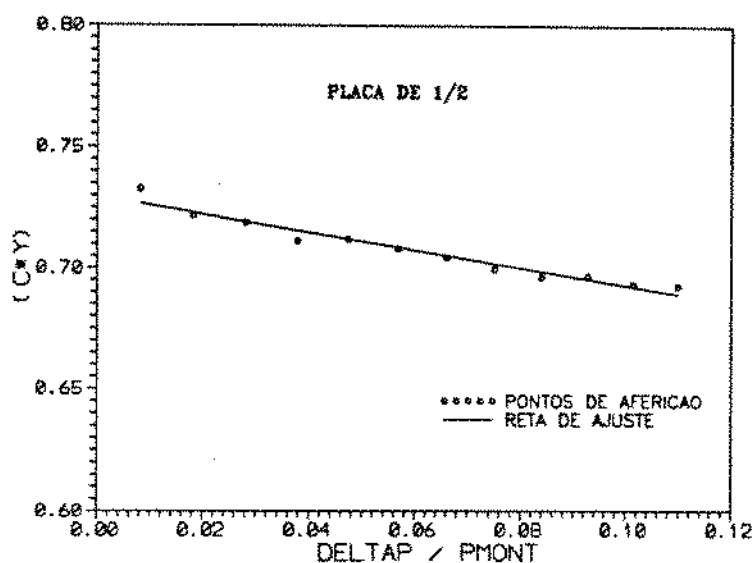


Figura (II.1) - Ajuste de (CY) para a placa de 1/2".

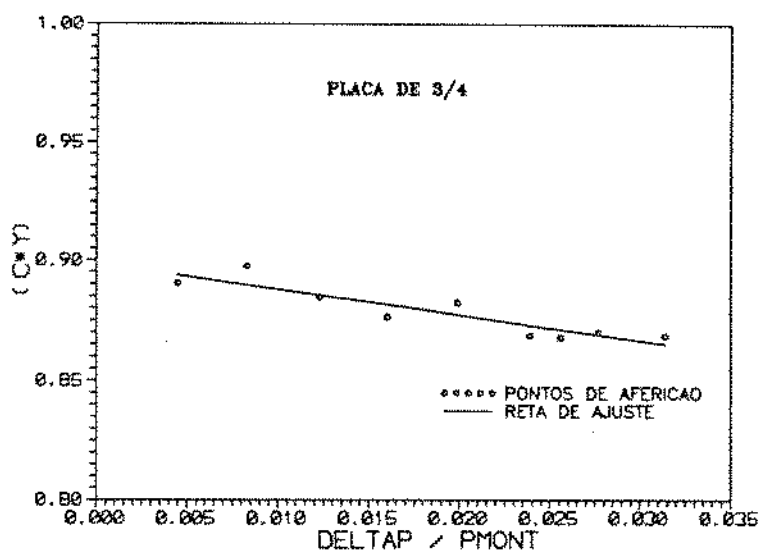


Figura (II.2) - Ajuste de (CY) para a placa de 3/4".

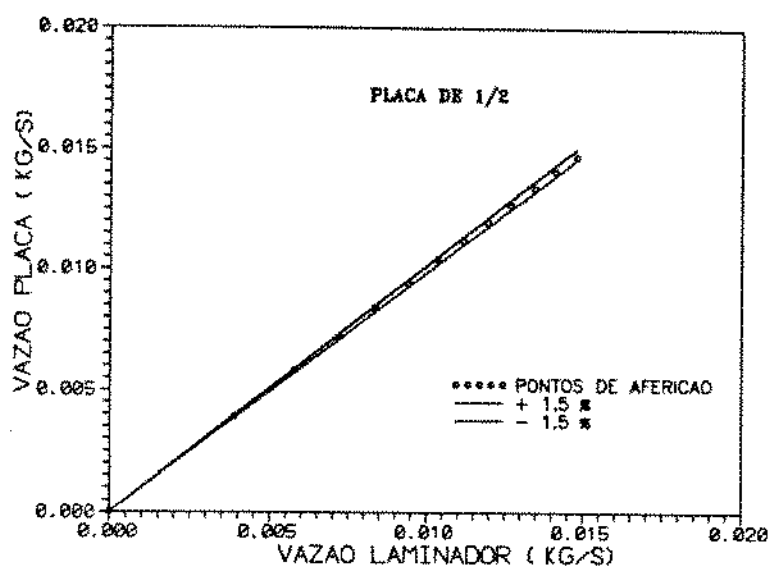


Figura (II.3) - Comparação entre as medidas obtidas com a placa de 1/2" e aquelas tomadas com o laminador de fluxo.

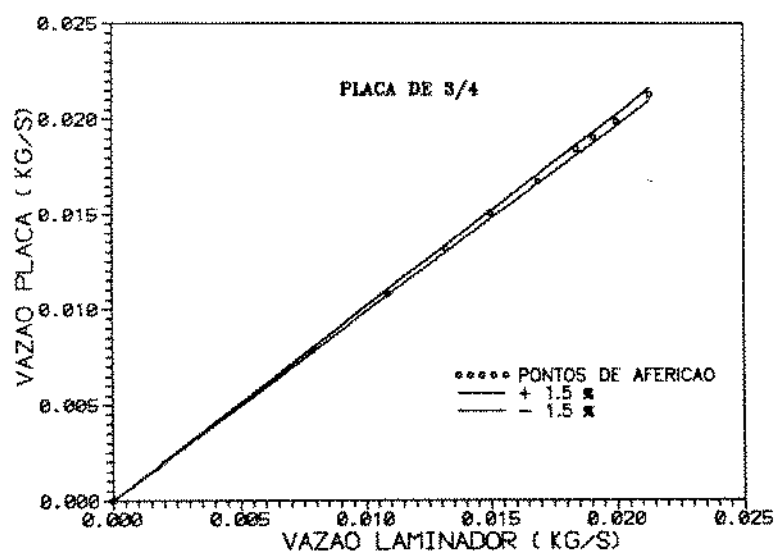


Figura (II.4) - Comparação entre as medidas obtidas com a placa de 3/4" e aquelas tomadas com o laminador de fluxo.

TABELA (II.2)

MEDICAO DA VAZAO DE AR
AFERICAÇÃO DE PLACA DE ORIFICIO COM LAMINADOR DE FLUXO

DATA	29.04.92
DIAMETRO DA TUBULACAO (POL)	1
DIAMETRO DO ORIFICIO (POL)	.75
BETA	.75
AREA DA TUBULACAO (M2)	.0005067
AREA DO ORIFICIO (M2)	.0002850
PRESSAO ATMOSFERICA (mbar)	947
PRESSAO ATMOSFERICA (N/M2)	94700
PRESSAO ATMOSFERICA (POL HG)	27.97

PONTO	(C*Y) MEDIDO (NOTA 1)	(C*Y) ESTIMADO (NOTA 2)	VAZAO LAMINADOR KG/S	VAZAO PLACA KG/S	DESVIO
1	.8904	.8939	.0079	.0079	.39
2	.8976	.8898	.0109	.0108	-.86
3	.8847	.8856	.0132	.0132	.10
4	.8766	.8816	.0150	.0151	.57
5	.8824	.8775	.0169	.0168	-.56
6	.8688	.8732	.0184	.0185	.50
7	.8680	.8714	.0191	.0191	.39
8	.8702	.8692	.0200	.0199	-.11
9	.8687	.8652	.0213	.0213	-.40

NOTAS:

(1) CALCULADO COM BASE NO LAMINADOR DE FLUXO

(2) ESTIMADO POR REGRESSAO LINEAR

TABELA (II.1)

MEDICAO DA VAZAO DE AR
AFERICAÇÃO DE PLACA DE ORIFICIO COM LAMINADOR DE FLUXO

DATA	29.04.92
DIAMETRO DA TUBULACAO (POL)	1
DIAMETRO DO ORIFICIO (POL)	.5
BETA	.5
AREA DA TUBULACAO (M2)	.0005067
AREA DO ORIFICIO (M2)	.0001267
PRESSAO ATMOSFERICA (mbar)	945
PRESSAO ATMOSFERICA (N/M2)	94500
PRESSAO ATMOSFERICA (POL HG)	27.91

PONTO	(C*Y) MEDIDO (NOTA 1)	(C*Y) ESTIMADO (NOTA 2)	VAZAO LAMINADOR KG/S	VAZAO PLACA KG/S	DESVIO %
1	.7327	.7267	.0039	.0039	-.82
2	.7219	.7230	.0058	.0058	.15
3	.7190	.7193	.0072	.0072	.04
4	.7115	.7158	.0083	.0084	.60
5	.7122	.7123	.0094	.0094	.01
6	.7083	.7088	.0103	.0104	.07
7	.7045	.7054	.0112	.0112	.13
8	.6998	.7021	.0120	.0120	.33
9	.6965	.6988	.0127	.0127	.33
10	.6969	.6956	.0135	.0134	-.19
11	.6934	.6924	.0141	.0141	-.14
12	.6927	.6893	.0148	.0147	-.50

NOTAS:

(1) CALCULADO COM BASE NO LAMINADOR DE FLUXO

(2) ESTIMADO POR REGRESSAO LINEAR

APÊNDICE - III

MEDIÇÃO DO GRADIENTE DE PRESSÃO

APÊNDICE - III

MEDIÇÃO DO GRADIENTE DE PRESSÃO

Na medição do gradiente de pressão foram usados dois sensores de pressão diferencial, do tipo relutância variável, da marca VALIDYNE, selecionados de acordo com a queda de pressão esperada. Os diafragmas escolhidos foram os de numero #22 (mais sensível) e #26. As tomadas de pressão, situadas na geratriz inferior do tubo, distam 3,14 m entre si. Os sinais provenientes dos medidores de pressão diferencial eram enviados a um condicionador de sinal, também da marca VALIDYNE, que fornecia uma saída proporcional de zero a cinco Volts.

Estes medidores foram aferidos por comparação com um manômetro inclinado de coluna de água. Como resultado da aferição foram obtidos:

DIAFRAGMA #22

Constante de proporcionalidade: 77,17 (Pa/m)/V

Fundo de escala (5 V): 385,85 Pa/m

DIAFRAGMA #26

Constante de proporcionalidade: 229,63 (Pa/m)/V

Fundo de escala (5 V): 1148,15 Pa/m

ANÁLISE DE ERRO

A incerteza na medição do gradiente de pressão foi estimada em $\pm 2,0 \%$ do valor lido, decorrente do processo de aferição, associada a um erro constante de $\pm 0,5 \%$ do fundo de escala, correspondente a uma histerese observada de $\pm 0,025$ V. Este erro constante equivale a ± 2 Pa/m no diafragma #22 e ± 6 Pa/m no diafragma #26. Para limitar a influência do erro contante sobre as leituras de gradiente de pressão, as medidas inferiores a 10% do fundo de escala foram descartadas, ou seja, 39 Pa/m para o diafragma #22 e 115 Pa/m para o diafragma #26. Nesta situação, o erro contante corresponde a $\pm 5 \%$ do valor lido que somado ao erro proporcional de $\pm 2,0 \%$ resulta num erro total de $\pm 7,0 \%$. Na medida em que o gradiente de pressão aumenta, o erro relativo total cai rapidamente. Por exemplo, para 50% do fundo de escala, o erro constante representa $\pm 1,0 \%$ do valor lido, que somado ao erro proporcional de $\pm 2,0 \%$ resulta num erro total de $\pm 3,0 \%$.

APÊNDICE - IV

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

APÊNDICE - IV

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

As áreas transversais ocupadas pelo gás e pelo líquido, bem como os perímetros das interfaces gás-parede, líquido-parede e gás-líquido foram determinados em função das leituras de espessura de filme, tomadas a cada 15., de 0. (geratriz inferior) até 180., assumindo-se simetria para a faixa de 180. a 360..

O perímetro da interface líquido-parede foi calculado simplesmente somando-se arcos de 15., a partir de 0., até encontrar uma leitura de espessura igual a zero (sonda seca), multiplicando-se o resultado por dois.

$$S_l = 2 \ n \ R \ \theta \quad (\text{IV.1})$$

onde n é o número de leituras não nulas de espessura de filme, R o raio interno do tubo (m) e θ o ângulo entre duas leituras consecutivas de espessura (rad). Para todas as medições, $\theta = 15.$

O perímetro da interface gás-parede pode ser obtido por diferença:

$$S_g = S - S_l \quad (\text{IV.2})$$

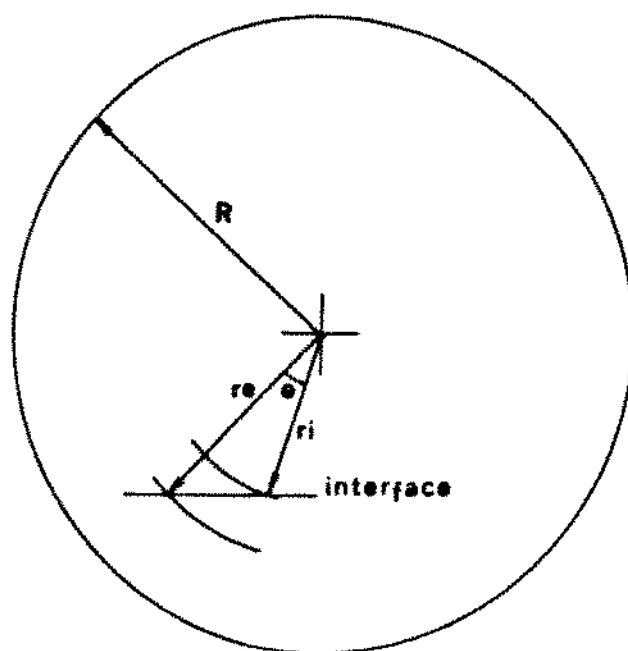


Figura (IV.1) - Definição das variáveis r_e , r_i e θ .

O perímetro da interface gás-líquido foi calculado de maneira aproximada pelo somatório:

$$S_i = 2 \sum \Delta S_i \quad (\text{IV.3})$$

$$\Delta S_i = \left[(r_e - r_i)^2 + \left[\theta (r_i + r_e)/2 \right]^2 \right]^{1/2} \quad (\text{IV.4})$$

onde r_e e r_i são os raios correspondentes a duas leituras consecutivas de espessura de filme (figura IV.1). O somatório é iniciado em 0. e se estende até a primeira leitura nula de espessura de filme. O resultado é então multiplicado por dois.

A área transversal ocupada pelo gás foi calculada pelo somatório:

$$A_g = 2 \sum \Delta A_g \quad (\text{IV.5})$$

$$\Delta A_g = \pi \left[(r_i + r_e)/2 \right]^2 (\theta/2\pi) \quad (\text{IV.6})$$

O somatório é iniciado em 0. e se estende até 180.. O resultado obtido é multiplicado por dois.

Para verificar o funcionamento dos procedimentos de cálculo acima, estes foram aplicados a uma geometria conhecida, uma interface plana com $H/D = 0,25$. O incremento de ângulo usado também foi de 15. e as espessuras de filme foram obtidas analiticamente. Os desvios observados com relação à solução exata foram os seguintes:

Perímetro da interface gás-parede:	+6,25 %
Perímetro da interface líquido-parede:	-12,50 %
Perímetro da interface gás-líquido:	+0,51 %
Área transversal ocupada pelo gás:	+0,47 %
Área transversal ocupada pelo líquido:	-1,94 %

APÊNDICE - V

TABELA DE RESULTADOS

TABELA V.1

RESULTADOS

PONTO	VAZAO AGUA Kg/s	JL m/s	VAZAO AR Kg/s	TESC K	GRADPRES Pa/m	PESC Pa (ABS)
1	.0100	.0088	.0057	298.00	***	95039.43
2	.0100	.0088	.0117	298.00	38.42	94985.29
3	.0100	.0088	.0153	298.00	66.63	94647.92
4	.0121	.0106	.0215	296.00	163.03	95461.93
5	.0146	.0128	.0266	294.00	245.82	95845.72
6	.0129	.0114	.0325	294.00	341.91	95859.04
7	.0239	.0209	.0057	298.00	***	95439.94
8	.0239	.0209	.0118	298.00	50.14	95411.31
9	.0239	.0209	.0157	298.00	104.71	95532.46
10	.0217	.0190	.0213	296.00	185.00	95510.70
11	.0232	.0203	.0267	294.00	276.39	96013.59
12	.0243	.0213	.0323	294.00	419.86	96032.09
13	.0336	.0295	.0056	298.00	13.50	95329.97
14	.0341	.0299	.0120	298.00	63.17	95440.24
15	.0341	.0299	.0156	298.00	112.53	95549.82
16	.0327	.0287	.0214	296.00	206.95	95559.43
17	.0349	.0306	.0267	294.00	312.01	95692.66
18	.0347	.0305	.0324	294.00	472.53	96249.02
19	.0452	.0397	.0057	298.00	14.41	95431.99
20	.0451	.0396	.0119	298.00	70.44	95156.38
21	.0451	.0396	.0156	298.00	129.58	95287.67
22	.0469	.0411	.0210	296.00	232.54	95616.24
23	.0463	.0406	.0269	294.00	349.52	96075.93
24	.0458	.0402	.0325	294.00	524.91	96365.30
25	.0811	.0711	.0057	296.50	25.40	95256.39
26	.0812	.0712	.0120	296.50	108.93	95441.82
27	.0818	.0718	.0156	296.50	174.88	95588.23
28	.0821	.0721	.0210	296.00	291.07	95746.18
29	.0826	.0724	.0270	294.00	469.59	96342.49
30	.0826	.0724	.0328	294.00	669.38	96686.02

TABELA V.1 (CONTINUAÇÃO)

RESULTADOS

PONTO	ROG	JG	ALFA	SI/SL	SL	SG
	Kg/m ³	m/s	-	-	m	m
1	1.147	4.50	.9576	.9510	.0399	.0798
2	1.146	9.27	.9745	.9722	.0399	.0798
3	1.142	12.14	.9827	.9785	.0399	.0798
4	1.160	16.75	.9855	.9793	.0399	.0798
5	1.172	20.53	.9841	.9811	.0499	.0698
6	1.173	25.09	.9875	.9894	.0698	.0499
7	1.152	4.47	.9188	.9329	.0499	.0698
8	1.151	9.32	.9519	.9555	.0499	.0698
9	1.153	12.33	.9702	.9616	.0399	.0798
10	1.160	16.65	.9780	.9748	.0499	.0698
11	1.175	20.56	.9782	.9786	.0598	.0598
12	1.175	24.87	.9828	.9854	.0698	.0499
13	1.151	4.40	.8890	.9038	.0499	.0698
14	1.152	9.45	.9410	.9434	.0499	.0698
15	1.153	12.24	.9609	.9591	.0499	.0698
16	1.161	16.66	.9707	.9670	.0499	.0698
17	1.171	20.63	.9712	.9720	.0598	.0598
18	1.177	24.90	.9780	.9835	.0798	.0399
19	1.152	4.49	.8647	.8828	.0499	.0698
20	1.148	9.36	.9308	.9341	.0499	.0698
21	1.150	12.29	.9520	.9505	.0499	.0698
22	1.162	16.39	.9617	.9644	.0598	.0598
23	1.175	20.70	.9660	.9670	.0598	.0598
24	1.179	24.99	.9713	.9858	.1197	.0000
25	1.155	4.46	.8002	.8598	.0598	.0598
26	1.158	9.43	.9071	.9244	.0598	.0598
27	1.159	12.17	.9311	.9409	.0598	.0598
28	1.163	16.35	.9441	.9489	.0598	.0598
29	1.179	20.78	.9463	.9743	.1197	.0000
30	1.183	25.08	.9603	.9805	.1197	.0000

TABELA V.1 (CONTINUACAO)

RESULTADOS

PONTO	SI	VG	VL	VISC DIN	REG	fg
	m	m/s	m/s	Ns/m ²	-	-
1	.0379	4.69	.21	.0000184	10881.61	.0077
2	.0388	9.51	.34	.0000184	22271.49	.0065
3	.0390	12.35	.51	.0000184	28790.45	.0061
4	.0391	17.00	.73	.0000183	40828.59	.0056
5	.0489	20.86	.80	.0000182	50884.24	.0053
6	.0691	25.40	.91	.0000182	62070.04	.0050
7	.0465	4.86	.26	.0000184	10988.62	.0077
8	.0477	9.79	.44	.0000184	22692.19	.0064
9	.0384	12.71	.70	.0000184	29905.55	.0060
10	.0486	17.03	.86	.0000183	40745.19	.0056
11	.0586	21.02	.93	.0000182	51196.94	.0053
12	.0688	25.31	1.24	.0000182	61799.82	.0050
13	.0451	4.95	.27	.0000184	10959.07	.0077
14	.0471	10.04	.51	.0000184	23144.98	.0064
15	.0478	12.74	.76	.0000184	29818.44	.0060
16	.0482	17.16	.98	.0000183	40922.92	.0056
17	.0582	21.24	1.06	.0000182	51354.52	.0052
18	.0785	25.46	1.38	.0000182	62162.78	.0050
19	.0440	5.19	.29	.0000184	11280.58	.0077
20	.0466	10.06	.57	.0000184	22956.89	.0064
21	.0474	12.91	.82	.0000184	29955.27	.0060
22	.0577	17.04	1.07	.0000183	40438.00	.0056
23	.0579	21.43	1.19	.0000182	51873.57	.0052
24	.1180	25.73	1.40	.0000182	62669.97	.0050
25	.0515	5.57	.36	.0000183	11544.42	.0076
26	.0553	10.39	.77	.0000183	23630.94	.0064
27	.0563	13.08	1.04	.0000183	30312.10	.0060
28	.0568	17.32	1.29	.0000183	40736.36	.0056
29	.1166	21.96	1.35	.0000182	52705.25	.0052
30	.1174	26.12	1.82	.0000182	63437.52	.0050

TABELA V.1 (CONTINUAÇÃO)

RESULTADOS

PONTO	TAUWG	TAUI	fi	fi/fg	MED	DP
	N/m2	N/m2	-	-	mm	mm
1	.10	***	***	***	2.882	.0282
2	.34	.41	.0079	1.22	2.154	.2471
3	.53	.83	.0096	1.58	1.512	.5543
4	.93	2.79	.0166	2.99	.968	.6540
5	1.34	3.72	.0146	2.77	.788	.5700
6	1.89	4.20	.0111	2.22	.496	.4372
7	.11	***	***	***	5.040	.4312
8	.36	.62	.0113	1.75	3.385	.7423
9	.56	1.85	.0199	3.31	2.187	1.0559
10	.94	2.90	.0172	3.10	1.351	.8927
11	1.36	3.87	.0149	2.84	1.058	.7974
12	1.88	5.47	.0145	2.90	.709	.6265
13	.11	.13	.0095	1.23	6.072	.1503
14	.37	.89	.0153	2.39	3.773	1.1059
15	.56	1.76	.0188	3.12	2.609	1.1787
16	.95	3.37	.0197	3.55	1.778	1.0660
17	1.39	4.51	.0171	3.26	1.443	1.0832
18	1.91	5.74	.0150	3.01	.915	.7909
19	.12	.13	.0086	1.13	6.813	.2031
20	.37	1.05	.0180	2.80	4.203	1.4141
21	.58	2.12	.0221	3.68	3.061	1.3302
22	.94	3.44	.0204	3.67	2.183	1.3949
23	1.41	5.19	.0192	3.67	1.648	1.2576
24	1.95	4.93	.0126	2.53	1.108	.9172
25	.14	.29	.0162	2.13	9.279	.4541
26	.40	1.61	.0257	4.03	5.264	1.6173
27	.59	2.67	.0269	4.49	4.017	1.6288
28	.97	4.49	.0257	4.63	3.116	1.6668
29	1.48	4.34	.0153	2.93	2.410	1.5430
30	2.01	6.24	.0155	3.11	1.668	1.3296

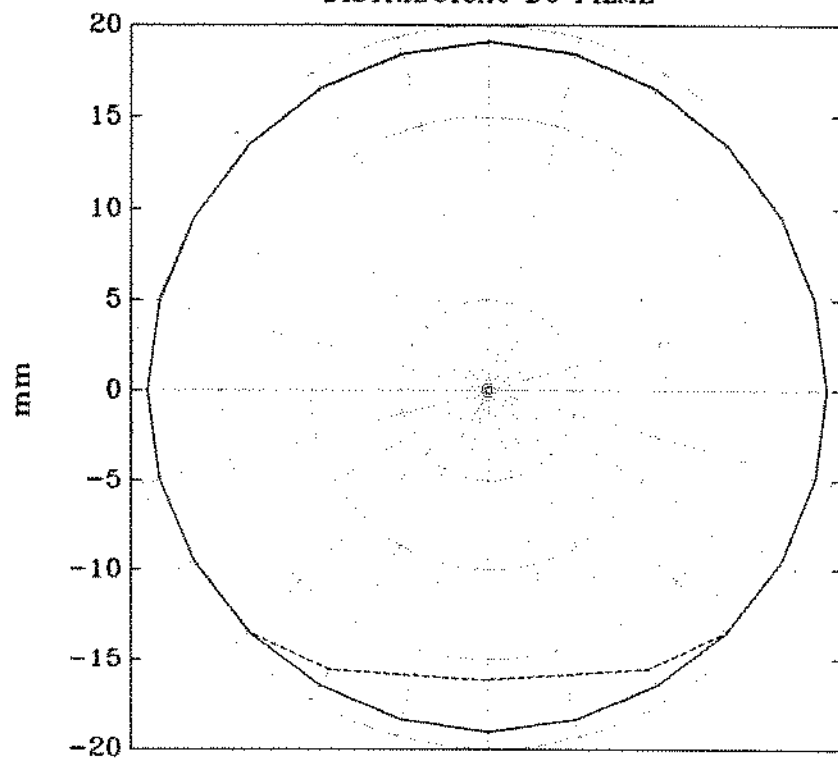
APÊNDICE - VI

GRÁFICOS

VI.1 - DISTRIBUIÇÃO DE FILME

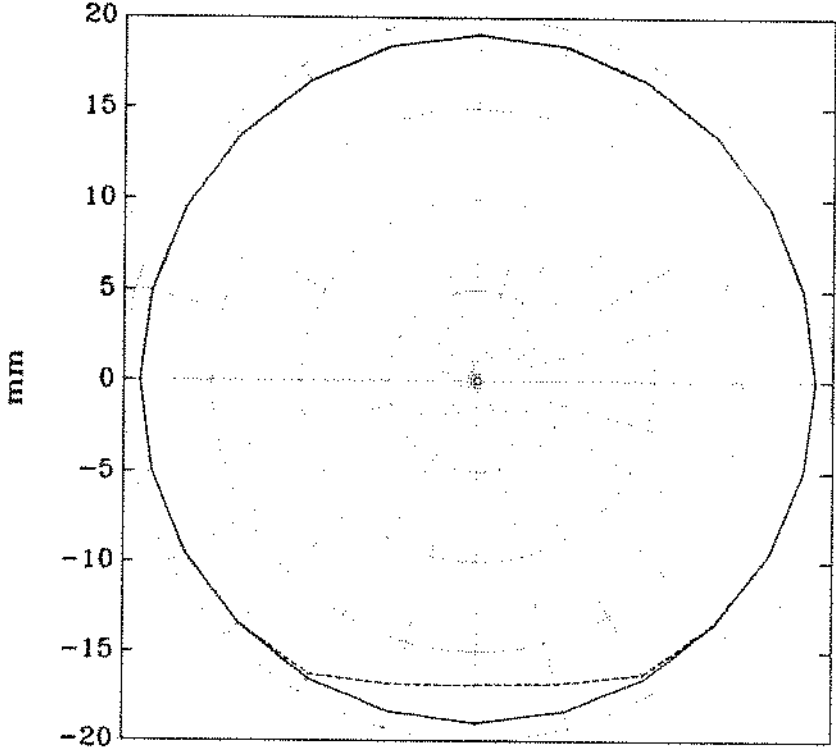
(SONDA 1)

DISTRIBUICAO DO FILME



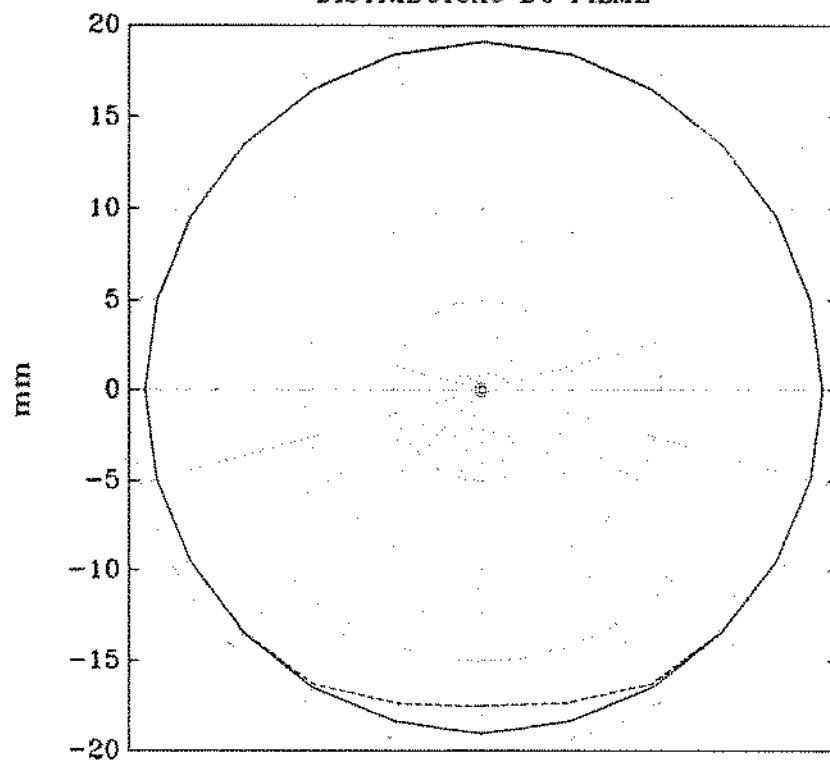
PONTO-1

DISTRIBUICAO DO FILME



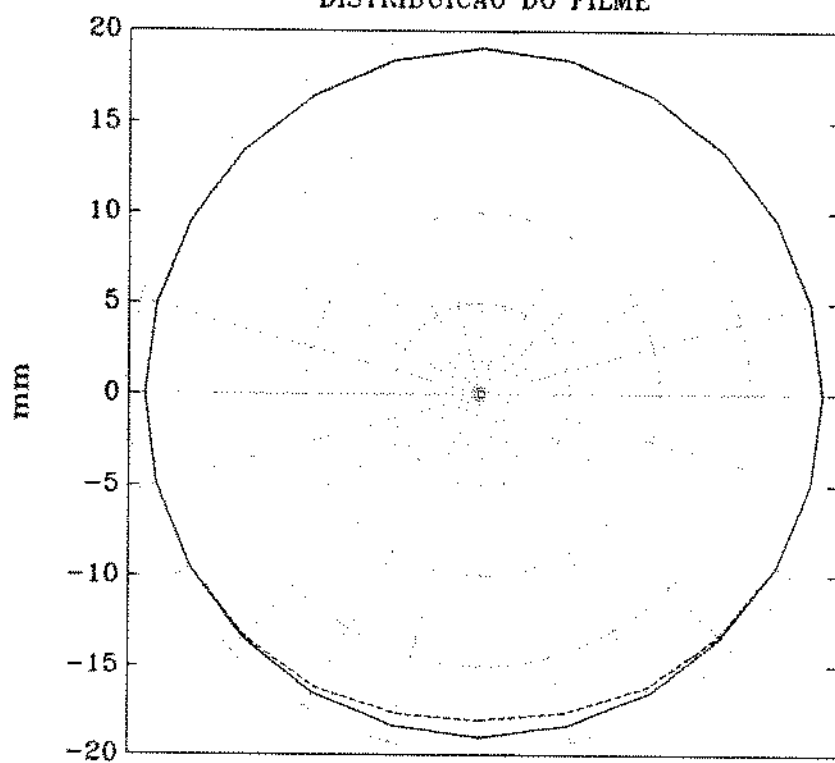
PONTO-2

DISTRIBUICAO DO FILME



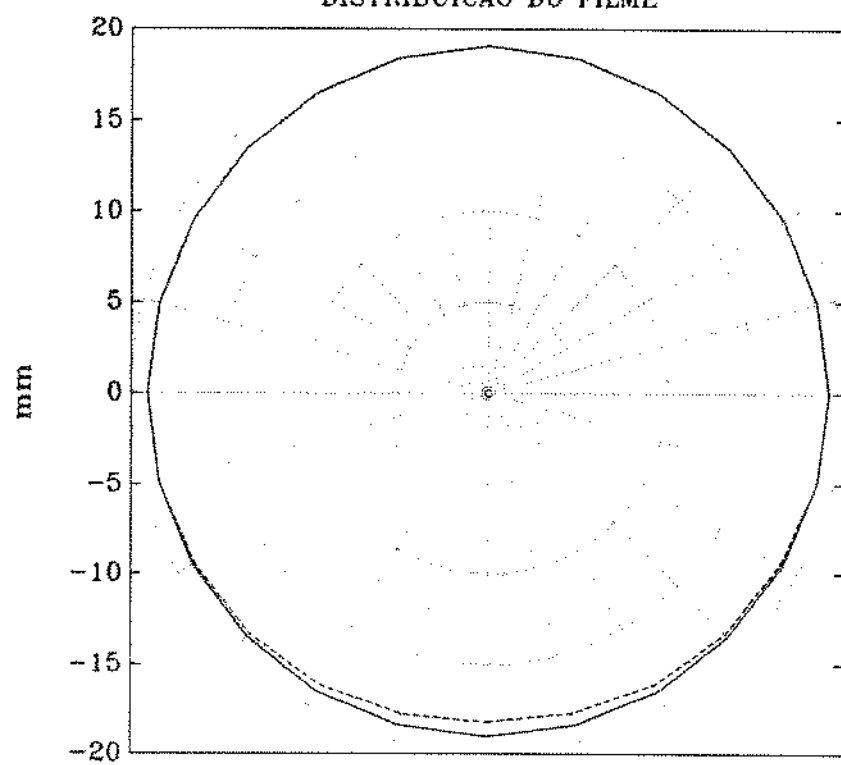
PONTO-3

DISTRIBUICAO DO FILME



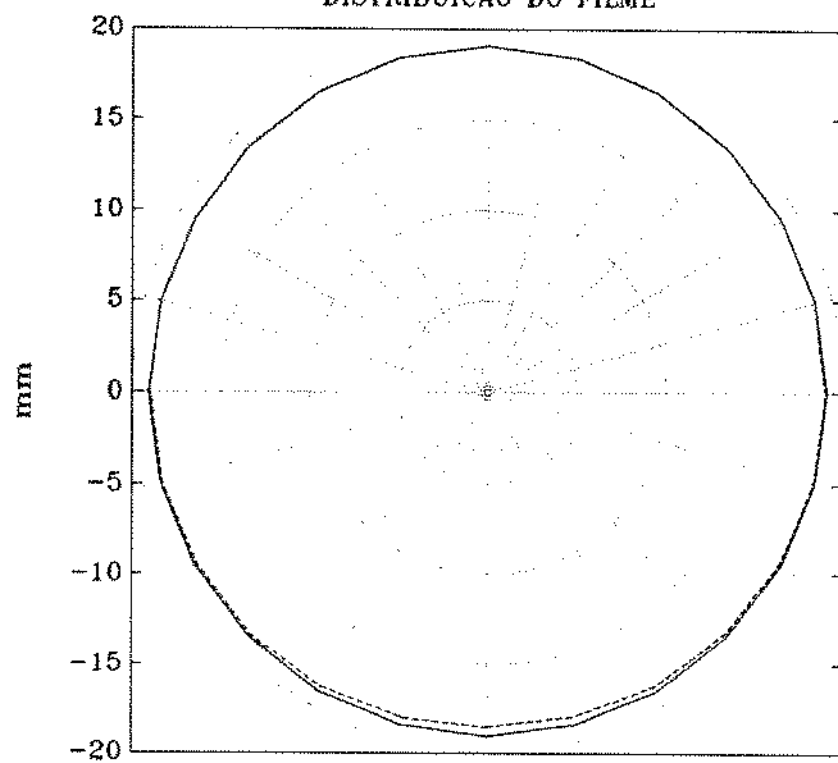
PONTO-4

DISTRIBUICAO DO FILME



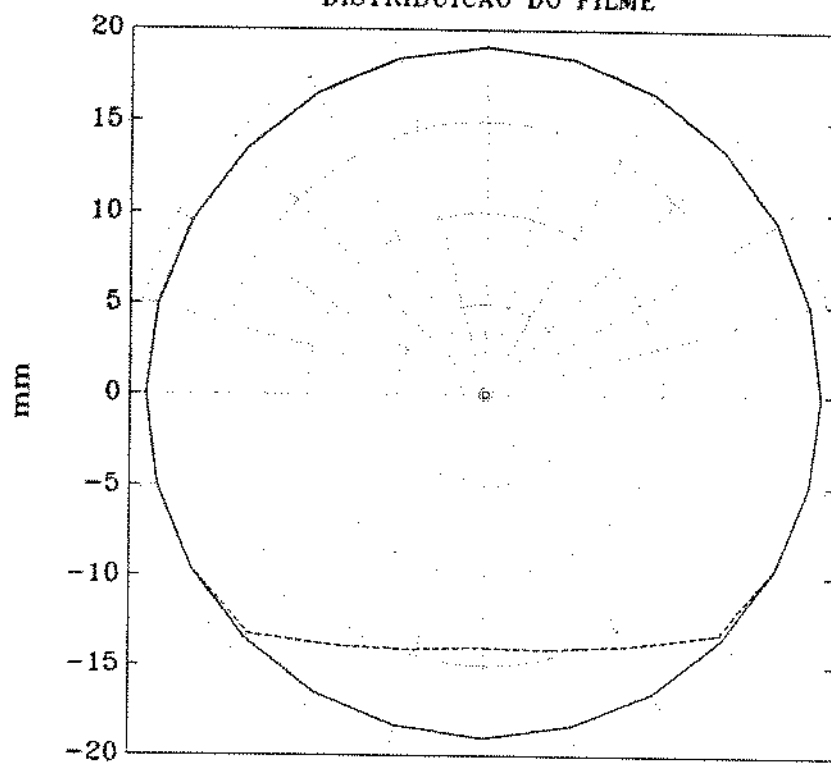
PONTO-5

DISTRIBUICAO DO FILME



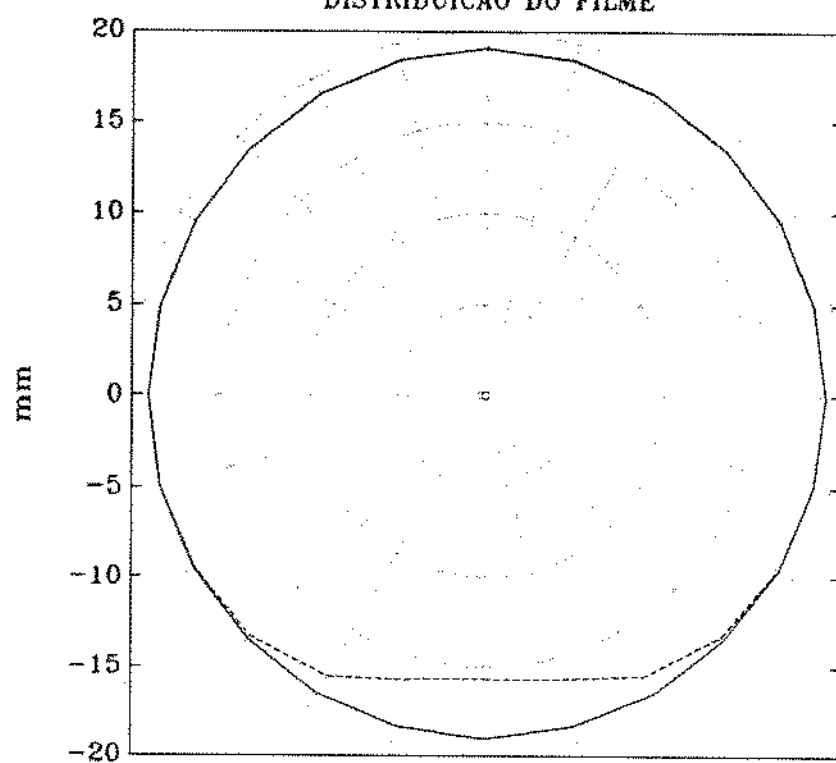
PONTO-6

DISTRIBUICAO DO FILME



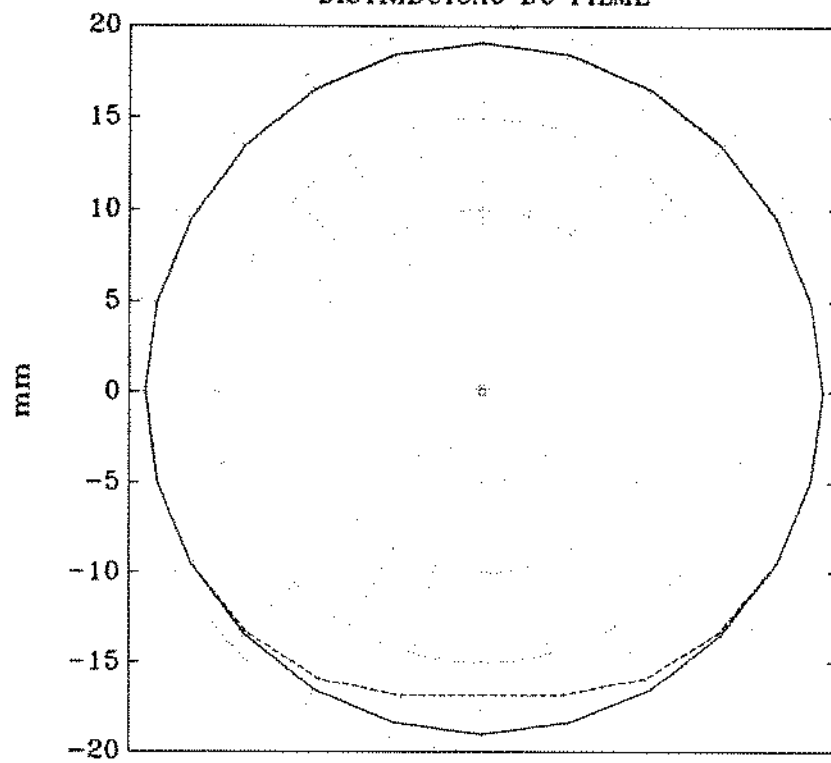
PONTO-7

DISTRIBUICAO DO FILME



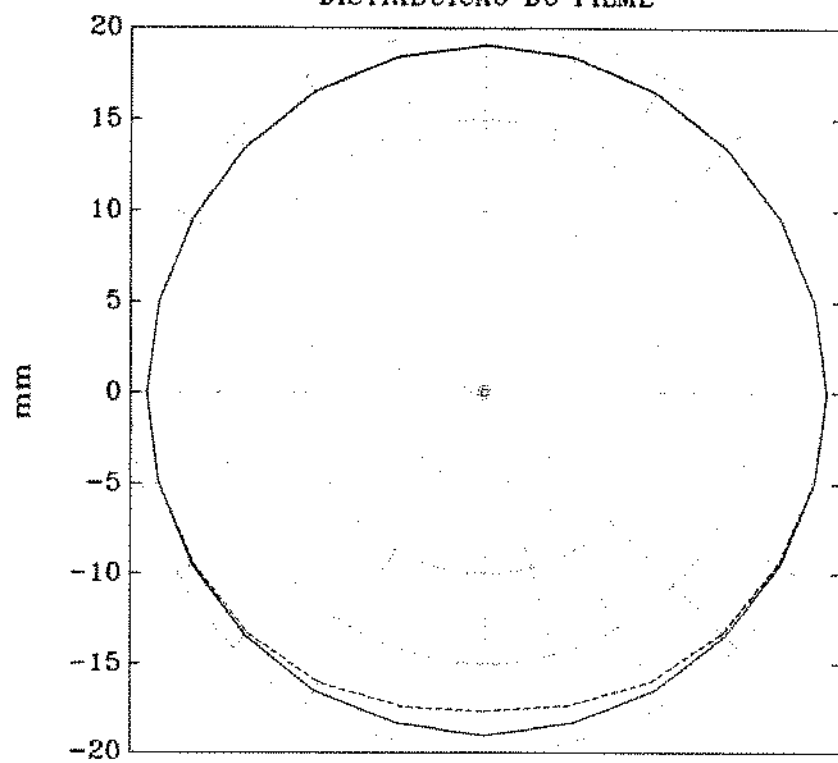
PONTO-8

DISTRIBUICAO DO FILME



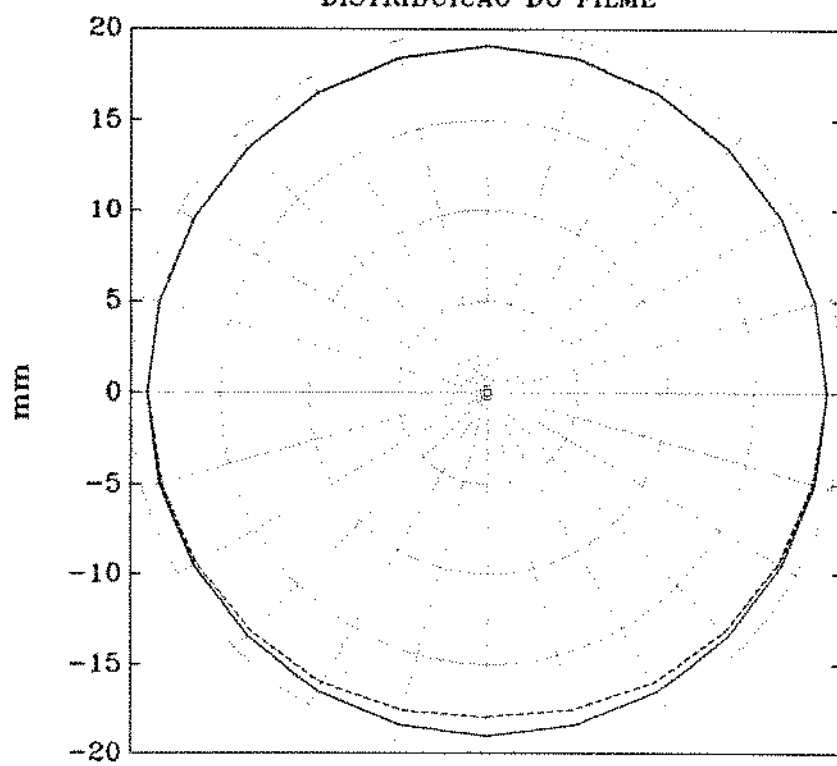
PONTO-9

DISTRIBUICAO DO FILME



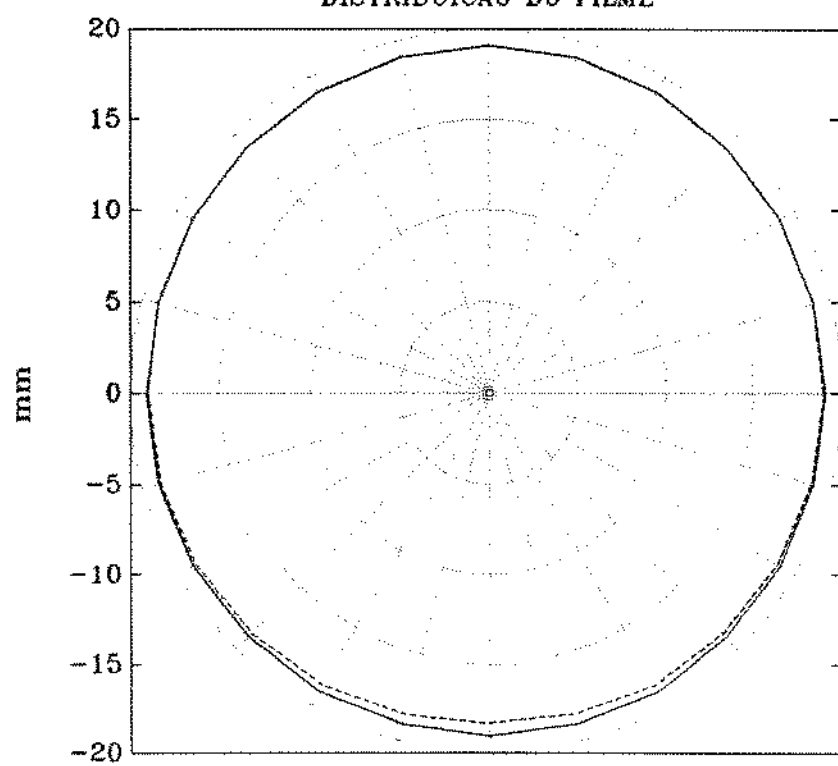
PONTO-10

DISTRIBUICAO DO FILME



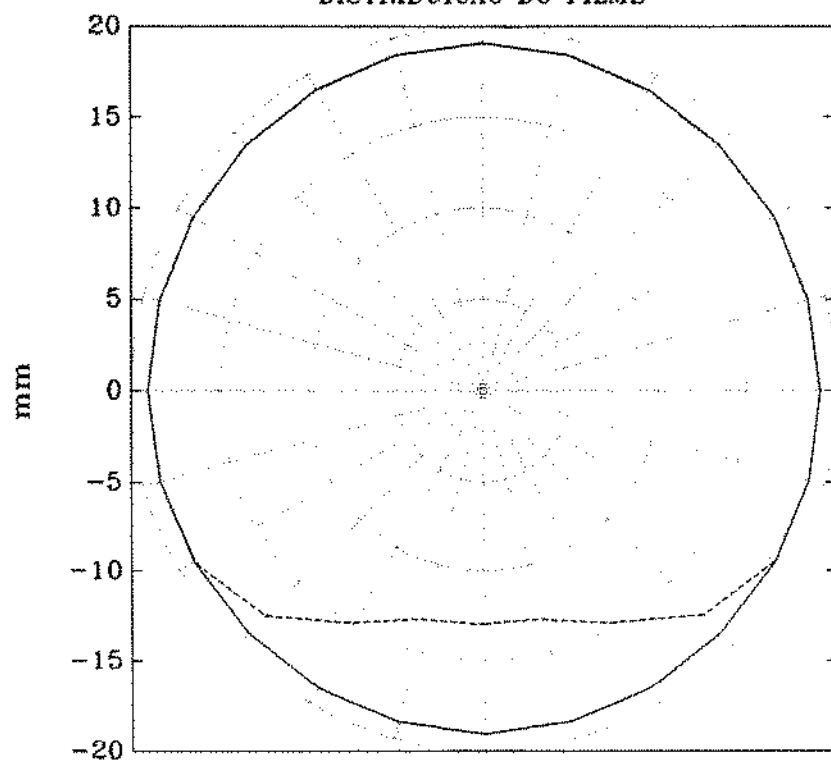
PONTO-11

DISTRIBUICAO DO FILME



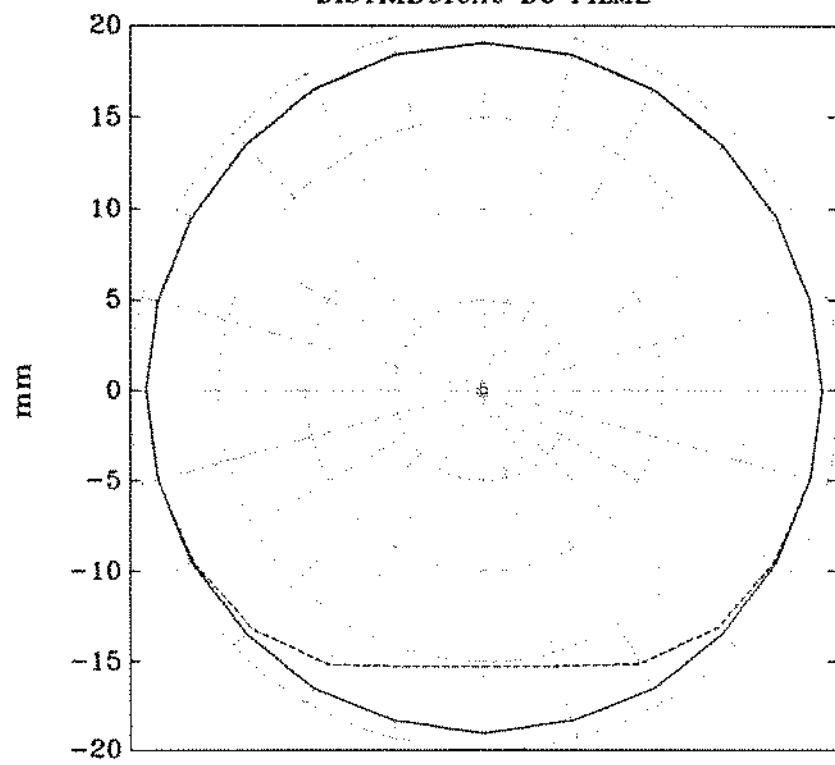
PONTO-12

DISTRIBUICAO DO FILME



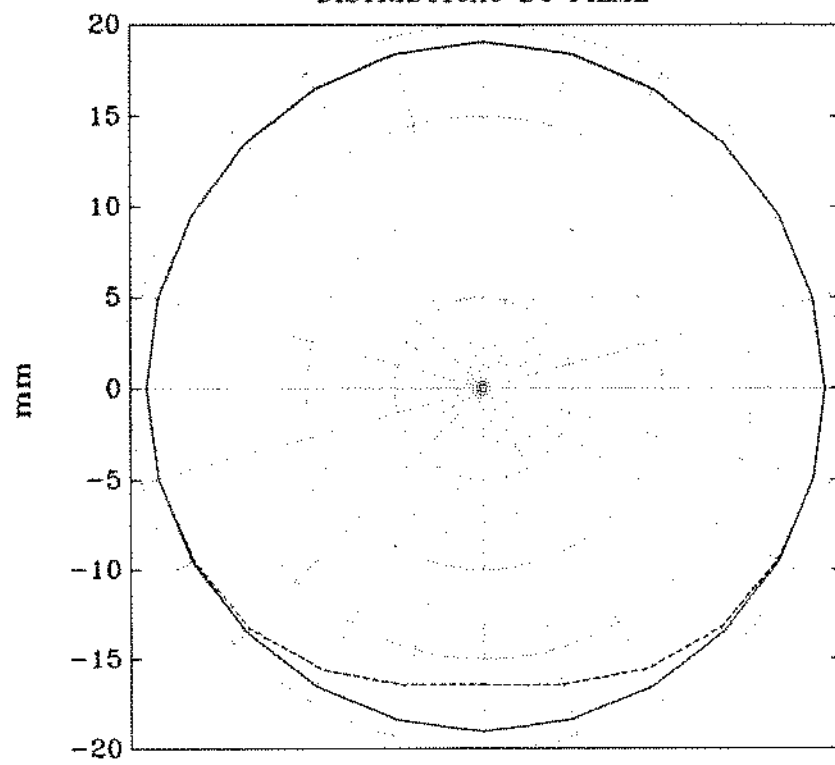
PONTO-13

DISTRIBUICAO DO FILME



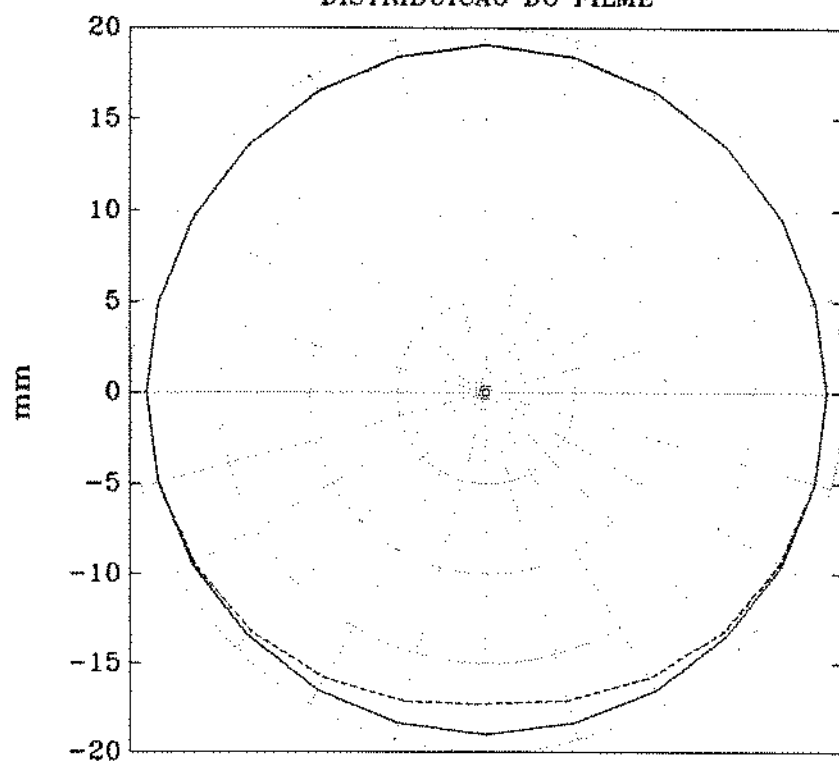
PONTO-14

DISTRIBUICAO DO FILME



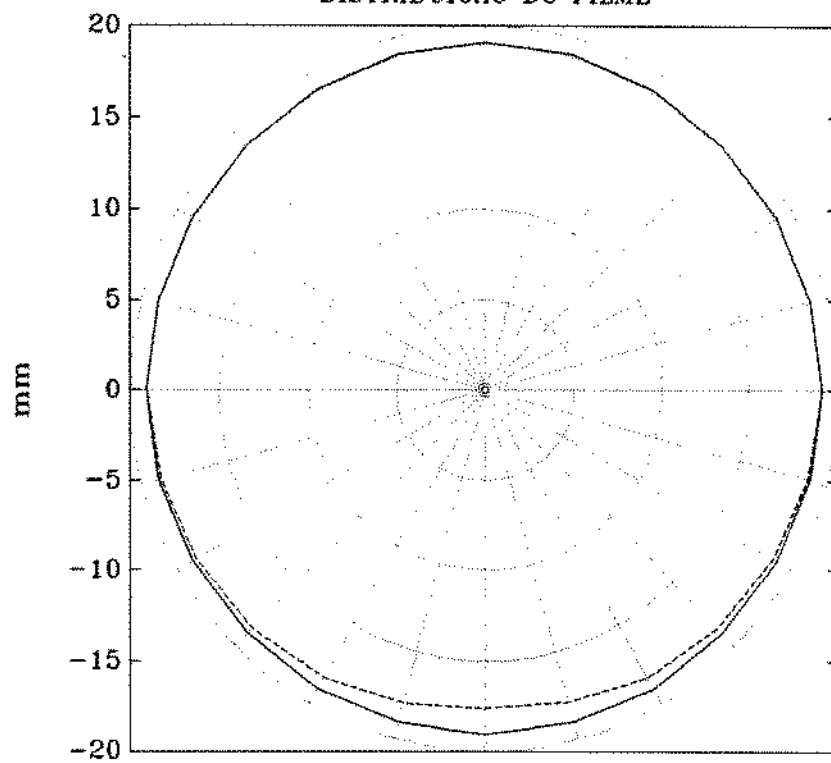
PONTO-15

DISTRIBUICAO DO FILME



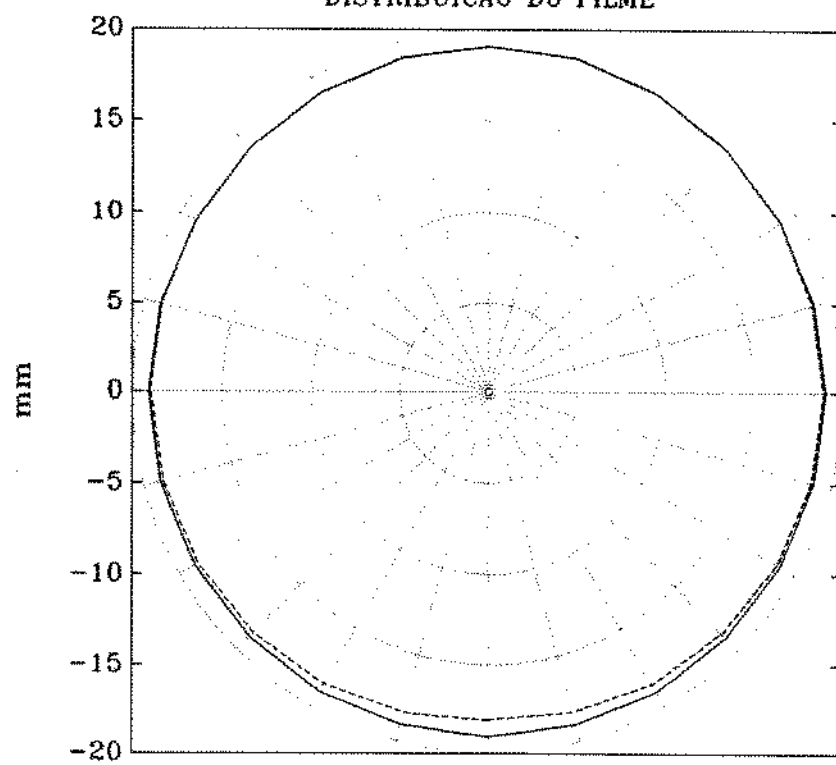
PONTO-16

DISTRIBUICAO DO FILME



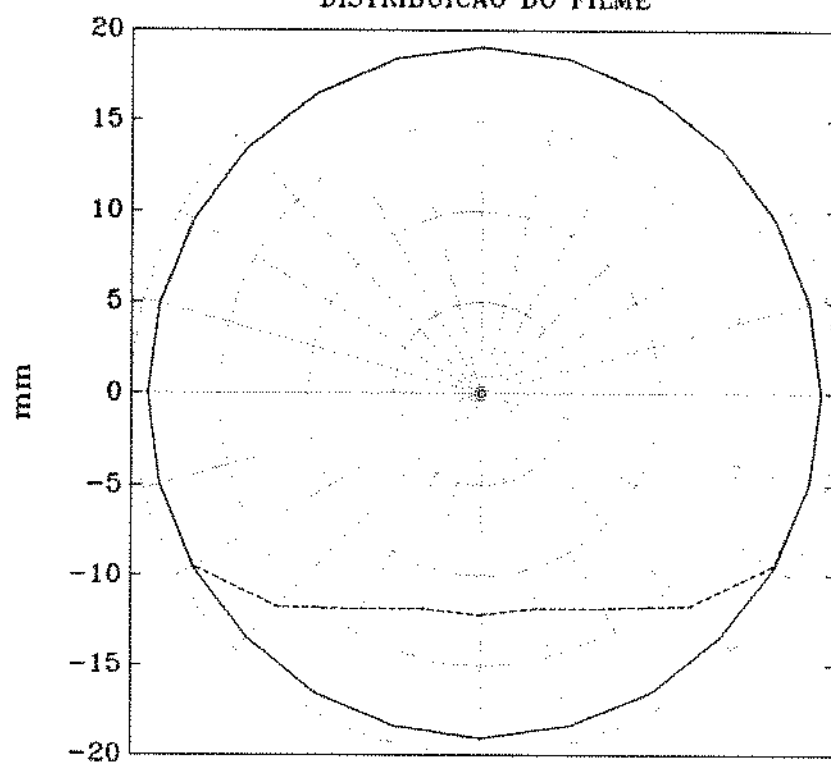
PONTO-17

DISTRIBUICAO DO FILME



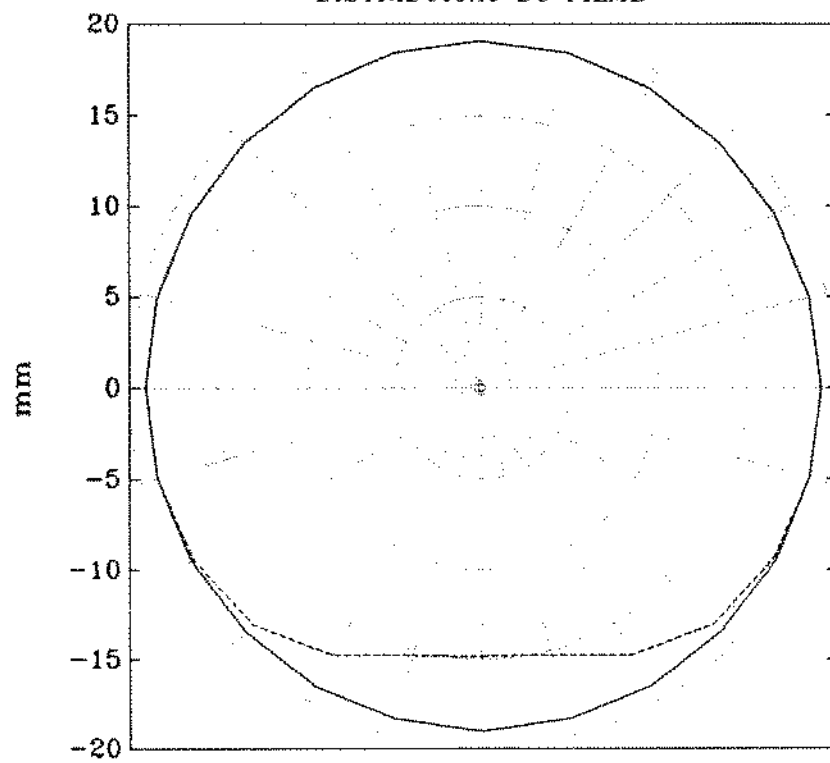
PONTO-18

DISTRIBUICAO DO FILME



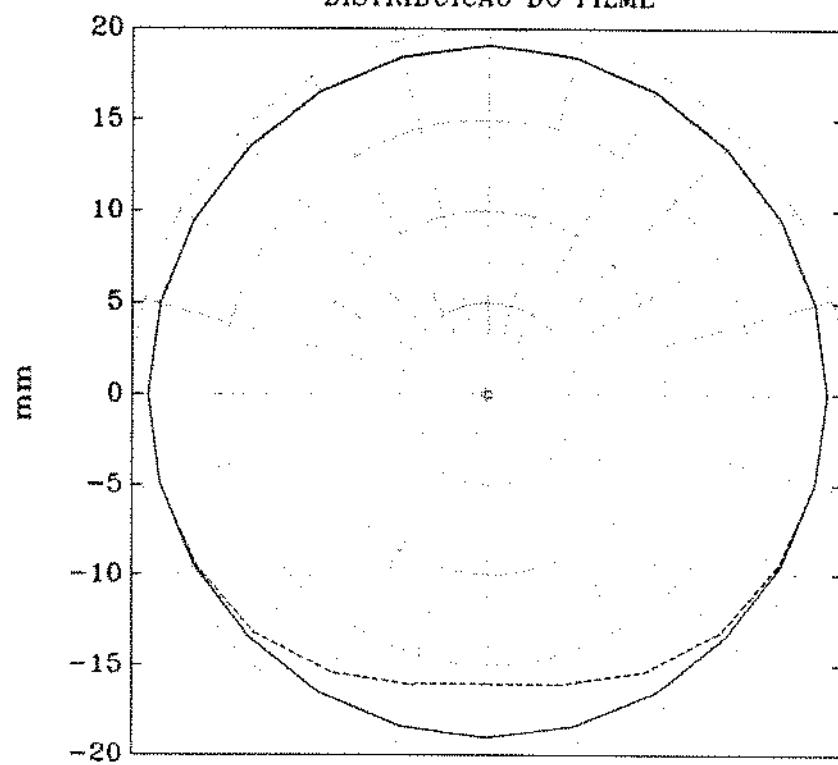
PONTO-19

DISTRIBUICAO DO FILME



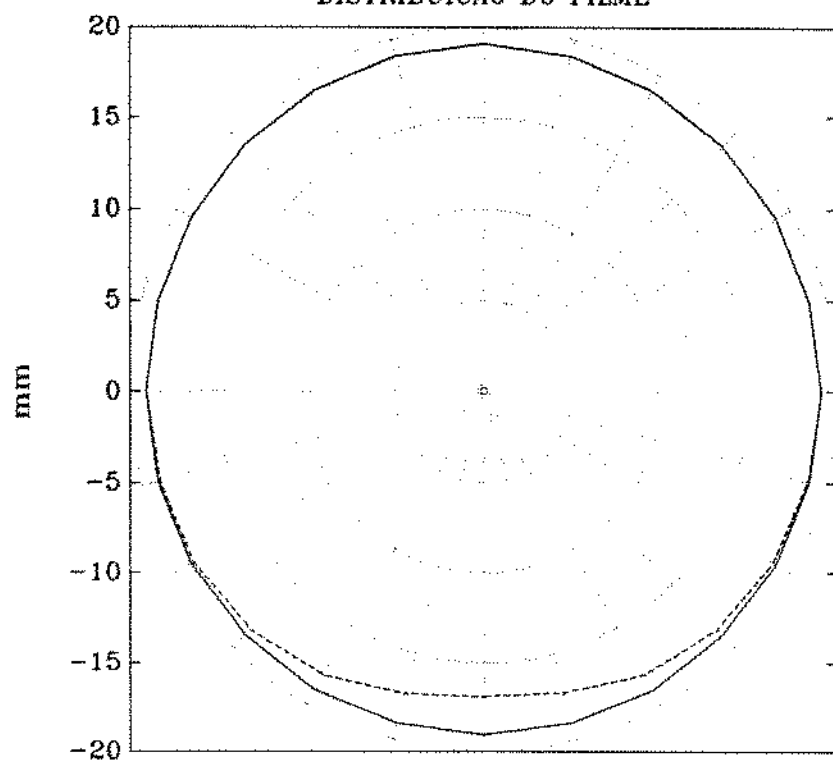
PONTO-20

DISTRIBUICAO DO FILME



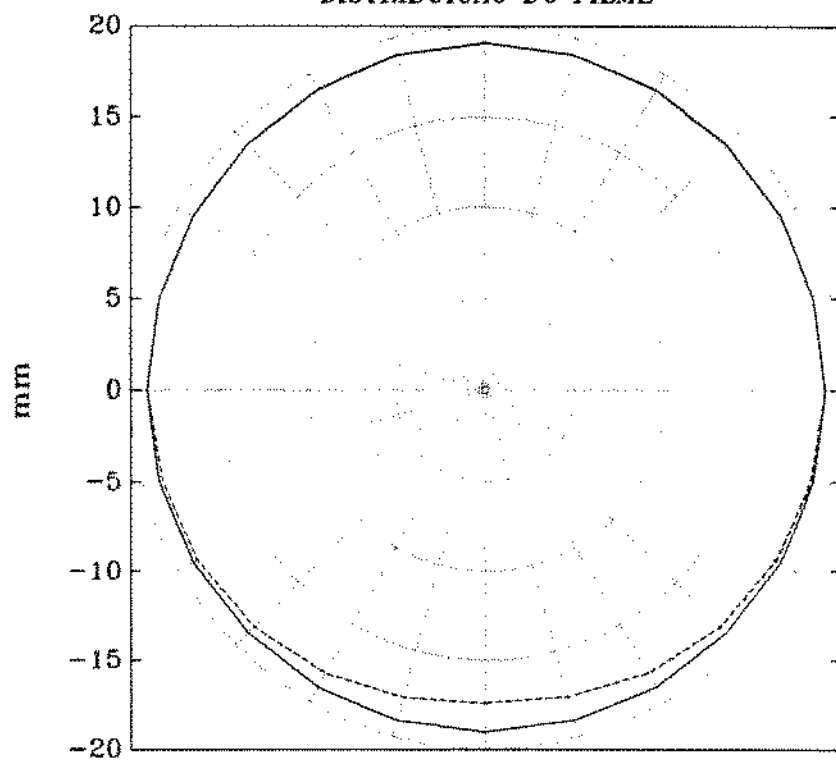
PONTO-21

DISTRIBUICAO DO FILME



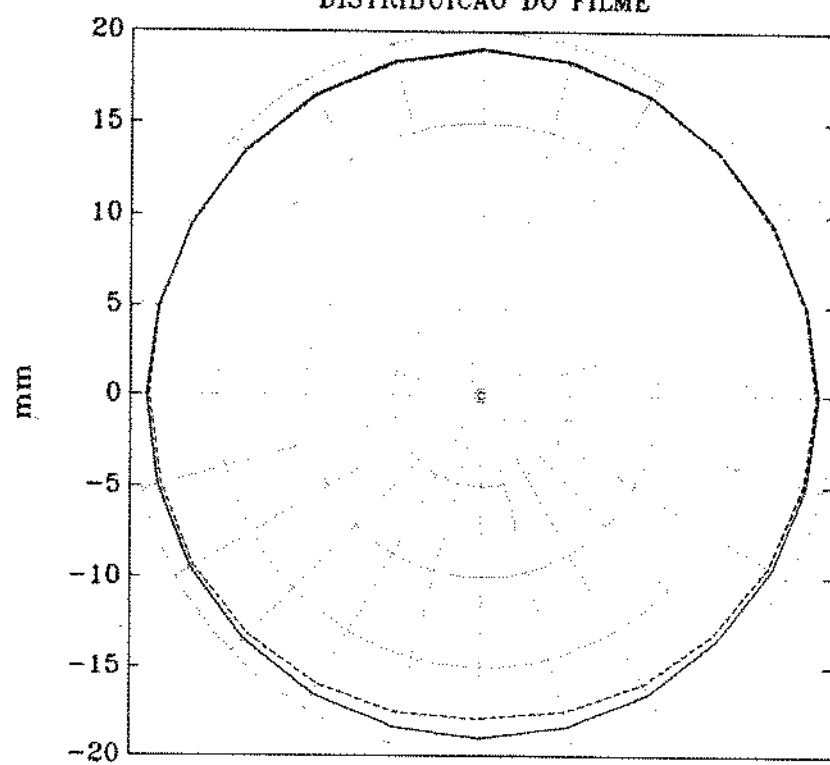
PONTO-22

DISTRIBUICAO DO FILME



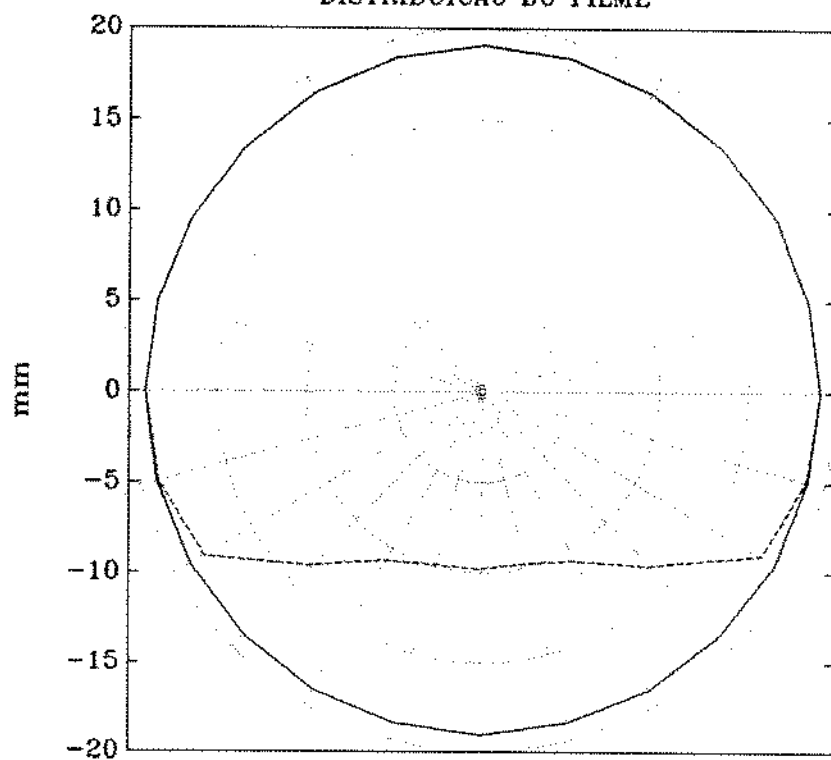
PONTO-23

DISTRIBUICAO DO FILME



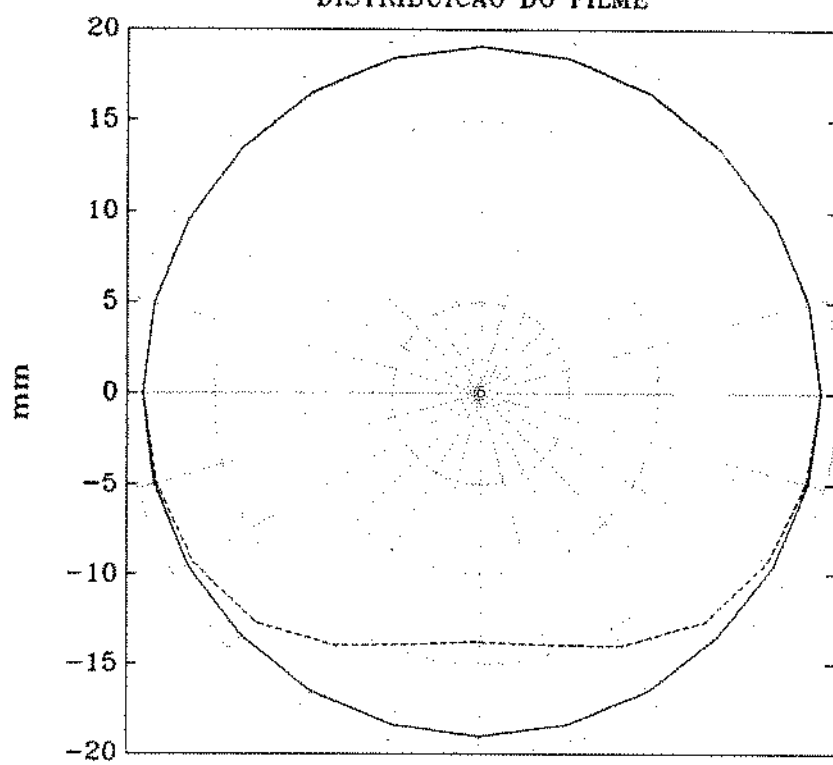
PONTO-24

DISTRIBUICAO DO FILME



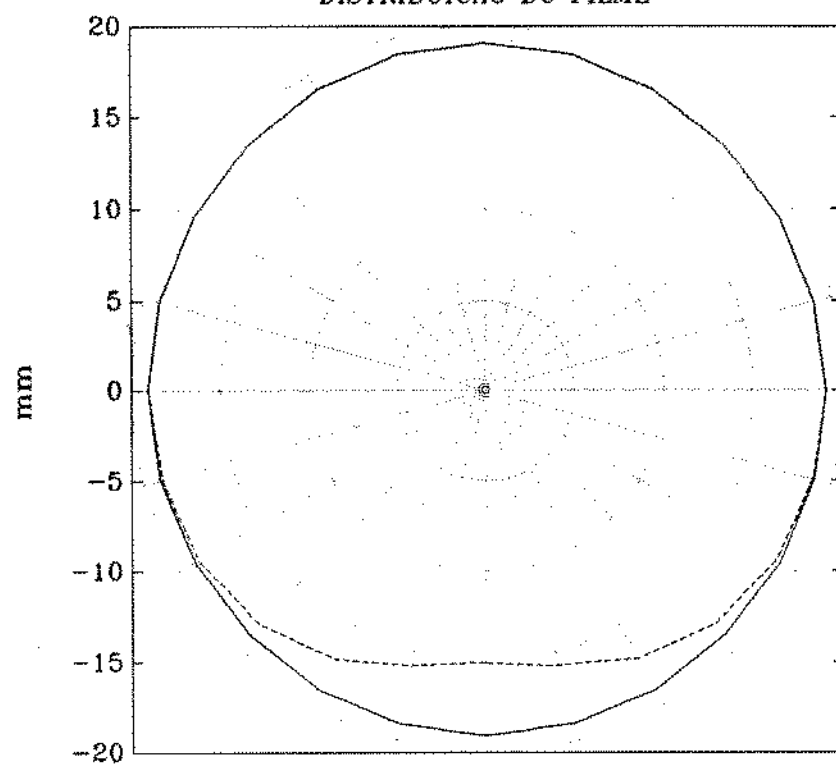
PONTO-25

DISTRIBUICAO DO FILME



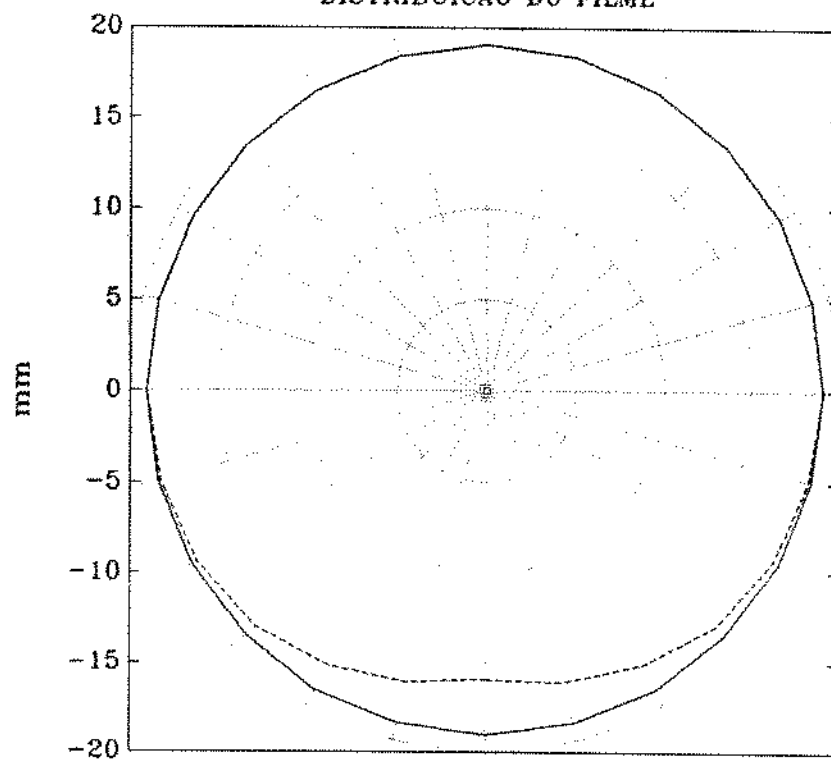
PONTO-26

DISTRIBUICAO DO FILME



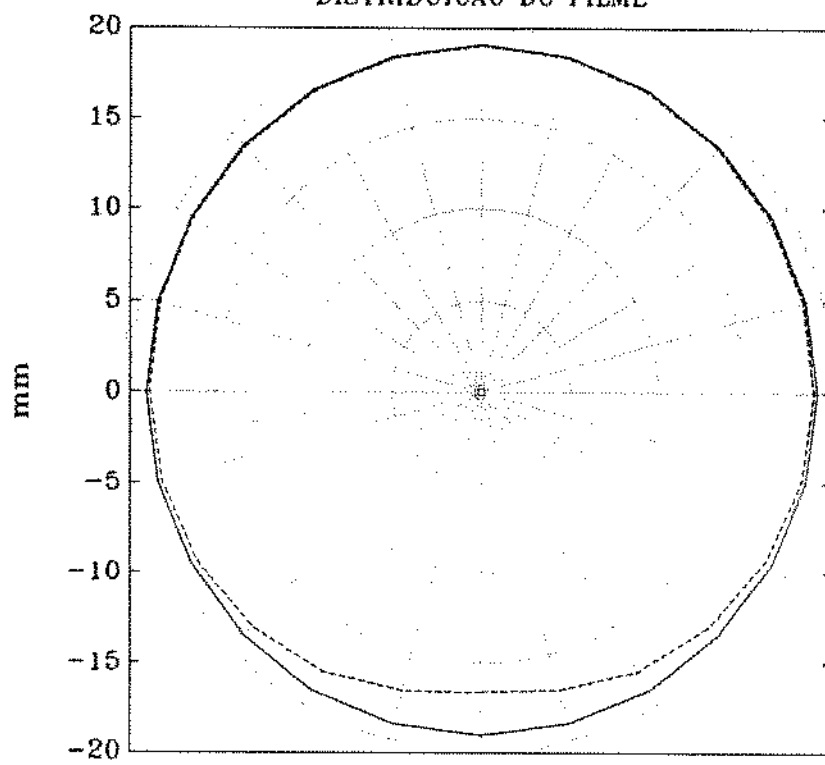
PONTO-27

DISTRIBUICAO DO FILME



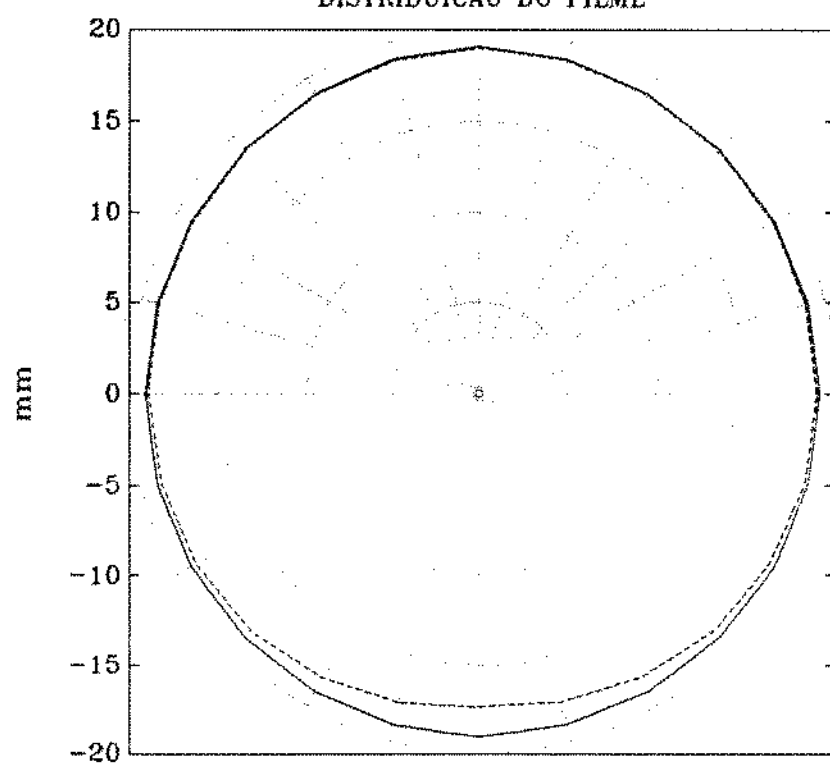
PONTO-28

DISTRIBUICAO DO FILME



PONTO-29

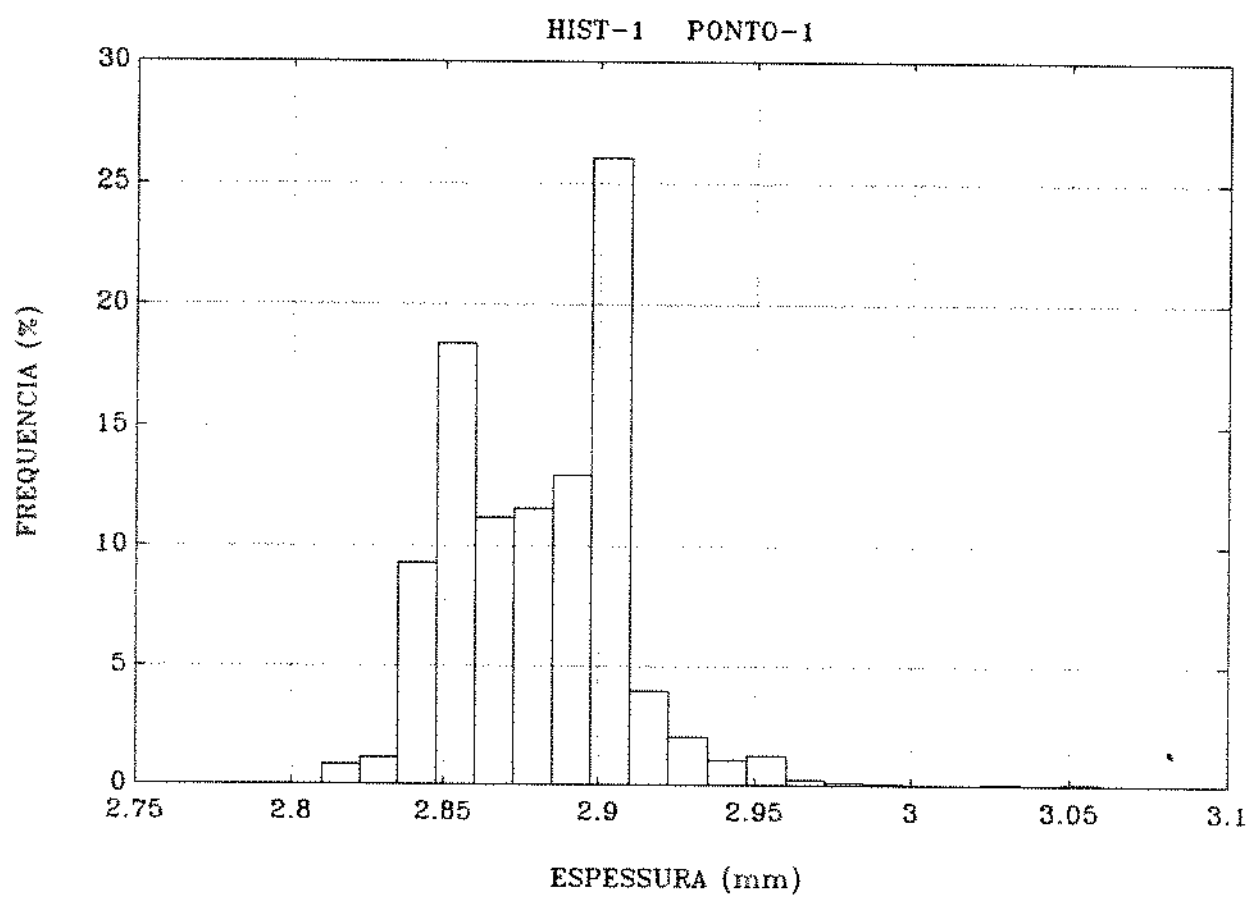
DISTRIBUICAO DO FILME



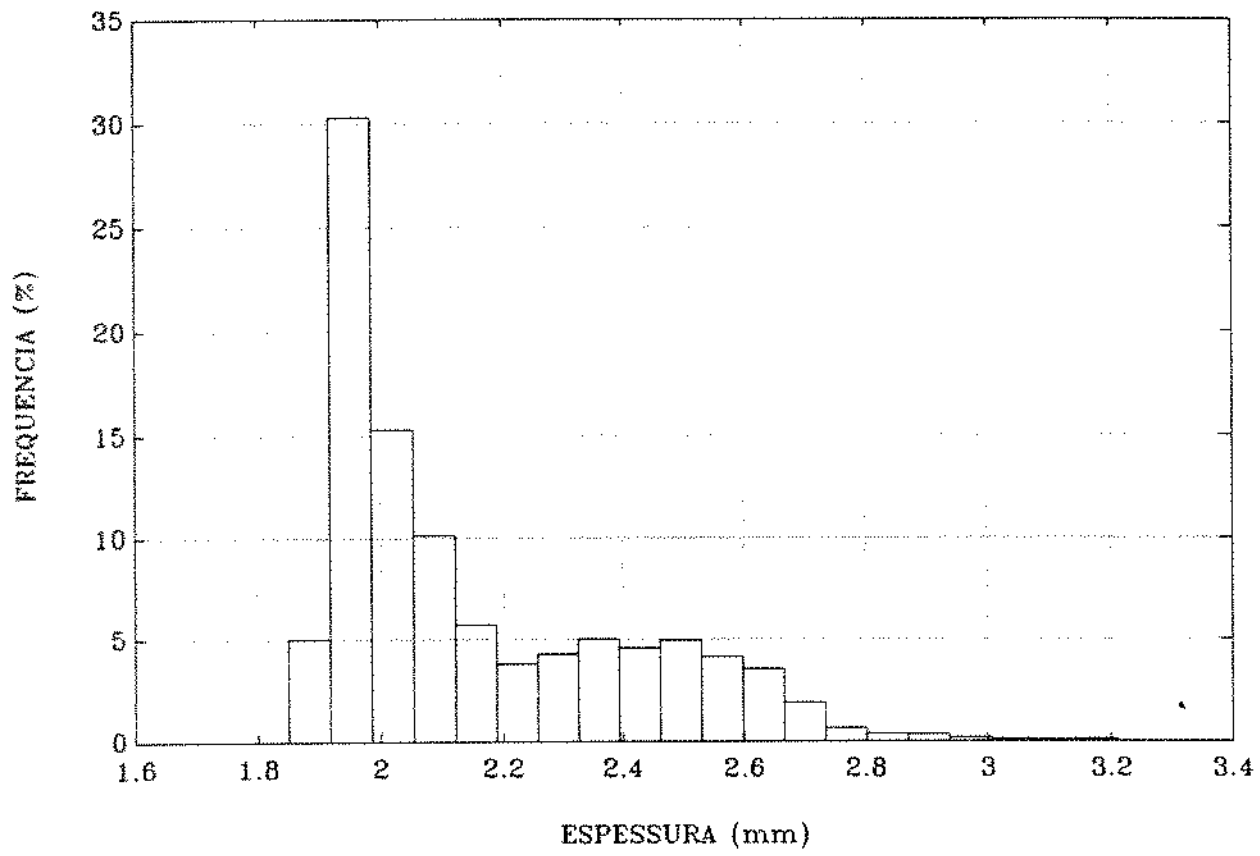
PONTO-30

VI.2 - HISTOGRAMA DE ESPESSURA DE FILME

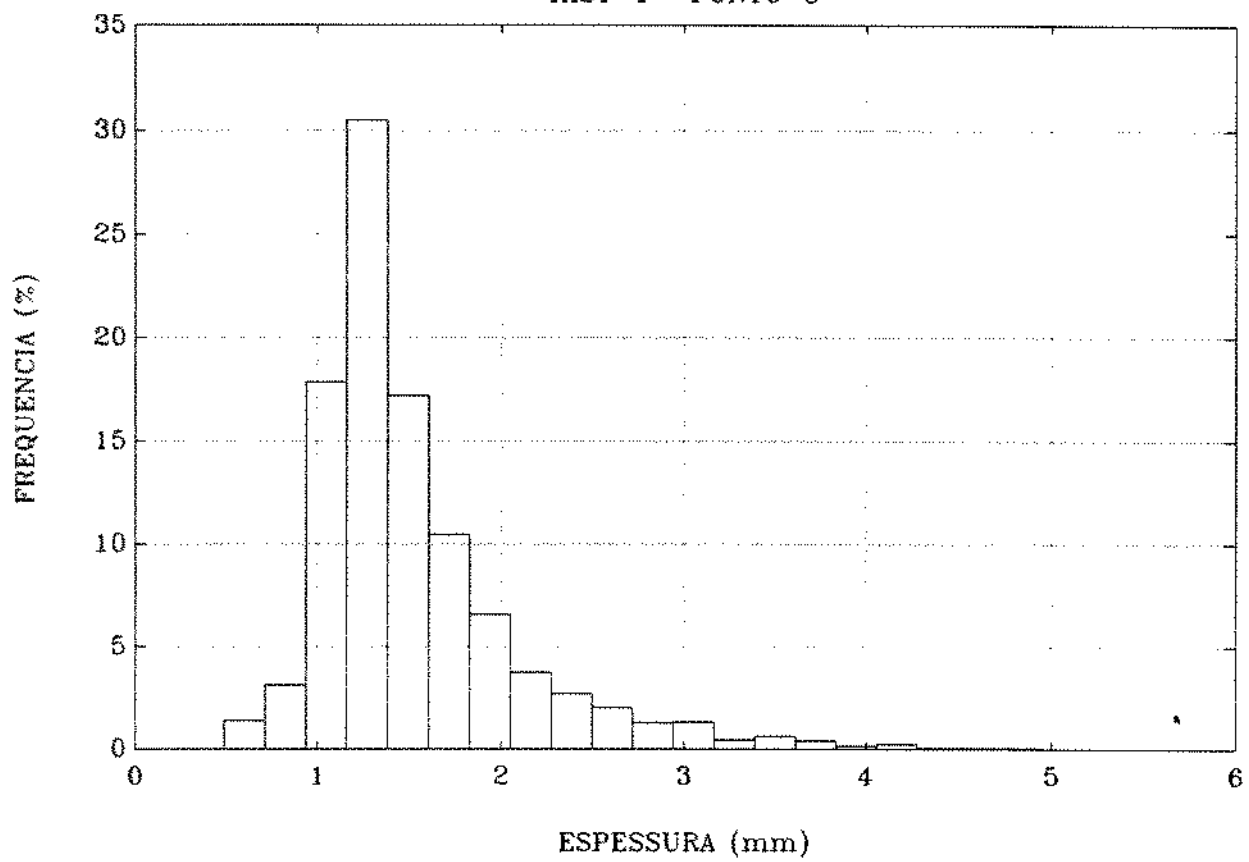
(SONDA 1)



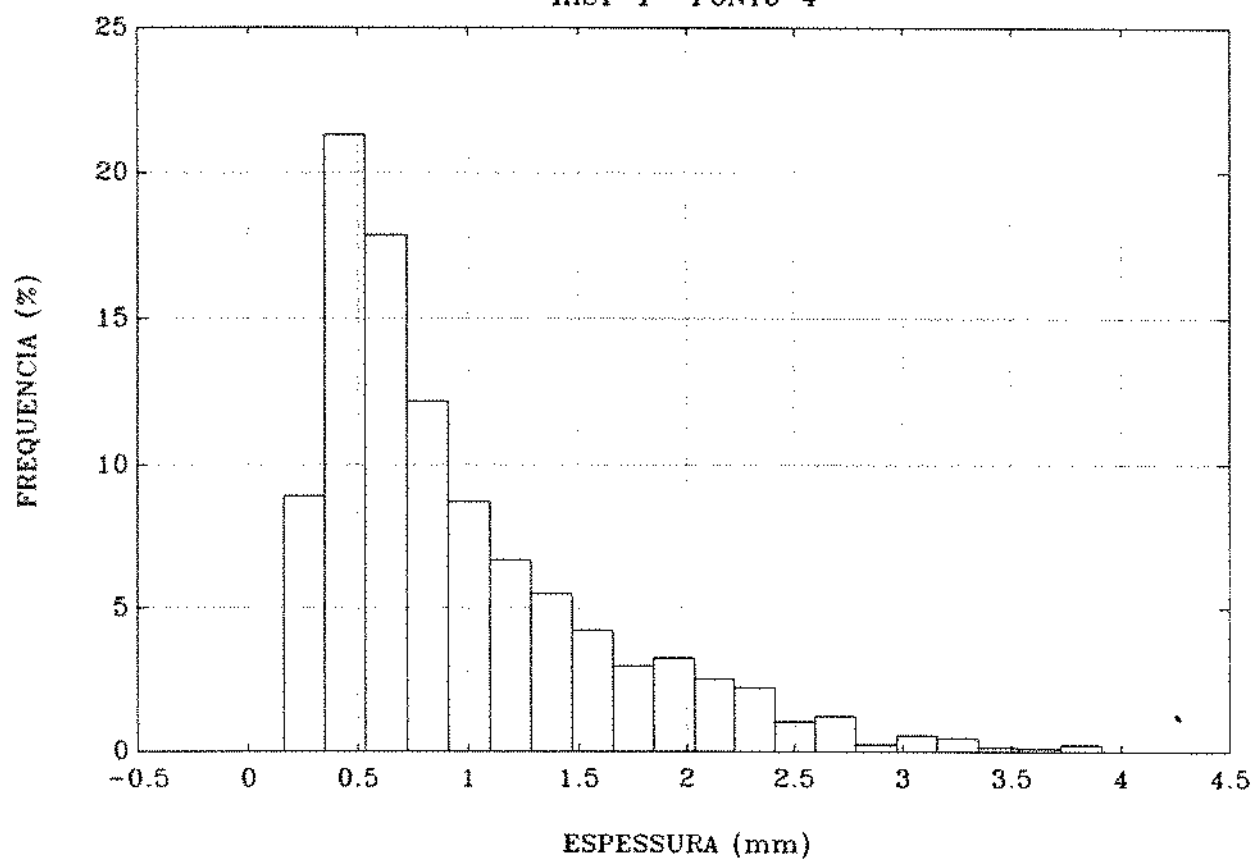
HIST-1 PONTO-2



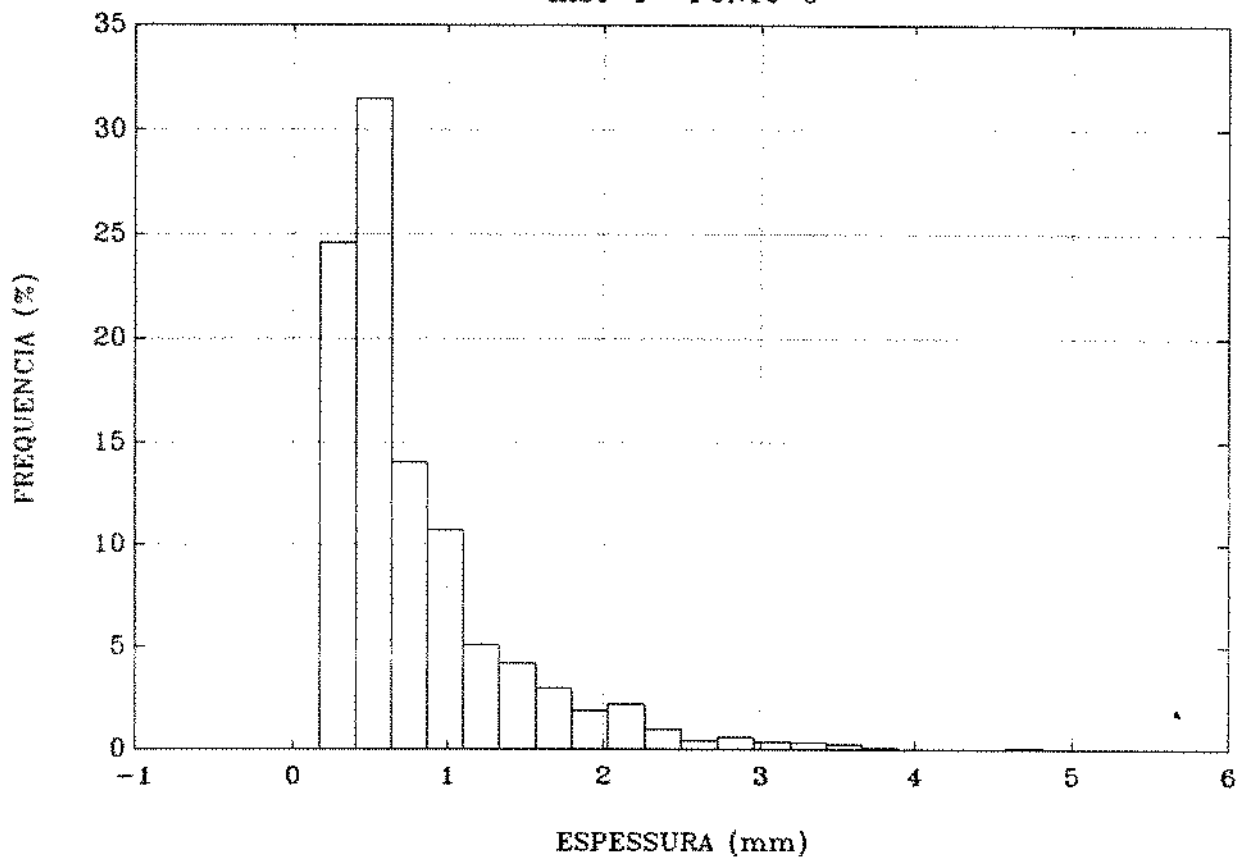
HIST-1 PONTO-3



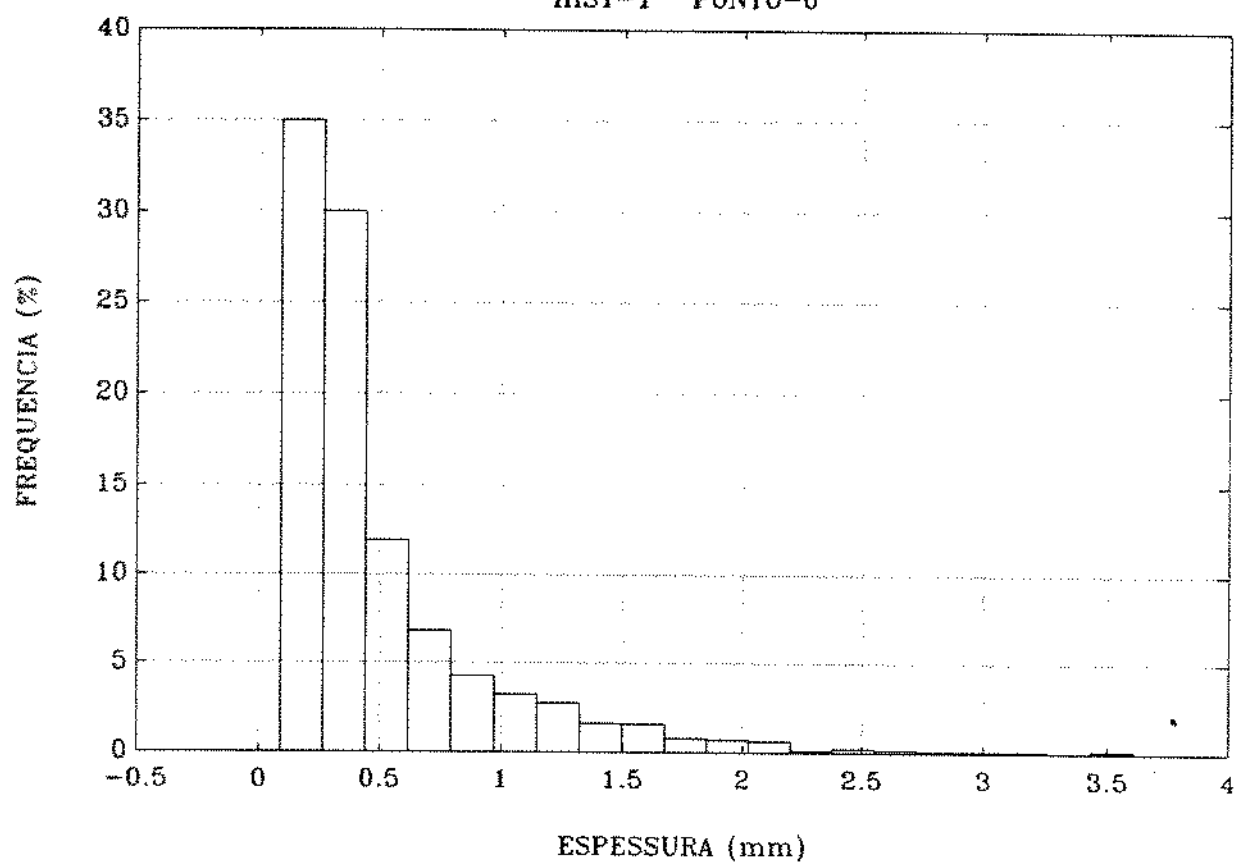
HIST-1 PONTO-4



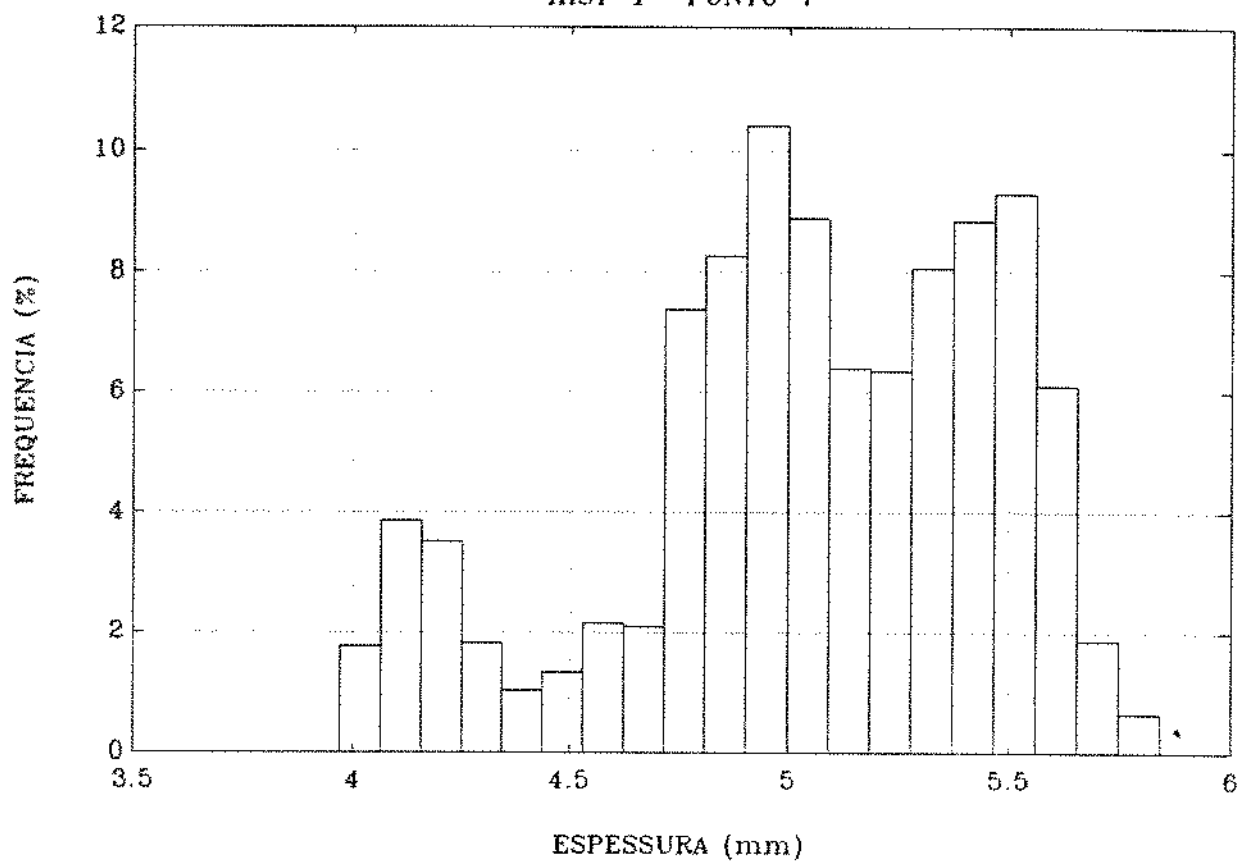
HIST-1 PONTO-5



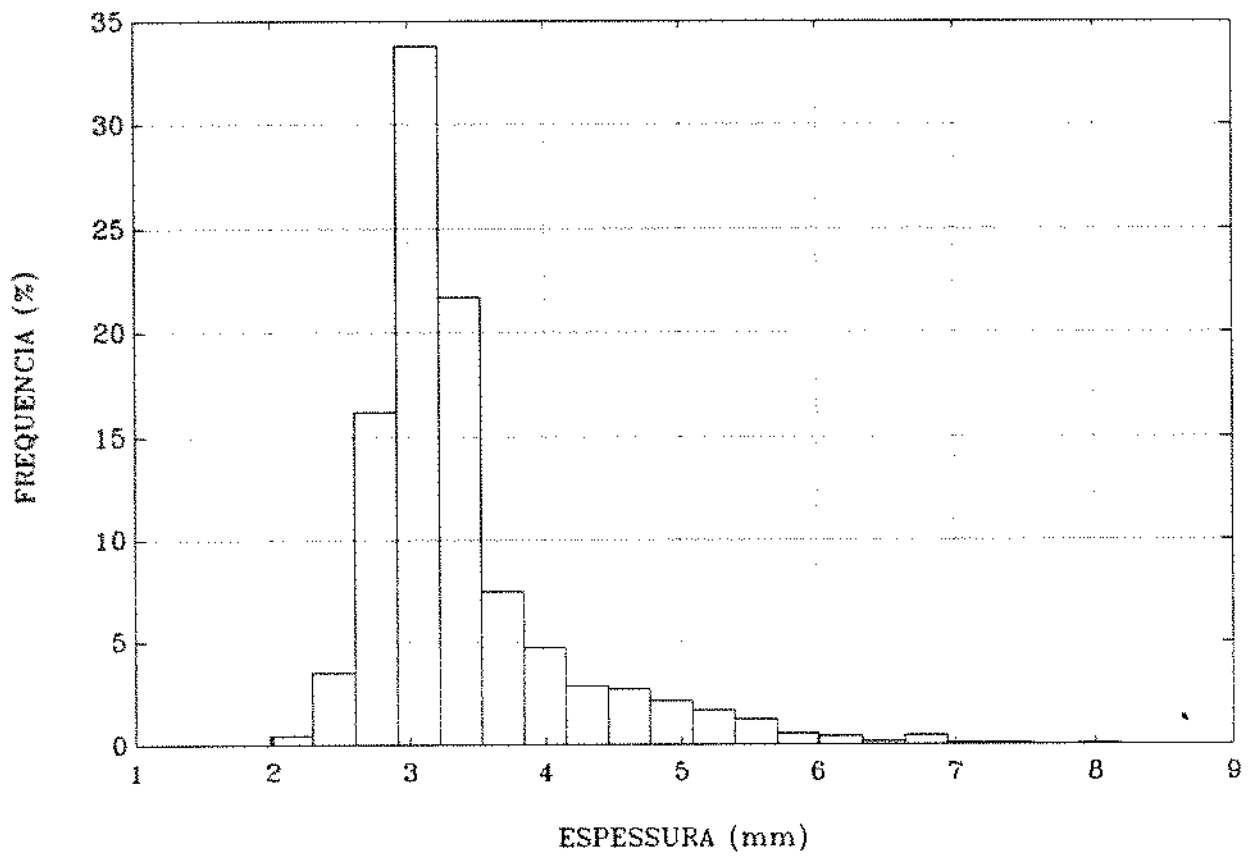
HIST-1 PONTO-6



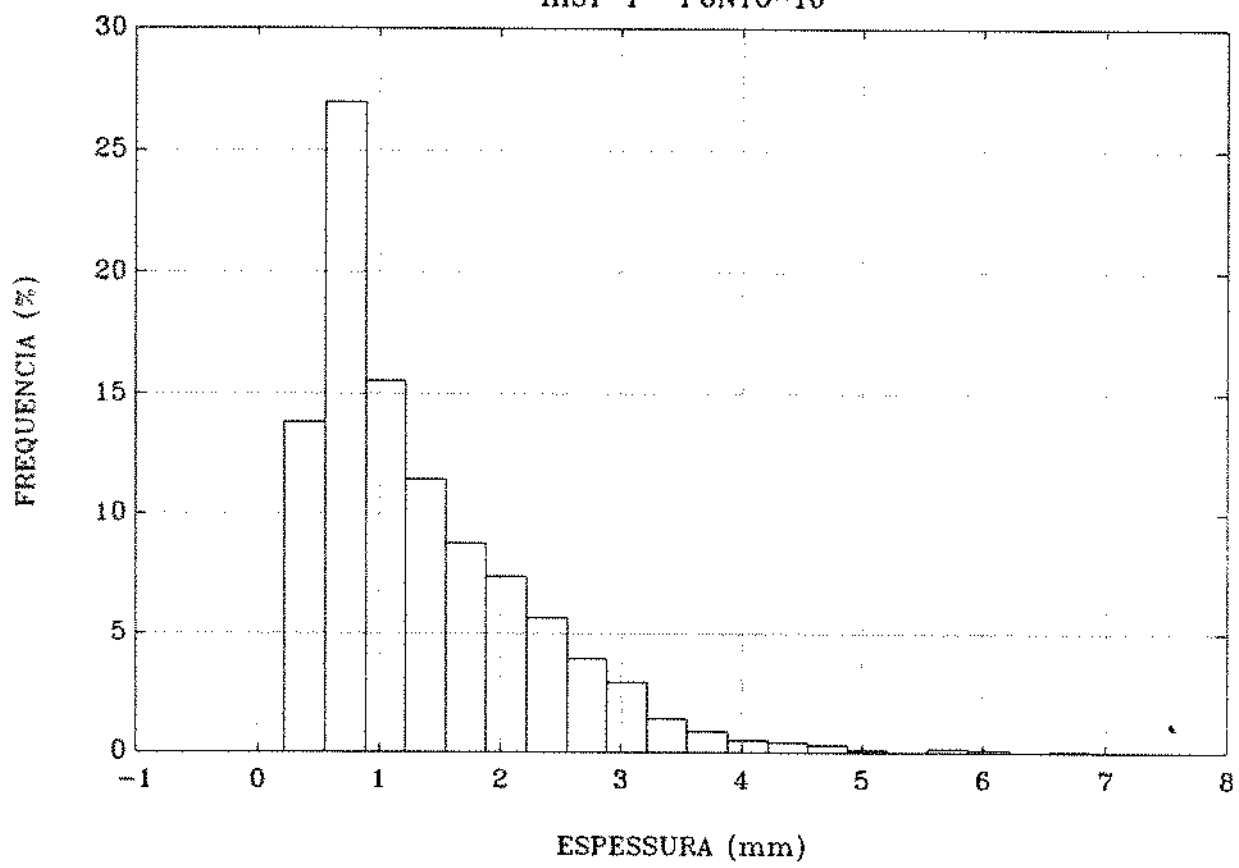
HIST-1 PONTO-7



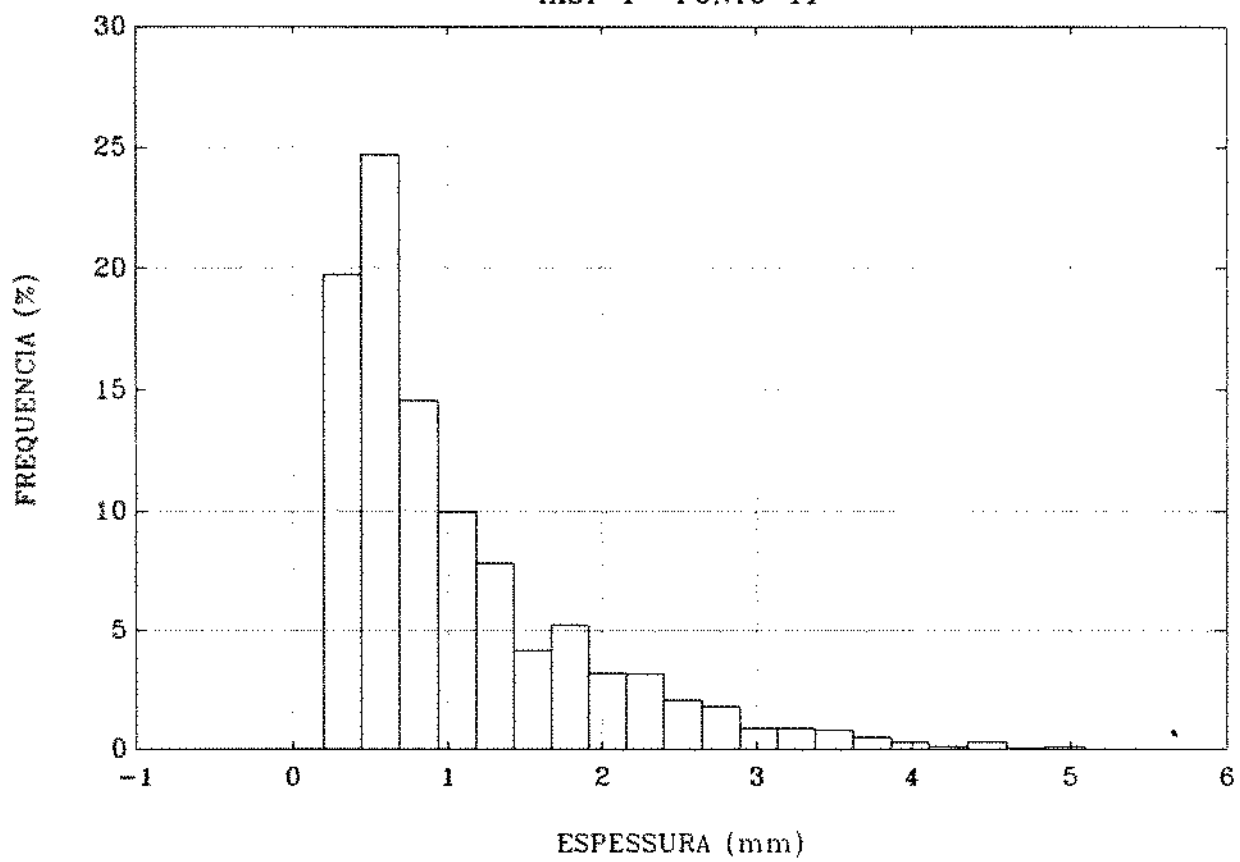
HIST-1 PONTO-8



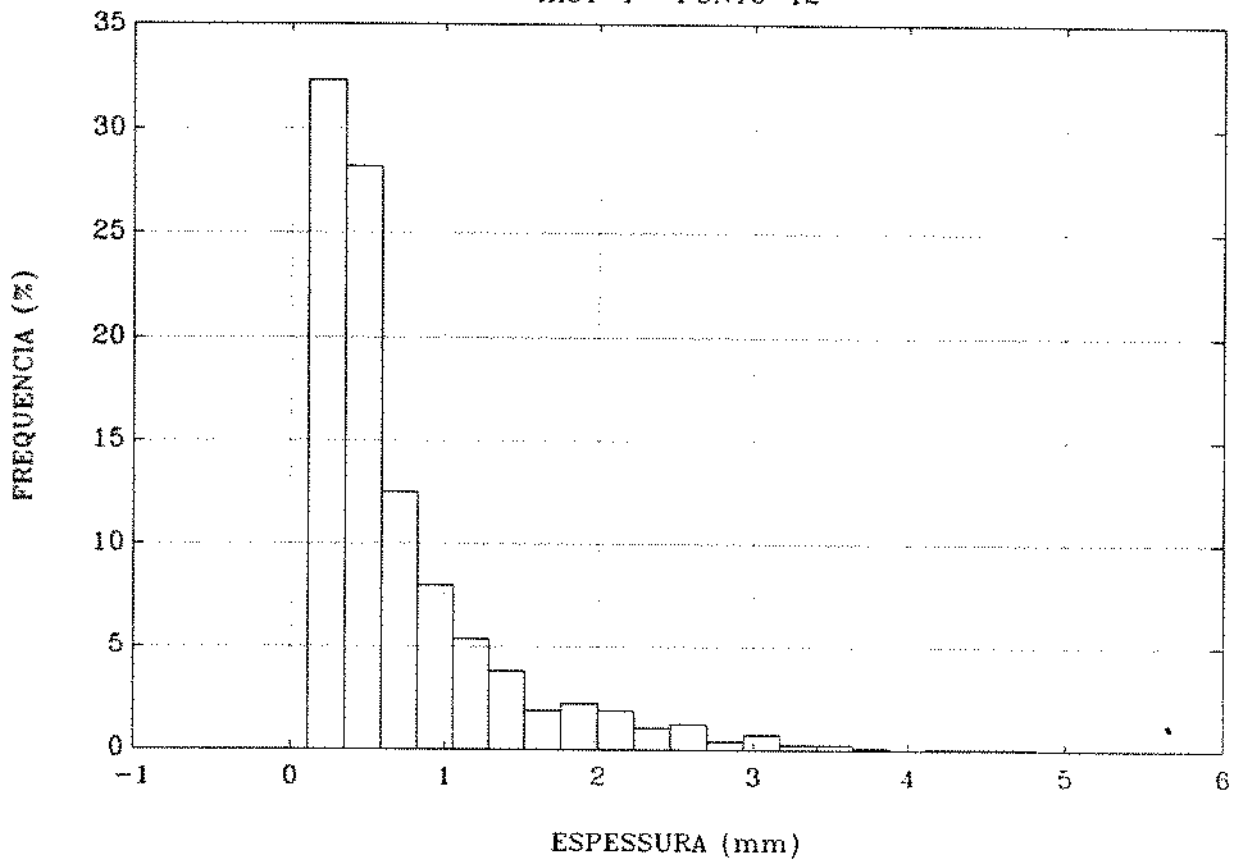
HIST-1 PONTO-10



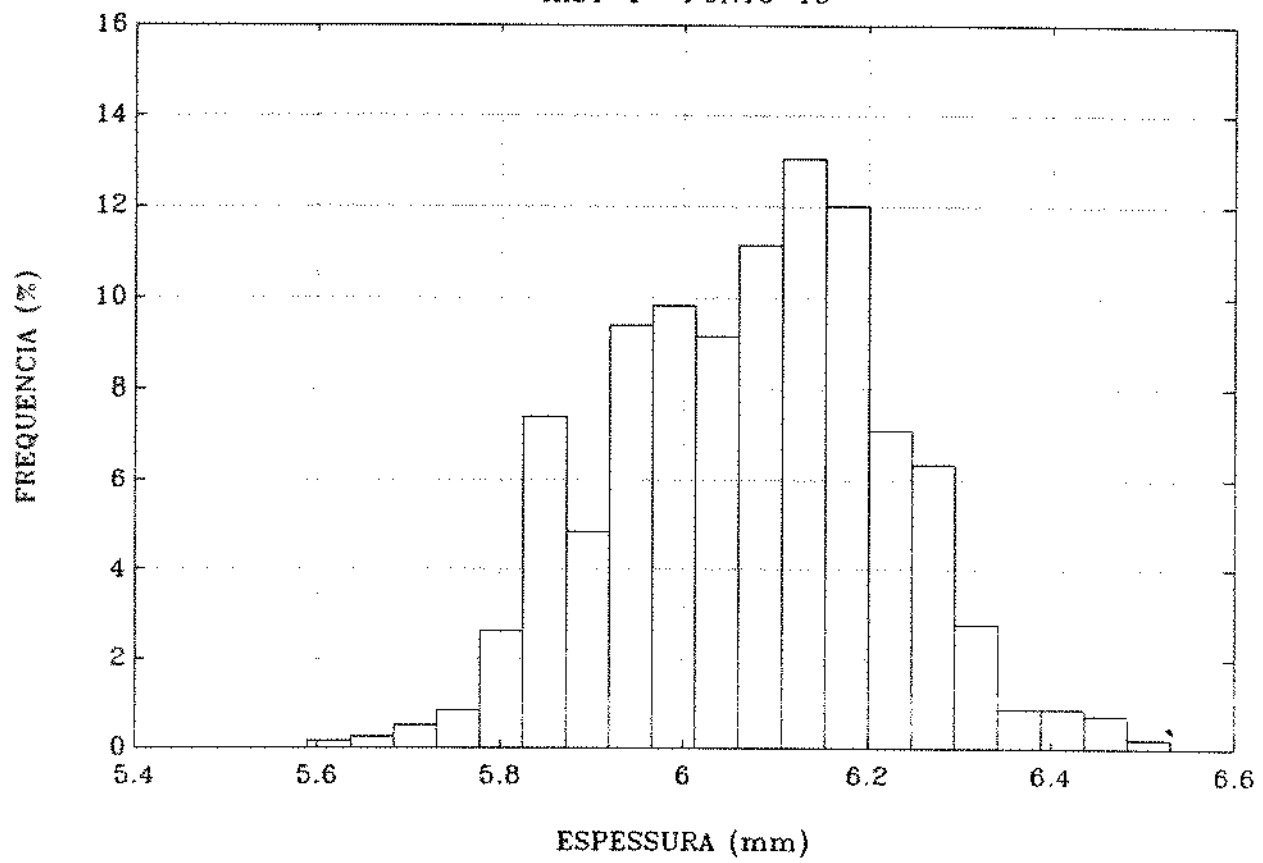
HIST-1 PONTO-11



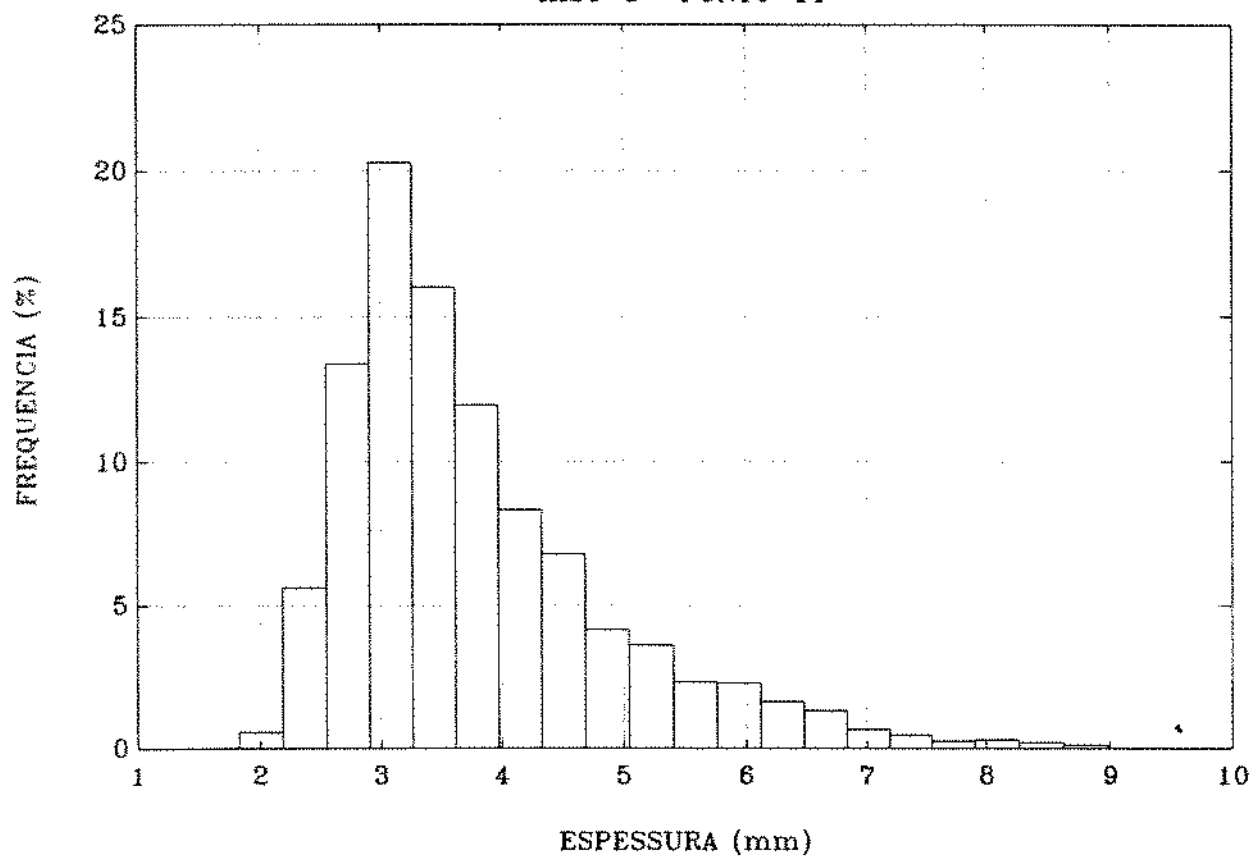
HIST-1 PONTO-12



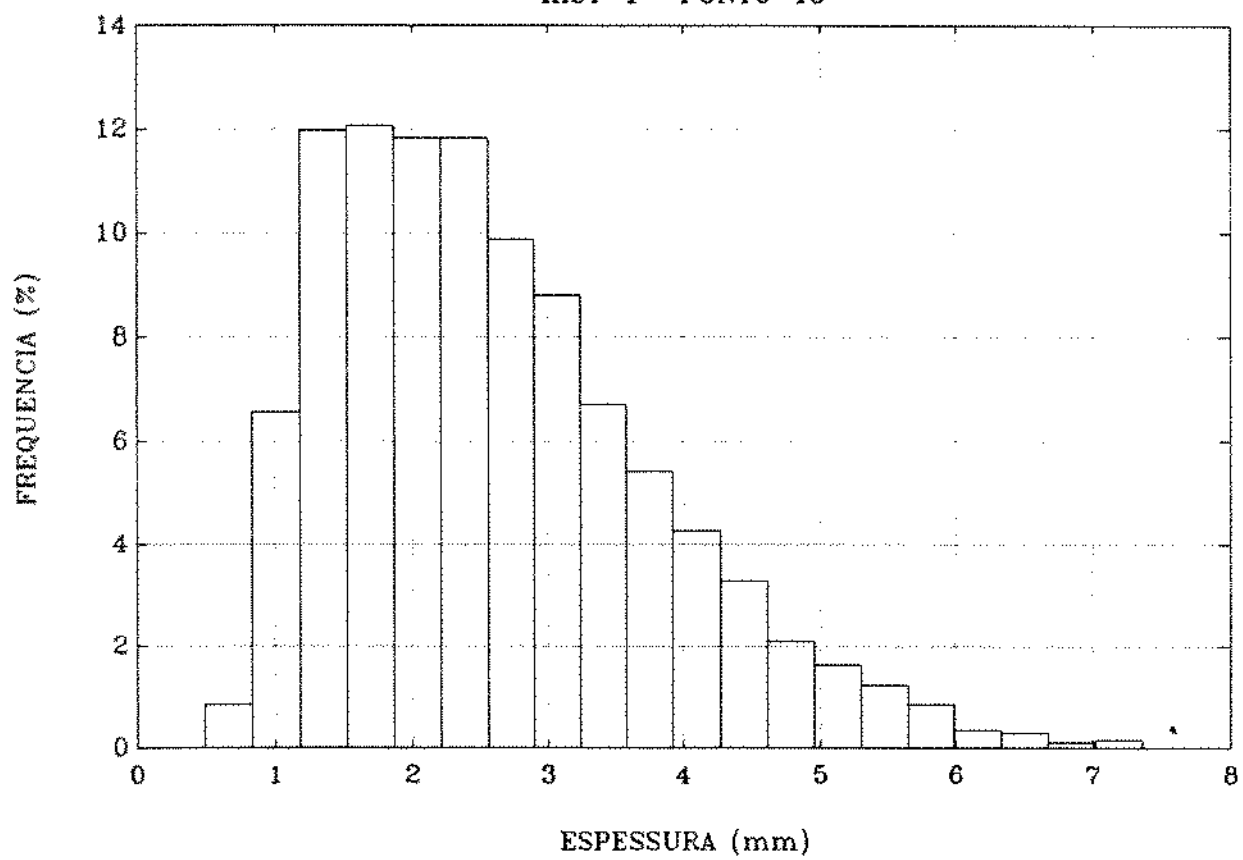
HIST-1 PONTO-13



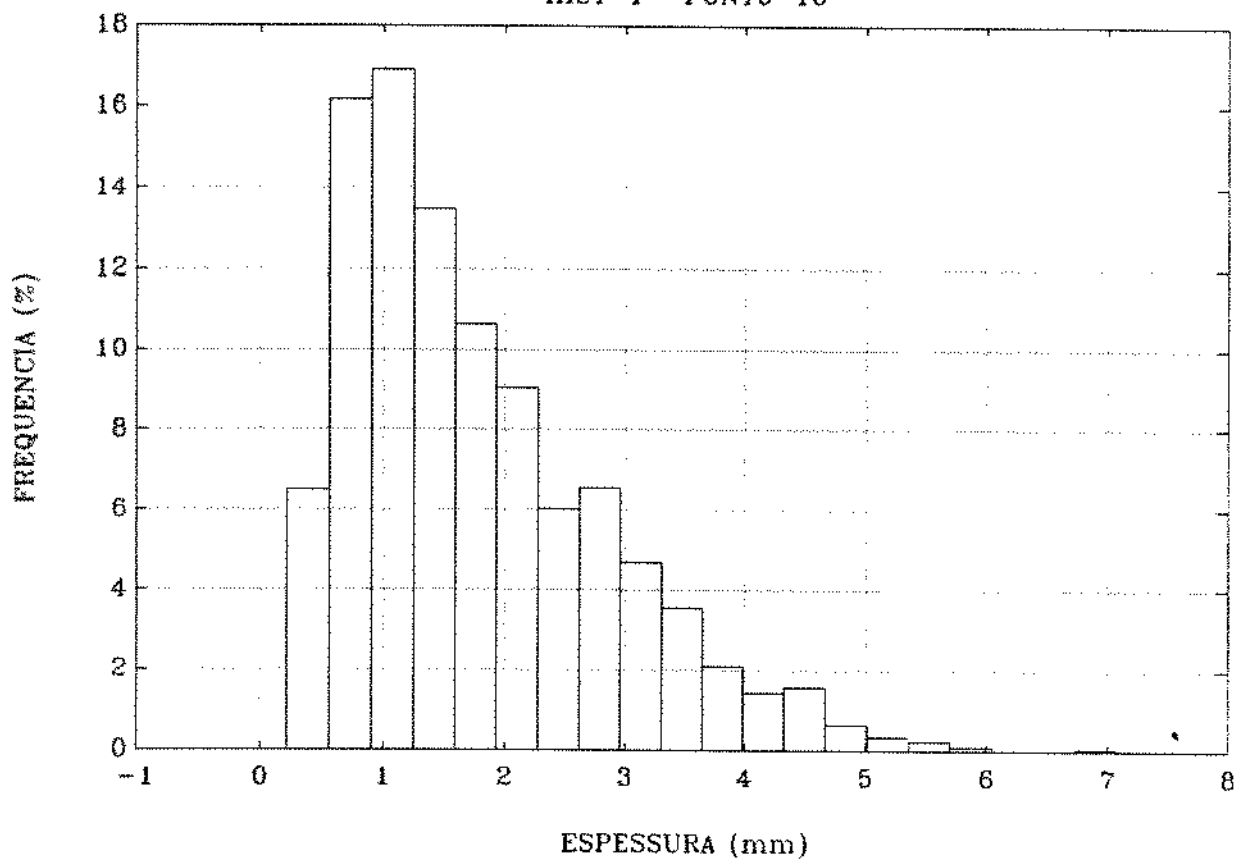
HIST-1 PONTO-14



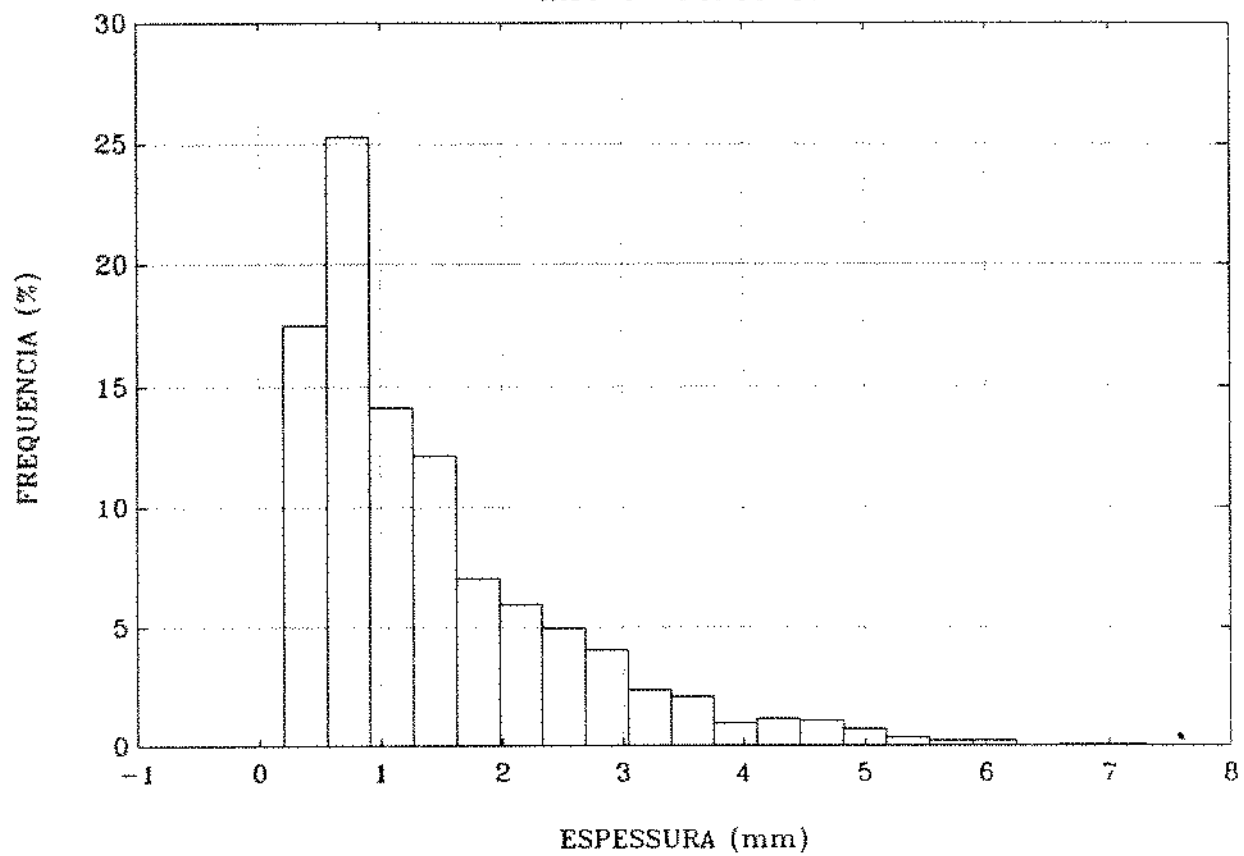
HIST-1 PONTO-15



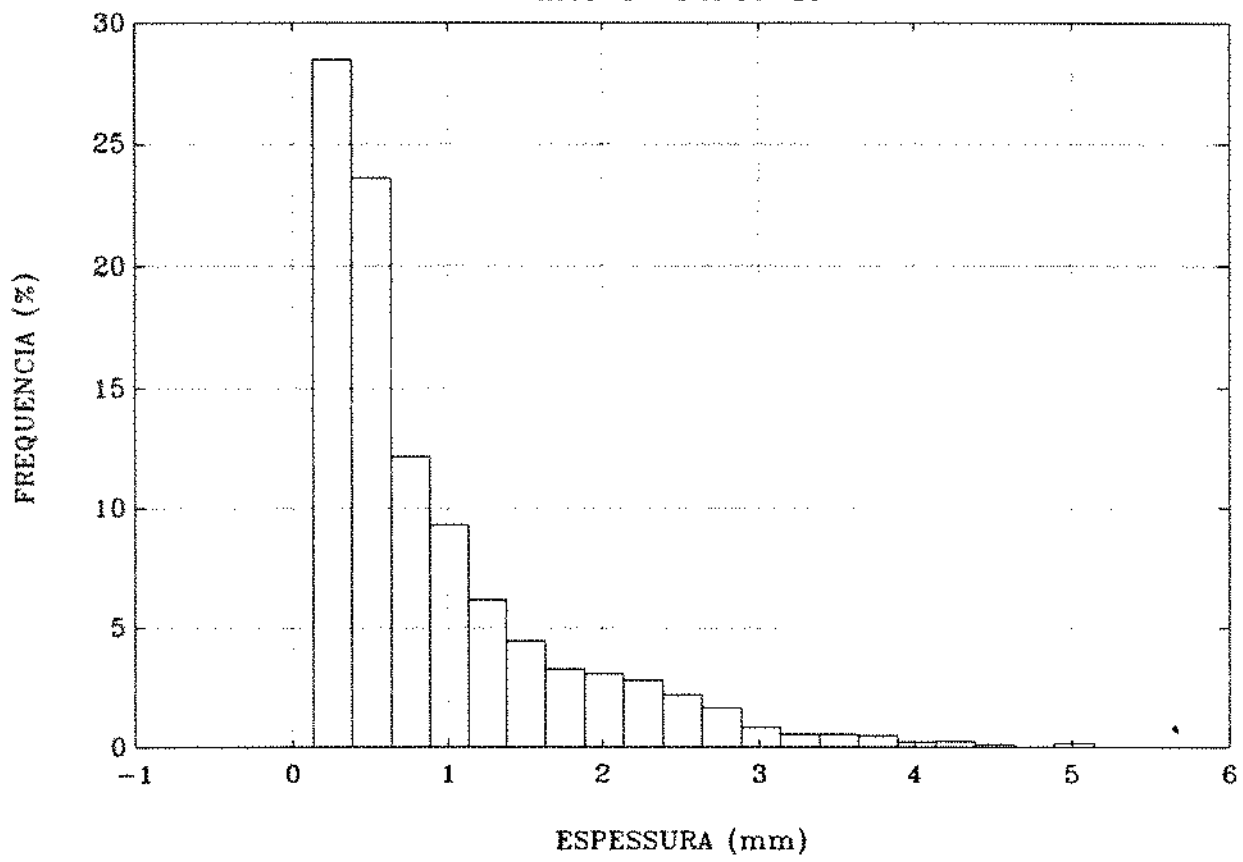
HIST-1 PONTO-16



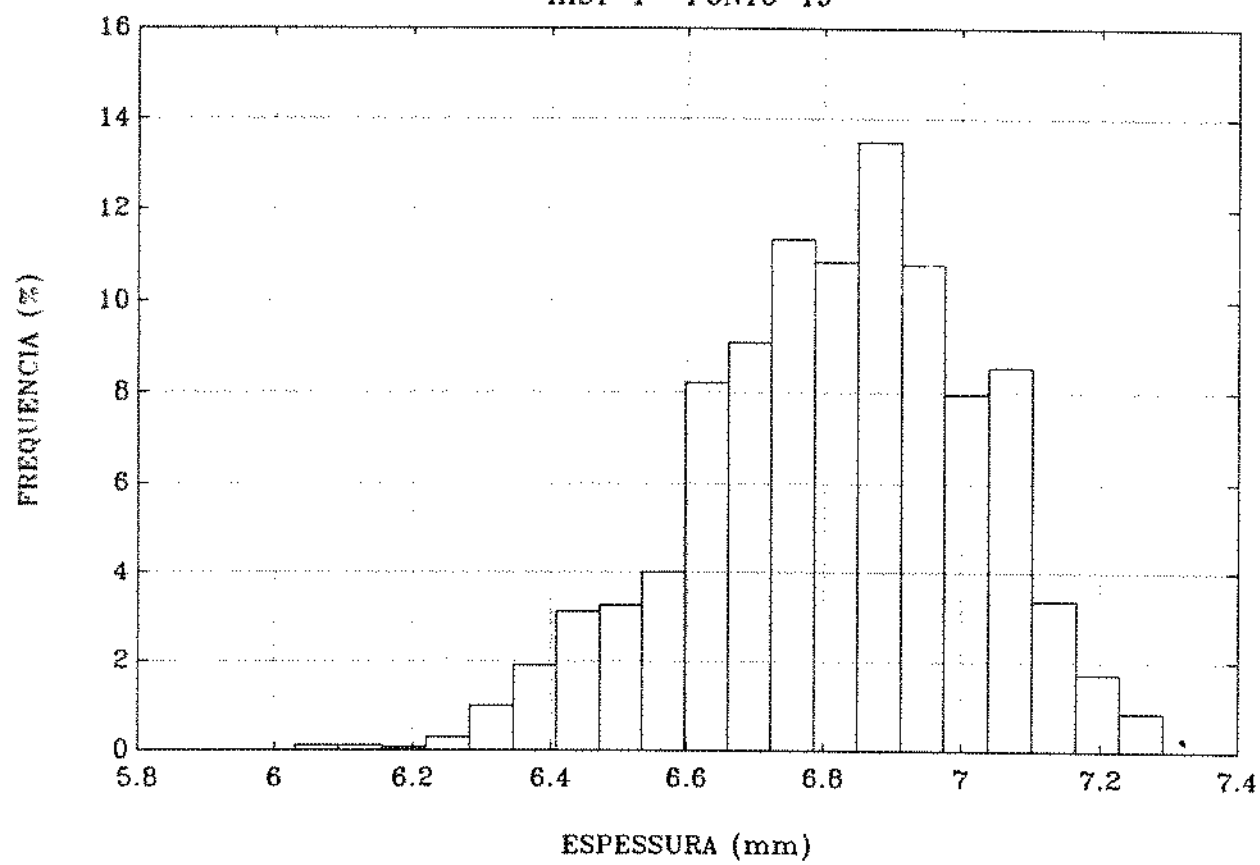
HIST-1 PONTO-17



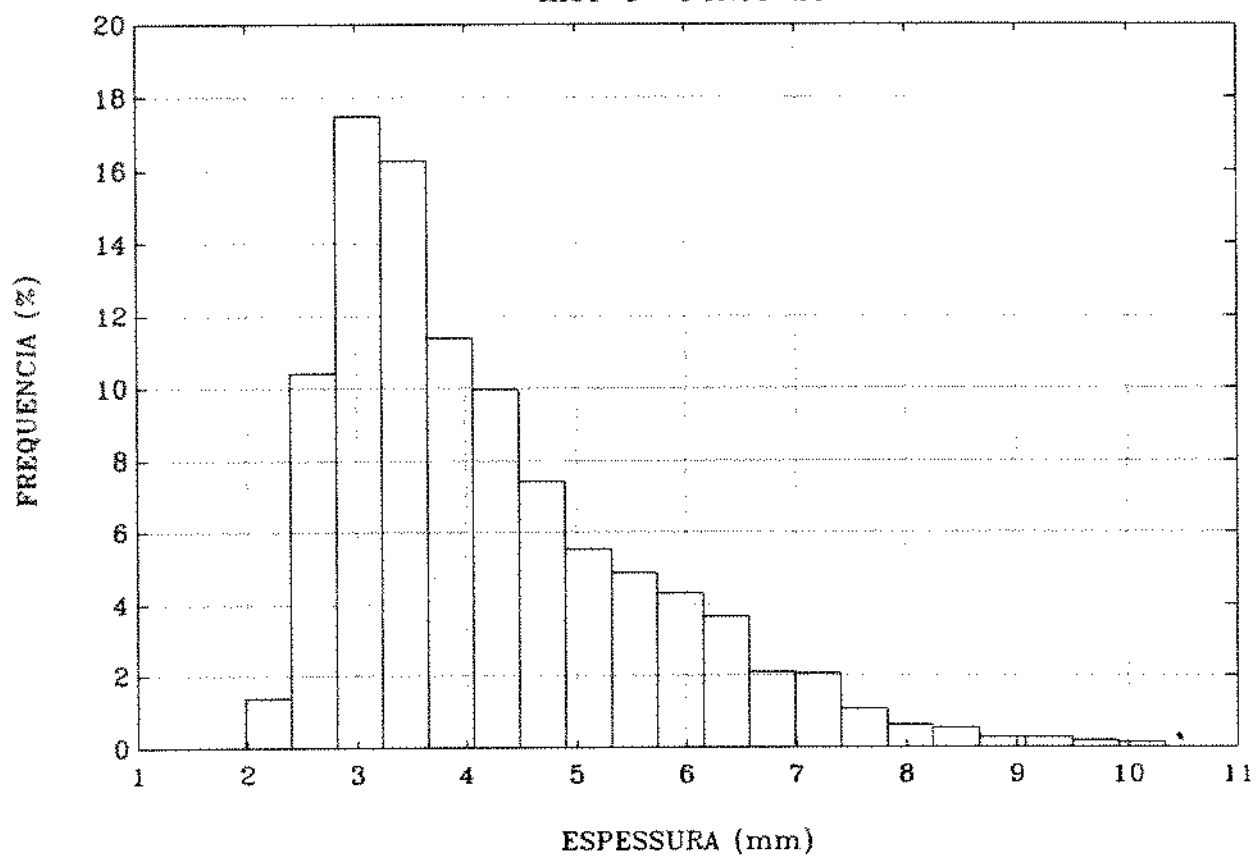
HIST-1 PONTO-18



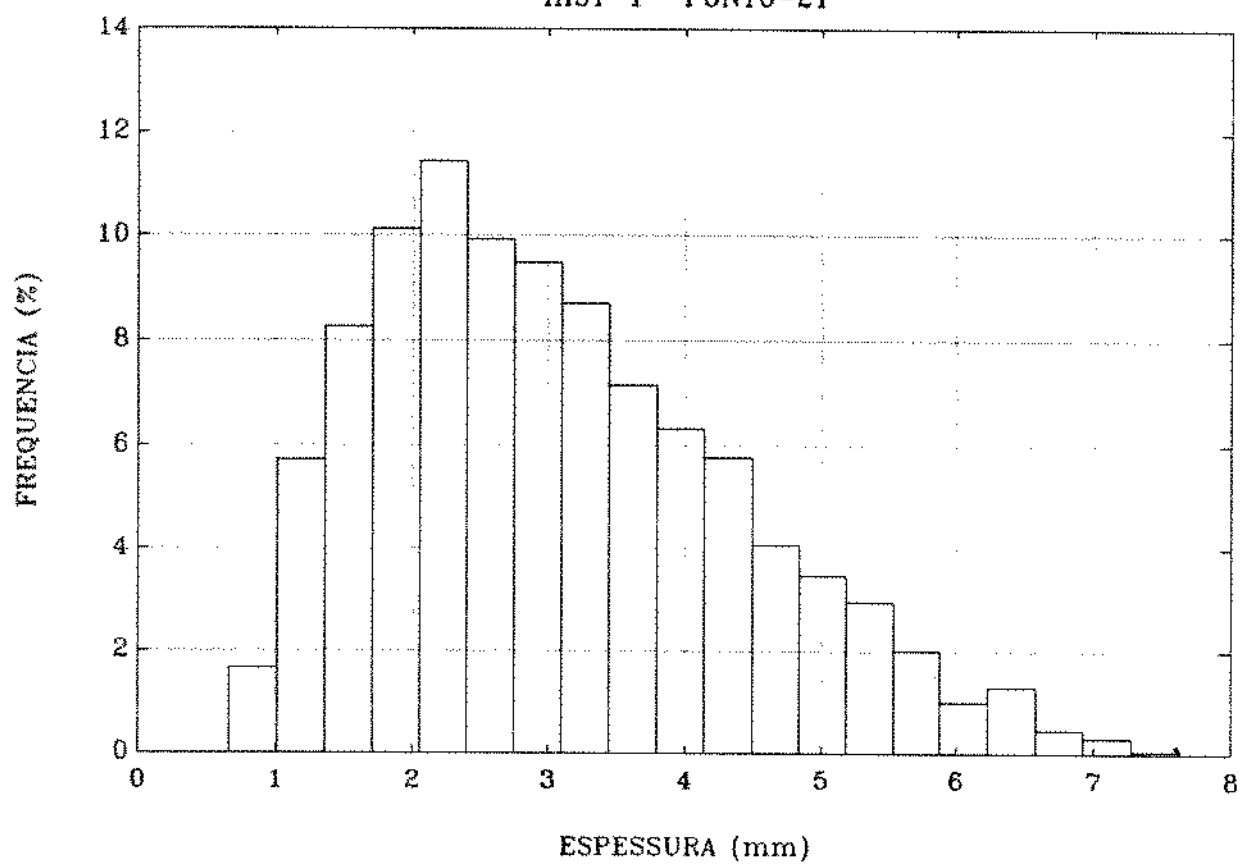
HIST-1 PONTO-19



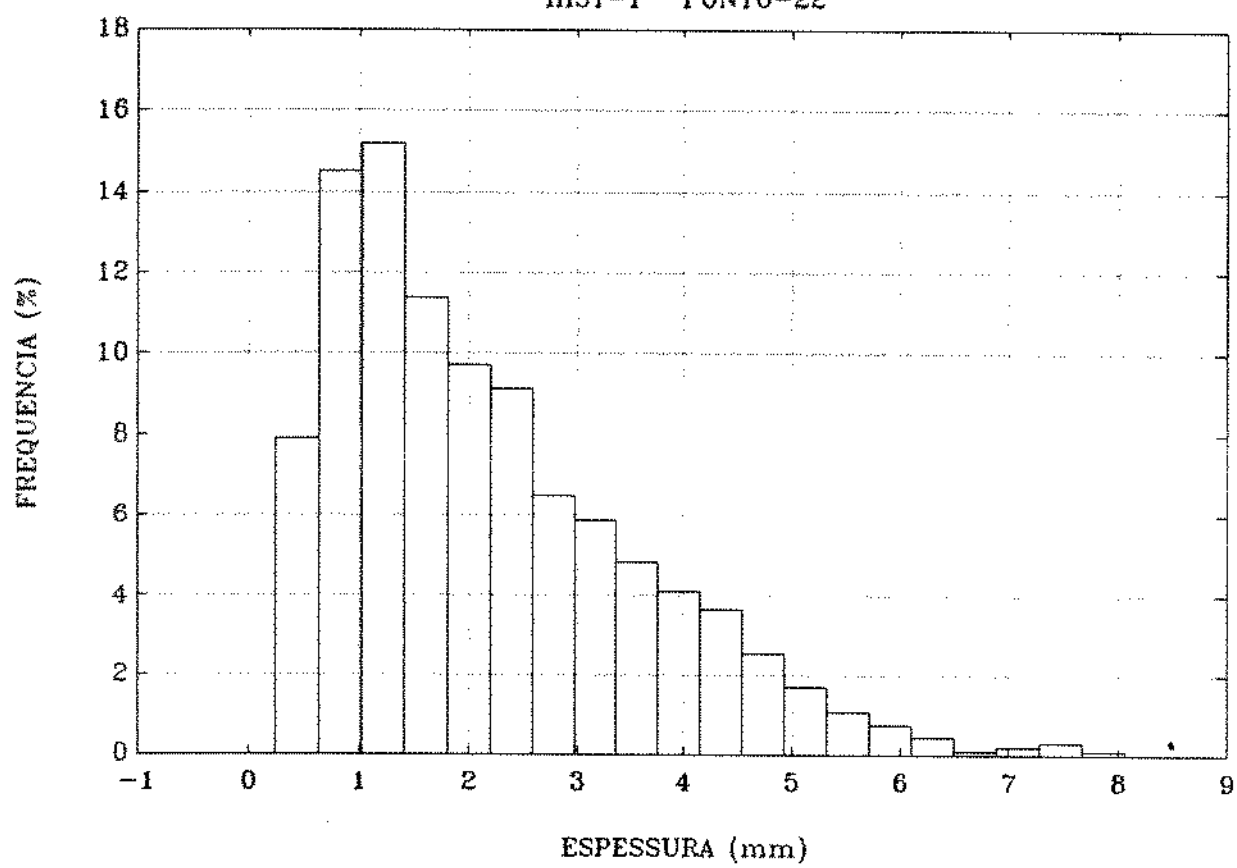
HIST-1 PONTO-20



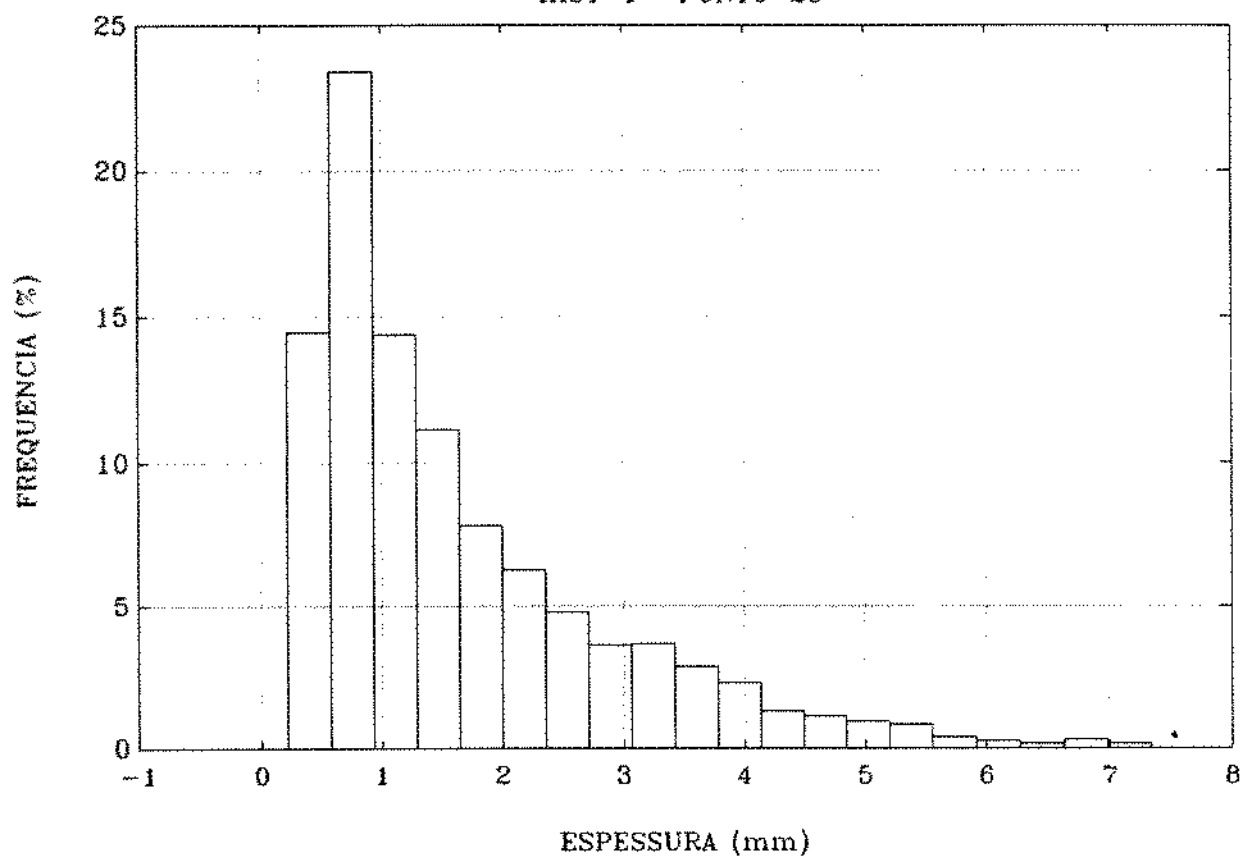
HIST-1 PONTO-21



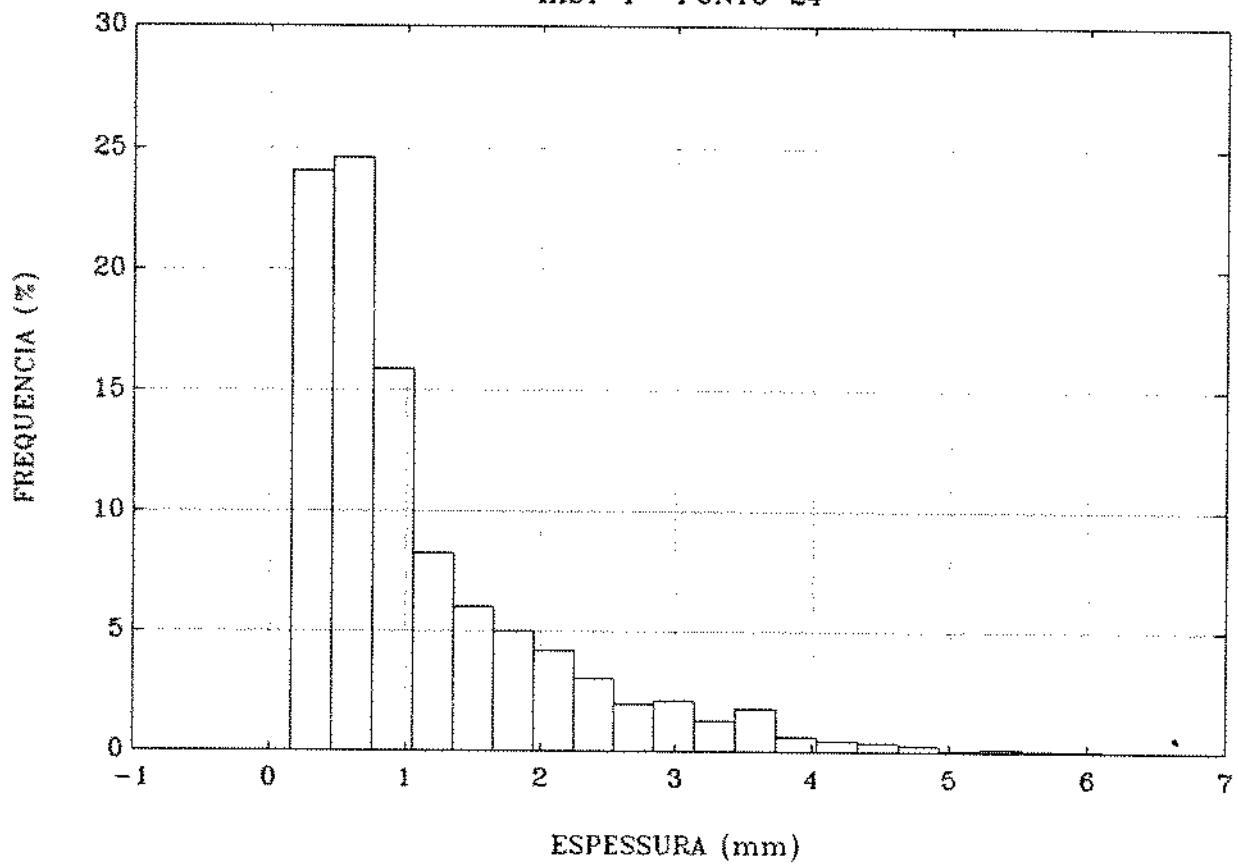
HIST-1 PONTO-22



HIST-1 PONTO-23

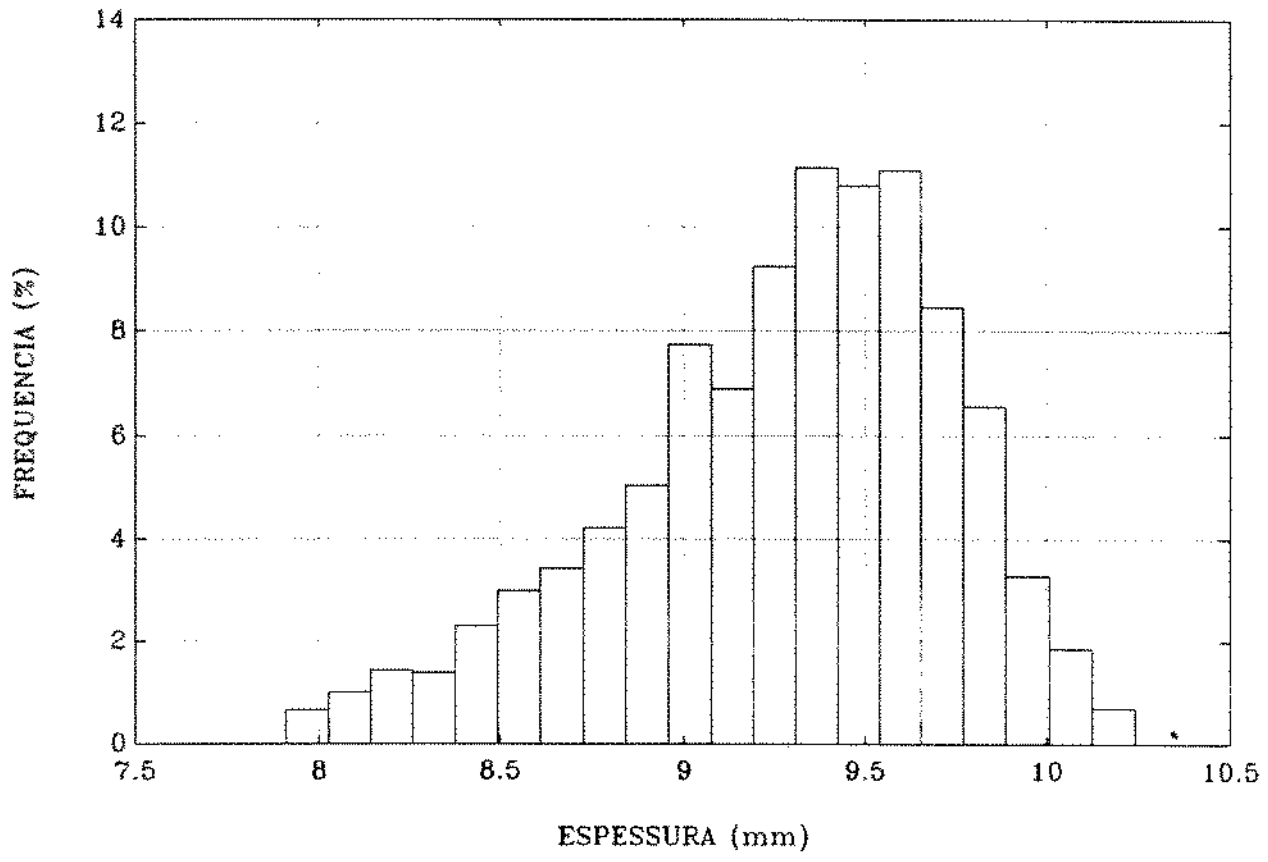


HIST-1 PONTO-24

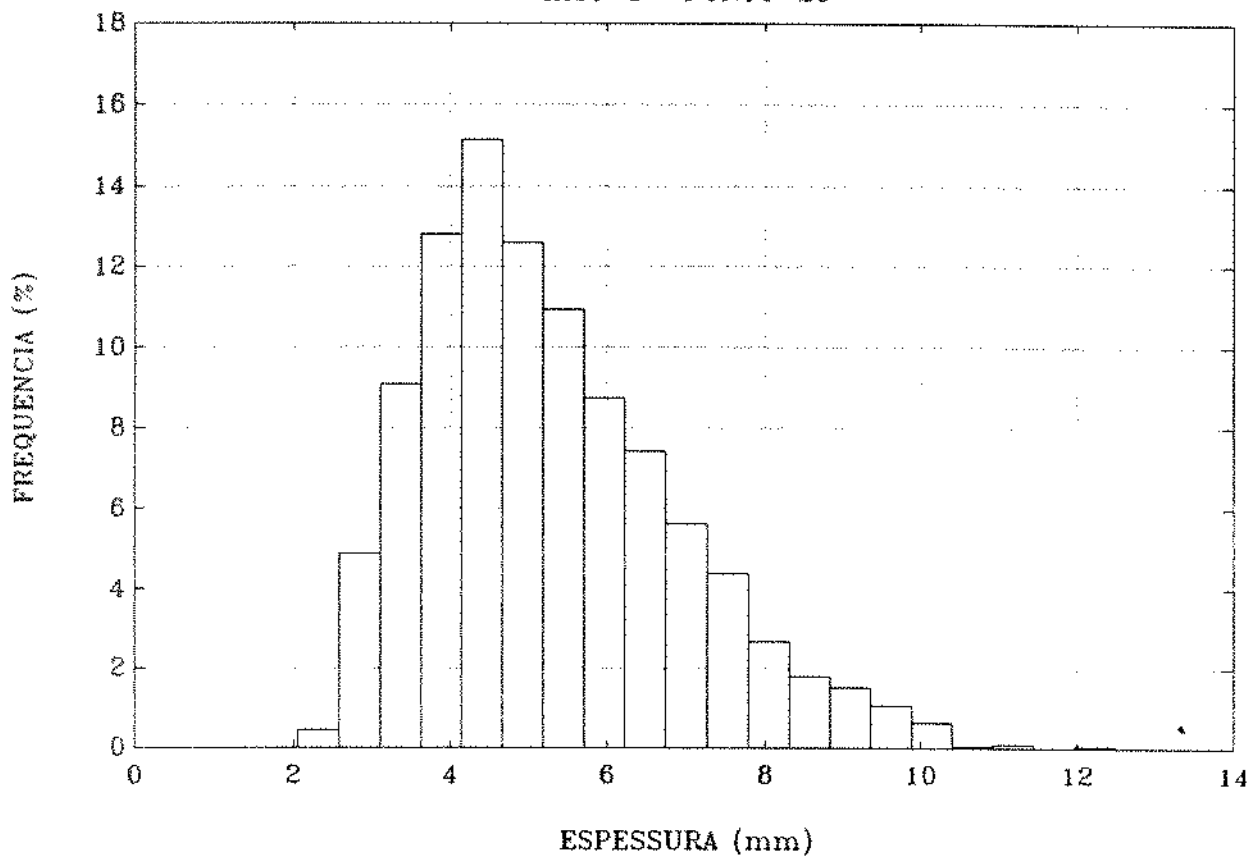


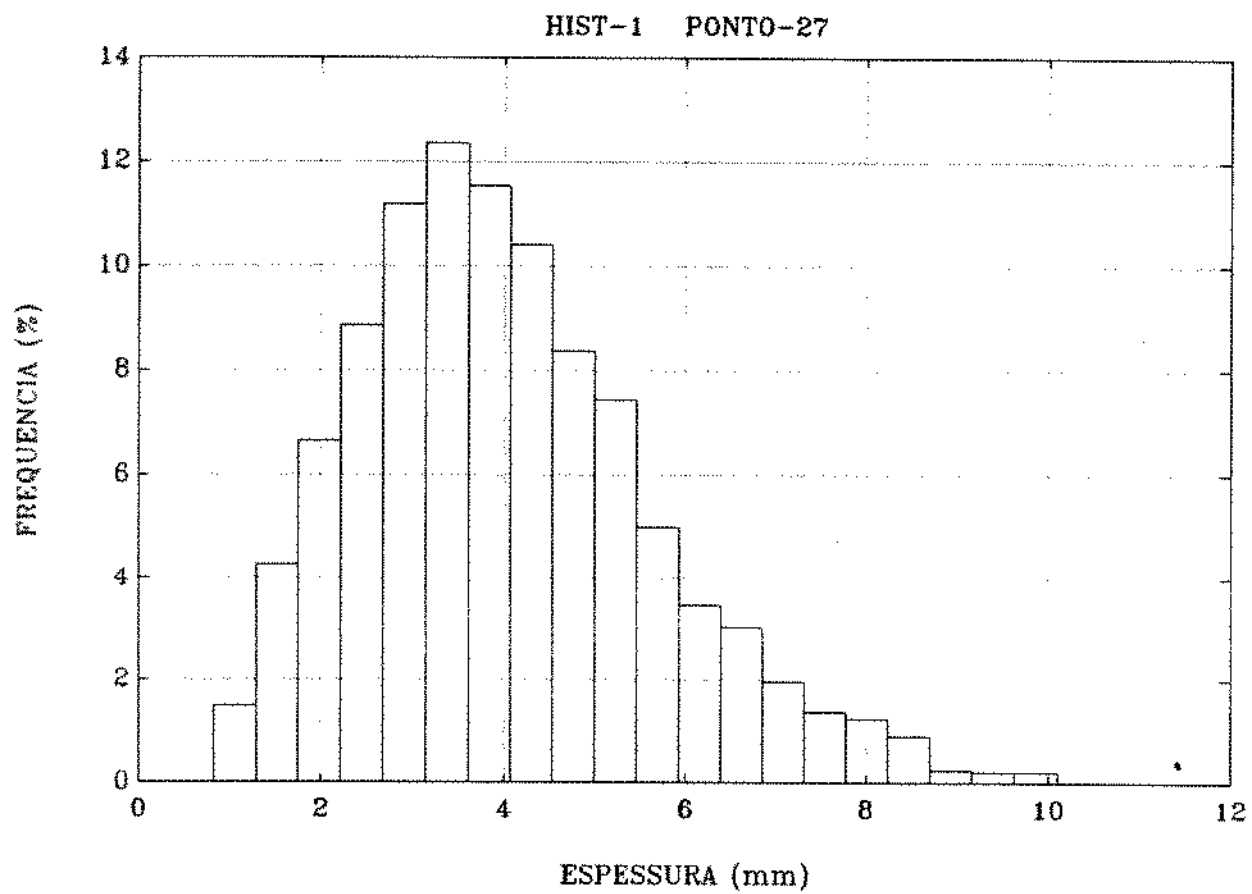
22

HIST-1 PONTO-25

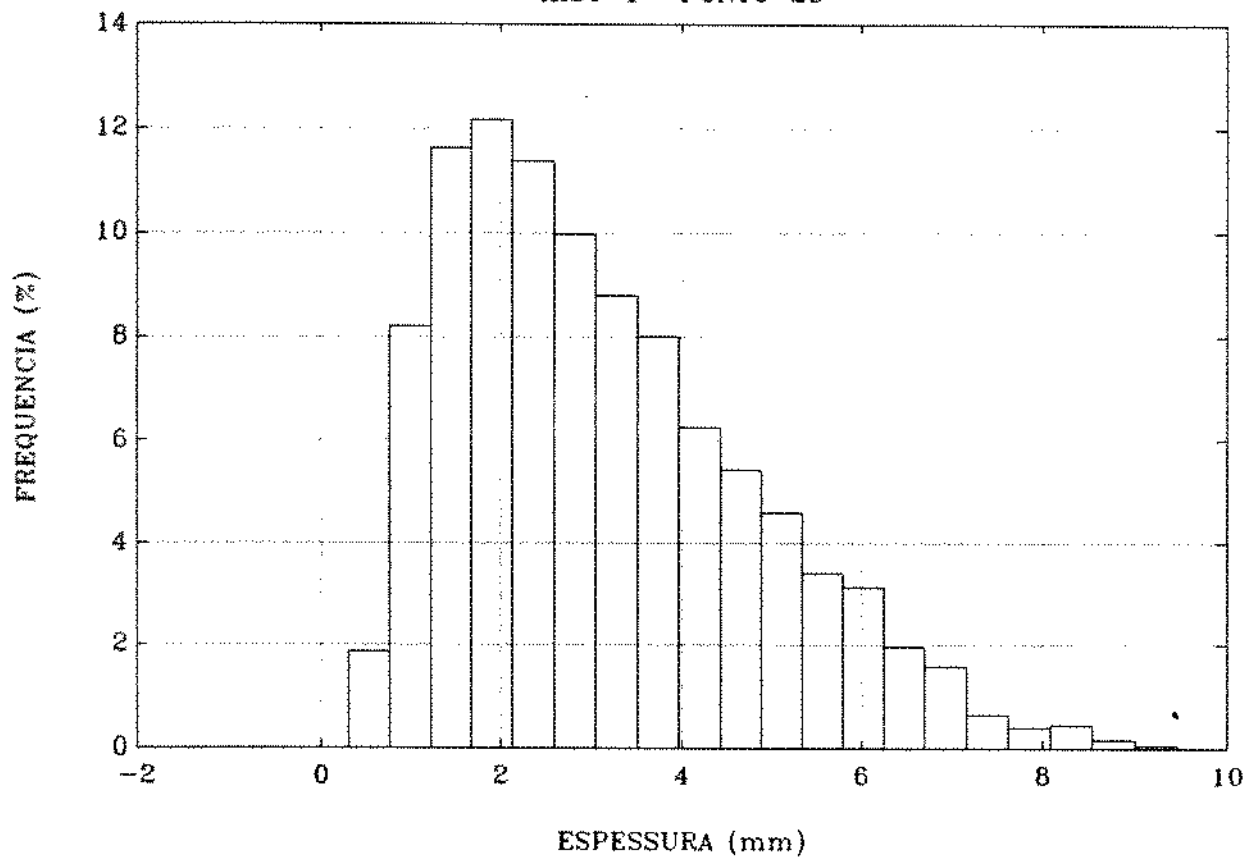


HIST-1 PONTO-26

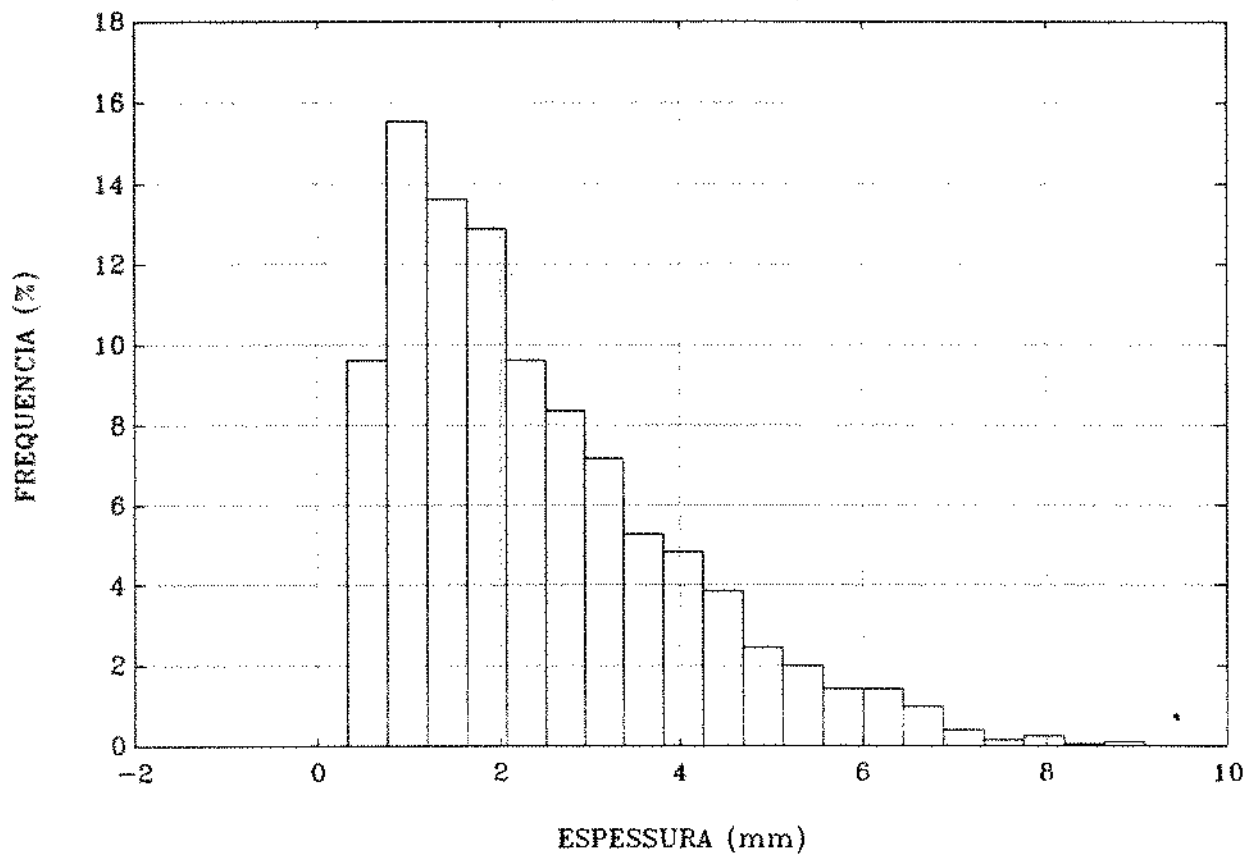




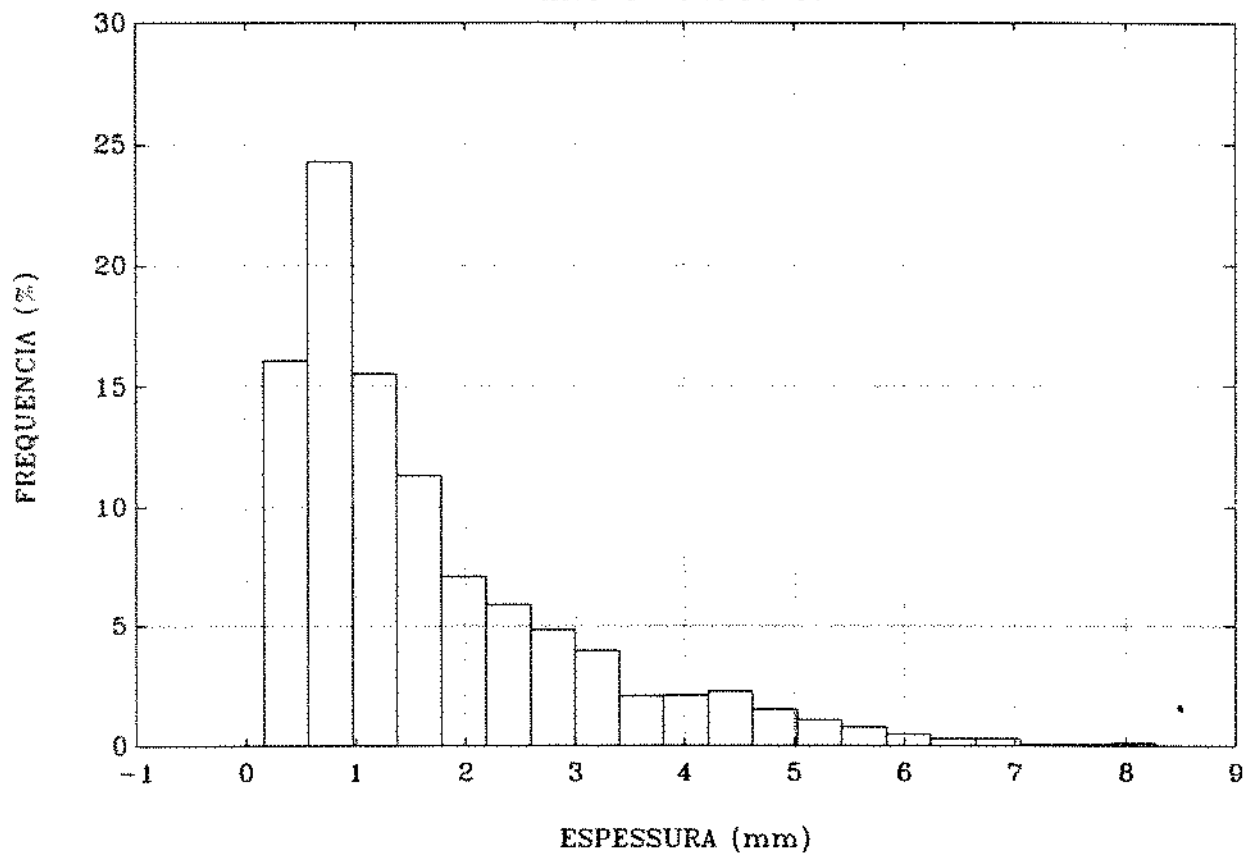
HIST-1 PONTO-28



HIST-1 PONTO-29



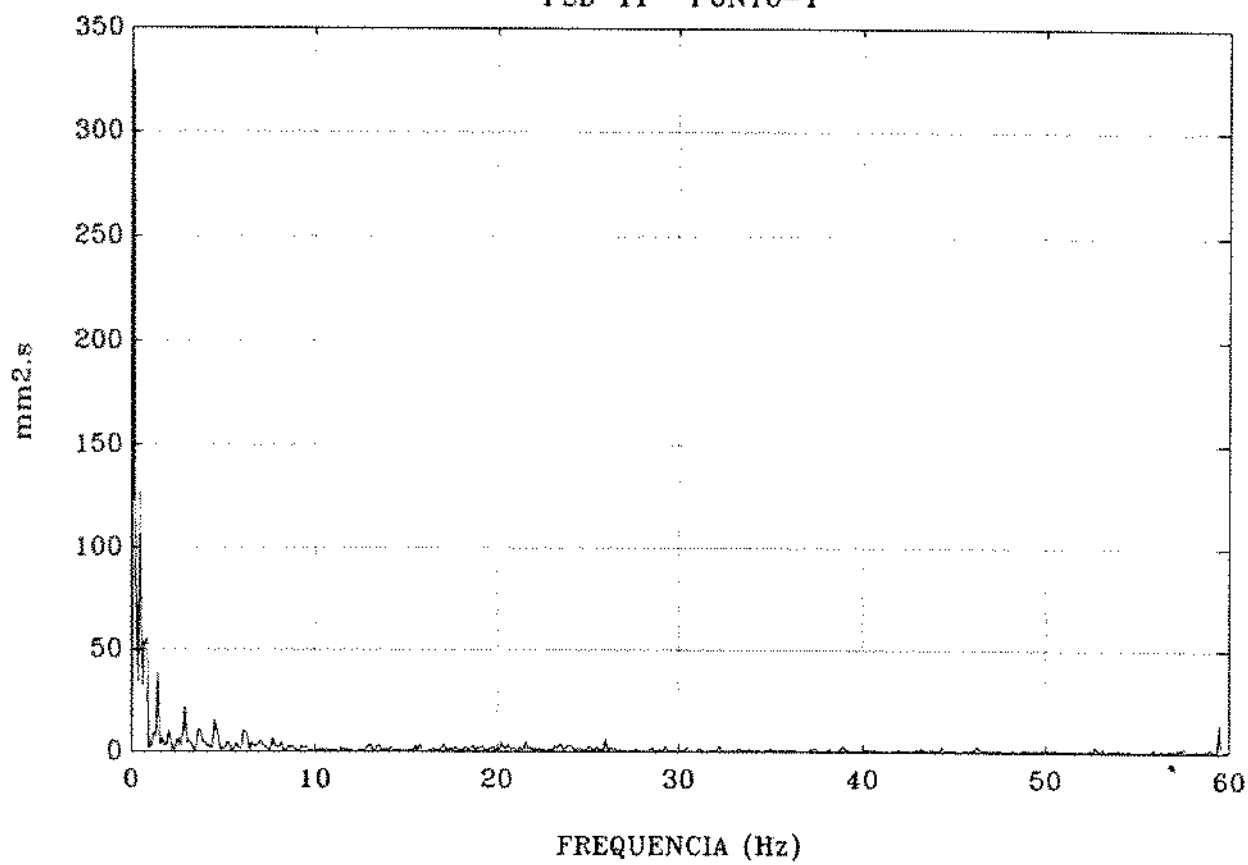
HIST-1 PONTO-30

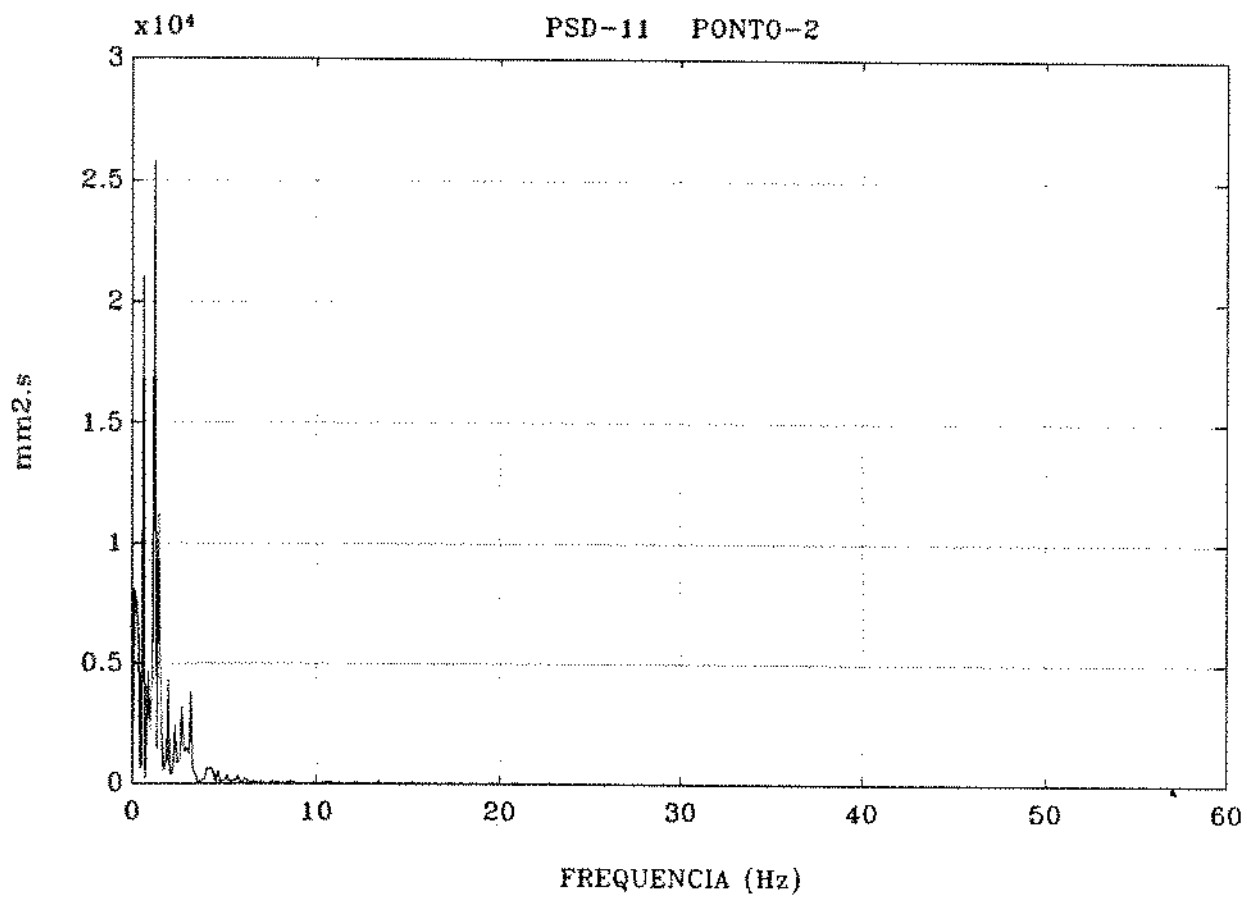


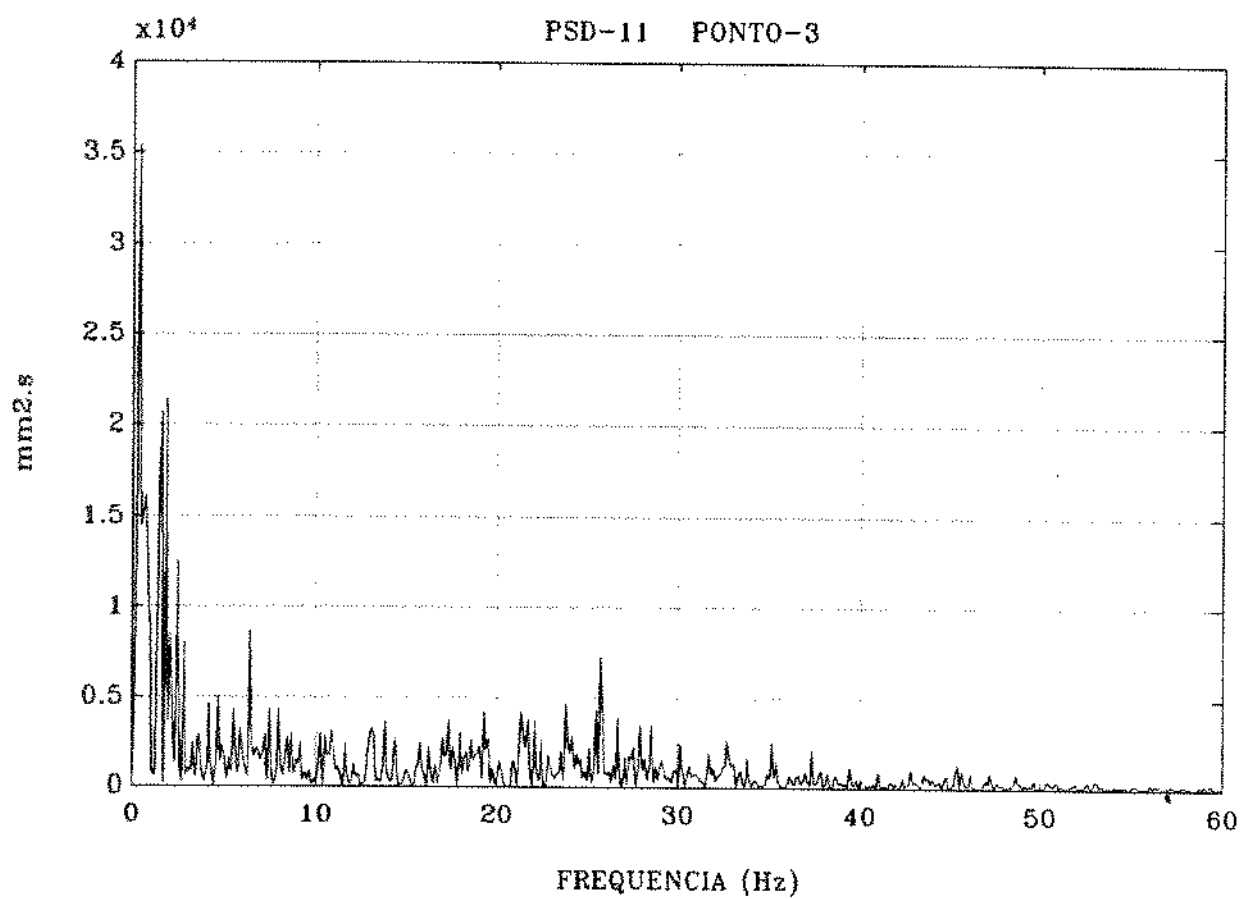
VI.3 - FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

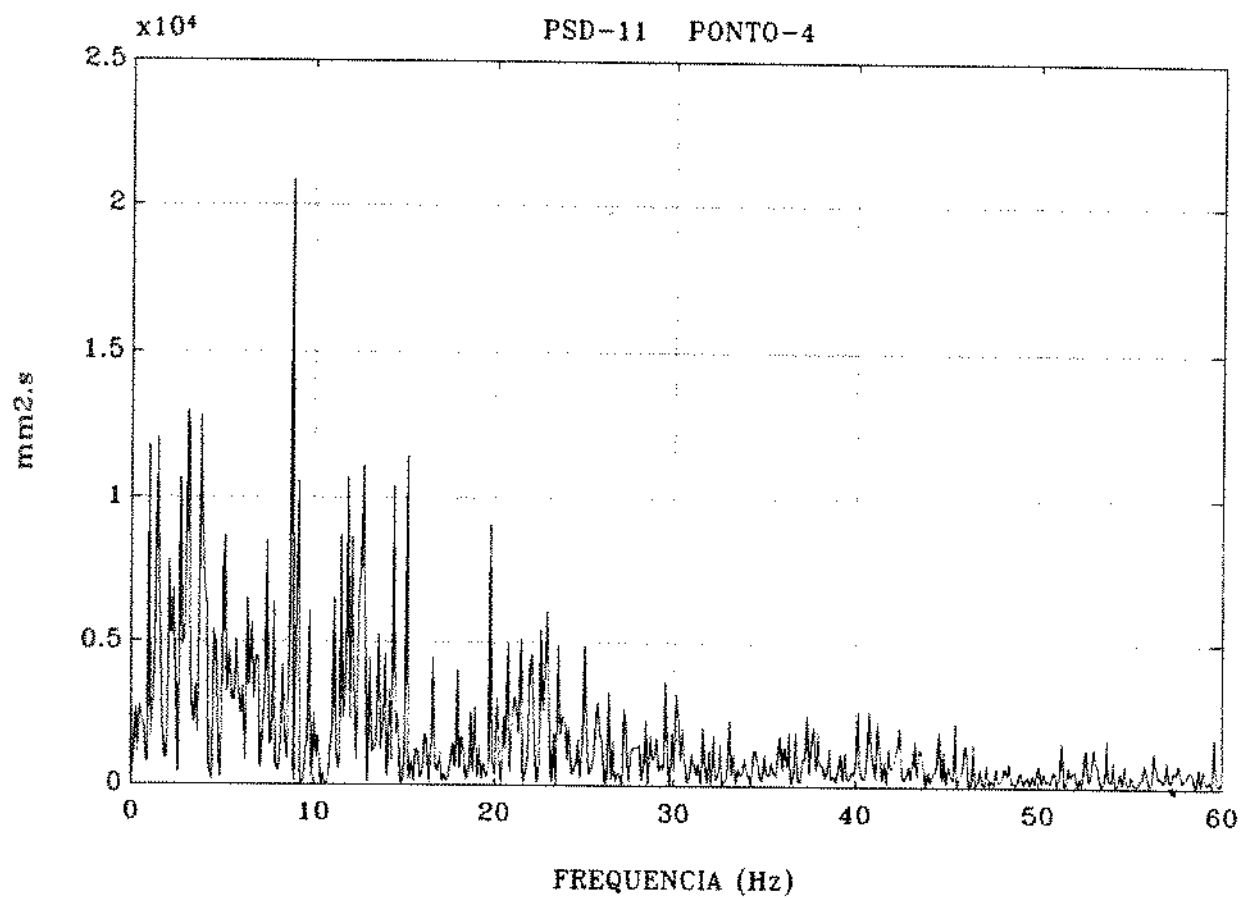
(SONDA 1)

PSD-11 PONTO-1

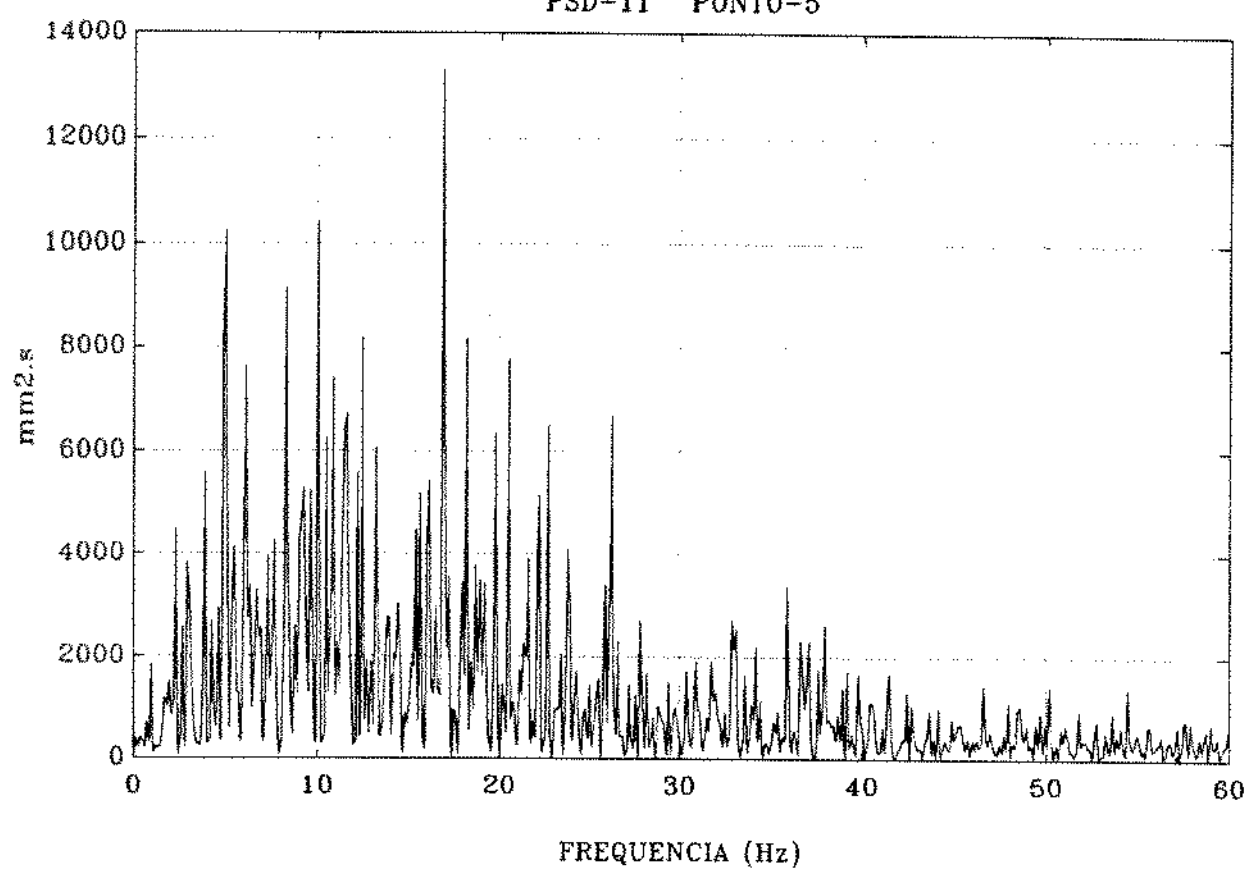




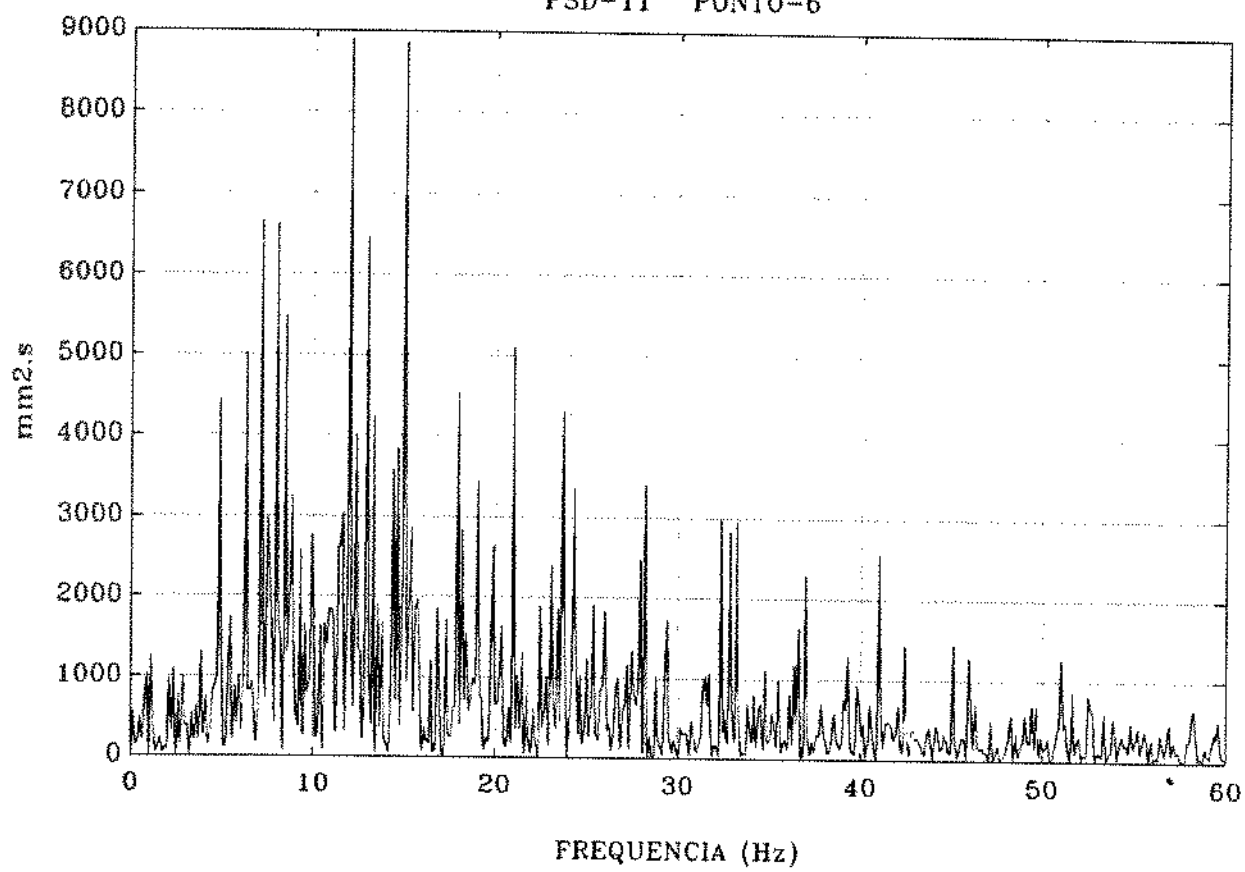


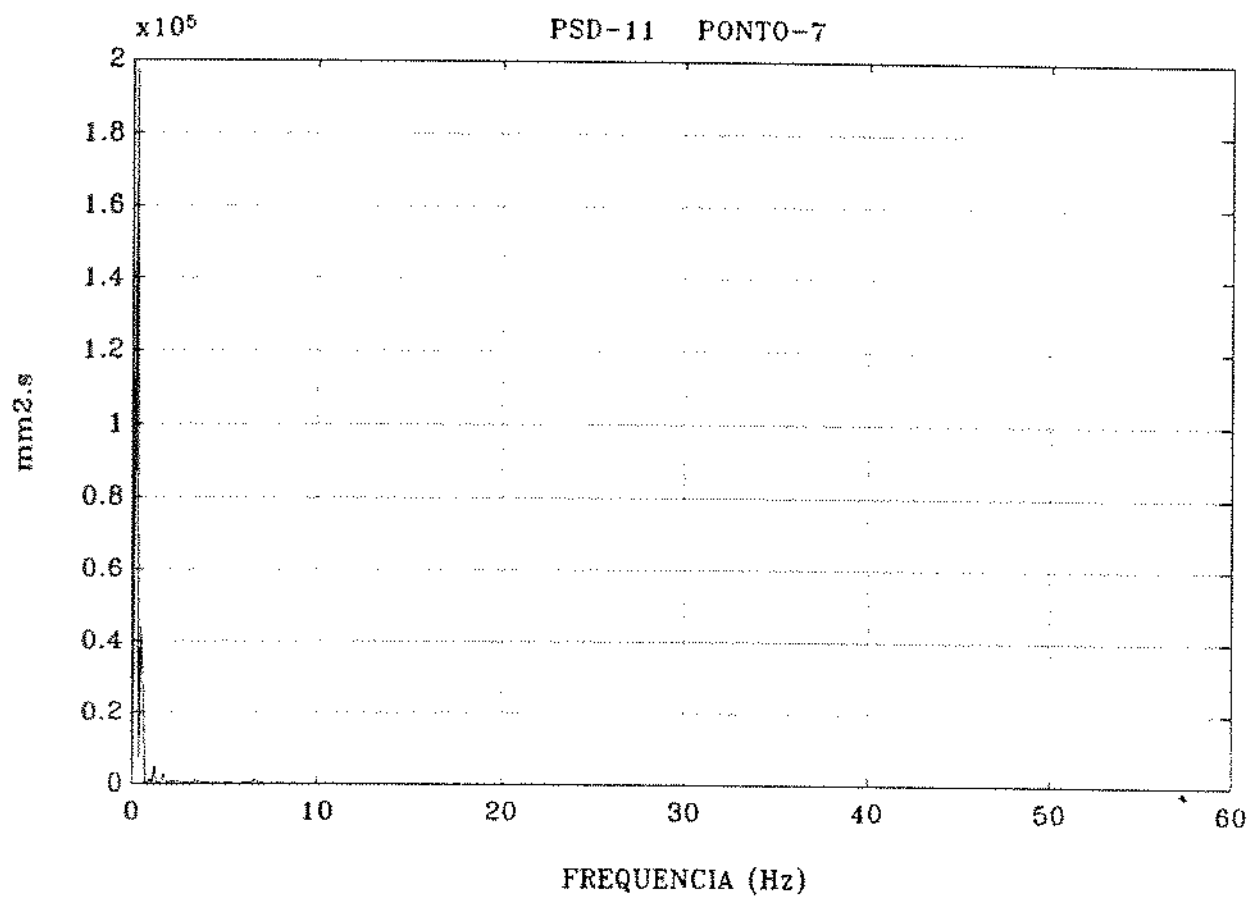


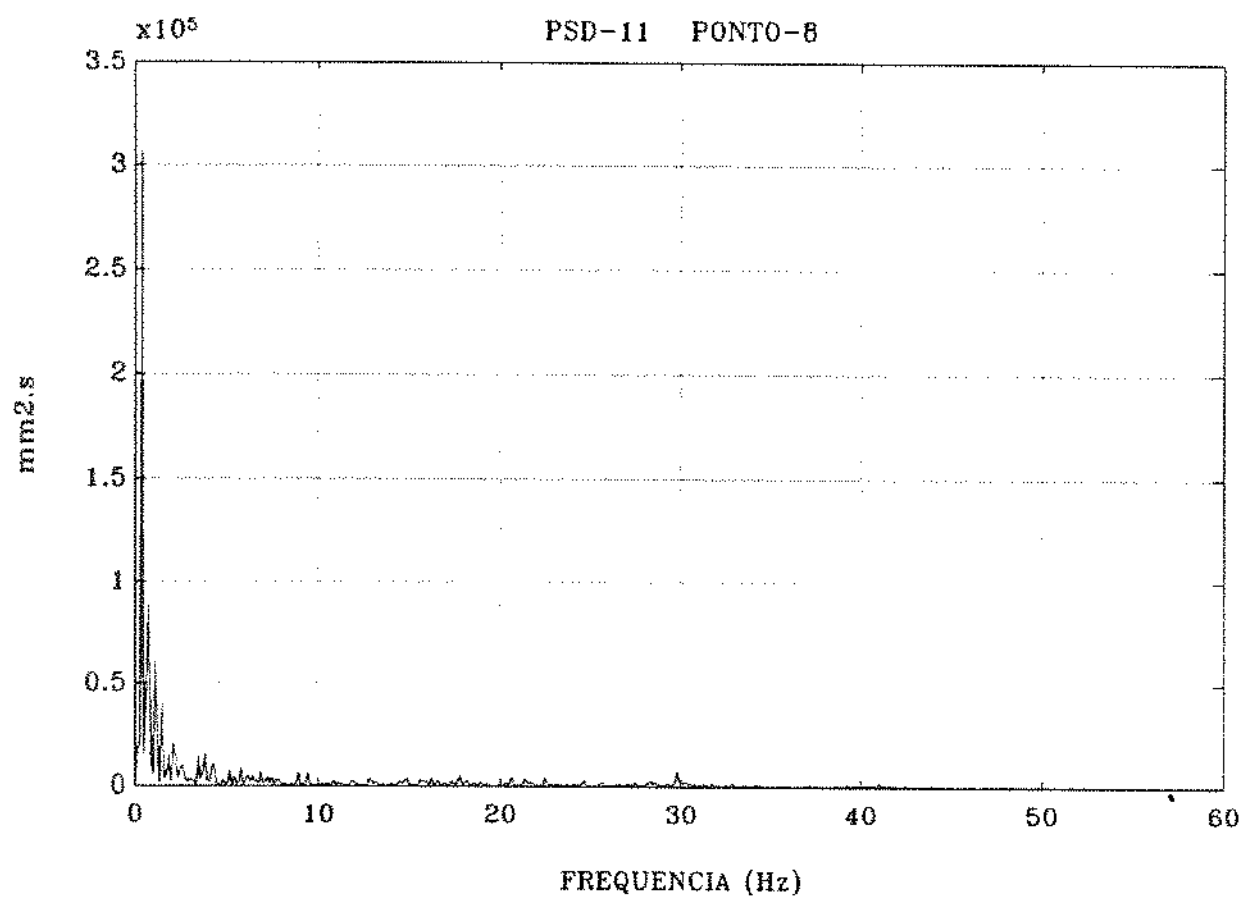
PSD-11 PONT0-5

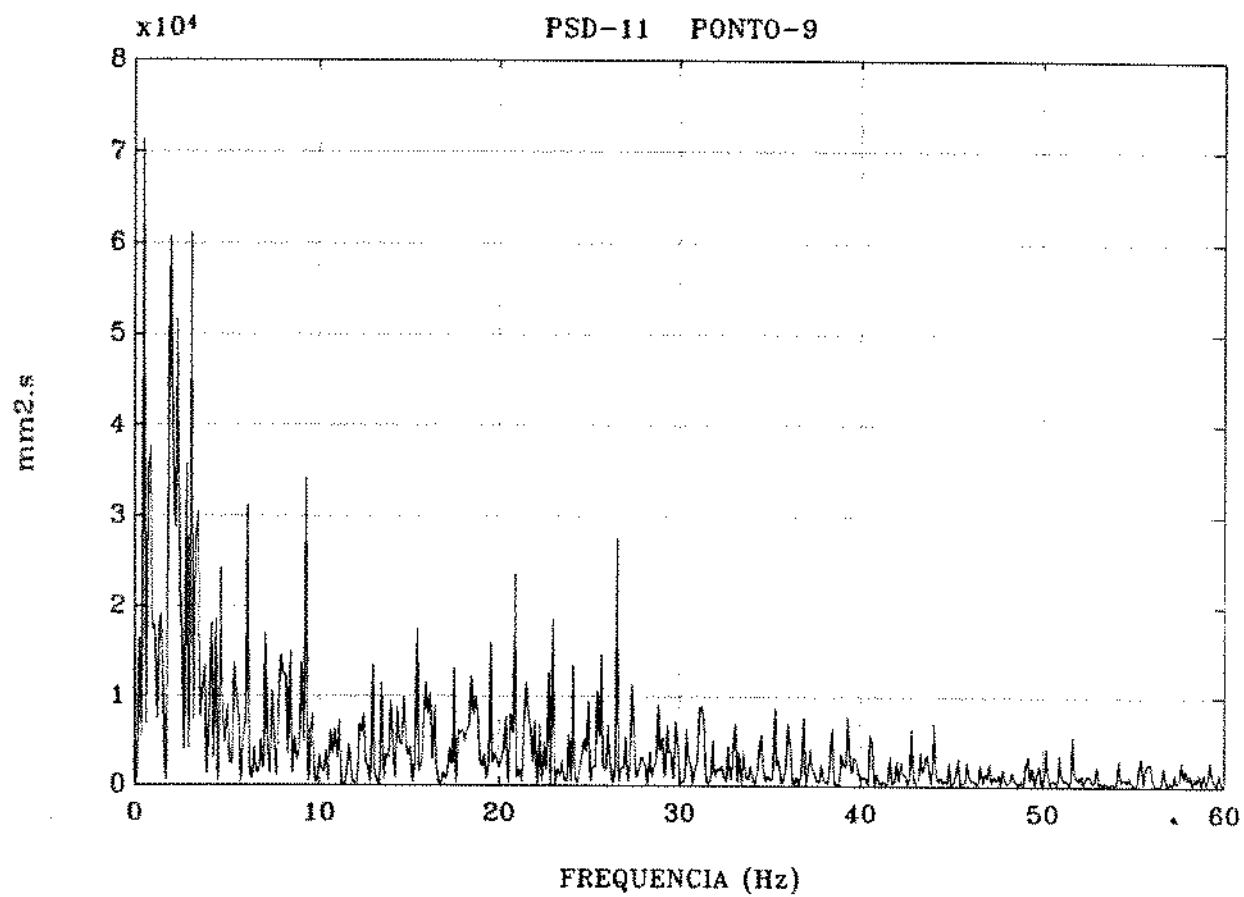


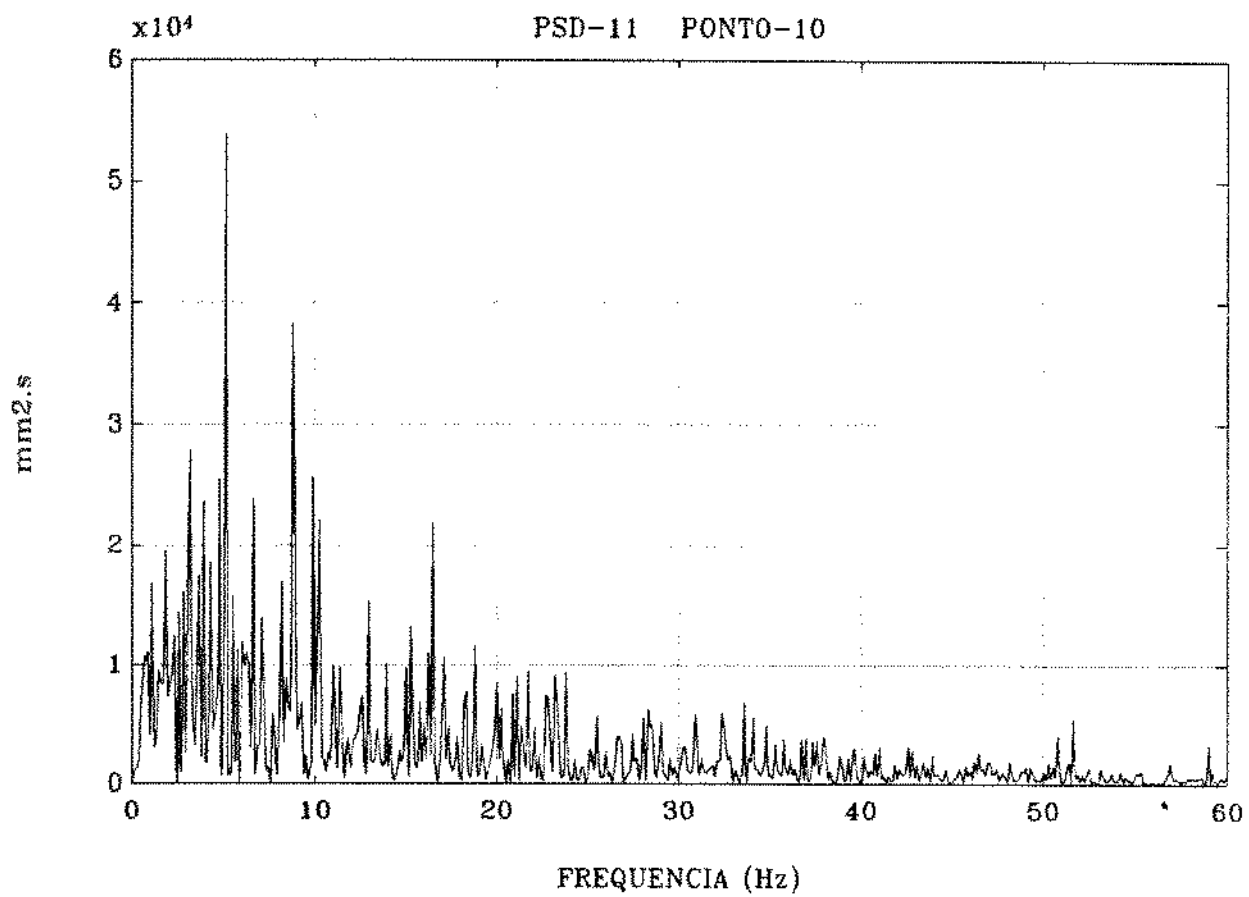
PSD-11 PONTO-6

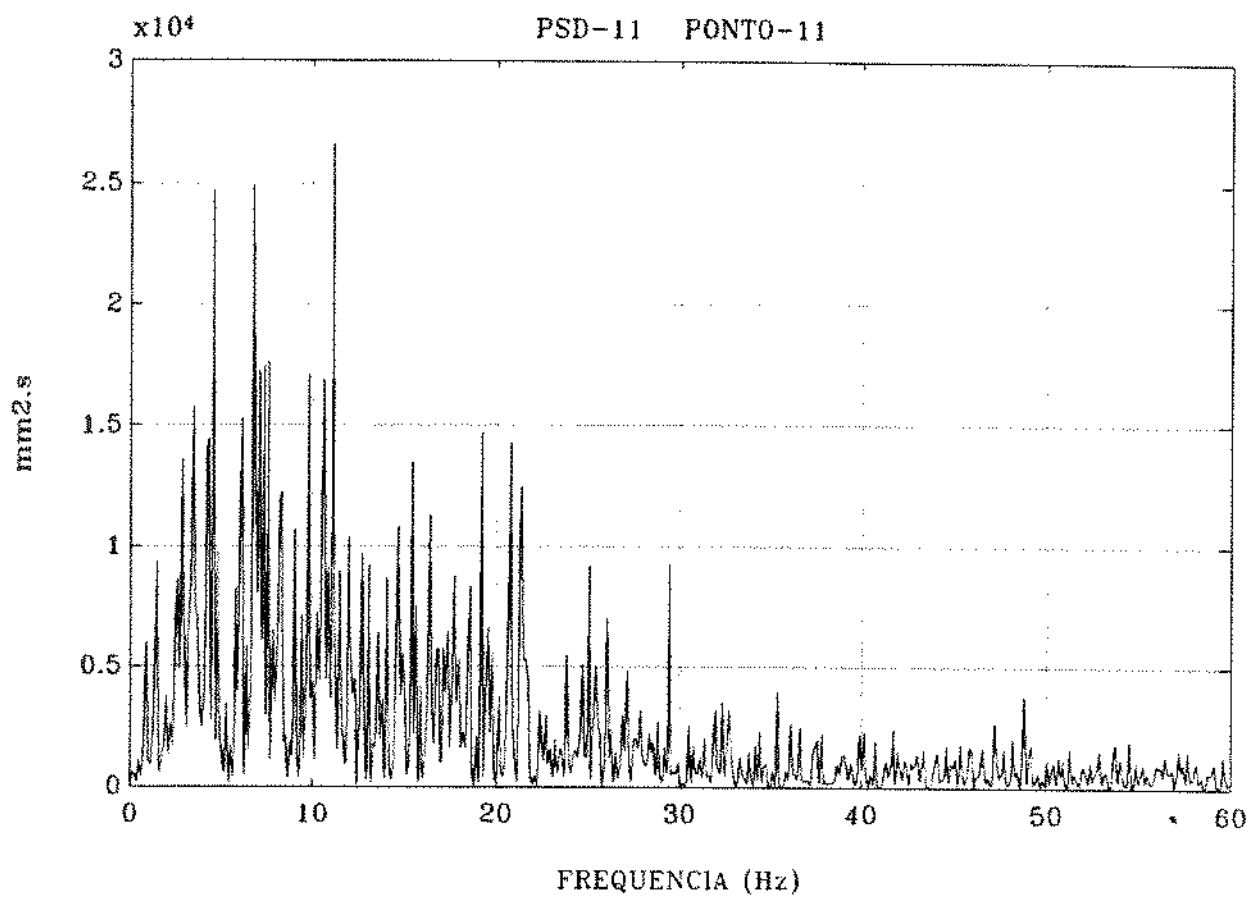


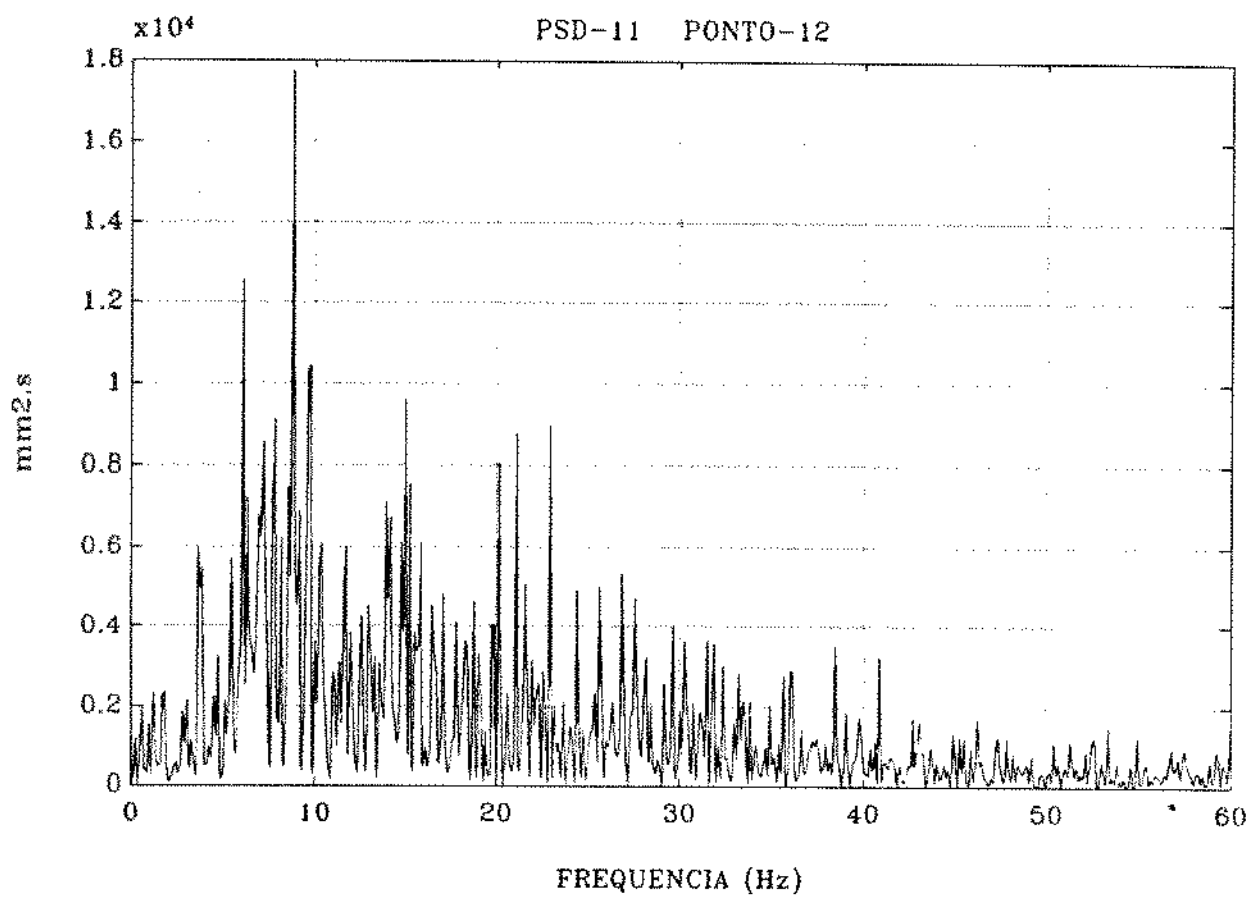




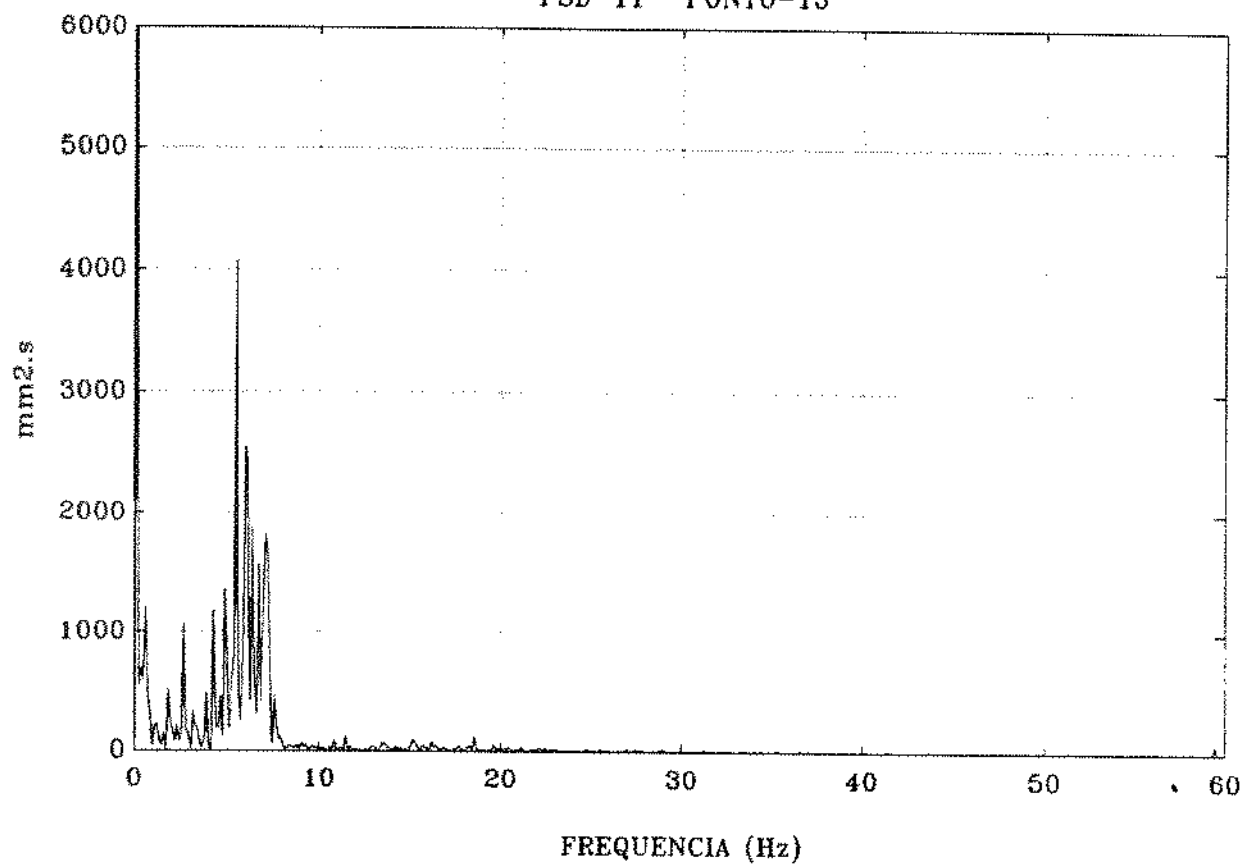


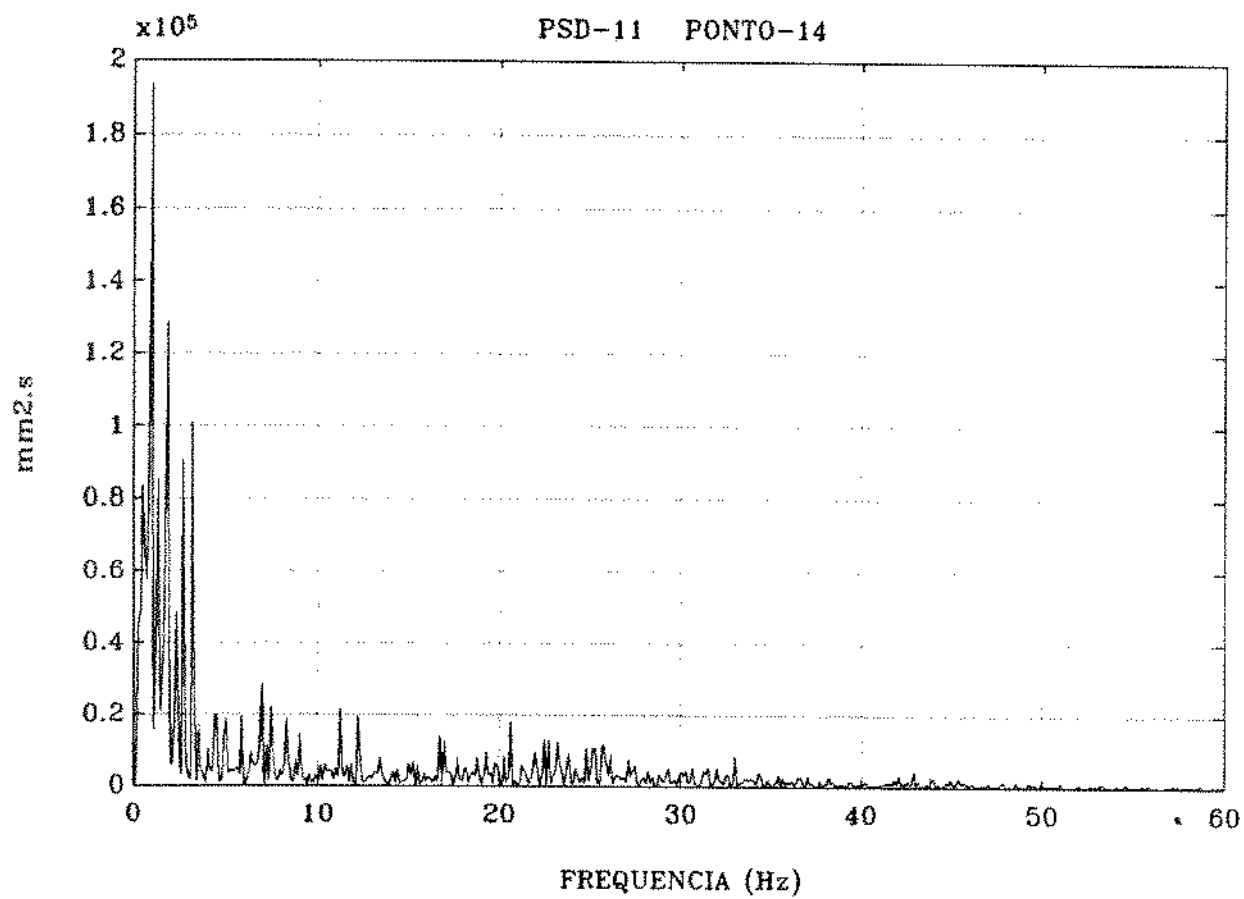


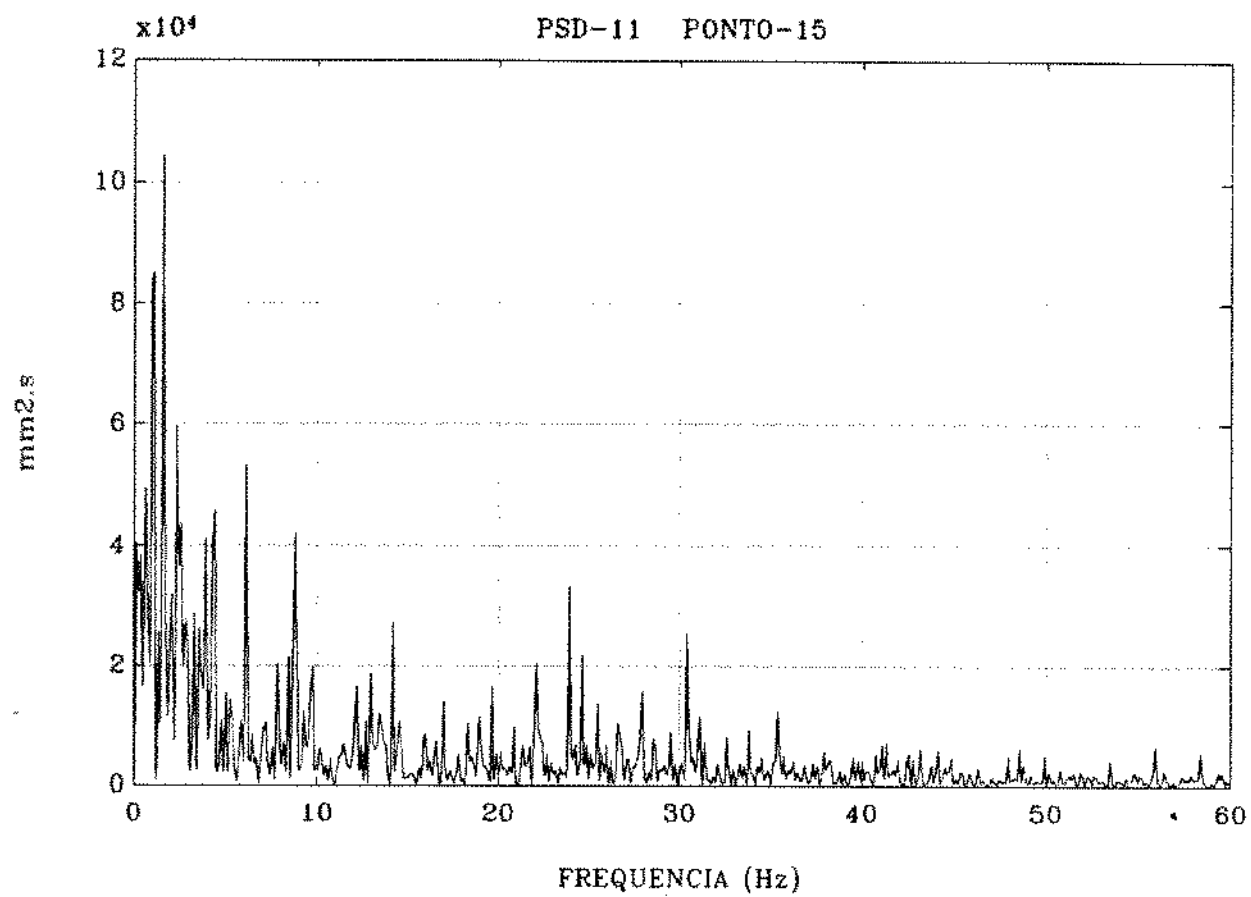


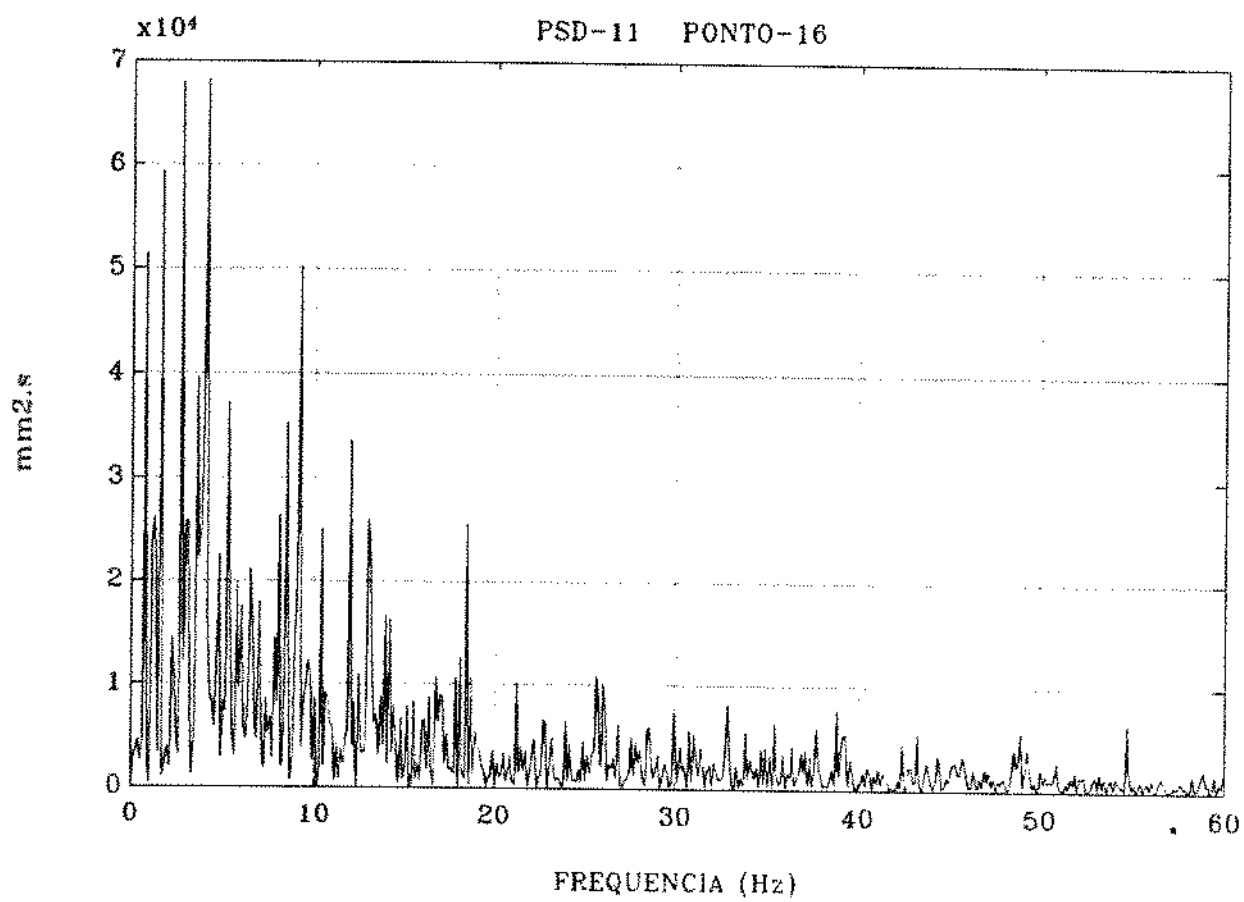


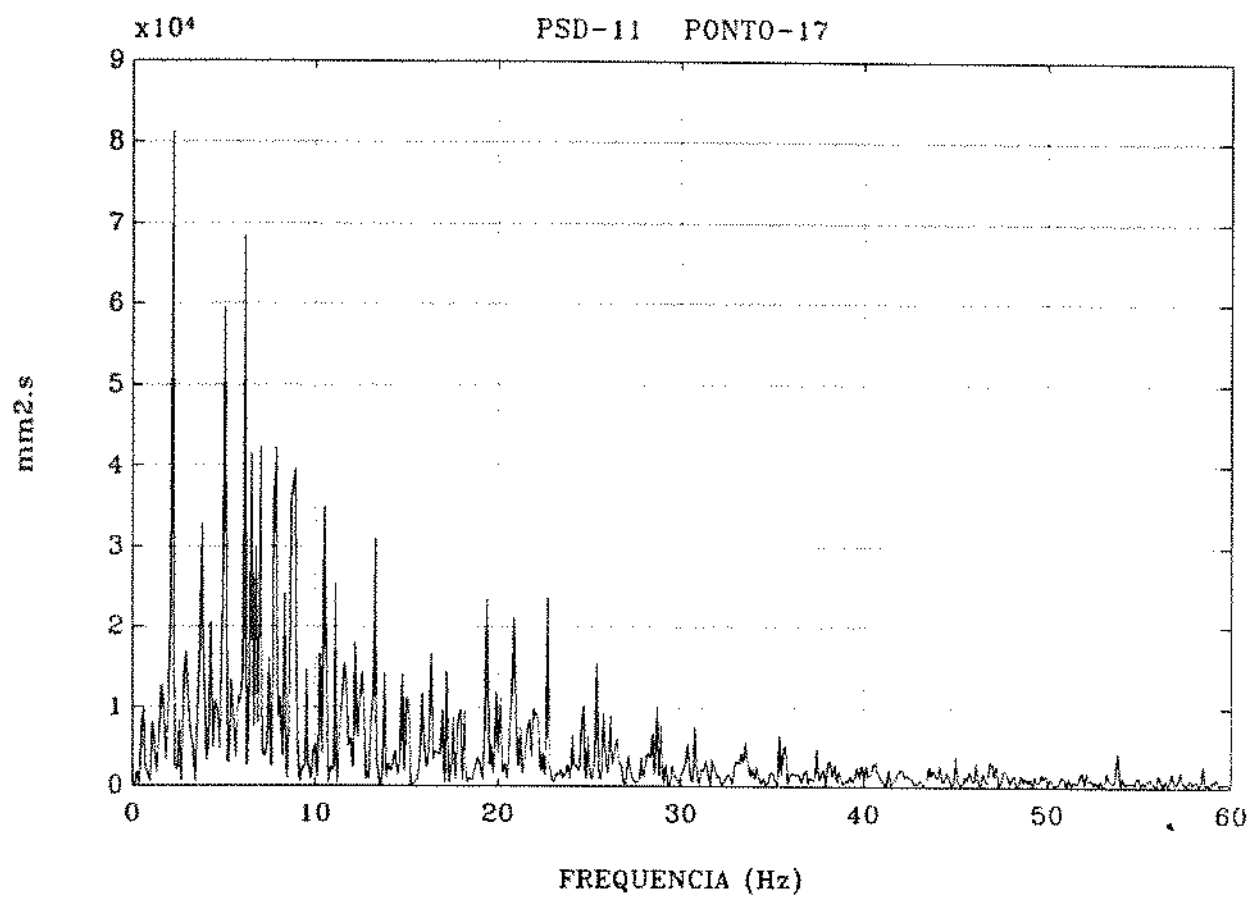
PSD-11 PONT0-13

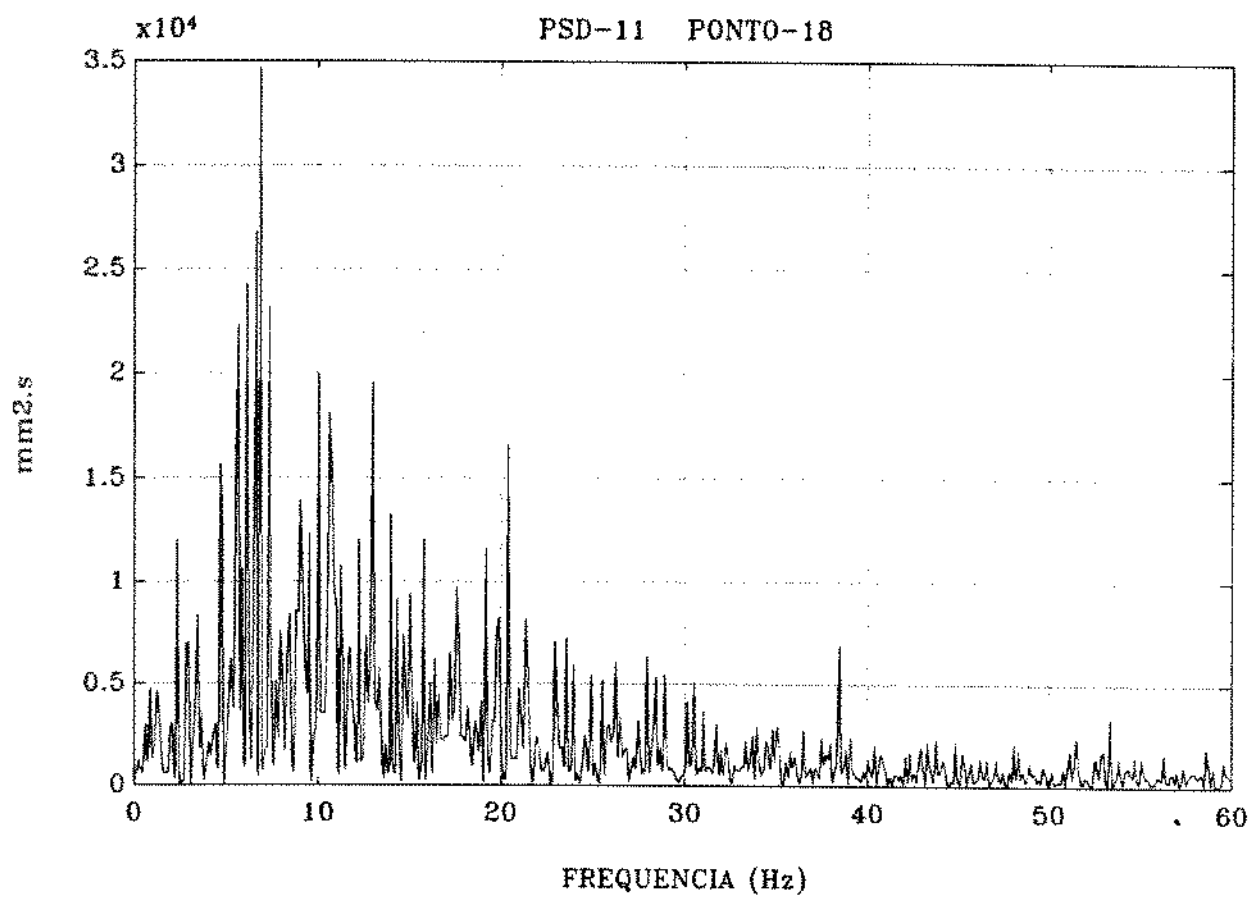




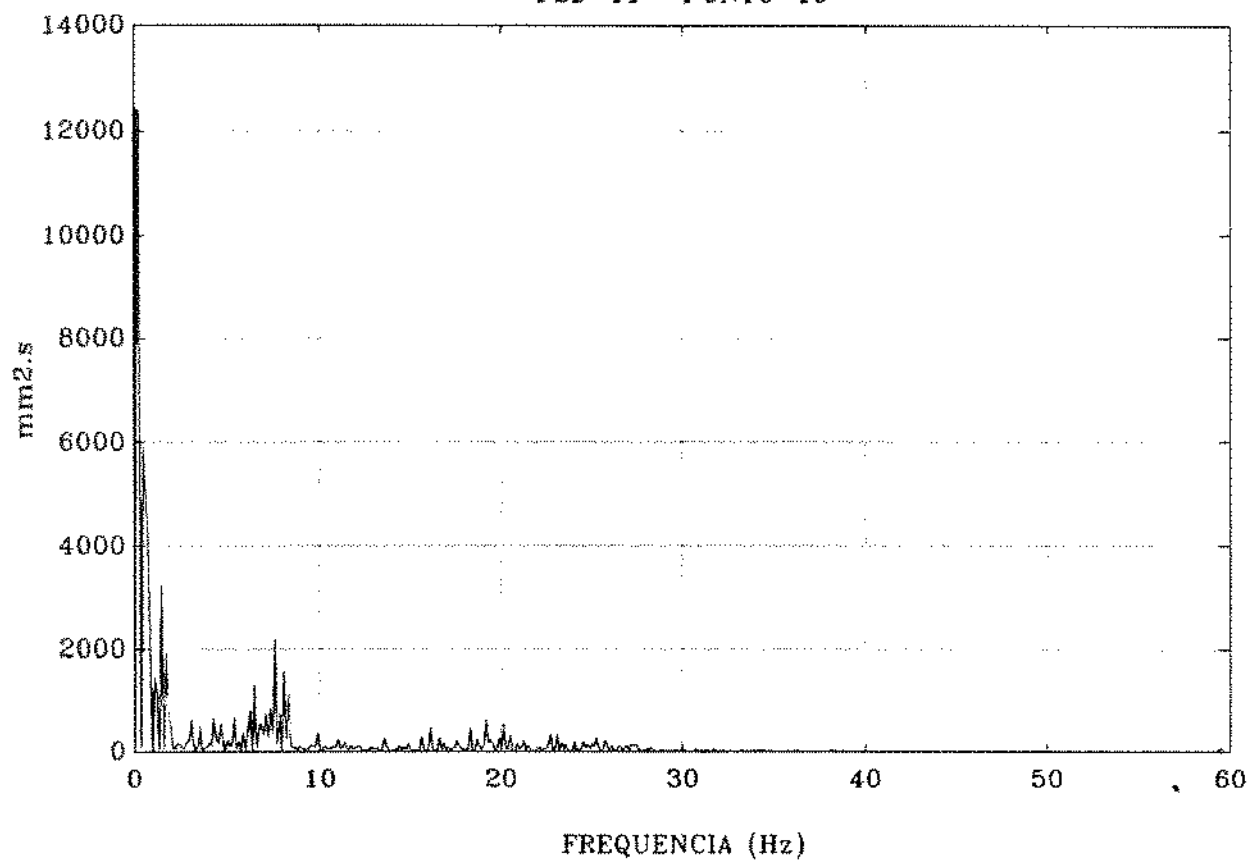


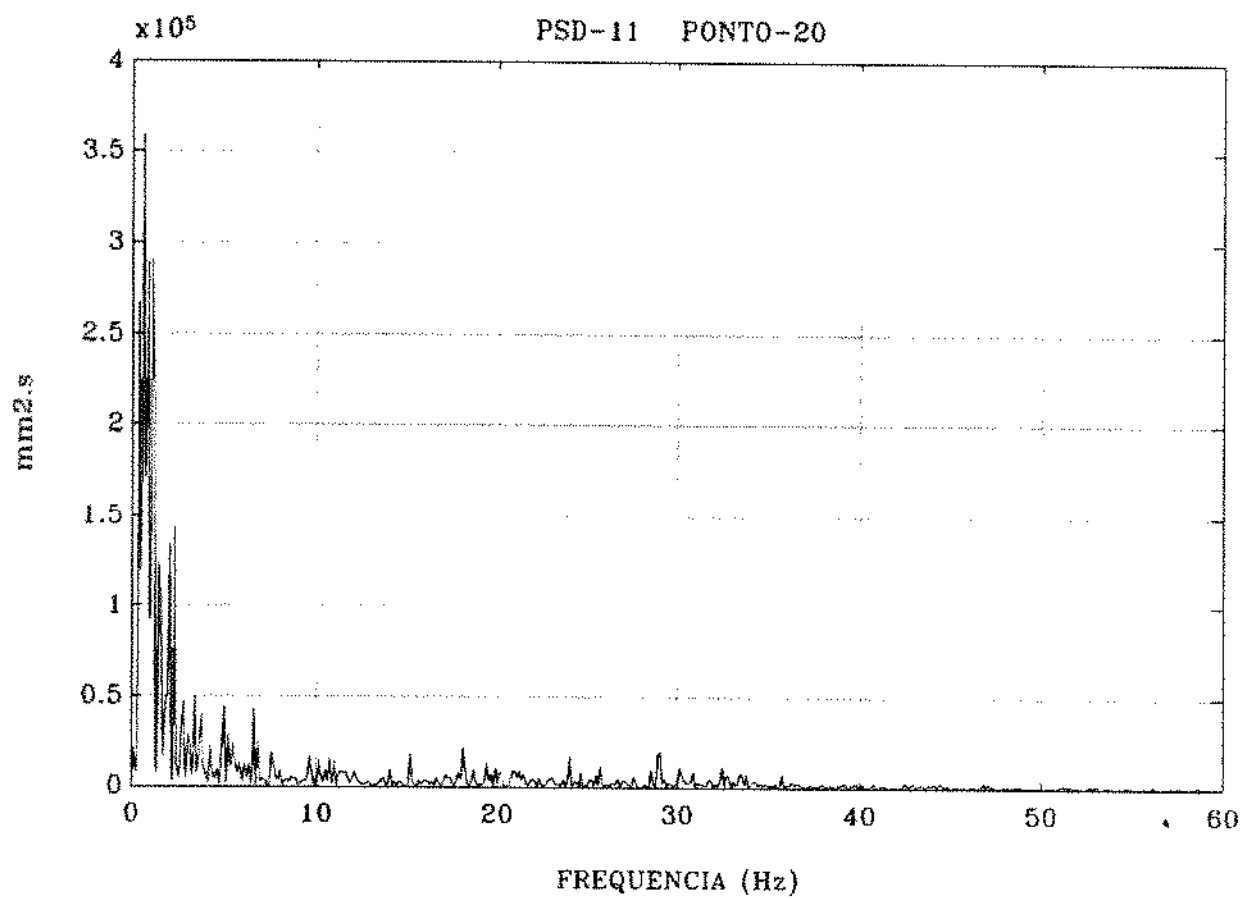


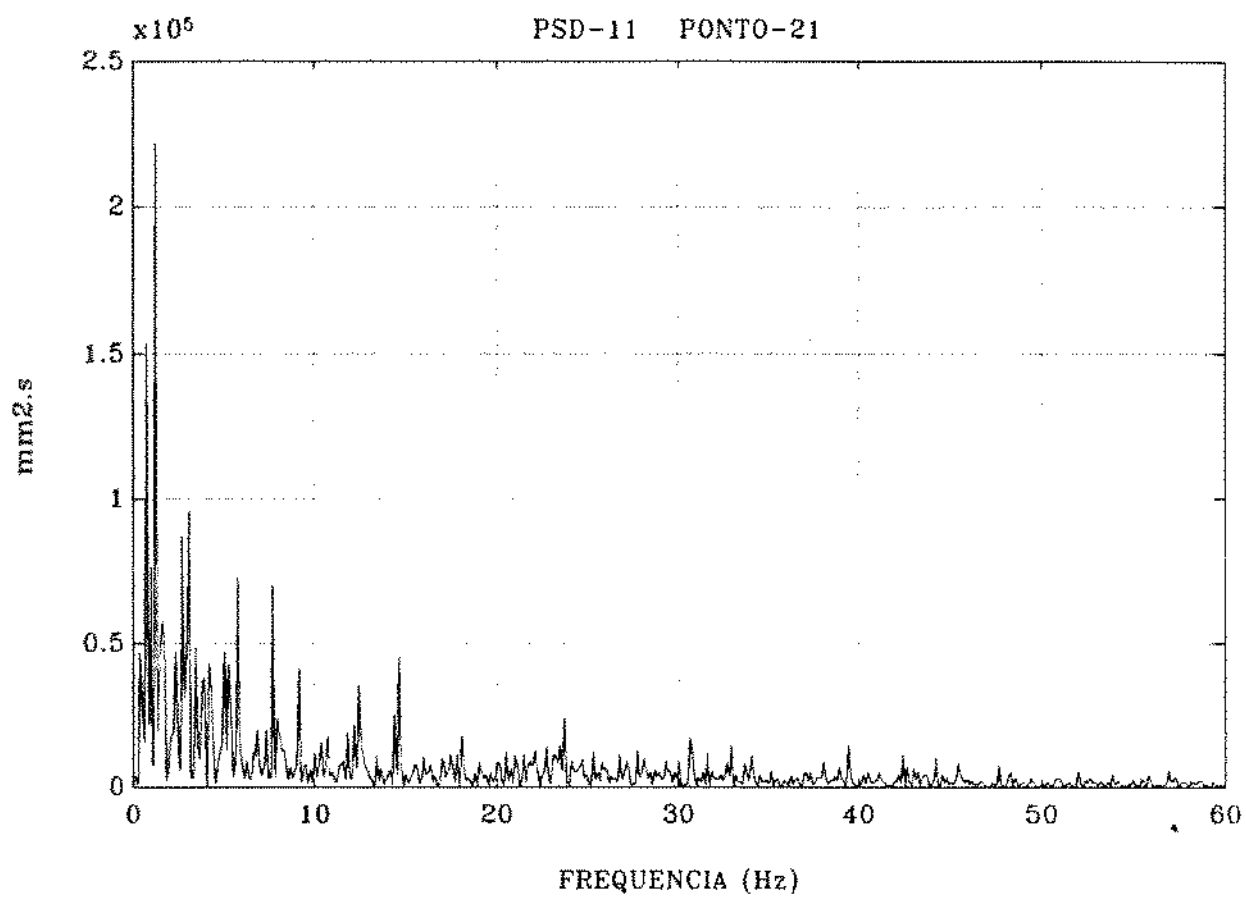


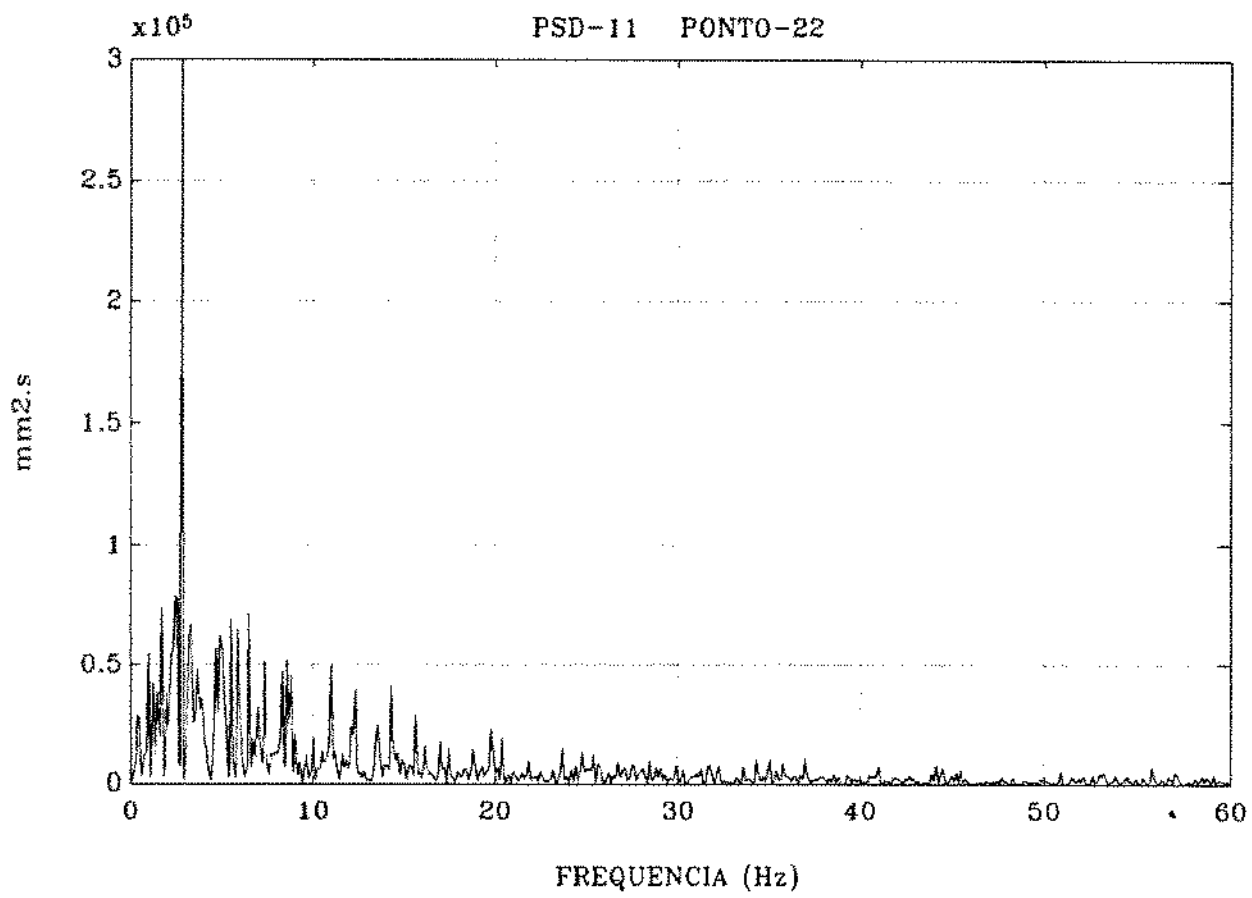


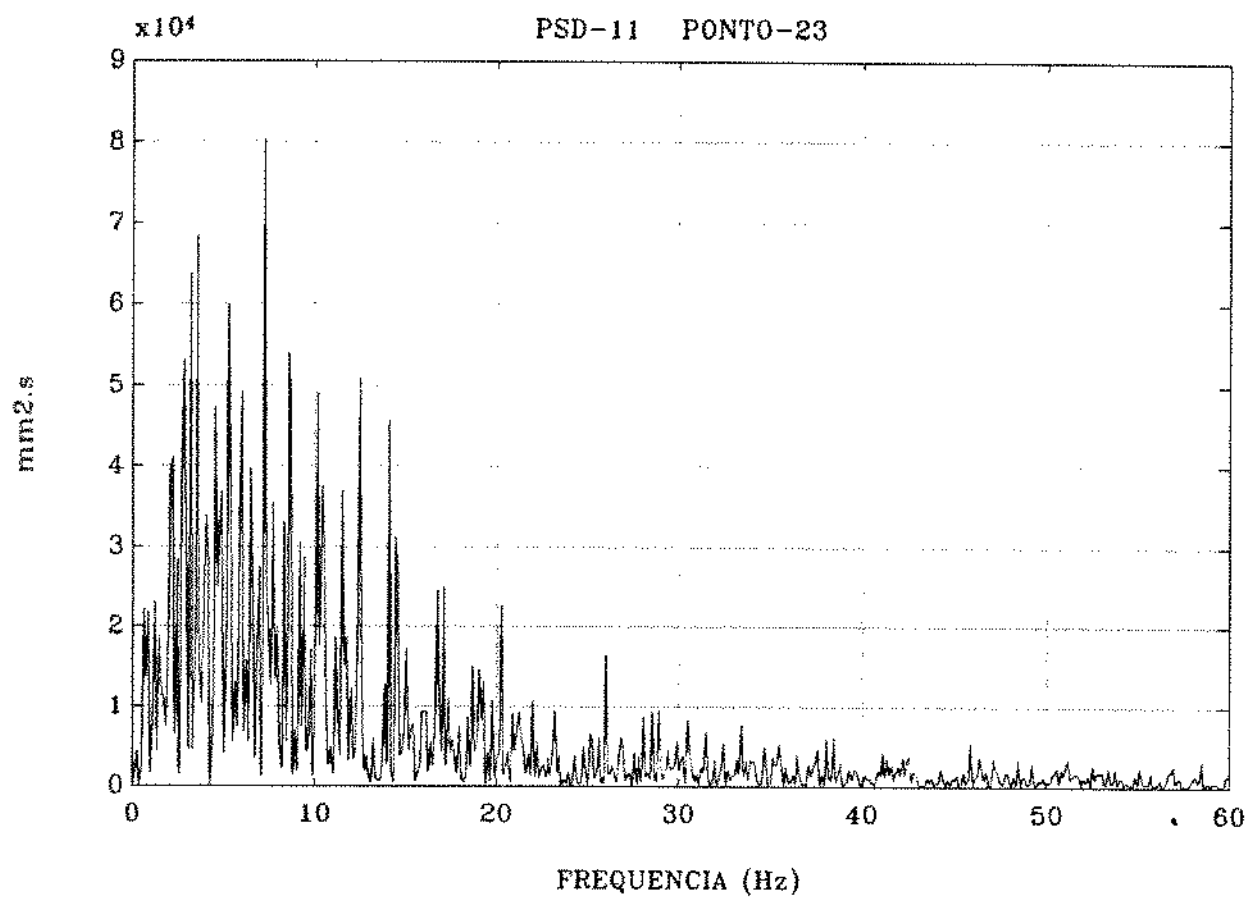
PSD-11 PONTO-19

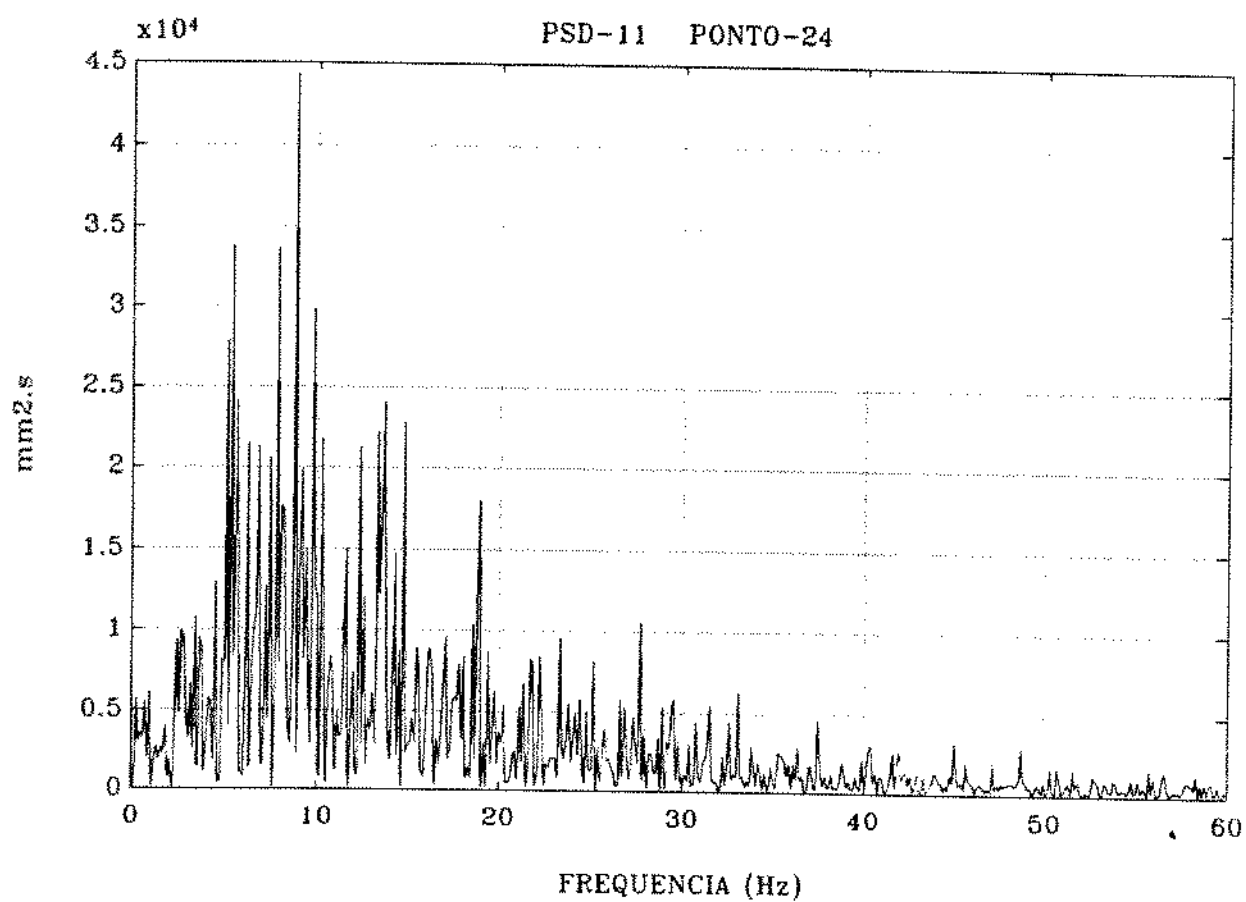


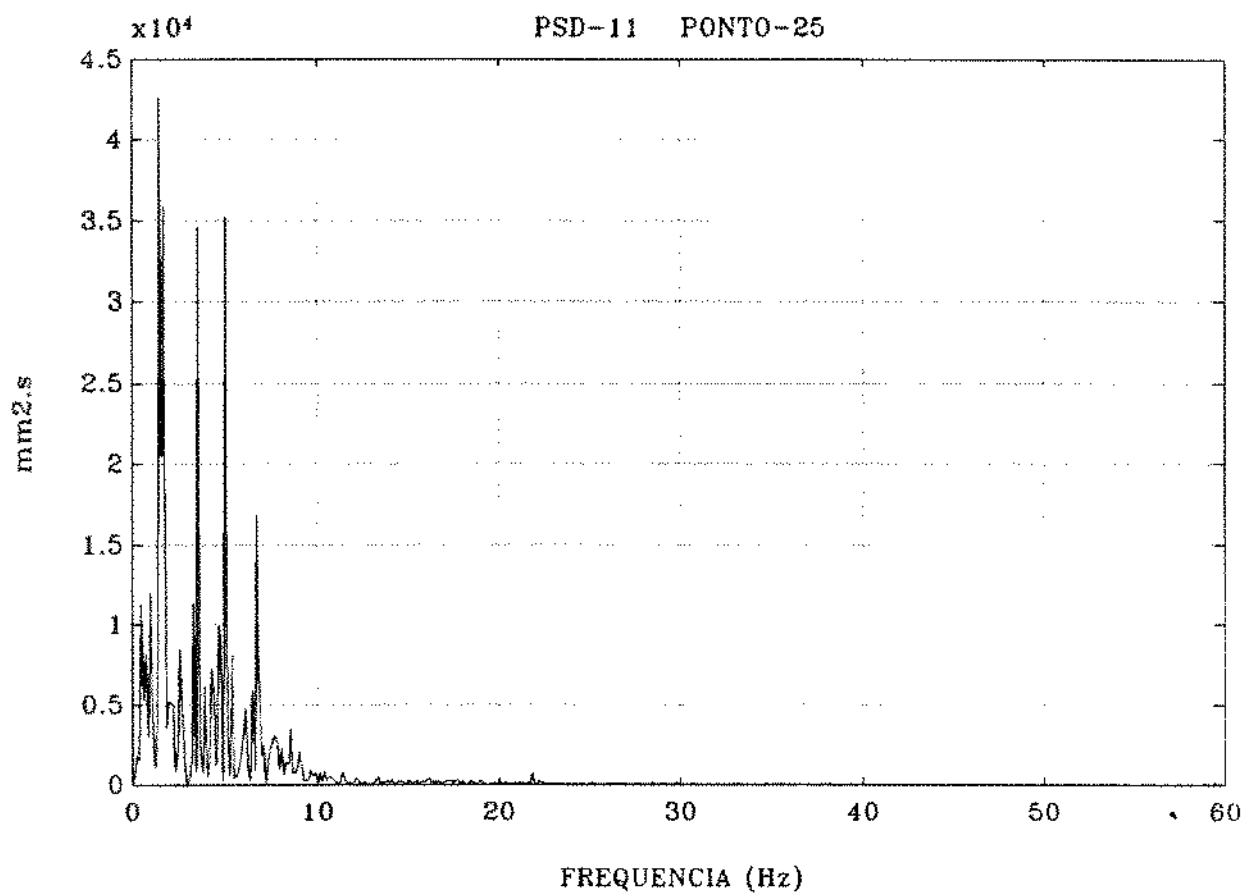


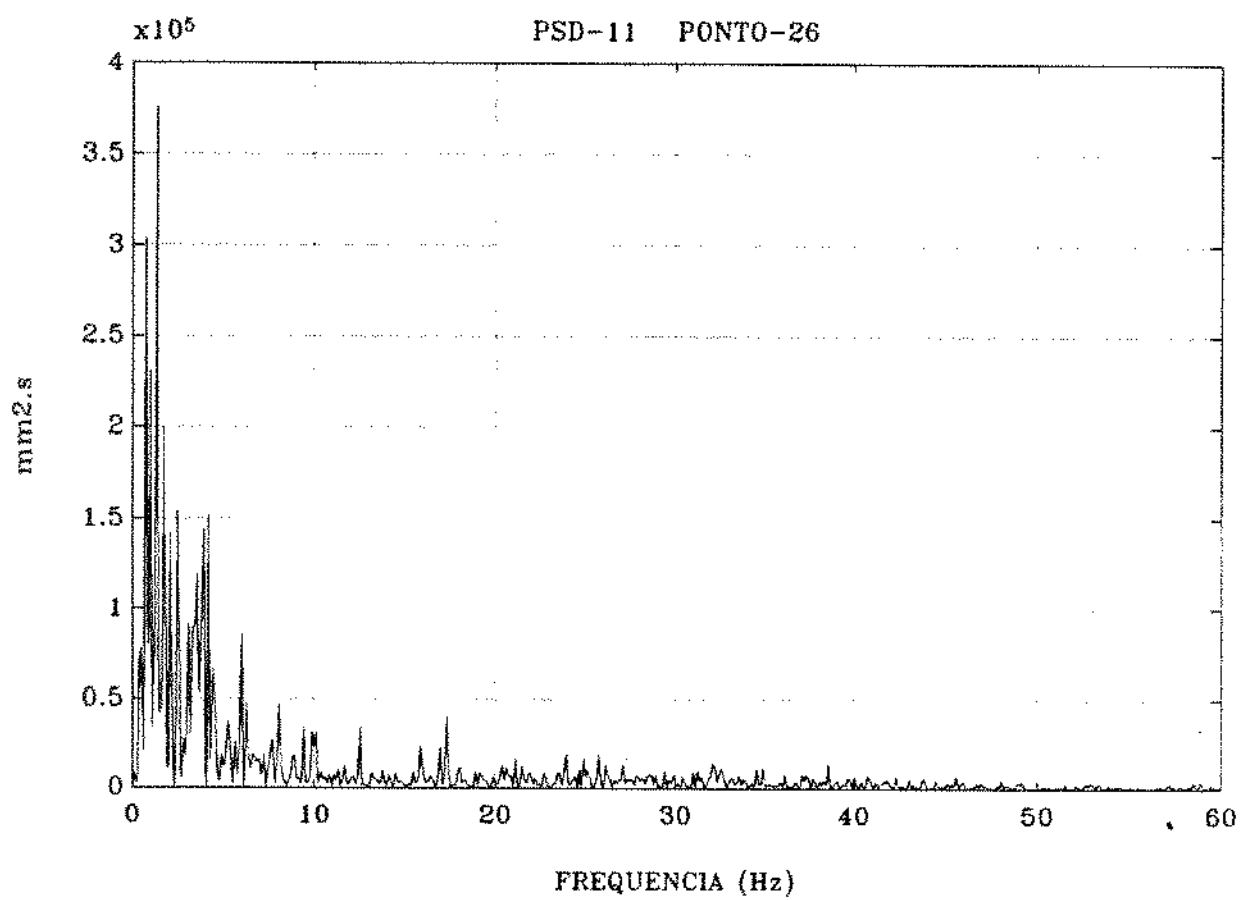


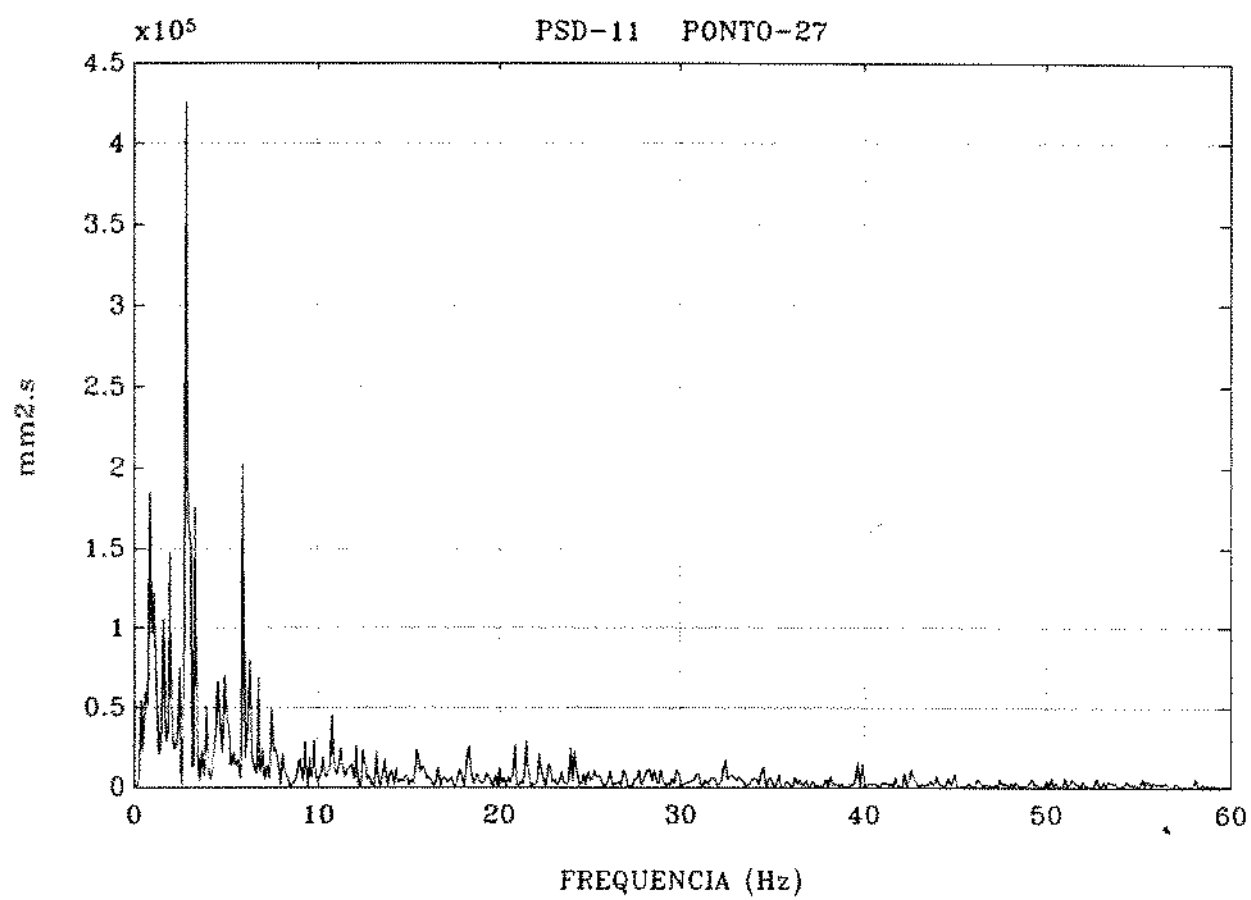


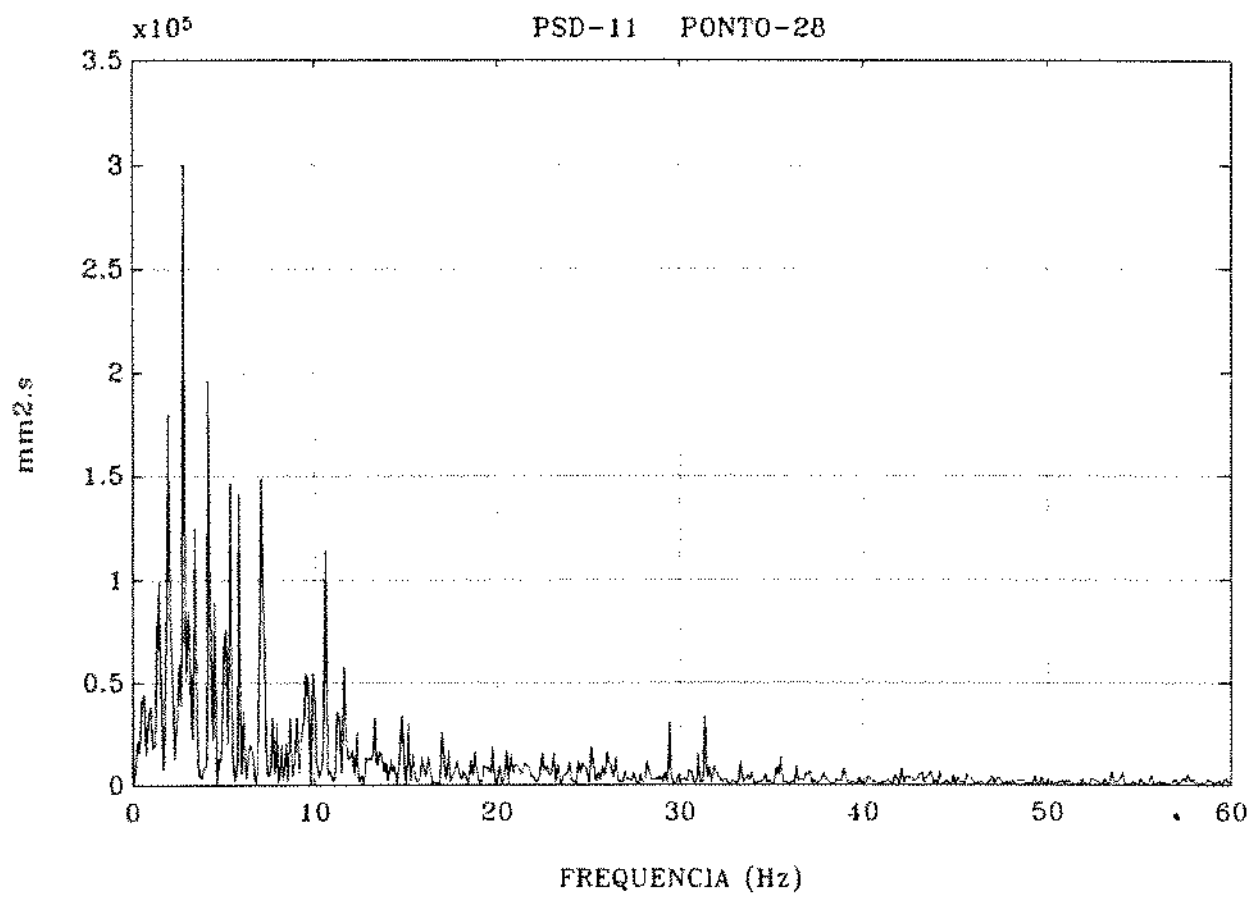


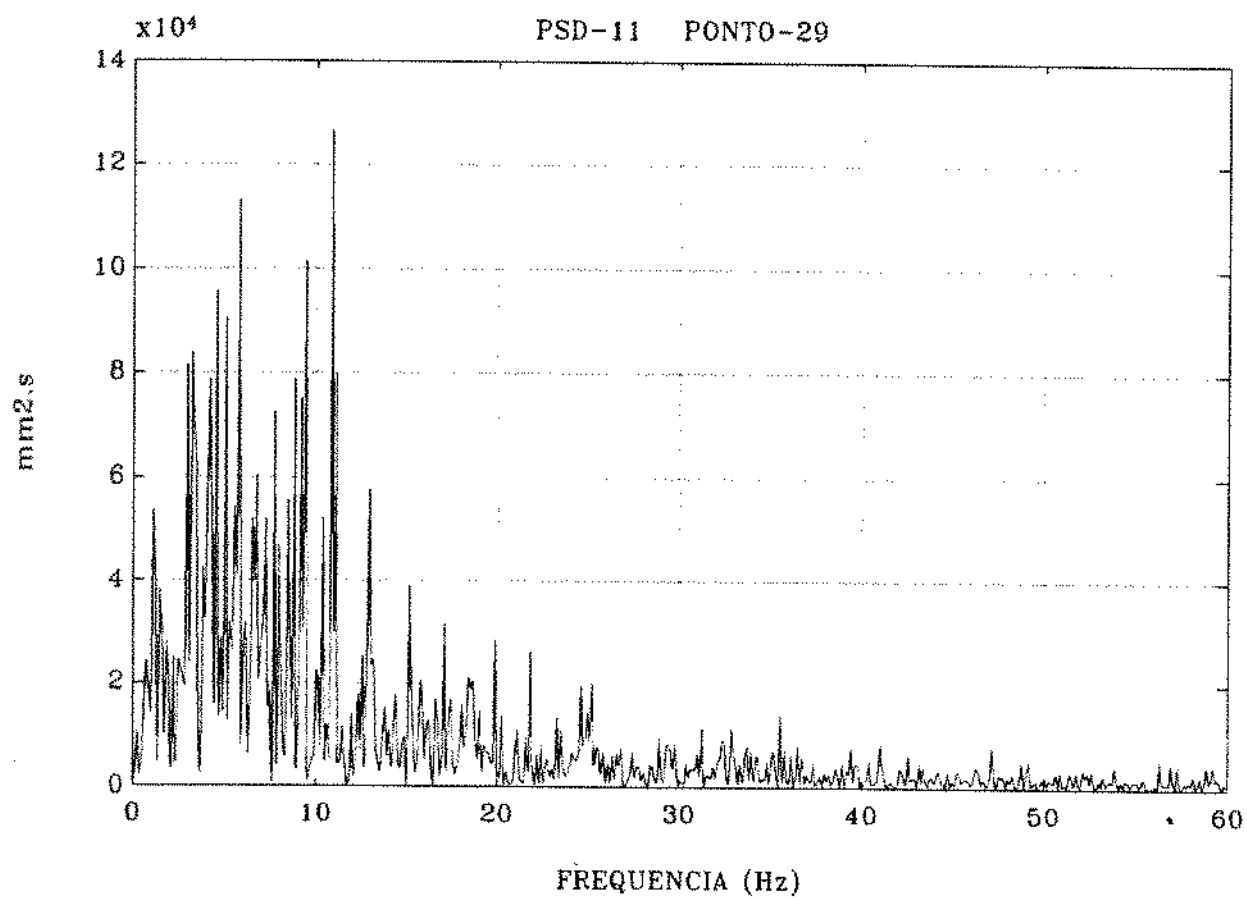


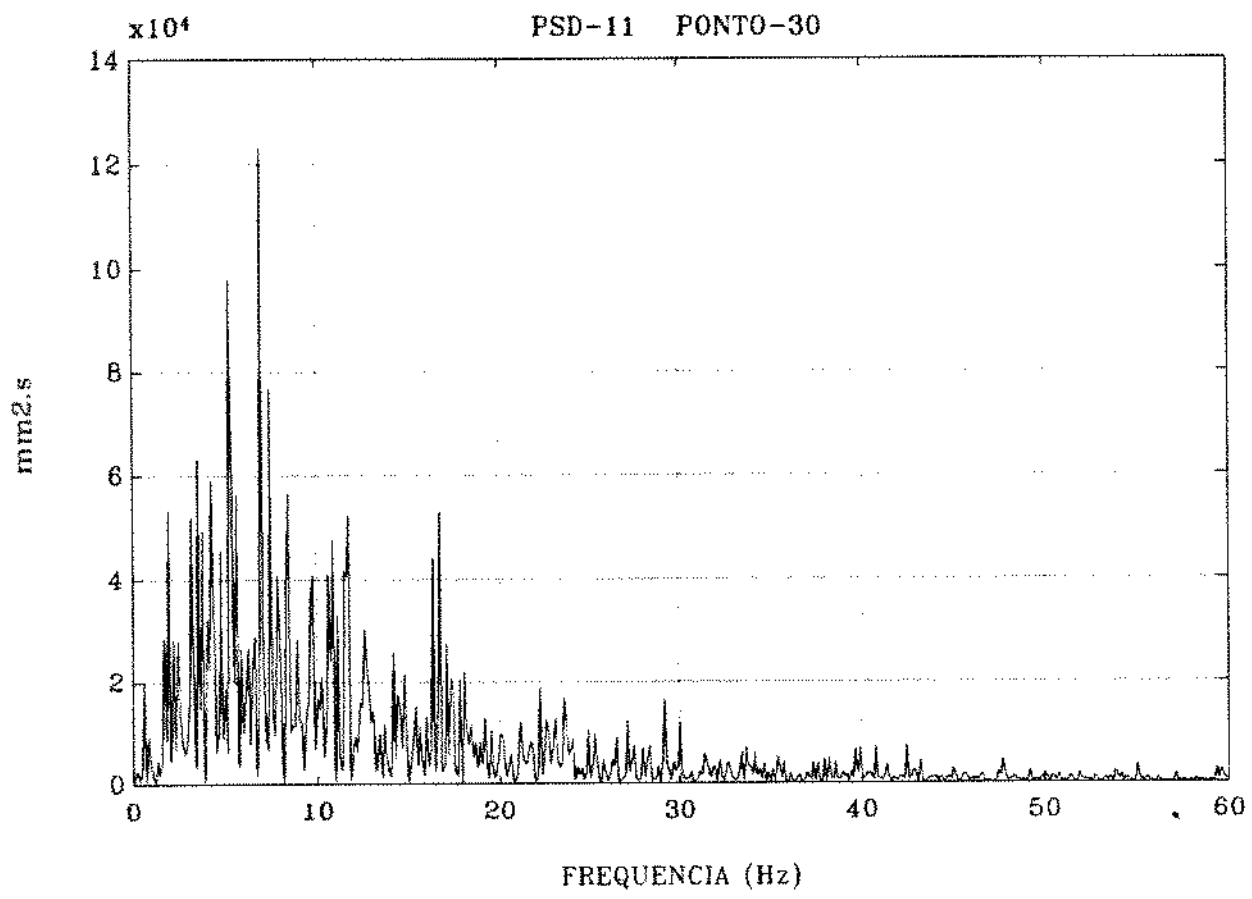








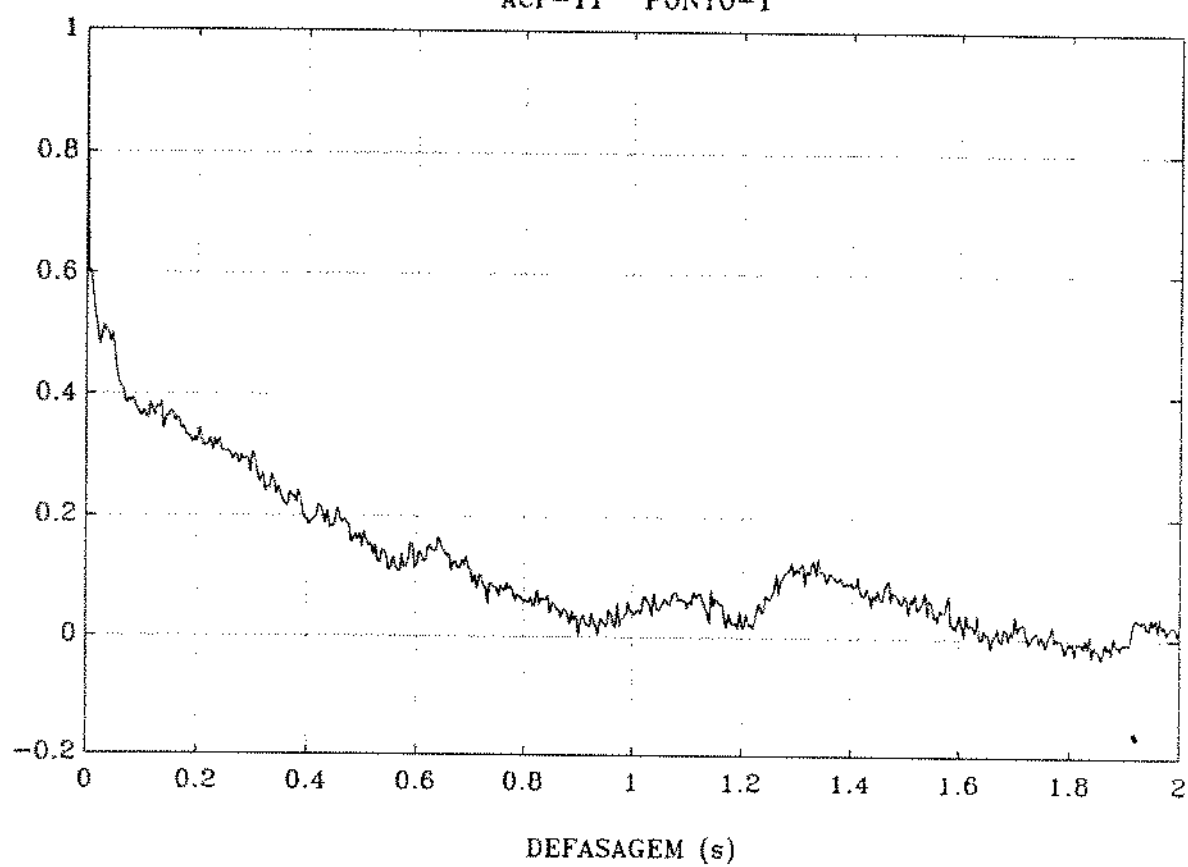




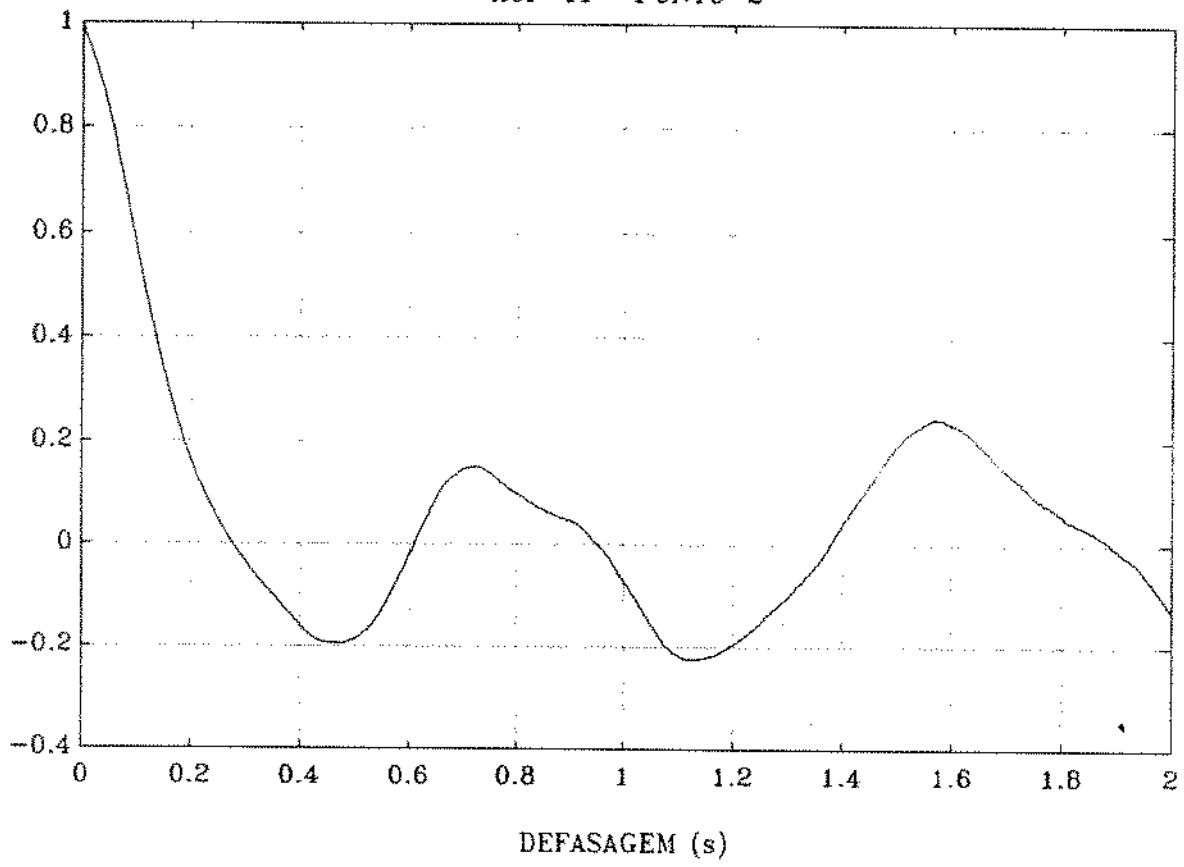
VI.4 - FUNÇÃO DE AUTOCORRELAÇÃO NORMALIZADA

(SONDA 1)

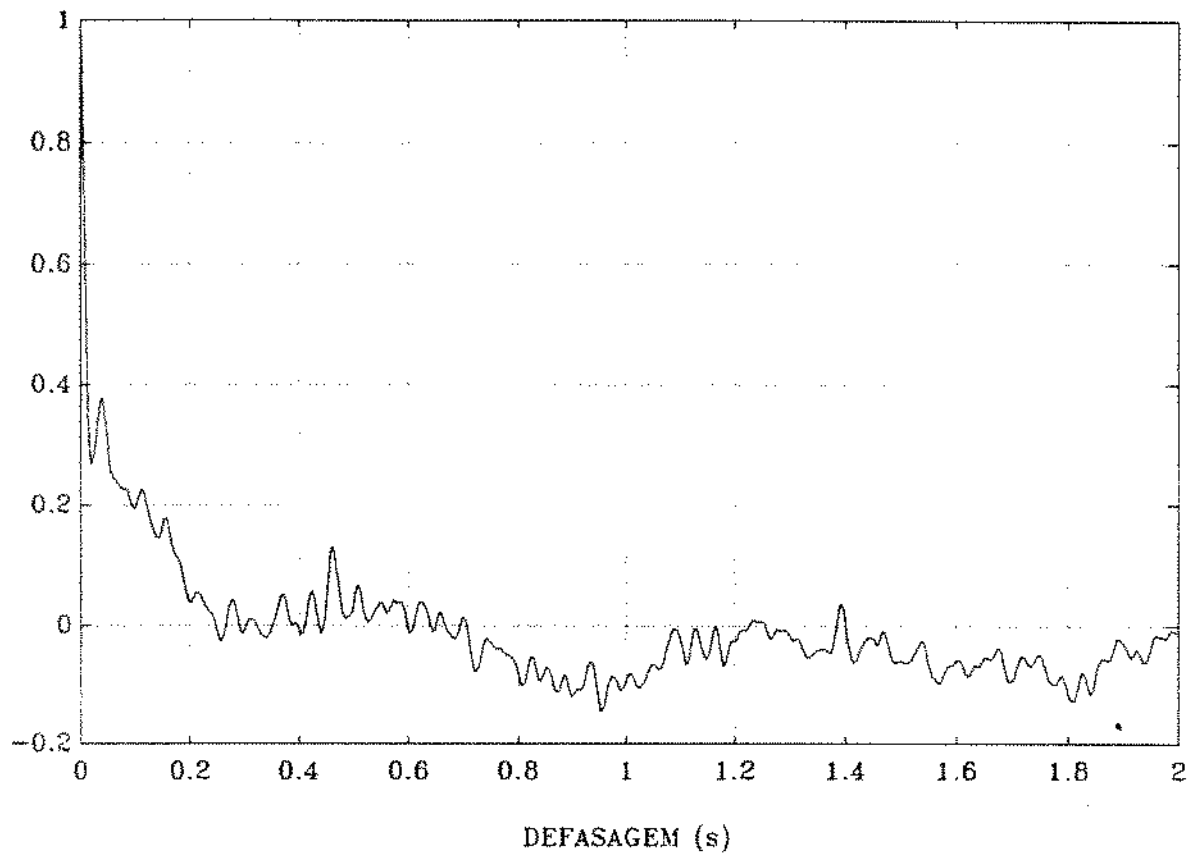
ACF-11 PONTO-1



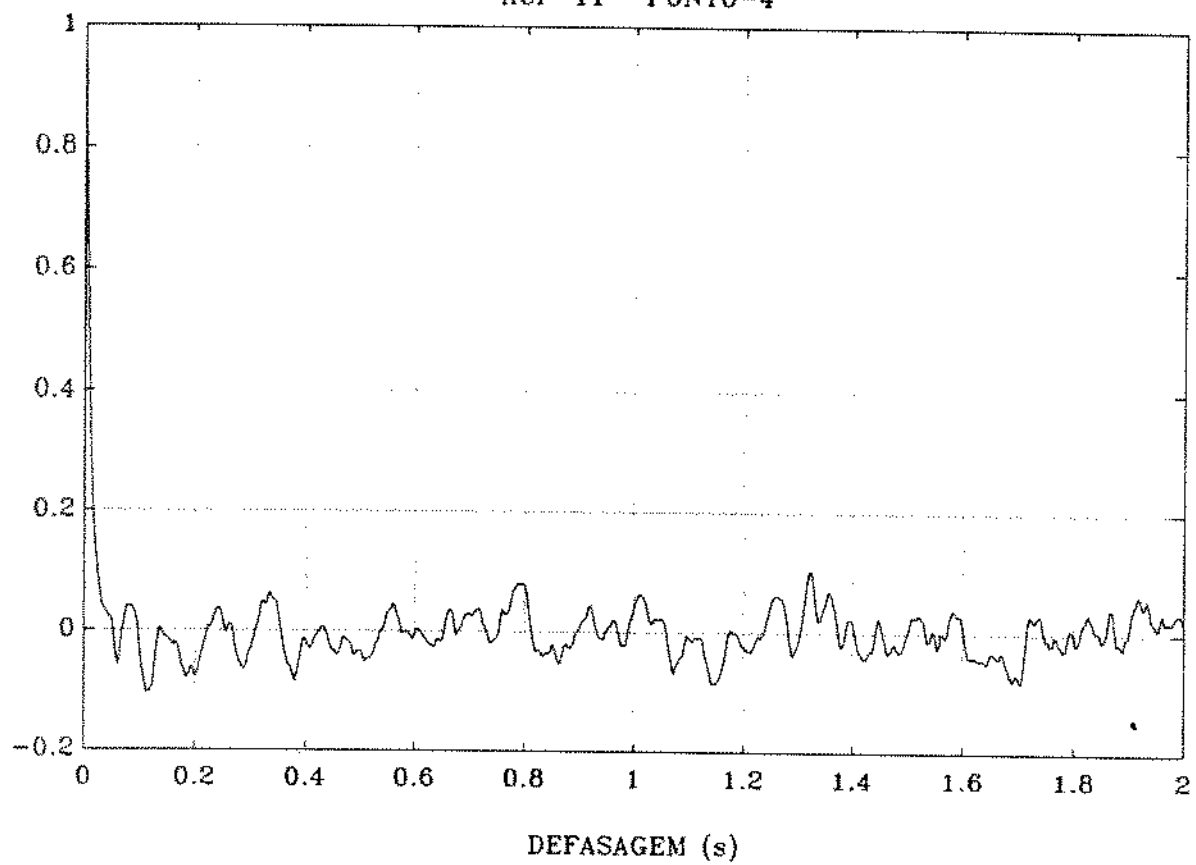
ACF-11 PONTO-2



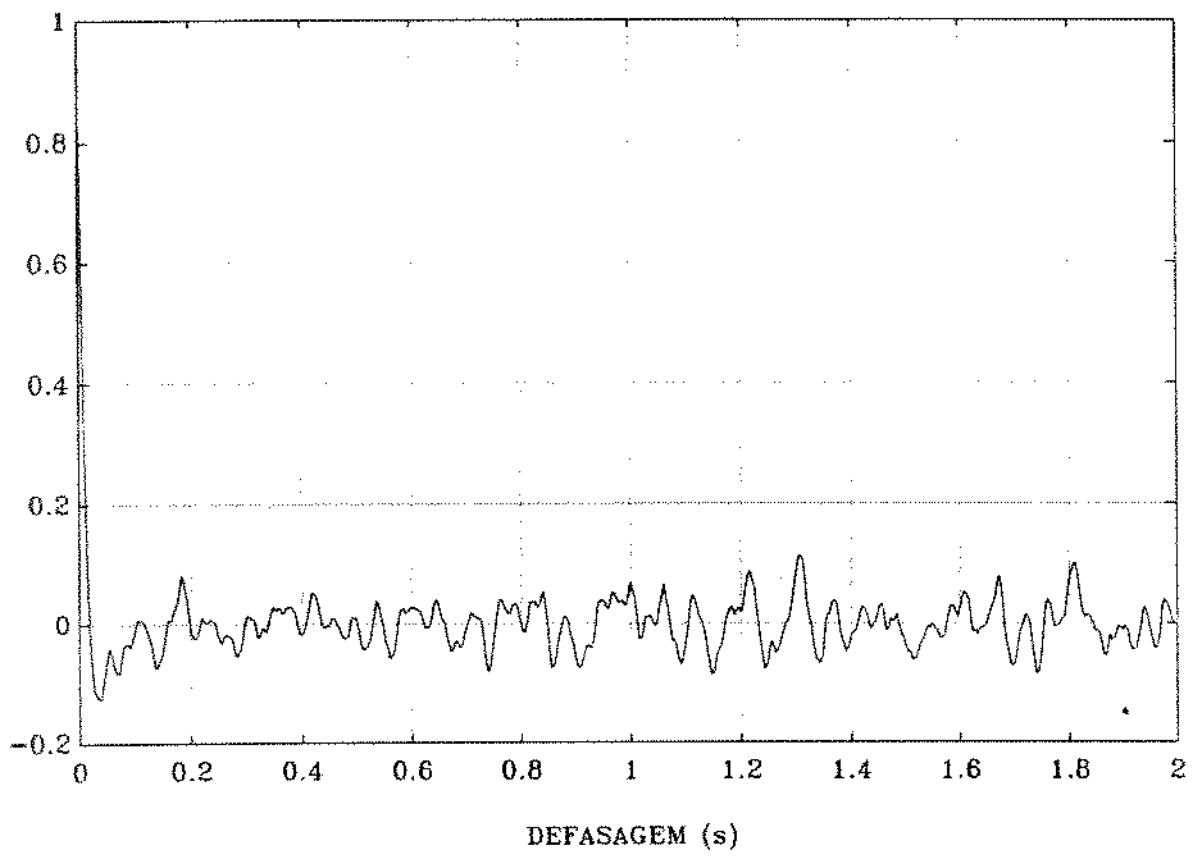
ACF-11 PONTO-3



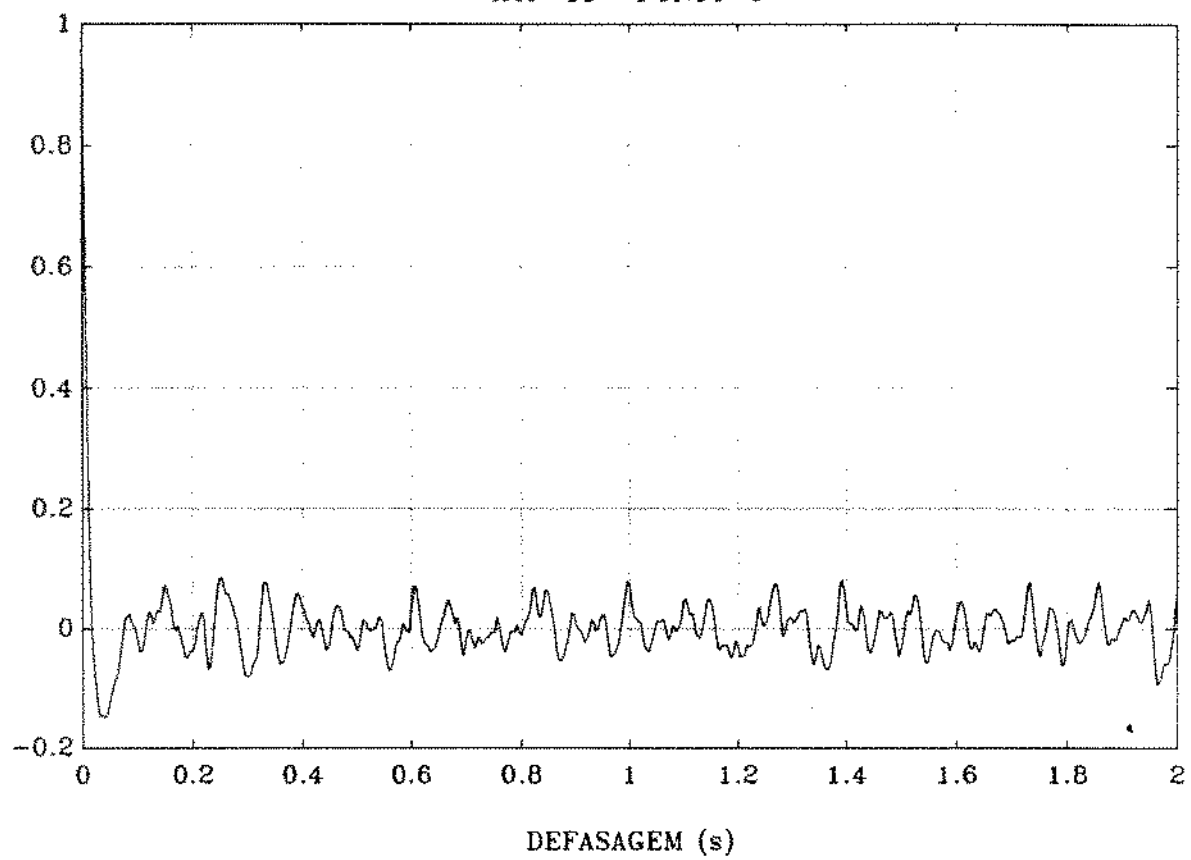
ACF-11 PONTO-4



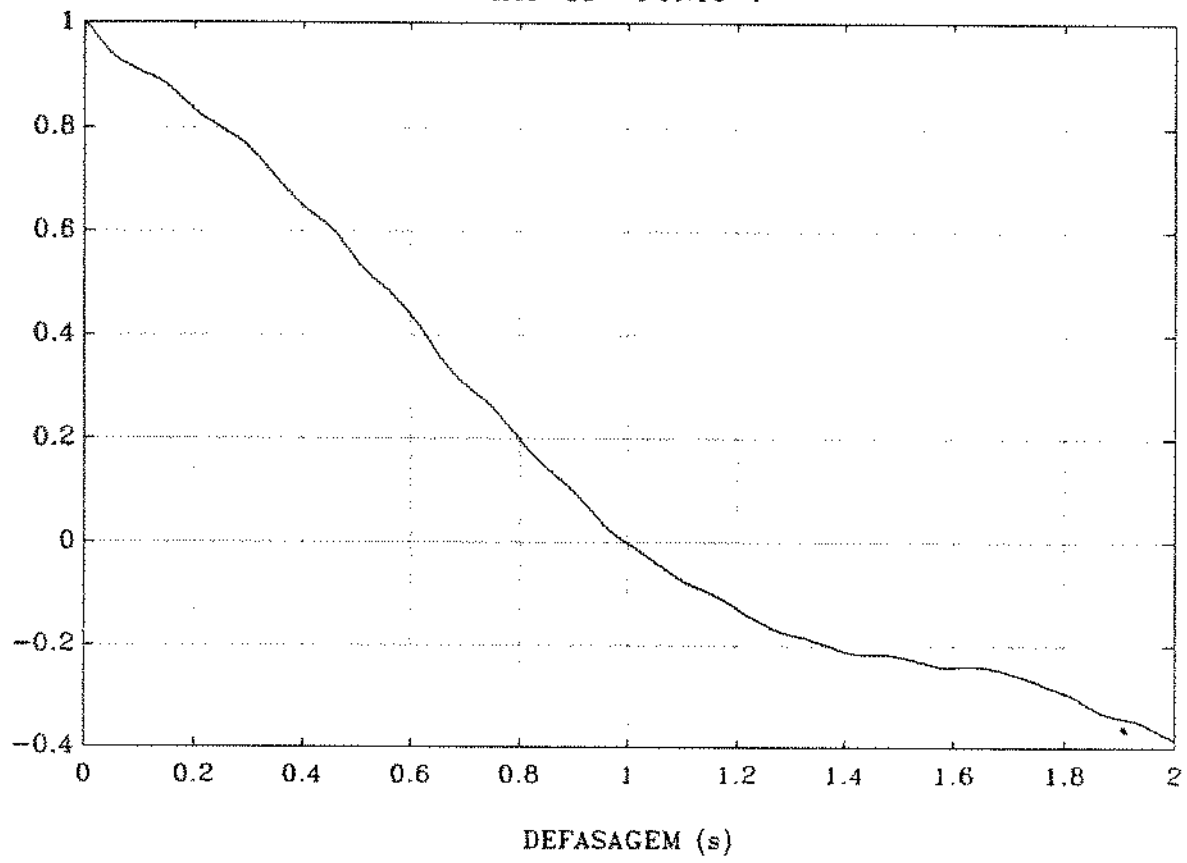
ACF-11 PONTO-5



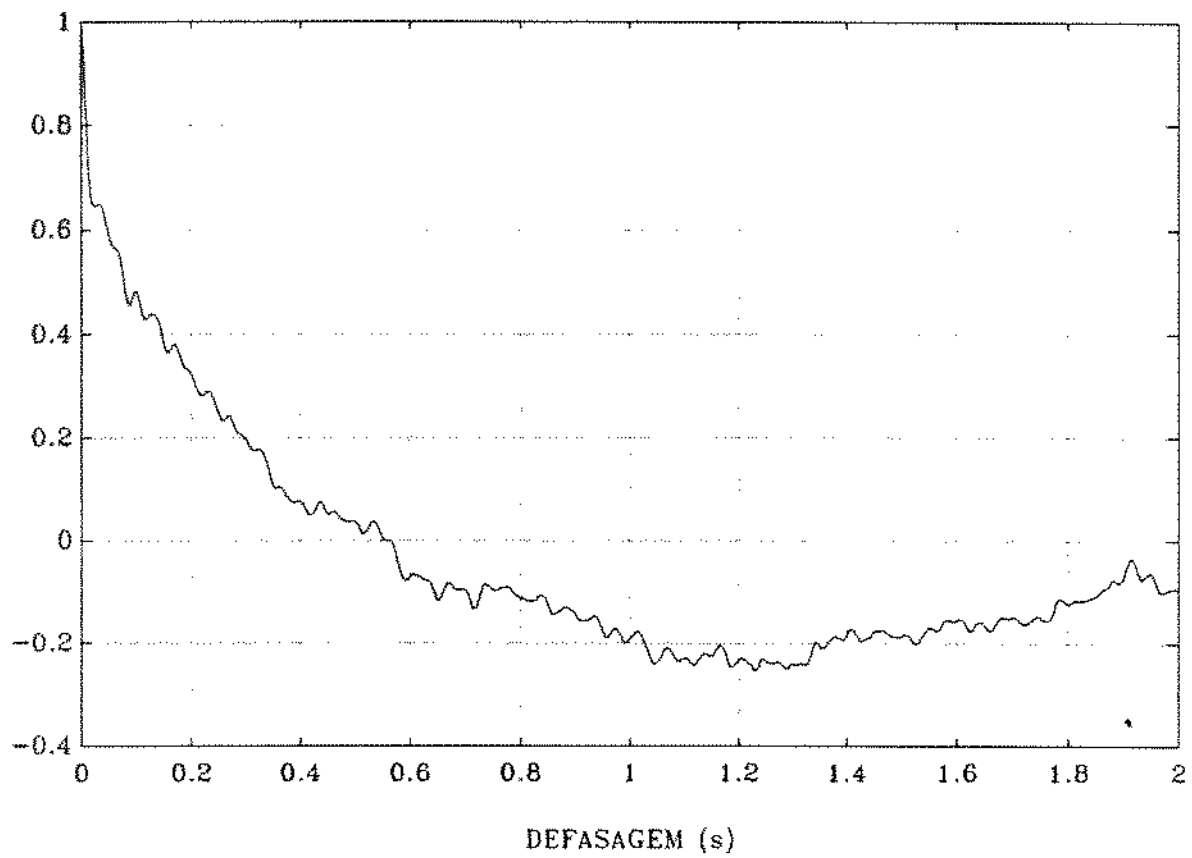
ACF-11 PONTO-6



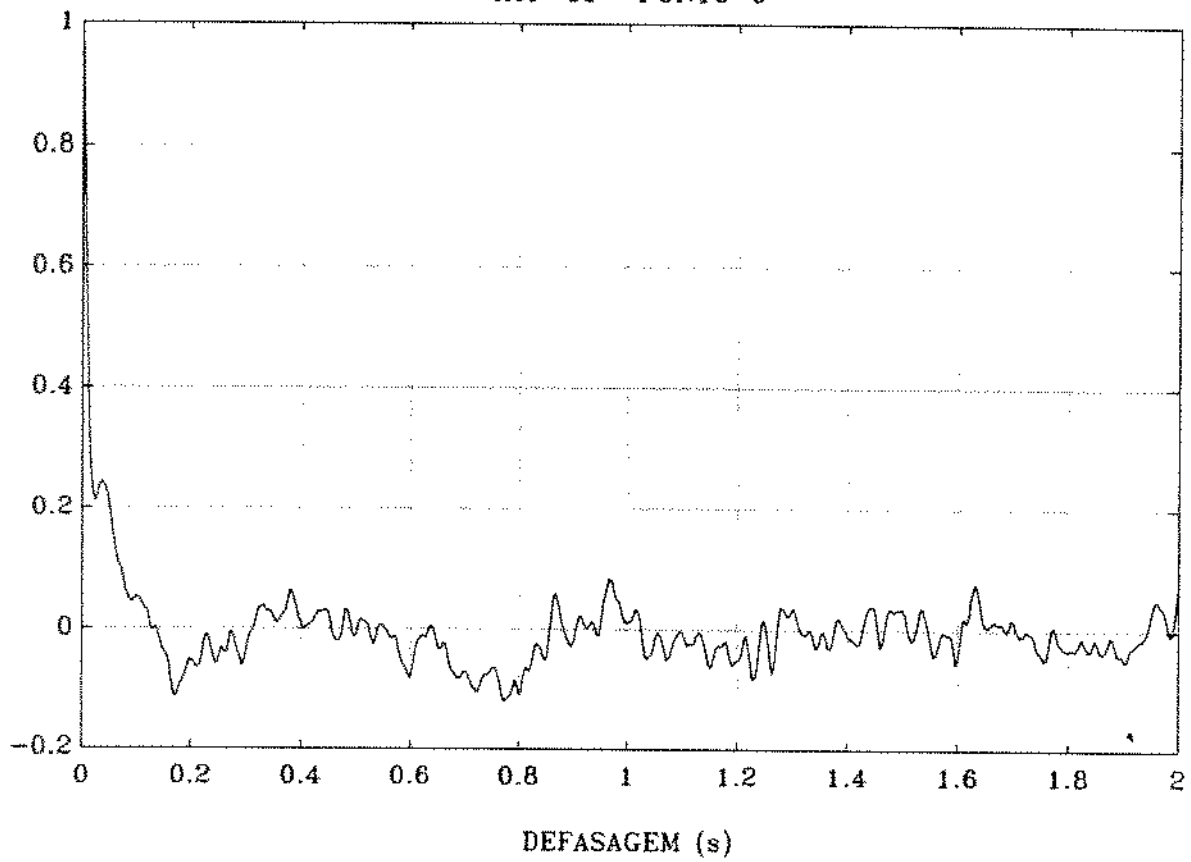
ACF-11 PONT0-7



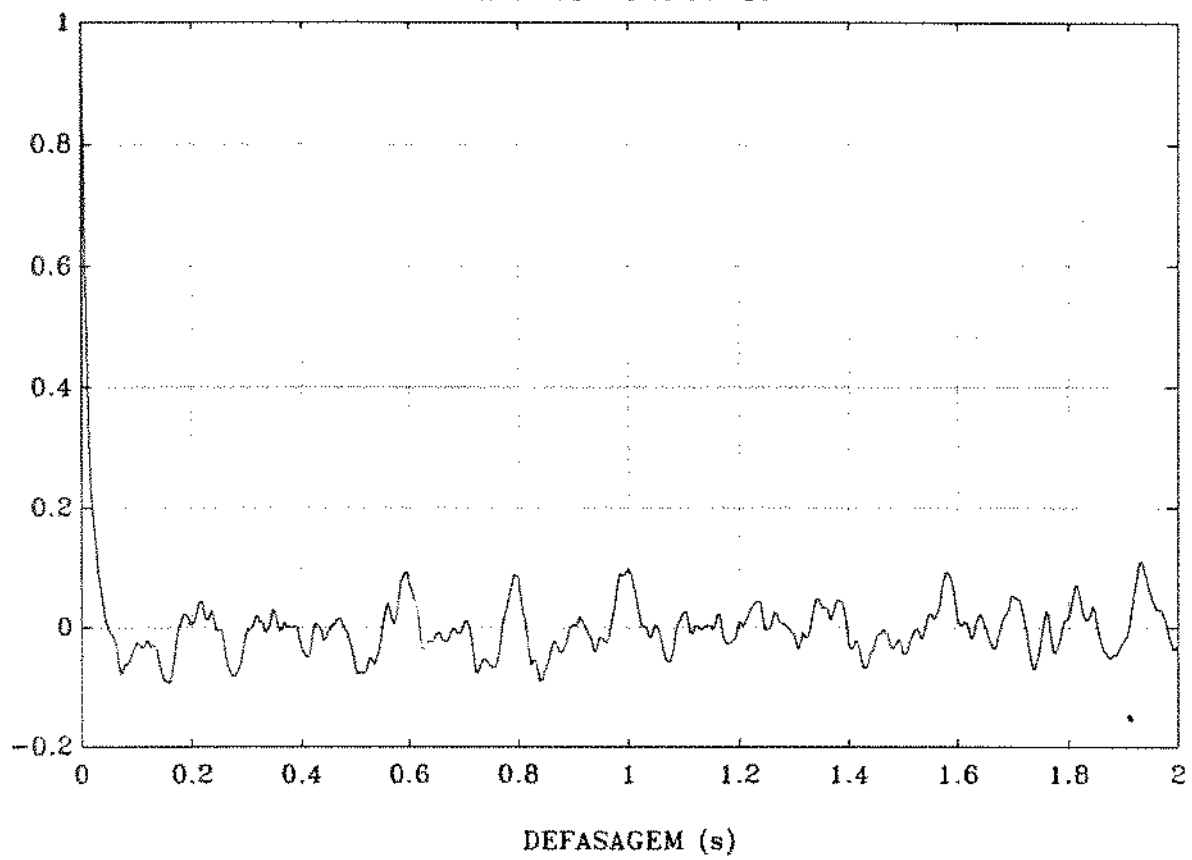
ACF-11 PONTO-8



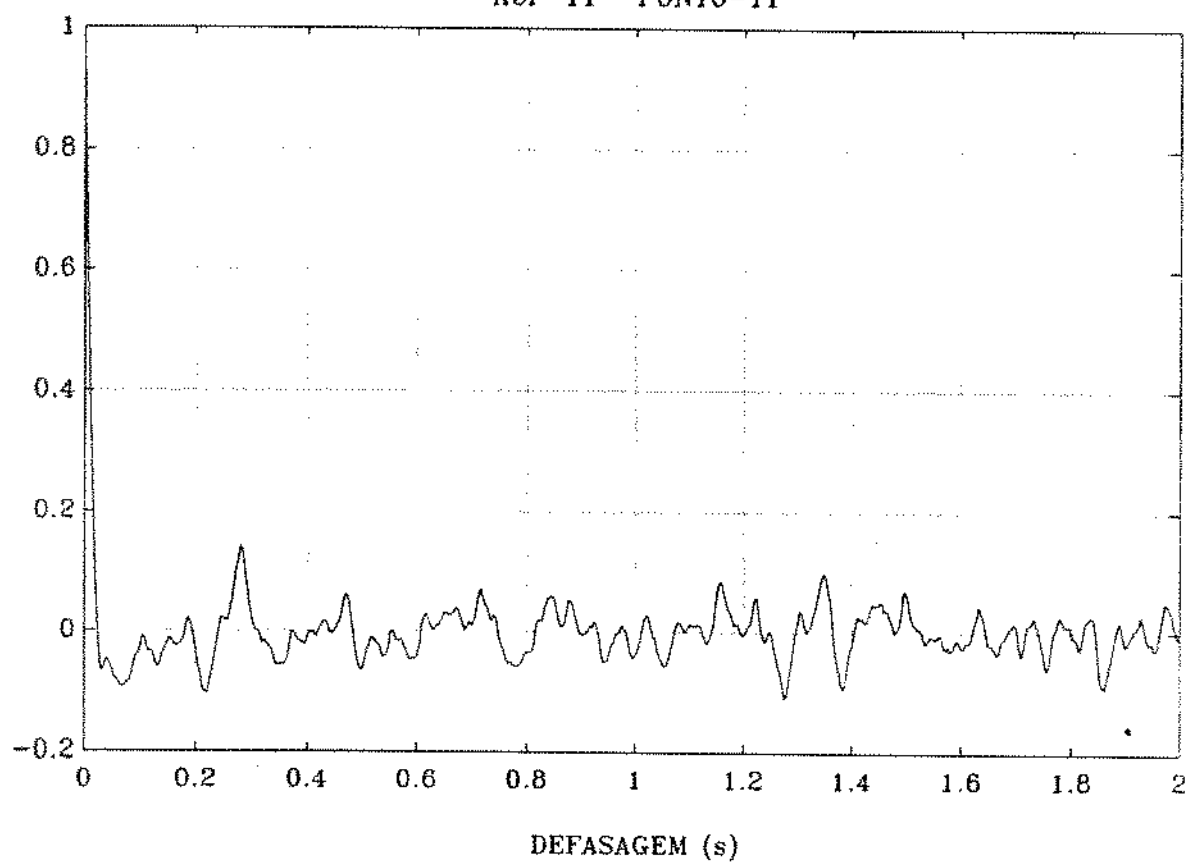
ACF-11 PONTO-9



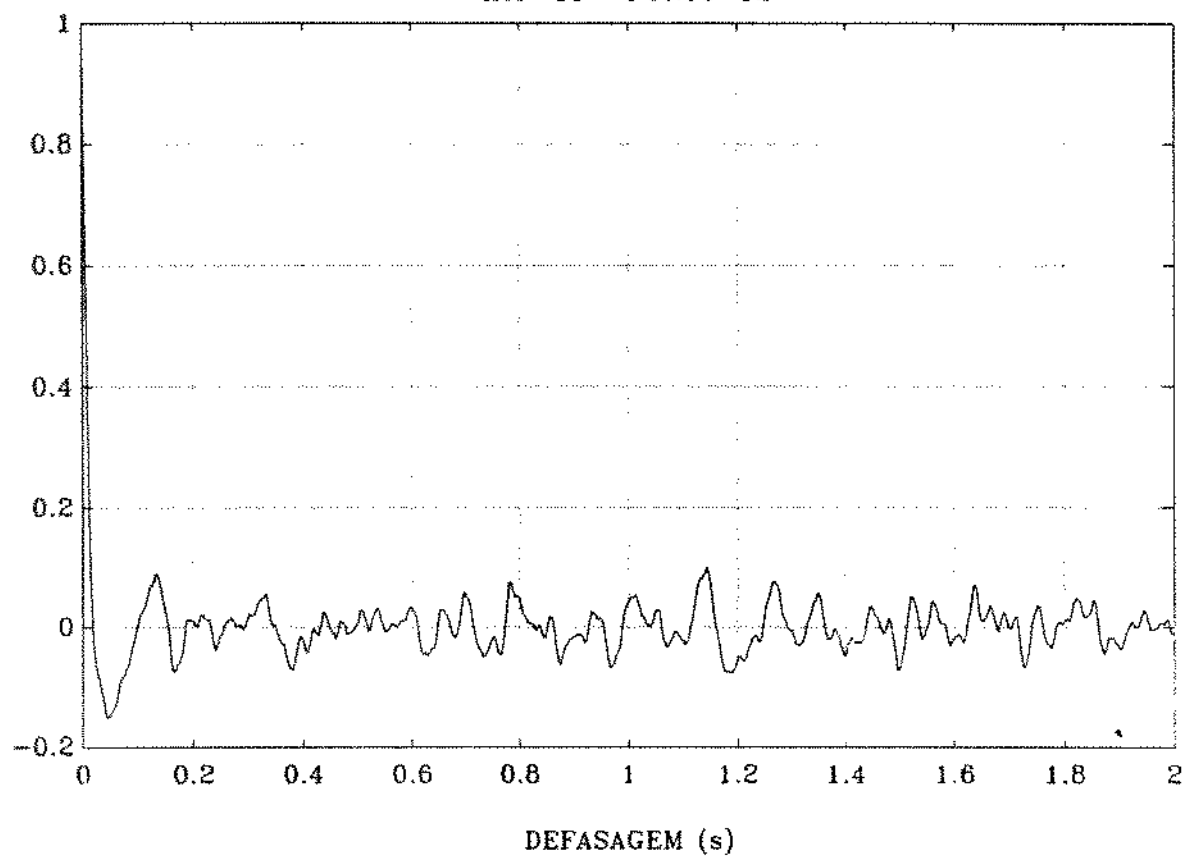
ACF-11 PONTO-10



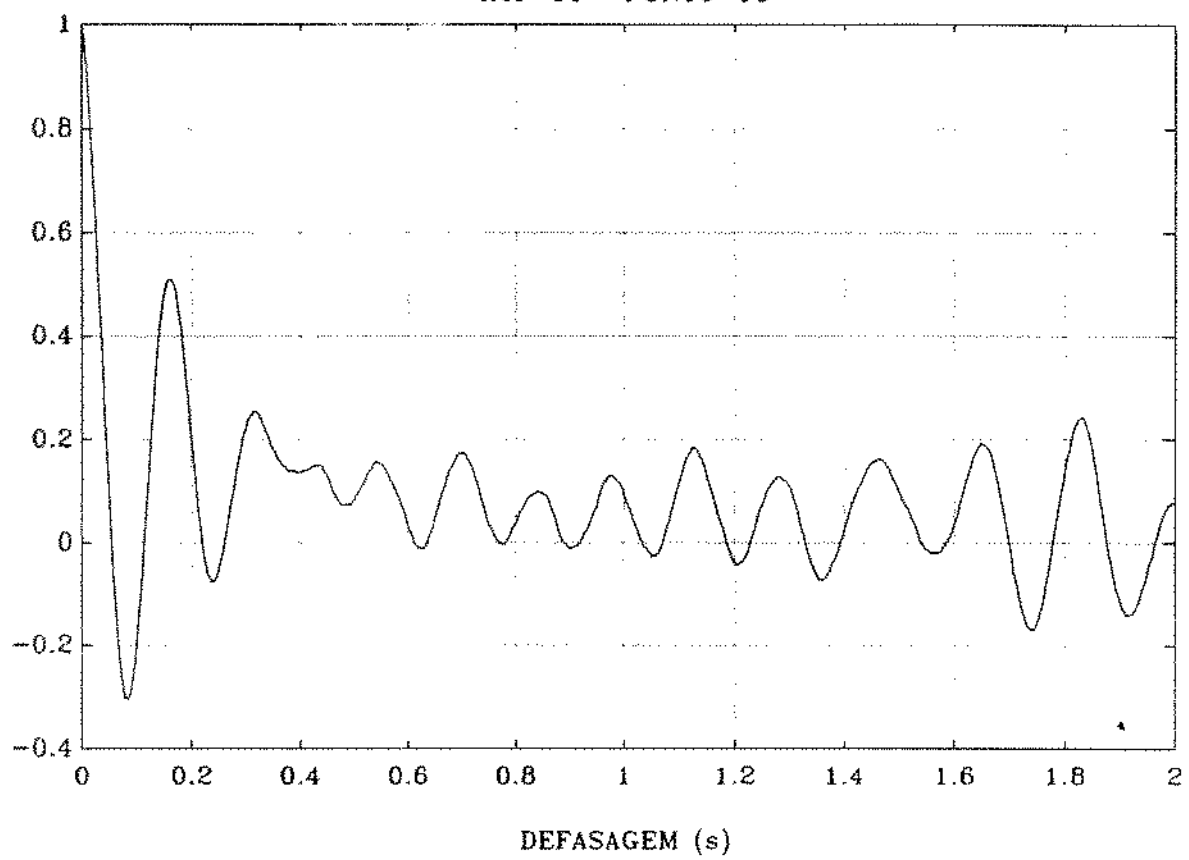
ACF-11 PONTO-11



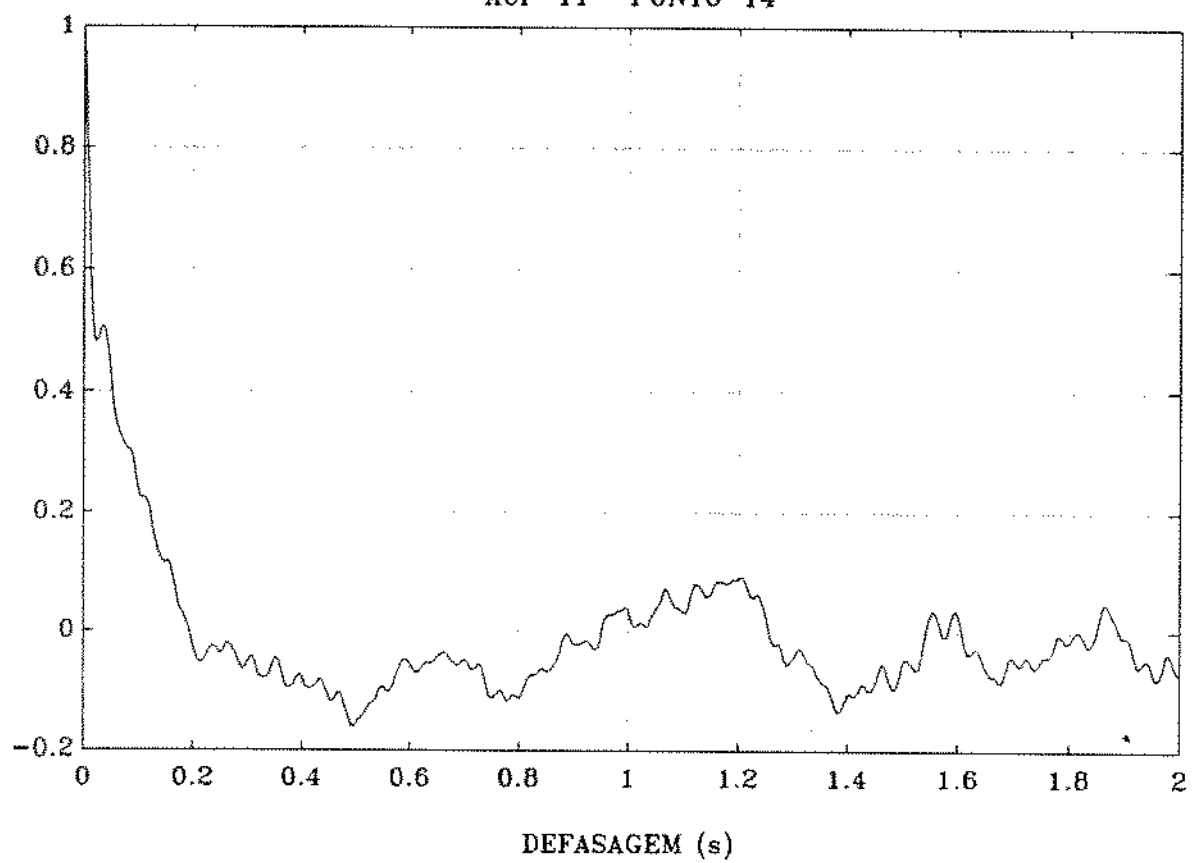
ACF-11 PONTO-12



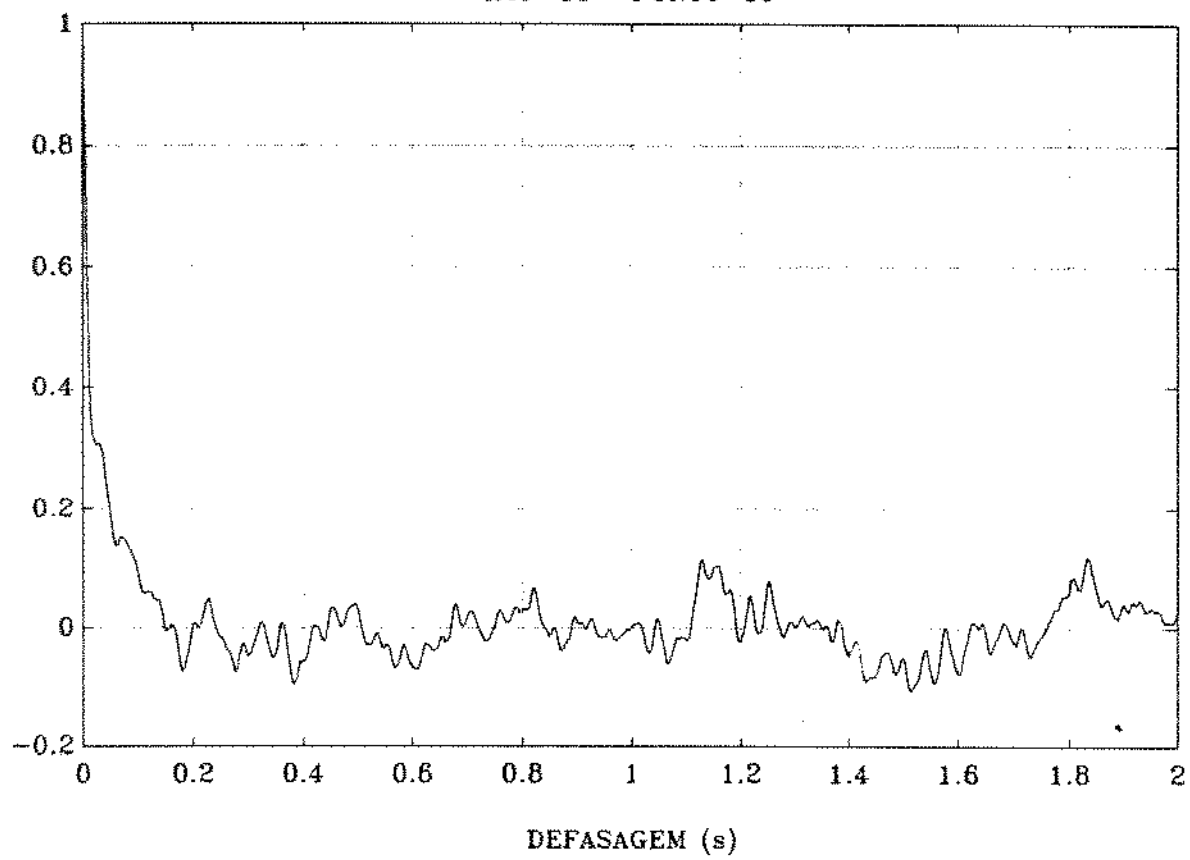
ACF-11 PONTO-13



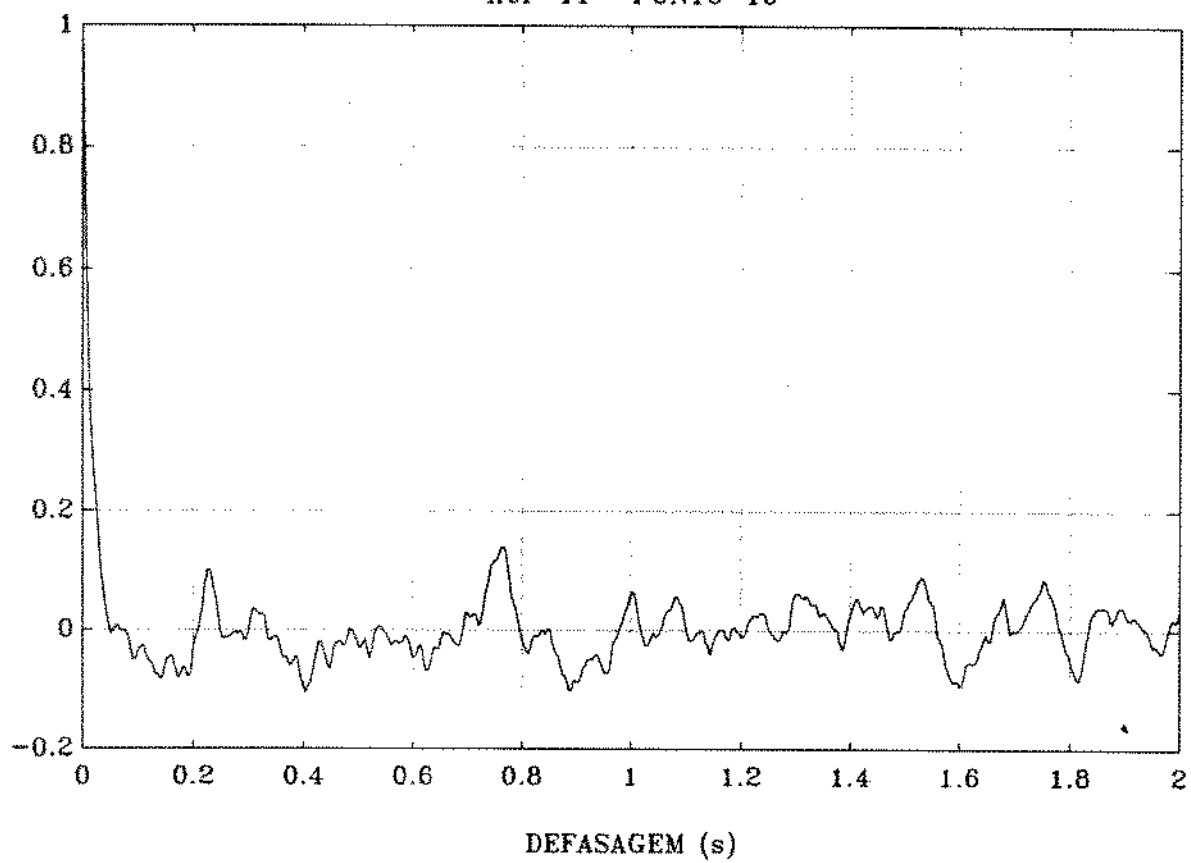
ACF-11 PONTO-14



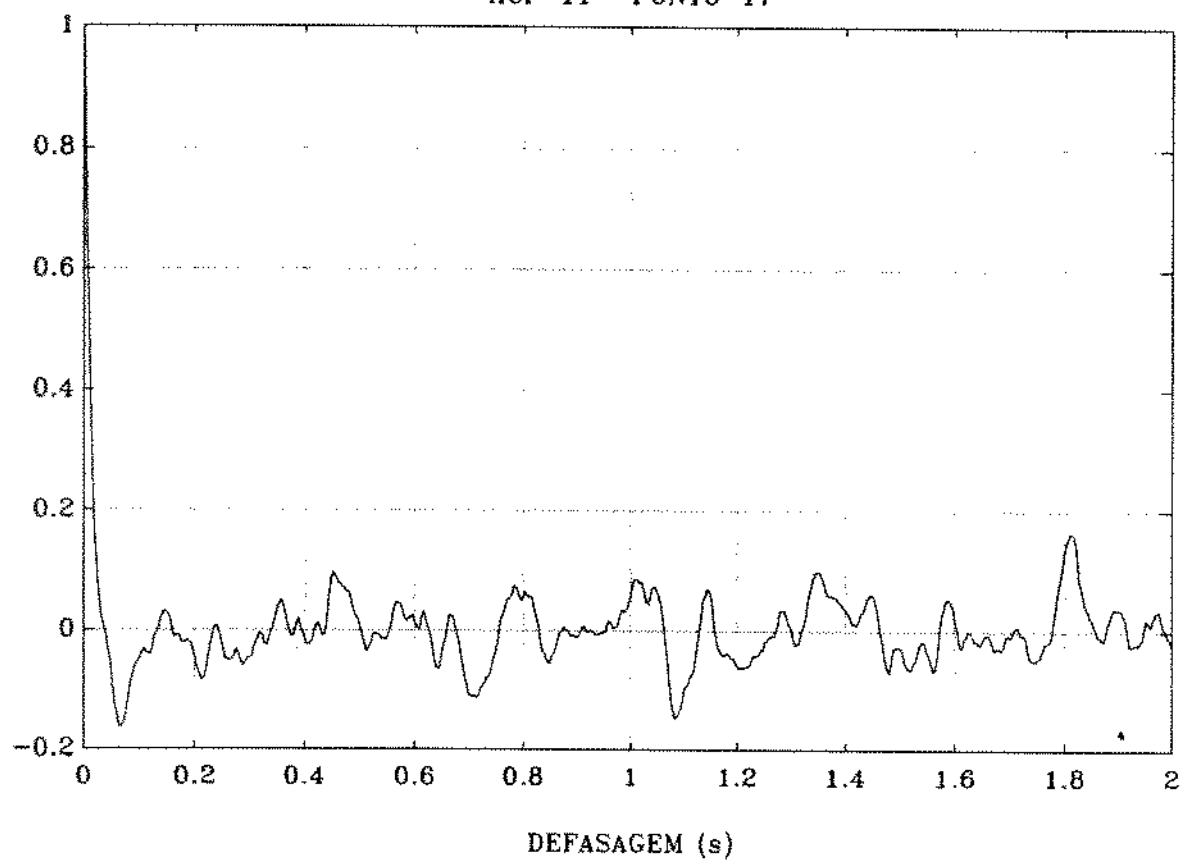
ACF-11 PONTO-15



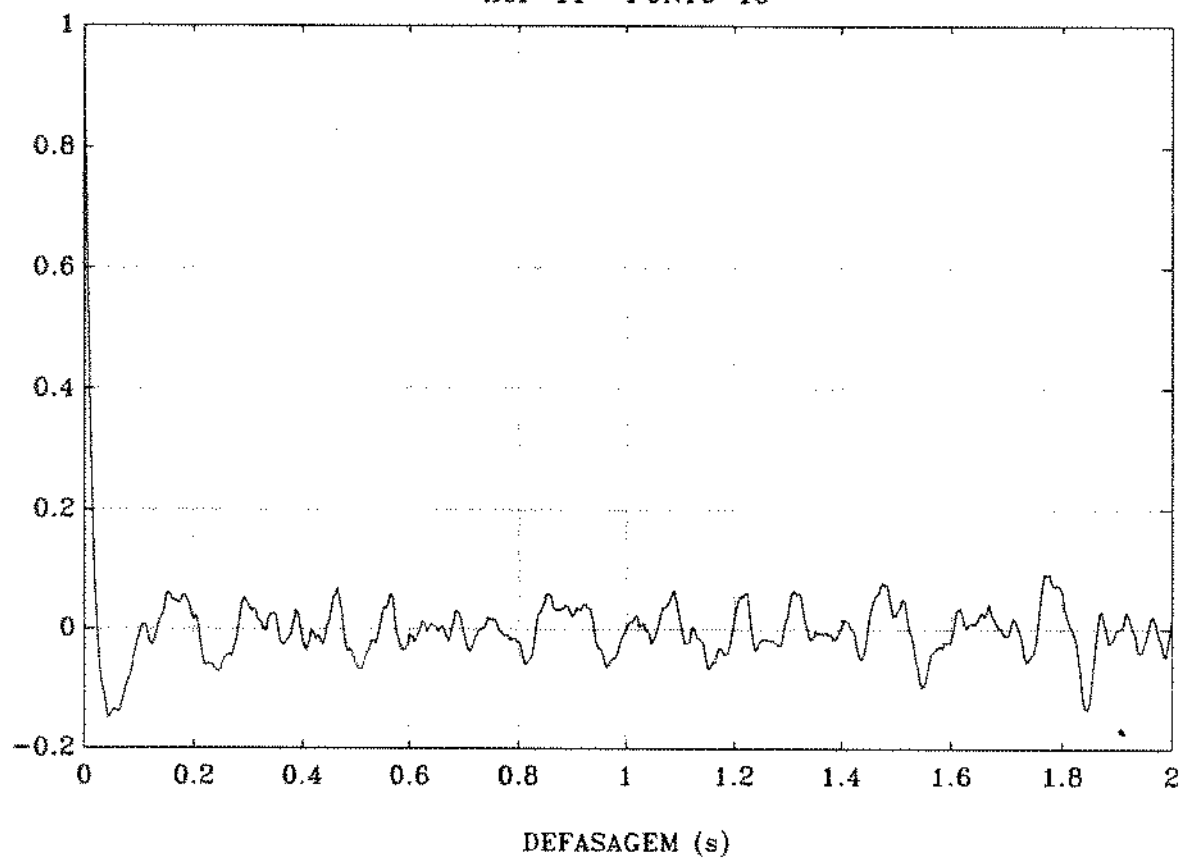
ACF-11 PONTO-16



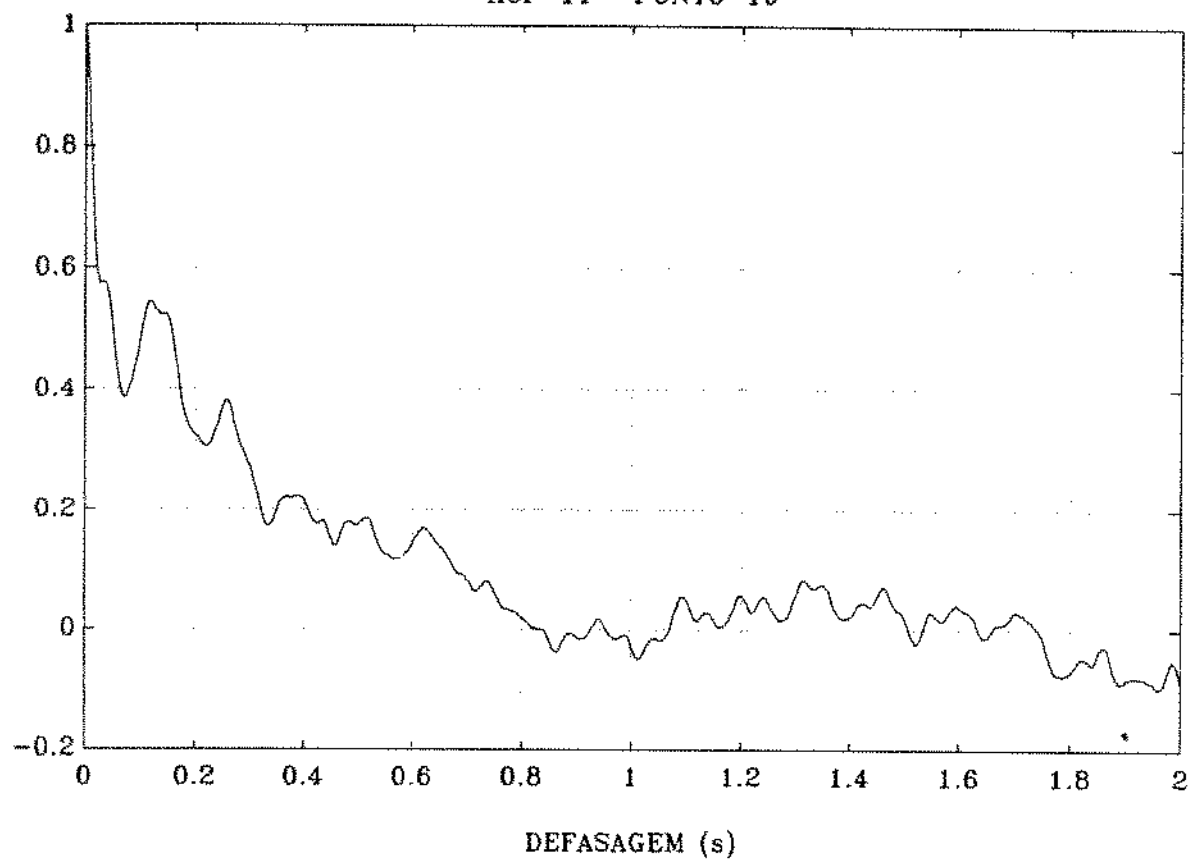
ACF-11 PONTO-17



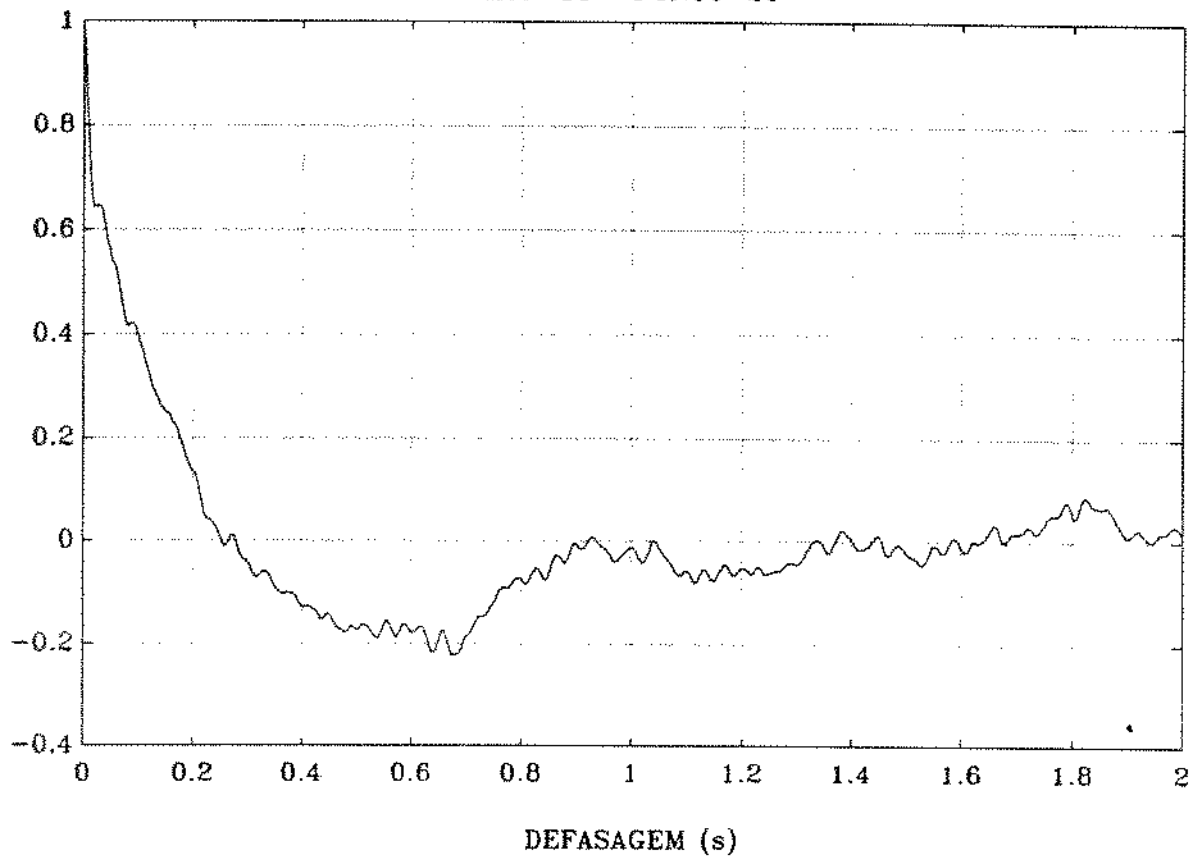
ACF-11 PONTO-18



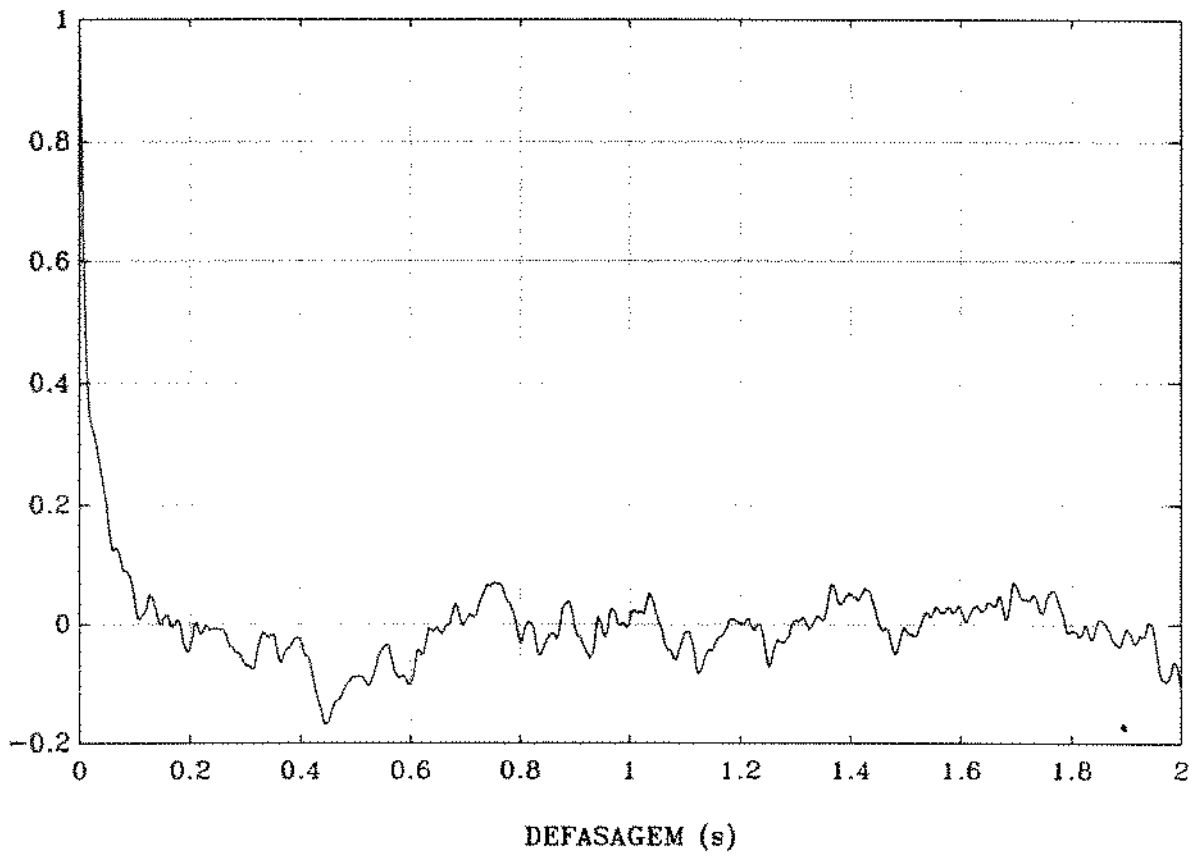
ACF-11 PONTO-19



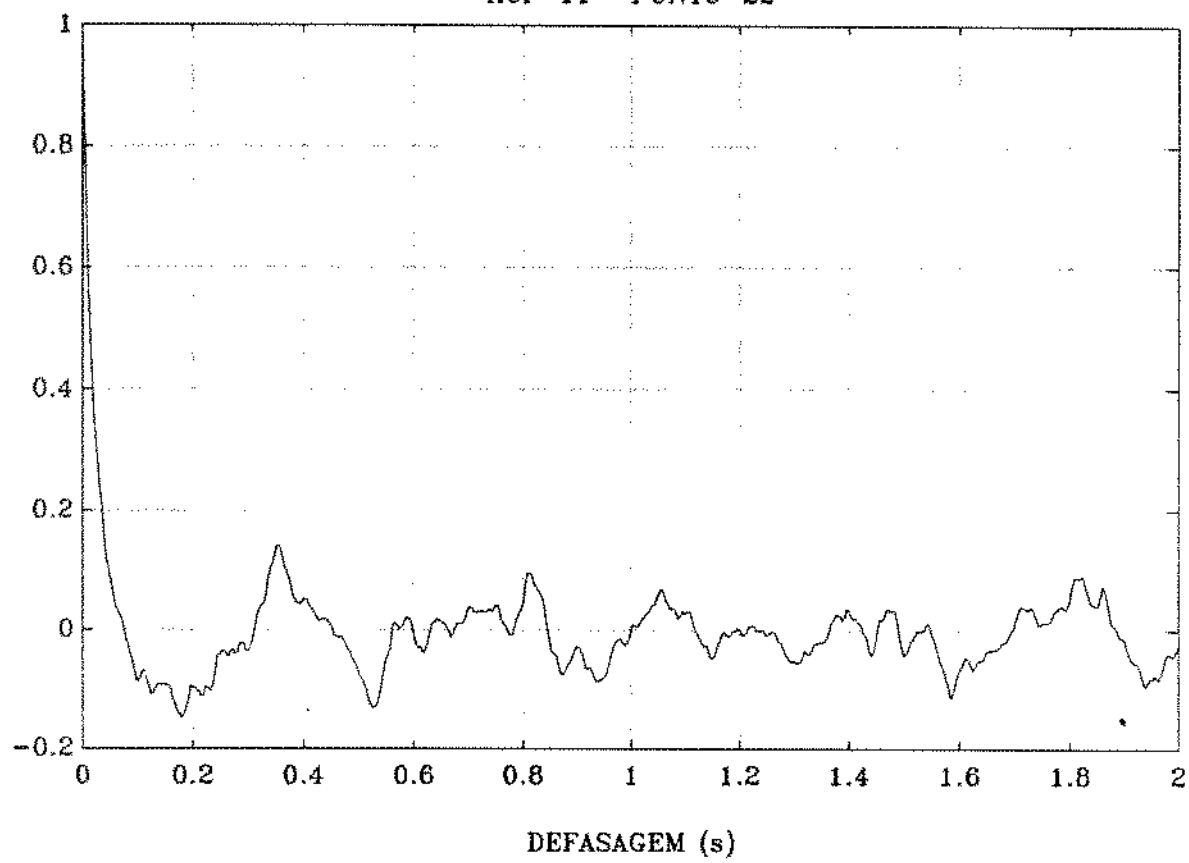
ACF-11 PONTO-20



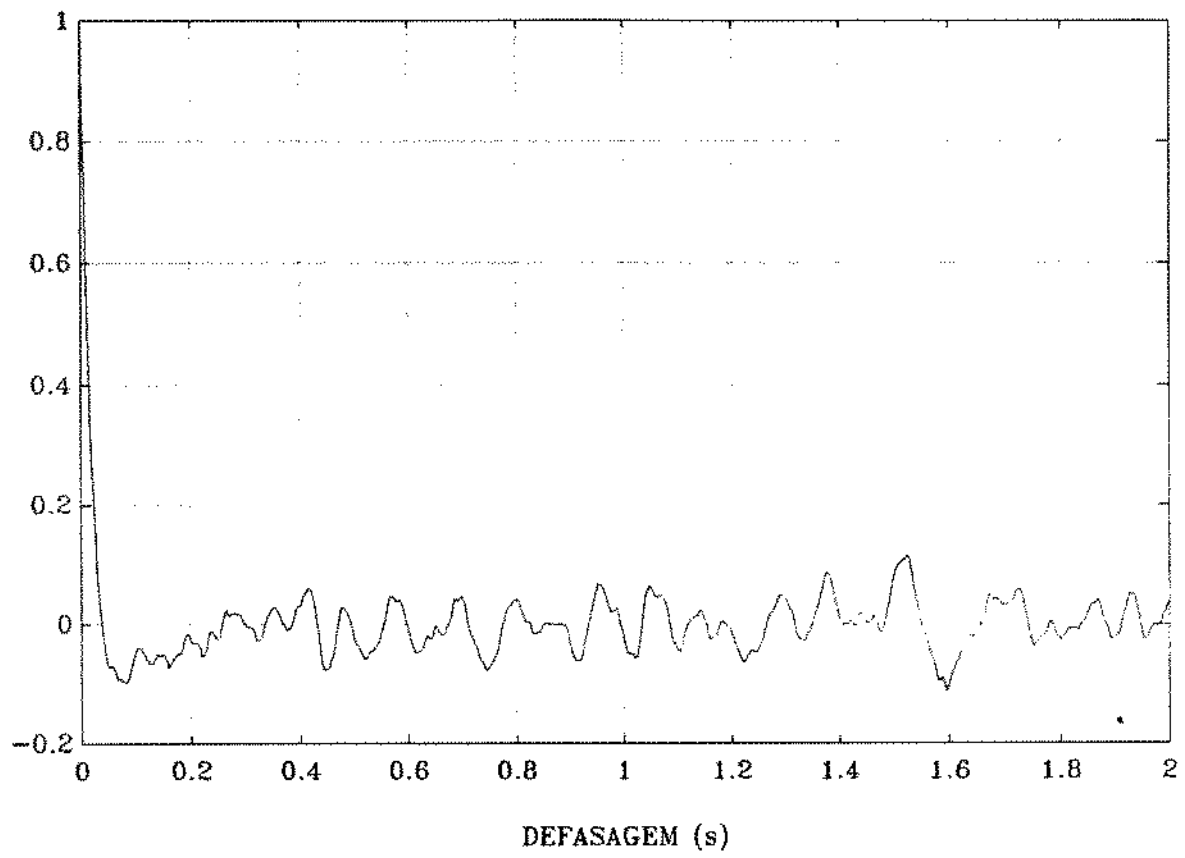
ACF-11 PONTO-21



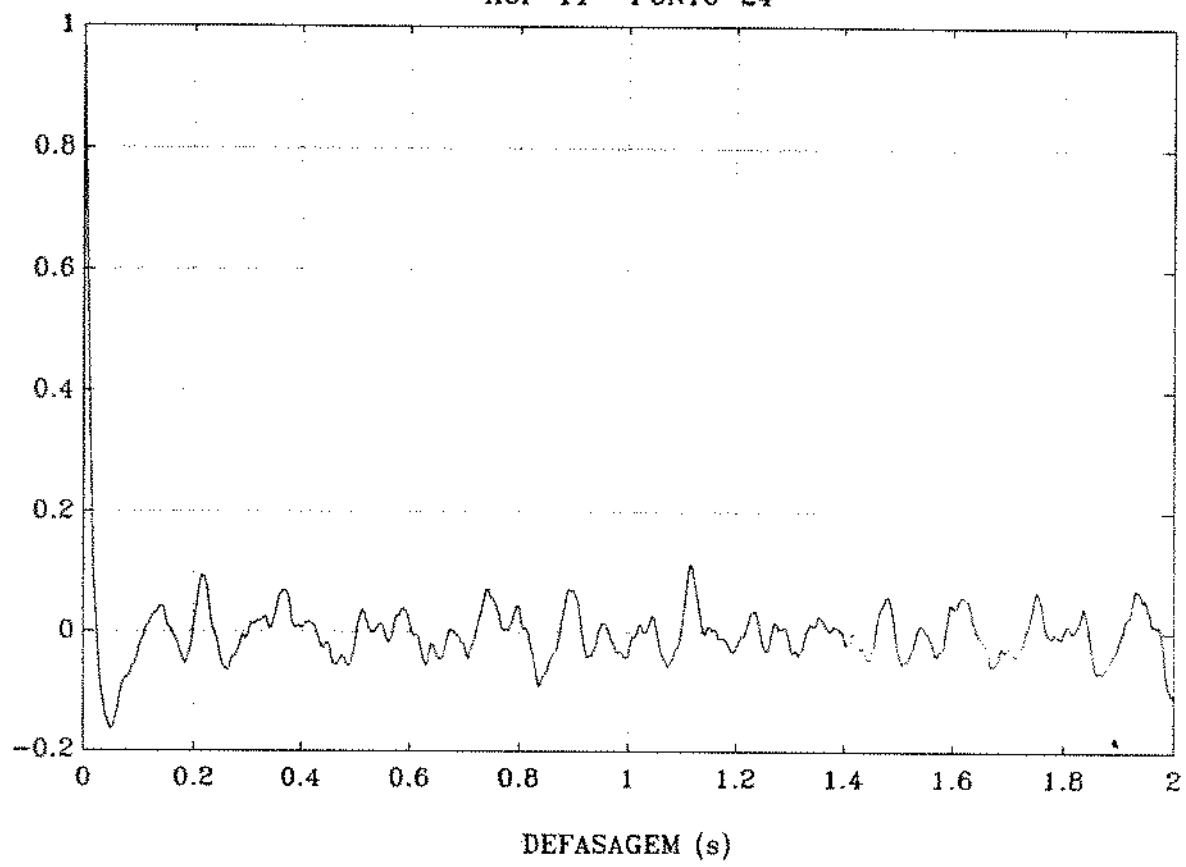
ACF-11 PONTO-22



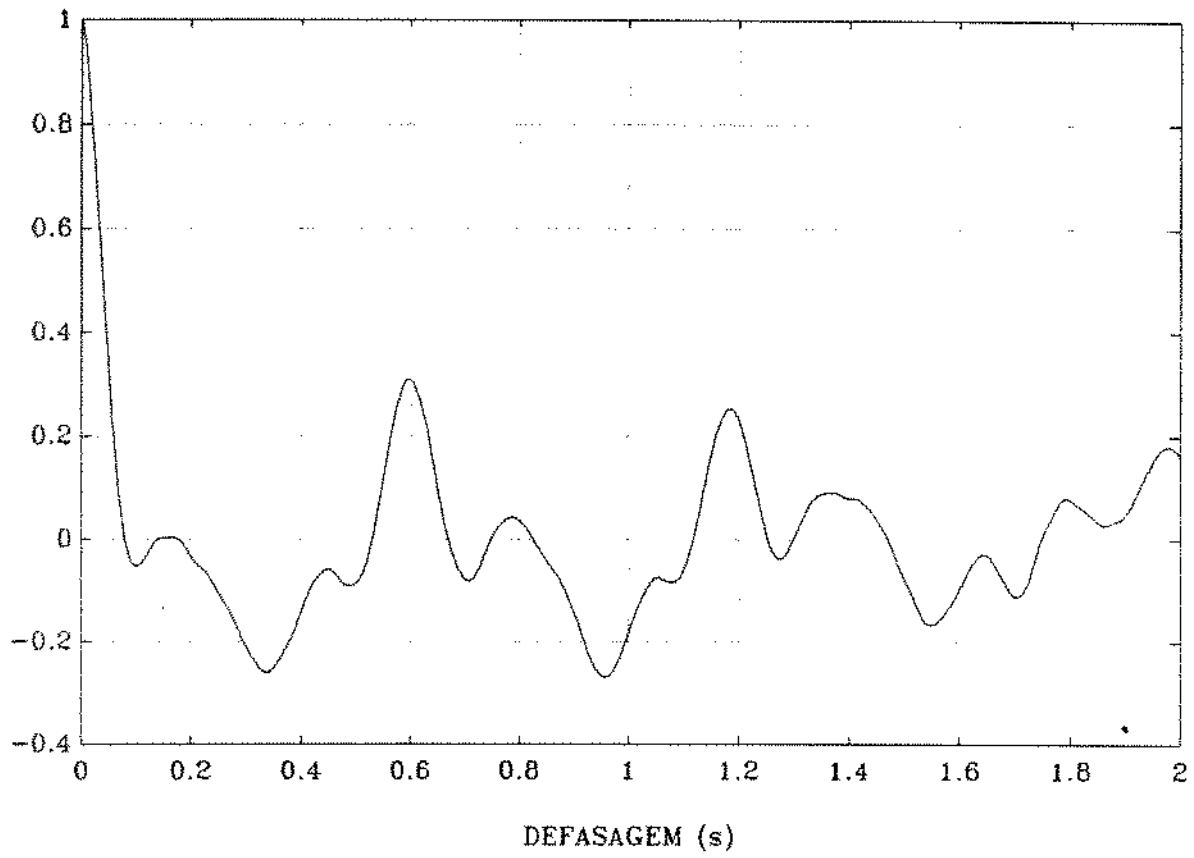
ACF-11 PONT0-23



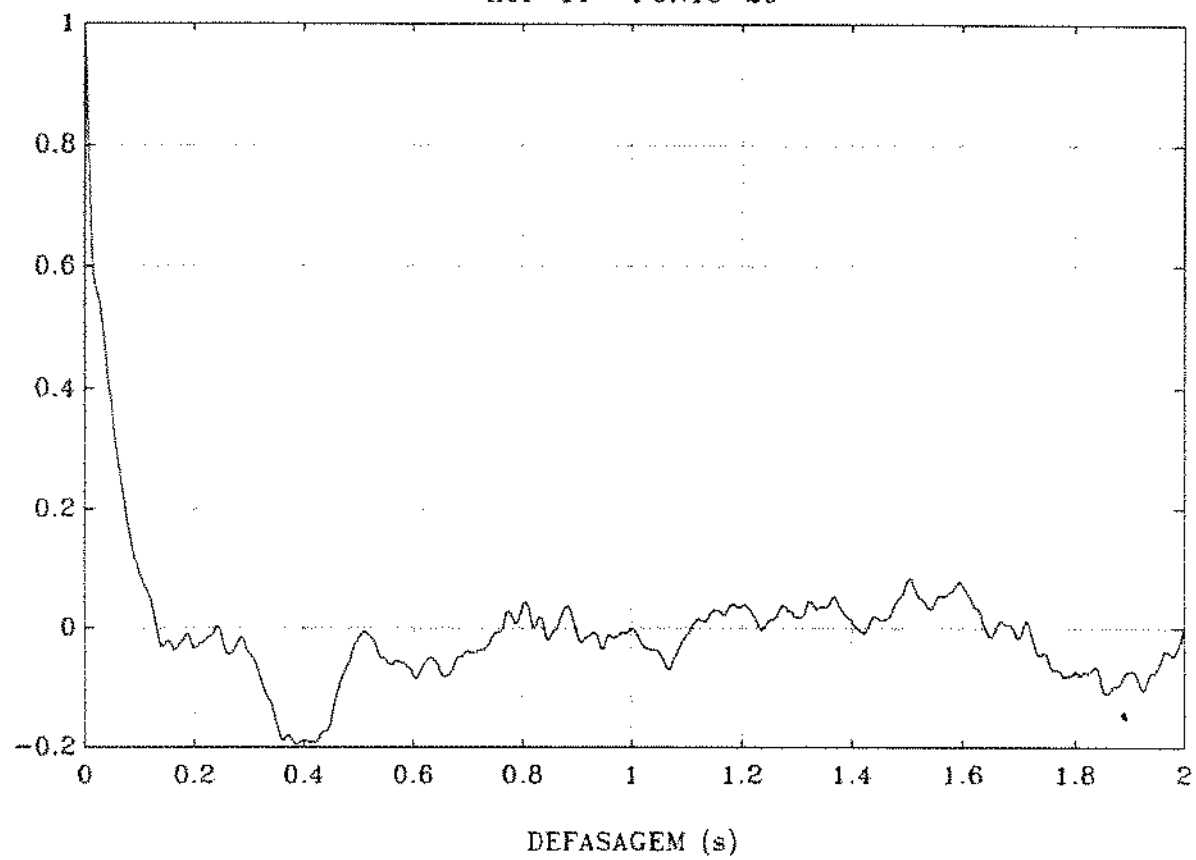
ACF-11 PONTO-24



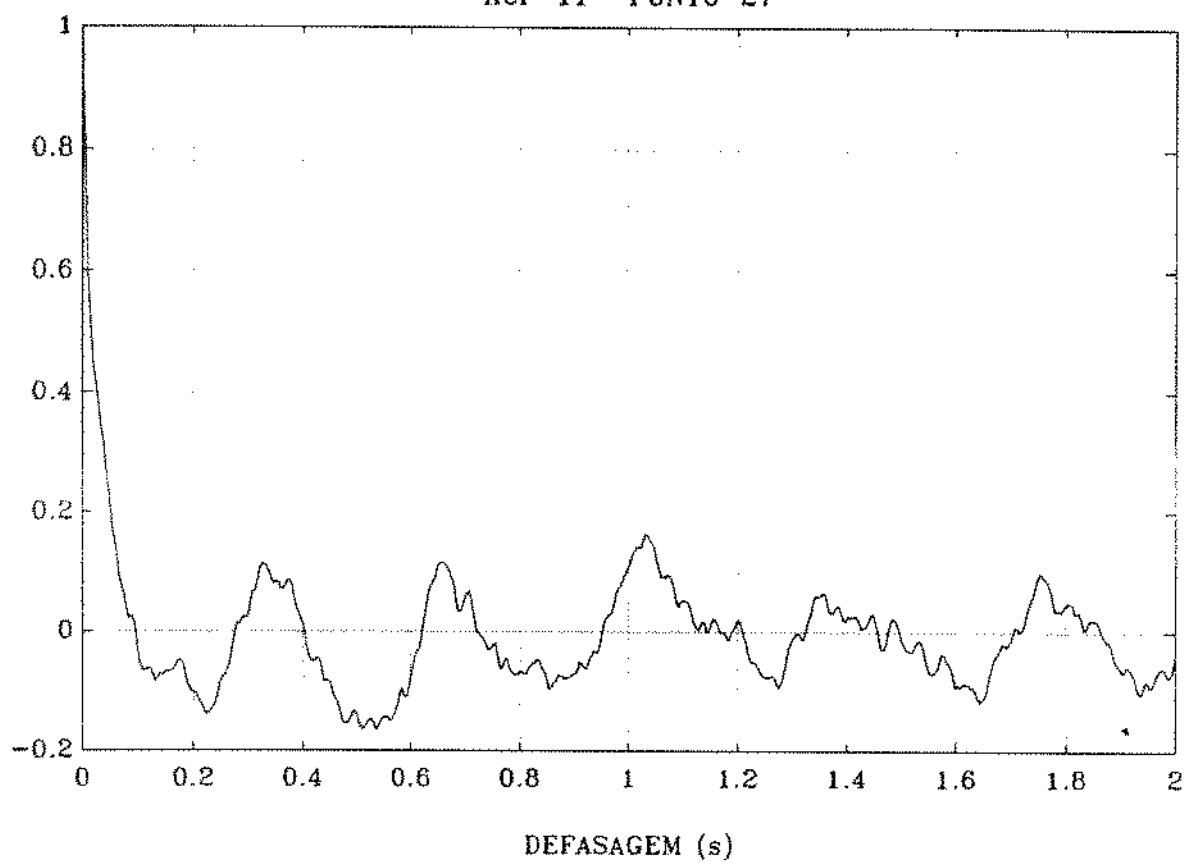
ACF-11 PONTO-25



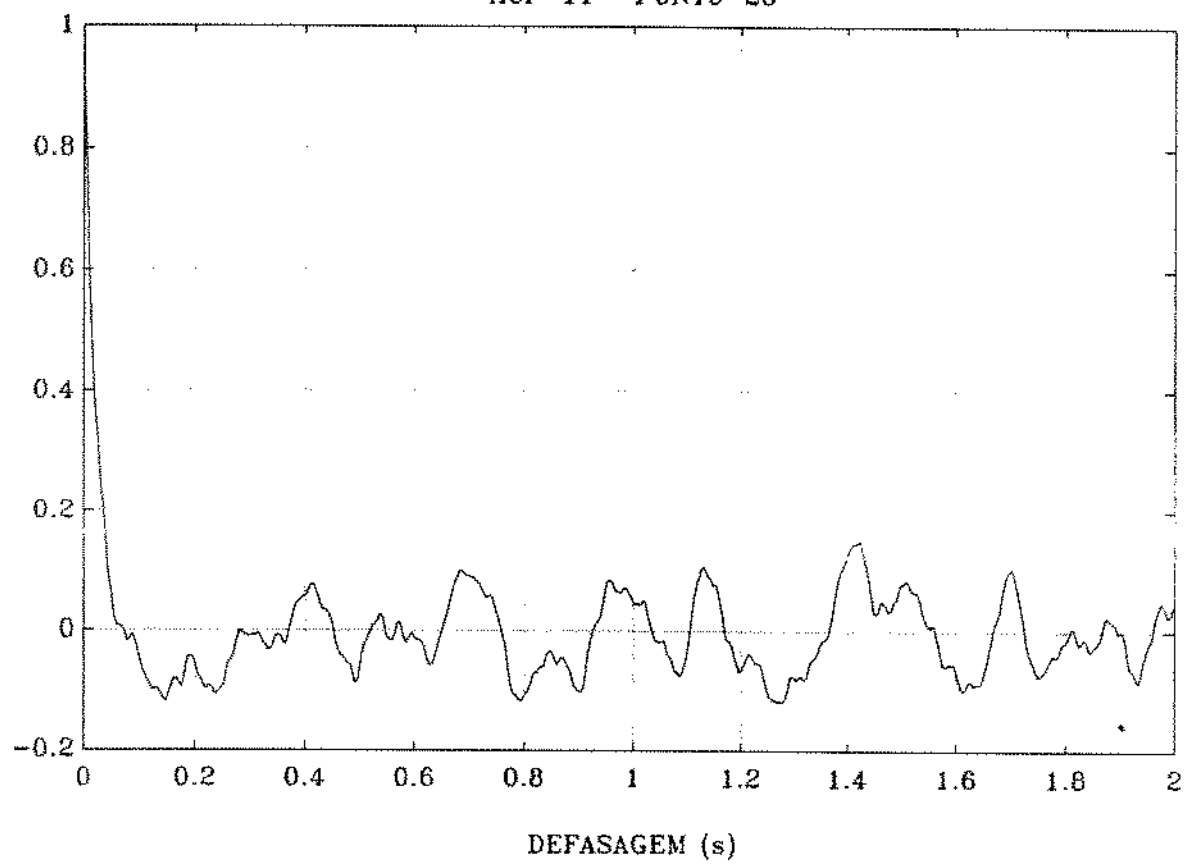
ACF-11 PONTO-26



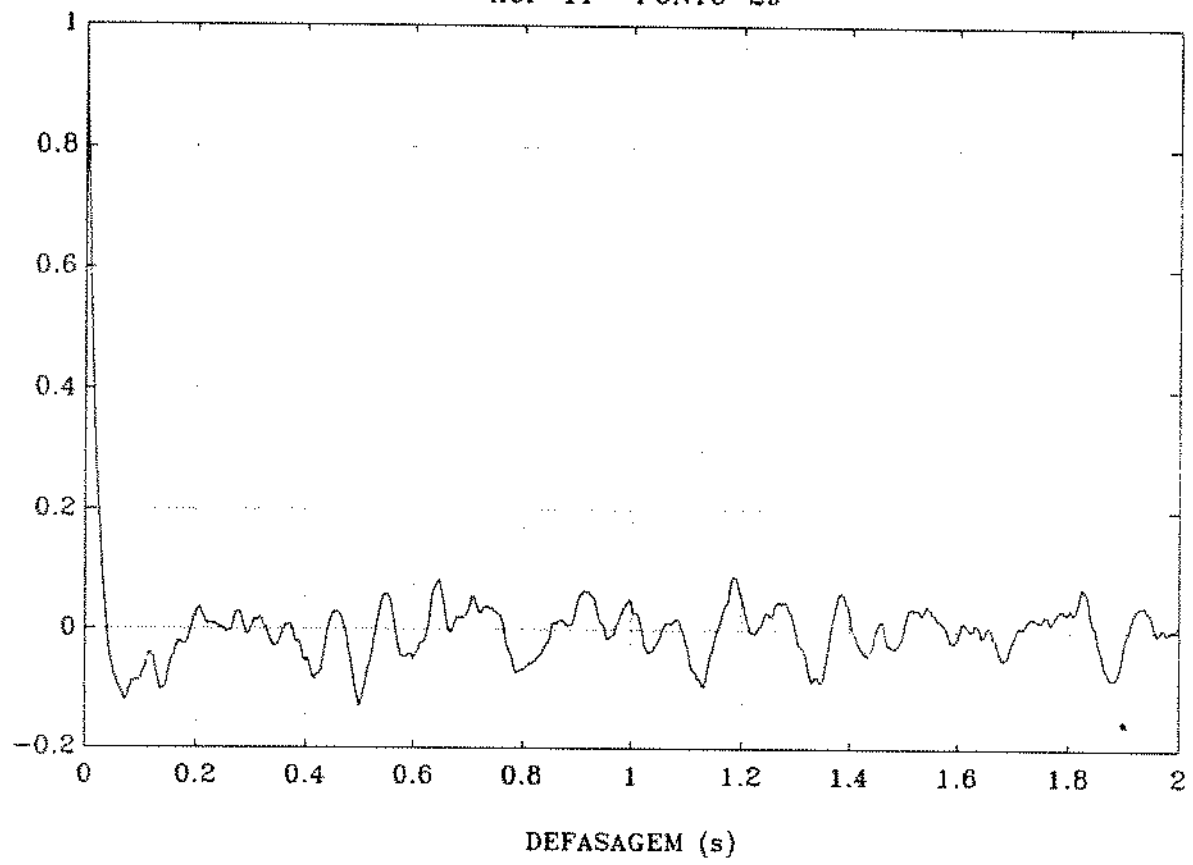
ACF-11 PONTO-27



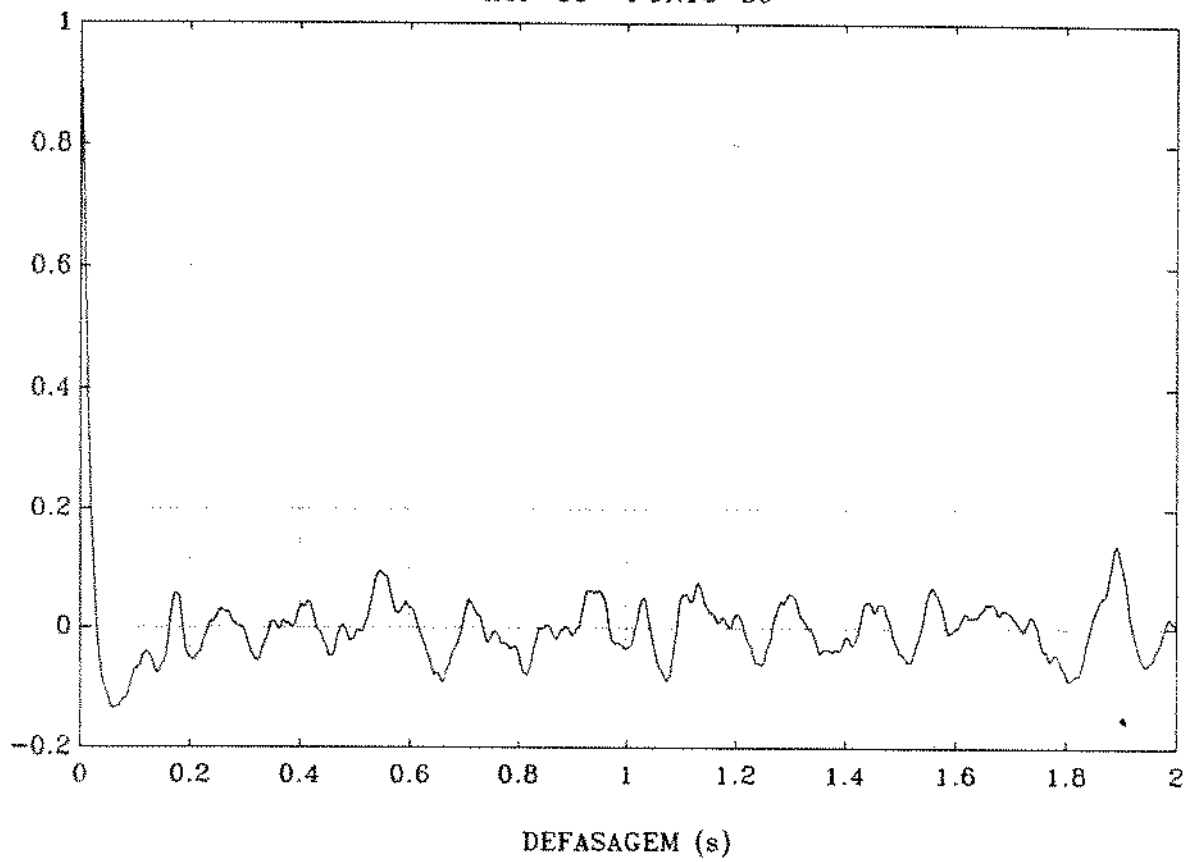
ACF-11 PONT0-28



ACF-11 PONT0-29



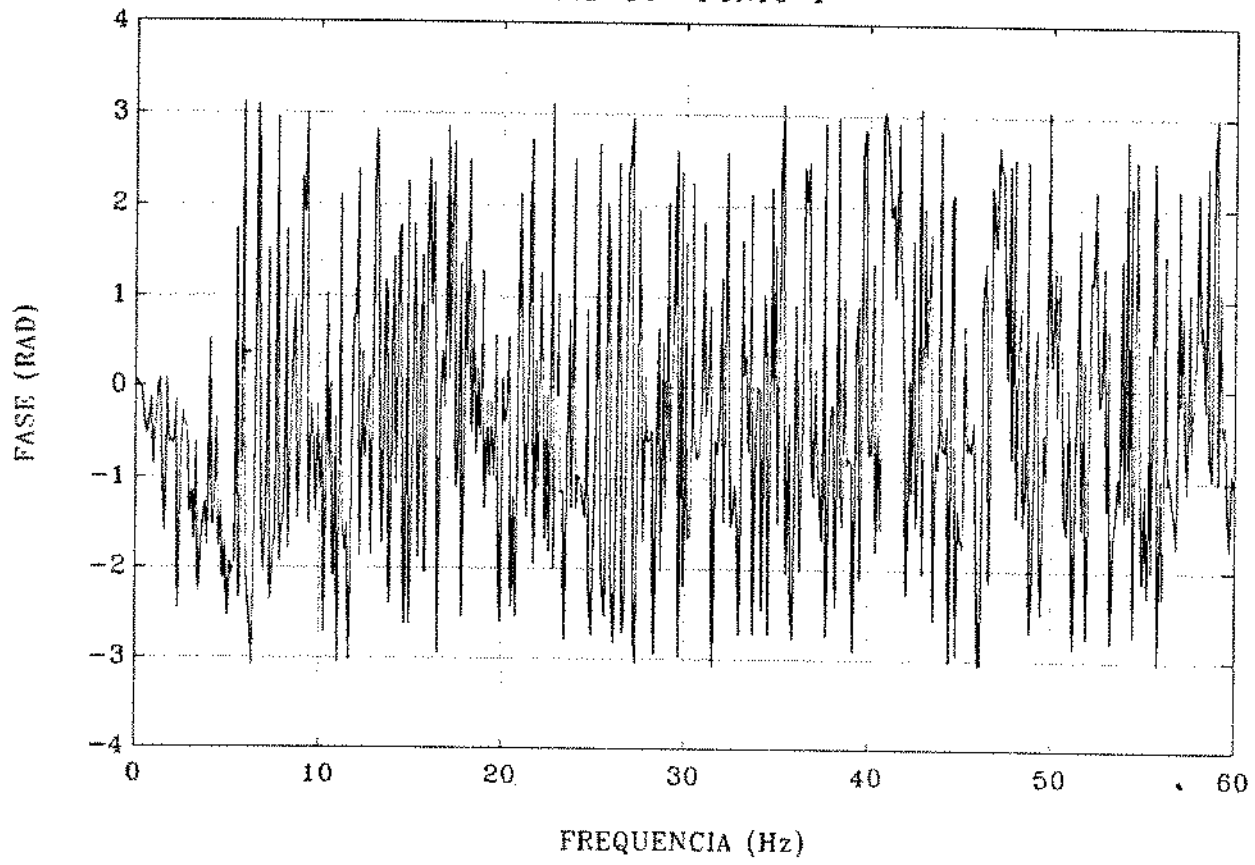
ACF-11 PONTO-30



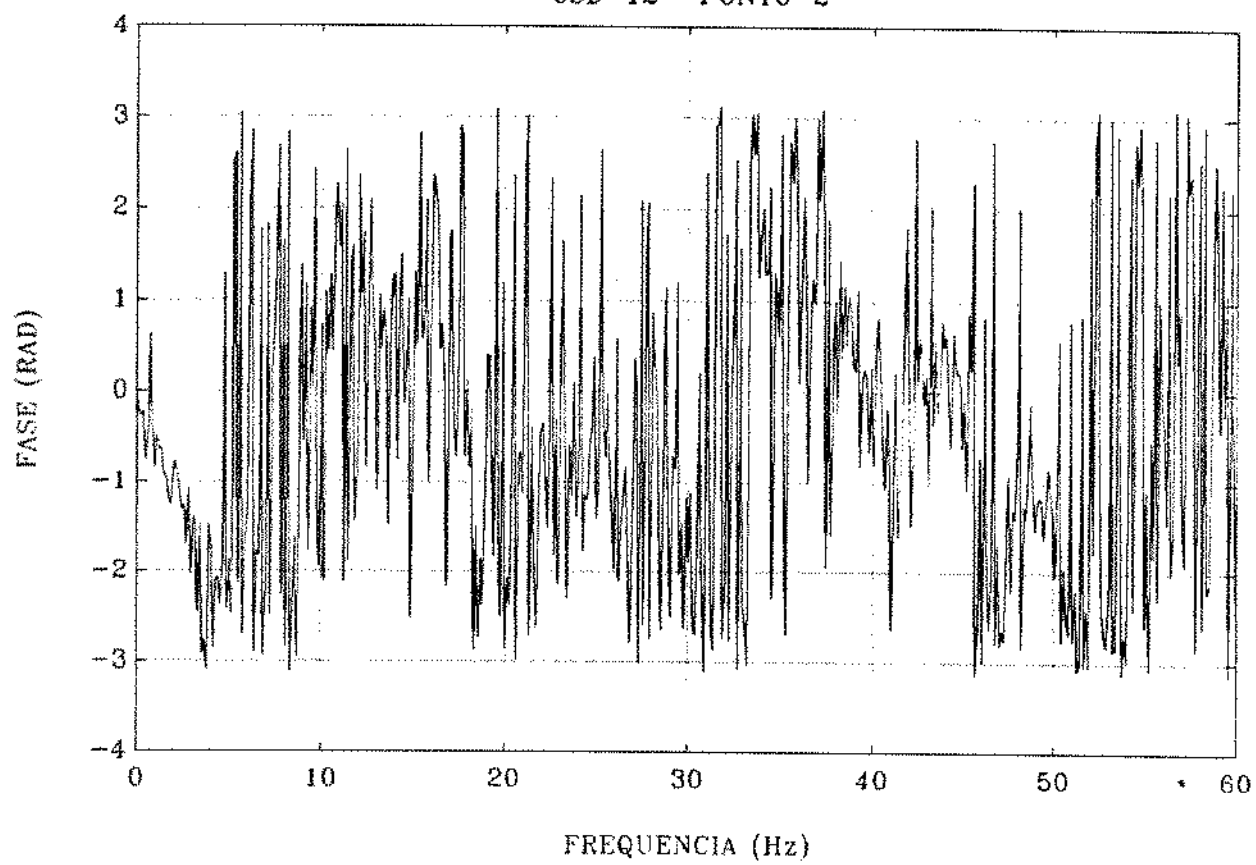
VI.5 - FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL CRUZADA DE POTÊNCIA

(SONDAS 1 E 2)

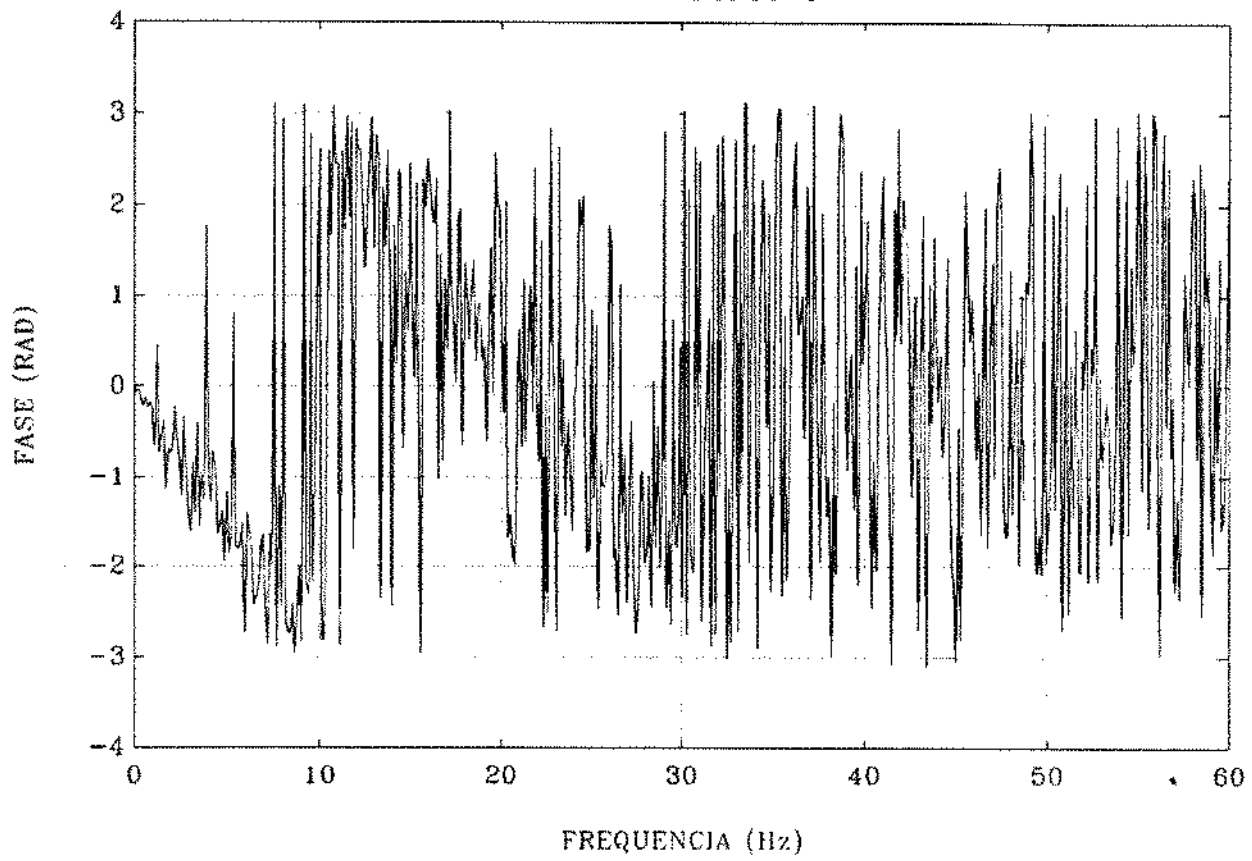
CSD-12 PONT0-1



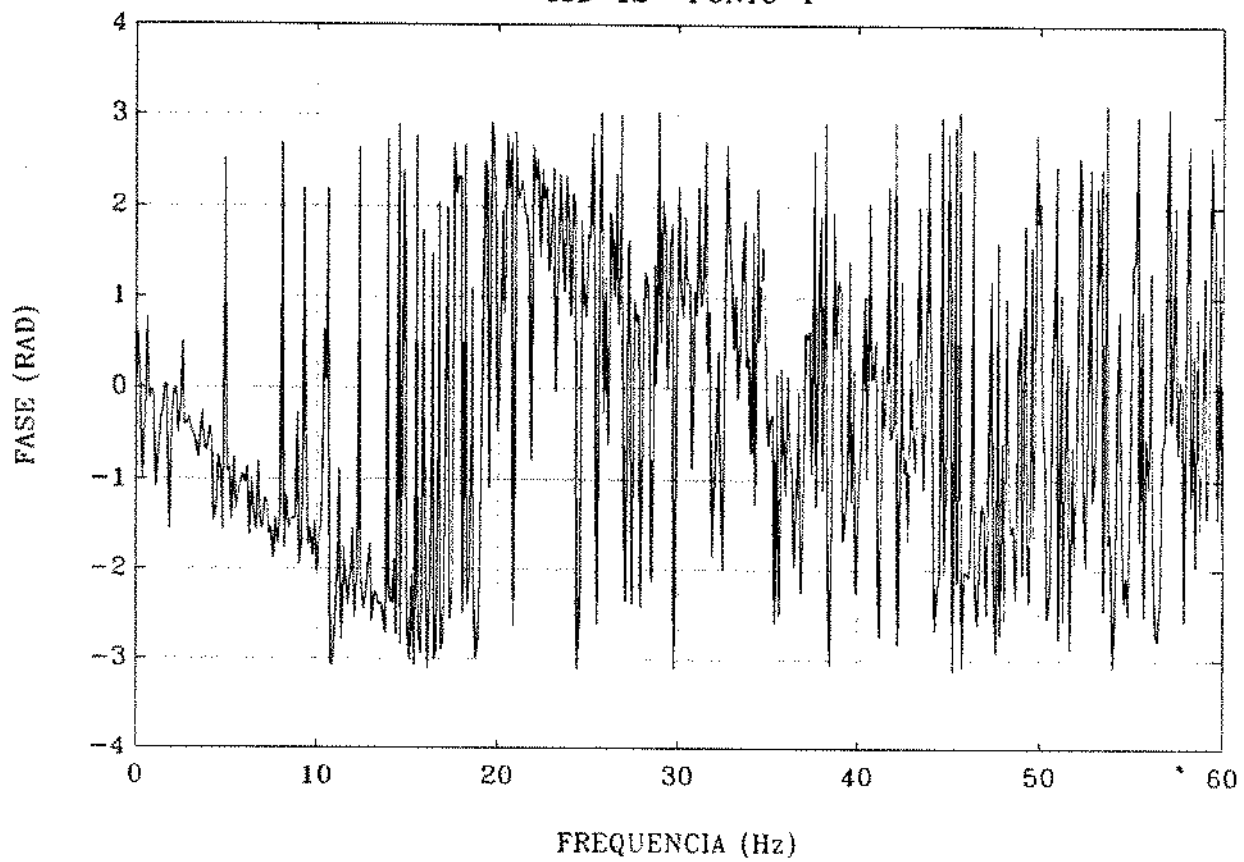
CSD-12 PONT0-2



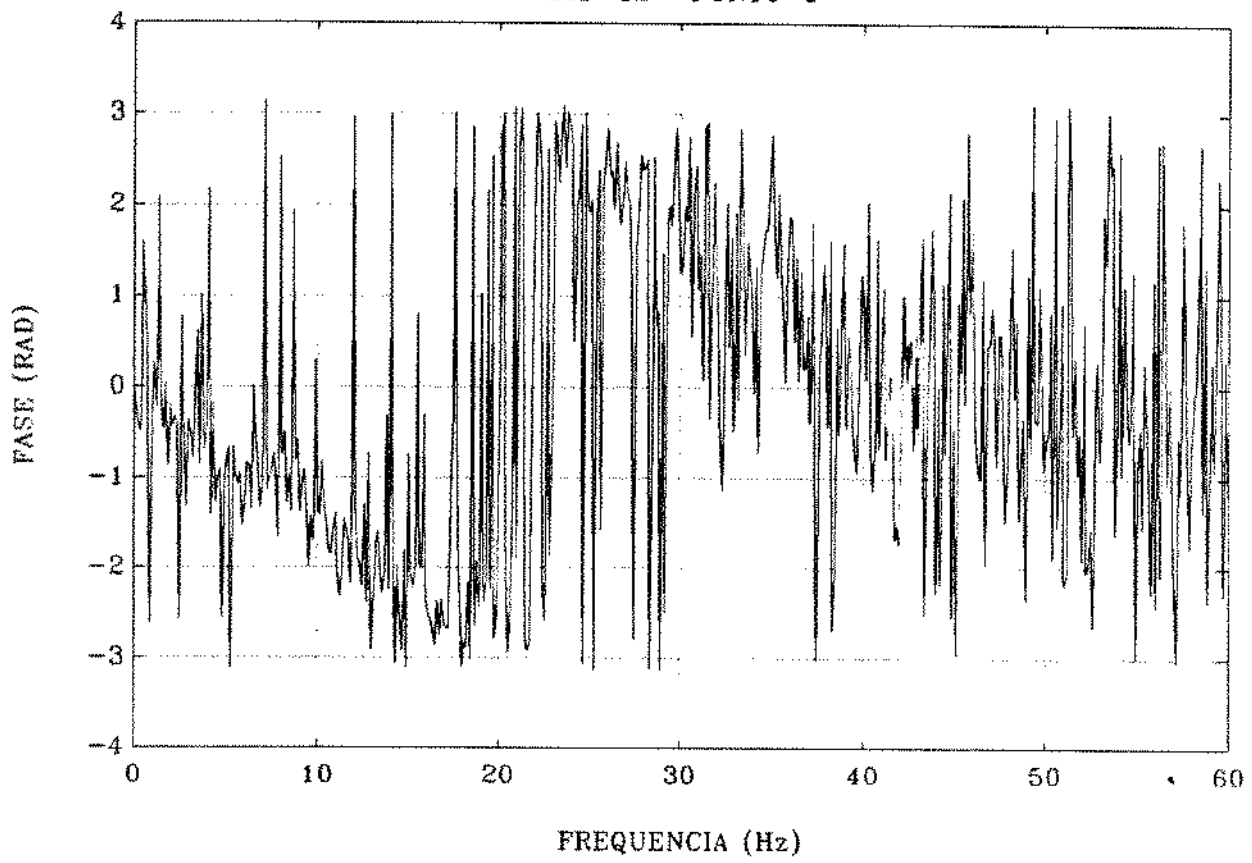
CSD-12 PONTO-3



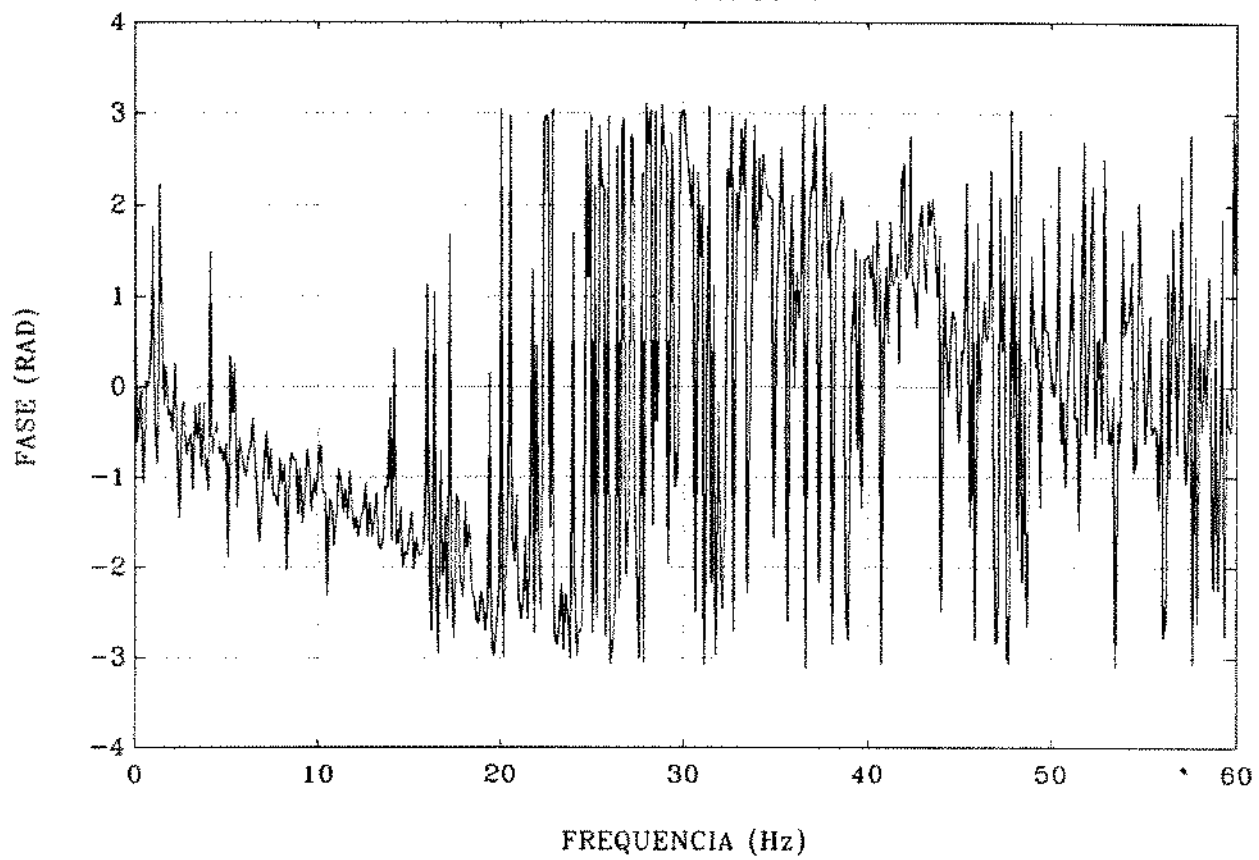
CSD-12 PONTO-4



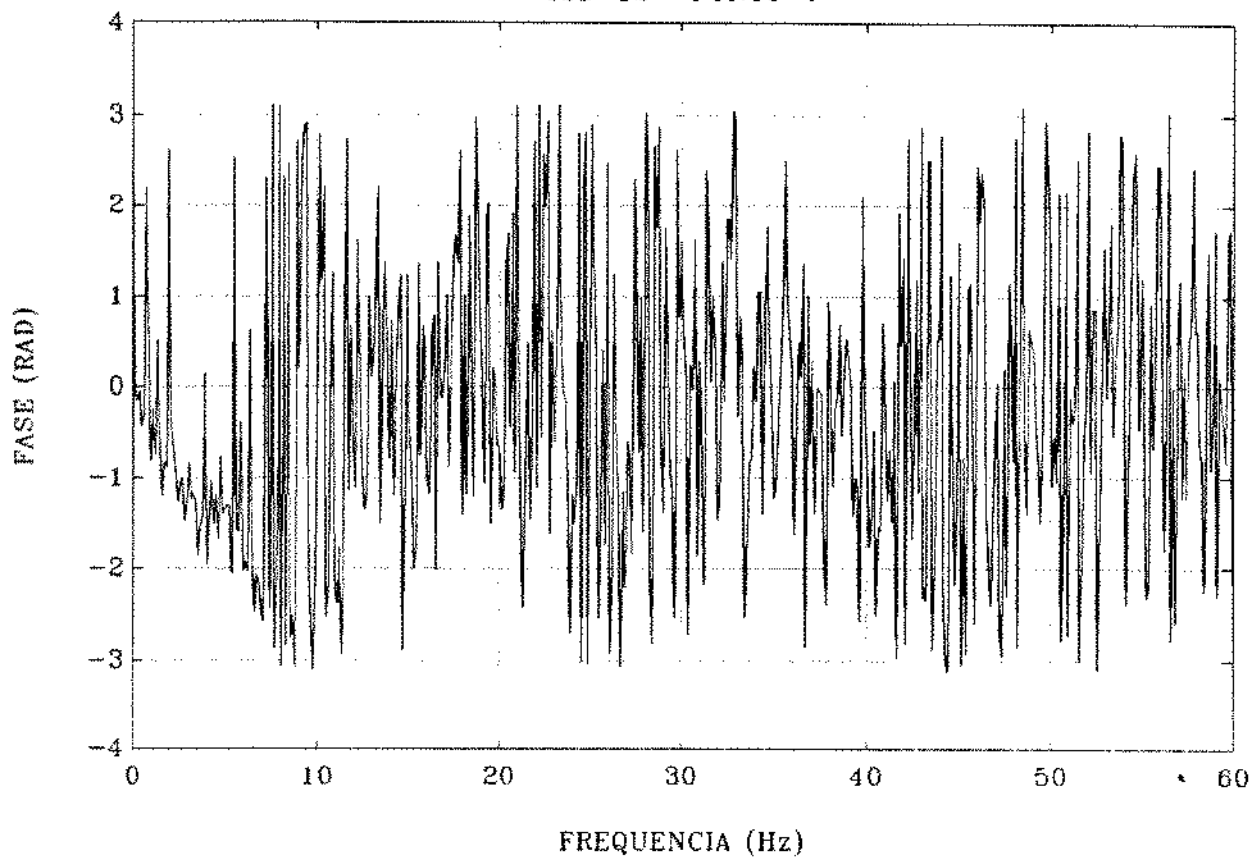
CSD-12 PONT0-5



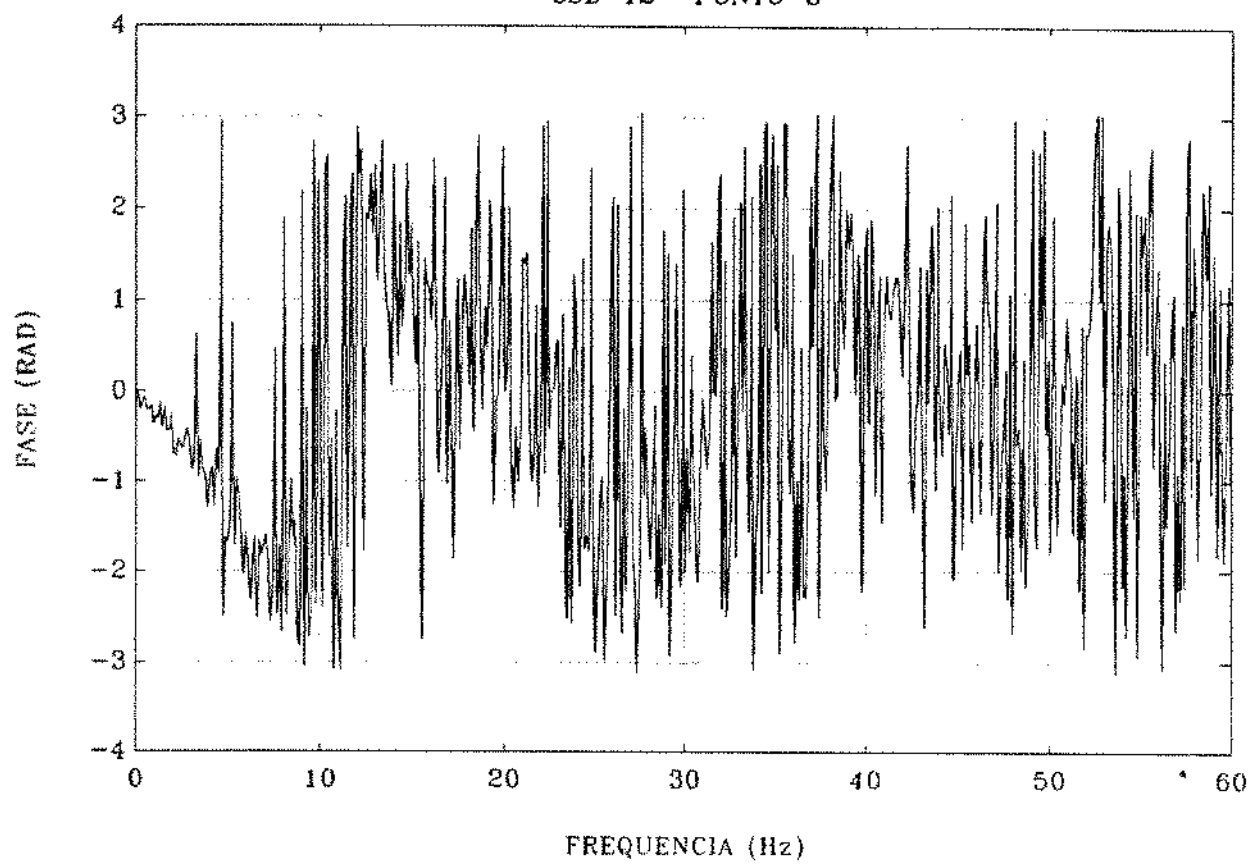
CSD-12 PONT0-6



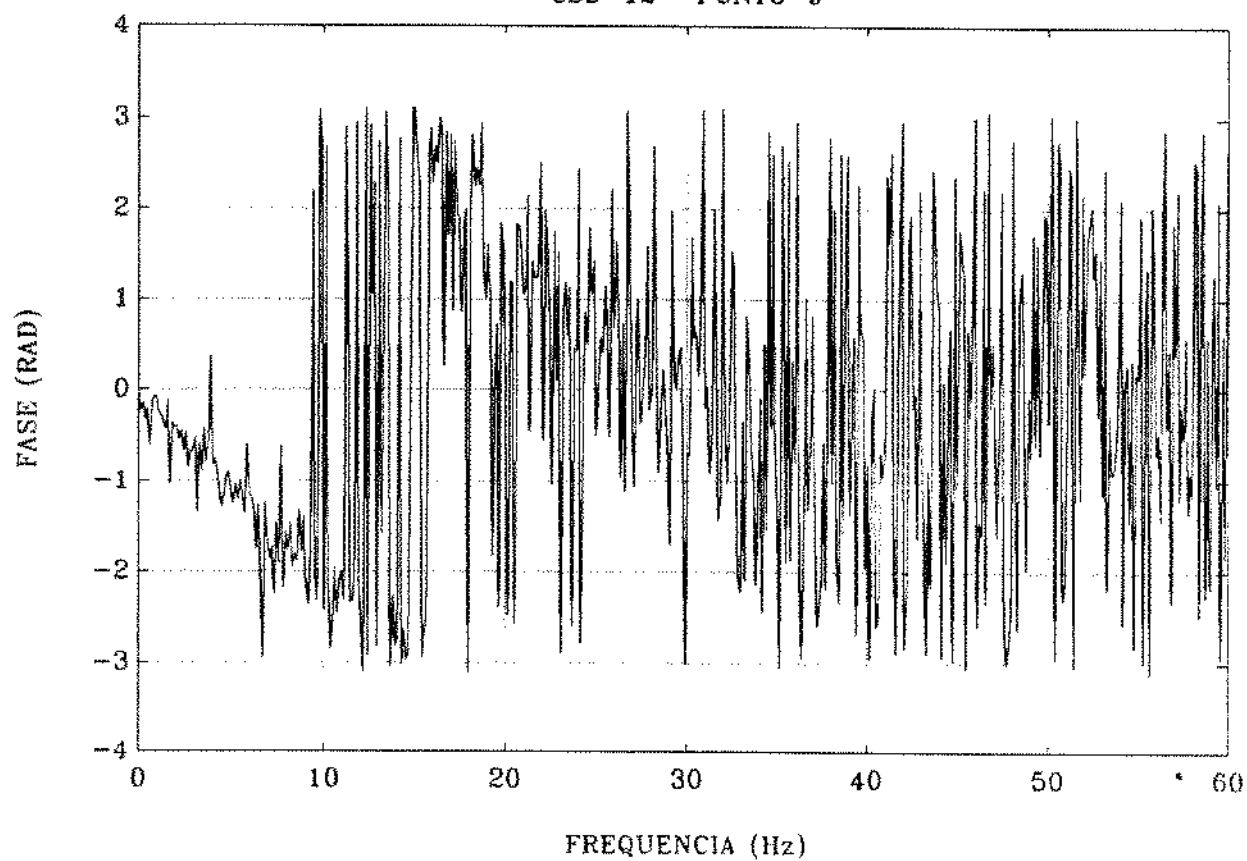
CSD-12 PONT0-7



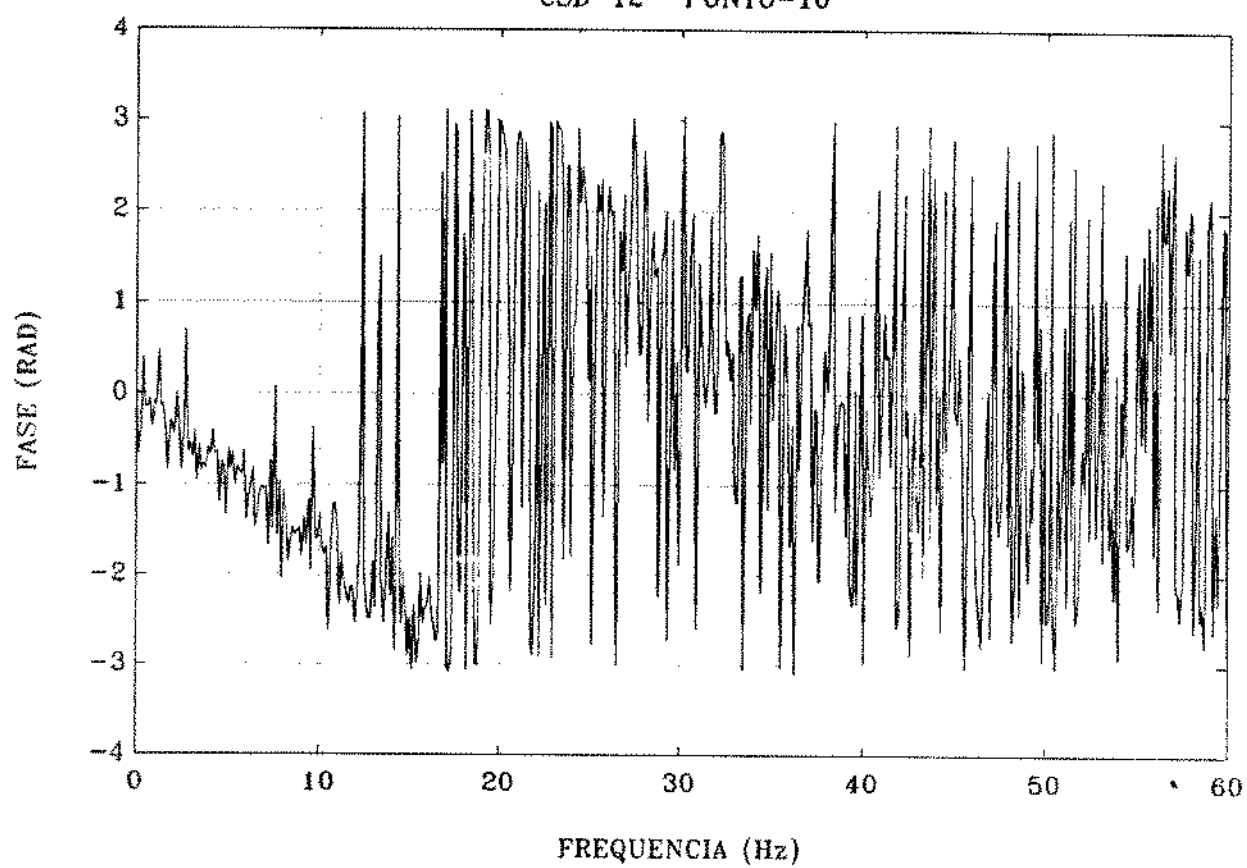
CSD-12 PONT0-8



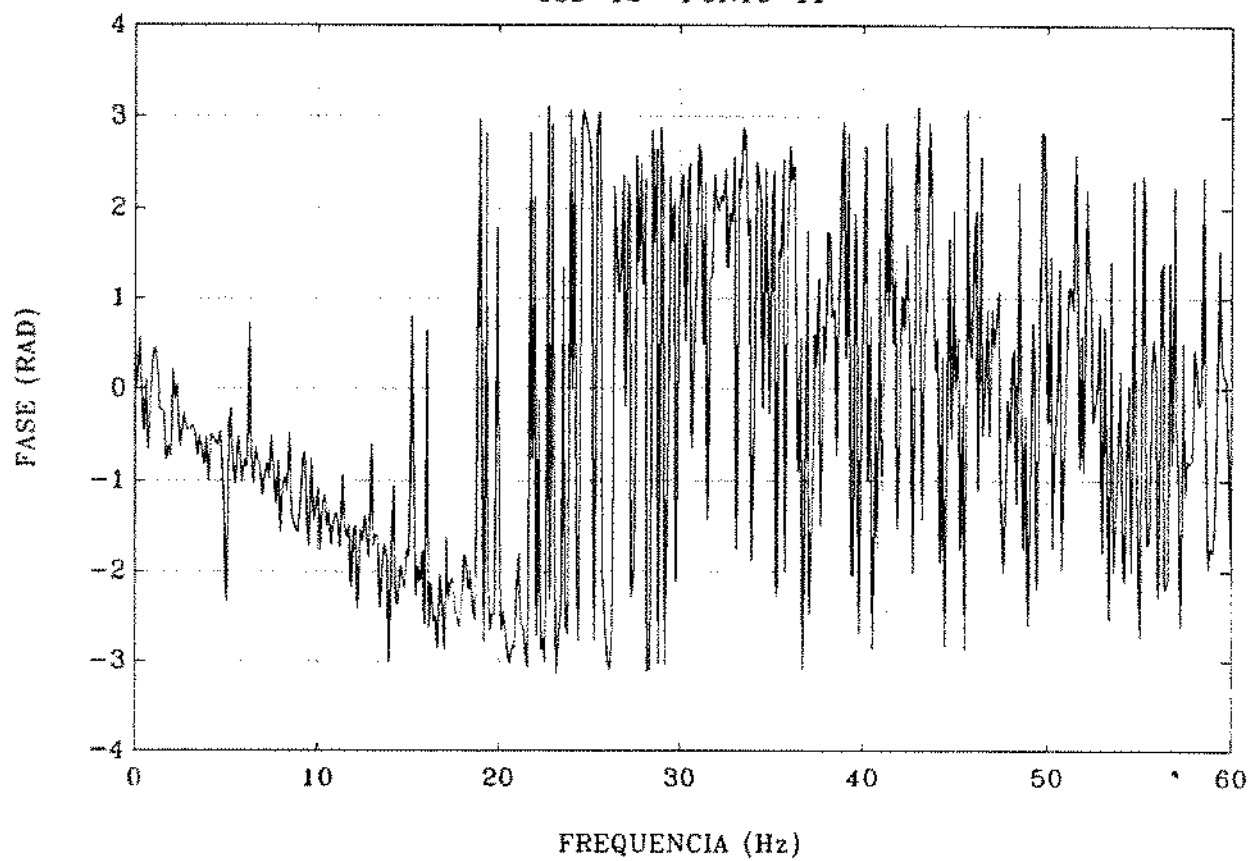
CSD-12 PONT0-9



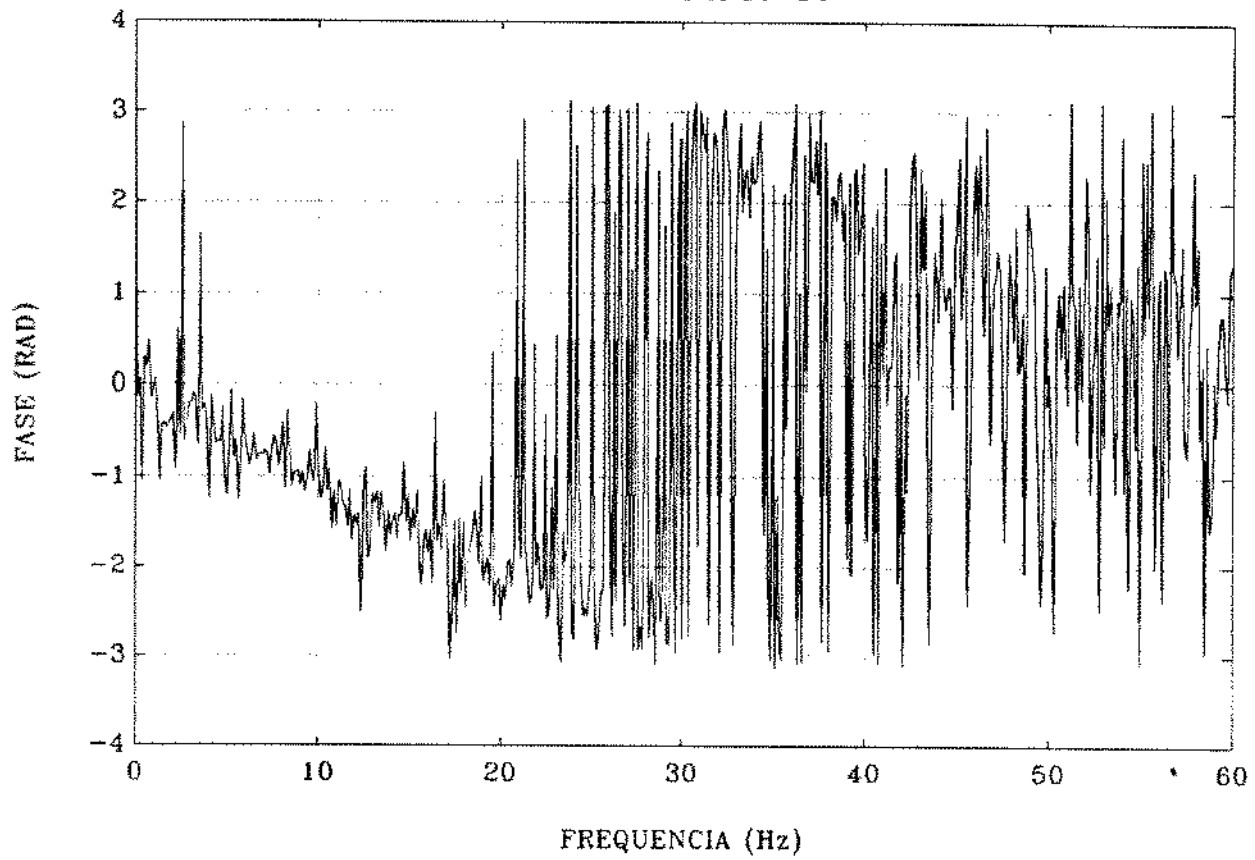
CSD-12 PONT0-10



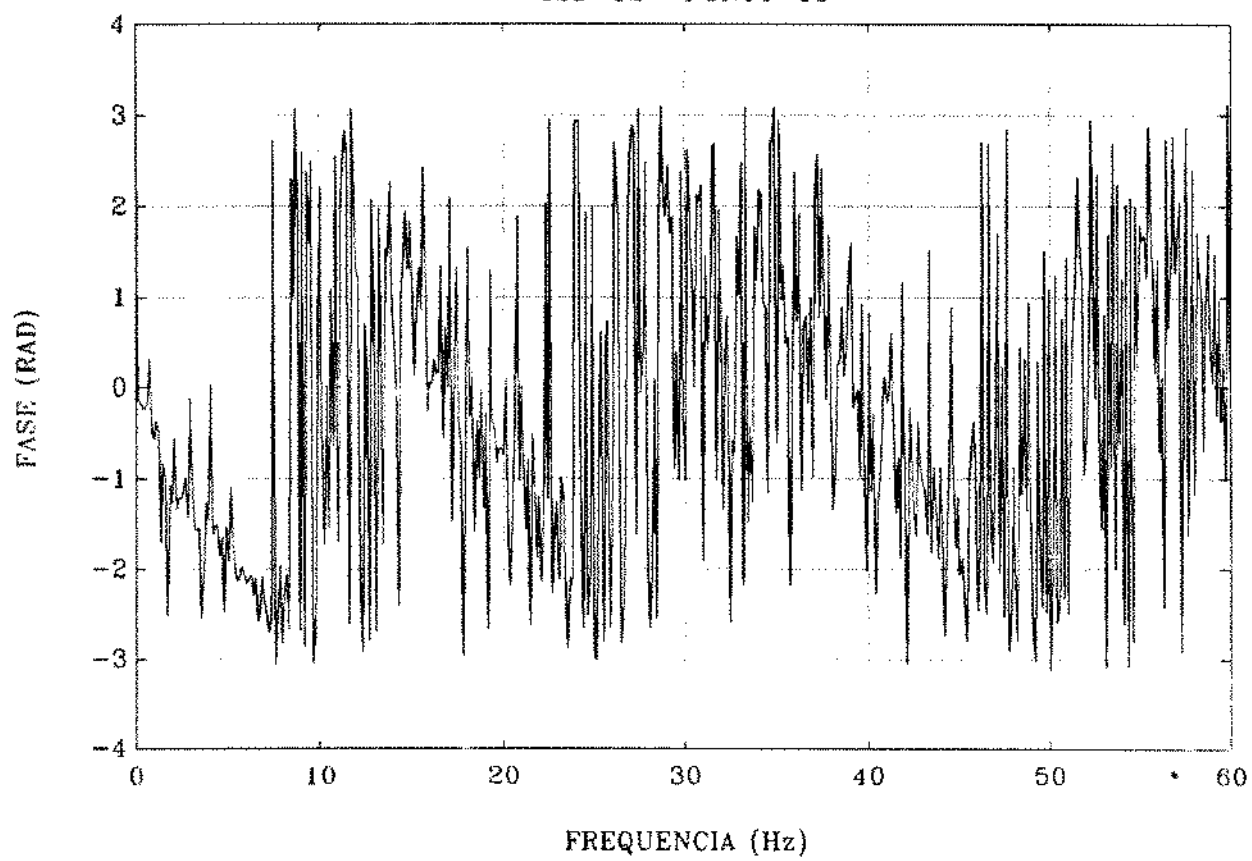
CSD-12 PONTO-11



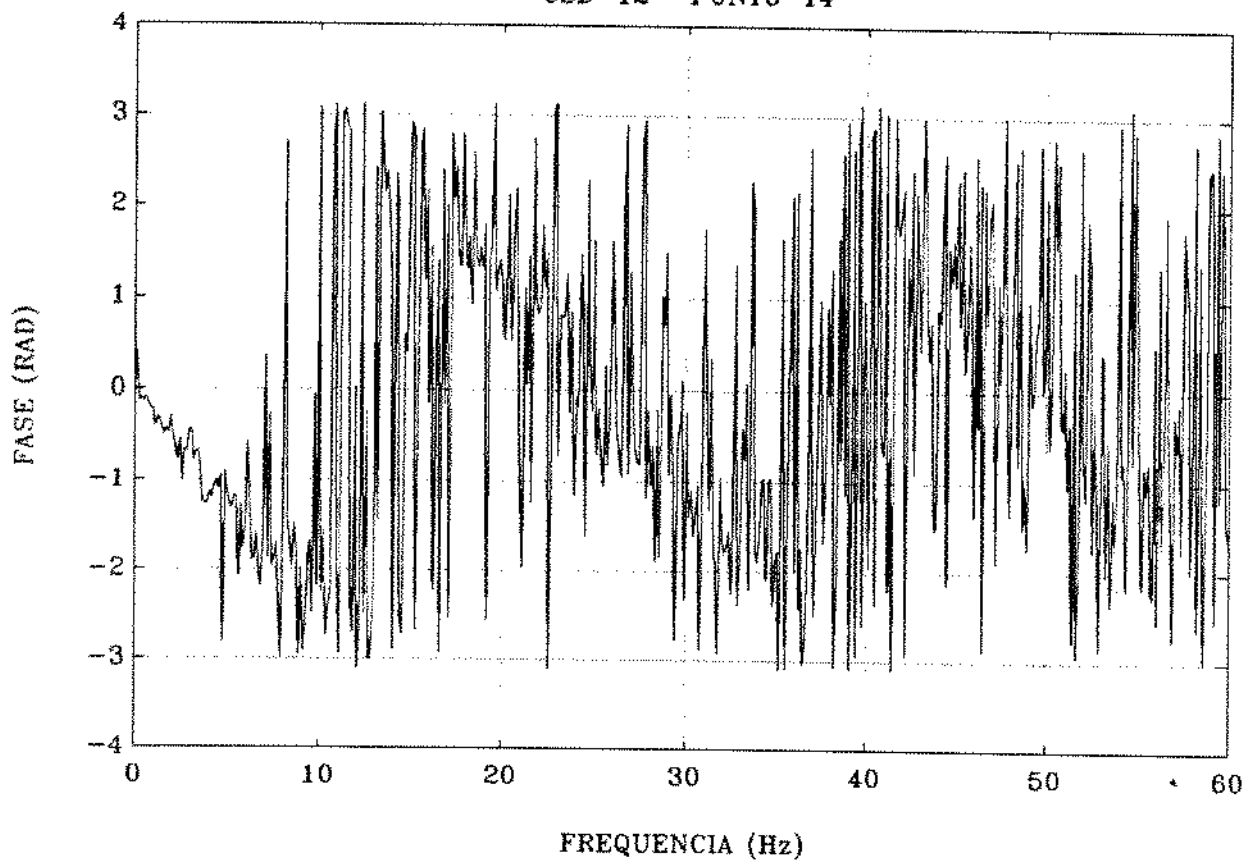
CSD-12 PONT0-12



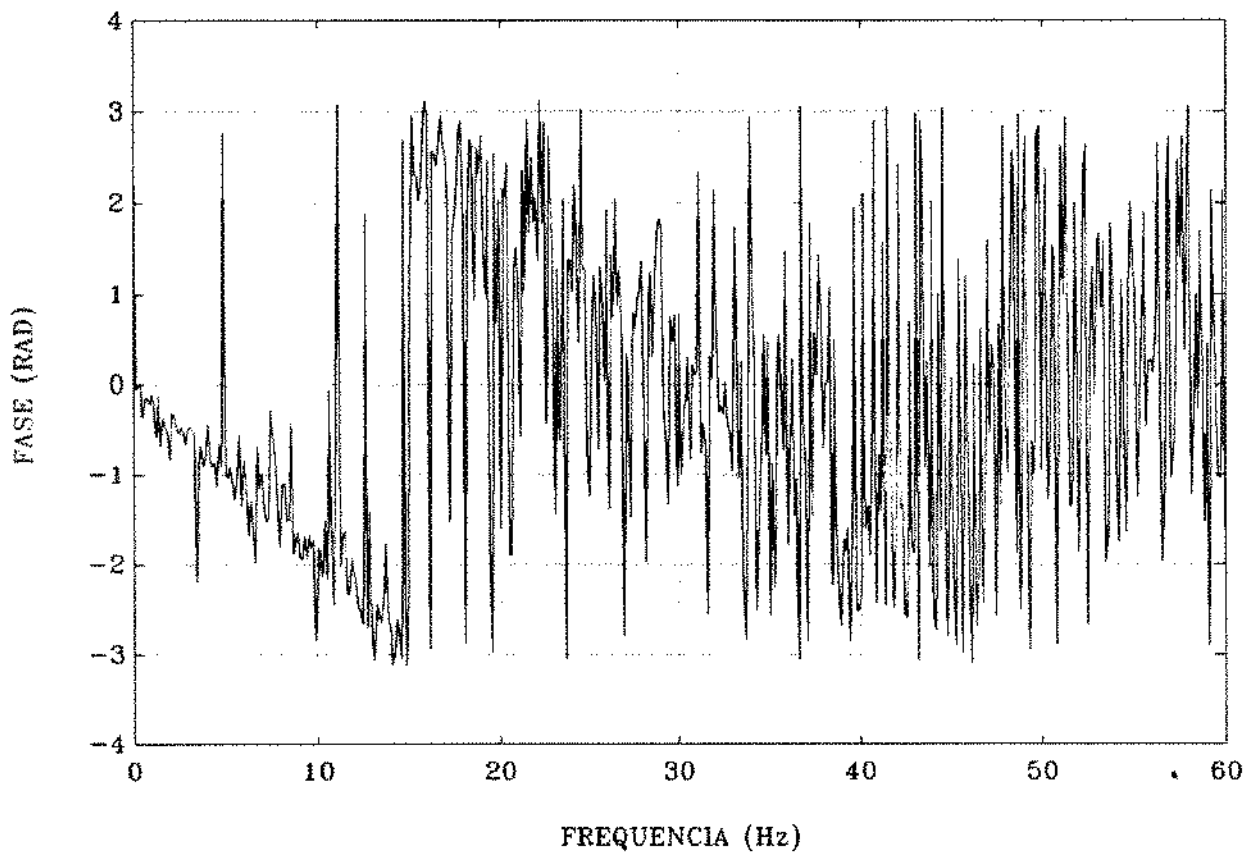
CSD-12 PONT0-13



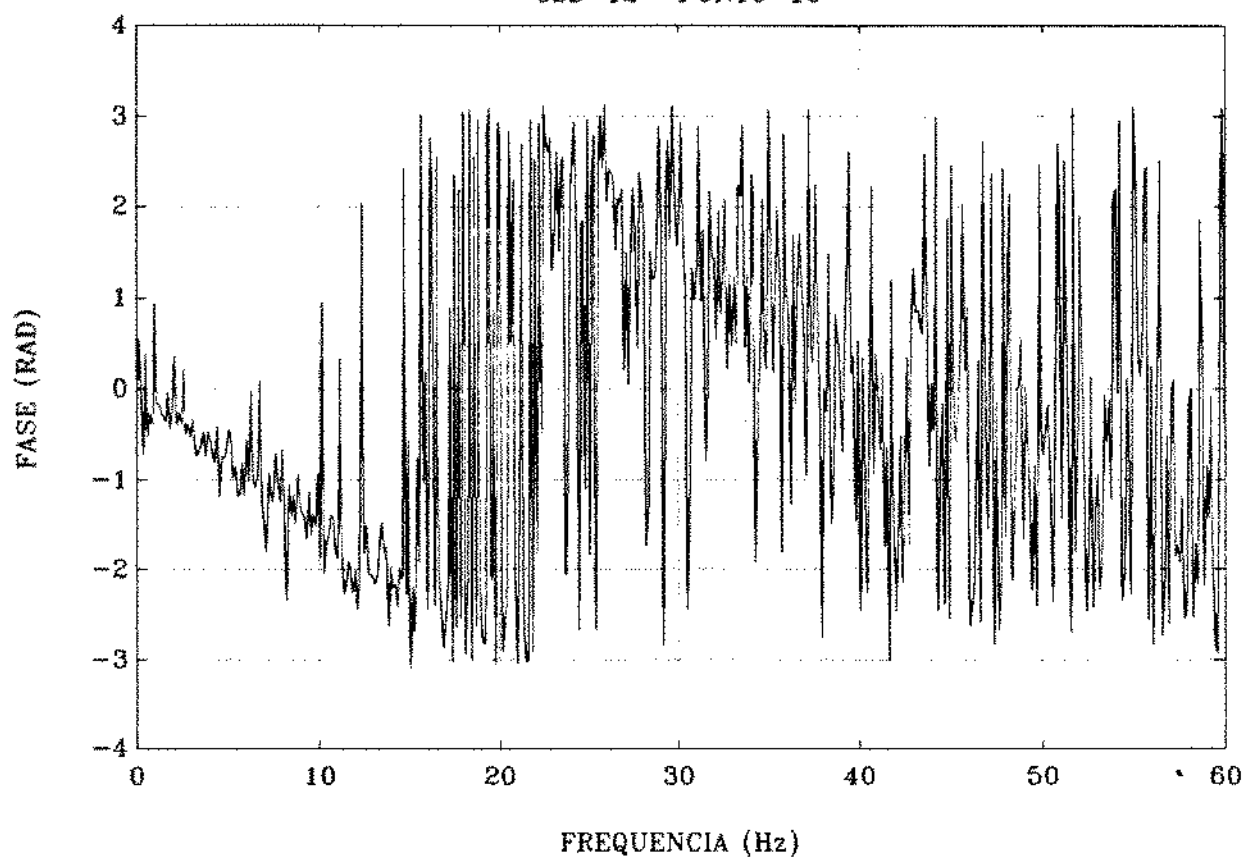
CSD-12 PONTO-14



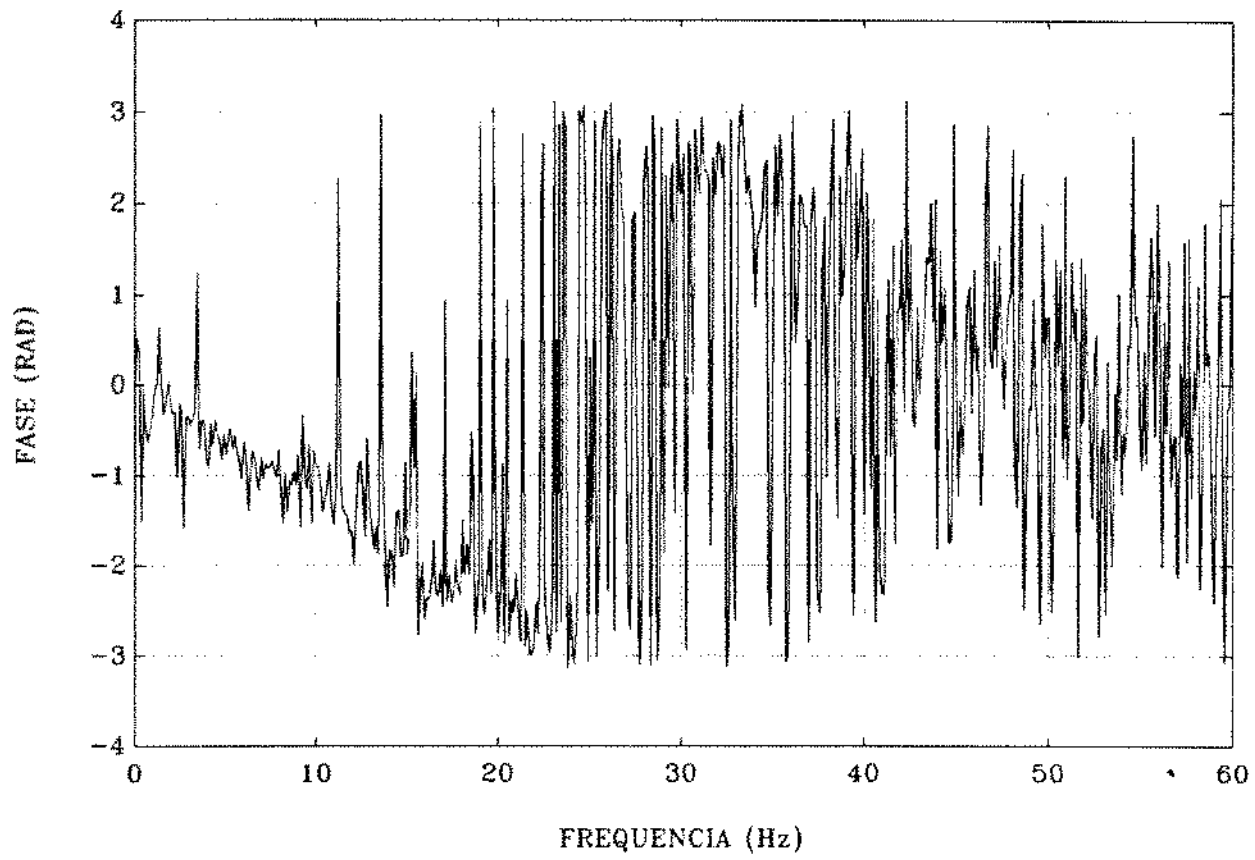
CSD-12 PONTO-15



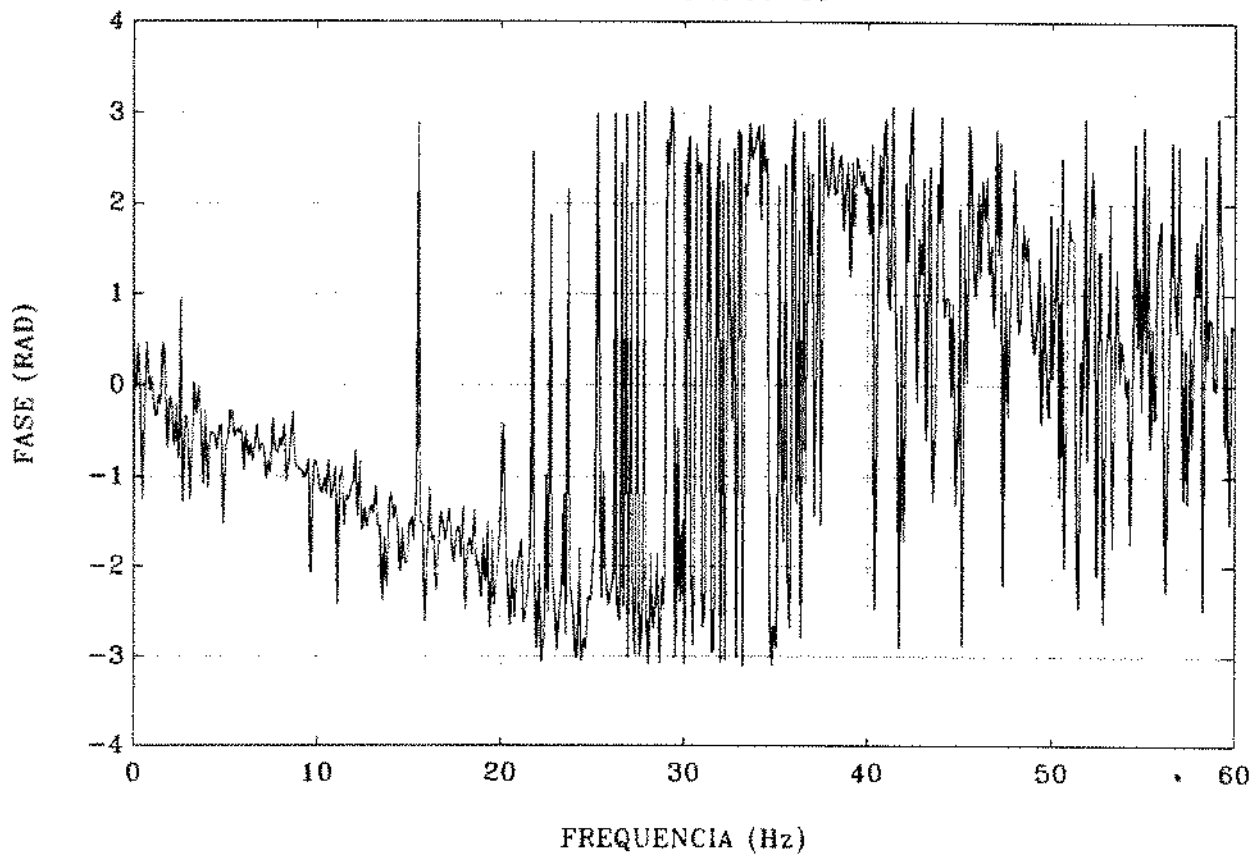
CSD-12 PONTO-16



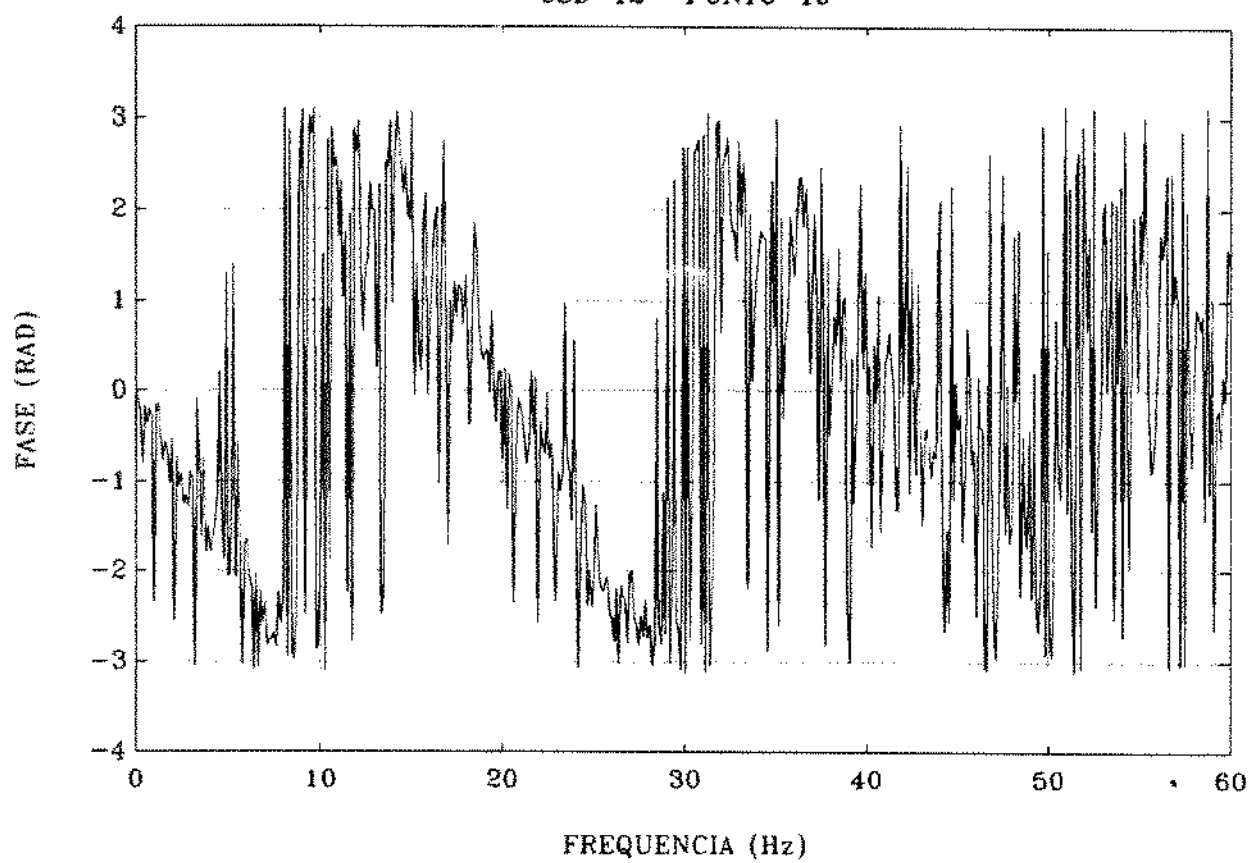
CSD-12 PONT0-17



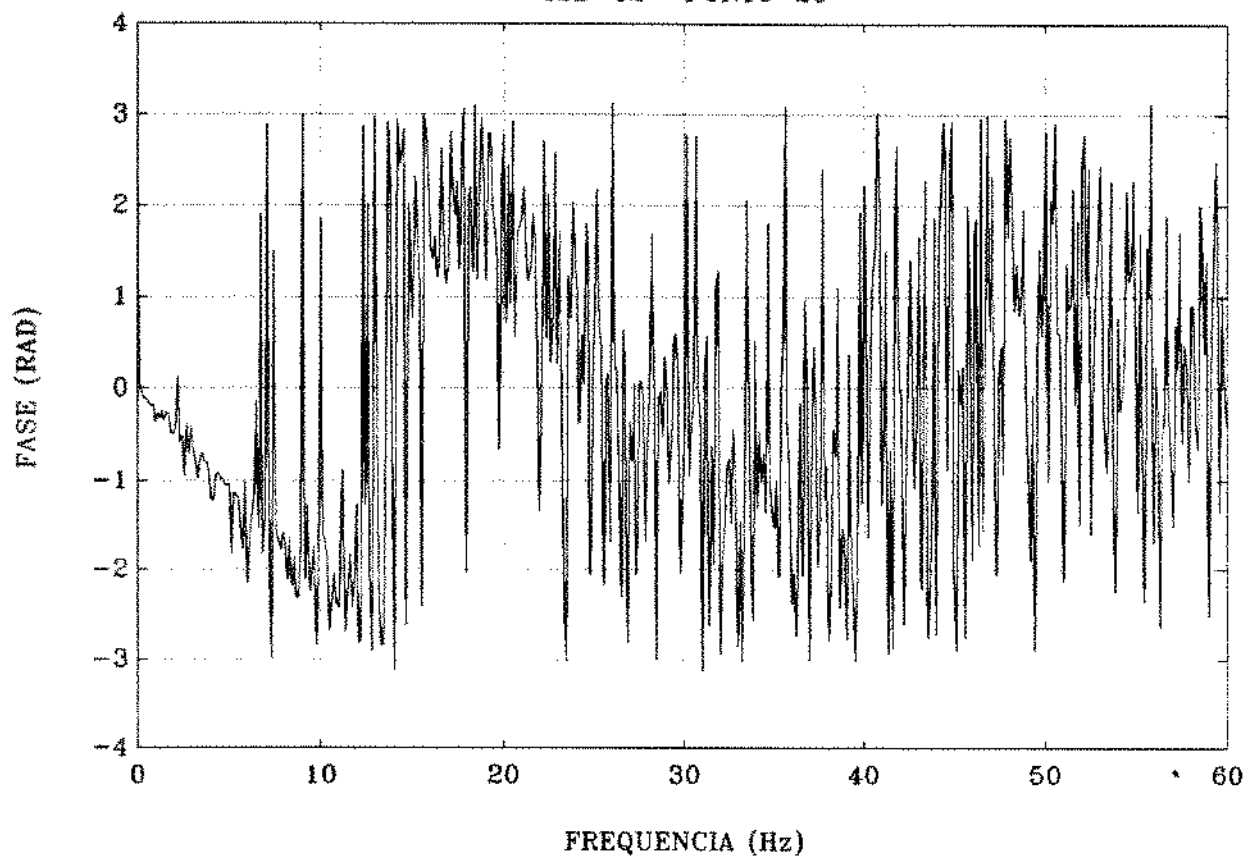
CSD-12 PONTO-18



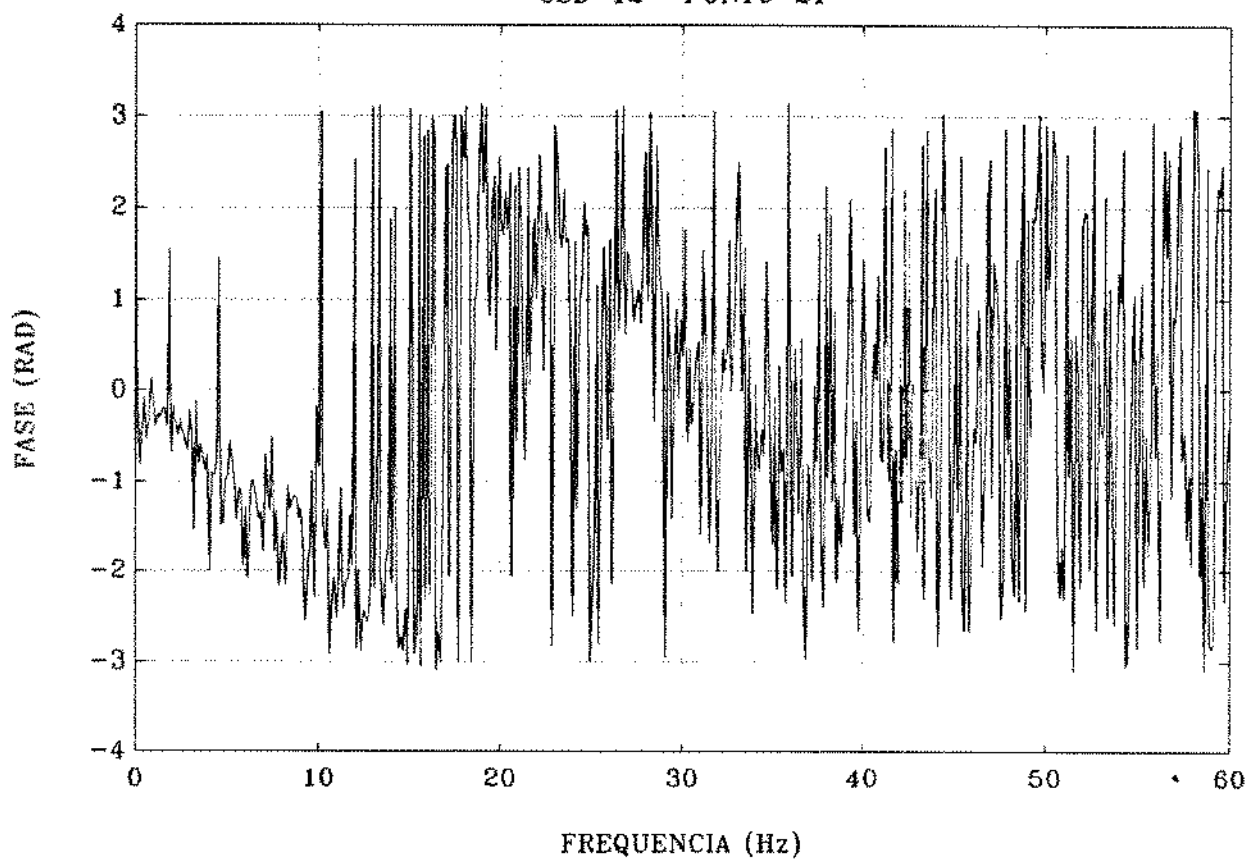
CSD-12 PONT0-19



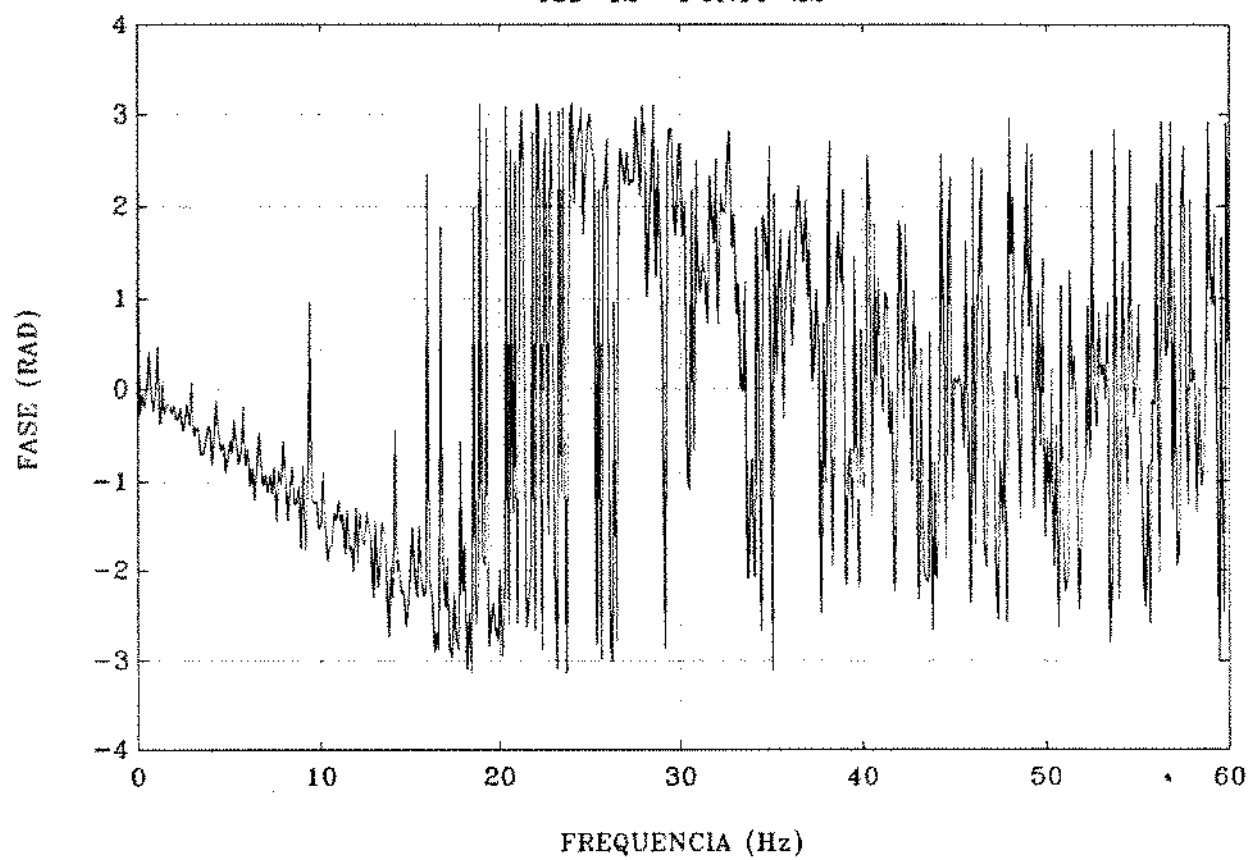
CSD-12 PONTO-20



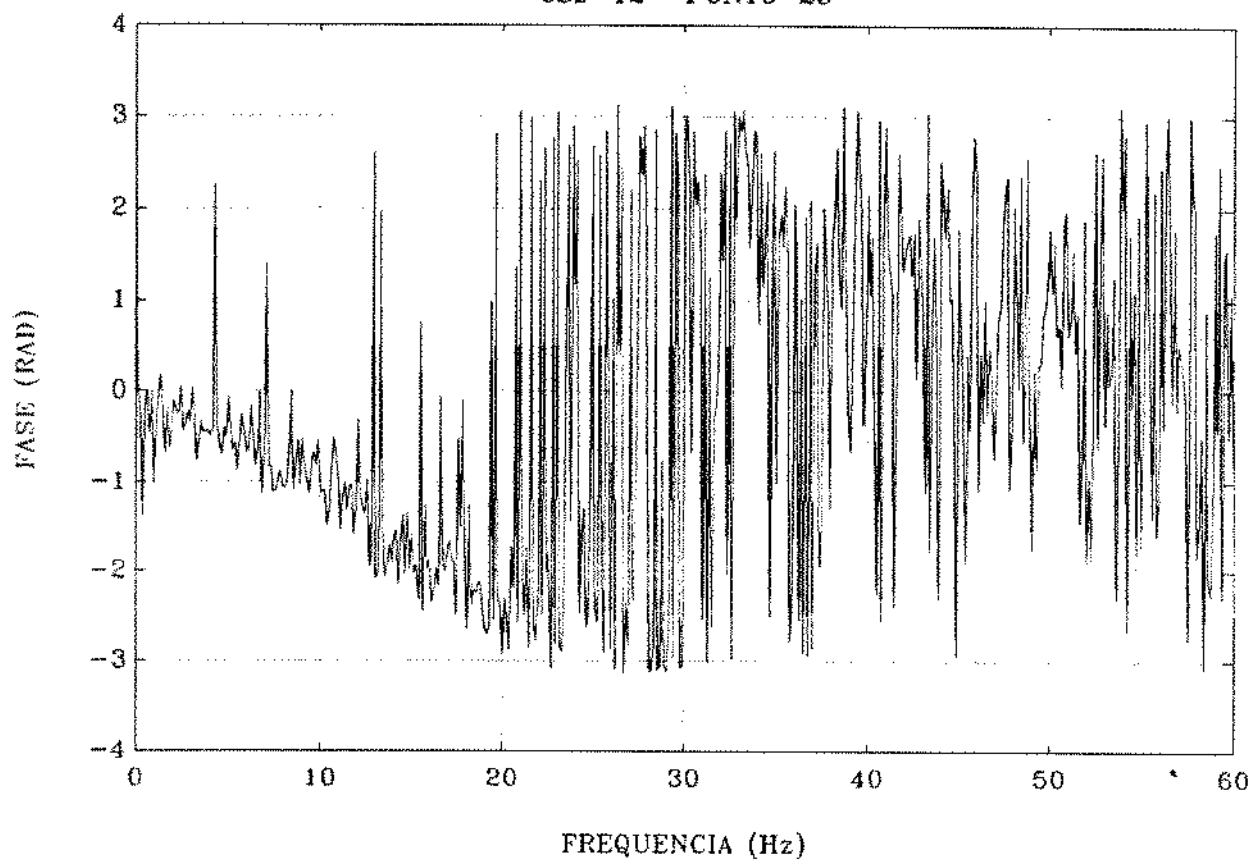
CSD-12 PONT0-21



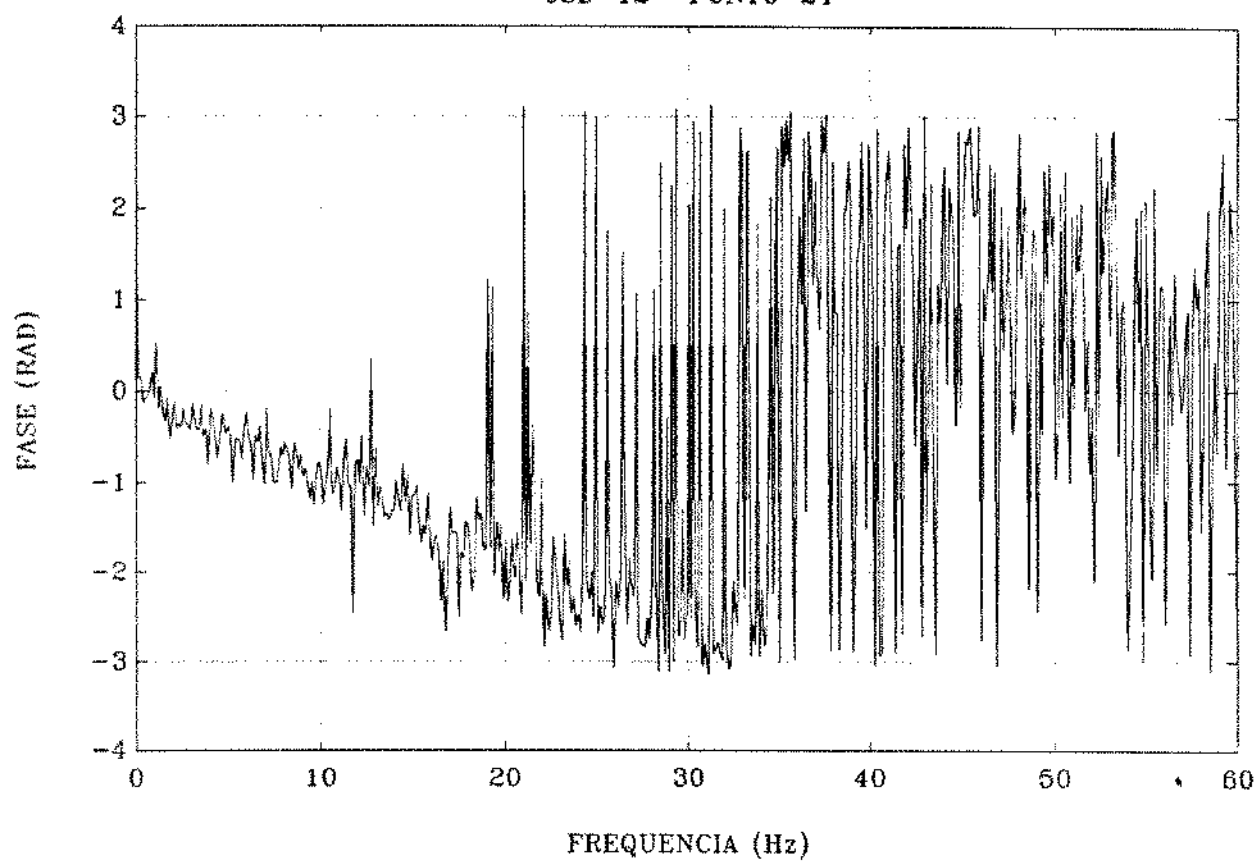
CSD-12 PONT0-22



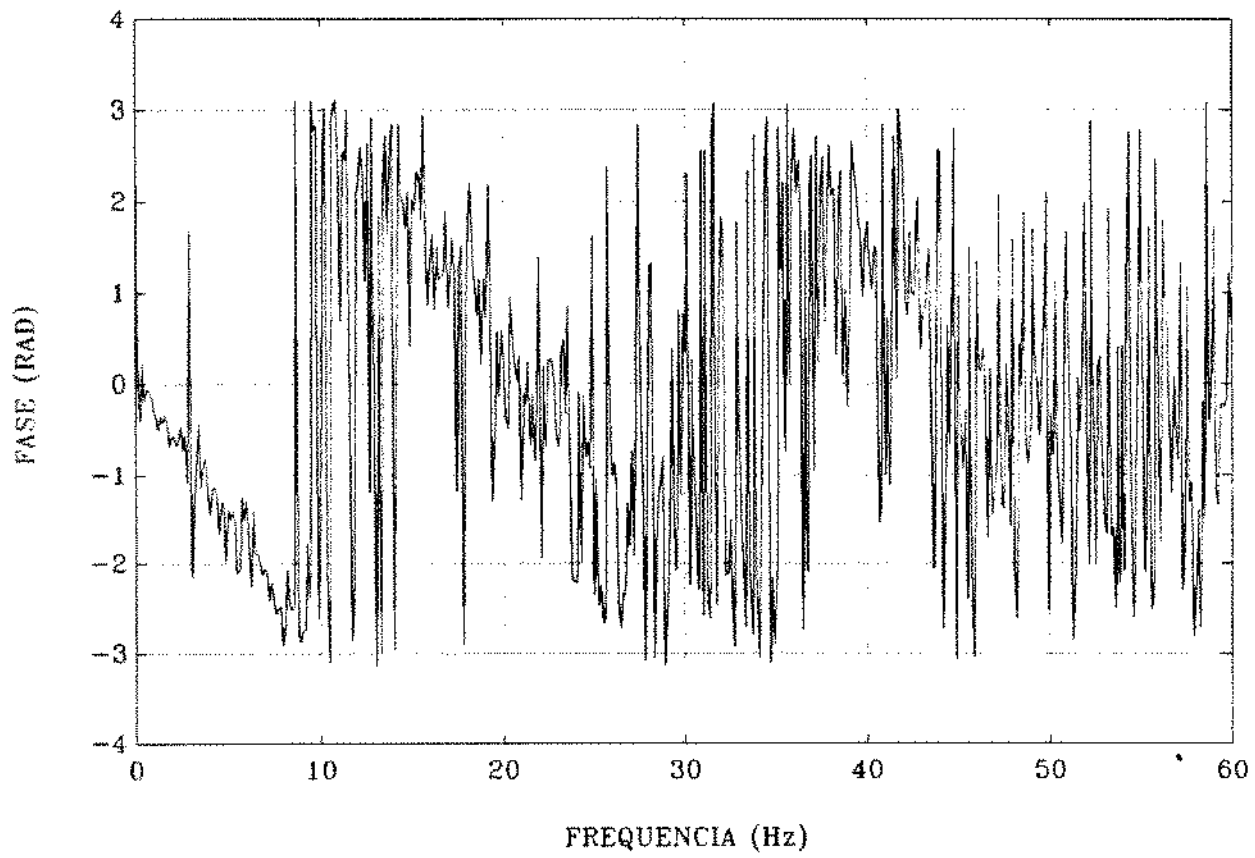
CSD-12 PONT0-23



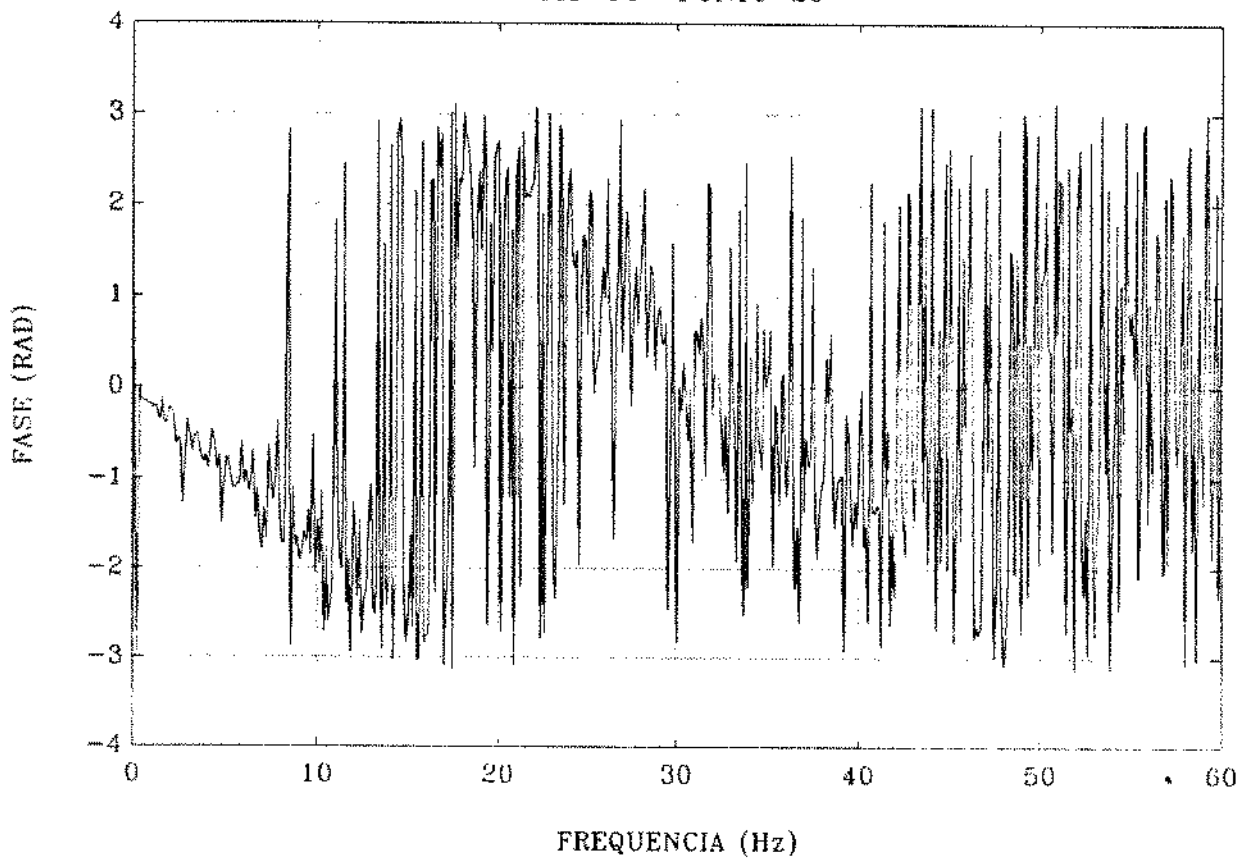
CSD-12 PONT0-24



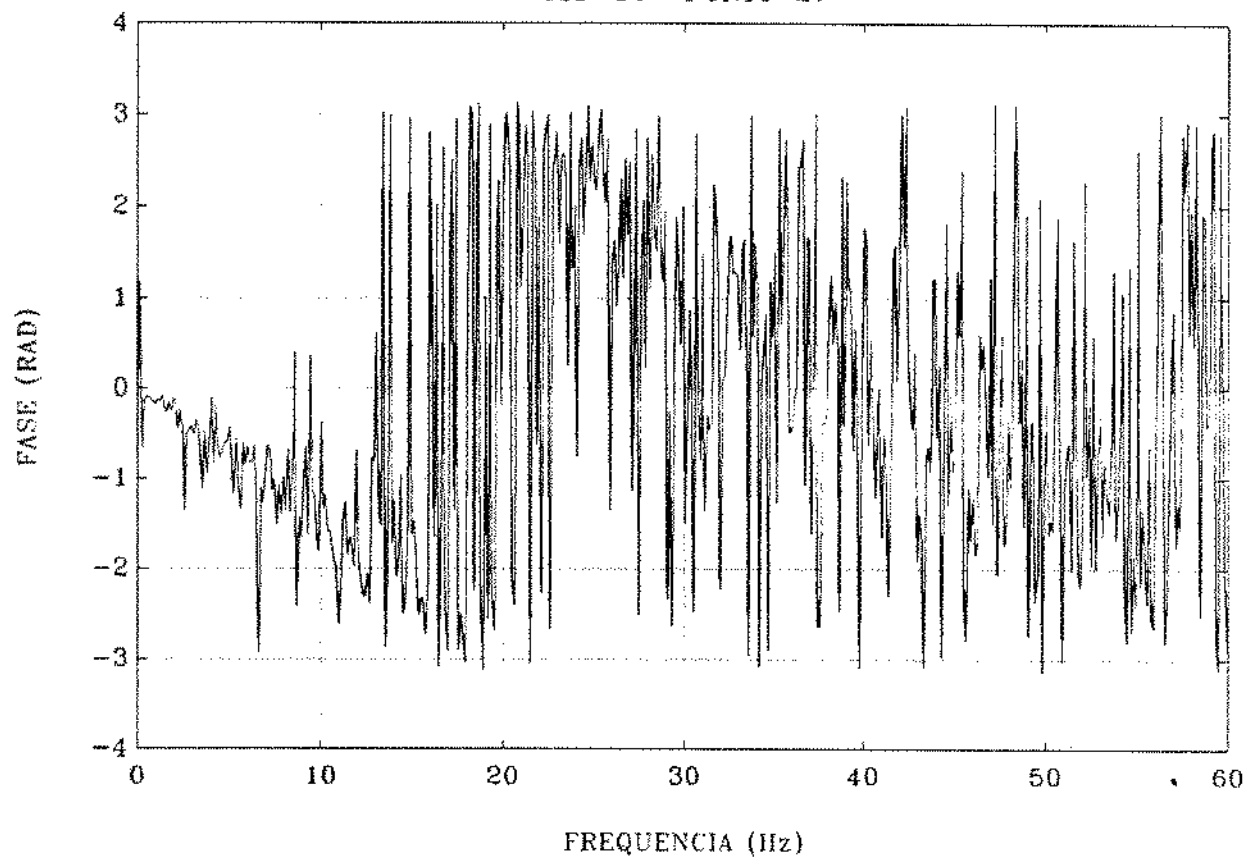
CSD-12 PONTO-25



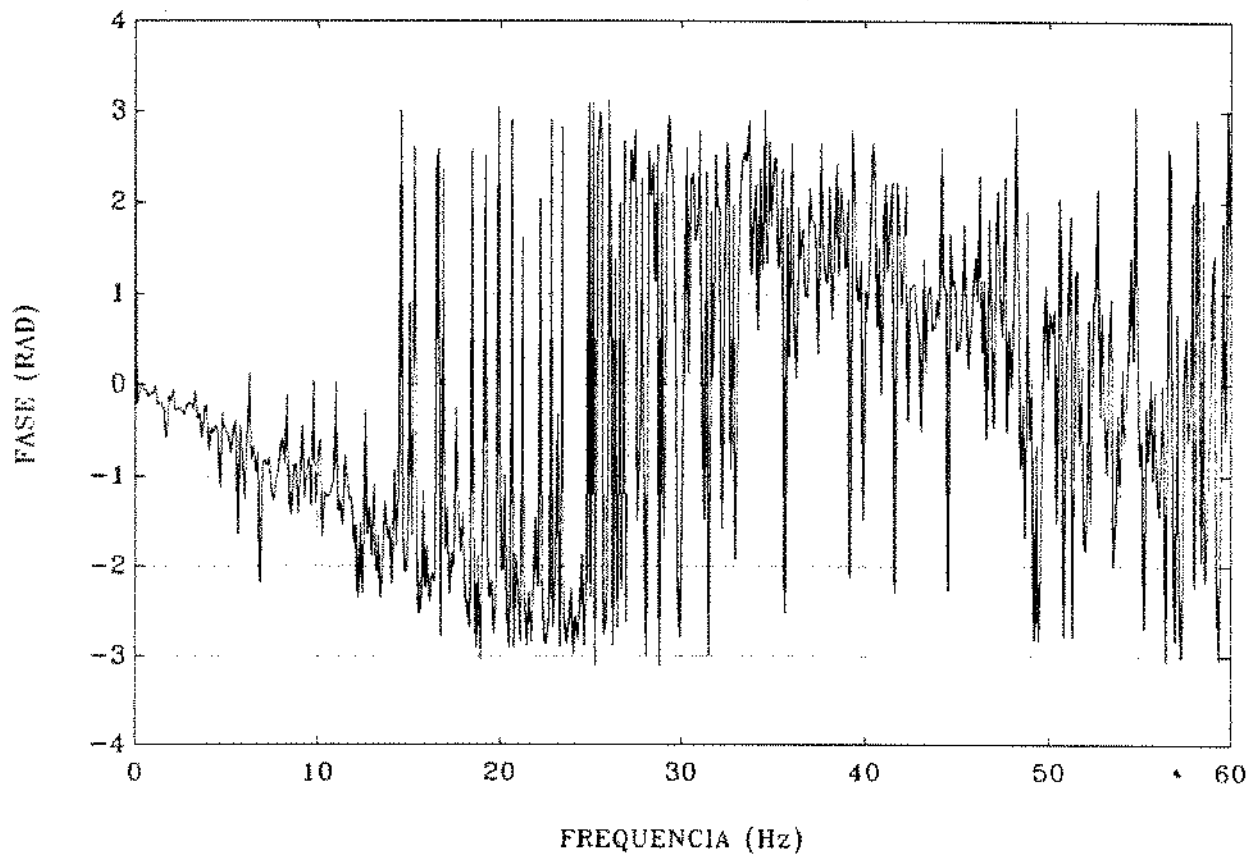
CSD-12 PONTO-26



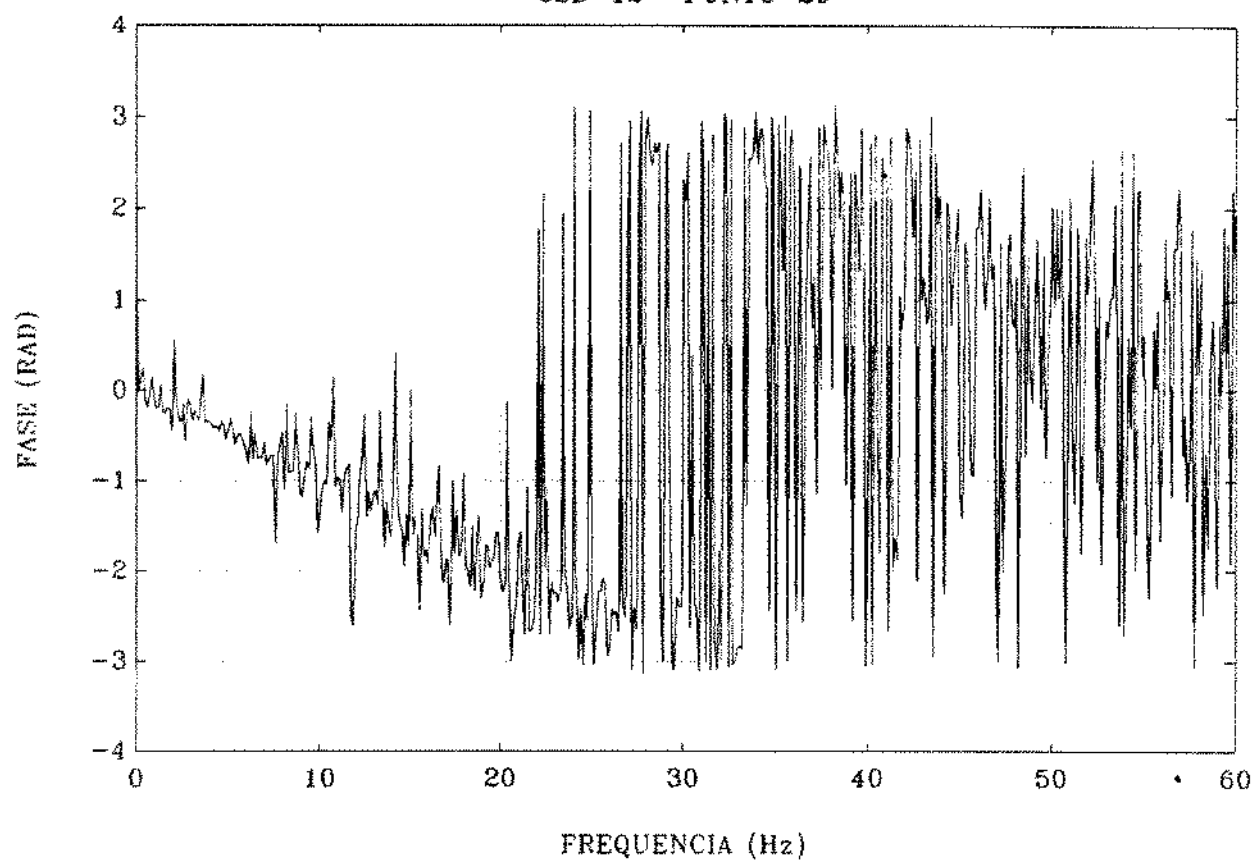
CSD-12 PONT0-27



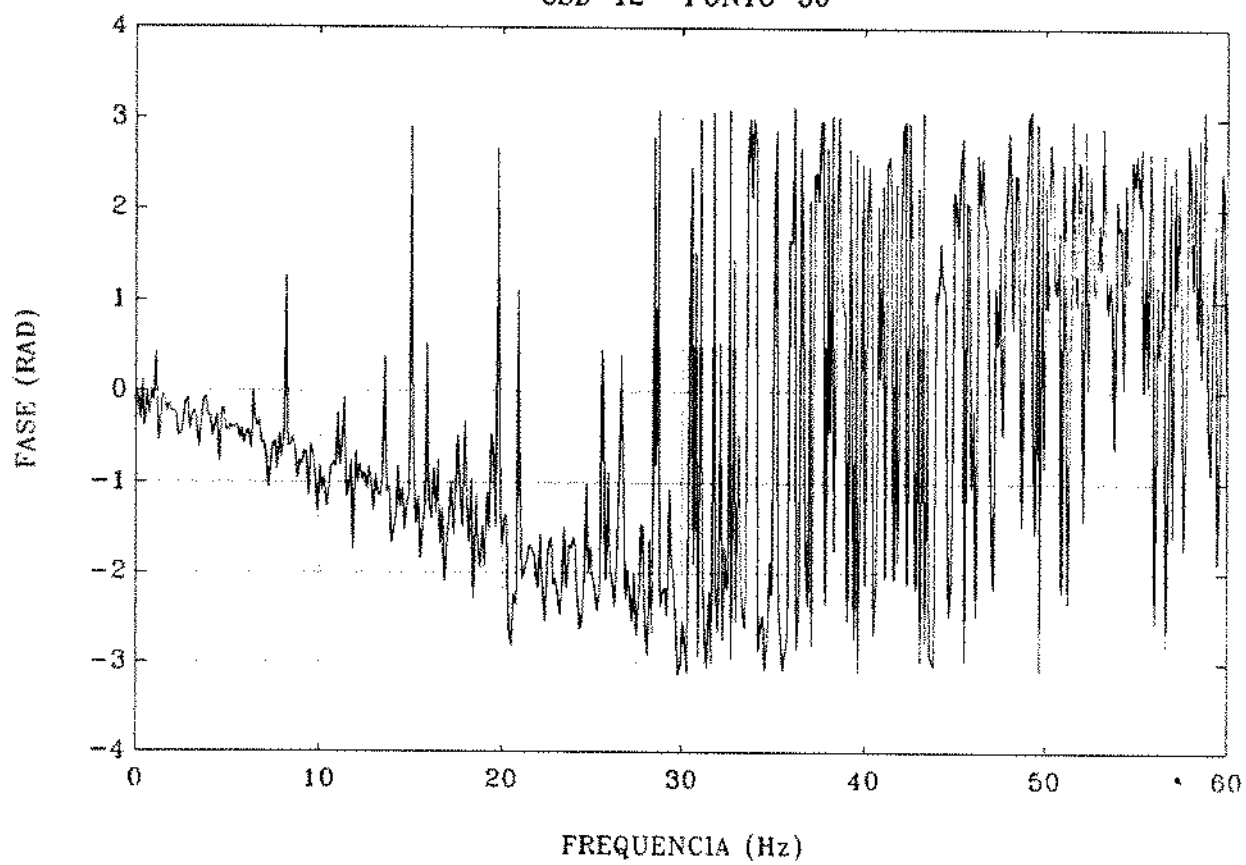
CSD-12 PONT0-28



CSD-12 PONTO-29



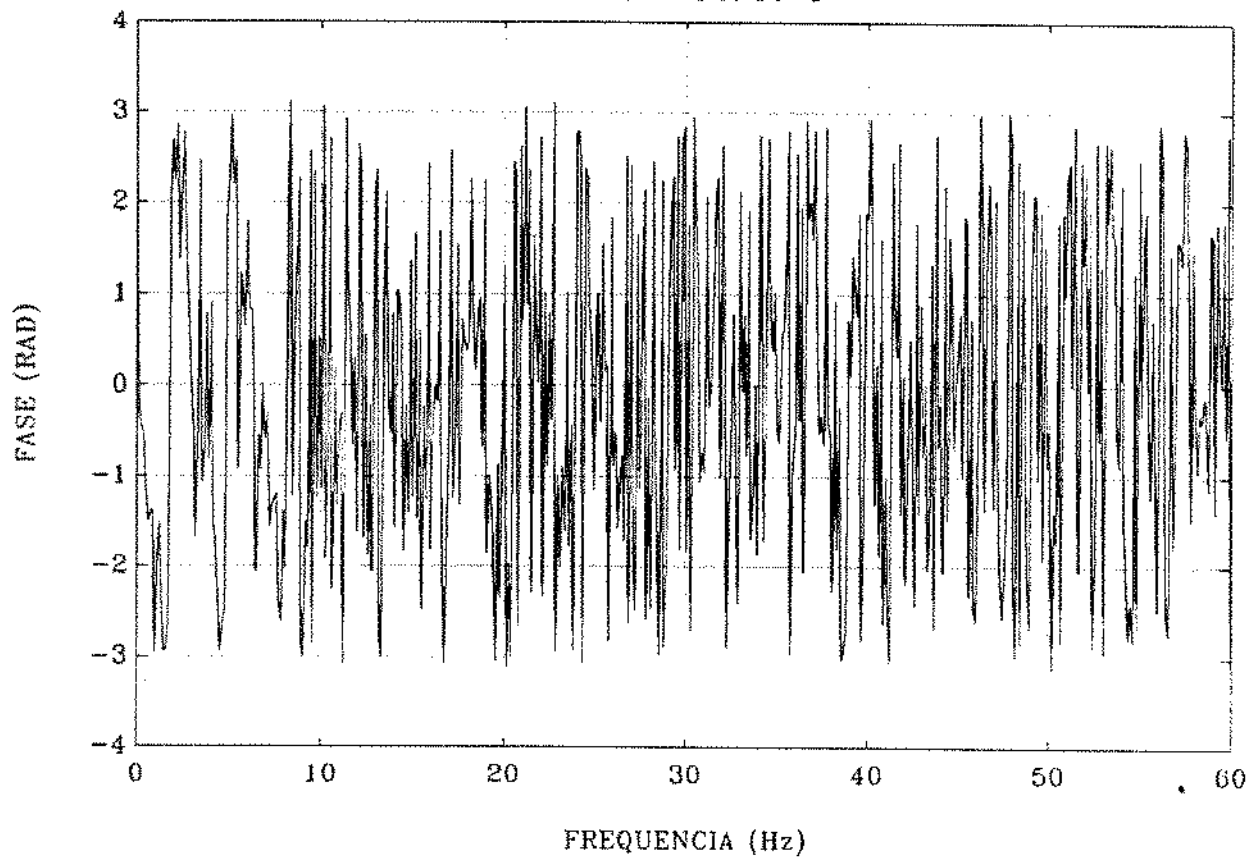
CSD-12 PONTO-30



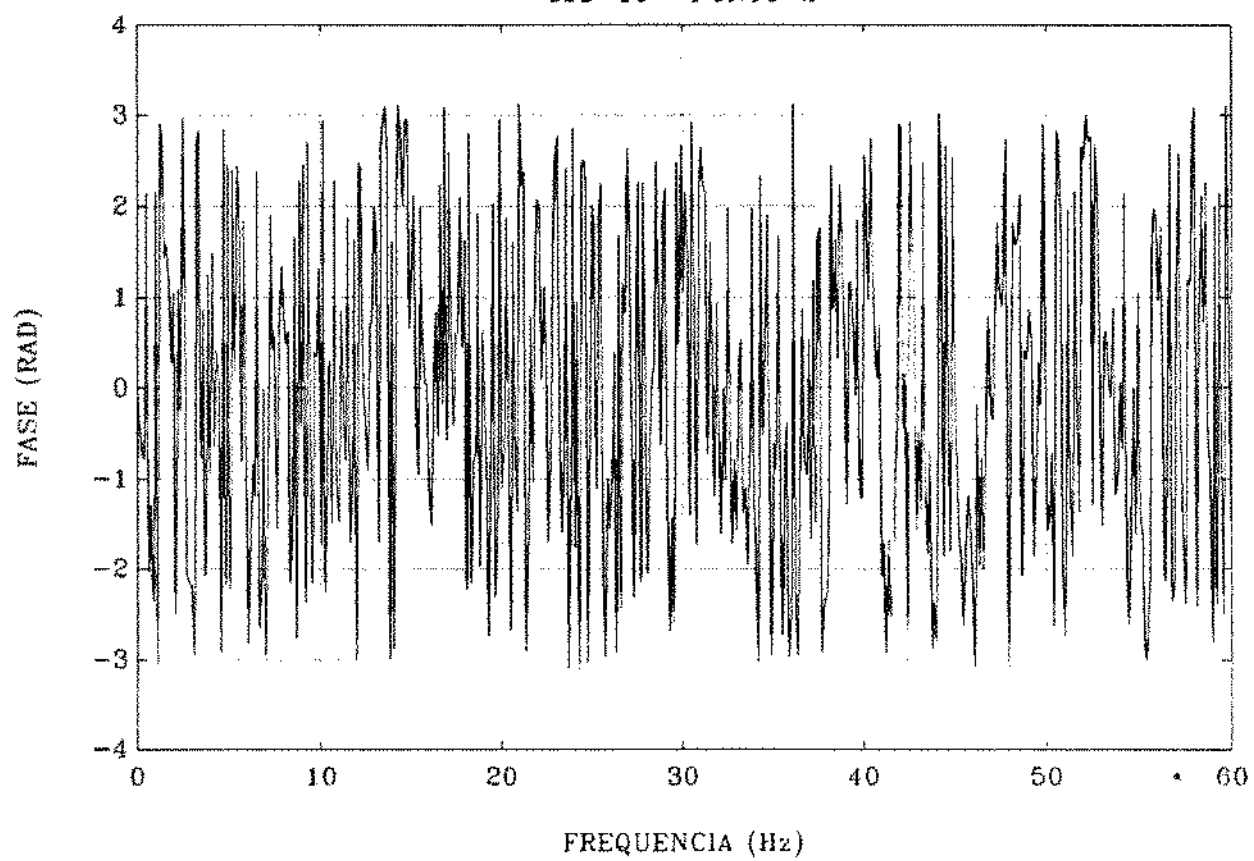
VI.6 - FUNÇÃO DENSIDADE ESPECTRAL CRUZADA DE POTÊNCIA

(SONDAS 1 E 3)

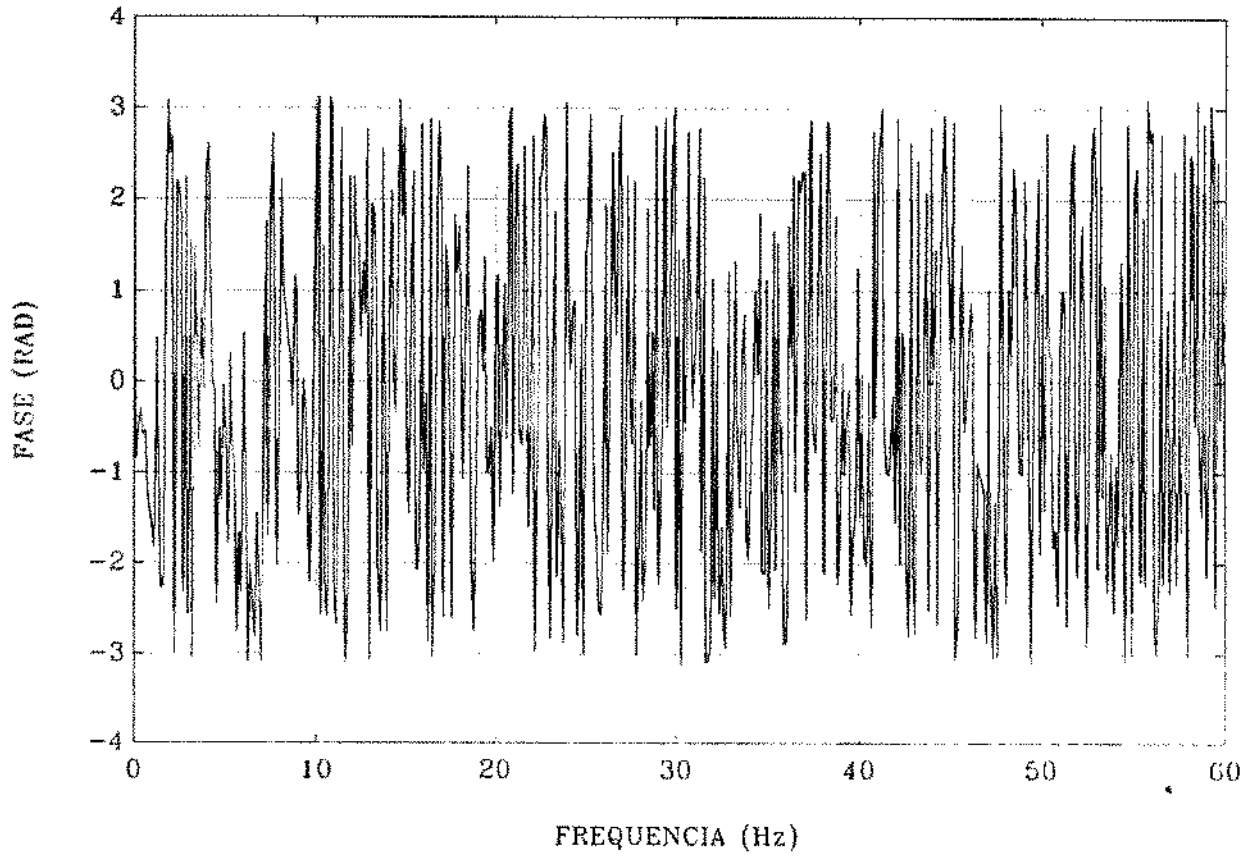
CSD-13 PONT0-1



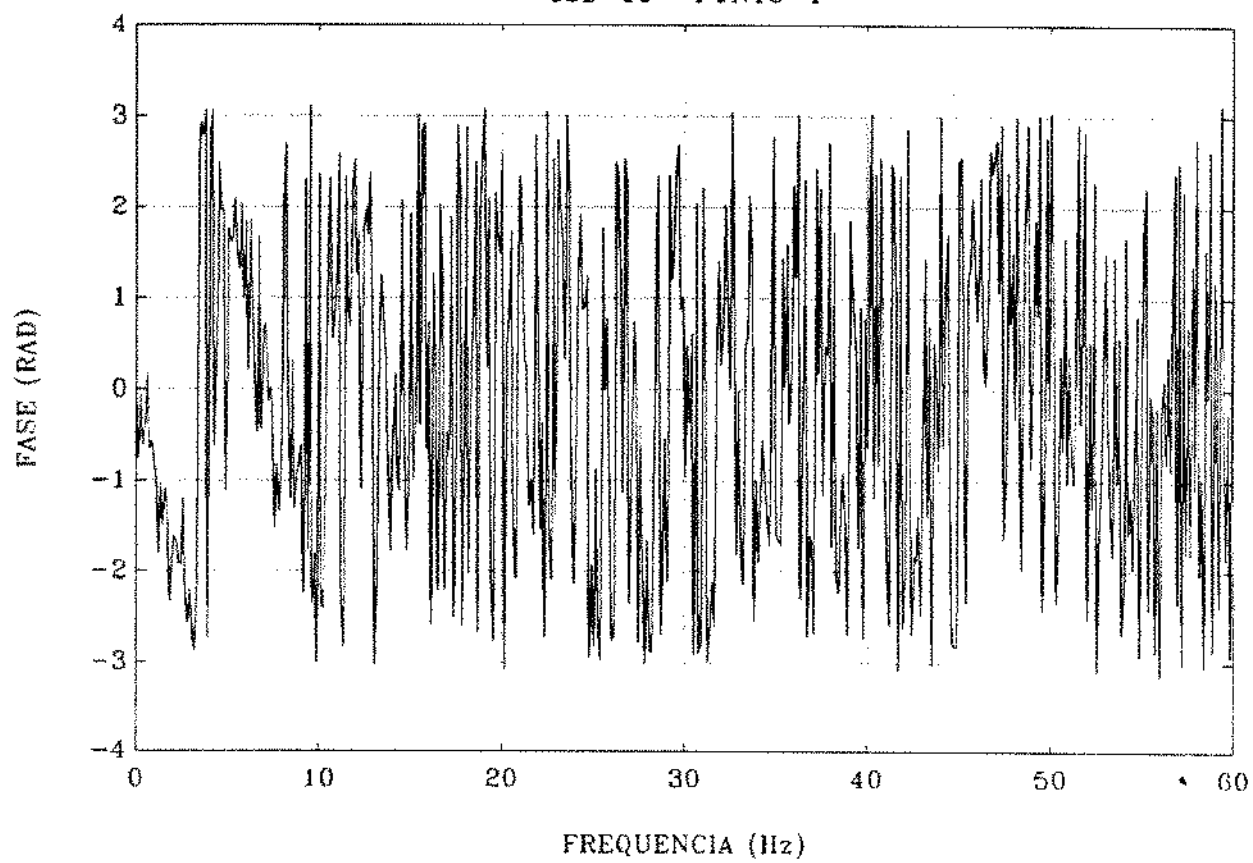
CSD-13 PONT0-2



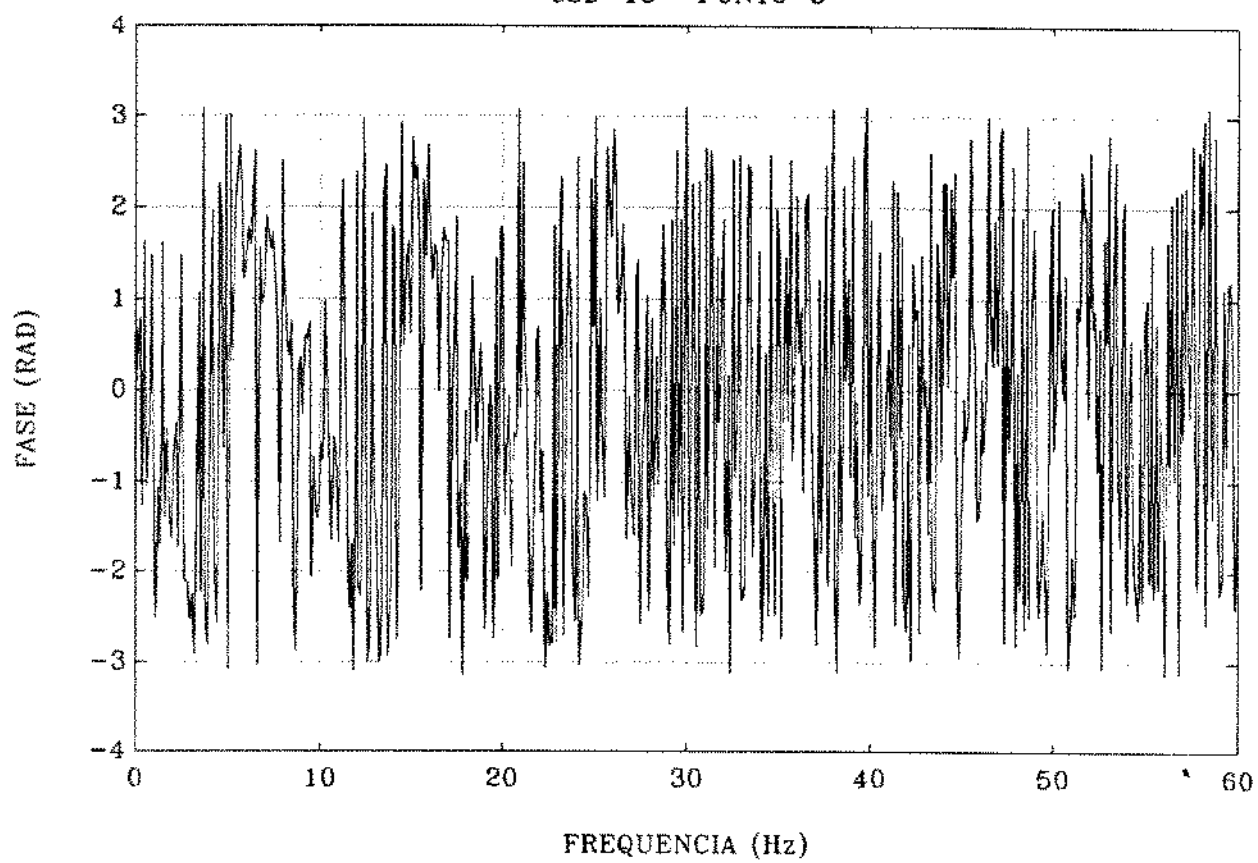
CSD-13 PONTO-3



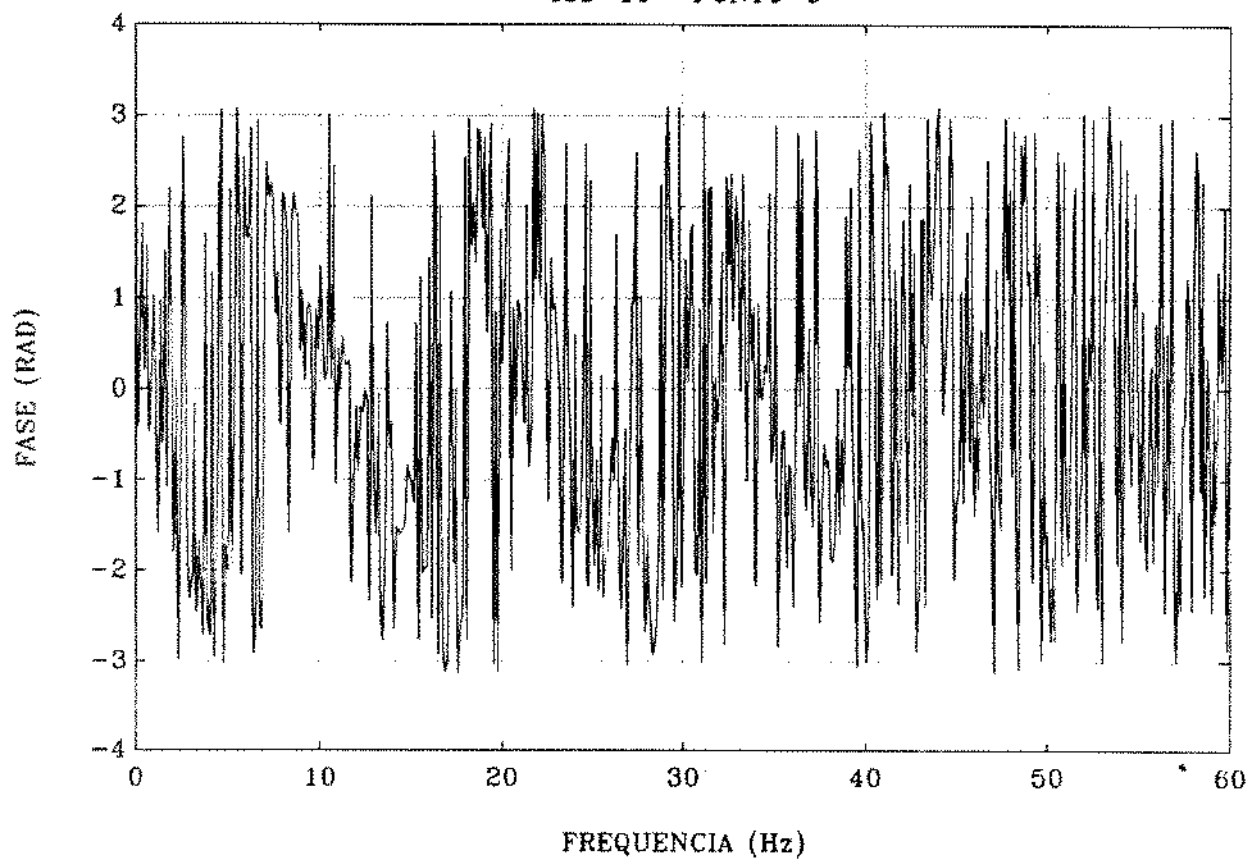
CSD-13 PONTO-4



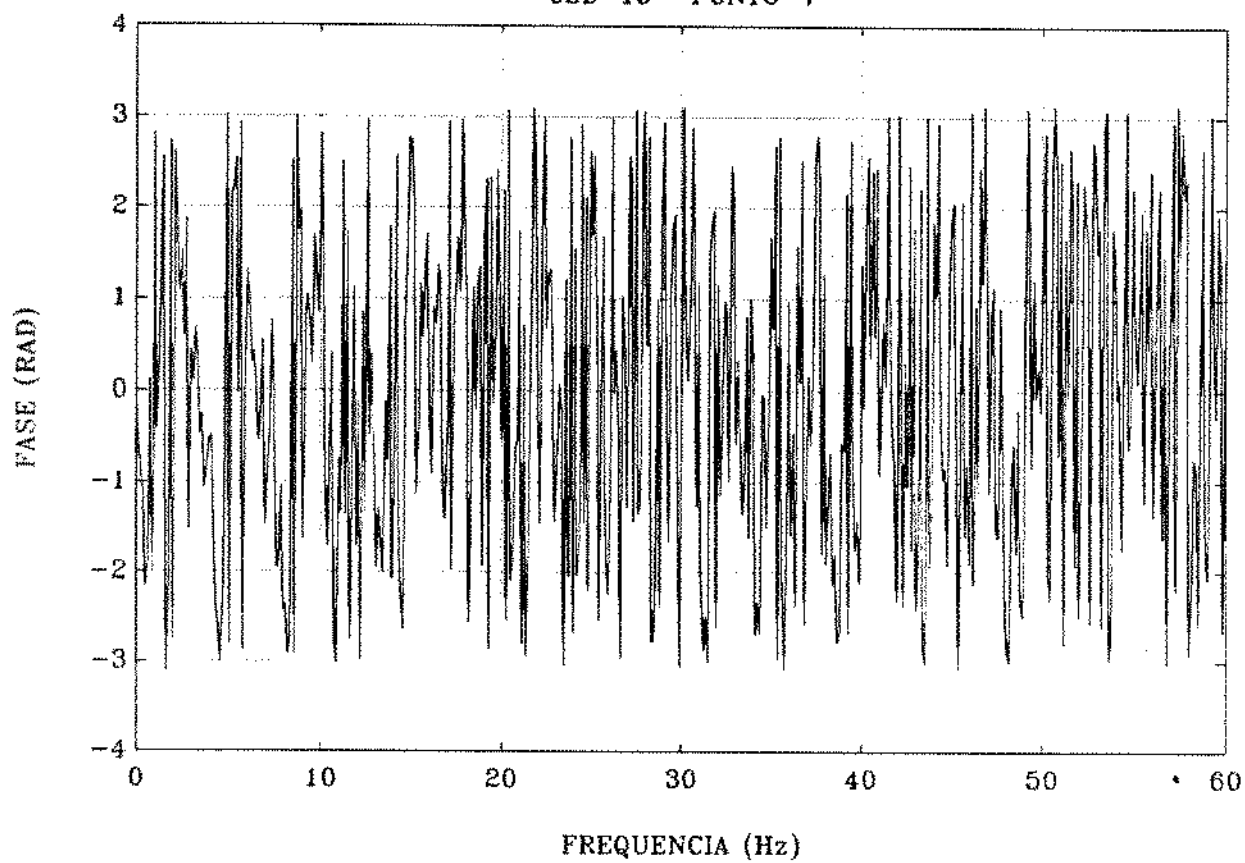
CSD-13 PONT0-5



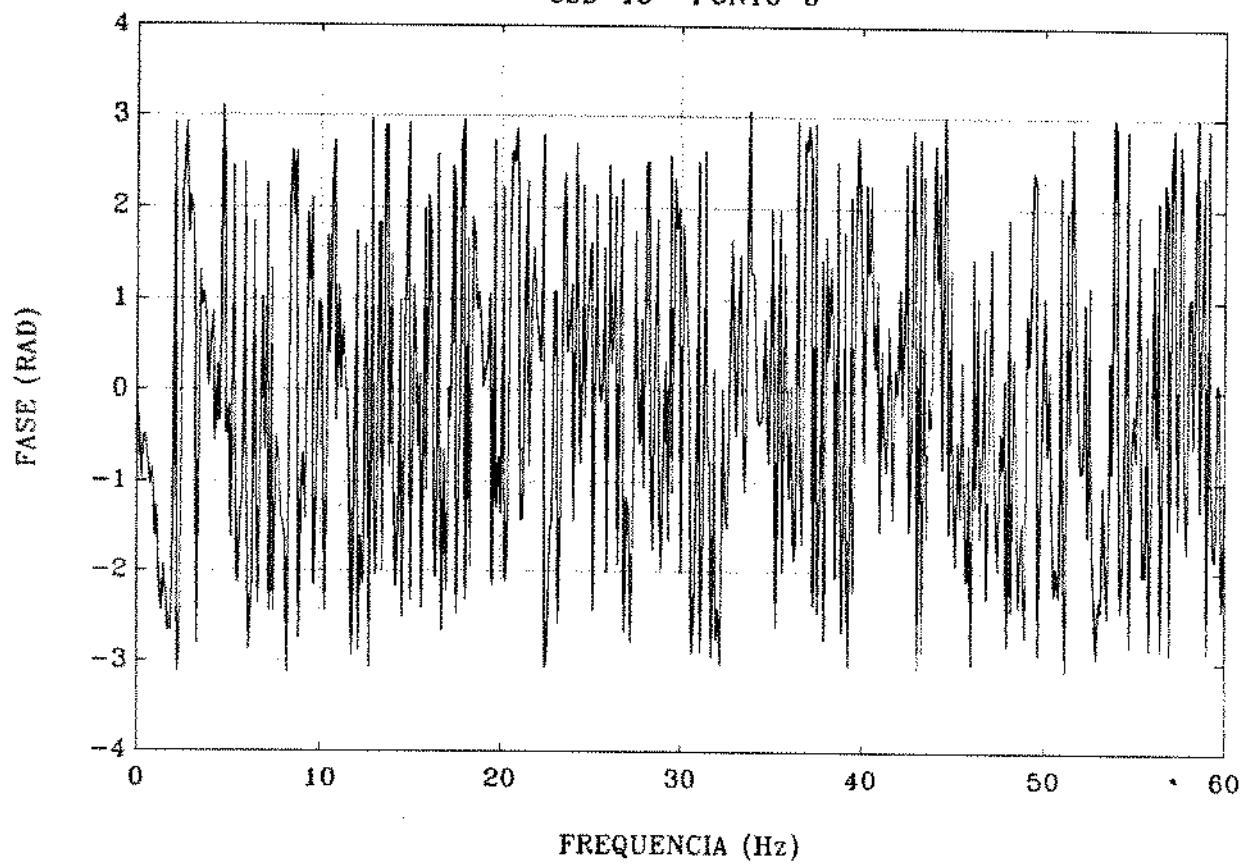
CSD-13 PONT0-6



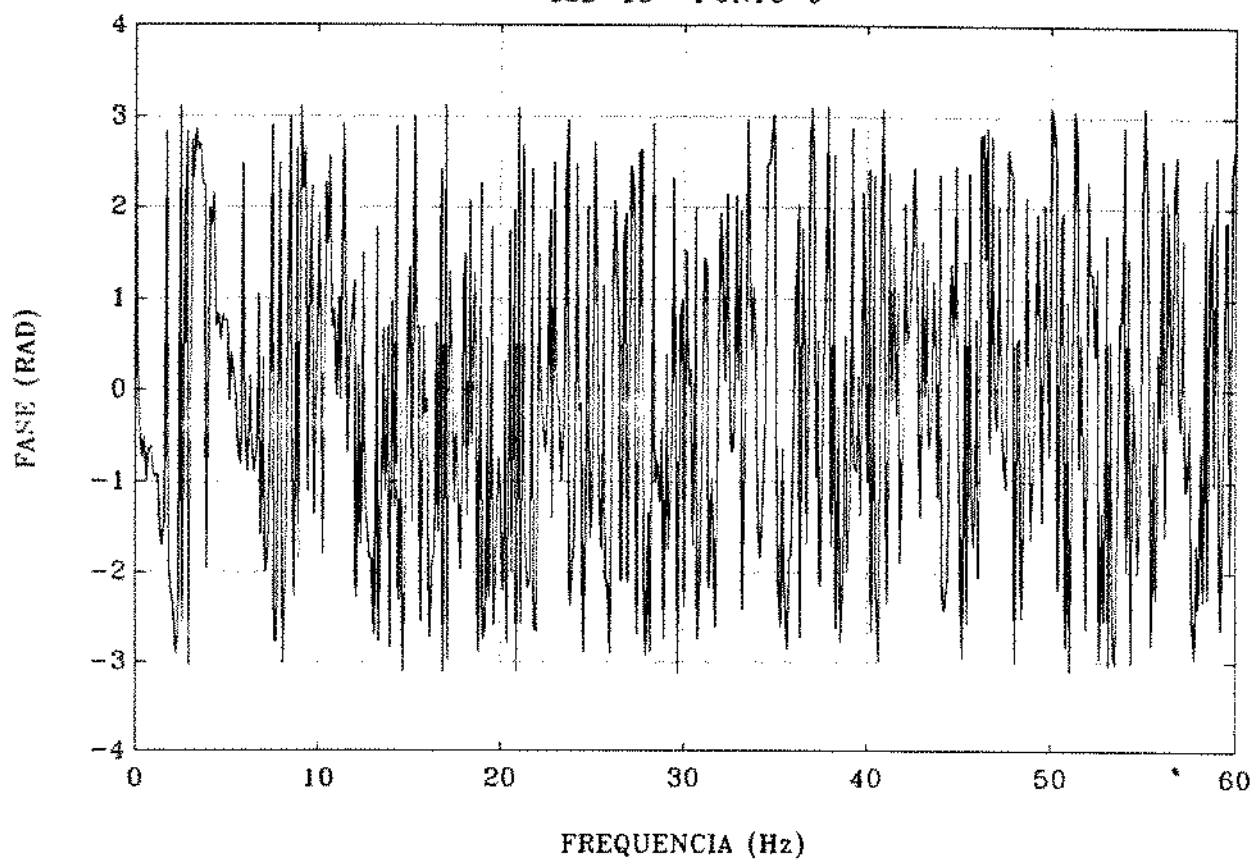
CSD-13 PONT0-7



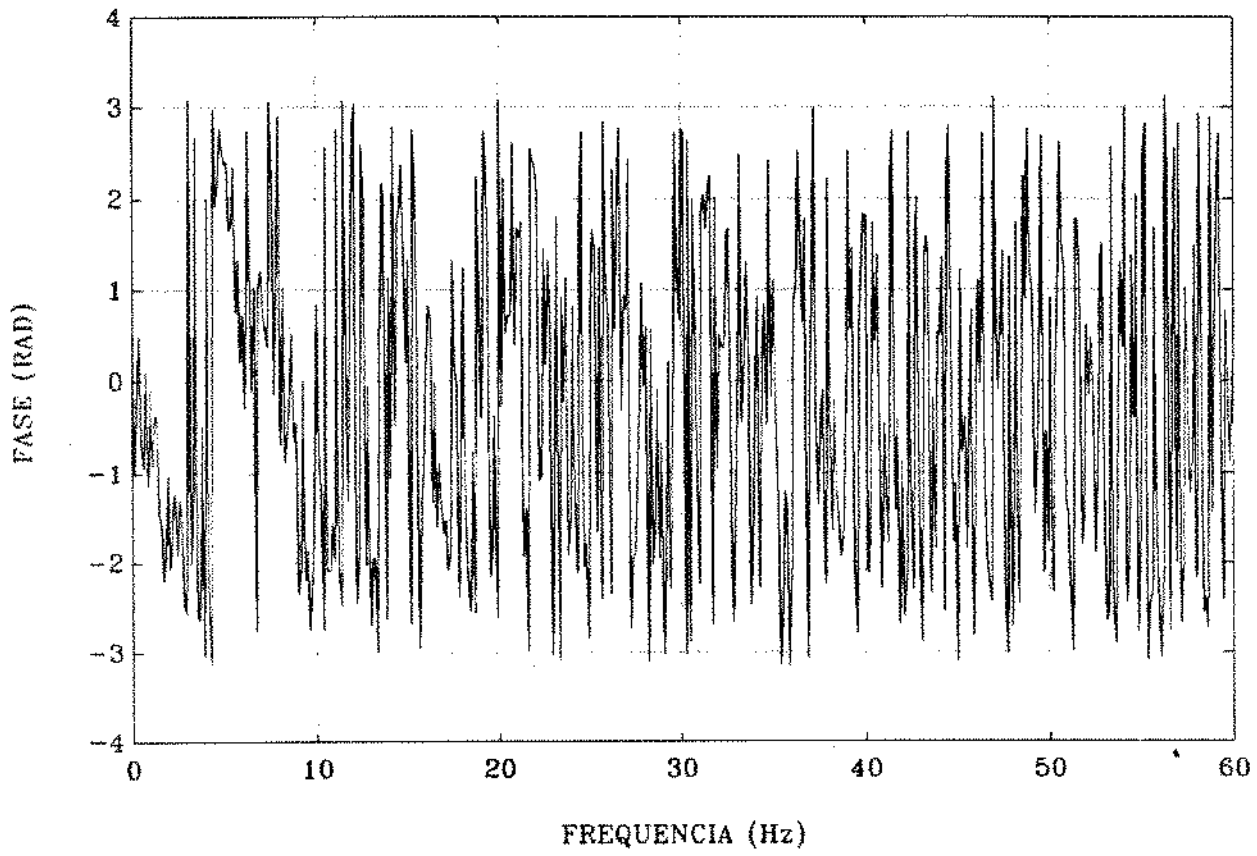
CSD-13 PONT0-8



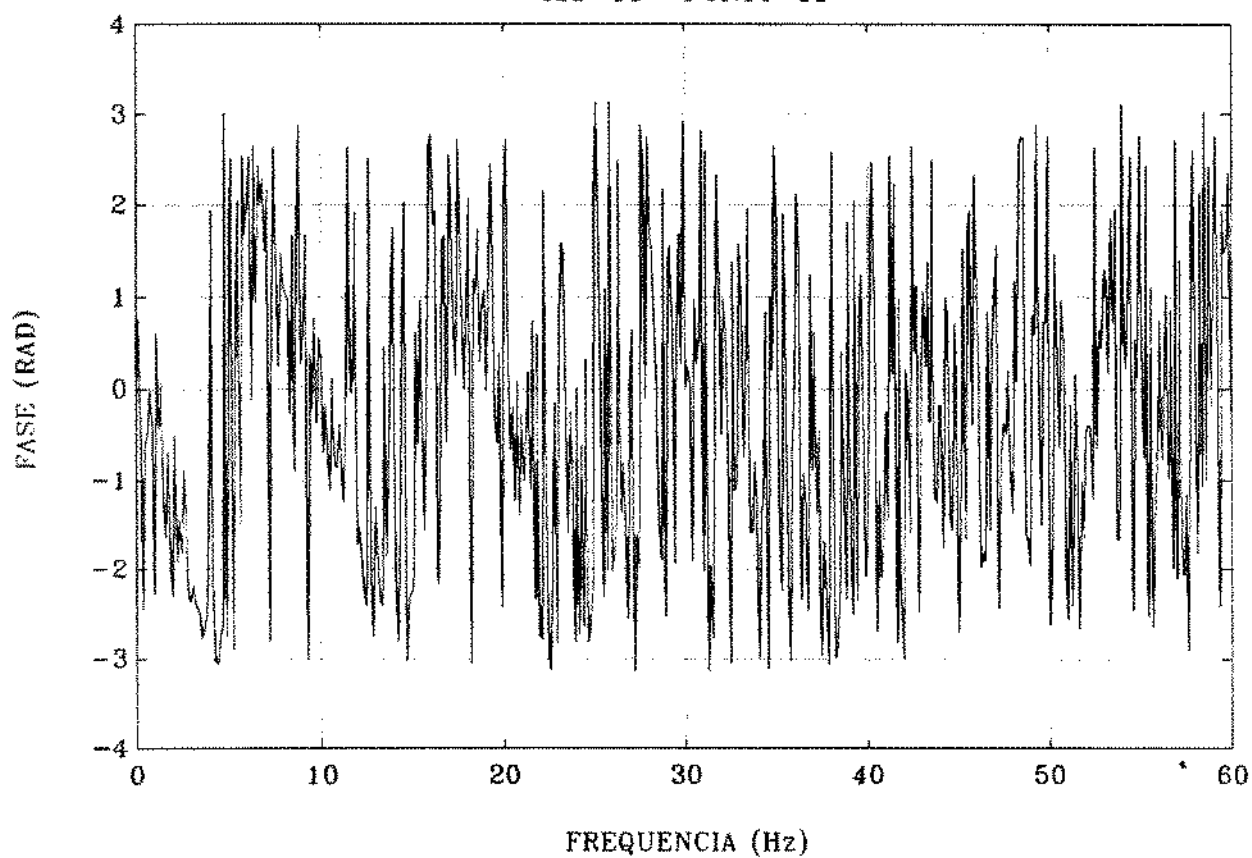
CSD-13 PONTO-9



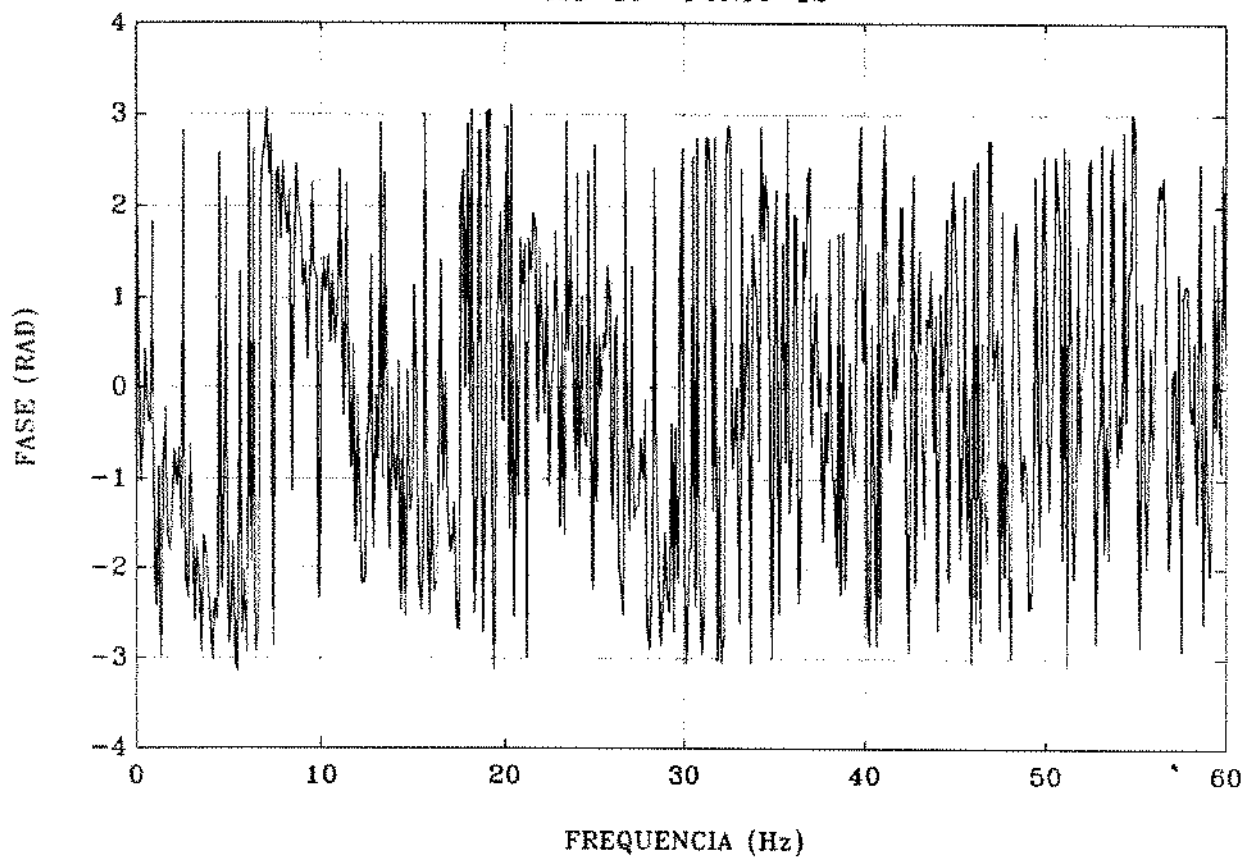
CSD-13 PONTO-10



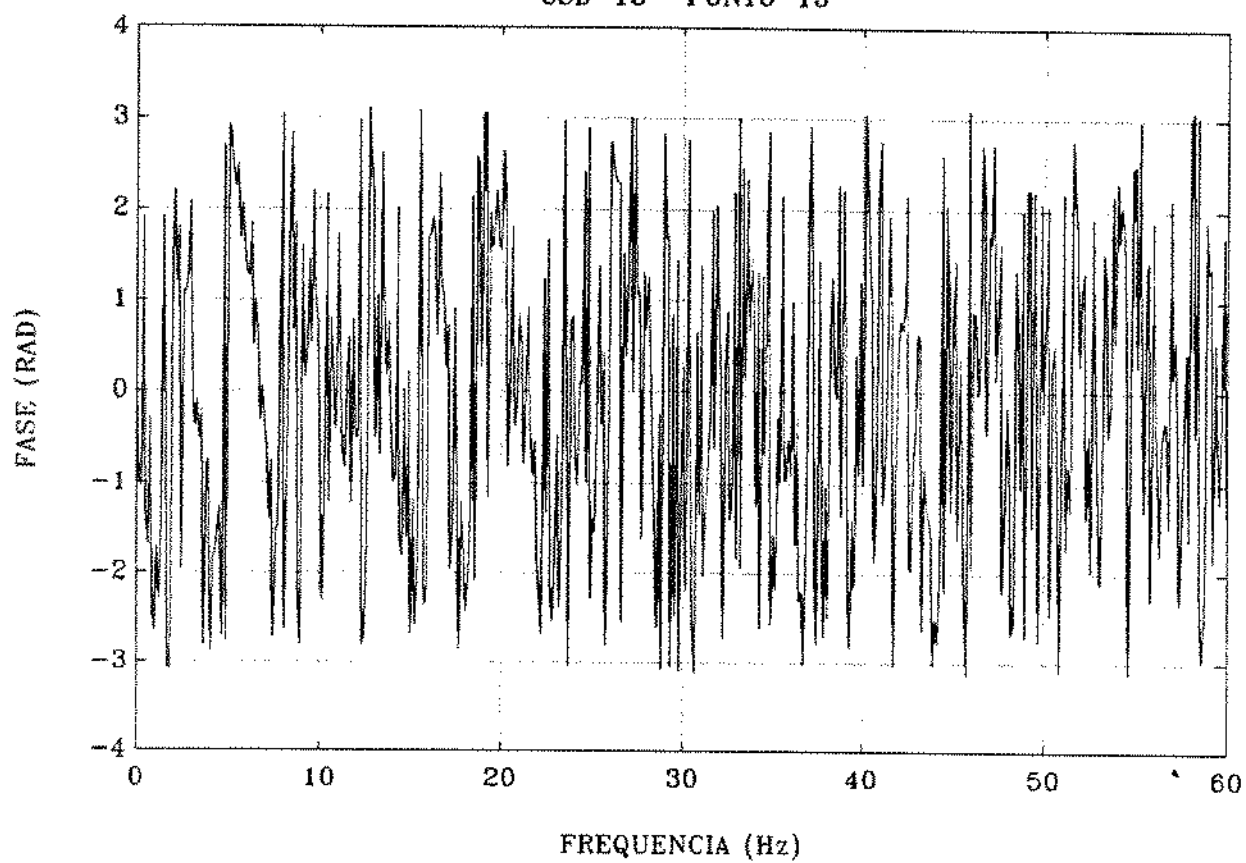
CSD-13 PONTO-11



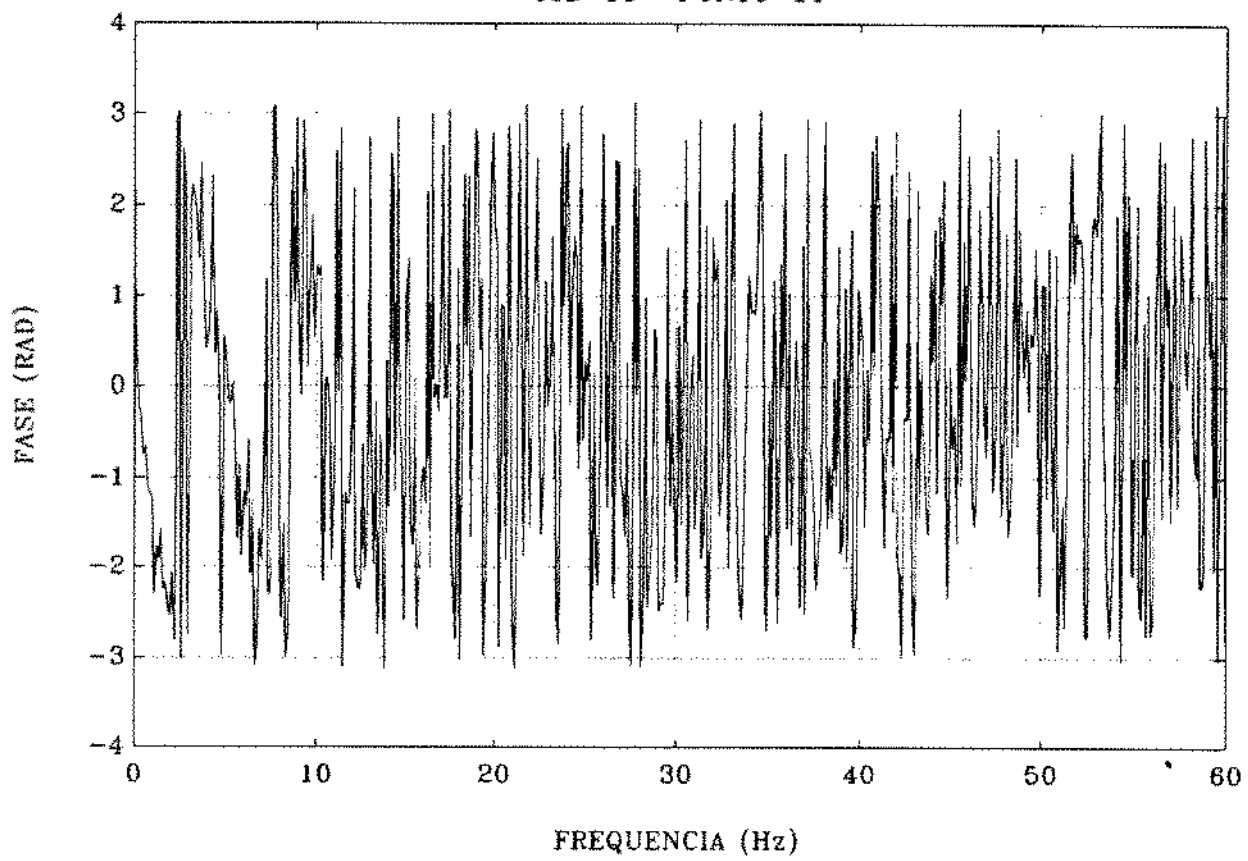
CSD-13 PONTO-12



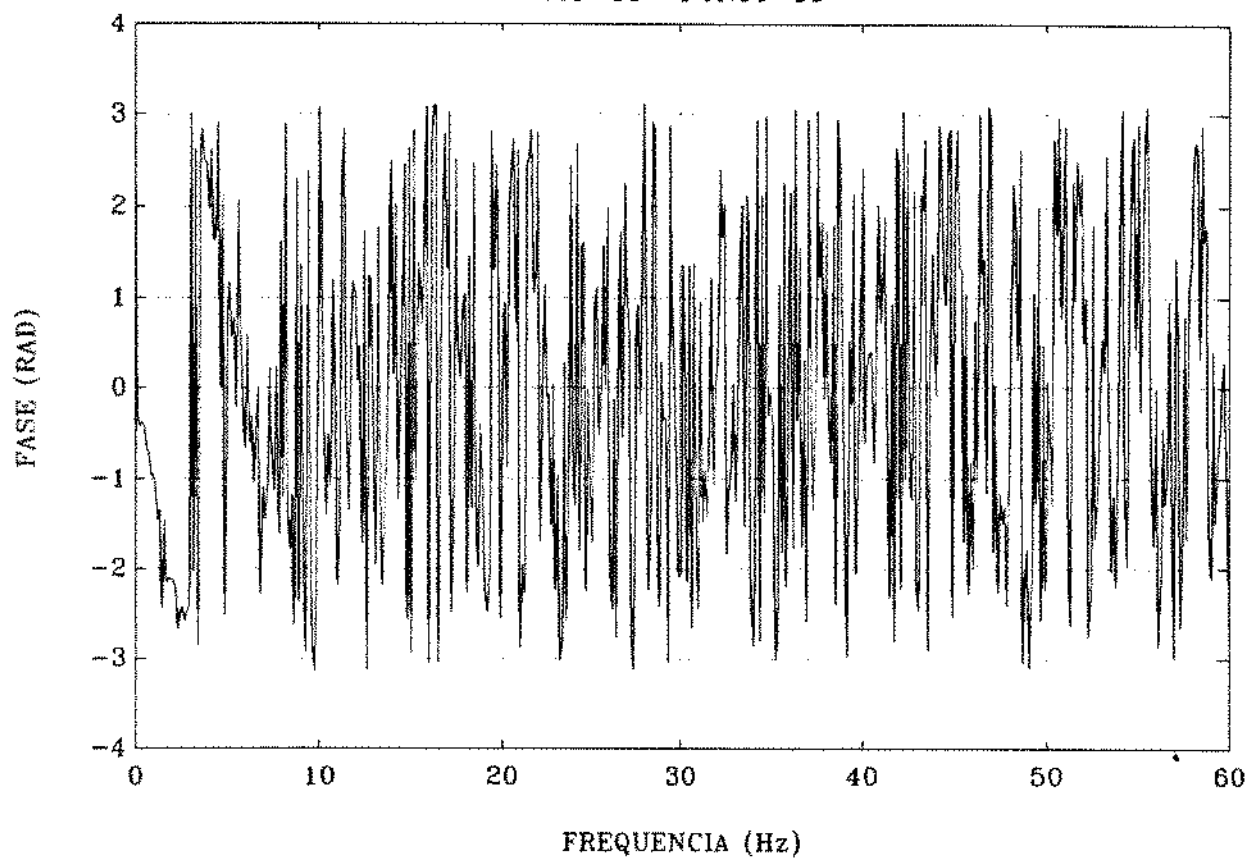
CSD-13 PONT0-13



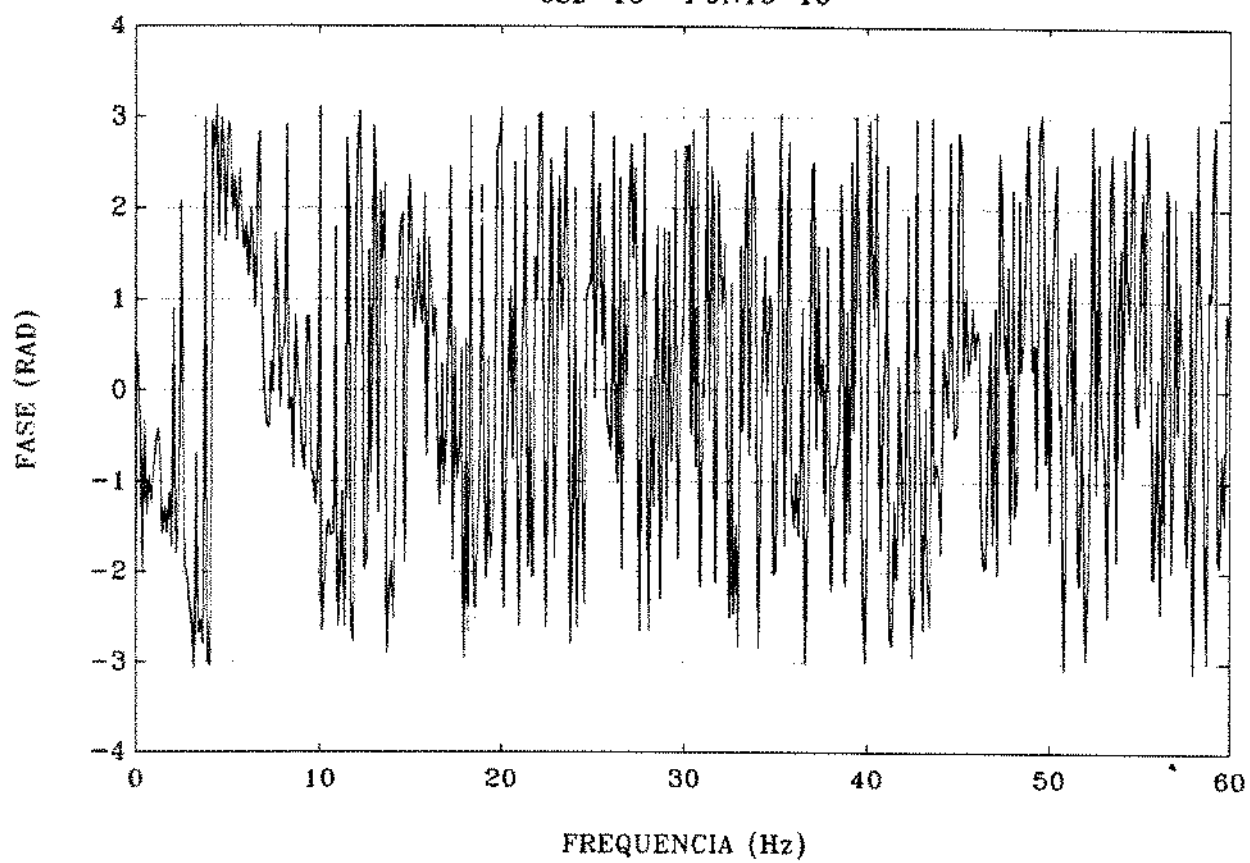
CSD-13 PONTO-14



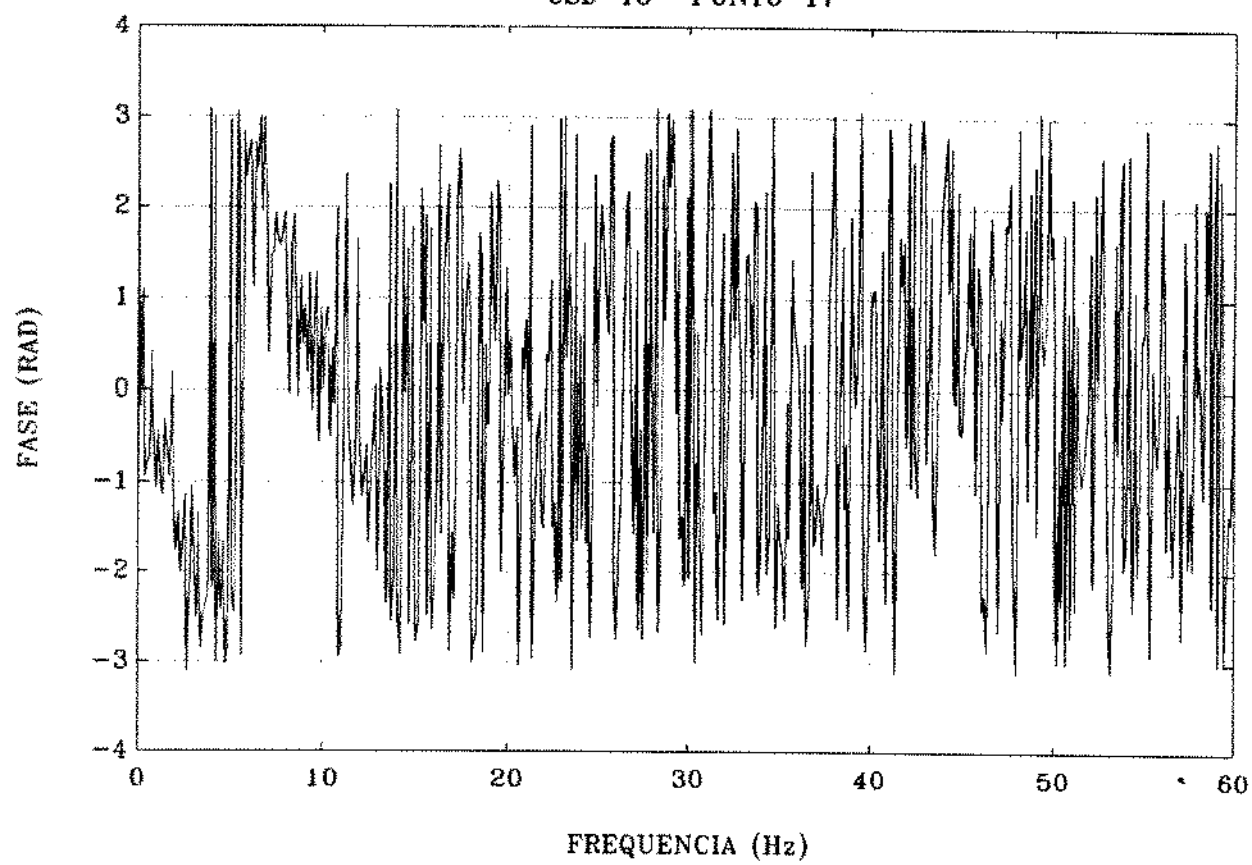
CSD-13 PONT0-15



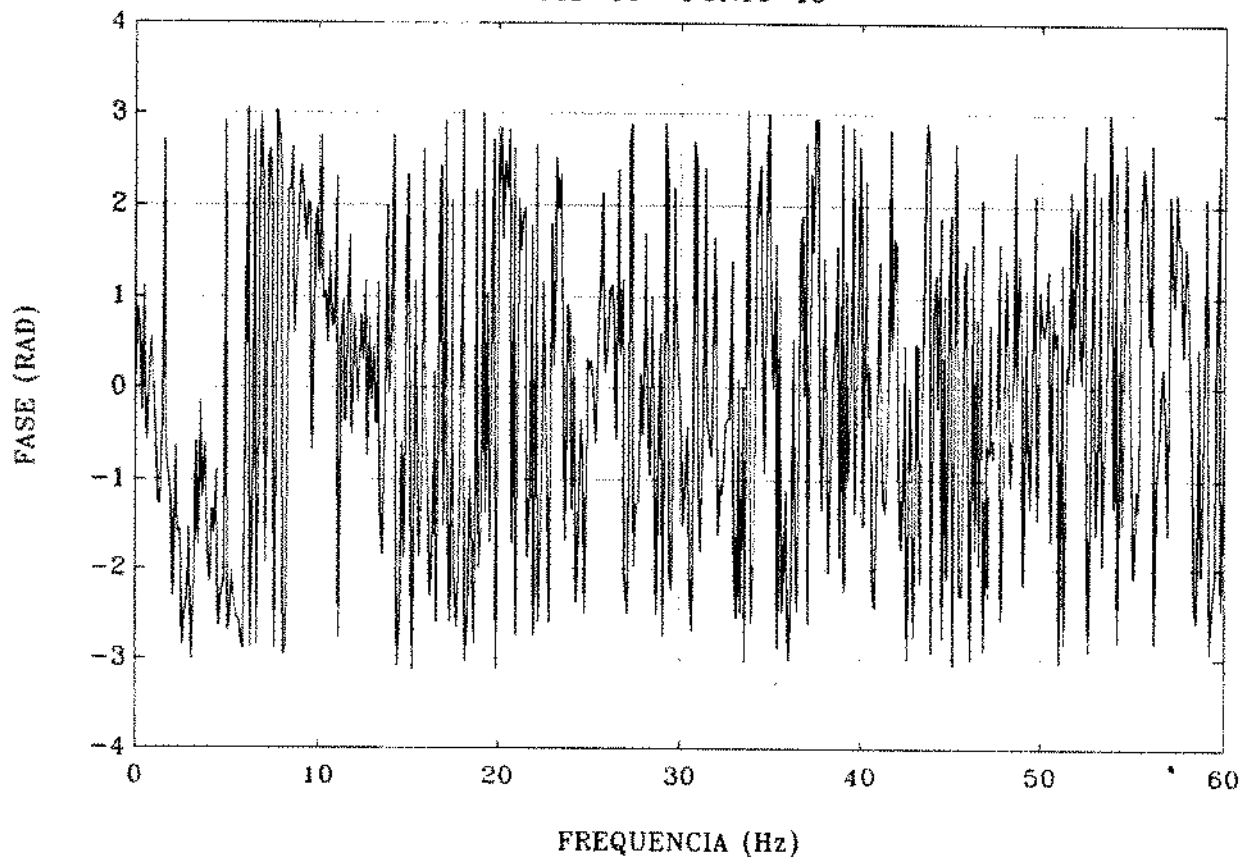
CSD-13 PONT0-16



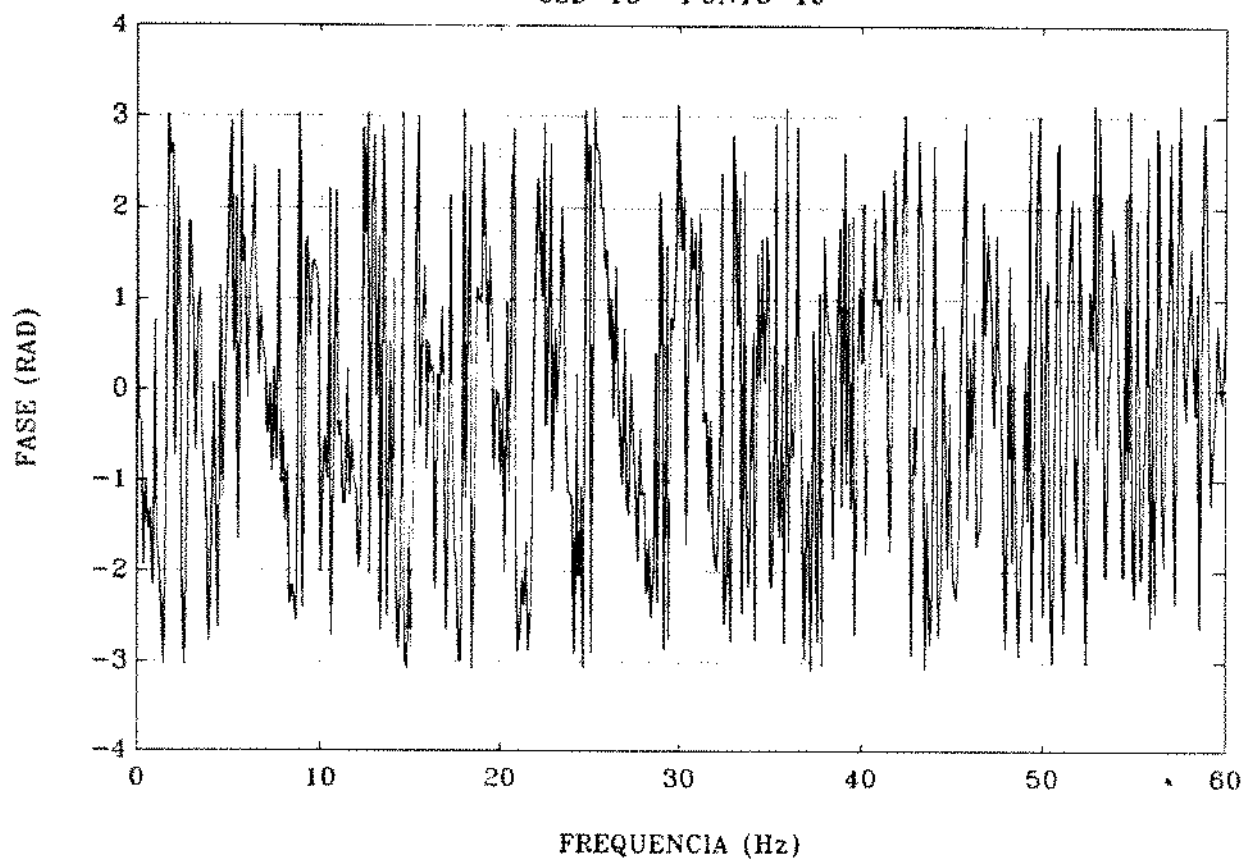
CSD-13 PONT0-17



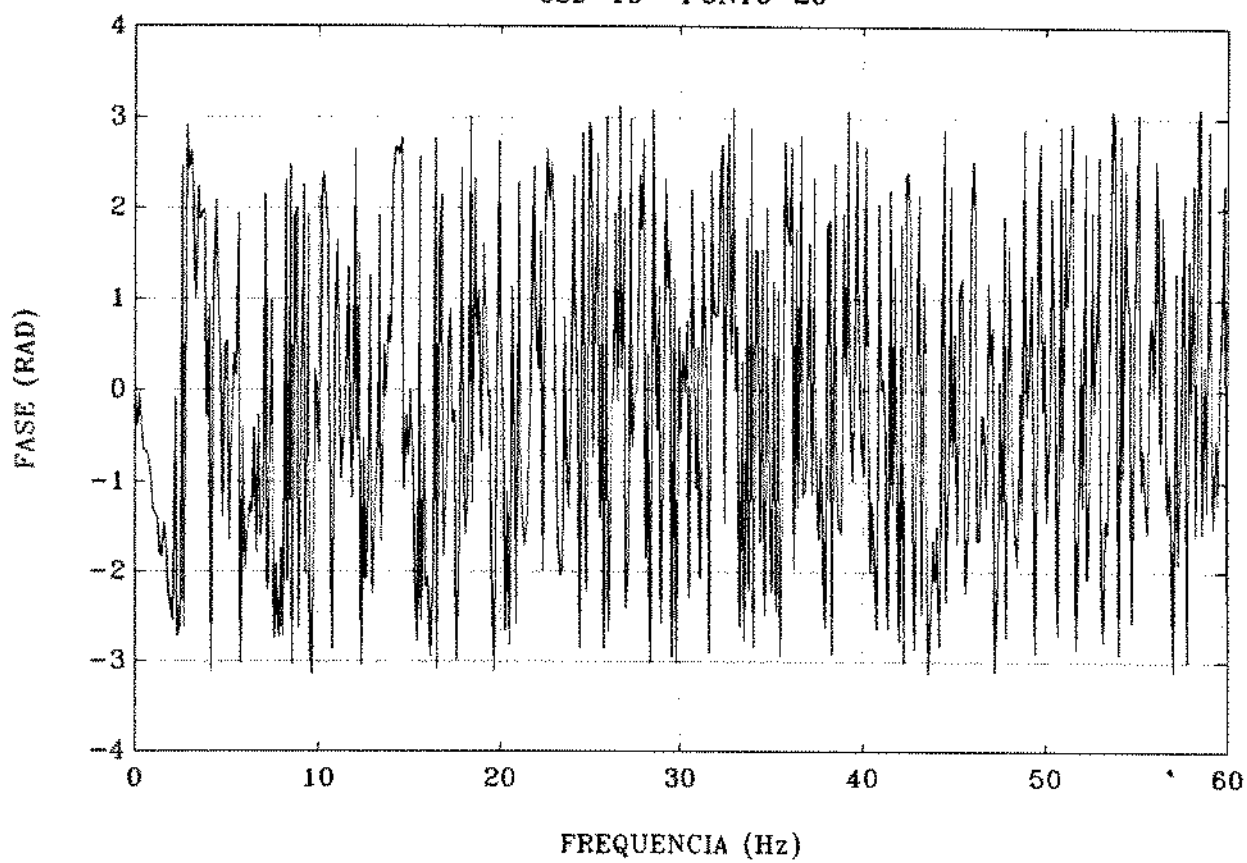
CSD-13 PONT0-18



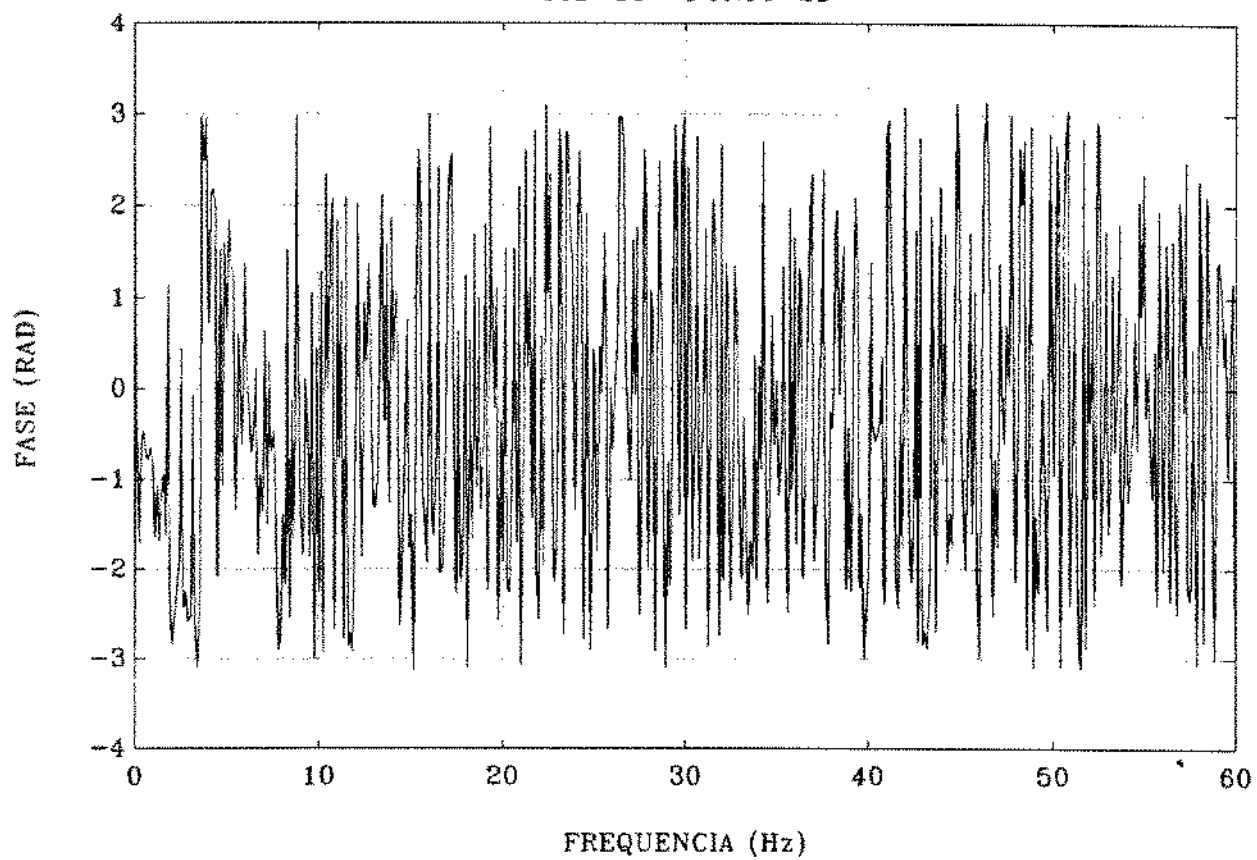
CSD-13 PONT0-19



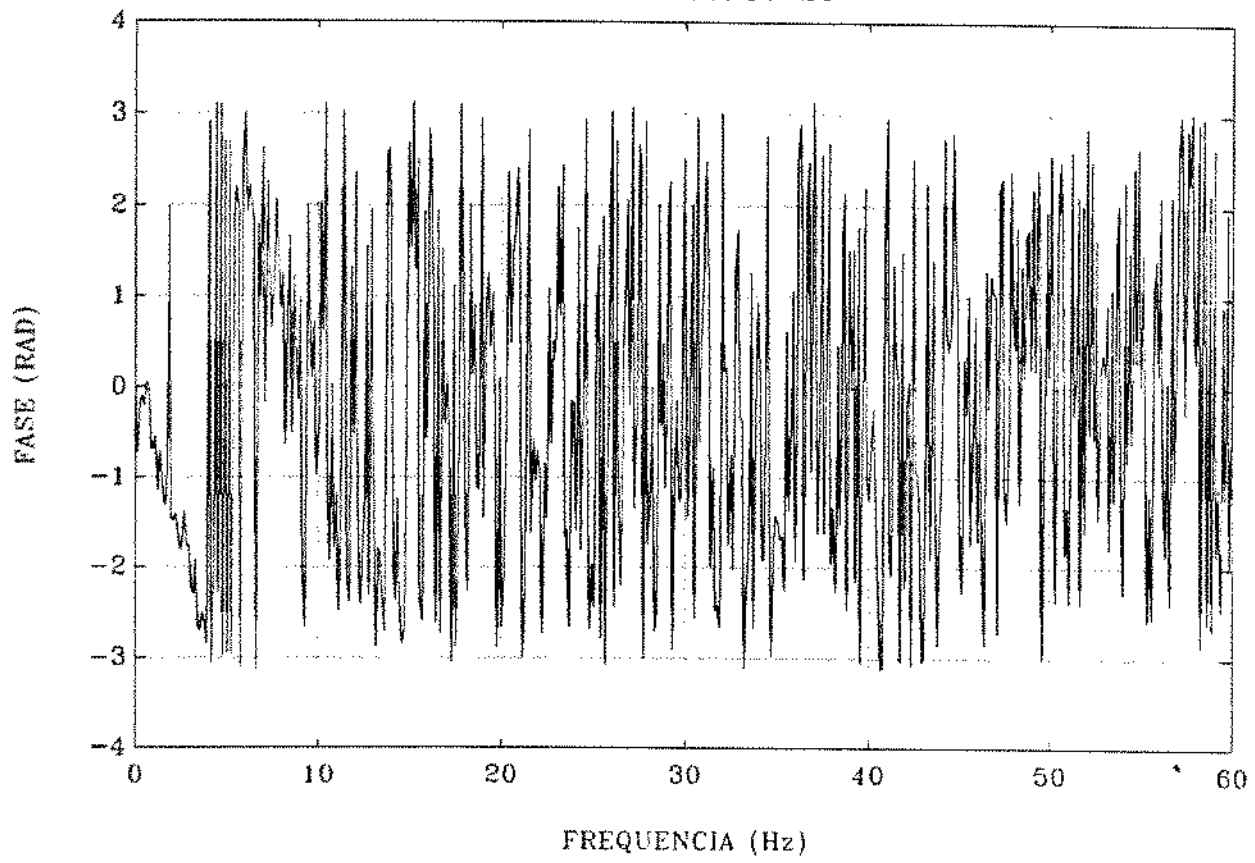
CSD-13 PONT0-20



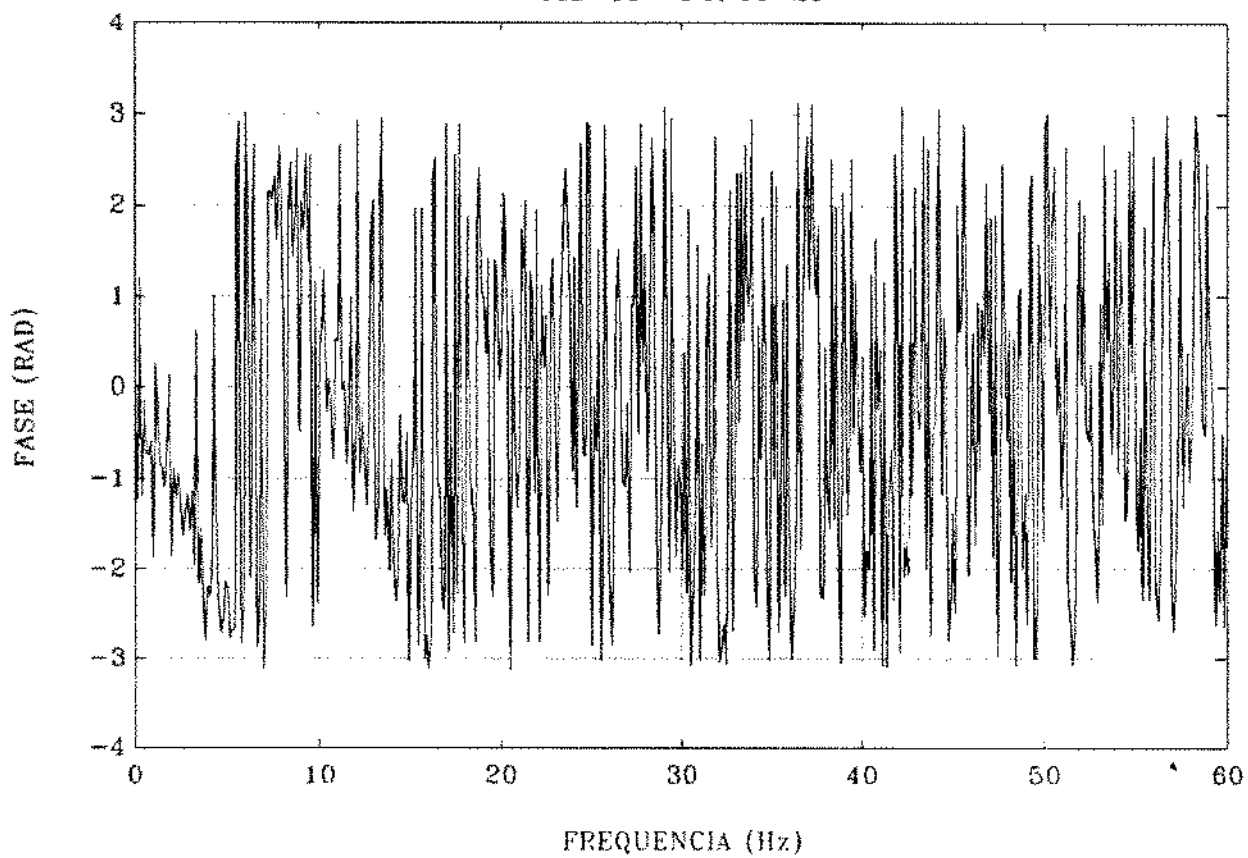
CSD-13 PONT0-21



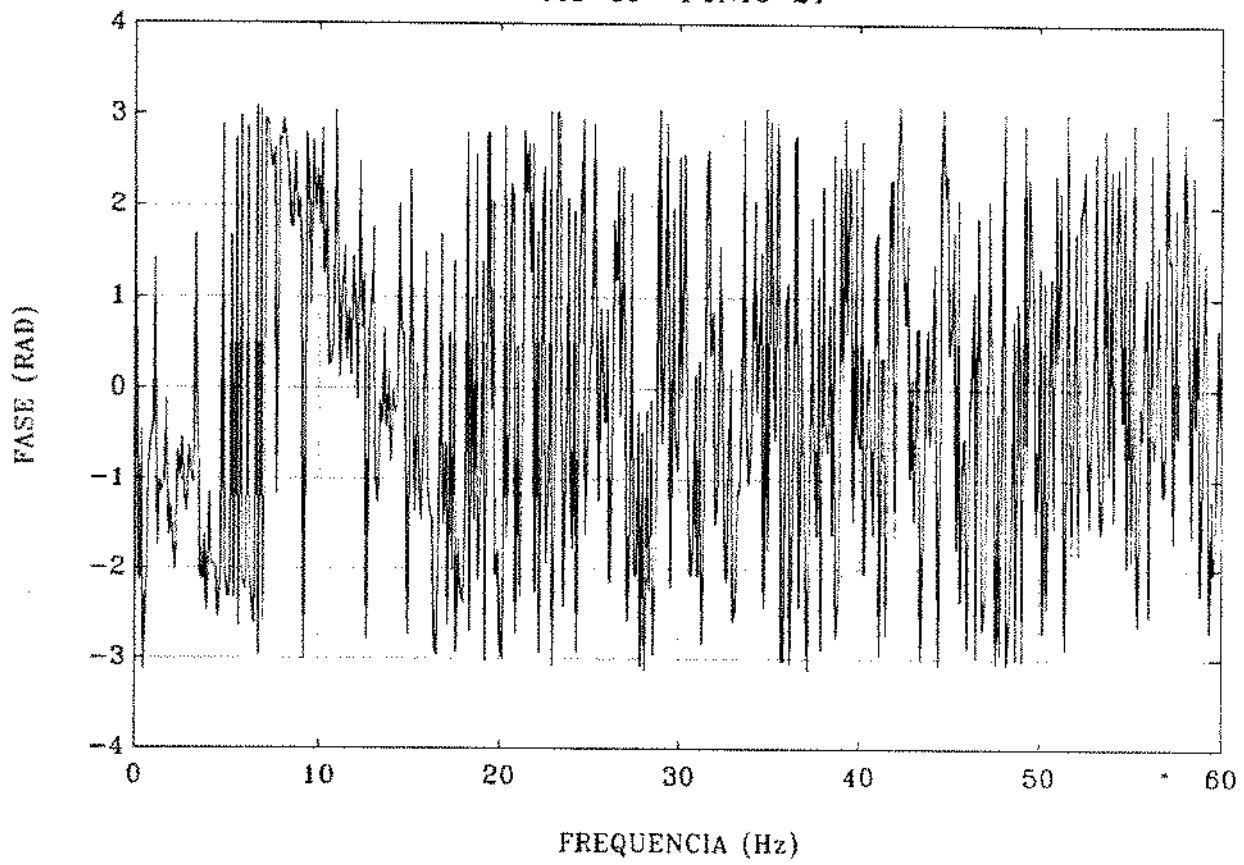
CSD-13 PONT0-22



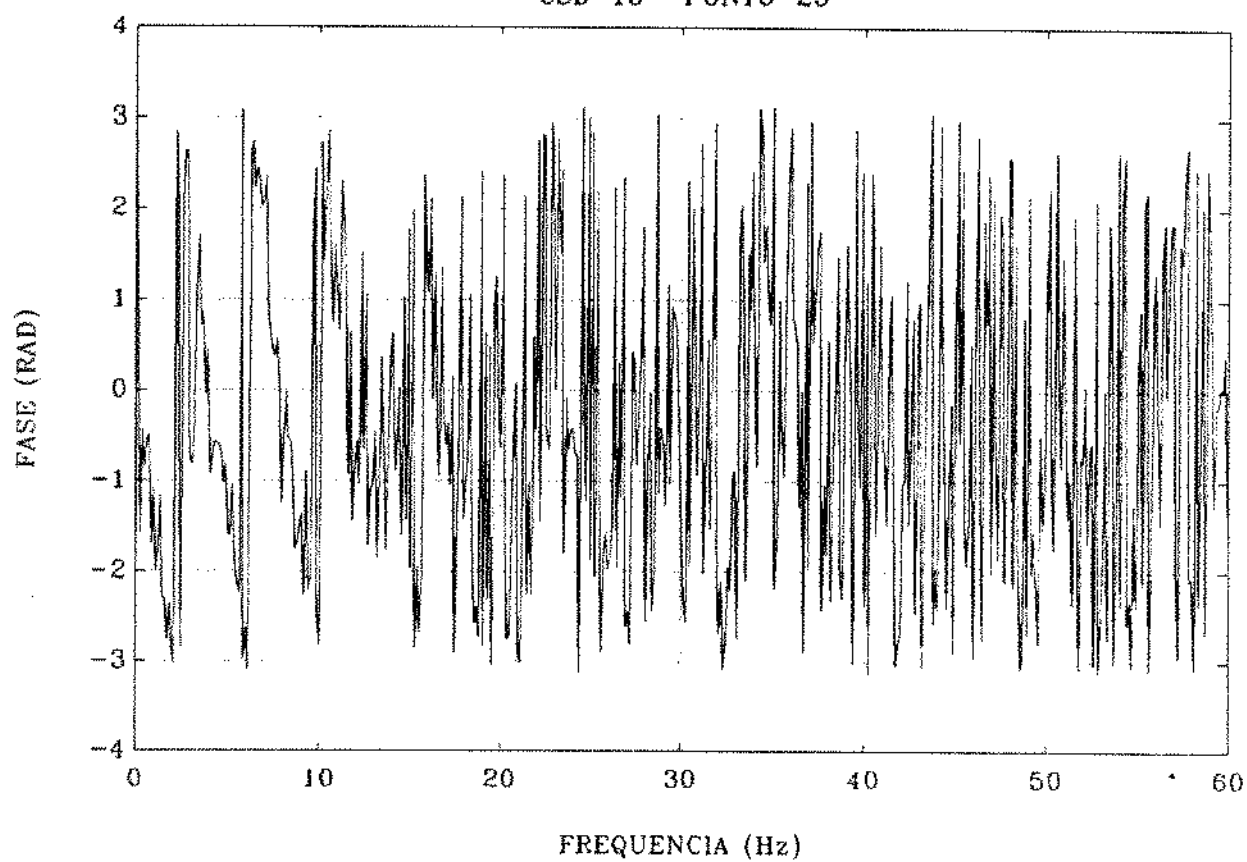
CSD-13 PONT0-23



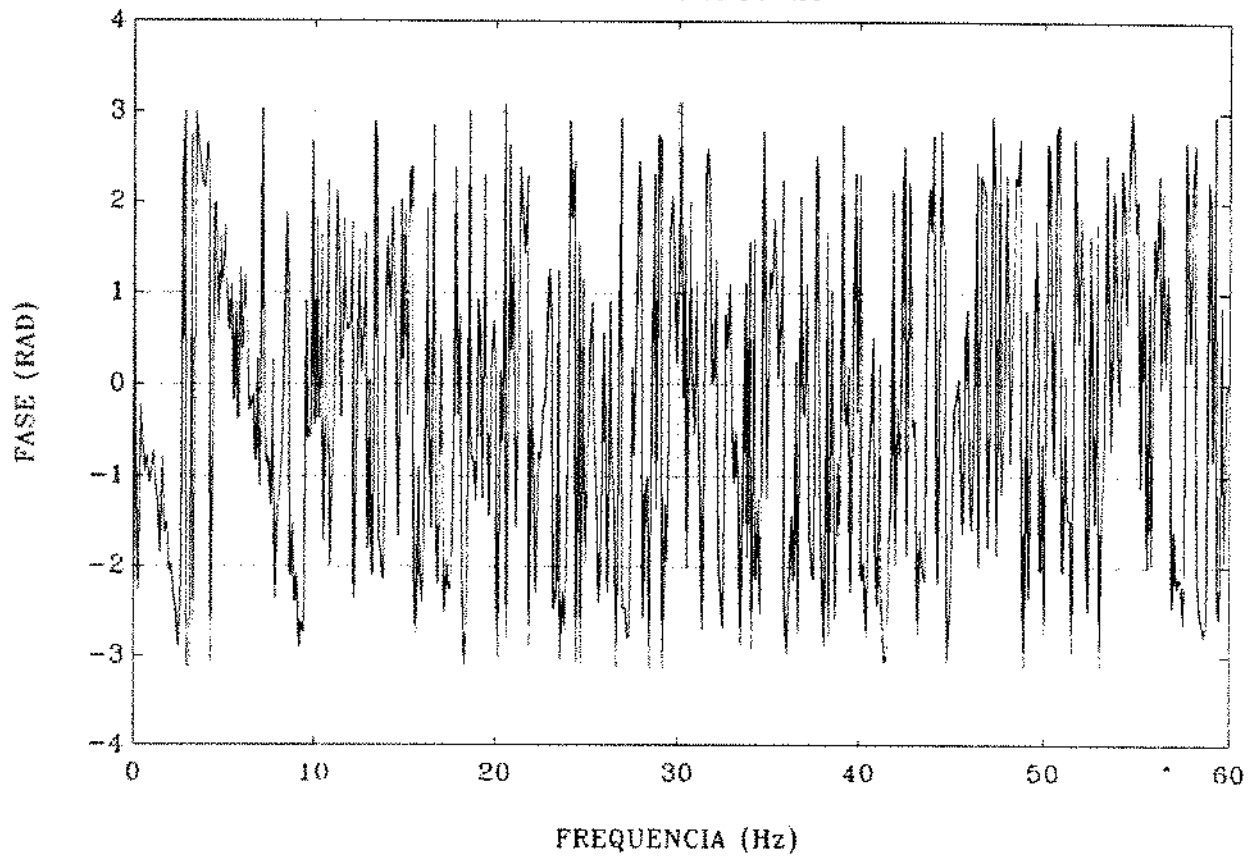
CSD-13 PONTO-24



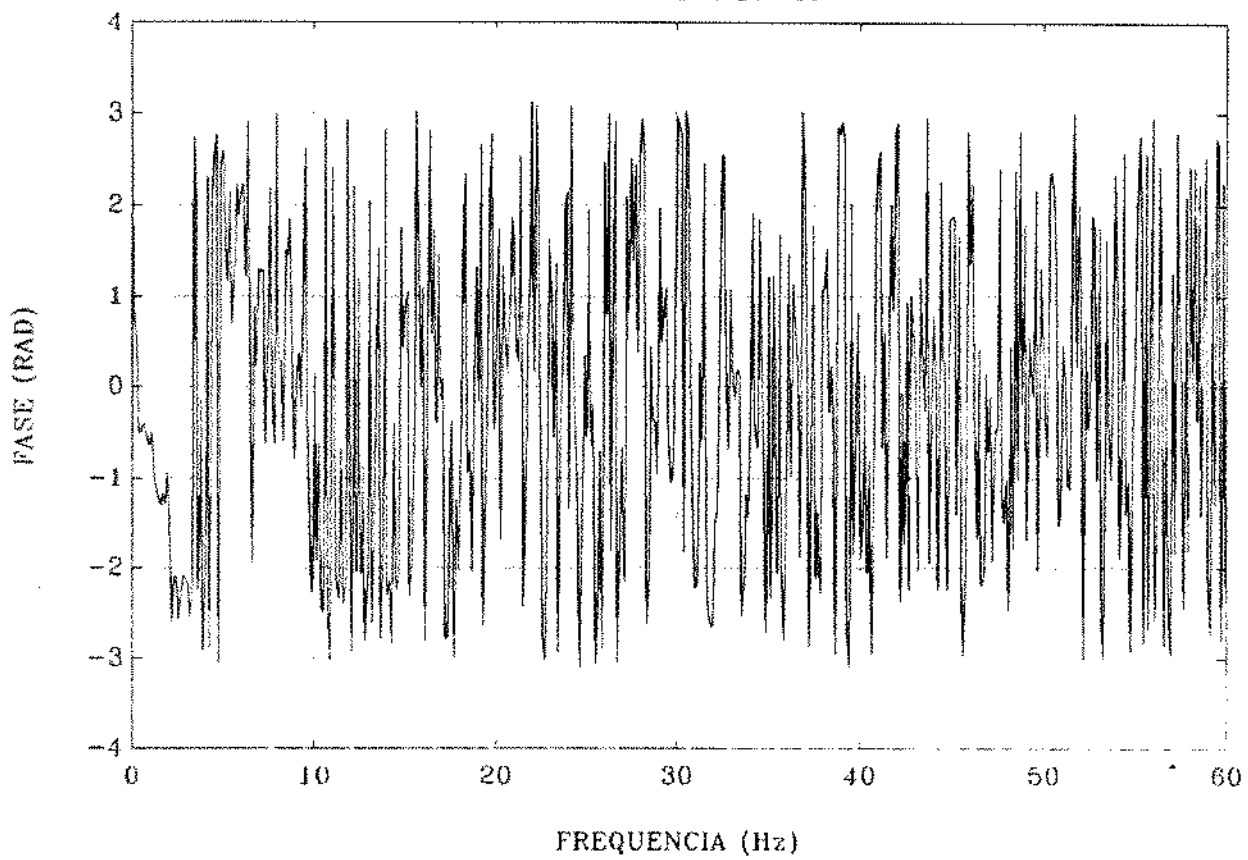
CSD-13 PONT0-25



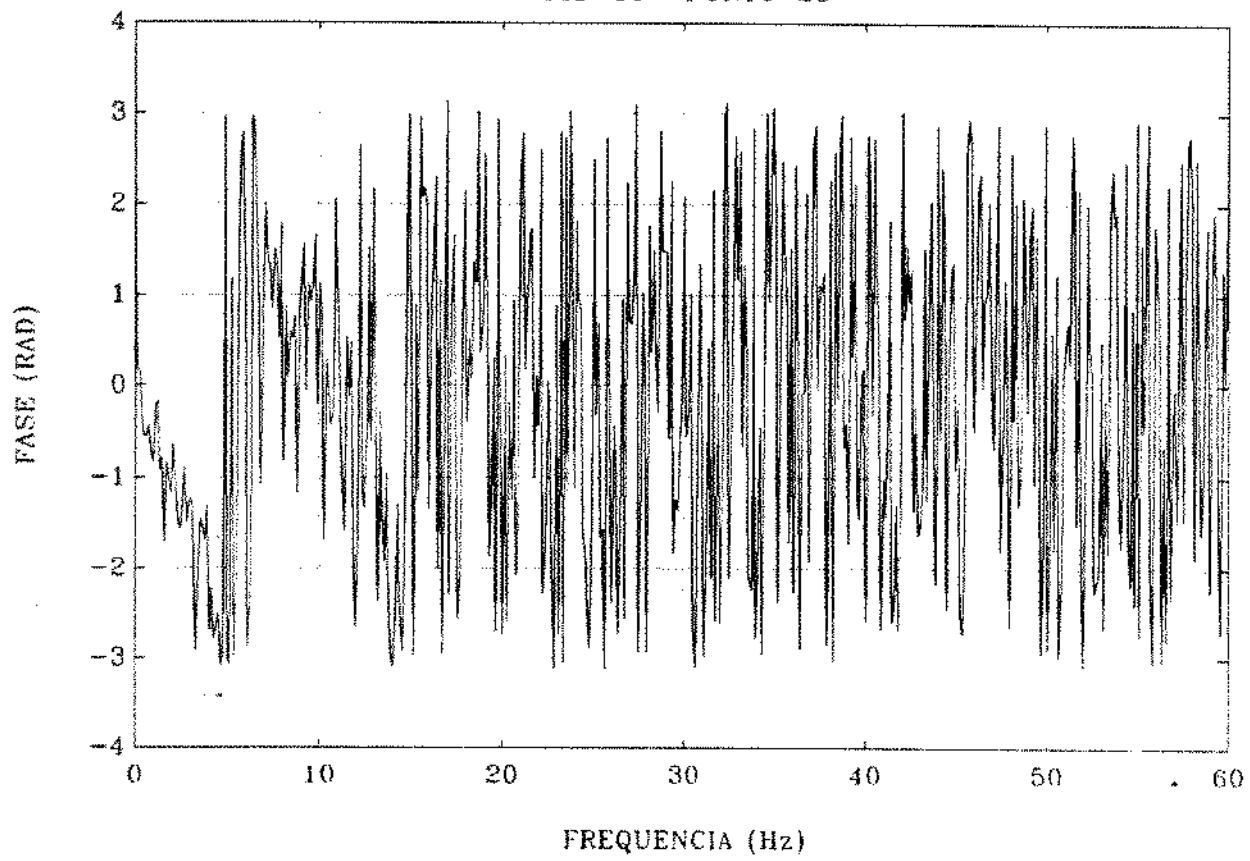
CSD-13 PONT0-26



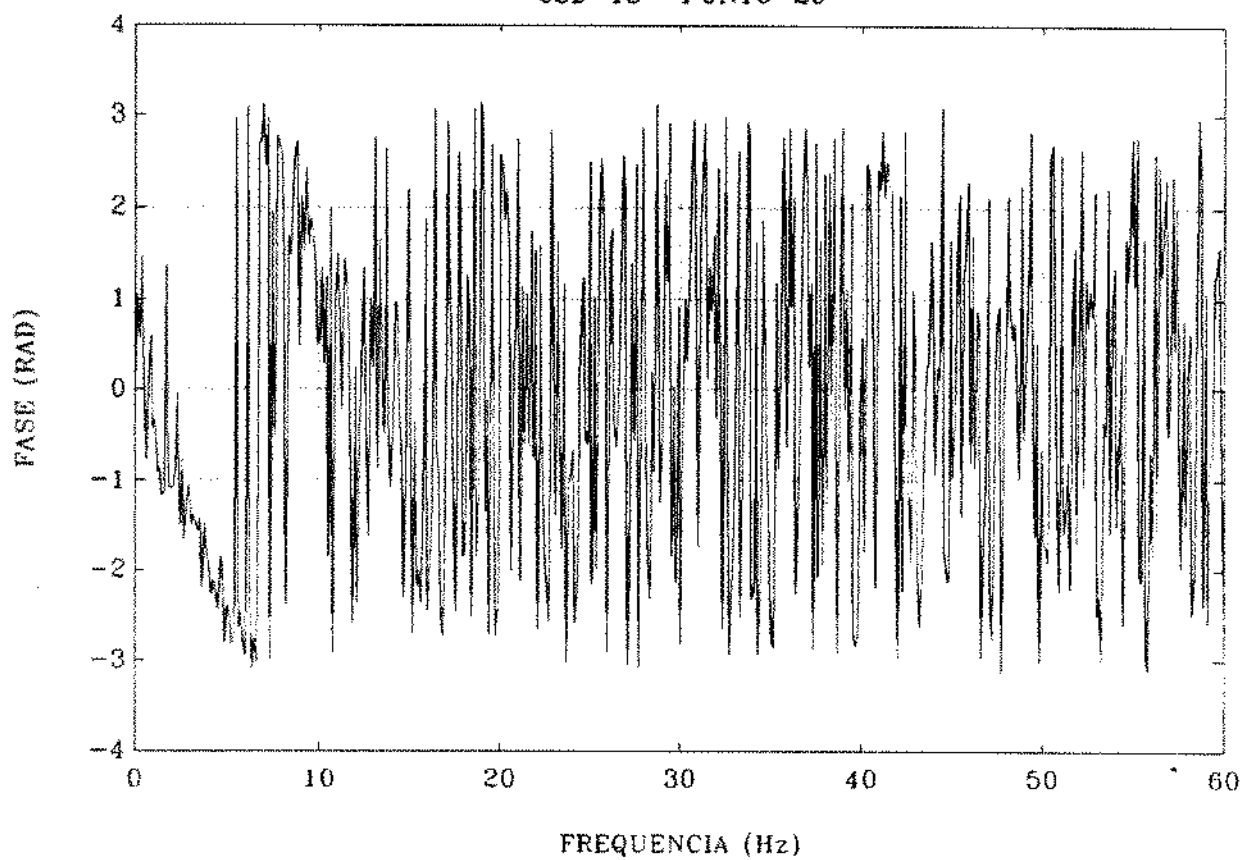
CSD-13 PONTO-27



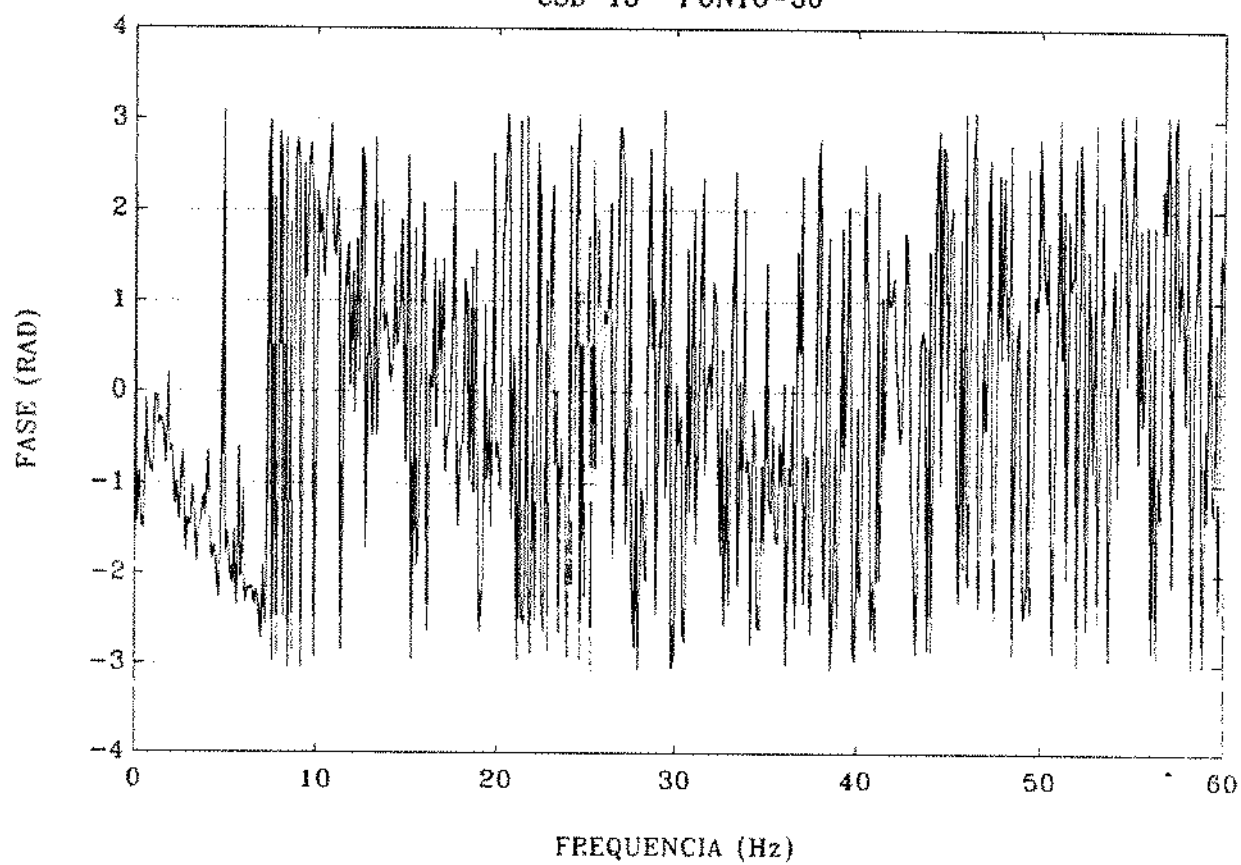
CSD-13 PONT0-28



CSD-13 PONTO-29



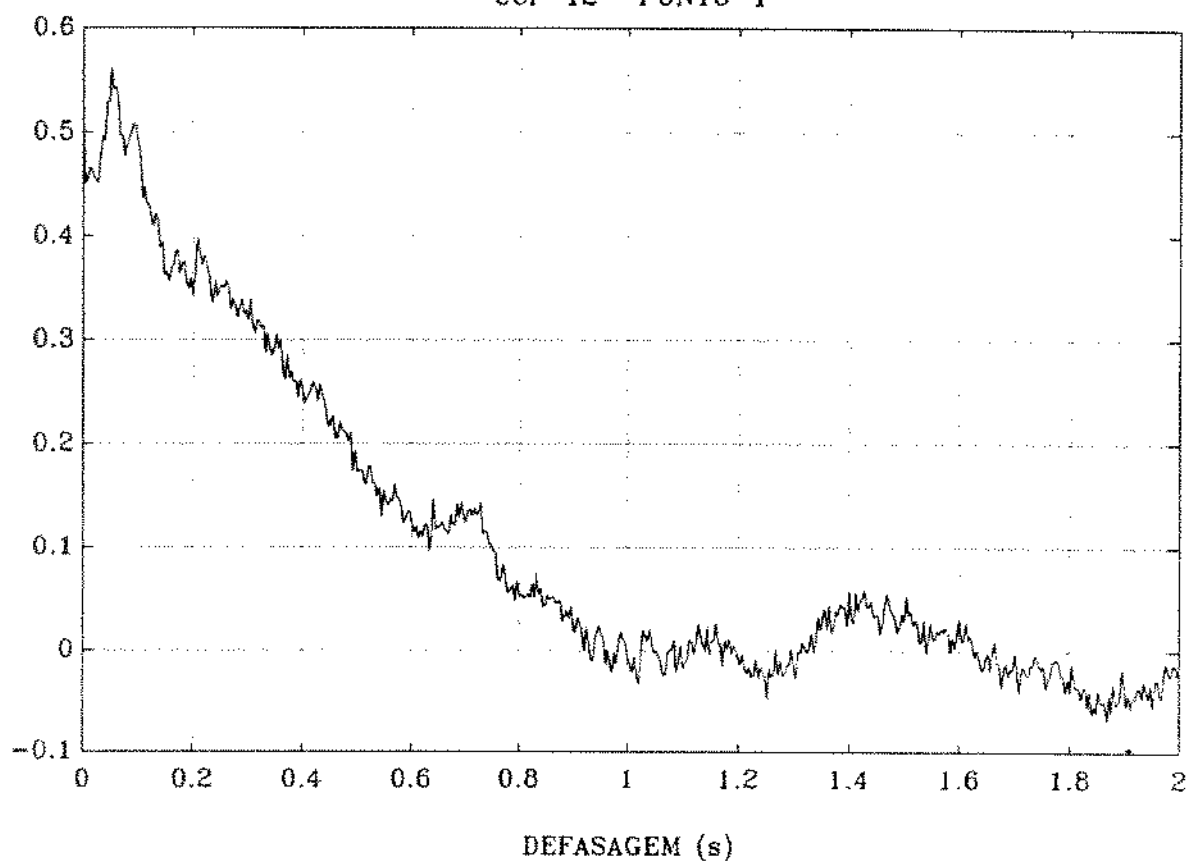
CSD-13 PONTO-30



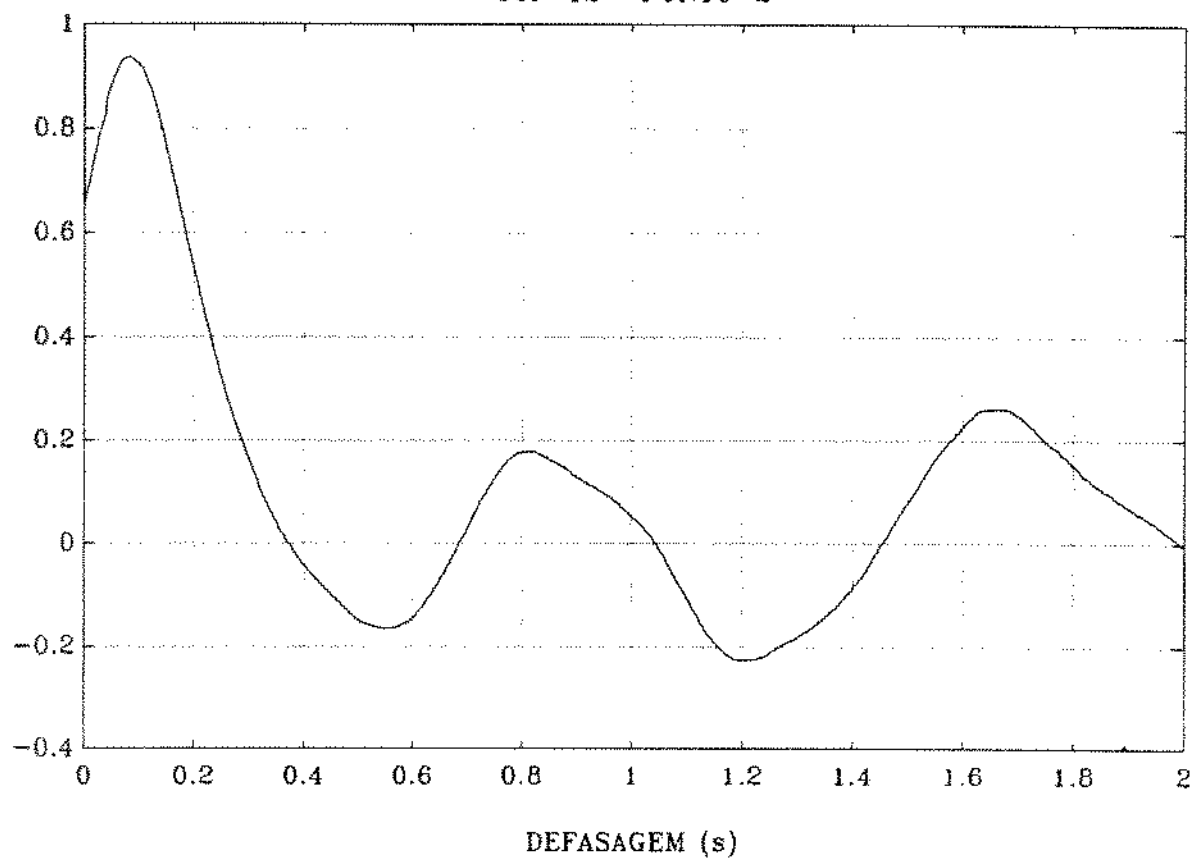
VI.7 - FUNÇÃO DE CORRELAÇÃO CRUZADA NORMALIZADA

(SONDAS 1 E 2)

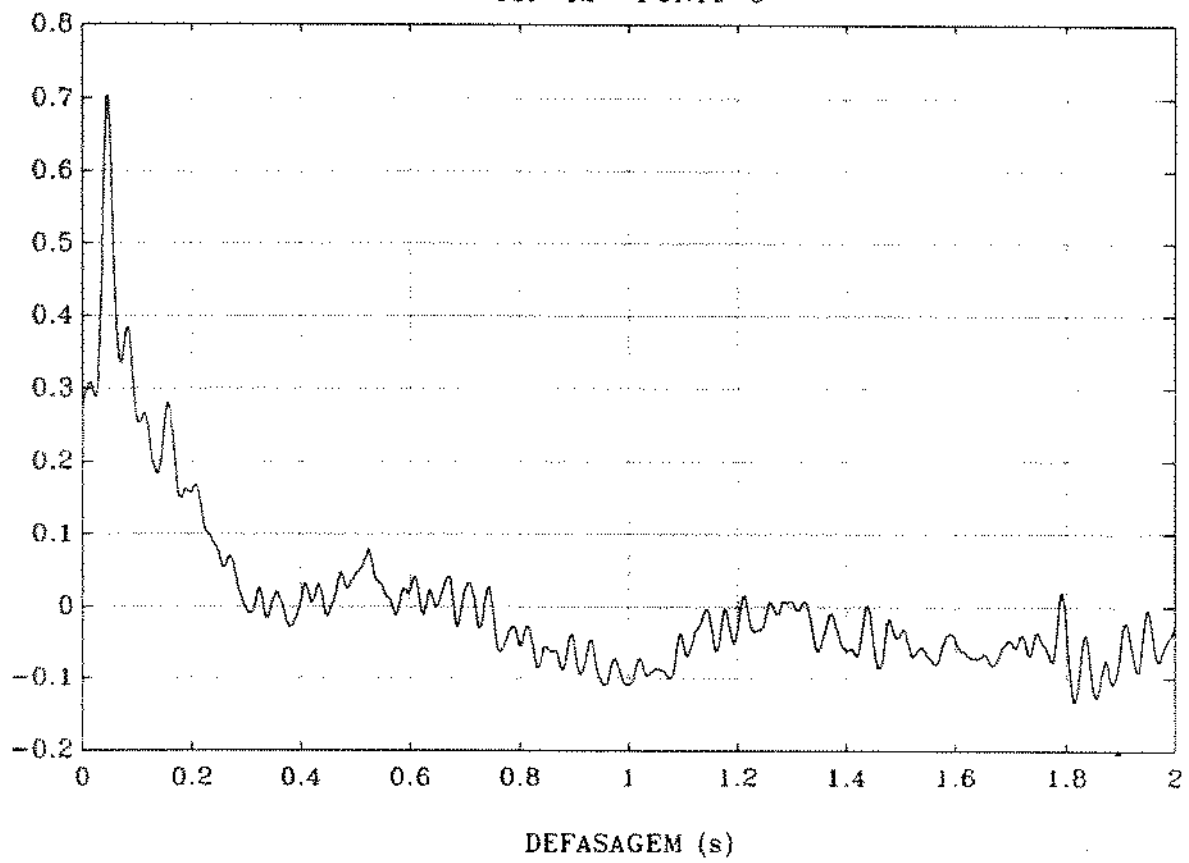
CCF-12 PONTO-1



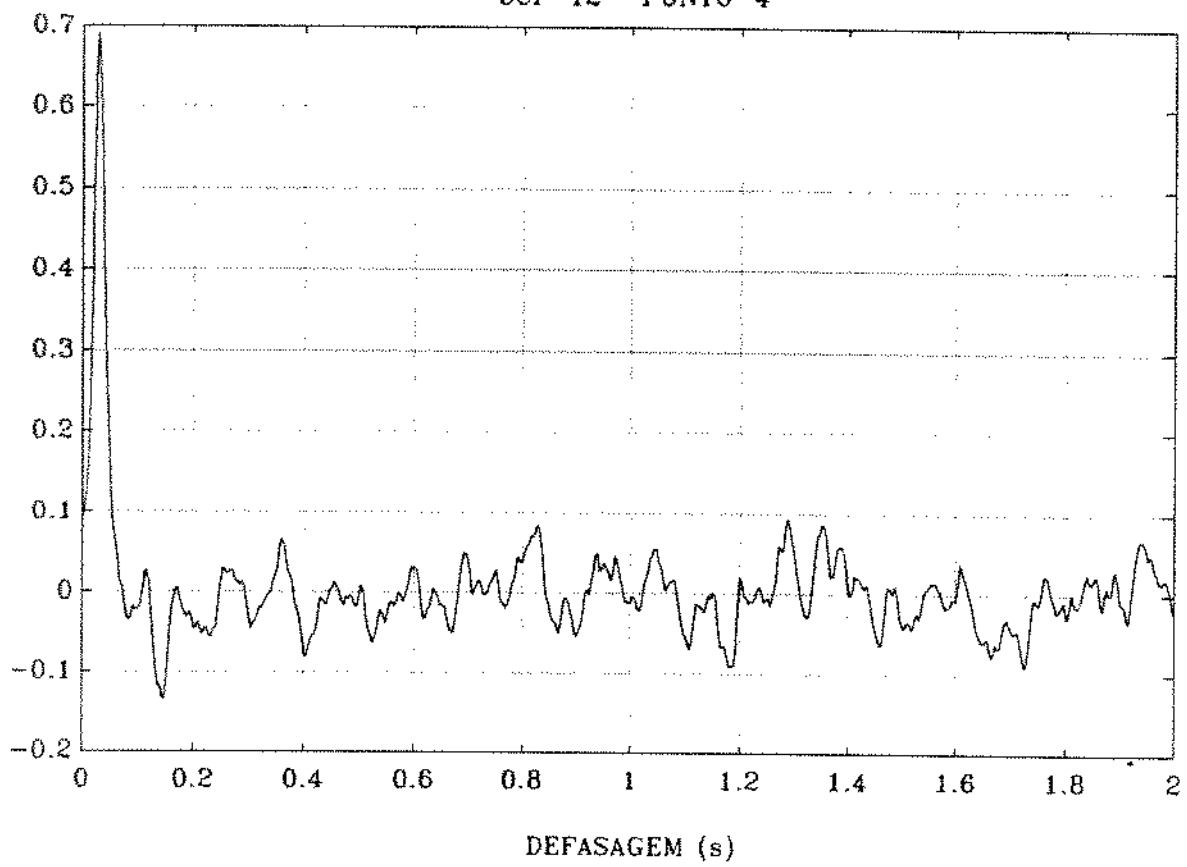
CCF-12 PONTO-2



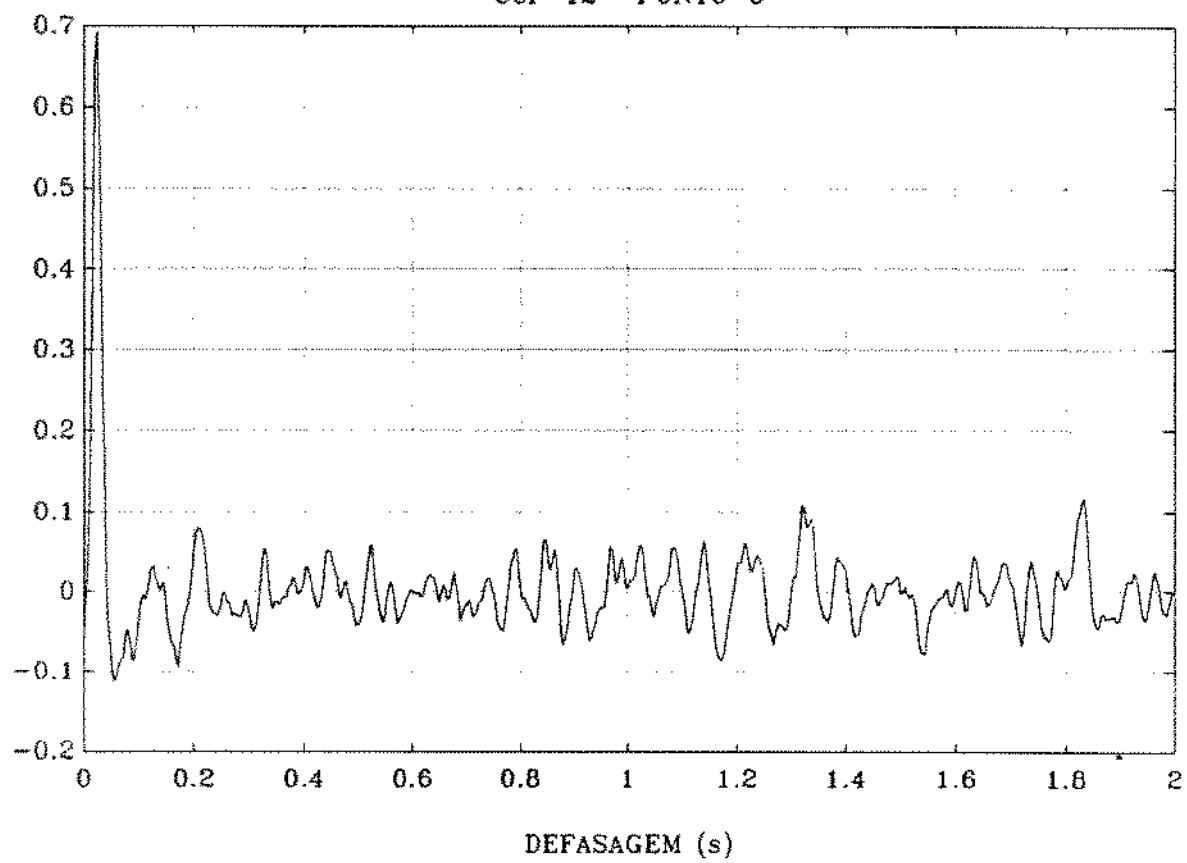
CCF-12 PONTO-3



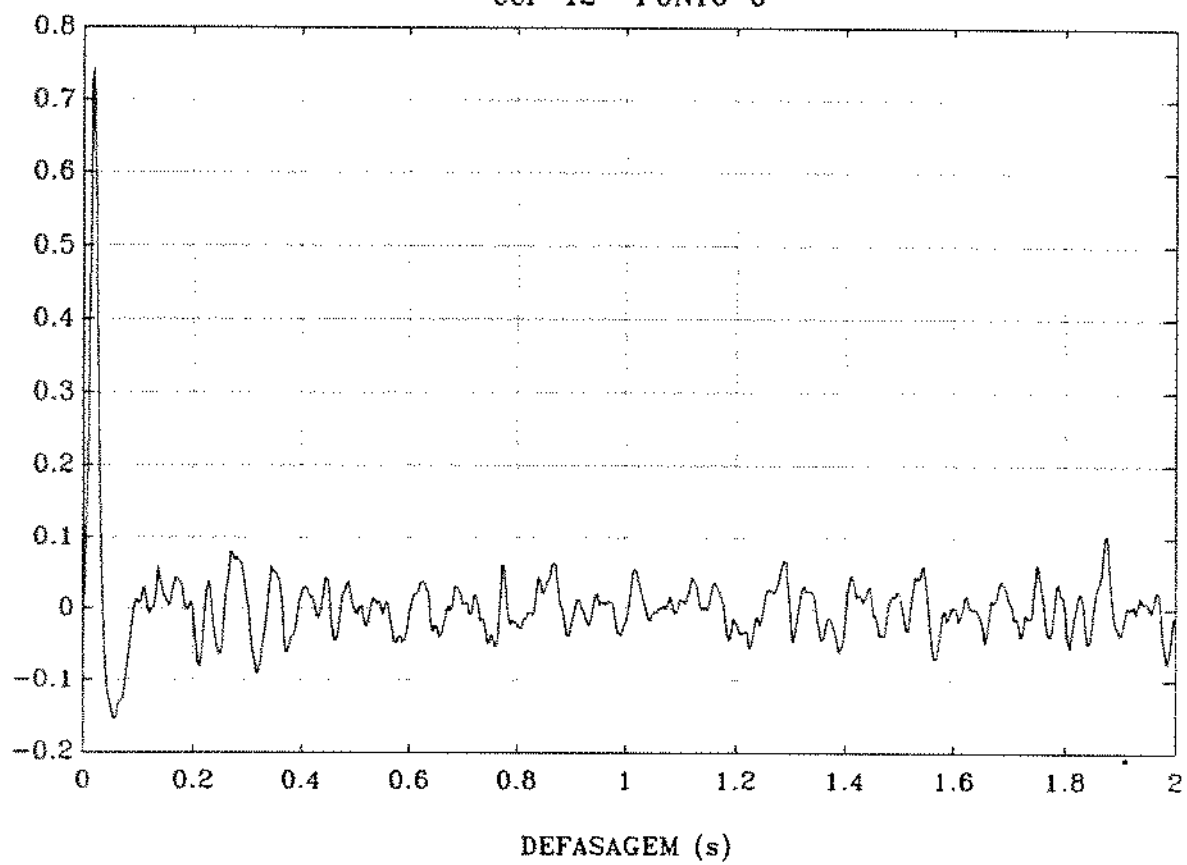
CCF-12 PONTO-4



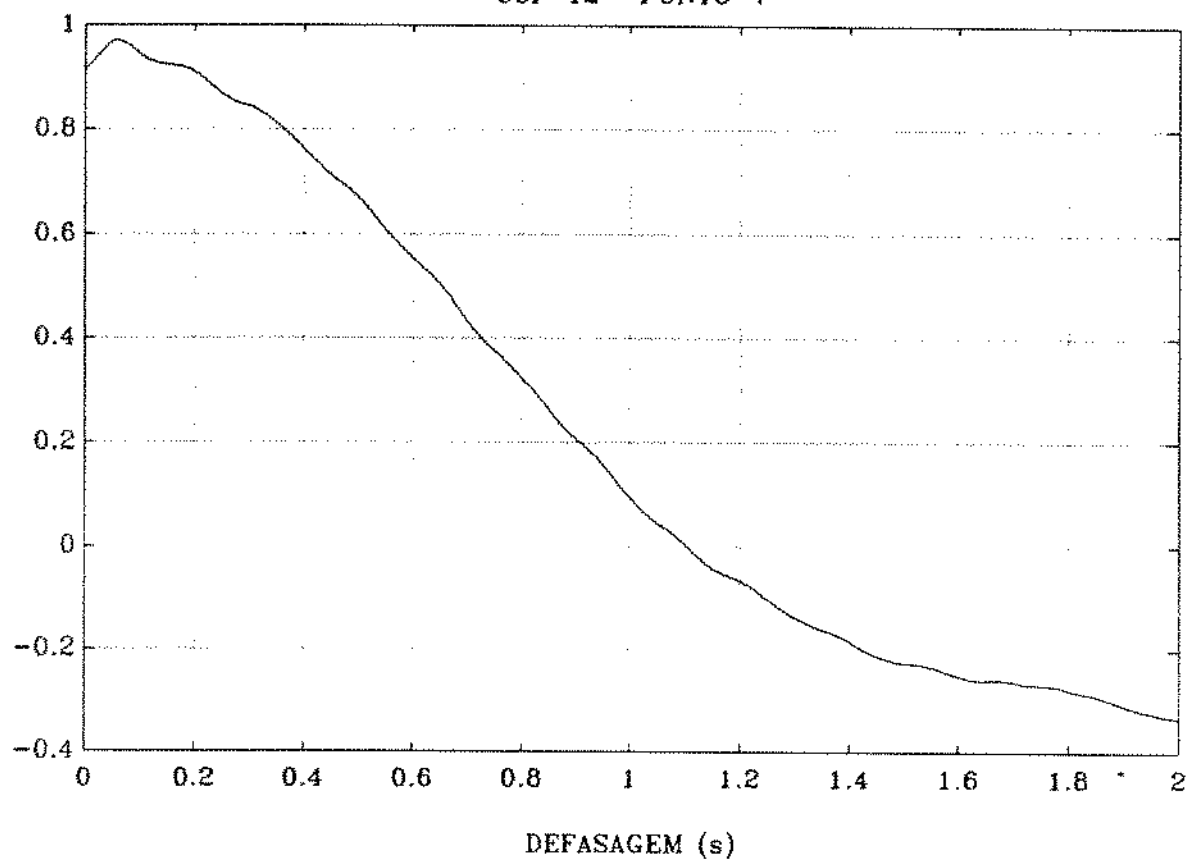
CCF-12 PONTO-5



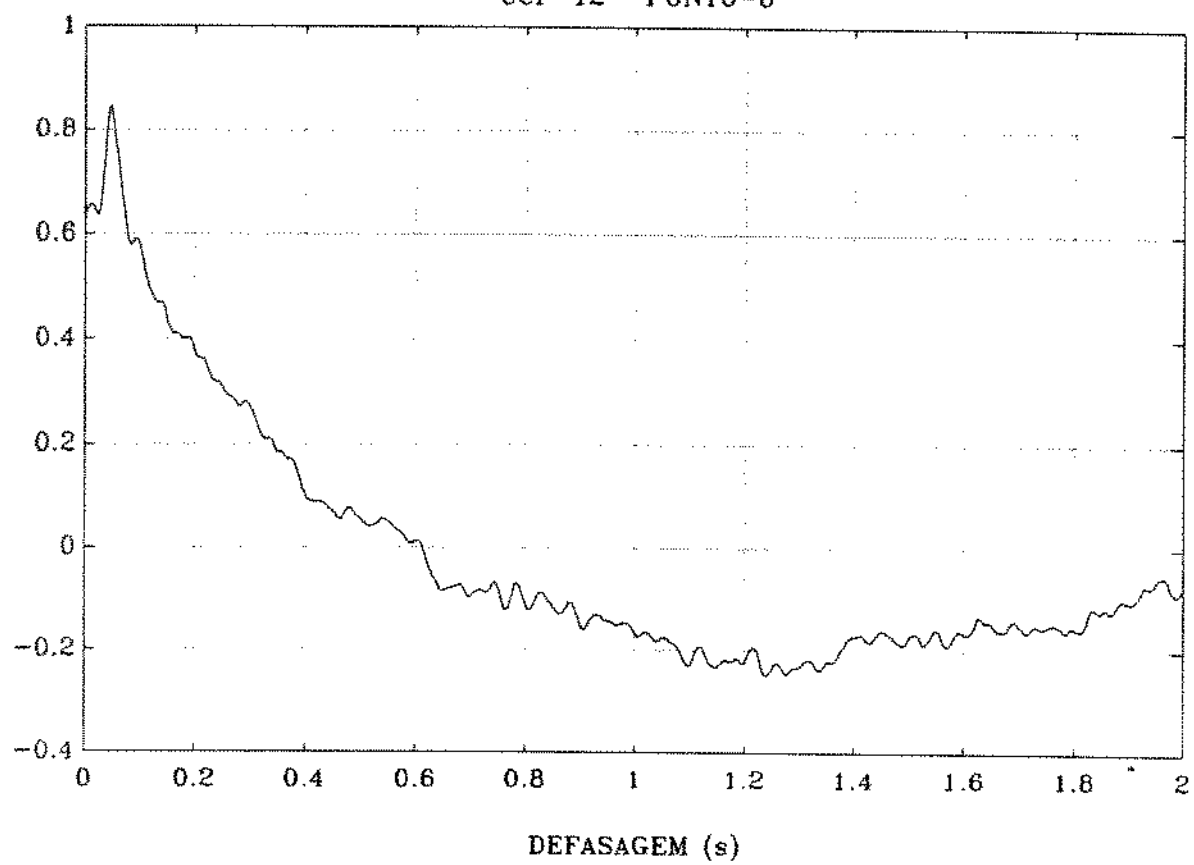
CCF-12 PONTO-6



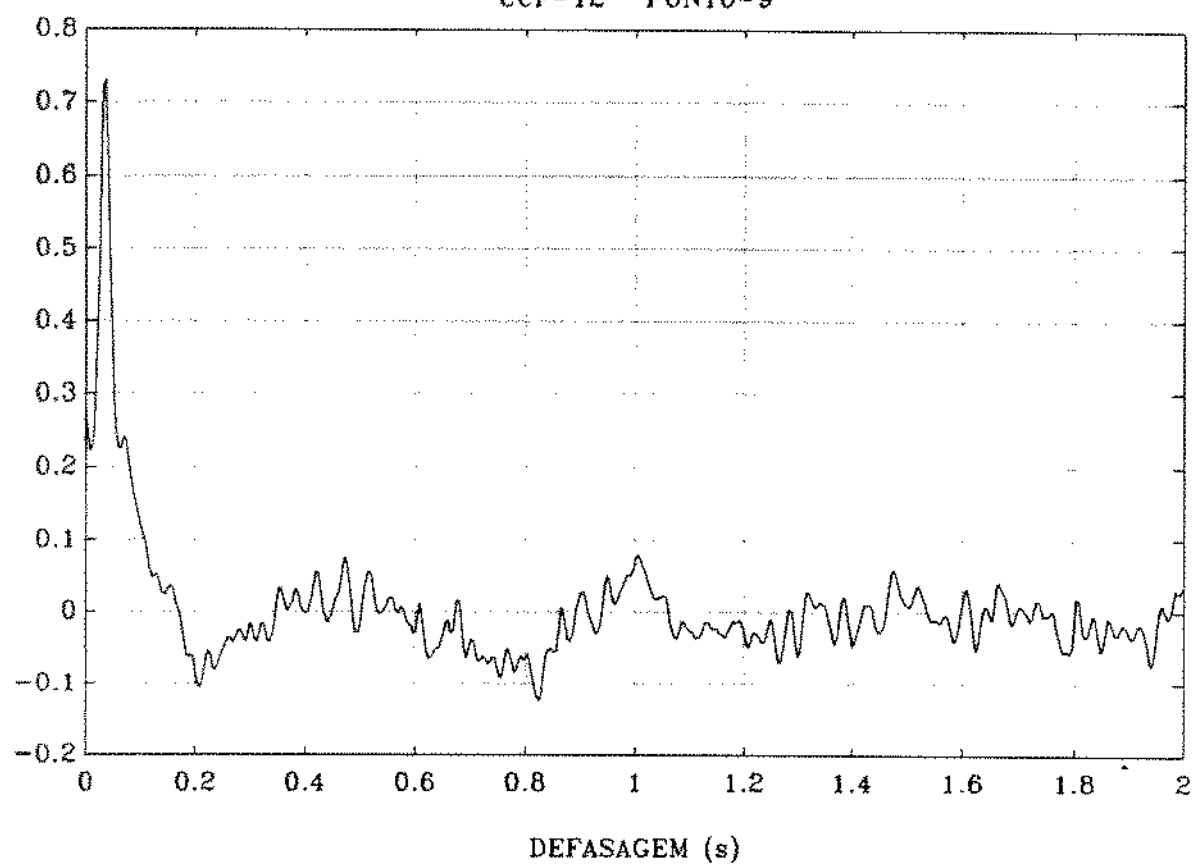
CCF-12 PONTO-7



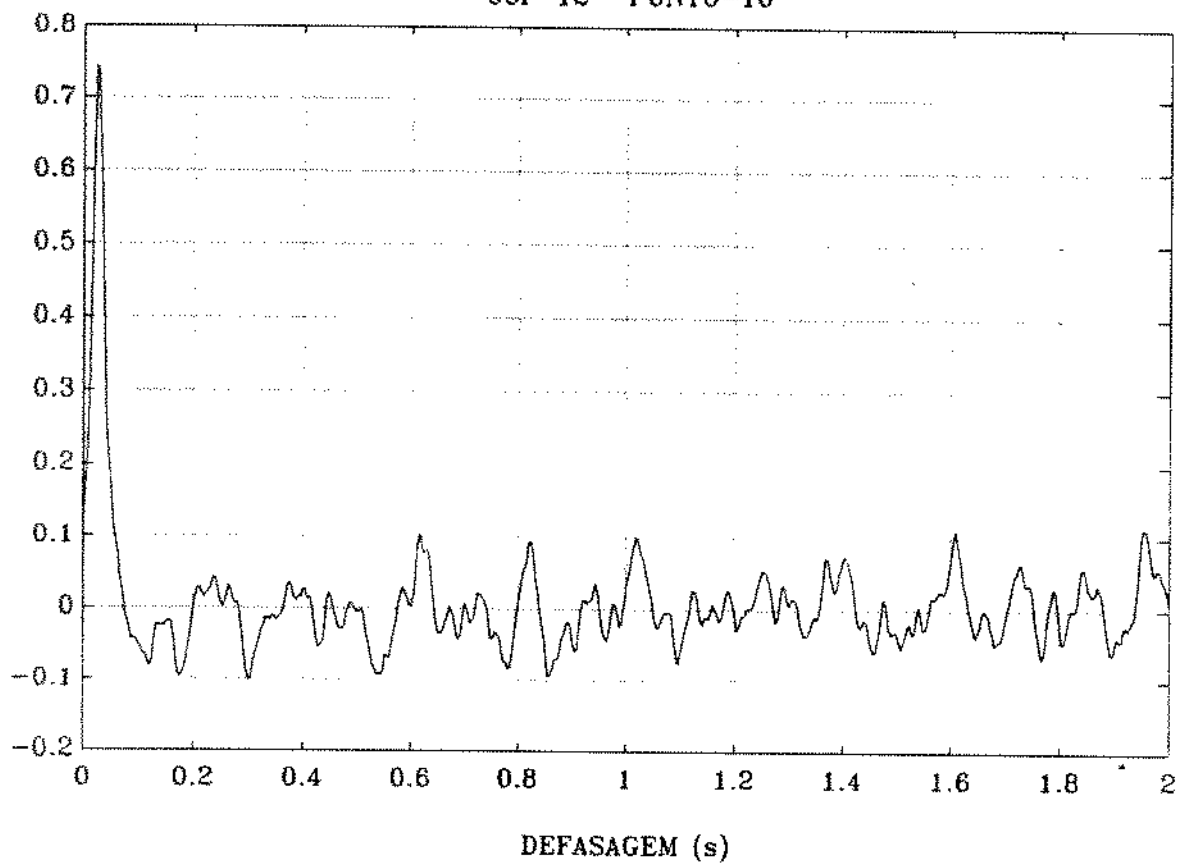
CCF-12 PONTO-8



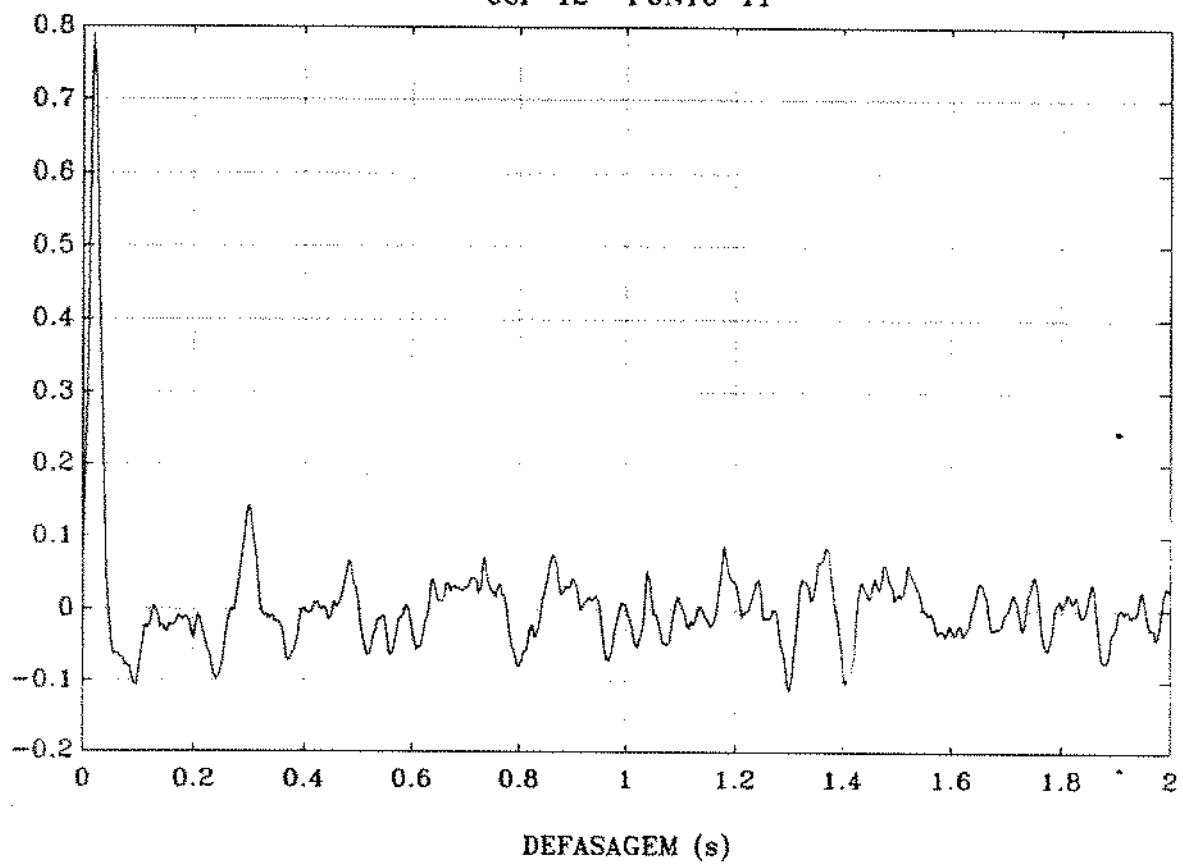
CCF-12 PONTO-9



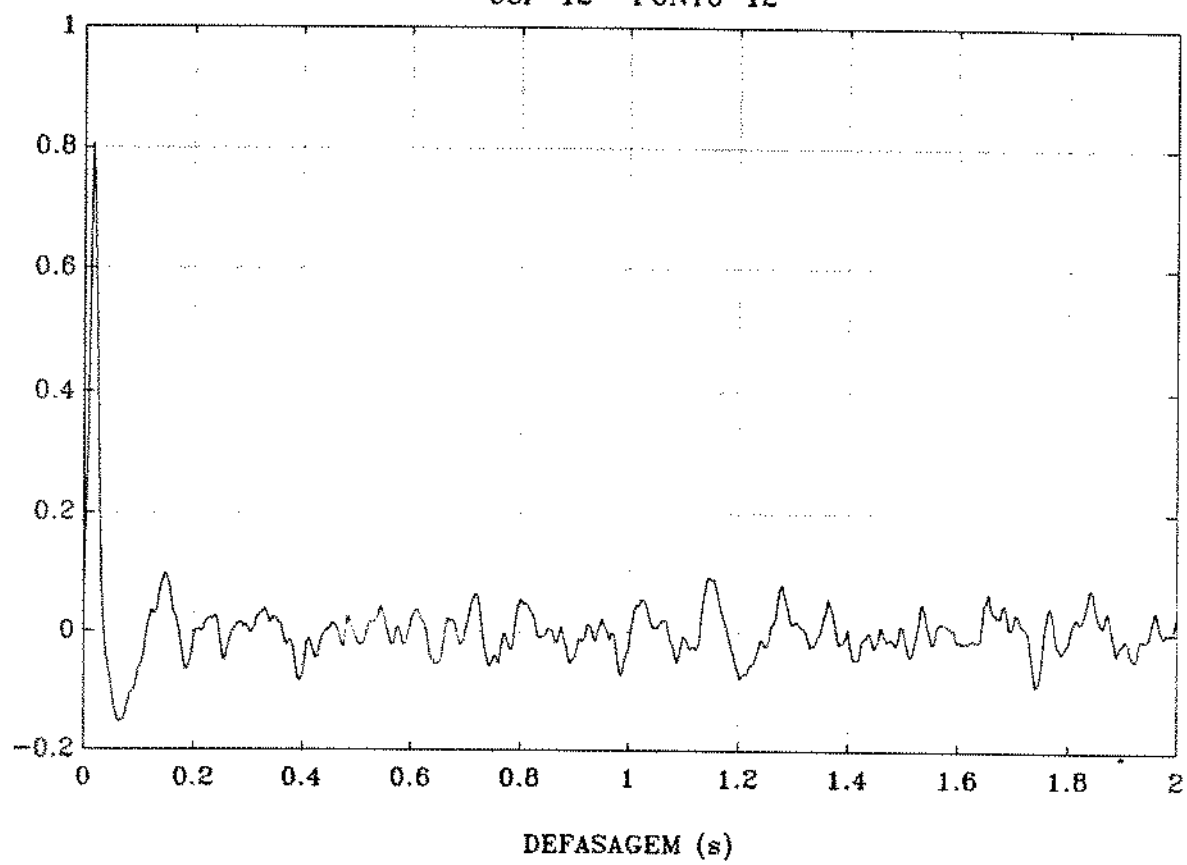
CCF-12 PONTO-10



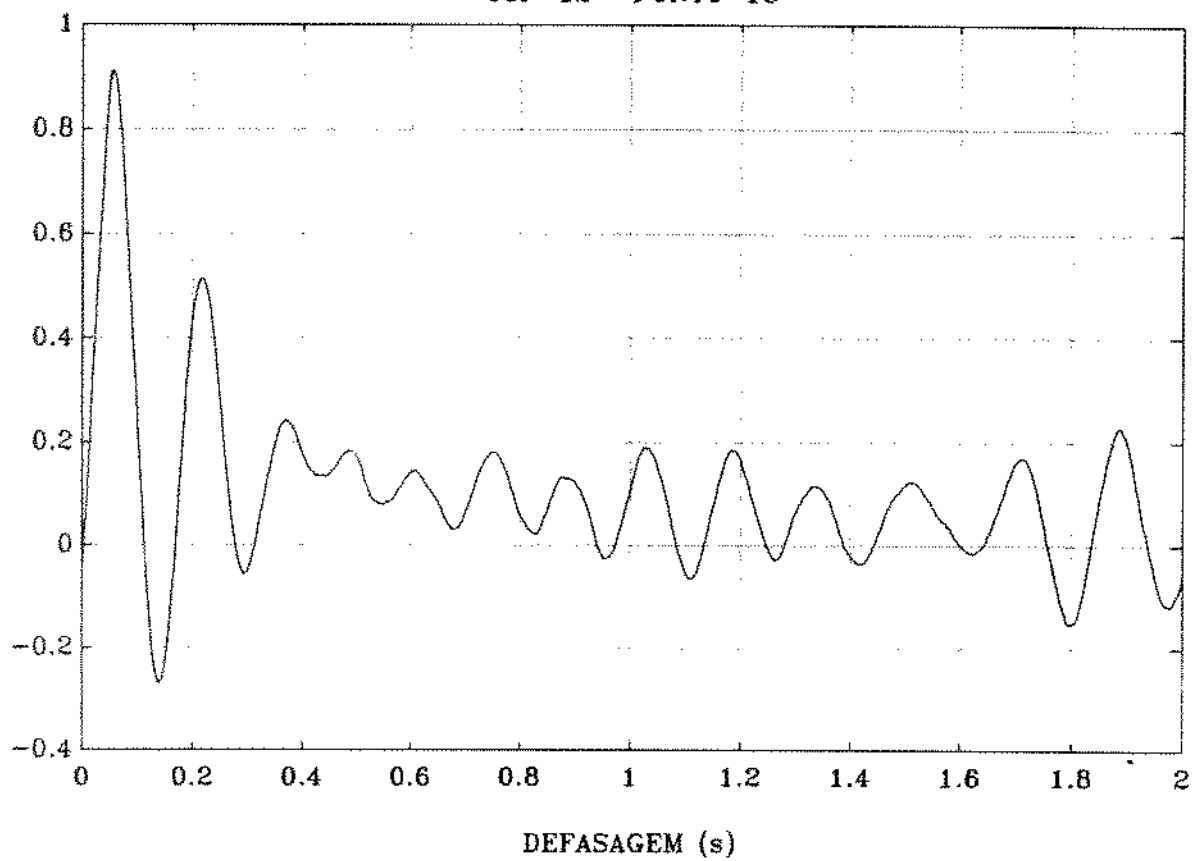
CCF-12 PONTO-11



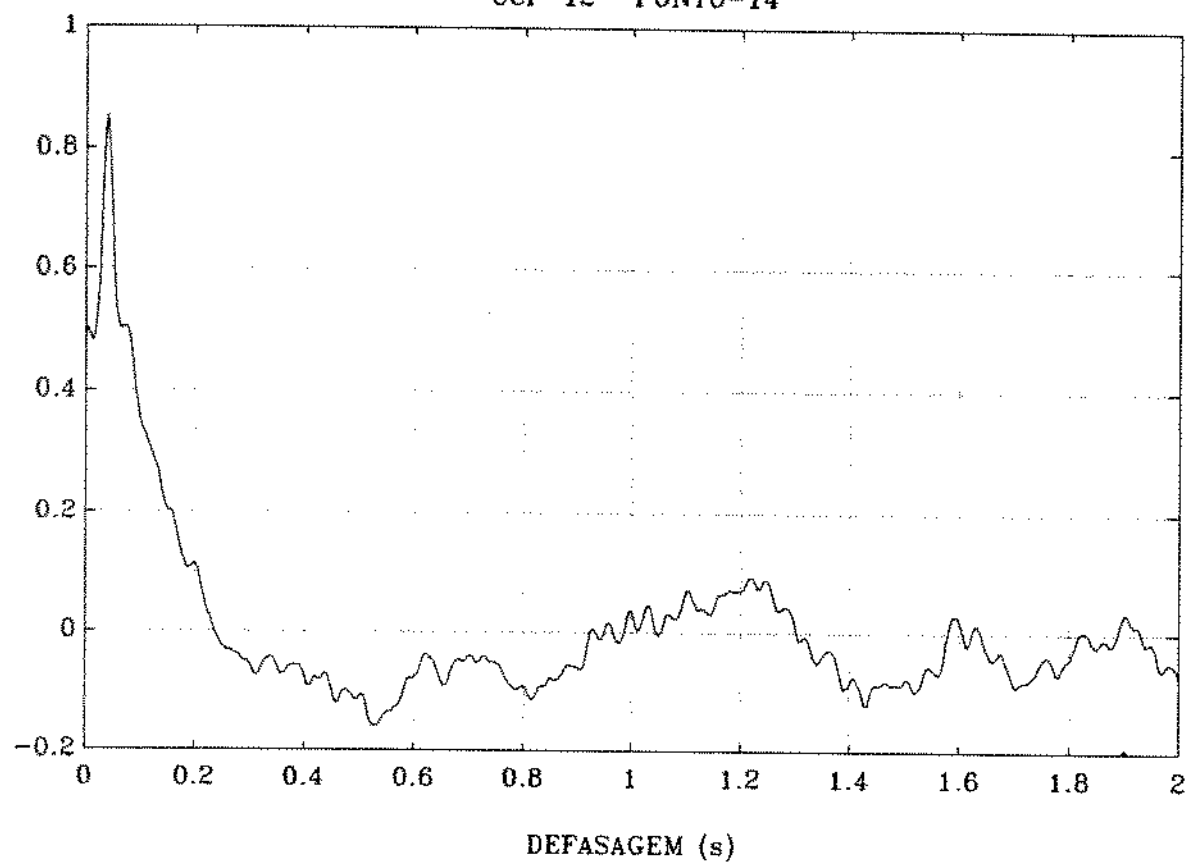
CCF-12 PONT0-12



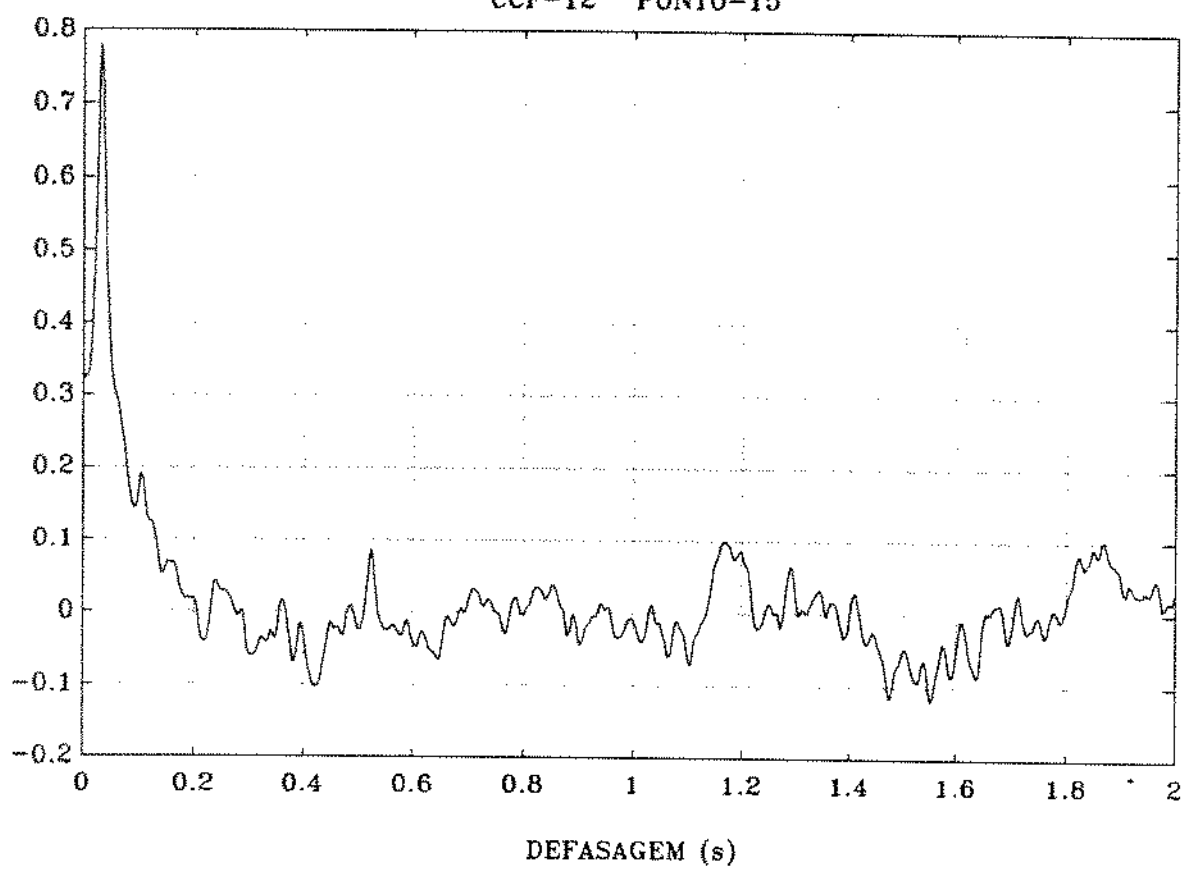
CCF-12 PONTO-13



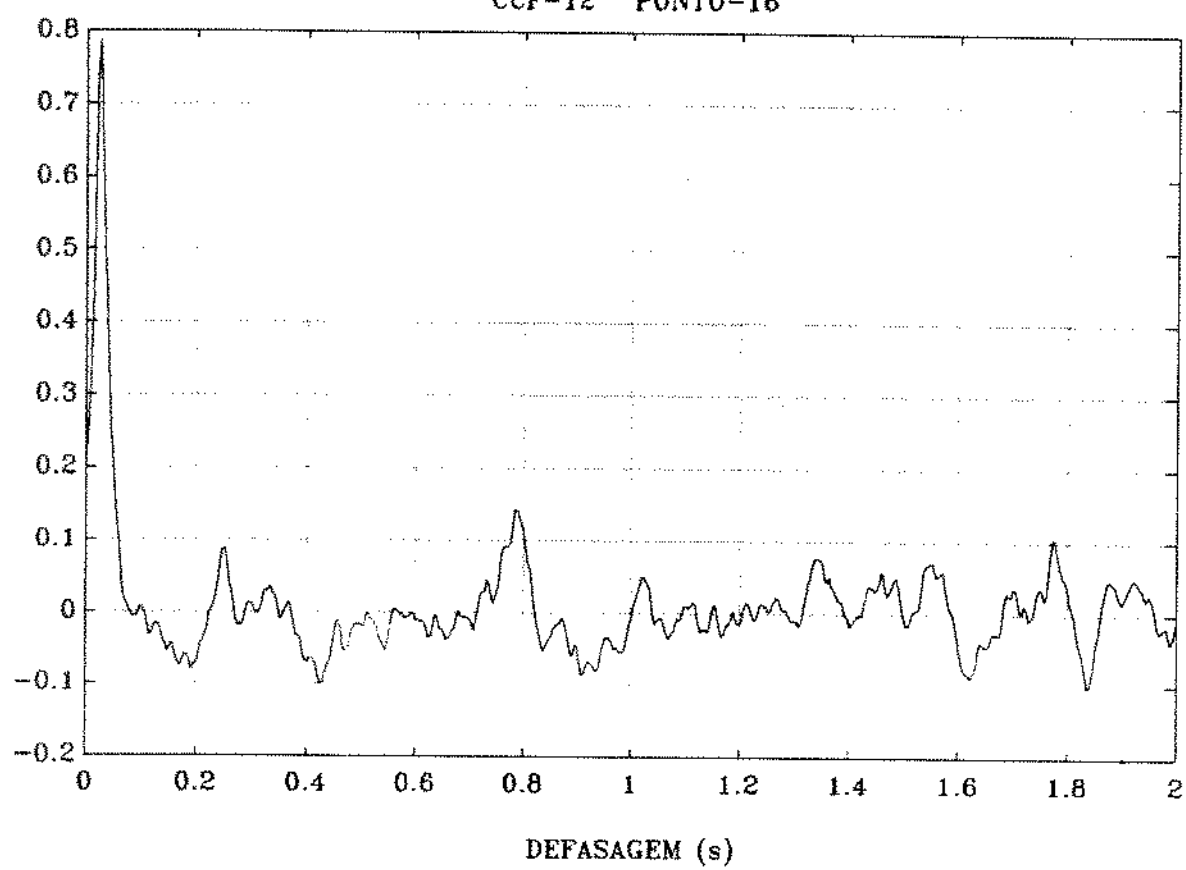
CCF-12 PONT0-14



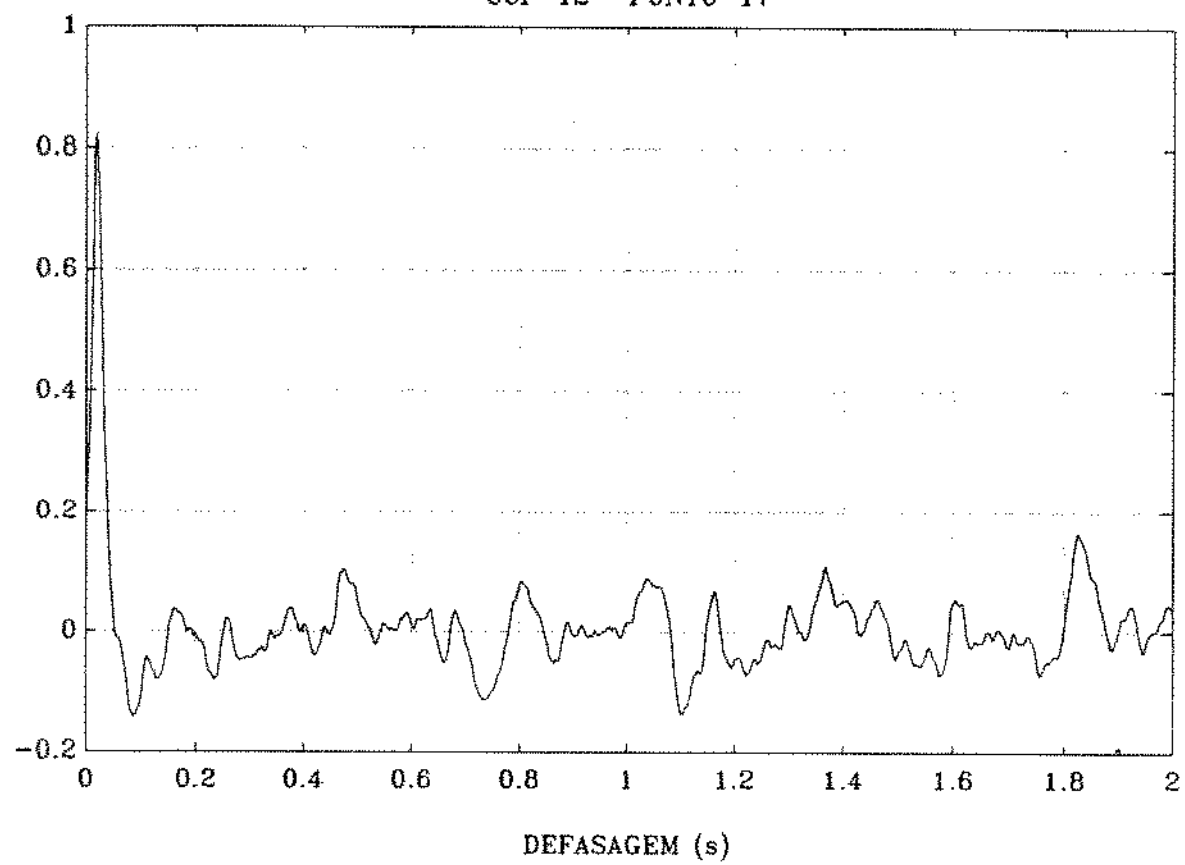
CCF-12 PONT0-15



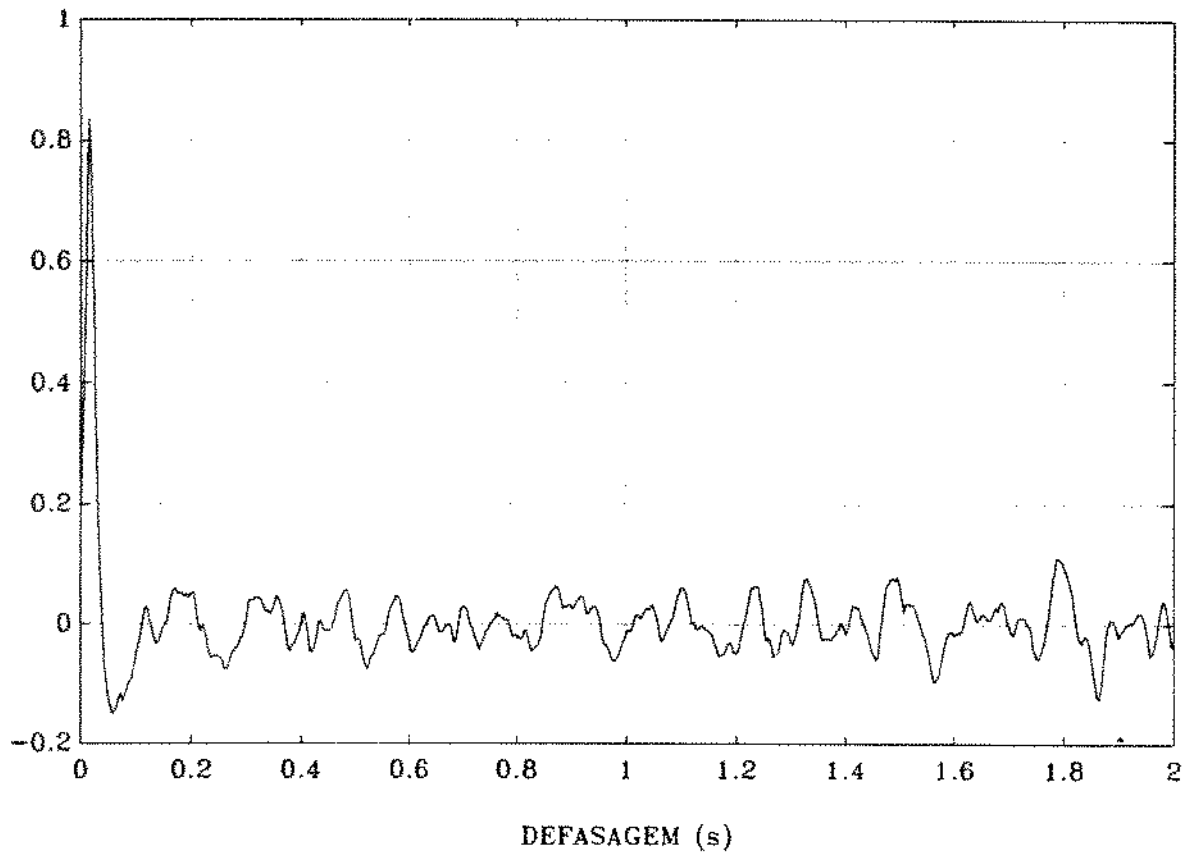
CCF-12 PONT0-16



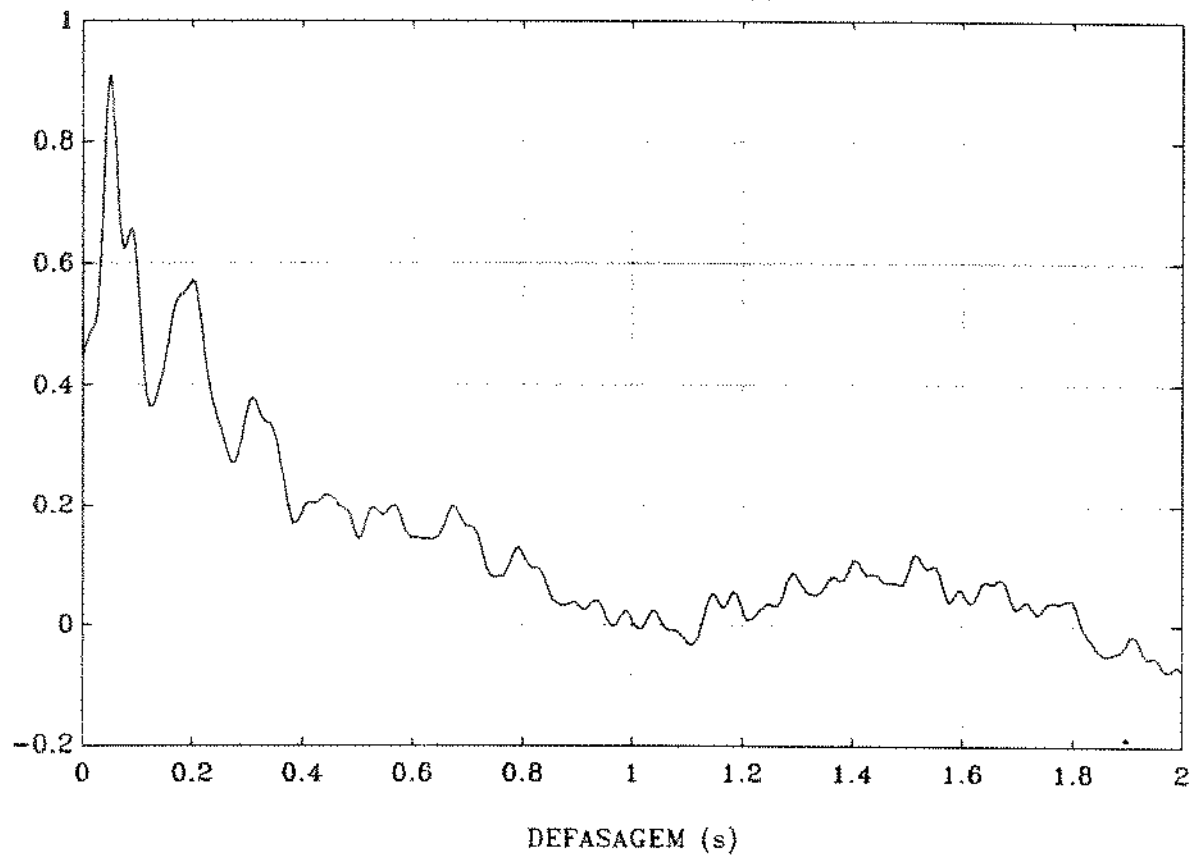
CCF-12 PONTO-17



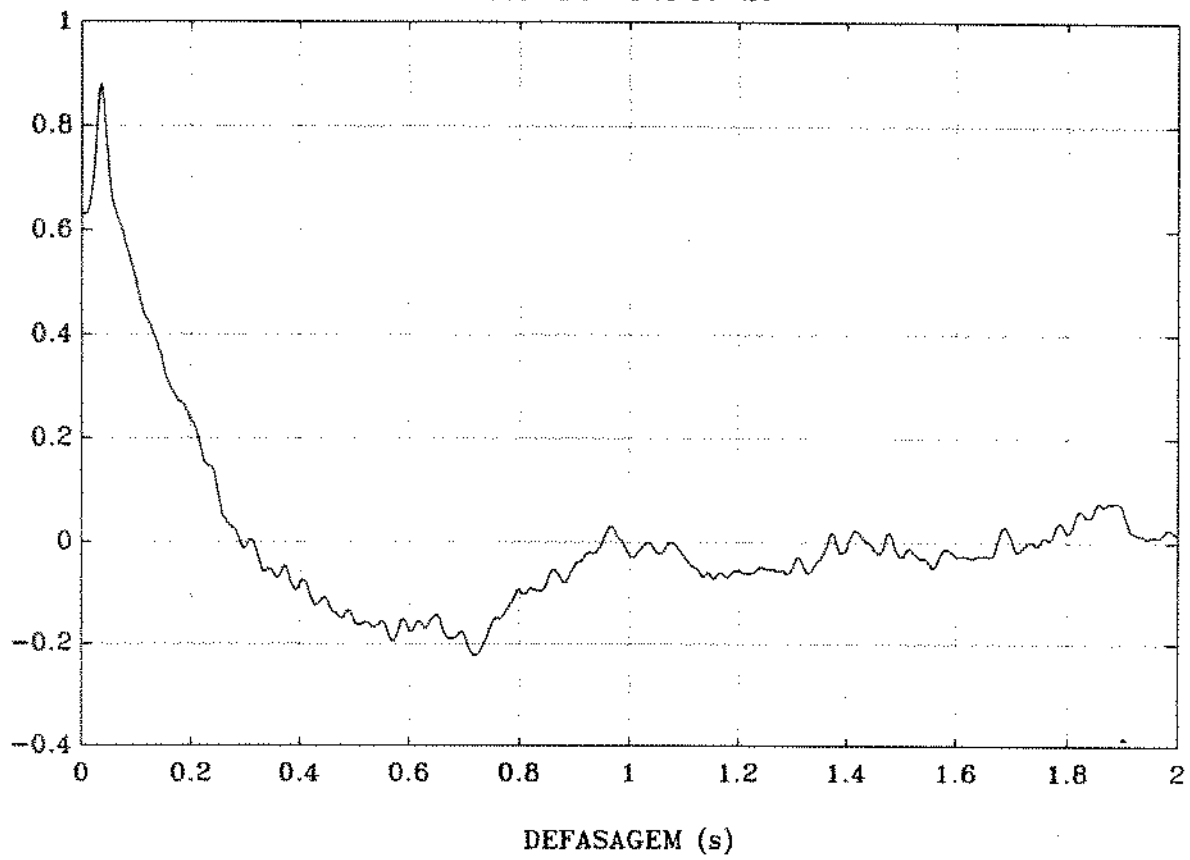
CCF-12 PONTO-18



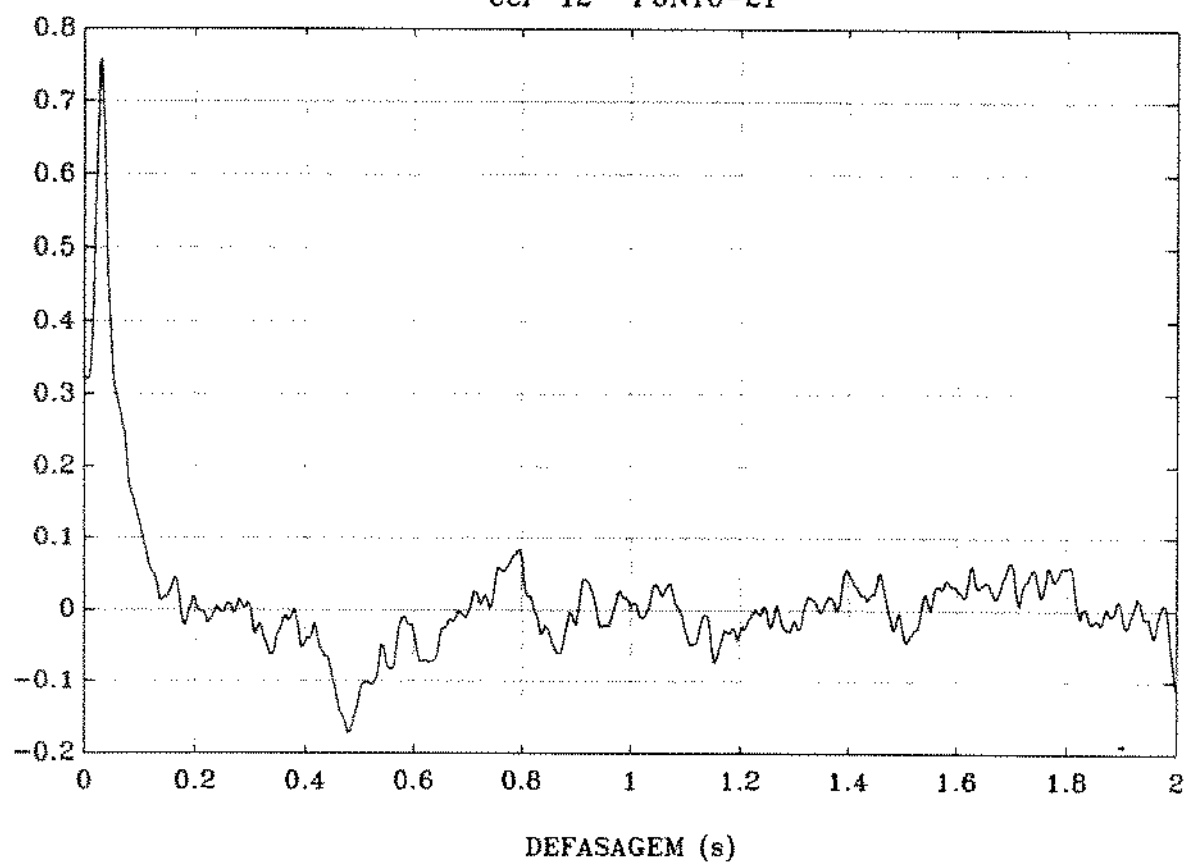
CCF-12 PONTO-19



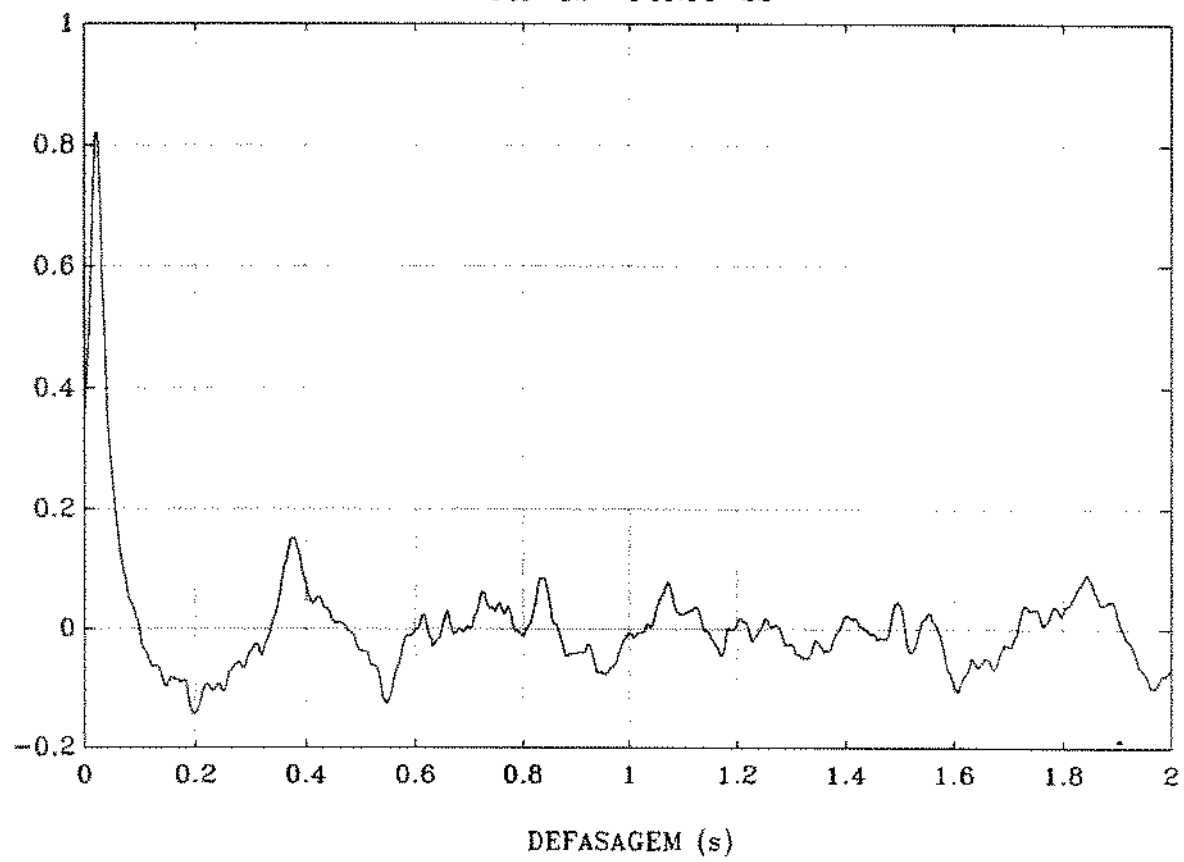
CCF-12 PONT0-20



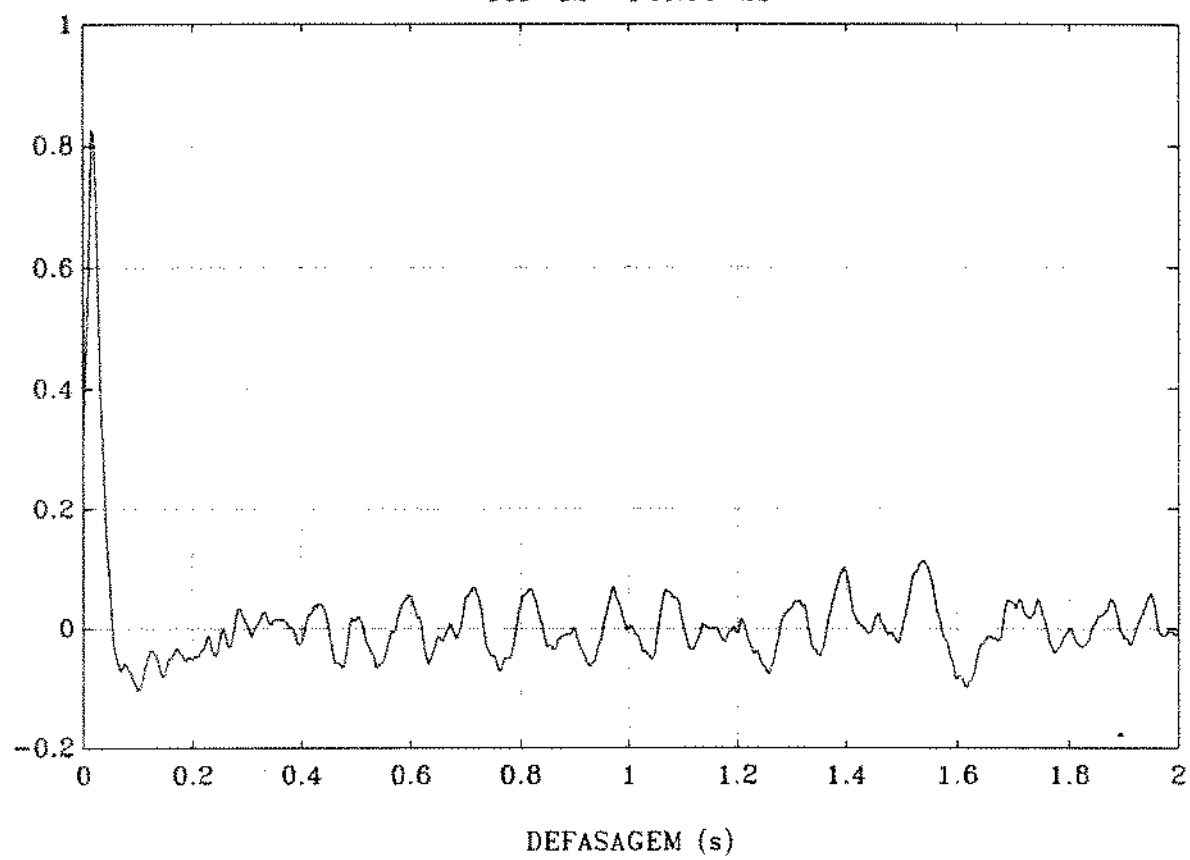
CCF-12 PONT0-21



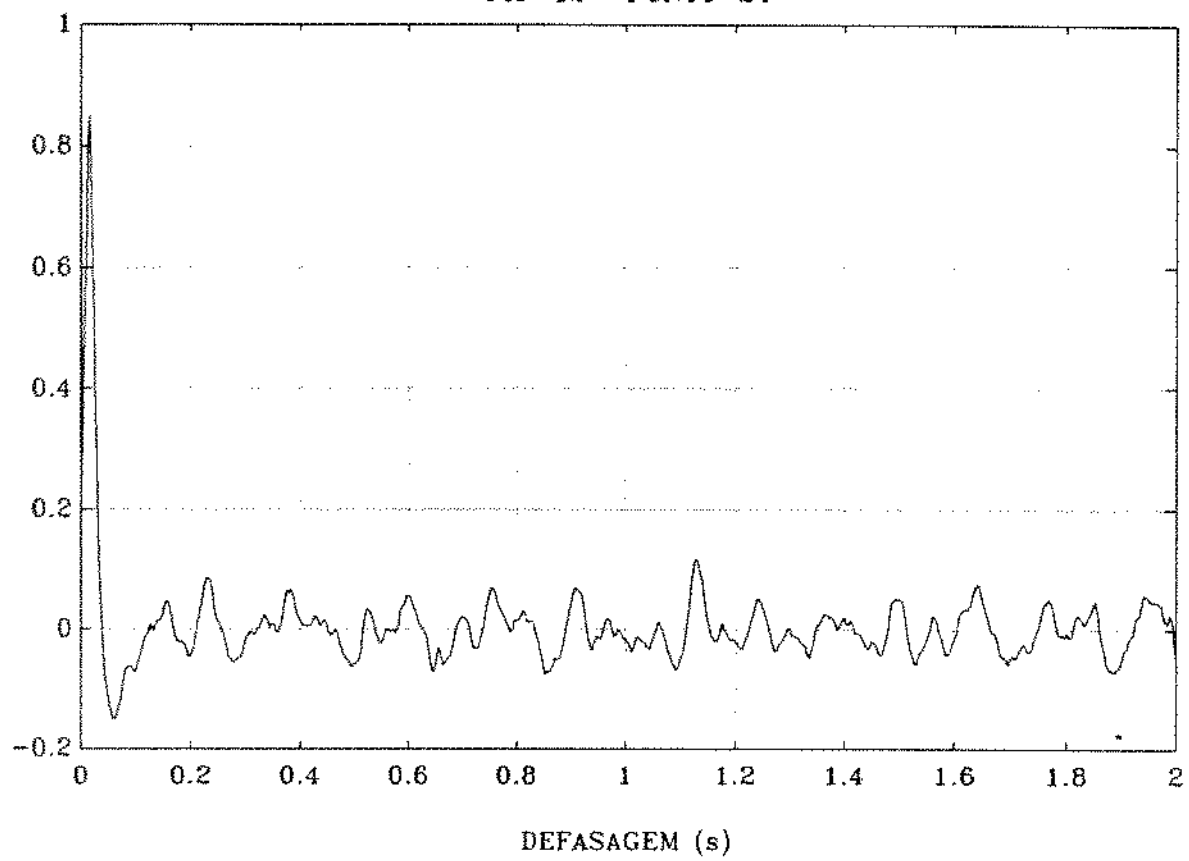
CCF-12 PONTO-22



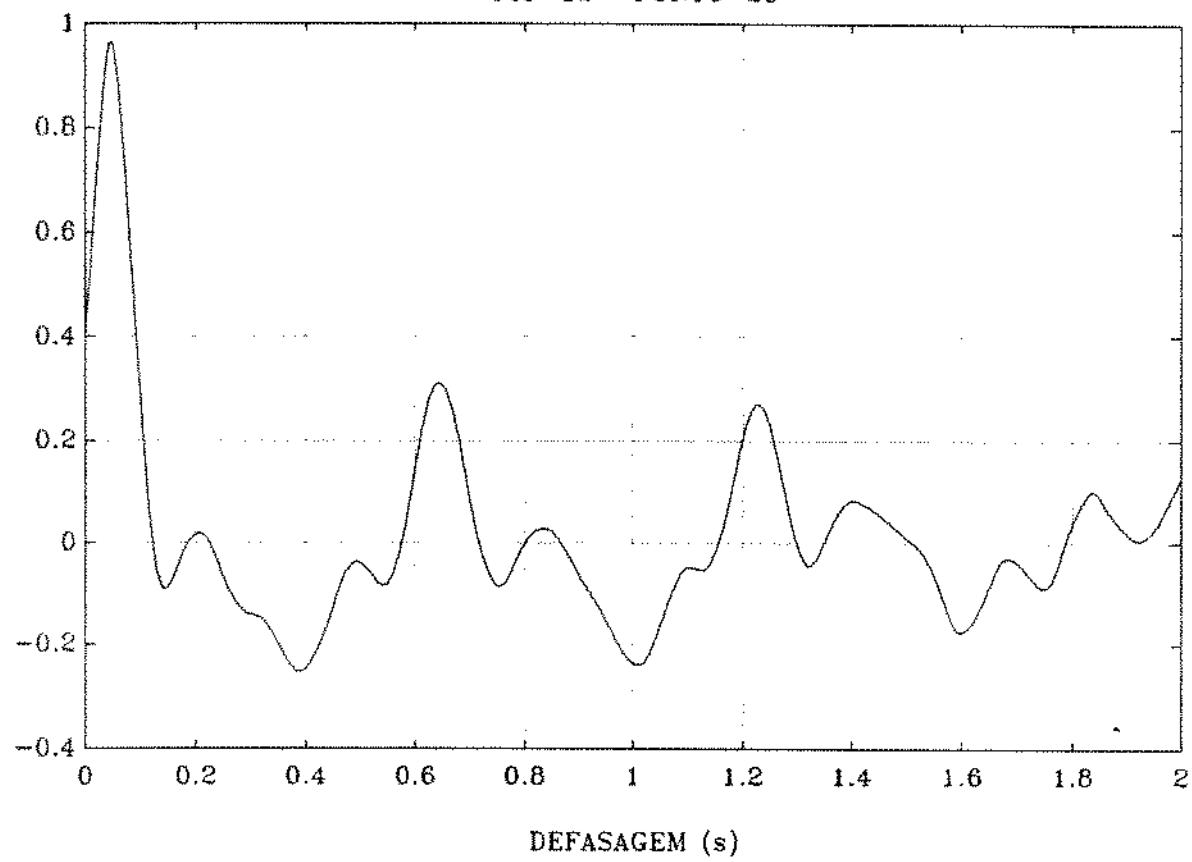
CCF-12 PONTO-23



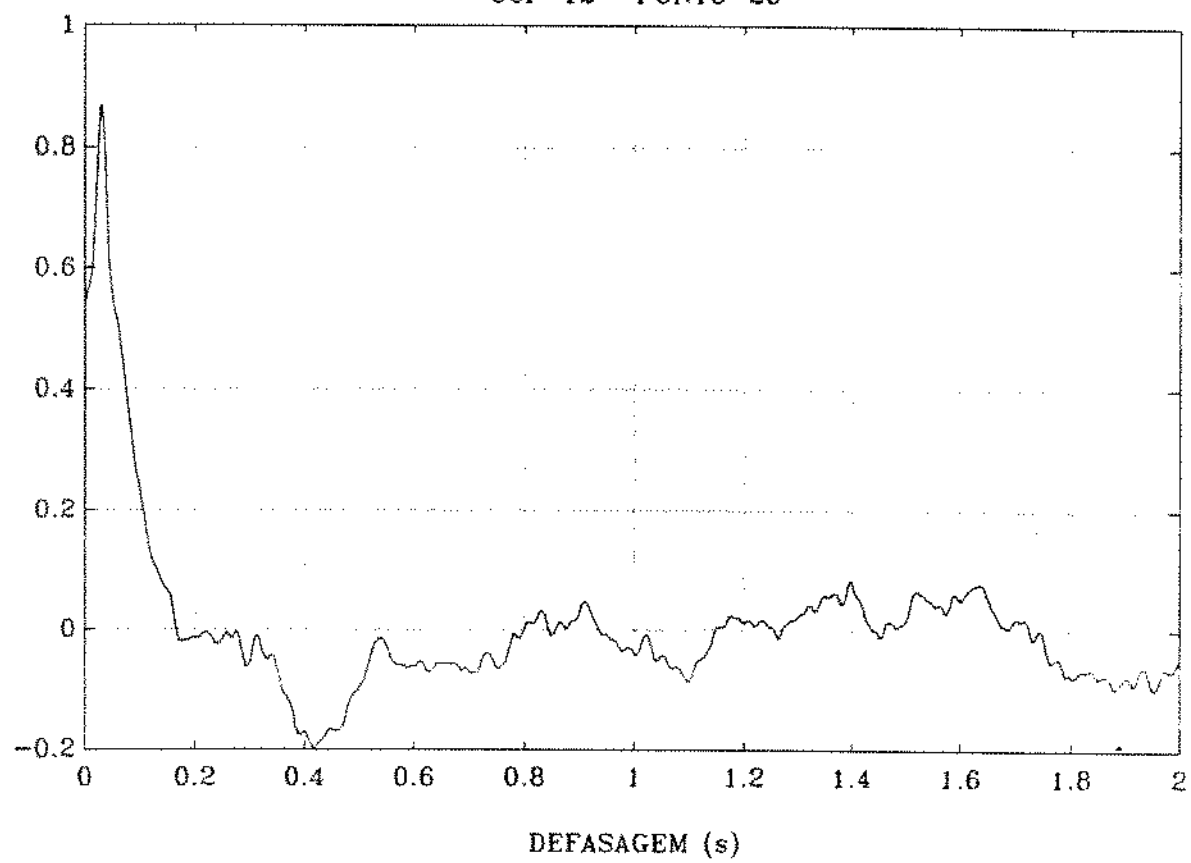
CCF-12 PONTO-24



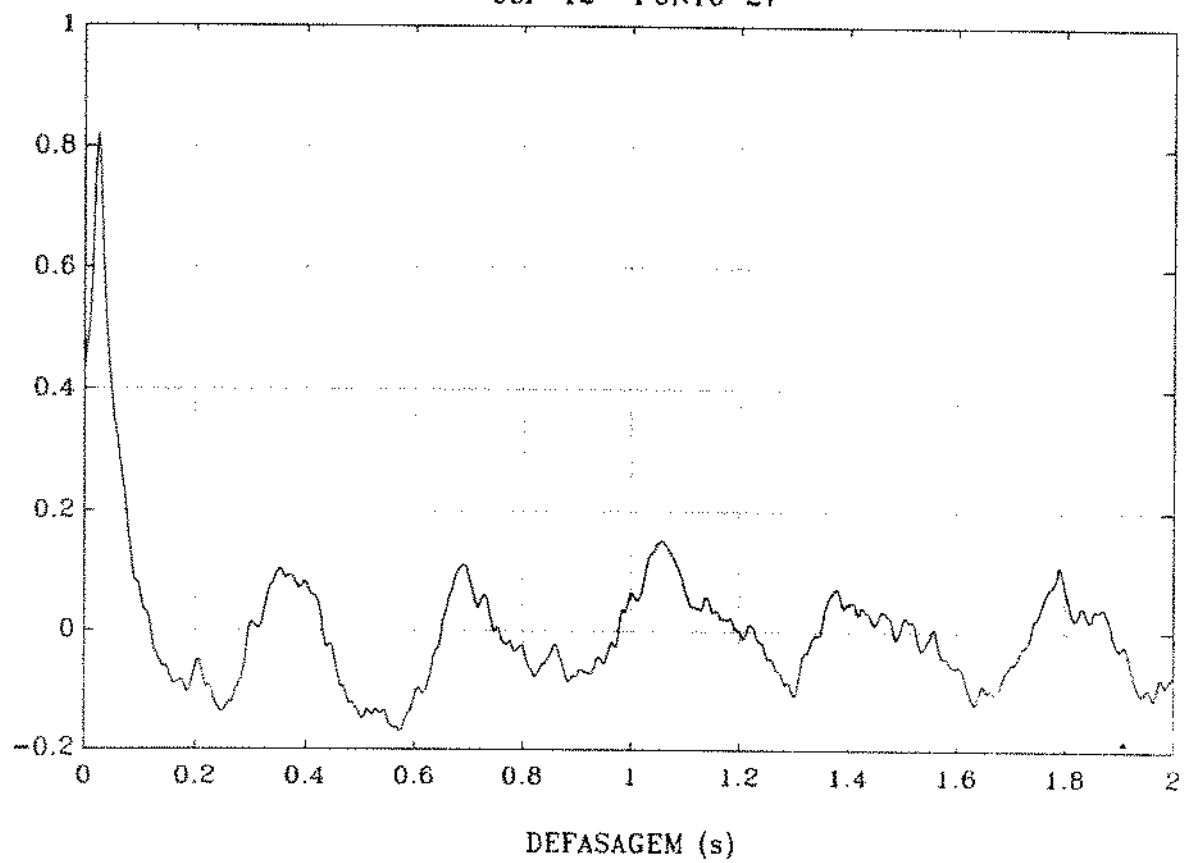
CCF-12 PONT0-25



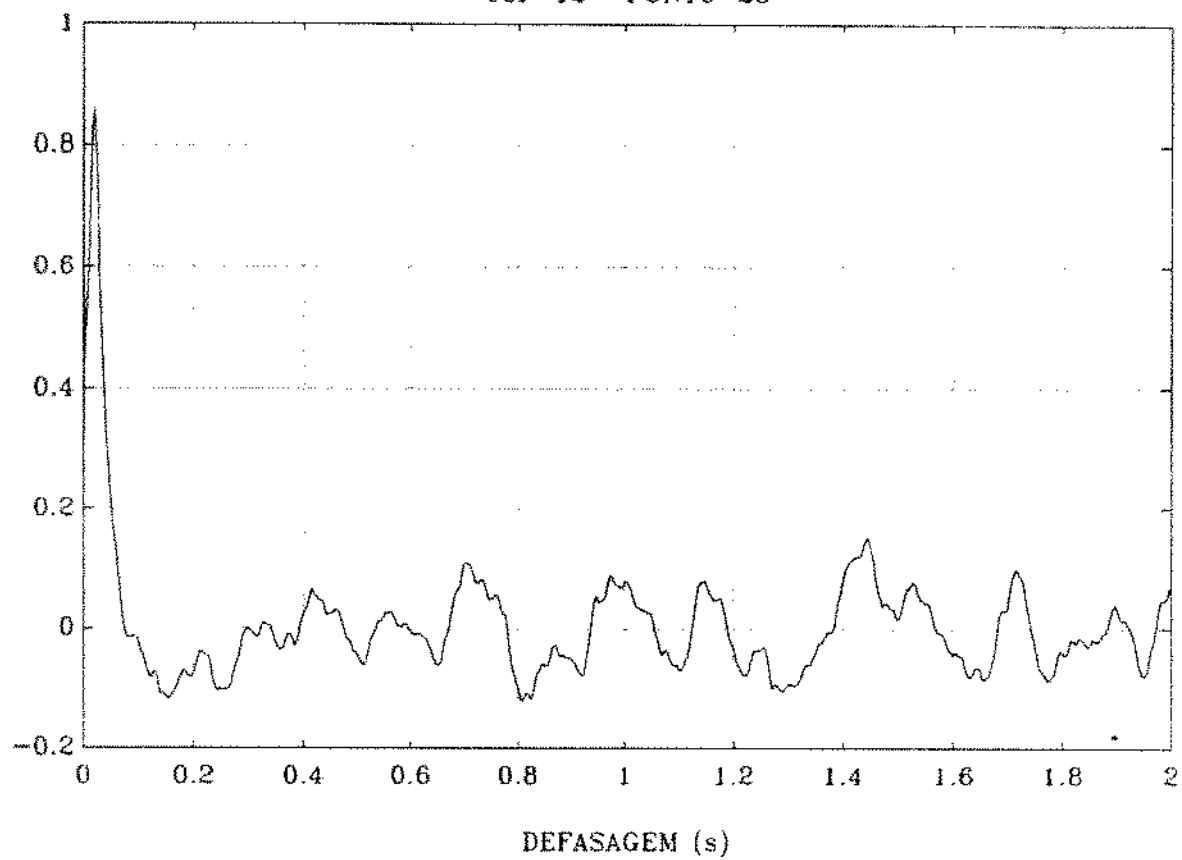
CCF-12 PONT0-26



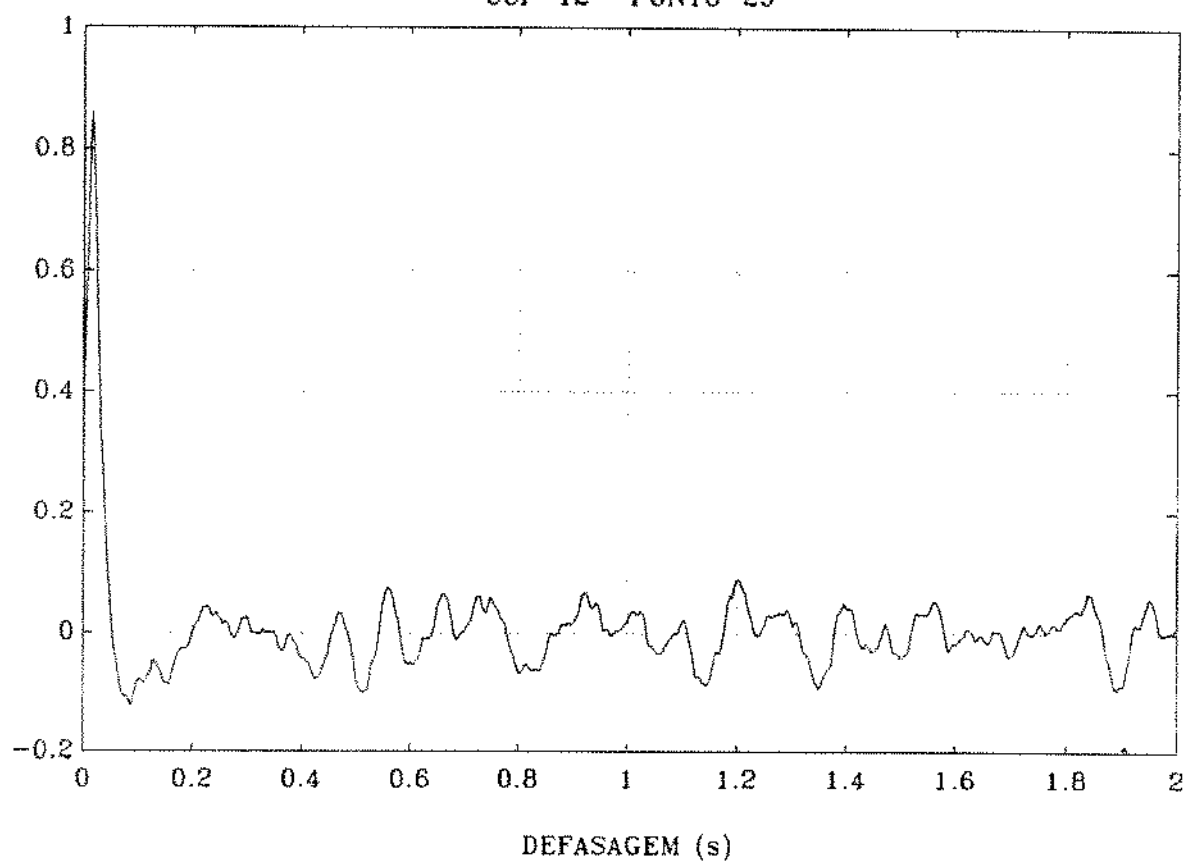
CCF-12 PONTO-27



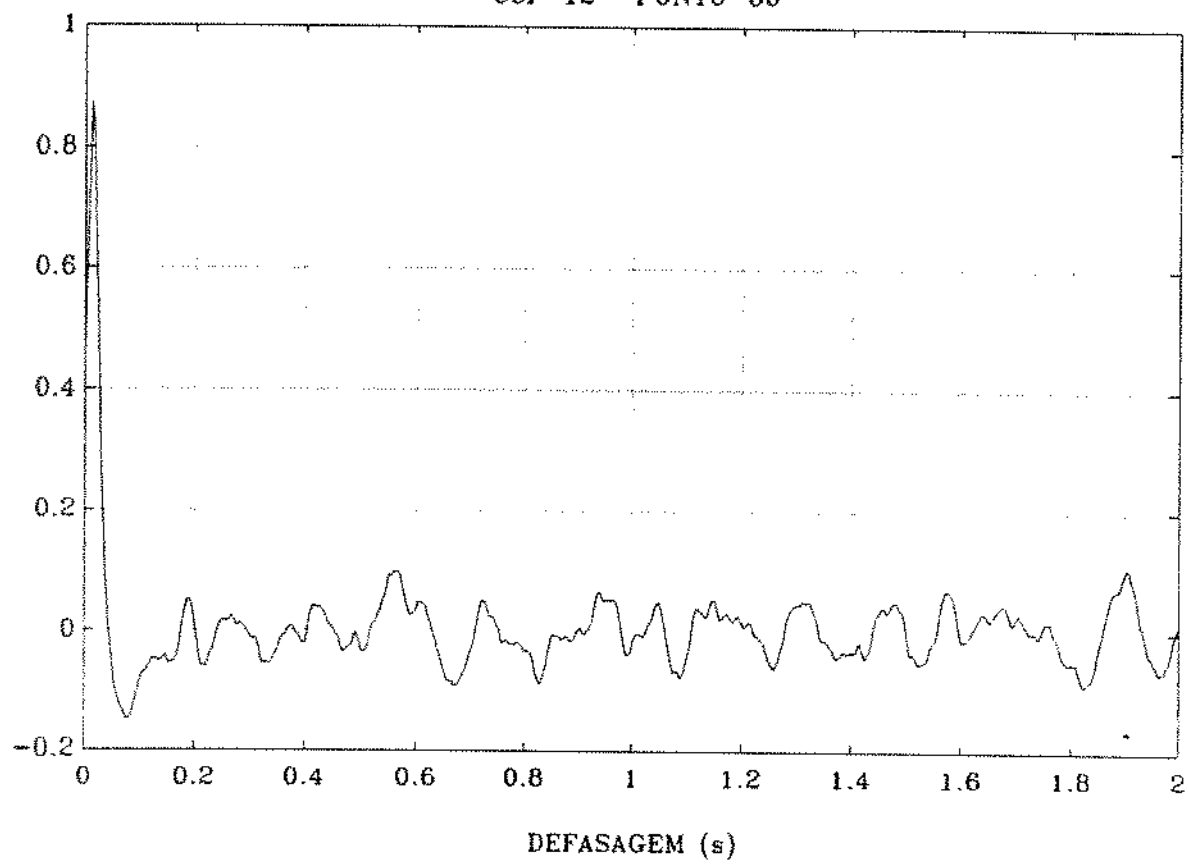
CCF-12 PONTO-28



CCF-12 PONTO-29



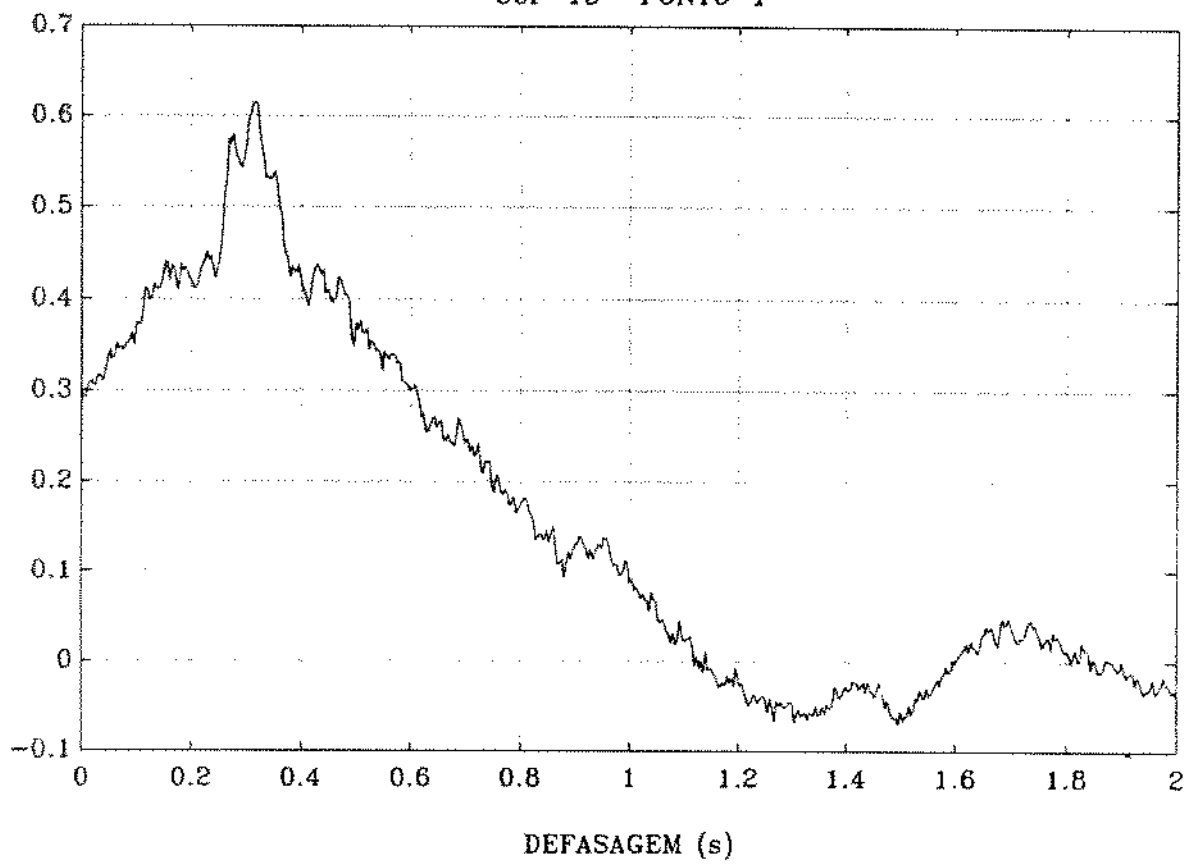
CCF-12 PONT0-30



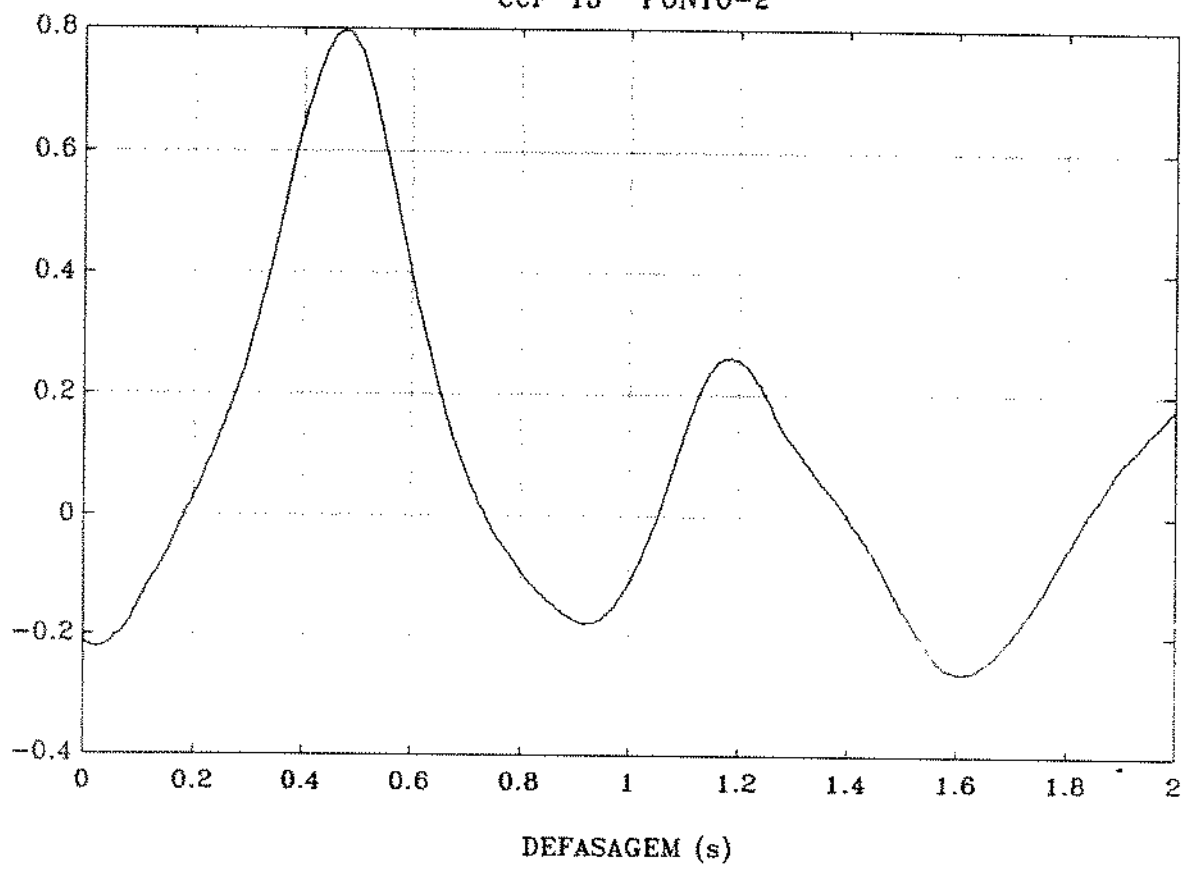
VI.8 - FUNÇÃO DE CORRELAÇÃO CRUZADA NORMALIZADA

(SONDAS 1 E 3)

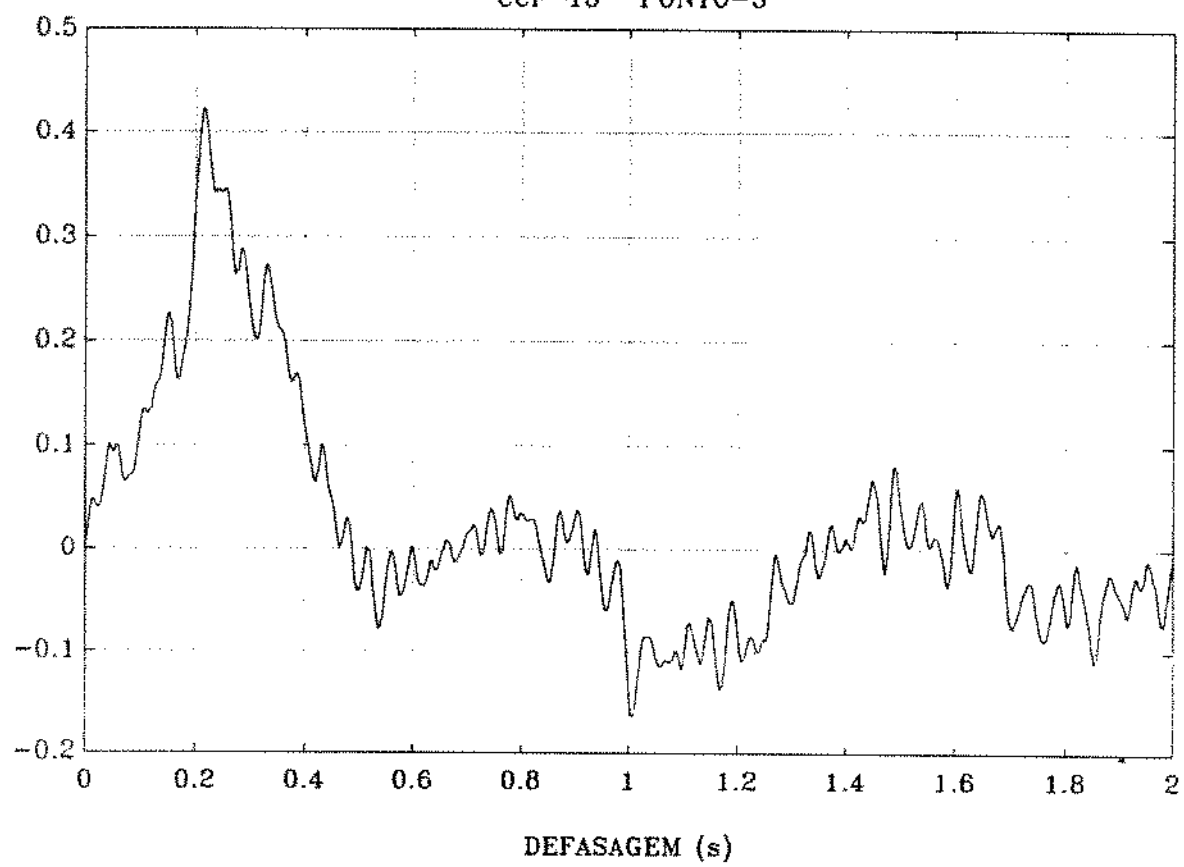
CCF-13 PONT0-1



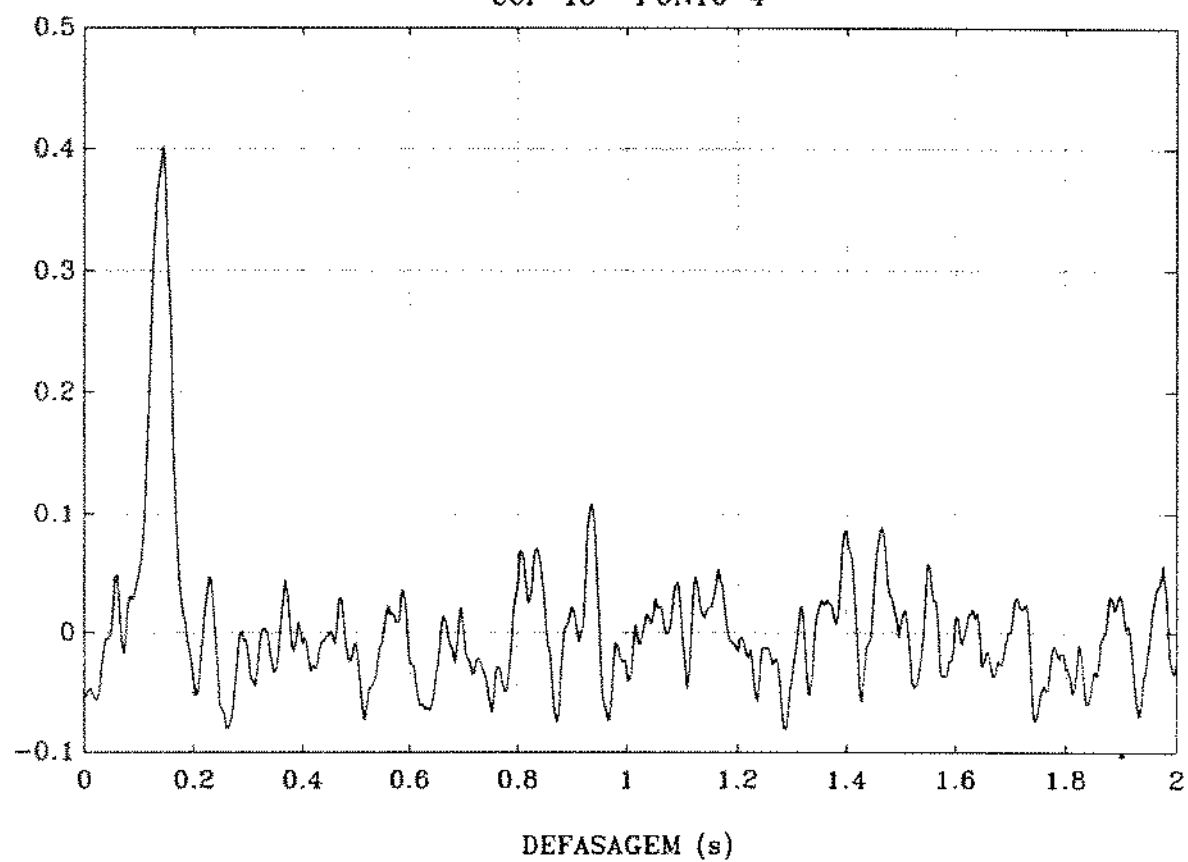
CCF-13 PONTO-2



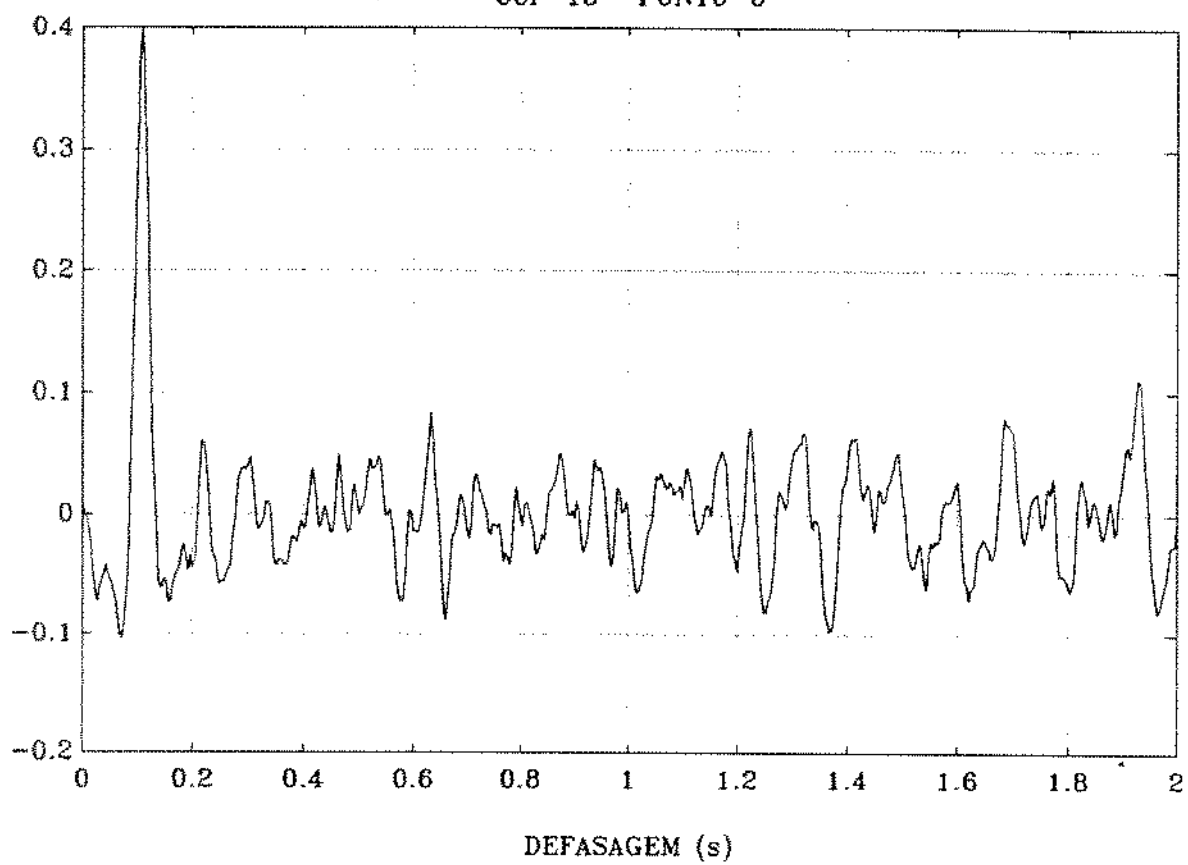
CCF-13 PONTO-3



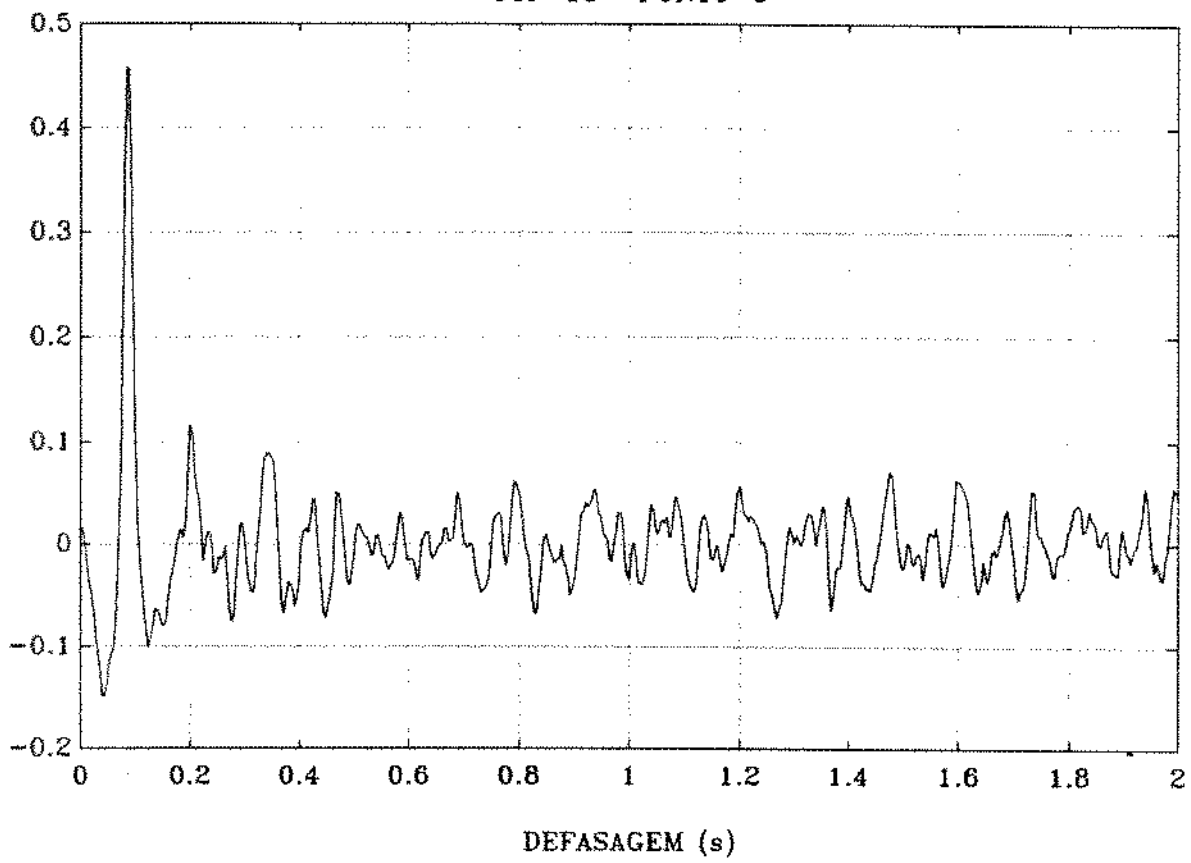
CCF-13 PONT0-4



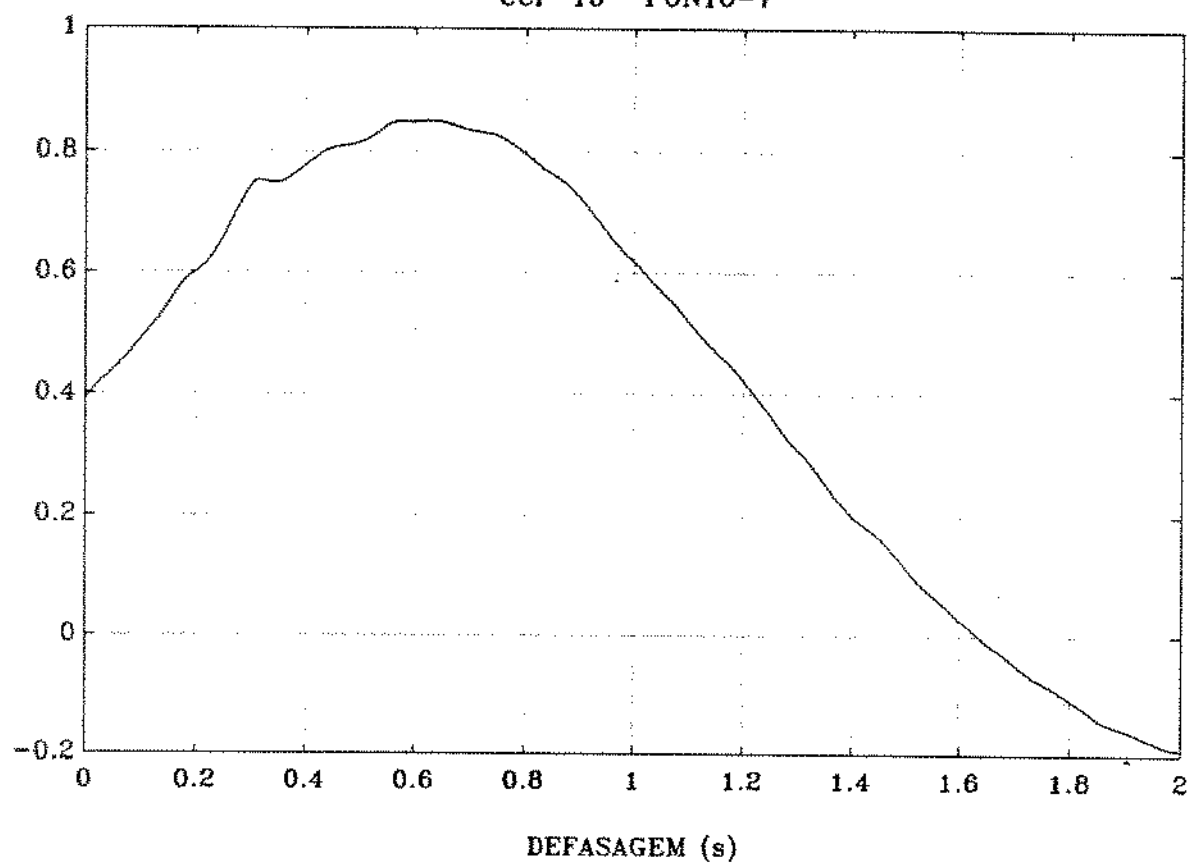
CCF-13 PONT0-5



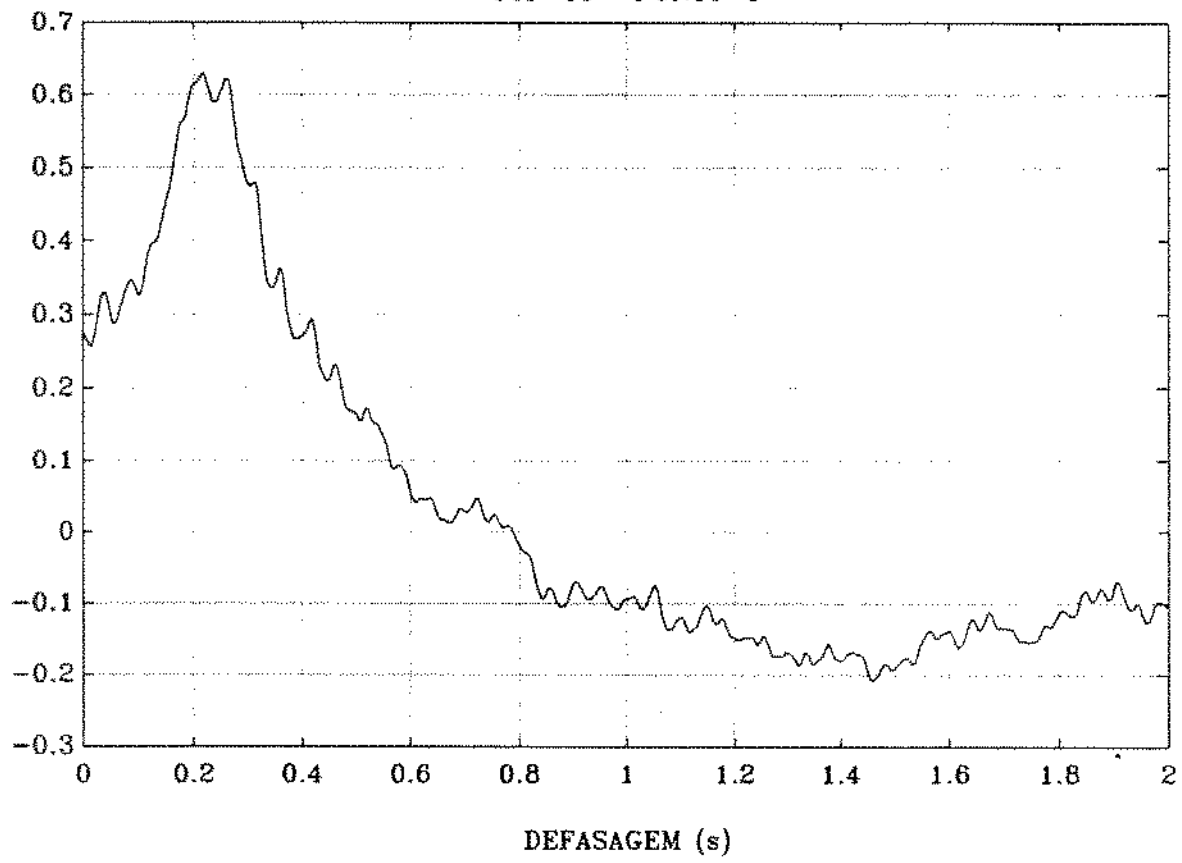
CCF-13 PONT0-6



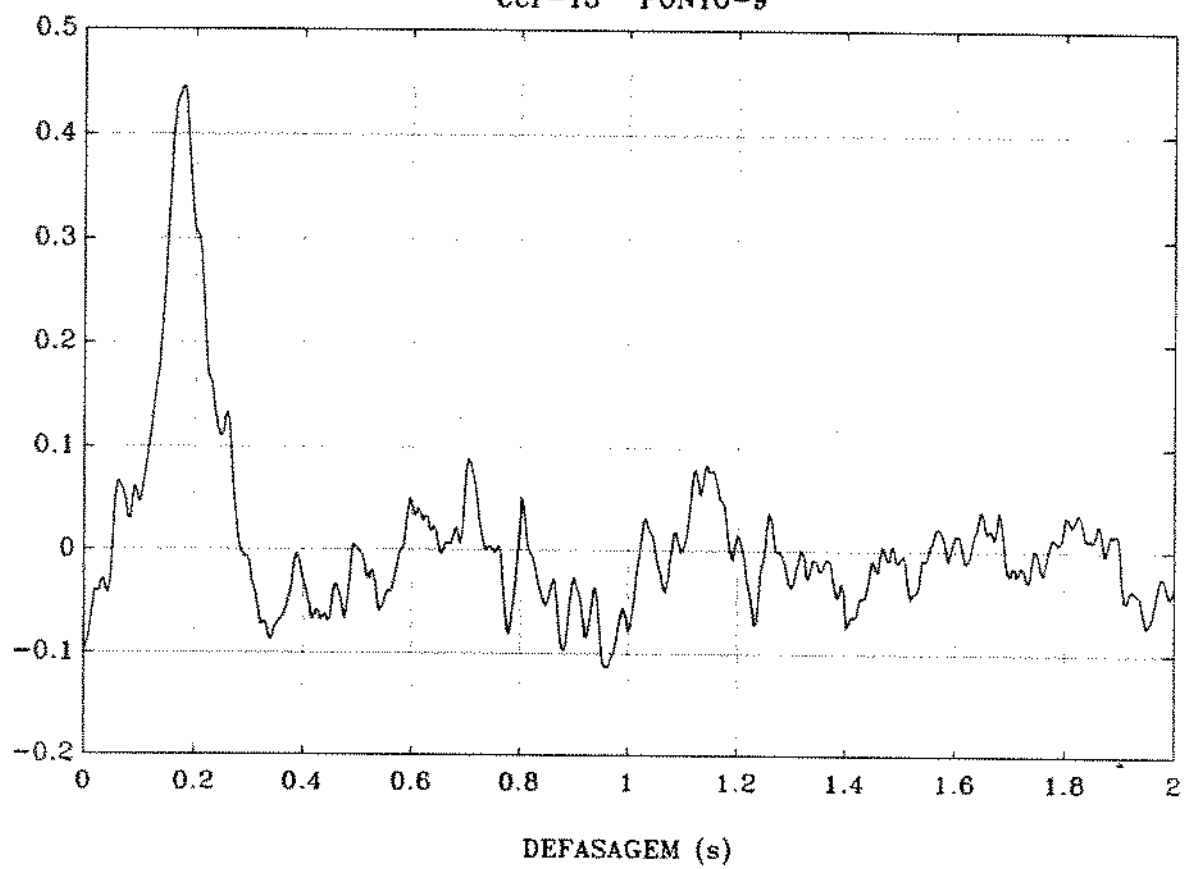
CCF-13 PONTO-7



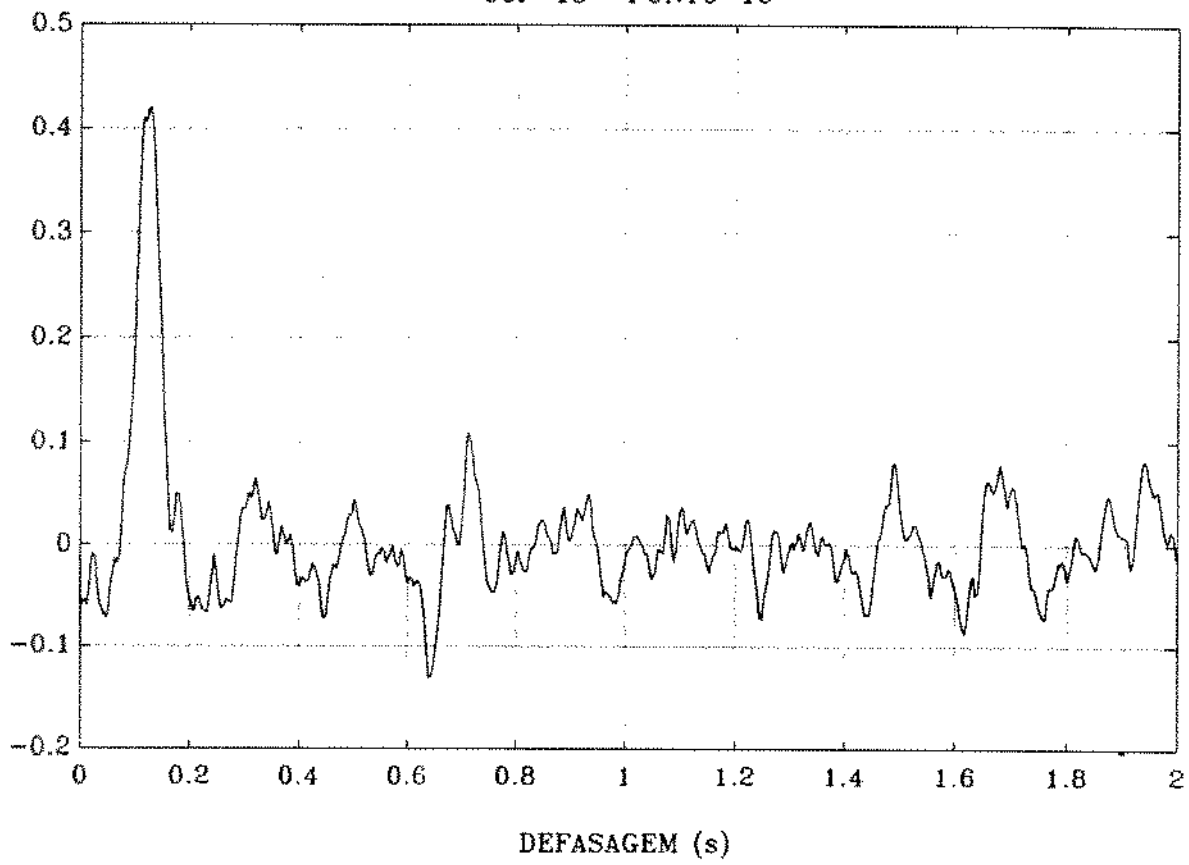
CCF-13 PONTO-8



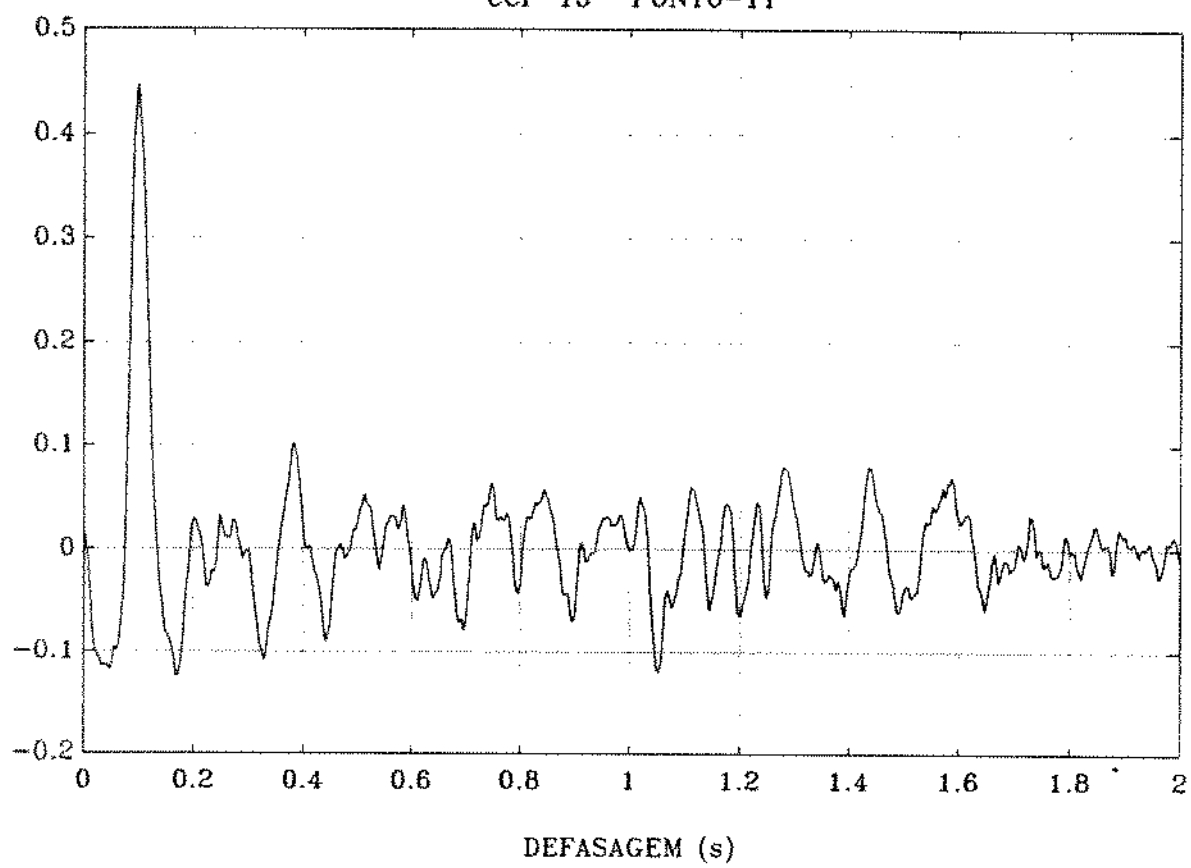
CCF-13 PONTO-9



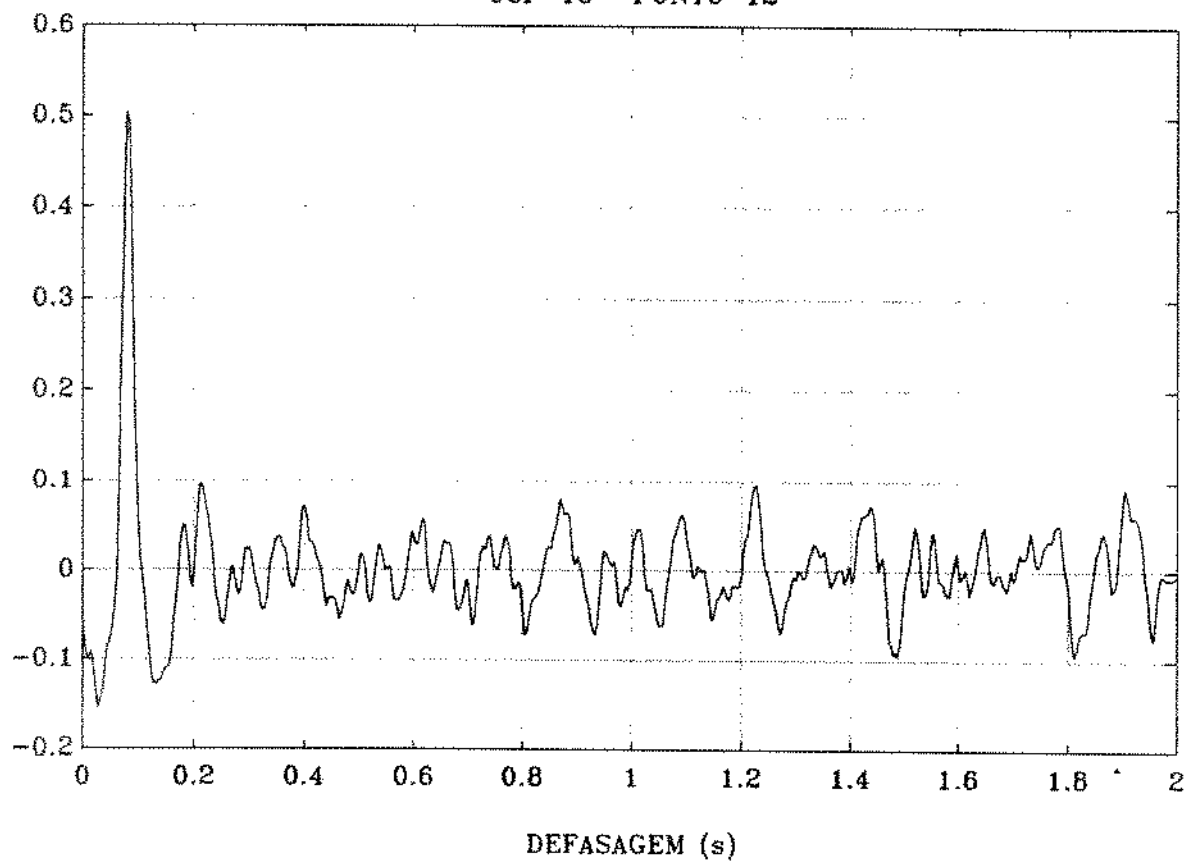
CCF-13 PONTO-10



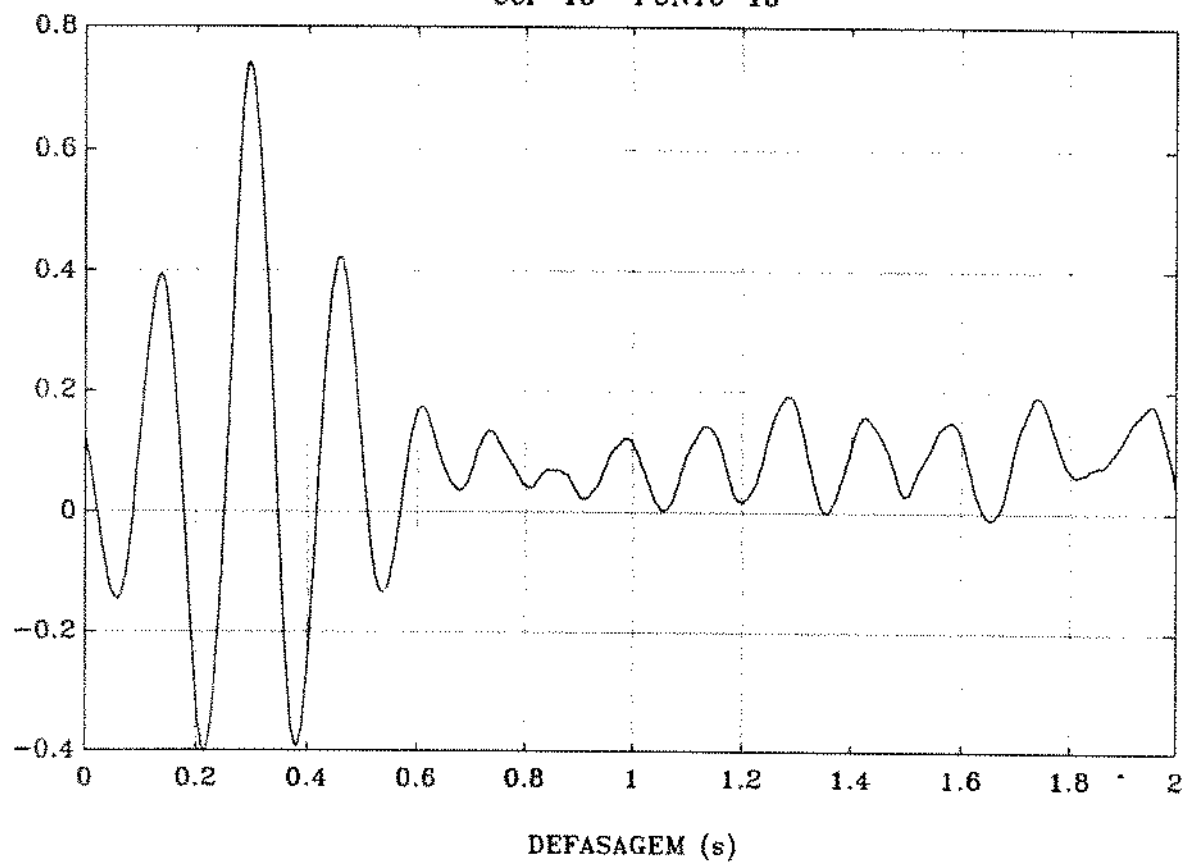
CCF-13 PONT0-11



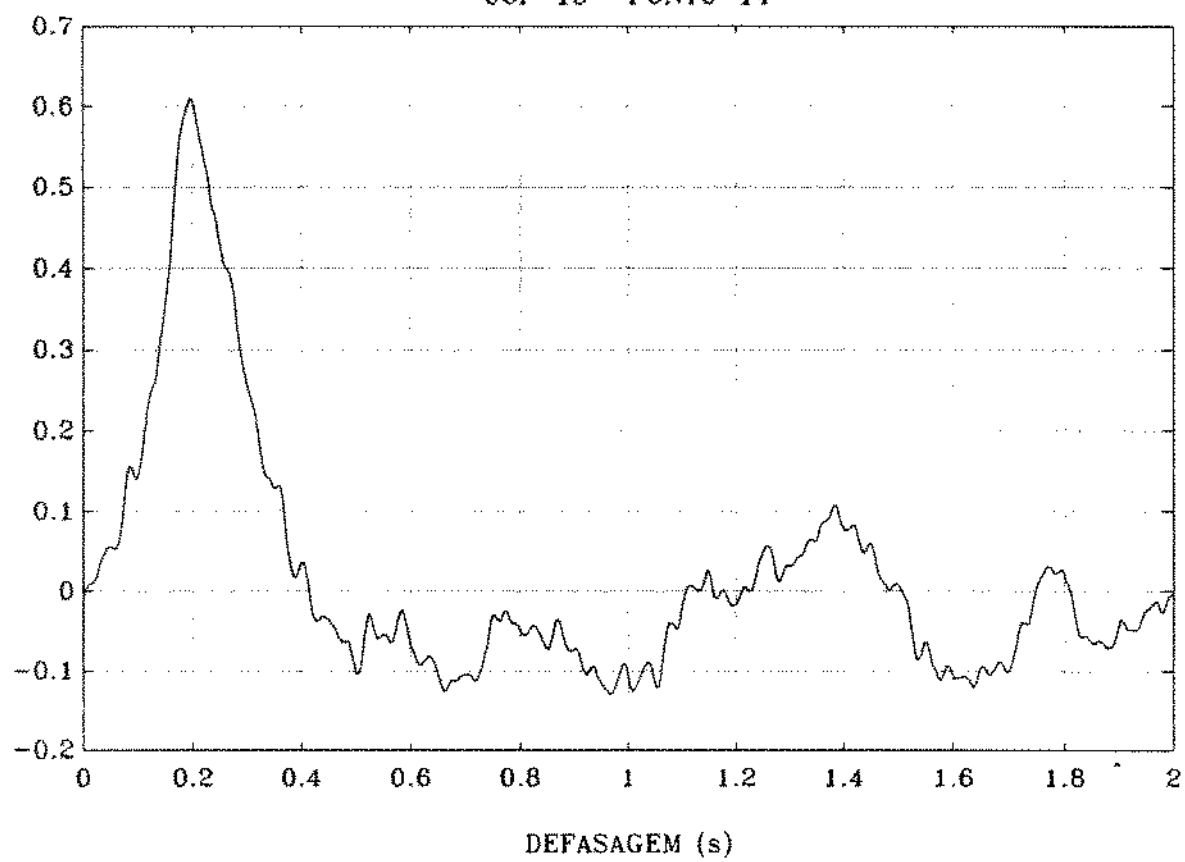
CCF-13 PONTO-12



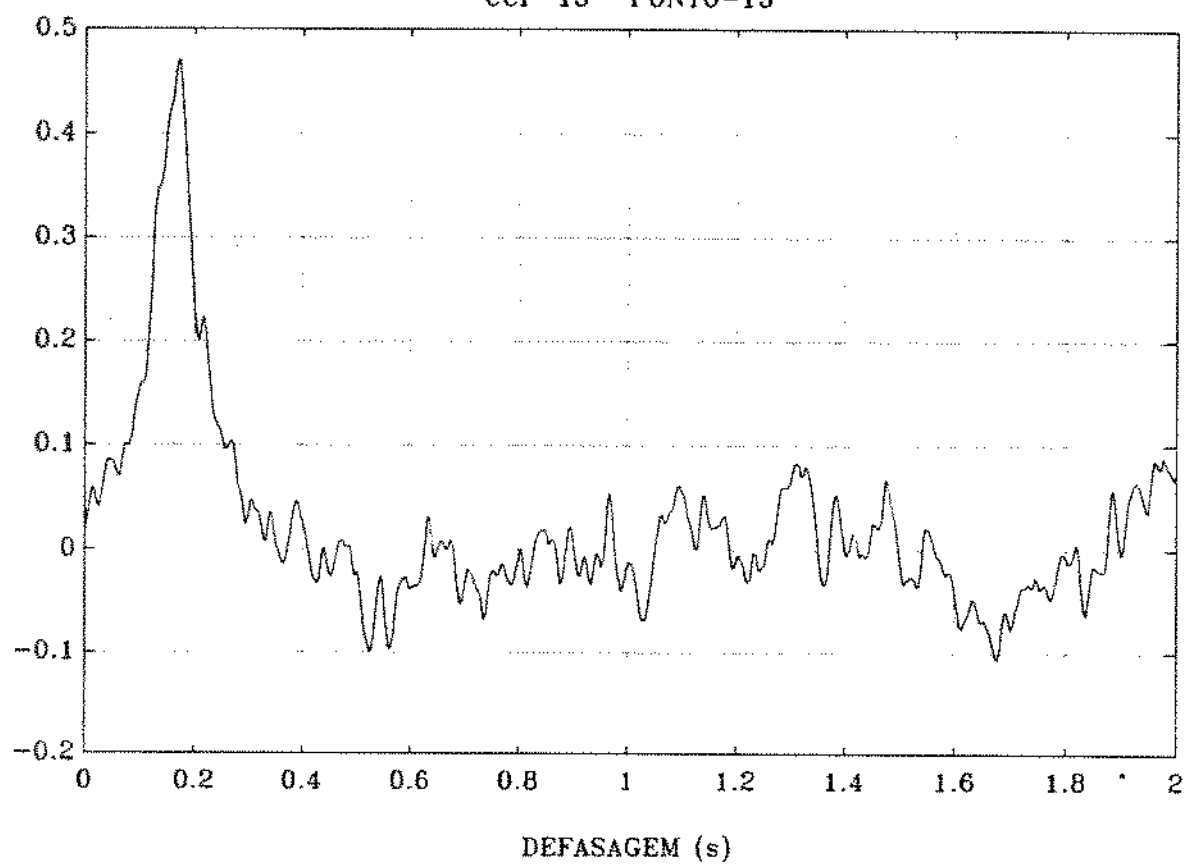
CCF-13 PONT0-13



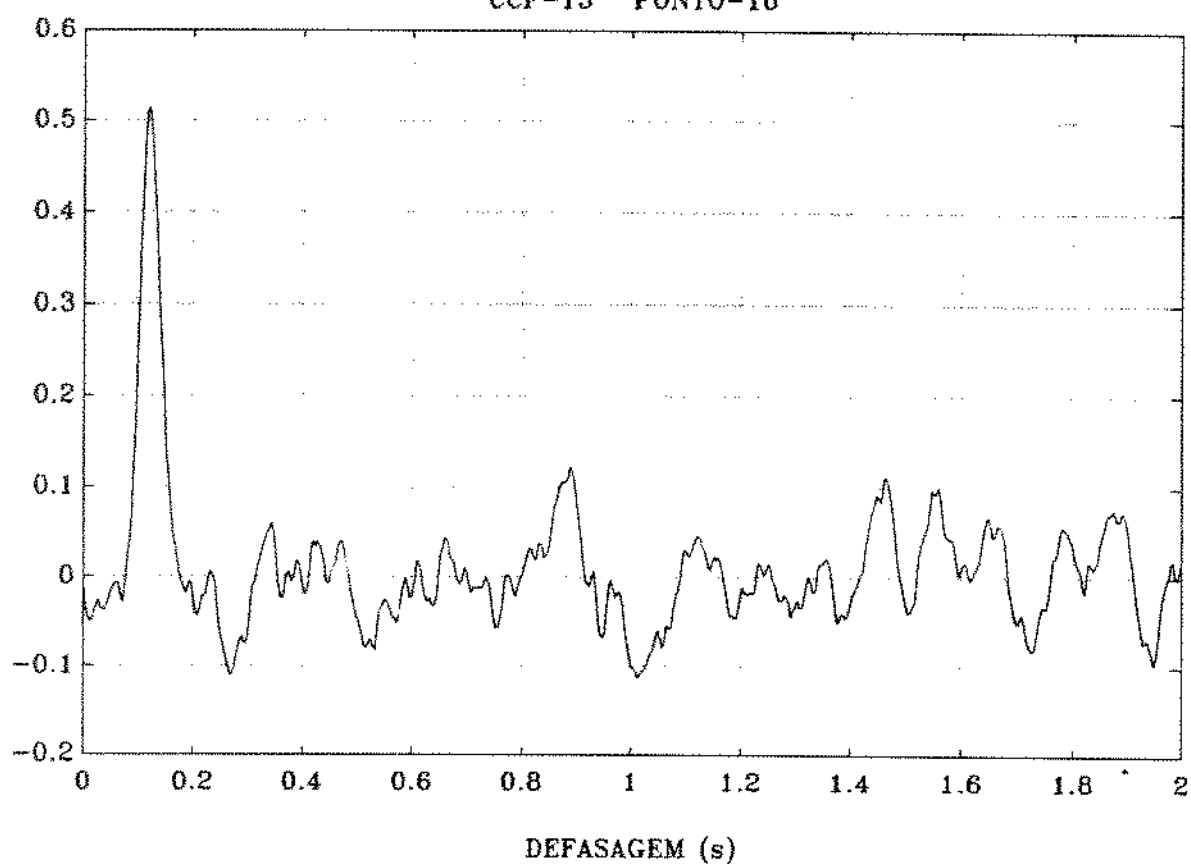
CCF-13 PONT0-14



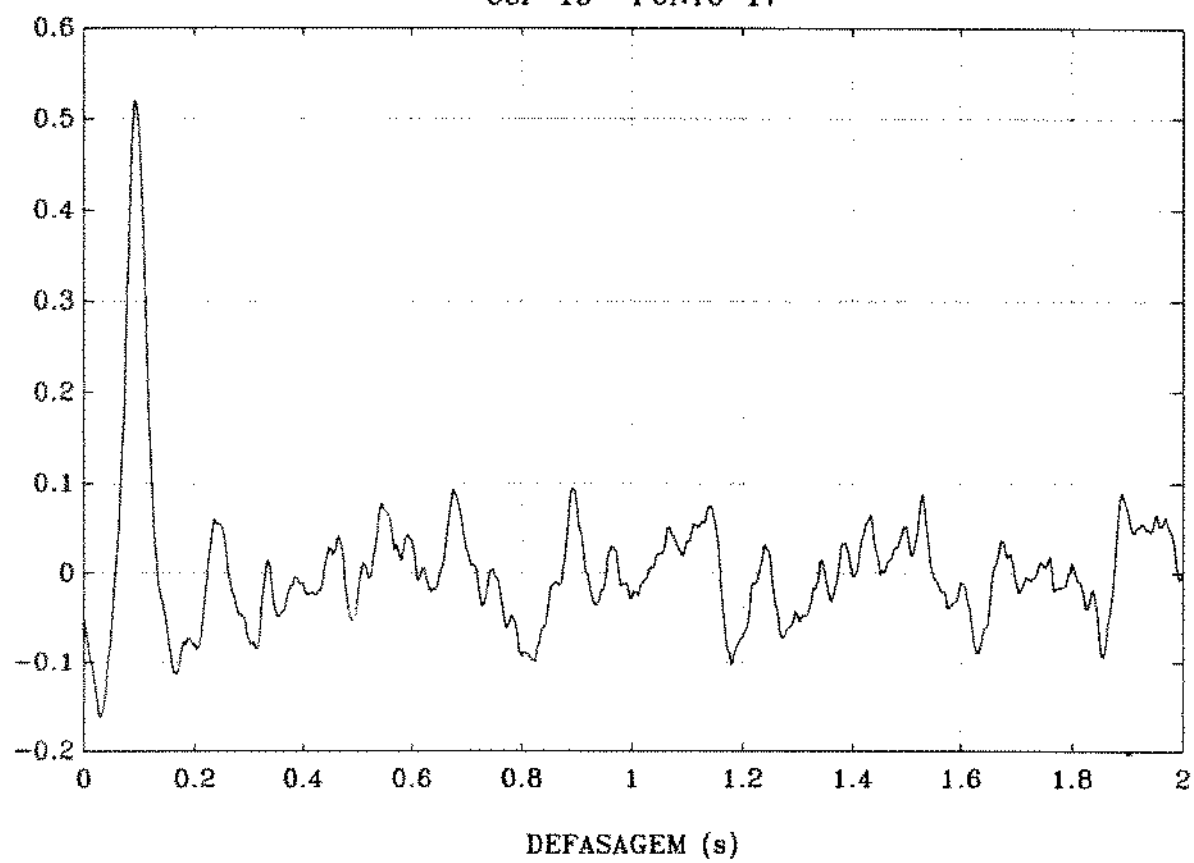
CCF-13 PONTO-15



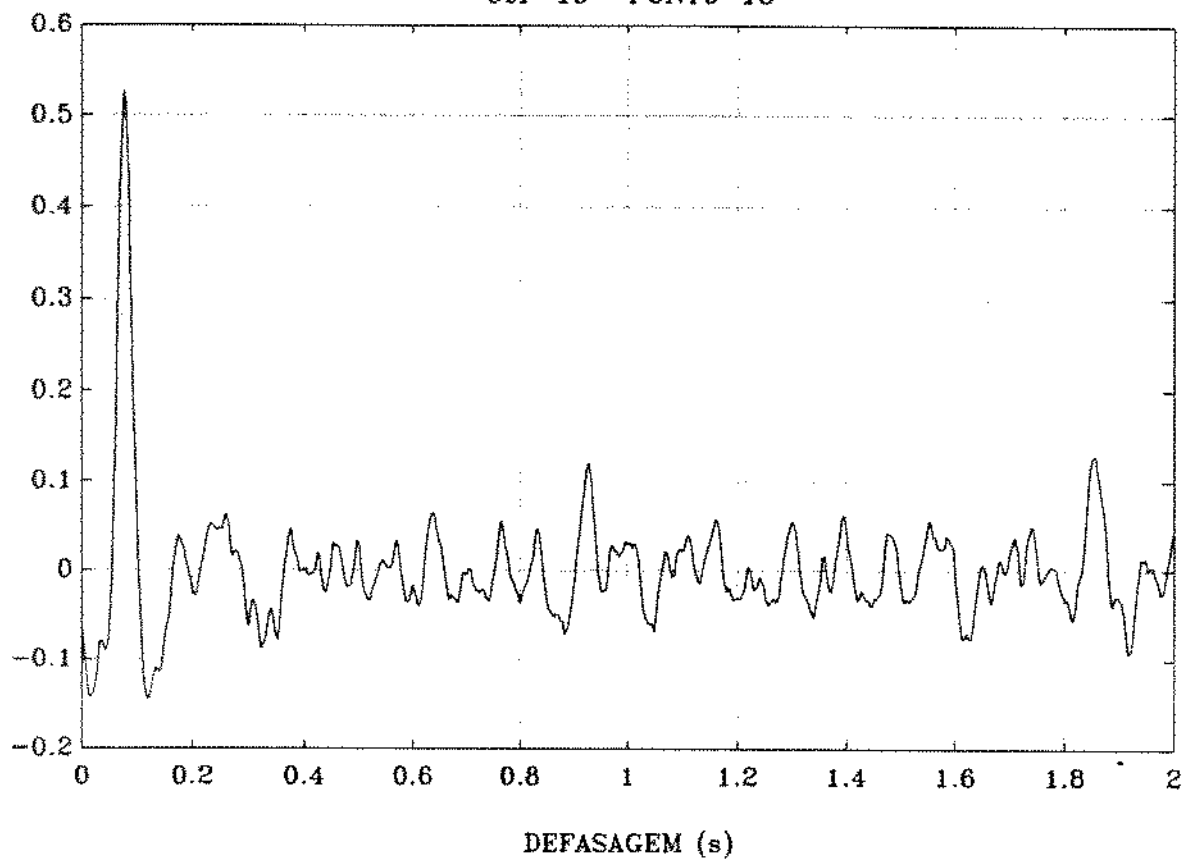
CCF-13 PONTO-16



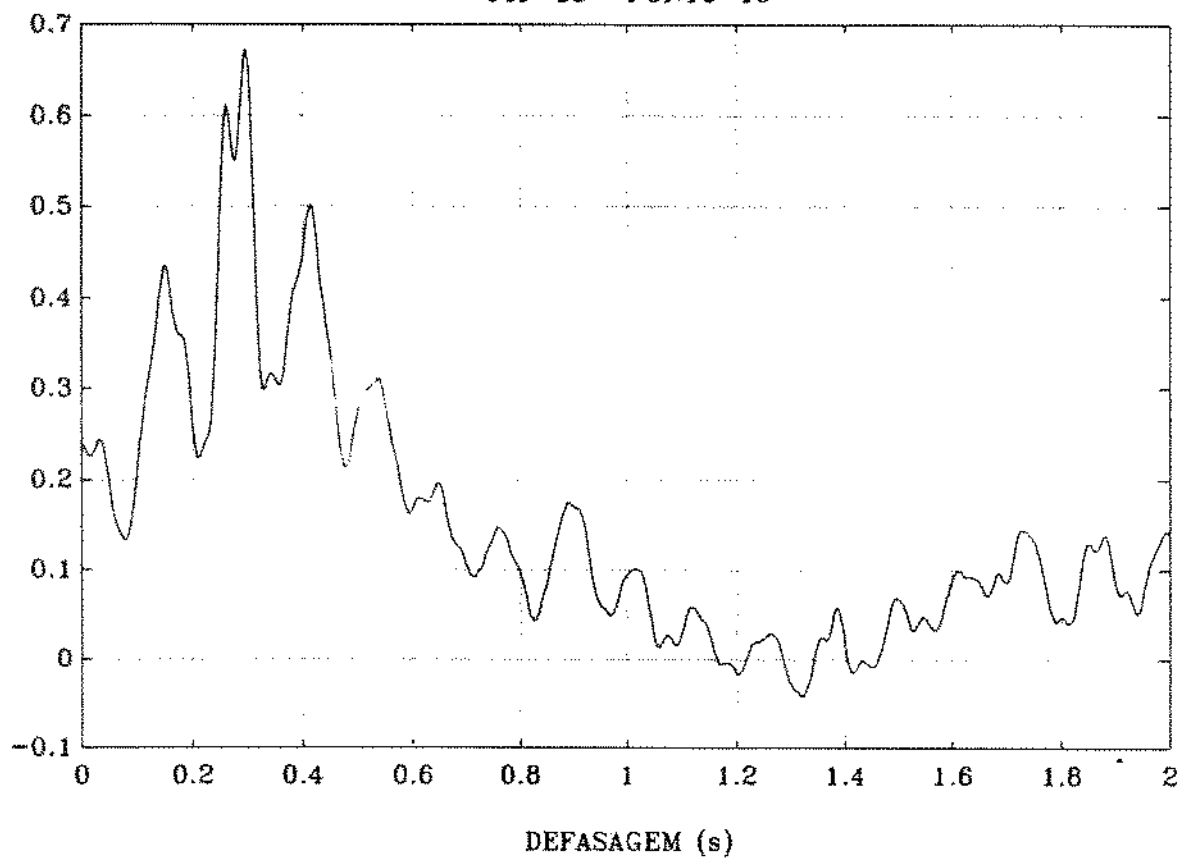
CCF-13 PONTO-17



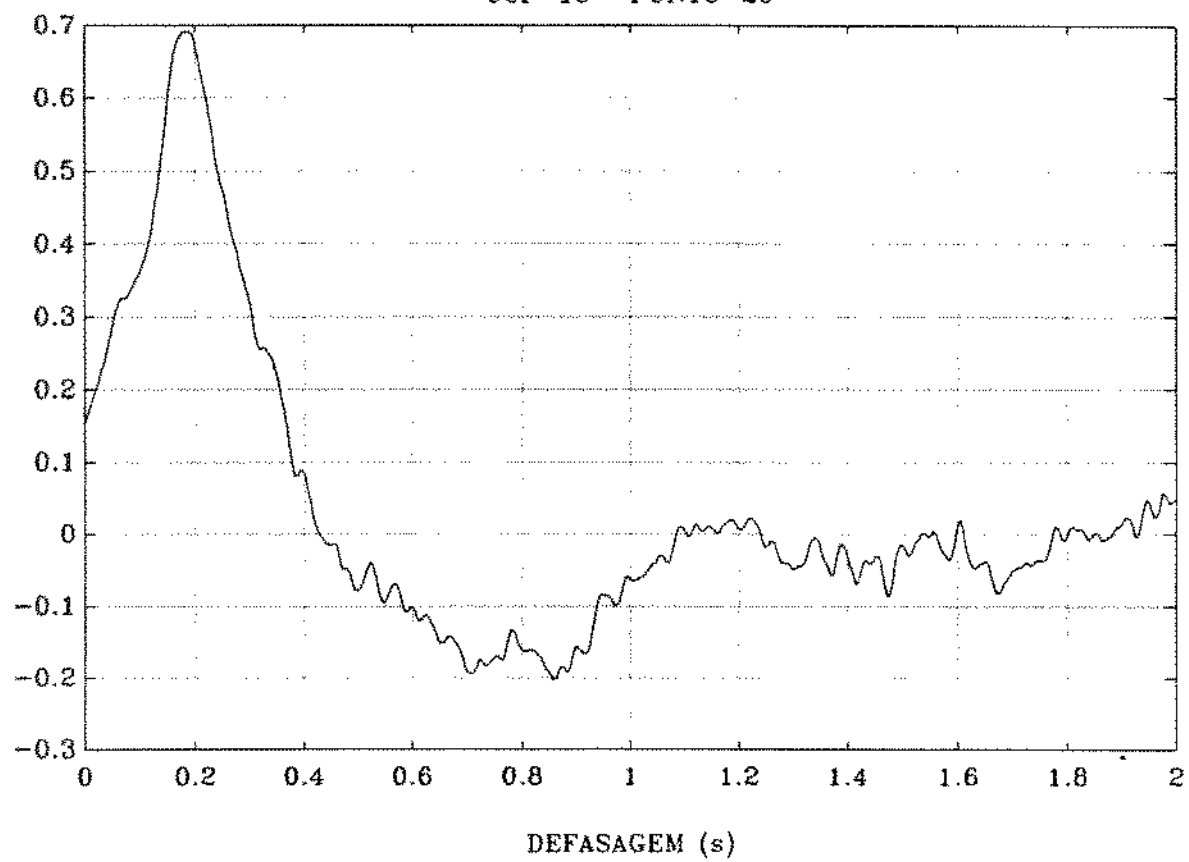
CCF-13 PONTO-18



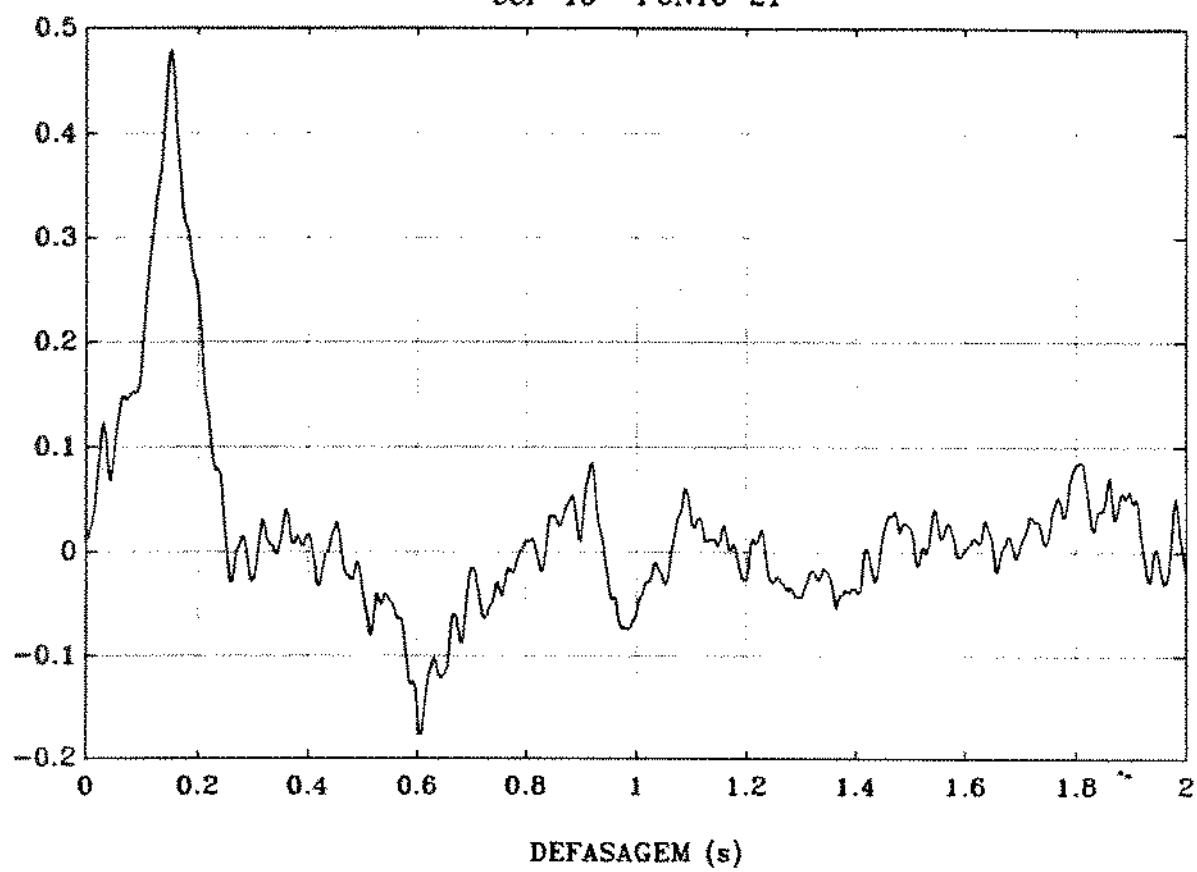
CCF-13 PONTO-19



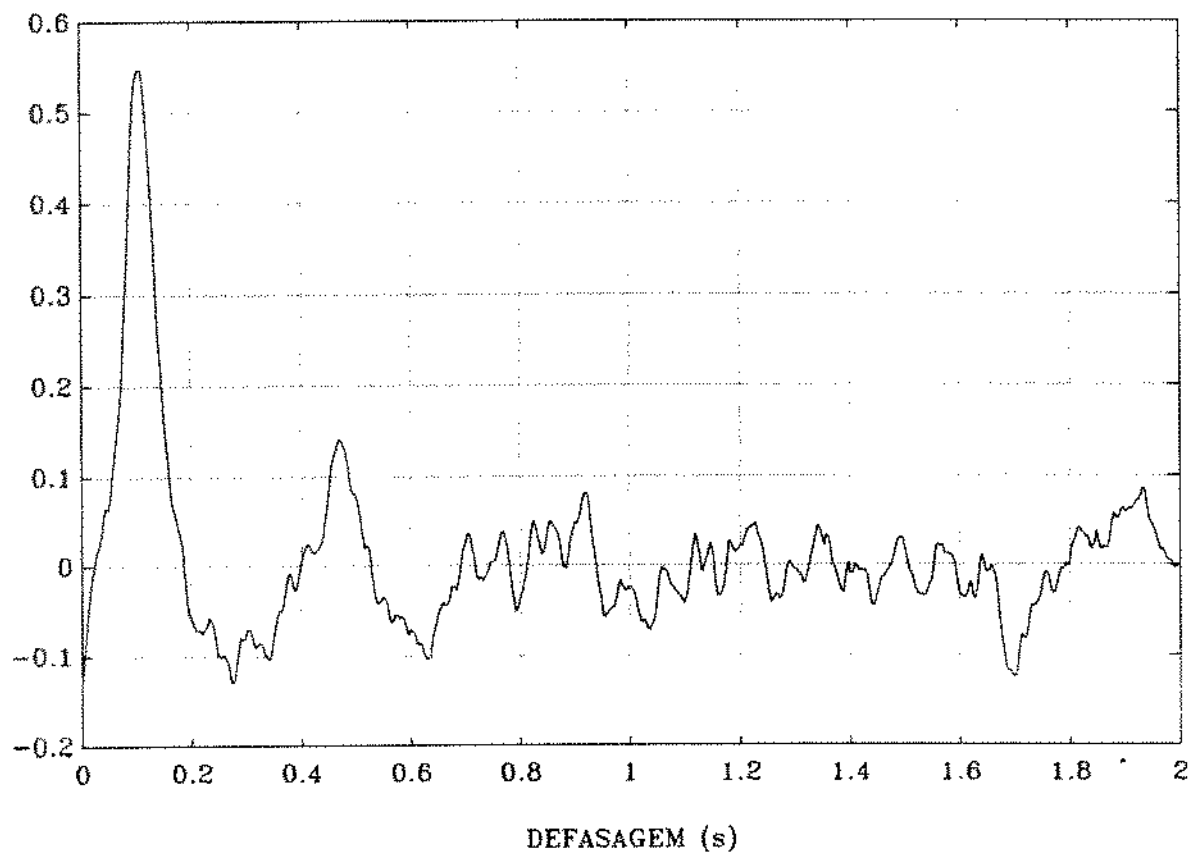
CCF-13 PONTO-20



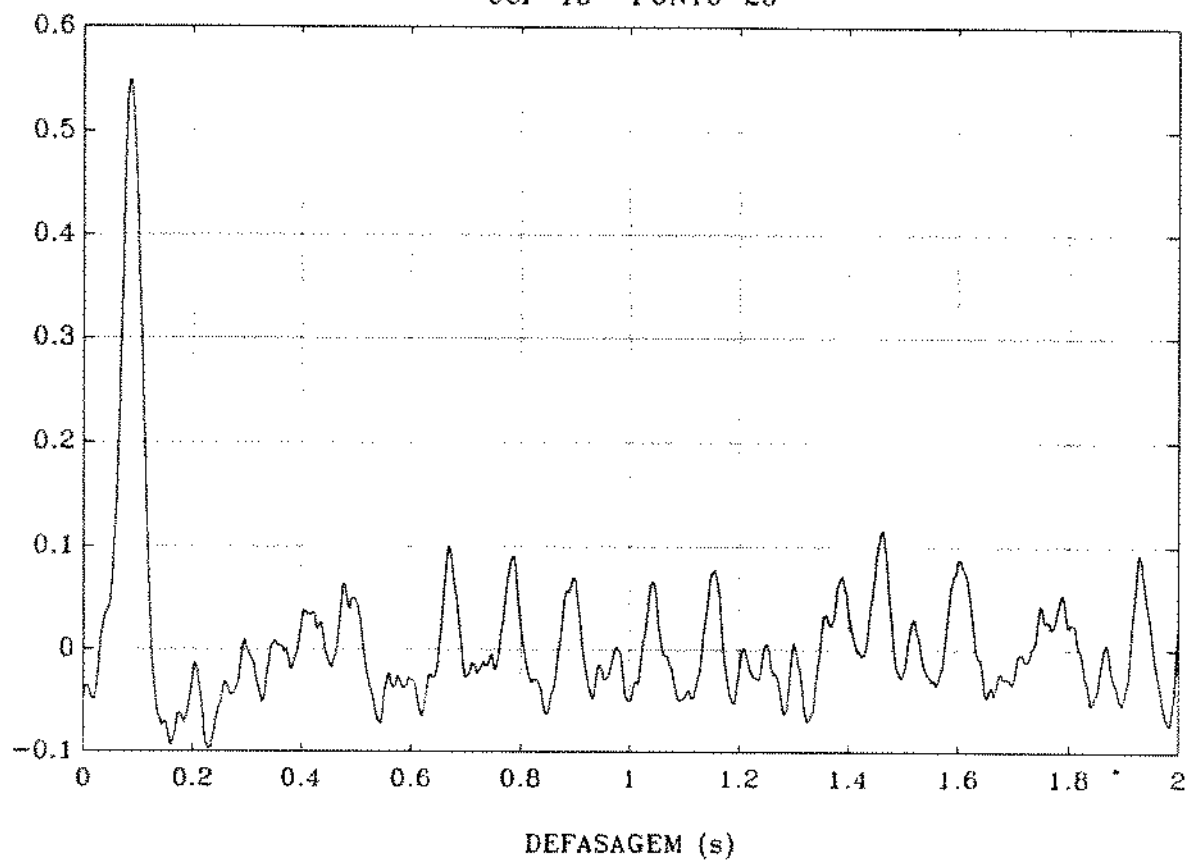
CCF-13 PONT0-21



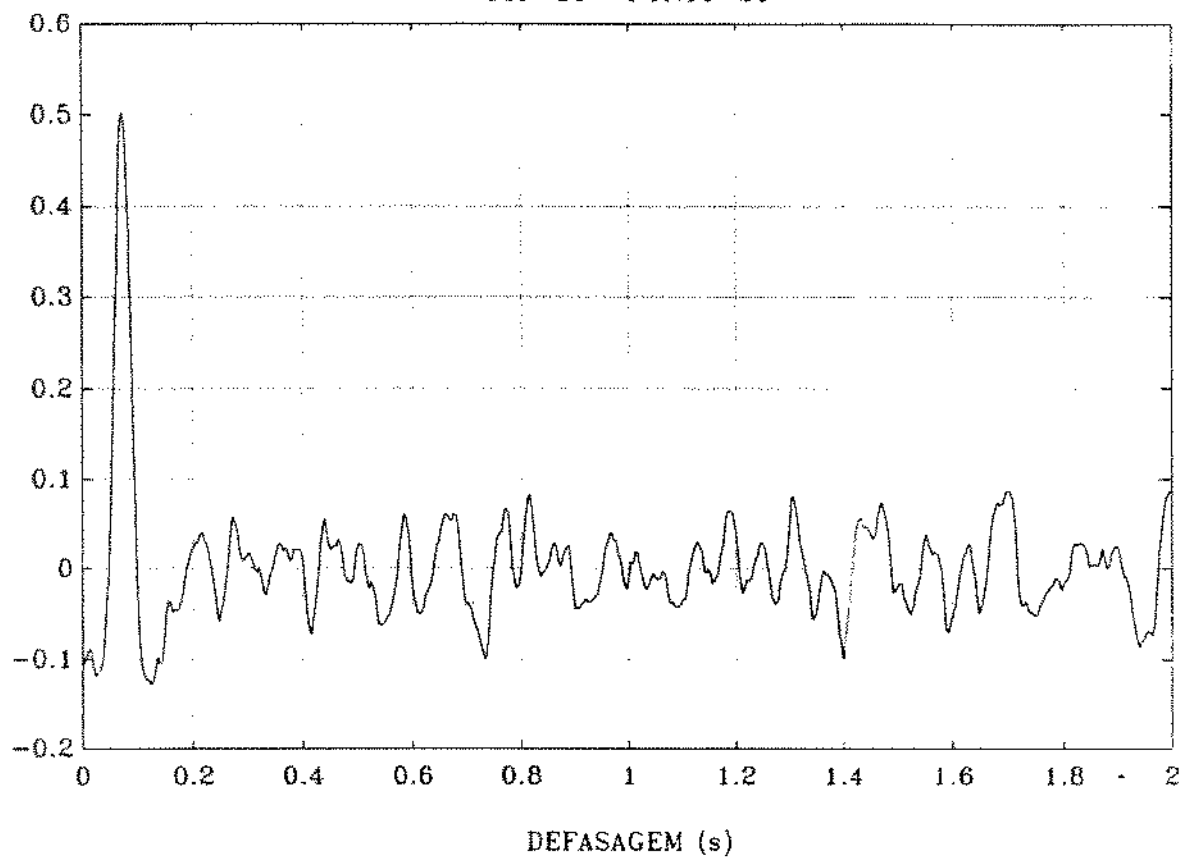
CCF-13 PONTO-22



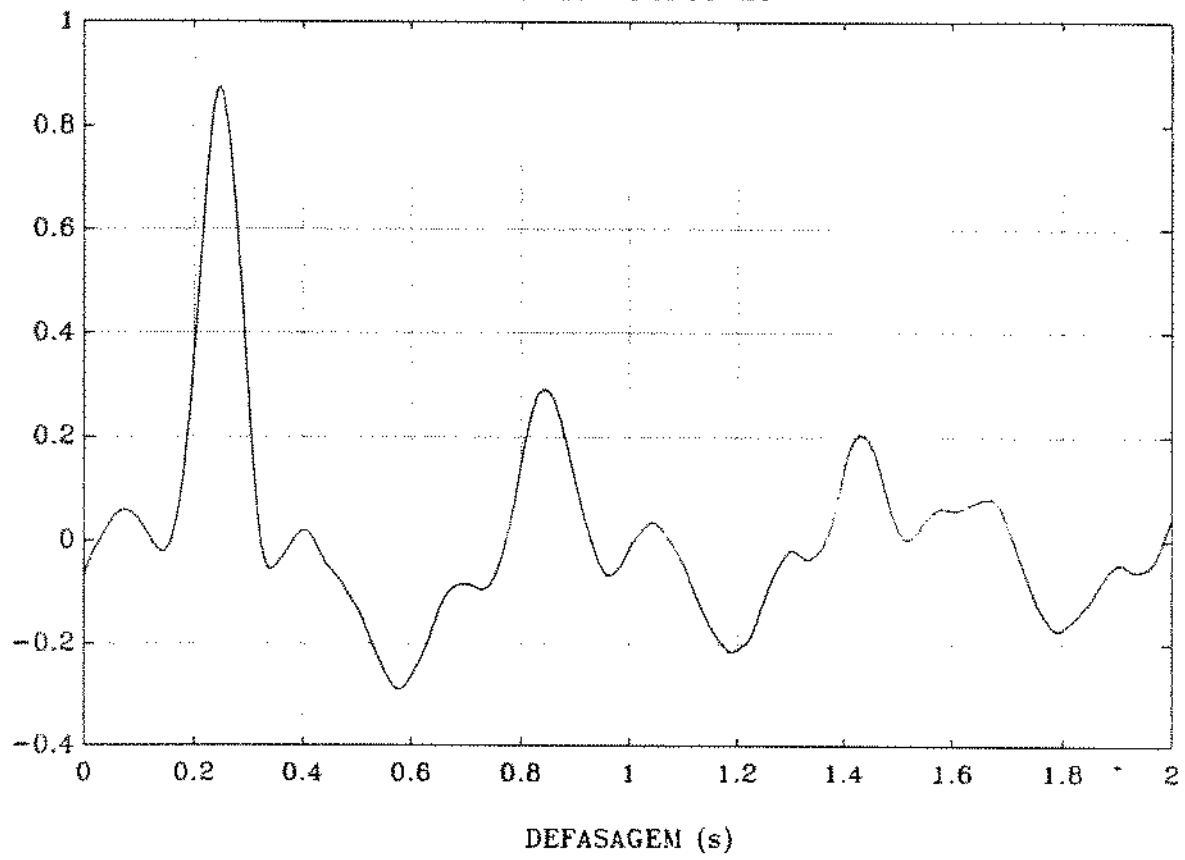
CCF-13 PONT0-23



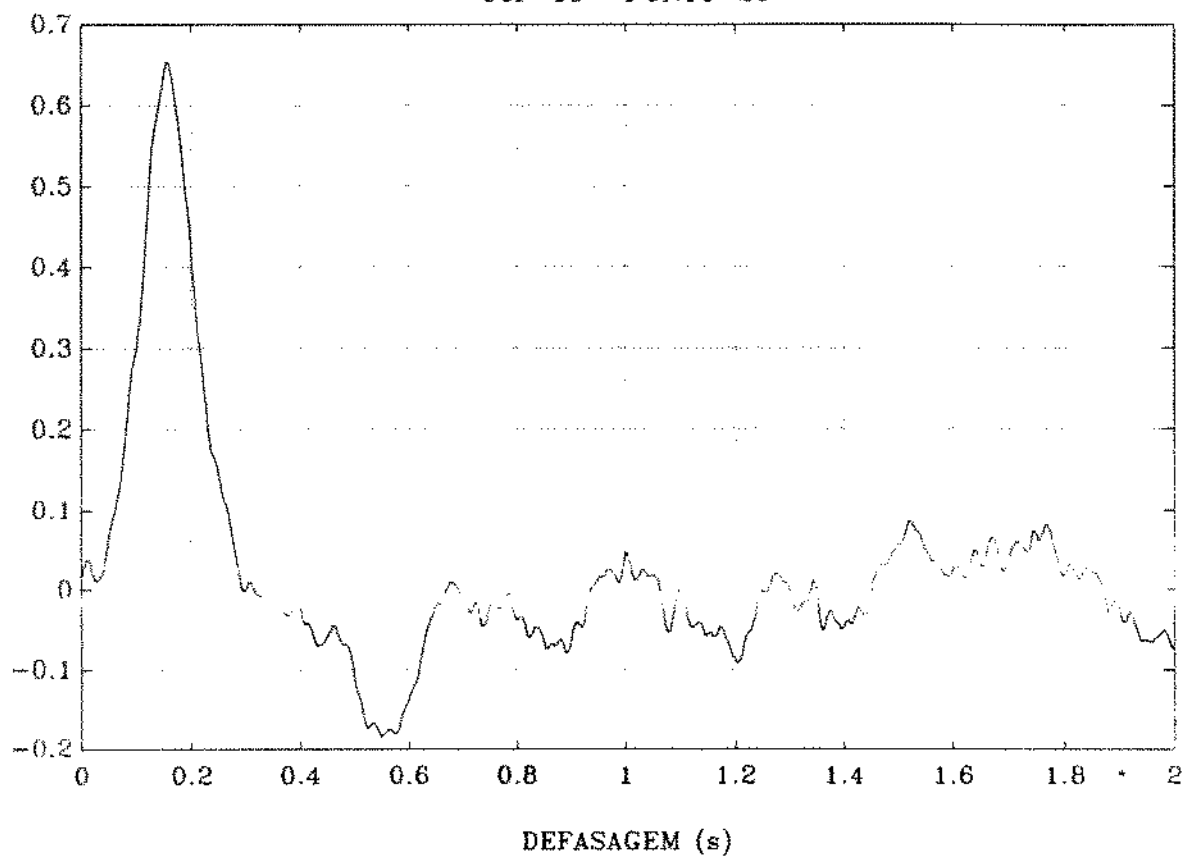
CCF-13 PONTO-24



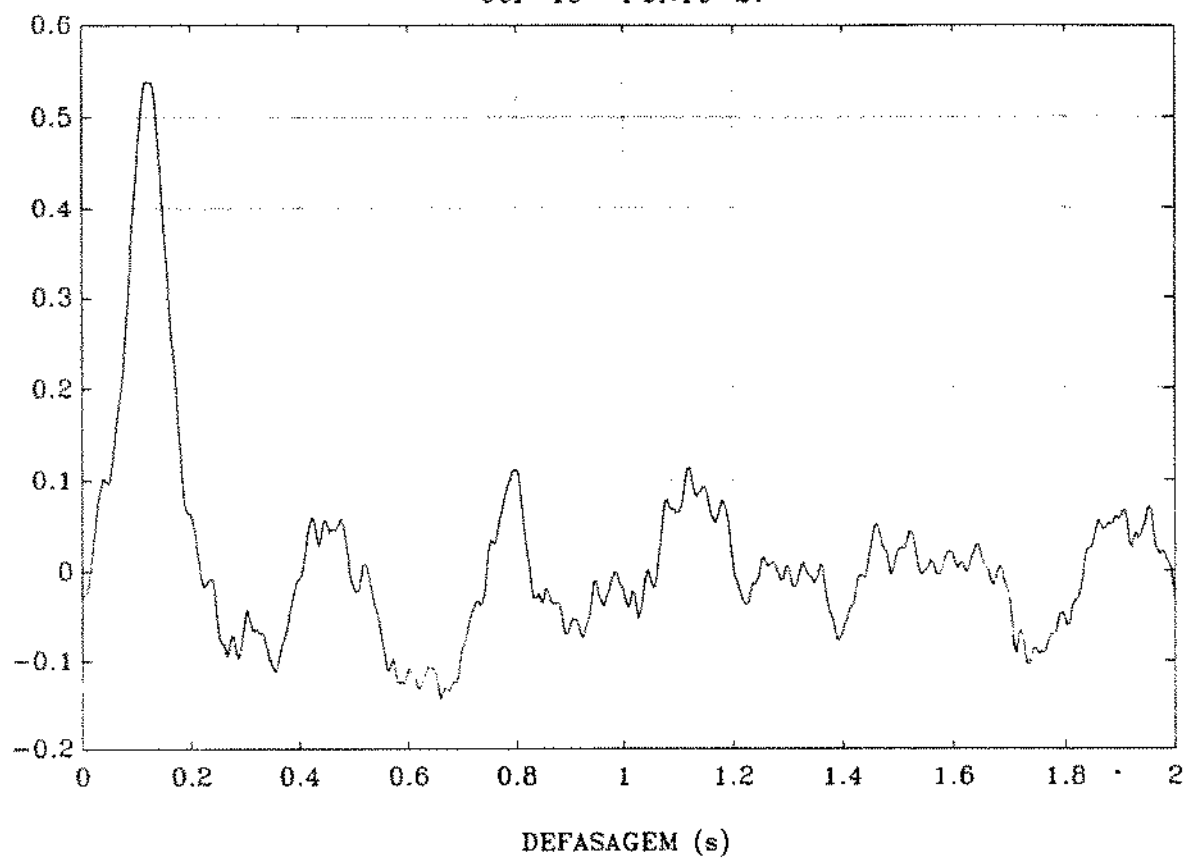
CCF-13 PONTO-25



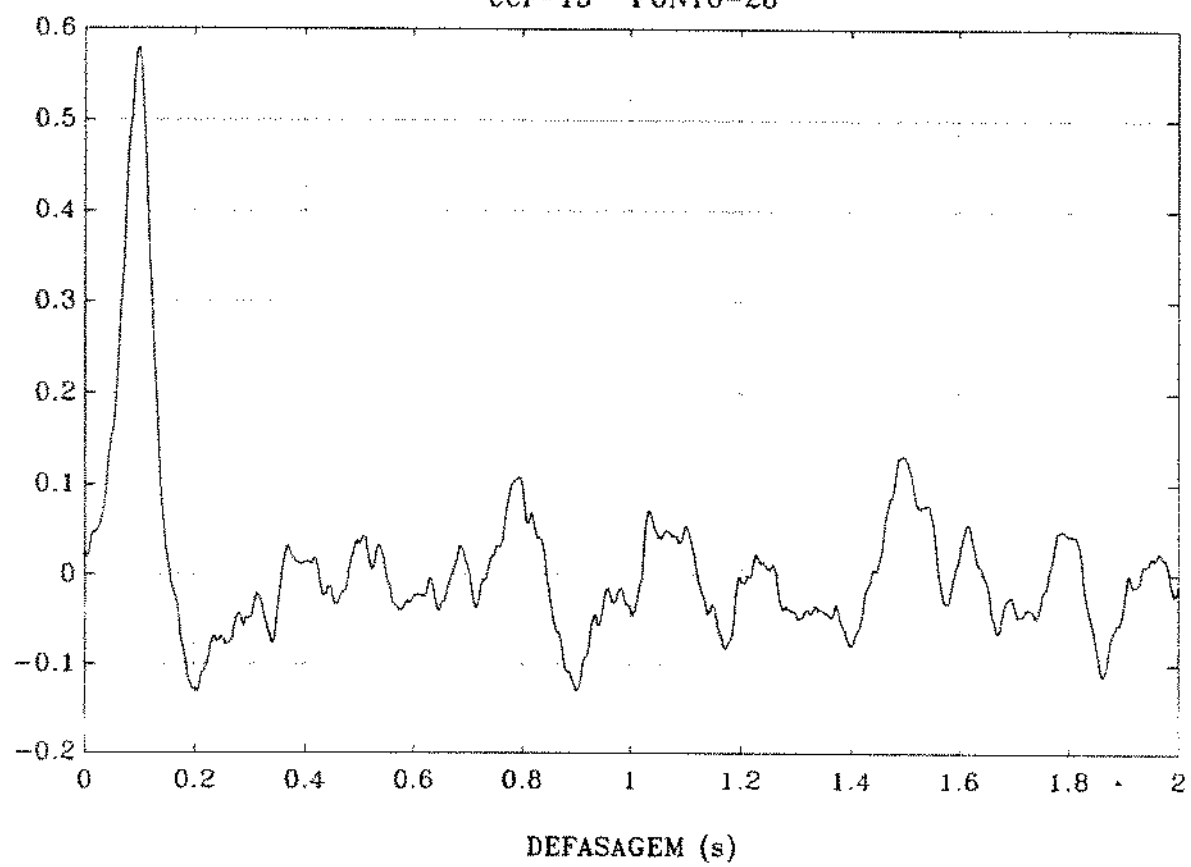
CCF-13 PONTO-26



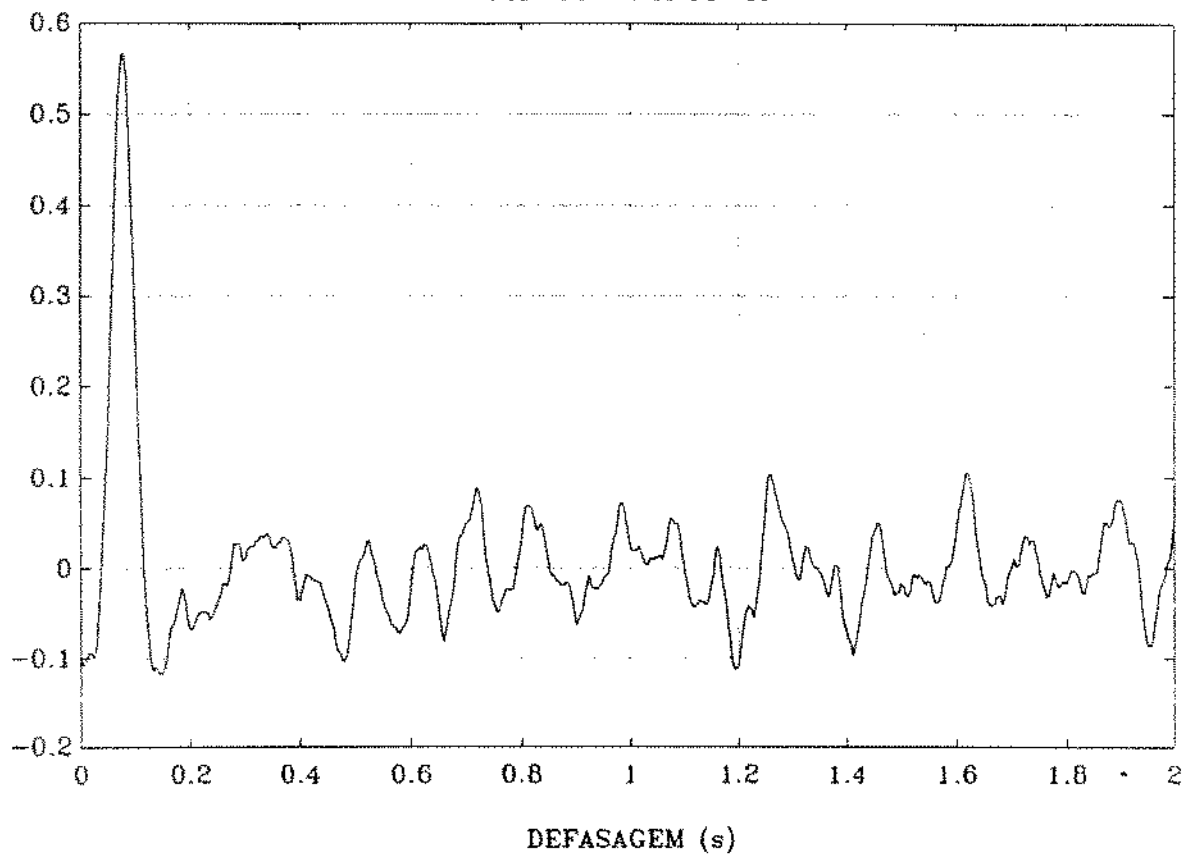
CCF-13 PONTO-27



CCF-13 PONTO-28



CCF-13 PONTO-29



CCF-13 PONTO-30

