

014

SÃO PAULO
2000

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

*ESTUDO DA RESPOSTA DINÂMICA DE PRESSÃO DE
FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS EM TUBOS ELÁSTICOS*

FLÁVIO SPINOLA BARBOSA

ED 7577
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
2000
SÃO PAULO

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia
Área de Concentração:
Engenharia Mecânica
Orientador:
Jayme Pinto Ortiz

***ESTUDO DA RESPOSTA DINÂMICA DE PRESSÃO DE
FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS EM TUBOS ELÁSTICOS***

FLÁVIO SPINOLA BARBOSA

AGRADECIMENTOS

Ao meu irmão Roberto, pela colaboração e estímulo.

A minha esposa Susette e meus filhos Thais e Vitor, pela compreensão e paciência.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – ERRATA

Candidato: Flavio Spimola Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz

Título: “Estudo da resposta dinâmica de pressão de fluidos incompressíveis em tubos elásticos”

Errata:

pag.	linha	onde se lê	leia-se
26	7ª	domínio da frequência, utilizando...	domínio da frequência (ver Hewlett Packard – Spectrum Analyser model 3582A –s/d e The fundaments of signal analysis -1982), utilizando...
29	15ª	mostrado na Figura 3.1.	mostrado na Figura 3.1 (ver Ortiz et al –1990 e Ortiz & Barbosa –1992).
50	10ª	flexibilidade	flexível
50	11ª	foram cortadas, montadas e preenchidas com água,...	foram cortadas, montadas e preenchidas com água,...
61	3ª	em quatro	em três
65	4ª	com parâmetros	como parâmetros
67	17ª	tubos de elásticos	tubos elásticos

SUMÁRIO

Lista de figuras	i
Lista de tabelas	iii
Lista de símbolos	iv
Resumo	vii
“Abstract”	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Dispositivos aferidores de pressão dinâmica	6
2.2 Ensaios de sistemas transmissores de pressão	10
2.3 Modelos teóricos de sistemas fluido dinâmico em tubos	12
3 METODOLOGIA DE ENSAIO	22
3.1 Tratamento de sinais	23
3.2 Descrição do aferidor dinâmico de pressão	29
3.3 Escolha e aferição dos transdutores	34
3.4 Descrição da técnica utilizada para a calibração	36
3.5 Aferição do sistema tubo transdutor	40
3.6 Tipos de tubos utilizados nos ensaios	41
3.7 Sinal de excitação de pressão	44
4 RESULTADO DOS ENSAIOS	48
4.1 Resultado dos ensaios com mangueira PVC flexível	50
4.2 Resultado dos ensaios com tubo de polietileno	56
4.3 Resultado dos ensaios com os tubos de poliamida I1	58
4.4 Resultado dos ensaios com tubos de cobre	61
4.5 Comparação de resultados em tubos de mesmo diâmetro	63
4.6 Análise dos resultados	64
5 MODELO MATEMÁTICO	67
5.1 Comparação entre o experimento e o modelo	74
5.2 Discussão sobre o modelo equivalente	76
6 CONCLUSÕES	78

ANEXO A – Tabela de dados experimentais	81
ANEXO B – Figuras dos ensaios	84
ANEXO C – Fotografias	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

4.8 - Freqüência de ressonância em relação ao diâmetro dos tubos poliflo.....	58
poliflo	57
4.7 - Freqüência de ressonância em relação ao comprimento dos tubos do tipo cristal	56
4.6 - Freqüência de ressonância em relação ao diâmetro das mangueiras cristal	55
4.5 - Freqüência de ressonância em relação ao comprimento das mangueiras	53
4.4 - Função de coerência do sistema tubo transmissor	53
4.3 - Função de transferência entre os transdutores de referência e teste	53
4.2 - Espectro de freqüência do transdutor teste	52
4.1 - Espectro de freqüência do transdutor de referência	51
3.10 - Comparação do transmissor excitado por sinal senoidal e randômico	46
3.9 - Esquema de conexão dos transdutores de referência e teste	41
3.8 - Função de transferência em ganho e fase entre os dois transdutores	39
3.7 - Espectro de freqüência dos dois transdutores em água	39
3.6 - Função de transferência em ganho e fase entre os transdutores	38
3.5 - Espectro de freqüência dos dois transdutores em ar	37
3.4 - Espectro de freqüência do recipiente do dispositivo aferidor	34
3.3 - Função de resposta do amplificador de potência até 1000Hz	33
3.2 - Sistema aferidor dinâmico de pressão	31
3.1 - Recipiente do dispositivo aferidor dinâmico de pressão	30
2.5 - Sistema tubo-câmara-transdutor e analogia com modelo elétrico	17
2.4 - Sistema tubo-câmara-transdutor	12
2.3 - Esquema do dispositivo Tubo de Choque	9
2.2 - Esquema do dispositivo de abertura rápida	8
2.1 - Dispositivo aferidor de transdutores de pressão em meio líquido	7

Pág.

LISTA DE FIGURAS

4.9 - Freqüência de ressonância em relação ao comprimento dos tubos nylon..... 60

4.10 - Freqüência de ressonância em relação ao diâmetro dos tubos de nylon..... 60

4.11 - Freqüência de ressonância em relação ao comprimento dos tubos de cobre..... 63

4.12 - Freqüência de ressonância em relação ao diâmetro dos tubos de cobre..... 63

4.13 - Freqüência de ressonância de tubos de mesmo diâmetros em relação ao comprimento..... 63

4.14 - Curva típica da resposta em freqüência de sistemas de segunda ordem..... 65

5.1 - Simplificações do modelo de parâmetros distribuídos de equivalência elétrica..... 68

5.2 - Simplificações do modelo de parâmetros distribuídos de equivalência elétrica..... 74

LISTA DE TABELAS

3.1 - Dimensões nominais dos tubos.....	42
3.2 - Valores medidos experimentalmente e os módulos de elasticidade.....	43
4.1 - Tabela com os resultados dos ensaios com mangueira cristal	54
4.2 - Tabela com os resultados dos ensaios com tubos polífilo	57
4.3 - Tabela com os resultados dos ensaios com tubos de nylon	59
4.4 - Tabela com os resultados dos ensaios com tubos de cobre.....	61
5.1 - Tabela do cálculo do fator de equivalência K	76
A.1 - Valores medidos experimentalmente	82
A2 - Cálculo do fator de equivalência K.....	82

Pág.

A	- área da seção transversal do tubo;
a	- aceleração;
a_i	- coeficiente constante;
b_i	- coeficiente constante;
c	- celeridade;
C_c	- capacitância na câmara;
C_d	- capacitância do transdutor;
C_d	- capacitância do diafragma do transdutor;
C_i	- capacitância no tubo;
C_{vp}	- compliância;
d	- diâmetro do tubo;
D	- operador diferencial;
d^p	- diâmetro da membrana (pistão);
f_a	- frequência de amostragem;
f_{max}	- frequência máxima de amostragem;
f_n	- frequência natural;
f_r	- frequência de ressonância;
G	- ganho;
$G^{xx}(f)$	- espectro de potência do sinal de entrada;
$G^{xy}(f)$	- espectro de potência cruzado entre entrada e saída;
$G^{xy}(f)^*$	- conjugado complexo do espectro de potência cruzado entre entrada e saída;
$\underline{G^{xx}(f)}$	- espectro de potência médio do sinal de entrada;
$\underline{G^{xy}(f)}$	- espectro de potência cruzado médio;
H(f)	- função de transferência;
j	- número imaginário;
K	- fator de equivalência;
KE	- energia cinética;
K_s	- constante da mola;
l	- comprimento do tubo;
L	- indutância equivalente;
L_c	- indutância na câmara;
L_e	- indutância equivalente;
L_i	- indutância no tubo;

LISTA DE SÍMBOLOS

M	- massa;
m	- números inteiros;
me	- massa equivalente;
N	- número de amostras;
n	- números inteiros;
p	- pressão;
$P1$	- pressão na câmara maior;
$P2$	- pressão na câmara menor;
P_e	- pressão de entrada no tubo;
P_s	- pressão de saída do tubo;
Q	- vazão em volume;
r	- distância do centro do tubo;
R	- resistência equivalente;
R_c	- resistência na câmara;
R_i	- resistência no tubo;
s	- variável complexa;
$S^x(f)$	- sinal de entrada no domínio da frequência;
$S^x(f)^*$	-complexo conjugado do sinal de entrada no domínio da frequência;
$S^y(f)$	- sinal de saída no domínio da frequência;
$S^y(f)^*$	- complexo conjugado do sinal de saída no domínio da frequência
T	- período;
t	- tempo;
v	- tensão;
v^m	- velocidade média no tubo;
v_i	- velocidade no tubo em relação a r , para um perfil parabólico;
v_c	- velocidade na linha central do tubo;
ω	- frequência angular;
ω_n	- frequência de ressonância angular;
ω_m	- frequência natural angular da membrana do transdutor;
$x(t)$	- sinal de entrada no tempo;
$y(t)$	- sinal de saída no tempo;
ΔF	- diferença de força;
Δf	- resolução de frequência;
Δp	- diferença de pressão;
Δp_s	- variação de pressão junto a membrana;
ΔV	- diferença de volume;
Δt	- intervalo de tempo;
γ	- função de coerência;
ρ	- massa específica;

σ - número real;
 η - coeficiente de viscosidade dinâmico.

Este trabalho originou-se da necessidade de medir variações de pressão de fenômenos hidráulicos em modelos reduzidos. O sistema transmissor de pressão, composto por um tubo de pequeno diâmetro e um transdutor elétrico na extremidade, é utilizado em situações onde não seja possível a instalação direta do transdutores junto ao ponto de medição. Como o tubo afeta a resposta em frequência da medida, é necessário conhecer o seu comportamento em relação a propagação de pressão. Este estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente o sistema transmissor de pressão do tipo tubos cilíndricos elásticos, utilizados em laboratório de hidráulica, procurando identificar suas características dinâmicas.

Projetou-se e montou-se um dispositivo gerador de pressão operando em água, utilizando um transdutor de referência, que foi empregado para aferir os sistemas transmissores. Foram ensaiados quatro tipos de tubo com diferentes comprimentos e diâmetros, obtendo-se as curvas de resposta em frequência (amplitude e fase), que representam o comportamento dinâmico da propagação de pressão nas várias configurações do sistema transmissor.

Dos resultados obtidos pôde-se identificar a frequência de ressonância e o amortecimento ocorrido em cada sistema transmissor. Isso permitiu identificar uma faixa de uso em medição, onde não há distorções na pressão medida na extremidade do tubo. Desta forma, obtêm-se subsídios importantes para o dimensionamento de sistemas de medição dinâmica de pressão, utilizado em ensaios de modelos reduzidos hidráulicos. Finalmente apresenta-se neste trabalho a comparação dos resultados experimentais obtidos em relação a um modelo matemático discreto de parâmetros concentrados adaptado para representar o sistema transmissor de pressão com tubo elástico.

RESUMO

ABSTRACT

This work was born from the necessity to measure dynamic pressure field of hydraulic phenomenon on reduced scale model. The pressure transmitter system in hydraulic physical models studies, object of this study, composed by a tube of small diameter with a electric pressure transducer on its end, is used on situations where it is not possible a direct instalation of the transducer on the measuring point. As the tube affects the frequency response of the measurement, it is necessary to know its pressure transmitter system behaviour made by a cylindrical elastic tube, used on hydraulic laboratories, searching for its dynamics characteristics.

A water pressure generator device, was built using a reference transducer, that was used to check transmitter system. Four tube types were tested with different lengths and diameters, producing frequency response curves (amplitude and phase), that represents the dynamic pressure propagation on the tube, for this transmitter systems configurations.

The results show the resonant frequency and damping behaviour for each transmitter system. The useful measurement range, where no distortion between in-tube and out-tube exist, have been identified. These results give support subsidise to the project of dynamic pressure transmitter systems, used in hydraulic physical models applications. This work also compares experimental results with a discrete lumped parameters mathematical model fitted to represent the transmitter system with elastic tube.

I INTRODUÇÃO

Em áreas da engenharia, hidráulica, aeronáutica, aplicações pneumáticas ou na bio-engenharia, é necessário a medição e registro de oscilações de pressão. Na avaliação de fenômenos aerodinâmicos ou hidrodinâmicos, é usual medir o perfil de pressão ao longo de um modelo experimental, registrando-se as oscilações de pressão junto a sua superfície. Na bio-engenharia a medição de pressão sanguínea, próximo ao coração, deve ser feita de maneira a registrar as oscilações de pressão em uma faixa de frequência adequada para obter fiel representação da pulsação sanguínea. No estudo hidráulico de comportas, vertedouros e bacias de dissipação de barragens, tubulações de condutos forçados é necessário a medição de oscilação de pressão para se verificar o comportamento ressonante e os picos de pressão junto as estruturas que as sustentam.

A forma usual de medição de pressão é instalar transdutores elétricos de pressão no ponto desejado. Deve-se escolher transdutor com capacidade suficiente para atender as características de sistemas dinâmicos, a serem monitorados. Dependendo do fenômeno, é preciso que o transdutor atenda a características operacionais compatíveis, tais como: faixa de pressão, precisão e resposta em frequência. Por vezes as dimensões do transdutor e a resolução espacial do ponto de medição exigida para a tomada de pressão, impossibilitam a sua instalação no ponto desejado. Por outro lado, a quantidade de tomadas de pressão pode ser um fator que limite o ensaio, interferindo no fenômeno físico que está sendo observado e mascarando a medição.

Em ensaios de modelos hidráulicos reduzidos dificilmente se consegue atender a todas essas exigências, o que traz limitações a instalação e operação da instrumentação de forma adequada. Na bio-engenharia a monitoração de pressão

intra-corporea exige que o transdutor tenha pequenas dimensões para poder ser introduzido na corrente sanguínea. Deve também interferir o menos possível na circulação para não prejudicar o processo de medição.

Para a medição de pressão em modelos aerodinâmicos em túneis de vento é necessário o uso de um grande número de tomadas de pressão que podem interferir no processo aerodinâmico. Considerando que grande quantidade de transdutores miniaturas, com características especiais, encarecem o processo de medição, muitas vezes inviabilizando economicamente o estudo, torna-se aconselhável o uso de outras técnicas de medição.

Para situações como estas, pode-se usar sistemas transmissores de pressão, que são compostos por um tubo e um transdutor com características gerais fica distante do ponto de medição, dimensões mais confortáveis podendo ainda ser facilmente intercambiável para várias tomadas de pressão. Os transmissores de pressão podem ser tubos cilíndricos, mangueiras, cateteres, por onde a onda de pressão se propaga do ponto medição em uma extremidade do transmissor, até o transdutor localizado na outra extremidade, em posição externa de fácil acesso. No entanto, a propagação de pressão ao longo de tubo sofre vários tipos de influências que deformam a onda de pressão transmitida. Estas deformações distorcem a medida de pressão dinâmica feita pelo transdutor e cria características especiais no sistema transmissor de pressão.

Três perguntas básicas devem ser respondidas para justificar a utilização de sistemas transmissores de pressão:

- Quais são as características físicas do tubo que influenciam a propagação de pressão?

- Qual é a resposta dinâmica dos sistemas transmissores de pressão?

- Qual é a faixa de resposta em frequência adequada de operação sem que haja distorção da pressão medida?

Os sistemas transmissores devem ser estudados em suas características físicas, identificando-se as propriedades do tubo que influenciam no desempenho em termos da transmissão de oscilação de pressão e no que se refere a resposta em frequência destes sistemas. Procura-se definir uma faixa útil de resposta dinâmica de pressão onde as distorções não mascarem, de forma significativa, as oscilações de pressão do ponto de medição.

Sob o ponto de vista prático, o trabalho aqui apresentado visa responder às questões surgidas quanto as medições experimentais no Centro Tecnológico de Hidráulico (C.T.H.), onde têm-se utilizado sistemas transmissores de pressão do tipo tubo elástico em água.

Para a realização deste trabalho projetou-se e montou-se um dispositivo aferidor de pressão dinâmica, que gera estímulos de pressão para excitar vários tipos de tubos, de onde foram obtidas curvas de resposta em frequência característica do sistema tubo-transdutor ensaiado.

A pesquisa bibliográfica realizada mostra que os sistemas transmissores são voltados para aplicações específicas nas áreas de aerodinâmica em túneis de vento, que abordaram o estudo de transmissores de pressão procurando expandir sua resposta em frequência, aumentando a capacidade de análise dos registros de flutuação de pressão.

Outros trabalhos voltados a área de bio-engenharia abordam o estudo de transmissores de pressão de pequenos diâmetros em meio fluido, e com faixa de resposta em frequência adequada a pressão a pulsação de coração.

Estudos teóricos de modelos matemáticos para sistemas transmissores de pressão são apresentados no capítulo de revisão bibliográfica, e em alguns

trabalhos são comparados os resultados experimentais com modelos matemáticos deste tipo de sistema.

Uma abordagem detalhada é desenvolvida neste trabalho onde descreve-se os vários tipos de dispositivos aferidores; como os excitadores hidráulicos, acústicos ou pneumáticos montados para faixas específicas de pressão e o uso de estímulos próprios para a correta verificação do tempo de resposta de transdutores e sistemas transmissores.

Este trabalho está voltado para a aplicação em sistemas de medição de oscilação de pressão em modelos reduzidos hidráulicos para faixa de baixa pressão, em fenômenos hidráulicos em regime de escoamento livre caracterizado por oscilações de pressão de baixa frequência. Os sistemas transmissores de pressão são avaliados experimentalmente considerando apenas os efeitos das características físicas do tubo que influenciam na propagação de pressão. Identificando-se o sistema em sua forma mais simples através de ensaios, usando-se vários tipos de tubos cilíndricos elásticos, sem o uso de restritores, adaptadores ou câmaras.

Avaliou-se comparativamente as propriedades físicas de cada tubo em termos de comprimento, diâmetro, rigidez e espessura de parede. Procurou-se identificar o comportamento dos sistemas transmissores constituído apenas pelo conjunto tubo-transdutor, onde o transdutor elétrico de pressão tem características de rigidez desprezível em relação ao tubo, propiciando-se algumas simplificações na modelagem do comportamento deste sistema.

Foram ensaiados quatro tipos de tubos cilíndricos com diferente rigidez, e de vários comprimentos e diâmetros. Para tanto foi montado um dispositivo aferidor dinâmico de pressão, que serve para excitar o sistema a ser aferido,

medindo-se a pressão do sistema tubo-transdutor comparativamente ao resultado de medição do transdutor de referência.

A metodologia utilizada para efetuar as comparações entre o sistema tubo-transdutor e o transdutor de referência se baseia na obtenção da função de resposta em frequência. Esta técnica, normalmente aplicada a sistemas de automação e controle, considera o sinal medido na saída do sistema em estudo comparado ao estímulo que excita a entrada do sistema.

Os resultados são fornecidos por funções em amplitude e fase que caracterizam o comportamento do sistema transmissor de pressão. Tornando-se possível identificar e definir a faixa útil de resposta em frequência para cada sistema, sem vibrações mecânicas, atenuações ou distorções. Podendo ser adaptado para a faixa de frequência de operação do aferidor dinâmico e para as faixas de respostas em frequência dos vários sistemas transmissores ensaiados. Este método é ratificado com o uso da função de coerência que registra possíveis interferências externas que possam afetar as variáveis consideradas no fenômeno da propagação da onda de pressão.

Procura-se com este estudo avaliar o desempenho de tubos elásticos em água, de modo a contribuir para a medição dinâmica de pressão em modelos hidráulicos. Desta forma, melhora-se o desempenho da instrumentação eletrônica aplicada a medição de fenômenos físicos hidráulicos, e obtêm-se maior confiabilidade nos resultados dos ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na bibliografia consultada, foram encontradas diversas aplicações de sistemas transmissores nas áreas de engenharia aeronáutica, hidráulica, mecânica e biomédica. Medição de pressão de modelos em túneis de vento; monitoração de pressão arterial intra-corpórea através de catéter; propagação da pressão em sistemas alimentadores de combustível; ensaios em modelos reduzidos hidráulicos, etc., foram algumas das utilizações observadas.

Em algumas publicações: FARELL; SITHEEQ. (1997b), DINIZ (1994), HOLMES; LEWIS (1986), SCHWEPPE (1964) e MELVILLE (1959), foram implementadas montagens de dispositivos aferidores geradores de excitação de pressão, usados para verificar o comportamento e resposta dinâmica de transdutores de pressão.

Em outros trabalhos: FARELL; SITHEEQ. (1997b), HOLMES; LEWIS (1986), NICOLOSI (1981), FRY (1962) e REID; KOPS (1959), foram abordadas a questão da resposta dinâmica em sistemas transmissores de pressão ao longo de tubulações de pequenos diâmetros.

Elaboração de modelos matemáticos para a representação da resposta dinâmica de pressão de sistemas transmissores, foram encontrados em: DOEBELIN (1975), BERGH (1965) e FRY (1962).

2.1 Dispositivos aferidores de pressão dinâmica

Para analisar o desempenho de sistemas de pressão são utilizadas funções de sinais de entrada, que excitam o sistema. Deve-se medir com precisão a saída do sistema ao longo do tempo, para identificar a função de resposta em

freqüência. As funções de entrada típicas são: função degrau, função rampa, função impulso, função senoidal, sinal randômico, etc. Com estas funções excitando o sistema em teste, as observações experimentais podem ser identificadas, pois esses sinais tem variação temporal conhecida. Entretanto, na prática, os dispositivos aferidores geram sinais de pressão aproximados destas funções devido a suas limitações, para excitar o sistema em teste.

Um método empregado para testes de resposta em freqüência em meio líquido é mostrado na Figura 2.1. O dispositivo aferidor do tipo Vibrador Eletrodinâmico (*Eletrodynamic Shaker*), DOEBELIN (1975), é constituído por um vibrador eletro-mecânico excitado por função senoidal de amplitude e freqüência conhecida. Esta acoplado a um conjunto pistão-diafragma, que transmite pressão a câmara do pistão preenchida com fluido. Na câmara do pistão são instalados os transdutores teste e de referência, cuja resposta em freqüência deve ser conhecida na faixa em que se deseja observar a resposta dinâmica. A pressão média, em torno da qual oscila a pressão senoidal aplicada, é fornecida pela pressão de ar ajustada na antecâmara do pistão.

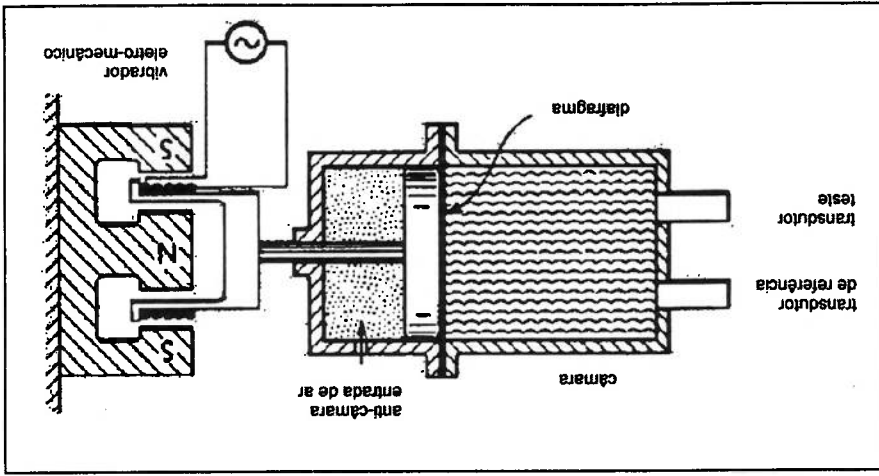


Figura 2.1: Dispositivo aferidor de transdutores de pressão em meio líquido

Este dispositivo vibrador eletro-mecânico é adequado para operar na faixa de média pressão e atinge algumas centenas de Hertz.

Para verificar faixas de respostas em frequência da ordem de alguns milhares de Hertz, são utilizados equipamentos do tipo Dispositivo de Abertura Rápida (*Quick-Opening Devices*), SCHWEPPE (1964); que em geral são constituídos de duas câmaras separadas por uma válvula, sendo uma das câmaras de pequenas dimensões com pressão P2, e outra bem maior com volumes na razão de 1/1000 e pressão P1. Estas câmaras comportam pressões diferentes, e o transdutor sob teste, é instalado na câmara menor e de pressão menor, conforme mostrado na Figura 2.2.

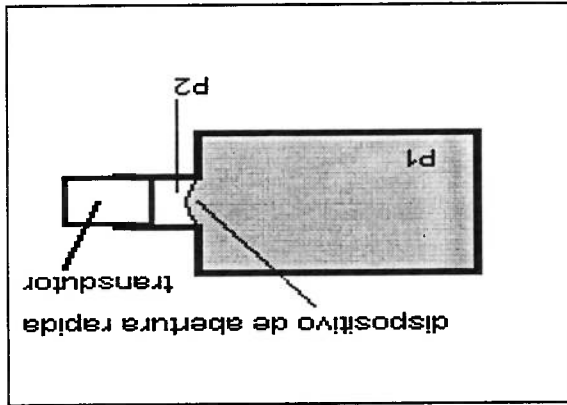


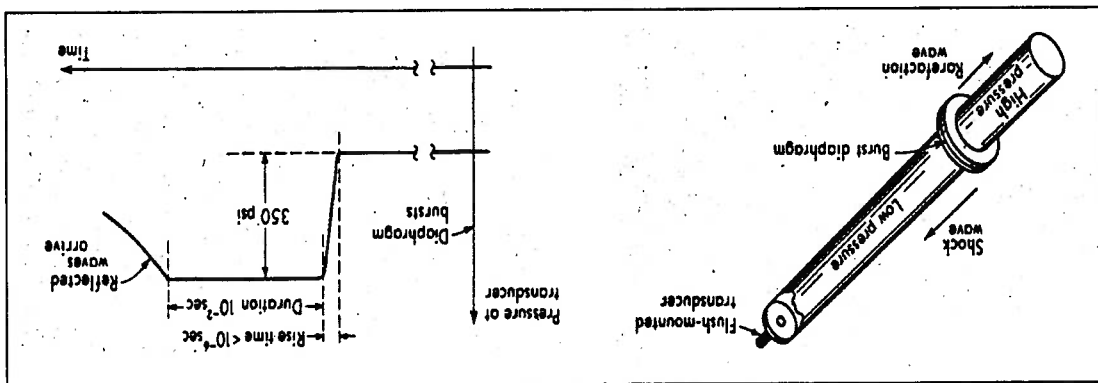
Figura 2.2: Esquema do dispositivo de abertura rápida

A válvula de separação é aberta rapidamente, e o transdutor percebe uma rápida variação de pressão. A pressão entre as duas câmaras pode ser estipulada com grande diferença, simulando uma degrau de pressão que leva cerca de centenas de microssegundos, para atuar. O sinal elétrico monitorado na saída do transdutor traz informações a respeito da resposta em frequência do transdutor sob teste.

Com o rompimento da membrana, uma onda de choque se propaga pelo tubo até atingir o transdutor teste, que pode estar instalado na parede ou no final do tubo de menor pressão. As equações pertinentes ao tubo de choque caracterizadas pelas grandezas de: pressão, temperatura, densidade e velocidade de fluxo de onda unidirecional, determinam a amplitude e duração do degraú de pressão gerado, que vai excitar o transdutor. Este degraú tem um tempo de subida da ordem de microsegundos, como observado na Figura 2.3, onde pode-se avaliar o desempenho do transdutor de resposta rápida.

Uma abordagem mais extensa sobre sistemas de calibração dinâmica de pressão, é apresentada na dissertação de DINIZ (1994), que desenvolveu um gerador periódico primário para calibração dinâmica de transdutores de pressão.

Figura 2.3: Esquema do dispositivo Tubo de Choque



Para aferição de transdutores na faixa de frequência da ordem de dezenas de milhares de Hertz, são utilizados dispositivos do tipo Tubo de Choque (*Shock Tube*), LEDERER (1967) e SCHWEPPE (1964), que basicamente utilizam um tubo longo dividido em dois por uma membrana, com pressões diferentes em cada um dos segmentos do tubo. Este dispositivo pode ser visto esquematicamente na Figura 2.3.

2.2 Ensaios de sistemas transmissores de pressão

Os ensaios experimentais de sistemas transmissores de pressão foram encontradas em vários trabalhos, FARELL et al. (1997), HOLMES; LEWIS(1986), REID; KOPS (1959), MELVILLE (1959), JONES et al., onde é estudada a sua resposta em frequência. O sistema transmissor apresentado, utiliza tubo de pequeno diâmetro, cuja aplicação é transmitir a pressão até um transdutor de pressão. Usualmente os sistemas transmissores utilizam uma montagem, que é constituída de: tubo, câmara e transdutor. Em função da aplicação ou da instalação do sistema são utilizadas conexões ou restrições, tubo flexíveis ou rígidos, trabalhando em meios diversos.

REID; KOPS (1959), estudando a resposta dinâmica de sistemas transmissores, observaram um comportamento interessante. Para os ensaios em ar, compararam alguns tipos de diferentes montagens. Primeiro, foi utilizada uma montagem tubo-câmara-transdutor, que obteve uma resposta em frequência com região plana até 60Hz, ressonância em 100Hz e amortecimento mediano. Em seguida, reduziu-se a câmara tanto quanto possível, e observou-se que a região de resposta plana aumentou ligeiramente. A frequência de ressonância aumentou para 560Hz, tornando o sistema muito pouco amortecido, surgindo ainda uma segunda frequência de ressonância da ordem de 3 vezes o valor da primeira. Em um terceiro ensaio, mantendo-se a montagem do segundo, acrescentou-se um orifício junto a tomada de pressão na entrada do tubo, e verificou-se que o seu sistema tornou-se tão amortecido a ponto de estender a região de resposta plana até aproximadamente 400Hz, expandindo a faixa utilizável para medição de pressão, da ordem de 7 vezes.

Considerando as condições de ensaio: tipo de tubo, rigidez do tubo, dimensões das câmaras, dimensões do orifício, meio ar, tipo de transdutor, tolerâncias de medição consideradas, etc., pode-se dizer, que com este estudo, Reid estimulou muitos pesquisadores.

Em um estudo de transmissão de pressão em tubos de pequenos diâmetros para aplicação em túneis de vento, HOLMES; LEWIS (1986), executaram experimentos com uma montagem do tipo tubo-câmara-transdutor com materiais dos tubos em PVC e aço. Observou-se que, ensaiando em meio ar e com pequenas amplitudes de excitação de pressão, as frequências de ressonância diferiram da ordem de 10%. Eles expandiram o estudo, utilizando montagens com tubos de diferentes diâmetros conectados em série, com restritores de pequenos diâmetros em posições médias dos tubos. Com estas implementações, a região de resposta em frequência plana foi expandida até 300Hz com $\pm 12\%$ de tolerância.

FARBELL et al. (1997a), realizaram estudos de sistemas transmissores de pressão com vários tubos de diferentes materiais, e com montagens de tubos em série. Os diâmetros internos dos tubos utilizados variaram entre 0,5 e 1,5 mm e comprimentos de 500 mm. Eles expandiram a faixa plana de resposta em frequência de 40-55 Hz com tubos simples, até 370 - 500 Hz para sistemas utilizando tubos em série.

Na área de bio-engenharia tem-se aplicações típicas, quanto a medição de pressão com sistemas transmissores. A monitoração de pressão sanguínea utiliza catêteres para registrar o comportamento do batimento cardíaco. WEBSTER (1978) apresentou um estudo das frequências harmônicas da curva de pressão sanguínea e sugere que para um boa fidelidade na medição de pressão sanguínea, o sistema transmissor tenha resposta em frequência até pelo menos 20Hz. Os sistemas transmissores que trabalham com líquidos, devido a maior viscosidade, tem seu desempenho em frequência limitado.

Abre-se portanto, um campo de pesquisa de grande interesse, para o estudo de sistemas transmissores de pressão em meios fluidos.

2.3 Modelos teóricos de sistema fluido dinâmico em tubos

Foram identificados na literatura três tipos de abordagem para a representação de sistemas transmissores de pressão por modelos matemáticos.

DOEBELIN (1975), apresenta um modelo de sistema transmissor do tipo tubo-câmara-transdutor, baseado no balanço da energia cinética do sistema. E faz considerações para um sistema de médio amortecimento e para rápidas variações de pressão.

A Figura 2.4 mostra o esquema do sistema transmissor montado com um tubo de comprimento (l), diâmetro (d), ligado a uma câmara com um membrana ou pistão de massa (m), de diâmetro (dp), que representa o diafragma do transdutor, e uma mola (K_s), que representa a constante de rigidez do transdutor. Este sistema está sujeito a uma pressão de entrada (p_e), que se propaga ao longo do tubo até a câmara. A pressão (p_s) aplicada a membrana do transdutor faz com que esse se desloque na direção de x .

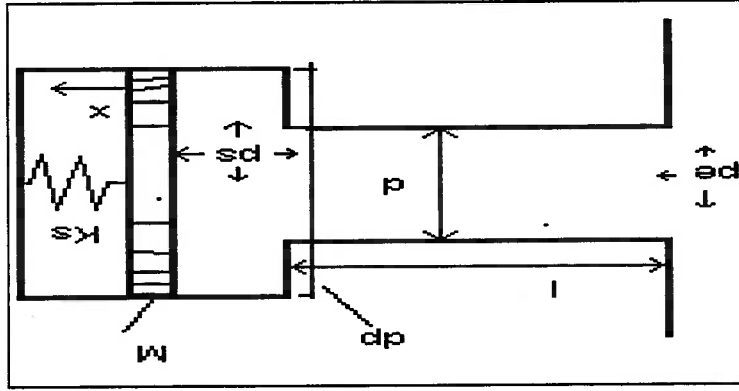


Figura 2.4: Sistema tubo-câmara-transdutor

Para o modelo teórico são feitas as seguintes considerações: tubo rígido, diâmetros do tubo pequeno, escoamento incompressível, regime laminar e fluidos

newtonianos. De acordo com estas considerações, e com a montagem do tipo tubo-câmara-transdutor, o transdutor de pressão instalado na câmara absorve toda a energia do fluxo de fluido, devido a diferença de pressão entre p_s e p_e , provocando um deslocamento na membrana M.

Para achar a relação de equivalência pistão/mola do sistema da Figura 2.4 para o transdutor, a variação de volume pela variação de pressão (C_{vp}), devem ser equivalentes. A variação de volume no transdutor é igual a variação de volume no pistão equivalente, dado por:

$$(2.1) \quad p C_{vp} = \frac{\pi^2 d^4 p}{16K^s}$$

em que p é a pressão aplicada, reorganizando a expressão tem-se:

$$(2.2) \quad \frac{d^4}{16C_{vp}} = \frac{K^s}{\pi^2}$$

A frequência natural angular da membrana do transdutor (ω_m) é igual a:

$$(2.3) \quad \omega_m = \sqrt{\frac{K^s}{M}}$$

Como o tubo é rígido, todo o fluxo de fluido dentro é transmitido à câmara, provocando um deslocamento dx na membrana do transdutor. A relação da velocidade média (v_m) no tubo, transmitida a membrana da câmara é dada por:

$$(2.4) \quad v_m = \left(\frac{d}{dx} \right)_z \frac{d}{dt}$$

Assumindo regime laminar no tubo com um perfil parabólico, tem-se a

velocidade no raio do tubo:

angular (ω_n) do sistema para:

Portanto a massa equivalente da membrana do transdutor (pistão), esta associada a energia cinética transferida pelo fluido. Logo, esta massa equivalente somada a massa da membrana do transdutor (pistão), altera a frequência natural

$$m_e = \frac{\pi \rho l d^2}{3d^2} \quad (2.8)$$

a seguinte expressão:

como a energia cinética na membrana é a massa equivalente (m_e) multiplicada pela metade da velocidade (dx/dt) ao quadrado obtém-se, aplicando-se em (2.7),

$$KE = \frac{\pi \rho l d^2}{6} \left(\frac{d}{d_p} \right)^2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (2.7)$$

integrando a equação 2.6 e utilizando a equação 2.4, obtém-se:

onde:

- KE: energia cinética;
- ρ : massa específica.

$$d(KE) = \frac{(2\pi r dr) l \rho v_i^2}{2} \quad (2.6)$$

O diferencial de energia cinética (KE) desenvolvida no tubo é:

onde:

- r: distância do centro do tubo;
- R: raio interno do tubo;
- v_i : velocidade no tubo, em r;
- v_{ic} : velocidade na linha central do tubo.

$$v_i = v_{ic} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

(2.9)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{M + m_e}}$$

Por fim, substituindo a massa da equação 2.3 e a massa equivalente de

(2.8) em (2.9), obtêm-se:

(2.10)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\omega_m^2} + \frac{16\rho l C_{vp}}{3\pi d^2}}}$$

Se o transdutor utilizado tiver uma massa muito pequena na membrana

comparado com a massa equivalente ($M \gg m_e$), pode-se simplificar a equação

2.10 para:

(2.11)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3\pi d^2}{16\rho l C_{vp}}}$$

O amortecimento pode ser calculado pela perda de pressão em fluidos

viscosos, com o uso da expressão de Poiseuille, onde a força devido a pressão

aplicada a membrana do transdutor (pistão), é igual a força de amortecimento do

sistema membrana (pistão), logo:

(2.12)

$$B \frac{dx}{dt} = \frac{4}{\pi d^2} \frac{32\mu l v_m}{d^2}$$

onde B é amortecimento e μ é viscosidade dinâmica. Aplicando a formula geral

do fator de amortecimento (ζ) de um sistema massa/mola amortecido, tem-se:

(2.13)

$$\zeta = \frac{2\sqrt{K_s}(M + m_e)}{B}$$

substituindo-se os valores e fazendo, $M \gg m_e$, obtêm-se o fator de

amortecimento, dado por:

(2.14)

$$\zeta = \frac{16\mu}{31C_{vp}} \sqrt{\frac{\pi d}{d^3}}$$

Percebe-se a influência das propriedades do tubo e do fluido, sobre a frequência natural e o fator de amortecimento.

Portanto, considerando-se sistemas de médio amortecimento e com pressões variando rapidamente, o efeito da inércia sobre o diafragma do transdutor não pode ser desprezado, devendo o sistema tubo-câmara-transdutor ser modelado como um sistema de segunda ordem, usando o operador de Laplace, dado por:

$$\frac{p^e(s)}{p^s(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.14)$$

O modelo matemático do sistema tubo-câmara-transdutor que permite calcular sua resposta em frequência foi obtido por um método de balanço energético.

O segundo tipo de modelo de sistemas tubo-câmara-transdutor representado por parâmetros elétricos fixos distribuídos foi apresentado por WEBSTER (1978). Através de simplificações pode representar o sistema contínuo por um equação diferencial de segunda ordem.

Os parâmetros elétricos equivalentes são:

- diferença de pressão representada por uma diferença de potencial elétrico equivalente.
- vazão de fluido representada pela corrente elétrica equivalente.
- inércia de fluido devido a inércia (massa) do fluido representada por uma indutância elétrica equivalente.
- resistência devido ao atrito e viscosidade no sistema representada por uma resistência elétrica equivalente.
- complância devido a propriedades elásticas do sistema representada por uma capacitância elétrica equivalente.

O sistema transmissor mostrado na Figura 2.5(a), apresenta um sistema tubo-câmara-transdutor. Um pequeno elemento do tubo do sistema, pode ser representado por parâmetros elétricos discretos, onde: um segmento do tubo tem resistência R_t , indutância L_t e capacitância C_t ; a câmara apresenta o parâmetros resistivo R_c , indutivo L_c e capacitivo C_c ; e o parâmetro capacitivo do diafragma do transdutor C_d . O tubo tem comprimento total l , e diâmetro nominal d .

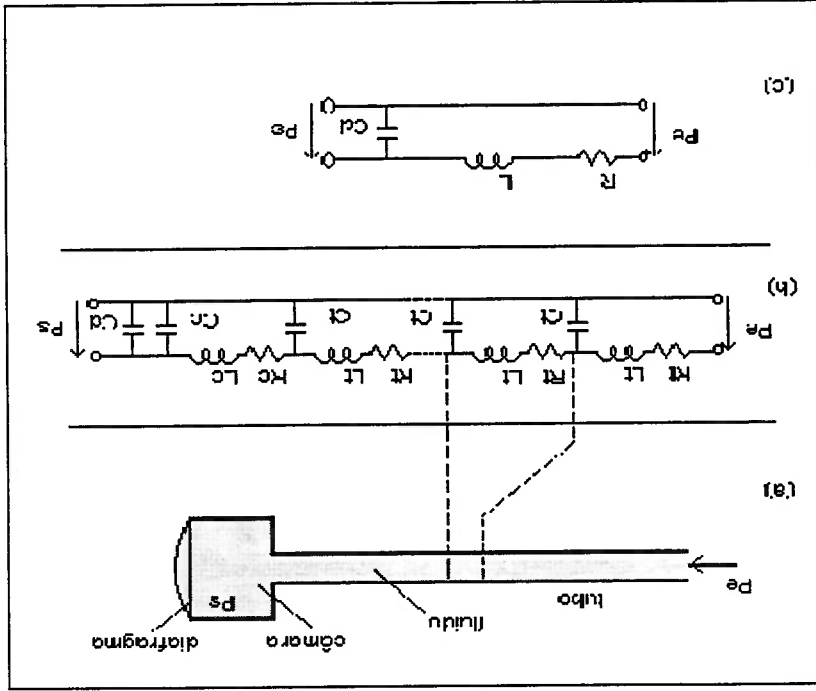


Figura 2.5: Sistema tubo-câmara-transdutor e analogia com modelo elétrico.

Tem-se na entrada do tubo uma pressão p_e , e na câmara uma pressão p_s , que representam os seus respectivos equivalentes elétricos. A Figura 2.5(b) mostra os elementos RLC em série, associados aos parâmetros da câmara e do transdutor. Algumas considerações devem ser feitas para a simplificação do modelo elétrico apresentado: baixa pressão de entrada, tubo rígido e fluido incompressível, logo $C_t=0$. A câmara é considerada rígida, sendo sua deformação desprezível comparada a deformação do diafragma do transdutor. O comprimento do tubo é bem maior do que o comprimento da câmara, logo os

parâmetros do fluido na câmara são desprezados frente a resistência e inércia do tubo. A inércia do fluido é tanto maior quanto maior for o comprimento e o volume do tubo, e tanto mais distribuída quanto maior for a seção transversal do tubo. Como a câmara apresenta diâmetro bem maior do que o diâmetro do tubo, pode-se desprezar L_c .

Com estas considerações, pode-se associar os valores de R_t , e representa-los pela resistência R total do fluido. Da mesma forma, associar os valores de inércia L_t , equivalentes a inércia L total do fluido, passando-se a representar o sistema equivalente elétrico, como mostrado na Figura 2.5(c), onde p_e e p_s são os parâmetros elétricos equivalentes a pressão.

A resistência elétrica representa a queda de pressão no tubo em relação a vazão, e pode ser expressa por:

$$R = \frac{\Delta p}{Q} = \frac{\Delta p}{A v_m} \quad (2.15)$$

onde:

- Δp : diferença de pressão;
- Q : vazão em volume;
- v_m : velocidade média;
- A : área da seção transversal.

Segundo a equação de Poiseuille para regime laminar, tem-se:

$$\Delta p = \frac{32\mu l v_m^2}{d^4} \quad (2.16)$$

onde μ é viscosidade dinâmica, substituído na equação 2.15, resulta:

$$R = \frac{128\mu l}{\pi d^4} \quad (2.17)$$

A inércia do modelo é devido ao movimento de massa do fluido no

tubo, sendo representada por:

$$L = \frac{\Delta P}{\Delta \dot{Q} / \Delta t} \quad (2.18)$$

Utilizando $\dot{Q} = v^m A$; $\Delta F = M \gamma$ e $M = \rho l A$, onde:

- ΔF : força;
- γ : aceleração;

substituindo na equação 2.18, chega-se a:

$$L = \frac{4 \rho l}{\pi d^2} \quad (2.19)$$

A compliância do diafragma do transdutor (C_d) é dado por:

$$C_d = \frac{\Delta V}{\Delta p_s} \quad (2.20)$$

onde:

- ΔV : variação de volume na membrana do transdutor;
- Δp_s : variação de pressão junto a membrana do transdutor.

O circuito elétrico da Figura 2.5(c) pode ser descrito pela função de transferência, obtido com auxílio da transformada de Laplace, representando o modelo simplificado de sistemas tubulares, dado por:

$$\frac{d^s p(s)}{d^s(s)} = \frac{1/L C_d}{s^2 + sR/L + 1/L C_d} \quad (2.21)$$

que é equivalente a função de transferência genérica de sistemas dinâmicos:

$$\frac{d^s p(s)}{d^s(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2s\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (2.22)$$

Percebe-se que nas equações obtidas pelo método de balanço de energia com a representação de parâmetros elétricos concentrados, que as expressões obtidas para a frequência natural, equações (2.11) e (2.23) e para o fator de amortecimento, equações (2.14) e (2.24), são equivalentes, a não ser de uma constante numérica.

Finalmente, no trabalho de BERGH (1965) citado por HOLMES; LEWIS (1986), foi desenvolvido um modelo teórico de resposta dinâmica de pressão para sistemas de medição, incluindo sistemas tubo transmissores, empregando as equações da dinâmica dos meios contínuos. Holmes discute sobre este trabalho abordando a aplicação de tubos transmissores de pequenos diâmetros em ar, fazendo uma comparação teórico-experimental. O modelo foi obtido a partir da equação de Navier-Stokes da conservação da quantidade de movimento e continuidade, para o movimento de ar em tubos de seção circular. O modelo pode ser aplicado a sistemas transmissores do tipo tubo-câmara em série, sendo de bastante complexidade.

Ainda no trabalho de Holmes, foi investigada a resposta dinâmica de tubos transmissores, e comparada com o modelo de Bergh, obtendo-se boa equivalência. Neste caso foram consideradas as seguintes condições: excitação senoidal de pressão, baixo número de Reynolds, tubo assumido como rígido, comprimento do tubo grande em relação ao diâmetro, entre outras.

obtem-se:

Pode-se identificar a frequência angular natural $f_n = \omega_n / 2\pi$, e o fator de amortecimento em relação aos parâmetros RLC. Substituindo estes termos

$$f_n = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{\pi d l C_a}{1}} \quad (2.23)$$

$$s = \frac{32\mu}{l C_a} \sqrt{\frac{\pi d}{1}} \quad (2.24)$$

FARELL et al. (1997a) também empregou o modelo teórico de BERGH (1965), para compará-lo com o resultado de seus ensaios, onde estudou o comportamento dinâmico de tubos de vários tipos de materiais em ar, tendo em vista ensaio em túnel de vento.

3 METODOLOGIA DE ENSAIO

O desempenho de instrumento ou sistema de medição é determinado através da avaliação das suas características estáticas e dinâmicas. Em algumas aplicações é suficiente medir grandezas que variam lentamente no tempo, podendo o instrumento utilizado na medição ter características estáticas de trabalho para se obter resultados precisos. Em outras aplicações, no entanto, lida-se com grandezas que sofrem rápidas variações no tempo, devendo o instrumento para medir tais grandezas, possuir características dinâmicas de trabalho, ou seja, a capacidade do instrumento de acompanhar as variações instantâneas da grandeza medida no tempo.

A aferição estática de um instrumento ou de um sistema de medição qualquer é realizada mantendo-se todas as variáveis que influenciam o sistema com valores constantes, exceto, a que deve ser verificada. A entrada de interesse deve ser variada lentamente e estabilizada em valores dentro da sua faixa de trabalho, para então se medir a saída do sistema para cada valor da entrada. Obtém-se a aferição do instrumento, dada pelo valor medido na saída em relação ao estímulo de entrada, em uma determinada faixa de atuação. Entretanto, como o sistema de medição não reage instantaneamente aos estímulos a que são solicitados, apenas a aferição estática não é suficiente para caracterizar sistema de medição dinâmica, sendo necessário avaliar o comportamento do sistema em relação ao tempo.

Alguns fatores que levam a retardar e deformar a resposta do sistema de medição com relação ao tempo são: a inércia devido a massa, o atrito, a resistência devido a viscosidade, a rugosidade, a velocidade de propagação, a rigidez do sistema, o amortecimento devido a variação volumétrica do sistema, a geometria entre outros. Assim sendo, torna-se necessário avaliar o

comportamento do sistema ao longo do tempo para determinar o quão rápida é a sua resposta.

Para se verificar o desempenho de sistemas que variam rapidamente no tempo podem ser utilizados vários tipos de sinais de entrada para excita-lo, registrando sua resposta no tempo. Os sinais de entrada tipicamente usados para se verificar a resposta em relação ao tempo destes sistemas são: função degrau, função impulso, função senoidal, e sinal randômico. Estimulando-se o sistema a ser estudado com sinais conhecidos, pode-se medir sua resposta em função do tempo e verificar a capacidade do sistema de acompanhar estes estímulos sem atrasos ou atenuações.

Para o desenvolvimento da calibração dinâmica de transdutor ou sistema transmissor, objeto deste trabalho, foi montado um dispositivo aferidor dinâmico de pressão que excita o sistema transmissor de pressão em teste para avaliar seu desempenho, comparando o sinal de saída em relação ao estímulo na entrada. Na prática o dispositivo simulador de pressão gera sinais aproximados das funções típicas que excitam a entrada dos sistemas, obtendo funções de resposta de saída. Considera-se a entrada de pressão como variável e mantém-se as demais condições ambientais estáveis. Pequenas variações de temperatura, umidade e pressão atmosférica, são consideradas desprezíveis. O dispositivo aferidor fornece os estímulos e as condições de instalação para o sistema a ser aferido, sendo necessário acrescentar outros equipamentos para medir a resposta e processar os sinais.

3.1 Tratamento de sinais

O processamento de dados pelo utilizado para o tratamento de sinais, considera na entrada do sistema transmissor em teste, sinal de pressão na forma de ruído randômico, que produz estímulos em uma banda larga de frequência,

sendo possível registrar e avaliar a resposta em frequência na saída do sistema em uma determinada faixa do espectro. Para esta monitoração e avaliação de sinal da resposta de saída, é necessário utilizar instrumento mais precisos e com maior faixa de resposta do que aquele a ser testado.

Neste item será apresentado uma descrição geral e simplificada de métodos de tratamento de sinal. Para mais informações recomenda-se consultar DOEBELIN (1975) que discute de forma completa sobre o assunto. A forma mais comum utilizada para a descrição de sistema dinâmico linear é a correlação entre a variável de entrada comparada com a sua saída. Este equacionamento pode ser escrito de forma matemática generalizada, pela equação diferencial com coeficientes constantes, dada pela seguinte expressão:

$$(3.1) \quad a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

onde:

- y : sinal de saída do sistema;
- x : sinal de entrada do sistema;
- a_i e b_i : são coeficientes constantes;
- t: tempo;
- n e m : números inteiros.

O tratamento dado a este sistema correlaciona o sinal de saída em relação a entrada, e utilizando-se o operador $D \equiv d/dt$, desenvolve-se a expressão 3.1, que representa a função de transferência do sistema:

$$(3.2) \quad Y(D) = \frac{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0}{b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0} X(D)$$

Utilizando a transformada de Laplace, que transforma a expressão no domínio do tempo para o domínio da frequência, através da variável complexa

$s = \sigma + j\omega$, onde σ é um número real, j o número imaginário ($j = \sqrt{-1}$) e ω é a frequência angular, obtém-se a função de transferência no domínio da frequência, dada por:

$$Y(s) = \frac{b^m s^m + b^{m-1} s^{m-1} + \dots + b^1 s + b_0}{a^n s^n + a^{n-1} s^{n-1} + \dots + a^1 s + a_0} \quad (3.3)$$

Os sistemas que possam ser escritos na forma da função de transferência contêm informações próprias, definidas em função da saída em relação ao estímulo de entrada aplicada sobre o sistema. O procedimento matemático com auxílio da transformada de Laplace, pode ser aplicado a sistemas com vários graus de liberdade cuja manipulação algébrica permite a solução de sistemas mais complexos.

A abordagem de tratamento dos dados de ensaios experimentais colhidos, através de sistemas digitalizados computadorizados implica fazer amostragens do sinal no tempo, de forma discreta, permitindo que o processamento da análise matemática contenha todas as informações necessárias para o tratamento dos dados sem a perda de informações significativas. Para tanto é necessário que na aquisição dos dados, se leve em consideração a frequência mínima para se reconstruir um sinal no tempo. Isto é dado pela condição de Nyquist, que diz: "o intervalo de amostragem de um sinal temporal, deve ser menor ou igual a pelo menos duas vezes o período da maior frequência em que se deseja observar o sinal", logo:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{\max}} \quad \text{ou} \quad f_a \geq 2 * f_{\max} \quad (3.4)$$

onde:

$$f_a = \frac{1}{\Delta t};$$

- f_a : frequência de amostragem;

- Δt : intervalo de tempo entre amostragens;

O comportamento do sistema transmissor de pressão foi estudado através da função de transferência. Através desta função matemática expressa no domínio da frequência, que é obtida pela relação dos espectros de potência dos sinais de entrada e de saída do sistema, calculada pela transformada de Fourier, obtêm-se as curvas de resposta em frequência em amplitude de ganho e de variação de fase do comportamento do sistema. O espectro de potência do sinal

- onde:
- $S_x(f)$: representação do sinal x no domínio da frequência;
 - $x(t)$: sinal no domínio do tempo;
 - $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$;
 - Δf : resolução de frequência;
 - T : período;
 - N : número de amostras;
 - n : número inteiro;
 - Δt : intervalo de tempo;
 - j : número imaginário.

$$S_x(m\Delta f) = \frac{T}{N} \sum_{n=1}^N x(n\Delta t) e^{-j2\pi mn/N} \quad (3.5)$$

O tratamento de dados é realizado neste trabalho com auxílio de um analisador de espectro, que fornece o espectro de frequência dos sinais de entrada e de saída do sistema em teste, calculado através da Transformada Discreta de Fourier. Utiliza o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*), que transforma uma função discretizada no domínio do tempo em uma função espectral no domínio da frequência, utilizando a equação da transformada discreta de Fourier, dada por:

- f_{\max} : frequência máxima que se deseja observar.

- $G_{xx}(f)$: espectro de potência médio do sinal de entrada.

- $G_{yx}(f)$: espectro de potência cruzado médio;

- $H(f)$: função de transferência;

onde:

$$(3.8) \quad H(f) = \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)}$$

sinal de entrada, conforme:

espectro cruzado médio de potência em relação ao espectro de potência médio do espectro cruzado médio de potência em relação ao espectro de potência médio do

Obtém-se finalmente a função de transferência $H(f)$, pelo relação entre o

- $S_y^*(f)$: complexo conjugado do sinal de saída em frequência.

- $G_{xy}(f)$: espectro de potência cruzado entre o sinal de entrada e o de saída;

$$(3.7) \quad G_{xy}(f) = S_x(f) S_y^*(f)$$

saída, dado por:

Fourier do sinal de entrada pelo complexo conjugado da transformada do sinal de

E o espectro de potência cruzado é igual ao produto da transformada de

- $S_x^*(f)$: complexo conjugado do sinal de entrada em frequência.

- $G_{xx}(f)$: espectro de potência do sinal de entrada;

sendo:

$$(3.6) \quad G_{xx}(f) = S_x(f) S_x^*(f)$$

complexo conjugado, dado por:

de entrada é igual ao produto da transformada de Fourier deste sinal pelo seu

Esta função é especialmente conveniente quando o sistema em estudo está contaminado por ruídos externos, através da qual pode-se identificar distúrbios que não dizem respeito ao sistema estudado. Sua interpretação física pode ser descrita como sendo a potência de saída devido a entrada, dividido pela potência total de saída. Isto é, se a potência total de saída for somente devido a entrada, então a função de coerência se torna unitária, portanto o sistema não está contaminado por ruído. Entretanto, se a função de coerência tiver valores menores do que a unidade, isto representa que o sistema está sendo influenciado ou contaminado por interferências ou distúrbios externas.

- $\underline{G_{yy}}(f)$: espectro de potência médio do sinal de saída y.
- $\underline{G_{xy}^*}(f)$: conjugado complexo do espectro de potência médio;
- $\underline{G_{yx}}(f)$: espectro de potência cruzado médio;
- γ : função de coerência;

$$\gamma = \frac{\underline{G_{yx}}(f) \underline{G_{xy}^*}(f)}{\underline{G_{xx}}(f) \underline{G_{yy}}(f)} \quad (3.9)$$

definida por:

Buscando obter maior confiabilidade, foi utilizada a função de coerência,

canais (entrada e saída).

realizada em 256 sub-séries de 128 pontos por sub-série para os sinais dos dois obtidos em valores *rms* (*root mean square*). A amostragem dos dados foi elimina o problema de *leakage*, e as amplitudes do espectro de frequência foram ensaiada. Para adequar o tratamento matemático foi usada janela de *Hanning* que em várias faixas de frequência de acordo com a conveniência da condição A configuração de operação do analisador de espectro pode ser utilizada

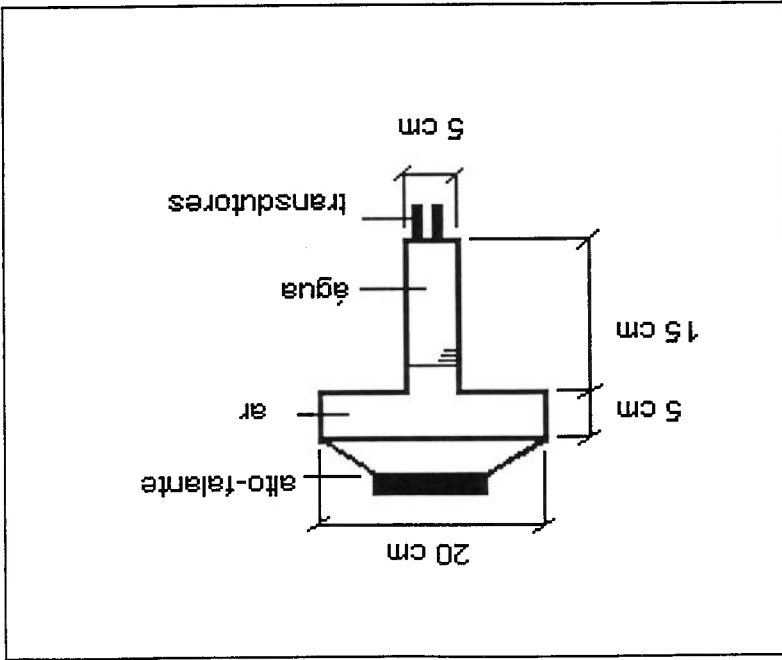
3.2 Descrição do aferidor dinâmico de pressão

Vários tipos de dispositivos para aferição com excitadores de pressão foram encontrados na literatura. Basicamente os dispositivos excitadores são montados para atender faixas de pressão e resposta em frequência para o instrumento ou sistema que se pretende verificar e aferir. Conforme discutido na revisão bibliográfica há excitadores do tipo impulsivos que geram choques de pressão e são utilizados para aferir transdutores com respostas rápidas no tempo. Outros utilizam função senoidal e varrem faixas de frequência de alguns décimos de Hertz até centenas de Hertz, e são usados para transdutores com tempos reduzidos de resposta. Os dispositivos vibradores eletro-mecânicos e alto-falantes atuam em transdutores de média e baixa faixa de pressão e até frequências de centenas de Hertz.

O dispositivo aferidor utilizado neste trabalho, foi projetado para operar com pequenas pressões, e para faixa de frequência até centenas de Hertz, conforme está mostrado na Figura 3.1. É composto de um recipiente com dois tubos cilíndricos de acrílico, sendo o tubo de maior diâmetro acoplado a um alto-falante. Em seu extremo é montado o tubo de menor diâmetro, em que são instalados, em sua extremidade inferior, os transdutores de ensaio. O recipiente é parcialmente enchido com água, que fornece a pressão média de ensaio, sobre a qual o alto-falante atua gerando oscilações de pressão. Este dispositivo acústico de aferição pode trabalhar com pressões médias até 1500 Pascal (cerca de 0,15 metros de coluna d'água - mca) e oscilações de pressão com amplitude da ordem de algumas centenas de Pascal. É adequado para ser utilizado na calibração de transdutores de pequena faixa de trabalho em pressão.

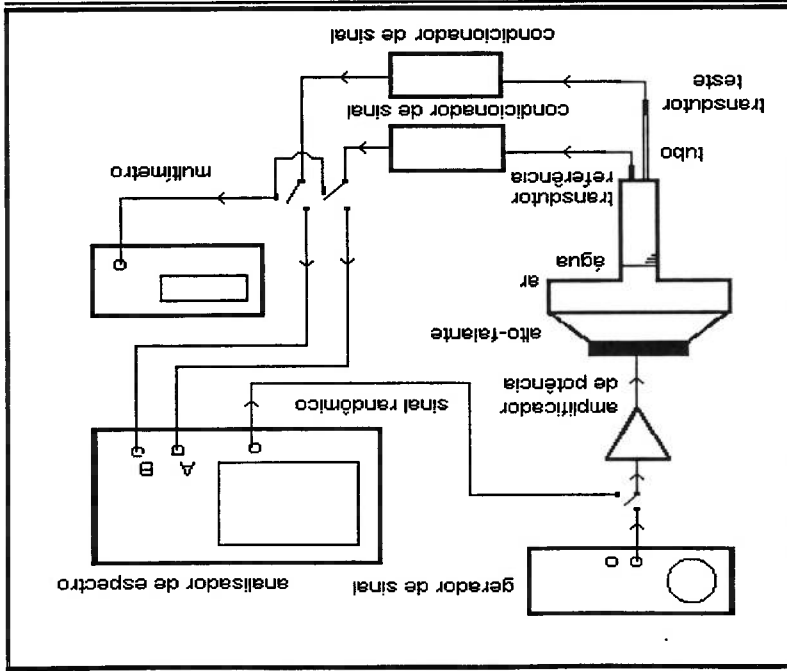
A montagem completa do dispositivo aferidor dinâmica de pressão esta mostrada na Figura 3.2. É composto por: um recipiente que condiciona a pressão de excitação, um alto-falante do tipo woofer, um amplificador de potência, um gerador de funções modelo “3300^A Function Generator”, um analisador de espectro modelo “3582^A Spectrum Analyser”, um multímetro modelo “3478^A Multimeter”, dois transdutores de pressão modelo “8510B-2” e dois condicionadores e amplificadores de sinal de tensão para extensometria modelo “2310 Signal Conditioning Amplifier”.

Figura 3.1: Recipiente do dispositivo aferidor dinâmico de pressão



A resposta do sistema quando excitado por funções periódicas com frequências discretas é captada pelos transdutores sendo monitoradas por um voltímetro *rms* para registrar os níveis médios e amplitude de oscilações de pressão. Os sinais elétricos dos transdutores são amplificados e filtrados nos condicionadores de sinal. Quando o sistema for excitado por sinal randômico proveniente do analisador de espectro, as saídas dos condicionadores devem ser comutadas para a entrada do analisador, onde pode-se observar os espectros de potência e função de transferência em amplitude e fase de resposta dos respectivos transdutores na faixa de frequência de interesse. A fotografia 3.1 mostra uma vista da bancada de ensaios, contendo o recipiente do dispositivo atêrrior e os equipamentos utilizados.

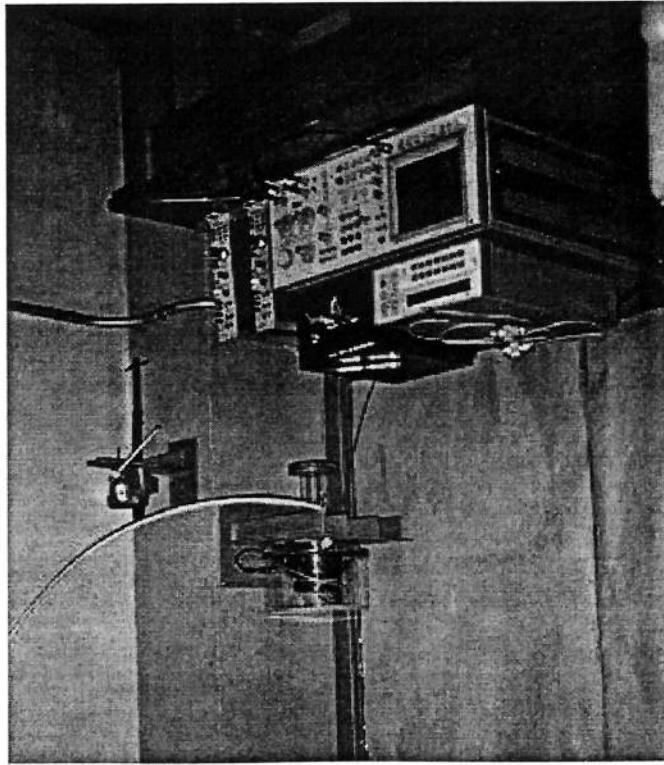
Figura 3.2: Sistema atêrrior dinâmico de pressão



O amplificador de potência foi projetado de tal forma a amplificar as baixas frequências, abrangendo desde 0,5 Hz até 1 KHz, como mostrado a Figura 3.3. Ele também amplifica a faixa até 100Hz, onde o alto-falante não responde com eficiência. Desta maneira o conjunto amplificador e alto-falante transmite uma potência de sinal para o recipiente, o mais plana possível, na faixa de frequência de interesse dos ensaios.

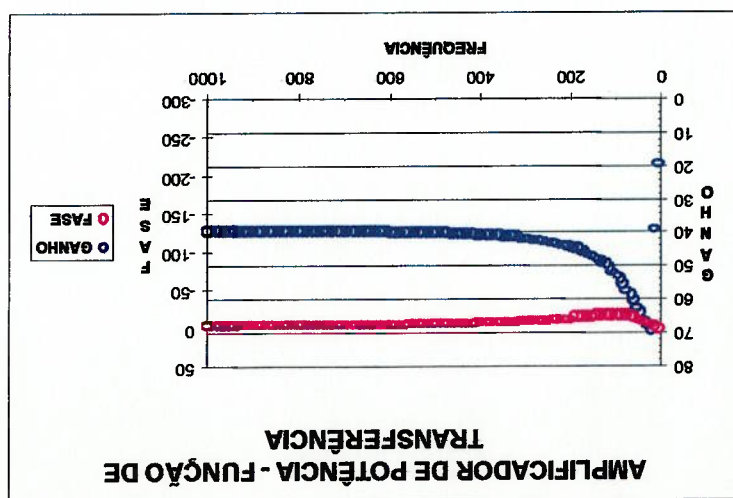
O sistema aferidor dinâmico de pressão utiliza pressão acústica para estimular os sistemas a ser testado. Primeiramente um gerador de funções fornece sinais elétricos, que podem ser periódicos ou randômico, para o amplificador de potência excitar o alto-falante do dispositivo. O alto-falante gera uma onda de pressão através do ar, que incide sobre a superfície da coluna d'água no interior do recipiente do aferidor e se propaga ao transdutor de referência e ao sistema em teste. O transdutor de referência esta instalado diretamente no fundo do recipiente do dispositivo e mede a onda de pressão neste, servindo como referência, a partir da qual devem ser referenciados as medições.

Fotografia 3.1: Dispositivo aferidor dinâmico de pressão e equipamentos



O recipiente do dispositivo foi construído com forma geométrica cilíndrica, de maneira a obter um melhor desempenho da propagação de pressão. Devido a redução da seção transversal do cilindro onde está contido o alto-falante, para a seção transversal da parte inferior do recipiente, há um ganho de pressão fornecida a superfície d'água e transmitida aos transdutores. O volume de água contido na parte inferior do recipiente oferece uma pressão média, que comparado as pequenas variações de volume ocorridas nos transdutores e nos transdutores de pressão, melhoram as condições de transmissão de pressão ao sistema a ser ensaiado. No entanto, os vários meios transmissores por onde passa o sinal de excitação no dispositivo aferidor (amplificador de potência, alto-falante, o ar no recipiente, a coluna d'água e a geometria do recipiente), fazem com que este conjunto ressoe com uma frequência característica. Ela pode ser verificada e registrada pelo transdutor de referência conforme mostrado na figura 3.4. Nota-se pelo espectro do transdutor de referência que há uma ampliação do sinal de pressão na faixa próxima a frequência de 200 Hz, revelando a frequência de ressonância do dispositivo aferidor.

Figura 3.3: Função de resposta do amplificador de potência até 1000Hz.

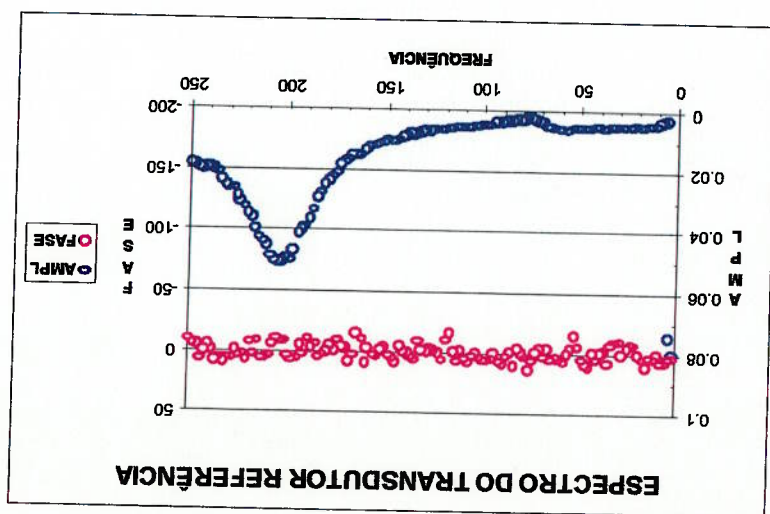


Os transdutores escolhidos para este trabalho, foram definidos principalmente em função da faixa de pressão mais usual em modelos reduzidos hidráulicos. A faixa de frequência selecionada deve atender a resposta dinâmica de ensaios e ser suficiente para verificar a resposta em frequência característica de sistema transmissor de pressão até pelo menos o primeiro pico de ressonância. Foram consideradas também as dimensões dos transdutores para que pudessem ser instalados dentro dos tubos a serem ensaiados. A superfície da membrana sensora, deve ser pequena o suficiente para ser considerada pontual. A escolha de transdutores de pequenas dimensões é aconselhável pois apresenta variações voltmétricas muito pequenas em relação a variação de pressão de excitação.

3.3 Escolha e aferição dos transdutores

Como a composição do espectro do dispositivo, mostrou-se plana até uma determinada região, que não é suficiente para o estudo de sistema transmissor de pressão, optou-se por utilizar um sistema de aferição com um transdutor de referência. Nos próximos itens serão descritos os procedimentos para validar o processo de calibração dinâmica segundo um padrão de referência.

Figura 3.4: Espectro de frequência característico do recipiente do dispositivo aferidor.



Um problema encontrado para o uso destes transdutores em água, foi o acúmulo de bolhas de ar, entre a membrana do sensor e a tela externa de proteção que fazia o transdutor ao ponto de tomada de pressão. Esta dificuldade foi solucionada injetando óleo de silicone com viscosidade próxima a da água, que

trabalho. frequência plana até 25 KHz, ambas suficientes para a faixa de interesse deste do fabricante. Os condicionadores de sinal, respondem com faixa de resposta de da ordem de até 20% da frequência de ressonância de acordo com o infortimação resposta em frequência dos transdutores considerada plana, com boa precisão, é menores do que 1.5% do fundo de escala do transdutor. A região dinâmica de Os erros combinados de linearidade, repetibilidade e histérese são

sendo p pressão aplicada ao transdutor e v tensão de saída equivalente.

$$p \text{ (Pascal) } = 4,899 \cdot 10^{+3} \cdot v \text{ (volts) } \quad (3.11)$$

ou em Pascal:

$$p \text{ (mca) } = 0,5 \cdot v \text{ (volts) } \quad (3.10)$$

relação:

de coluna d'água, cuja curva de calibração para os dois transdutores é dada pela buscando-se minimizar problemas de ruídos elétricos. Foram aferidos até 1 metro d'água. Foram ajustados e calibrados usando-se condicionadores de sinais e aferidos estaticamente em bancadas, com referência de pressão em coluna princípio, atendem as exigências para os ensaios. Os dois transdutores foram KHz, diâmetro de 3.86 mm da membrana sensora. Estas especificações, em 14.700 Pascal (cerca de 1,47 mca), frequência de ressonância da ordem de 70 piezoresistivo de pequenas dimensões, com faixa de trabalho de pressão até Foi escolhido um tipo de transdutor de tecnologia semicondutora

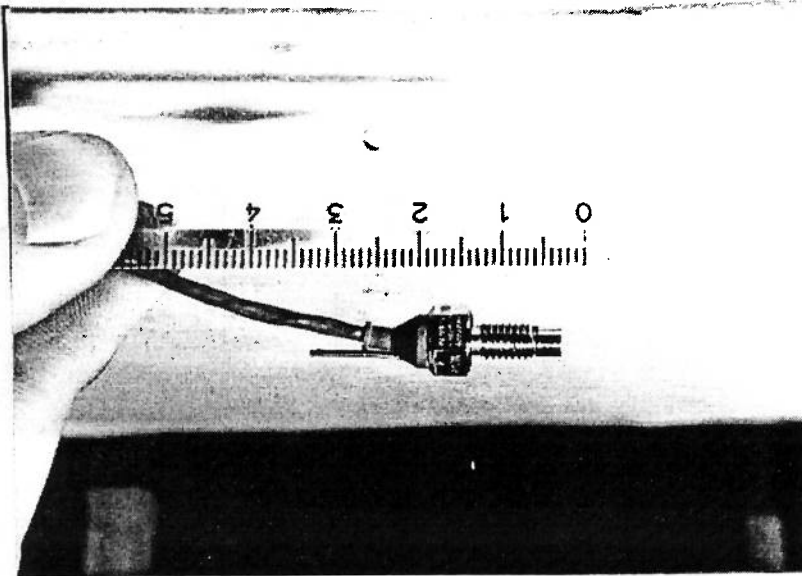
O desempenho dos transdutores escolhidos para os ensaios, em termos de características dinâmicas, foi avaliado de modo a não introduzir distorções indesejáveis ao sistema, devido a respostas em frequência diferentes entre os dois transdutores. Para tanto, foi realizado um ensaio preliminar, onde os dois

foi utilizada.

contornar, a técnica de aferição por comparação com um transdutor de referência distorção a propagação do sinal. Como estes problemas são difíceis de se fluídos e interface entre ar e água, são componentes do sistema que causam gerador de sinal, amplificador de potência, alto-falante, duas câmaras, meios dinâmicas conhecidas fica limitada. O sistema aferidor de pressão composto pelo constituem o sistema aferidor, a obtenção de uma pressão com propriedades Devido as distorções introduzidas pelos vários componentes e meios que

3.4 Descrição da técnica utilizada para a calibração

Fotografia 3.2: Detalhe do transdutor de pressão



transdutor pode ser visto em detalhe na fotografia 3.2. evita o acúmulo de bolhas de ar nesta região de volume morto do transdutor. Este

transdutores foram instalados lado a lado no fundo do recipiente aerificador e estimulados com o mesmo sinal de pressão.

Foram registradas as funções espectrais de frequência de cada transdutor e a função de transferência em amplitude e fase entre os dois transdutores. Os resultados permitiram comparar a resposta em frequência entre estes transdutores, primeiramente em meio ar (figuras 3.5 e 3.6), e em seguida em água (figuras 3.7 e 3.8).

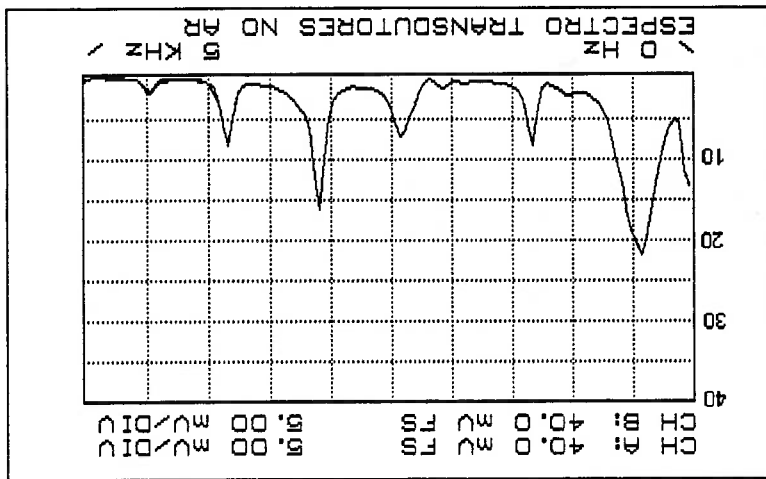


Figura 3.5: Espectro de frequência dos dois transdutores em ar.

- Obs. linhas coincidentes
- linha contínua: espectro do transdutor 1
- linha tracejada: espectro do transdutor 2

Os espectros de frequência vistos até 5 KHz dos dois transdutores com o recipiente preenchido por ar está na Figura 3.5, e são praticamente coincidentes. Estes espectros mostram a curva característica de frequência do dispositivo aerificador dinâmico de pressão com ar, sofrendo as influências e ressonâncias de todos os componentes do sistema aerificador.

Nos ensaios mostrados nas Figura 3.7 e Figura 3.8, o recipiente do dispositivo aferidor foi enchido com um coluna de água menor do que 10 centímetros, e a instalação dos transdutores mantidas na mesma posição no fundo do recipiente. A faixa de frequência amostrada foi até 1 KHZ.

Pode-se perceber pela Figura 3.6, que o ganho da função de transferência (linha contínua) é unitário, representando a equivalência de respostas entre os dois transdutores até a frequência de 3,5 KHZ. Observa-se também nesta figura a equivalência da fase (linha tracejada) que é aproximadamente zero grau, para a mesma faixa. Acima de 3,5KHZ a resposta entre os transdutores passa a ser discrepante. Ocorrem algumas distorções em baixa frequência, devido a desvios de zero (*offset*) dos condicionadores de sinal.

Figura 3.6: Função de transferência em ganho e fase entre os transdutores

- linha contínua: ganho da função de transferência
- linha tracejada: fase da função de transferência

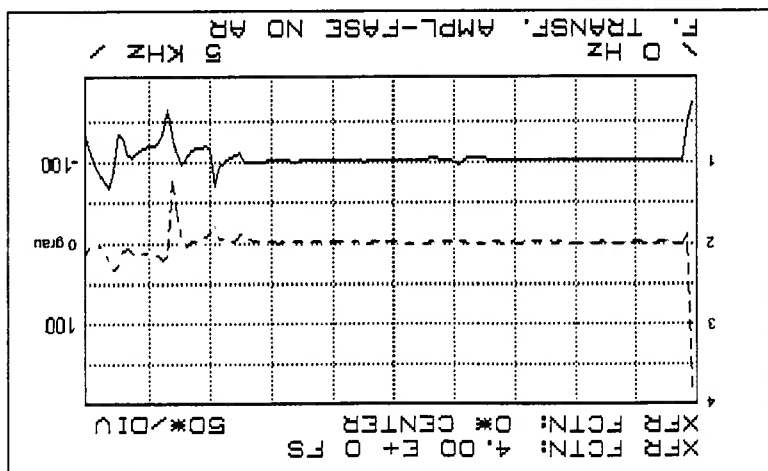
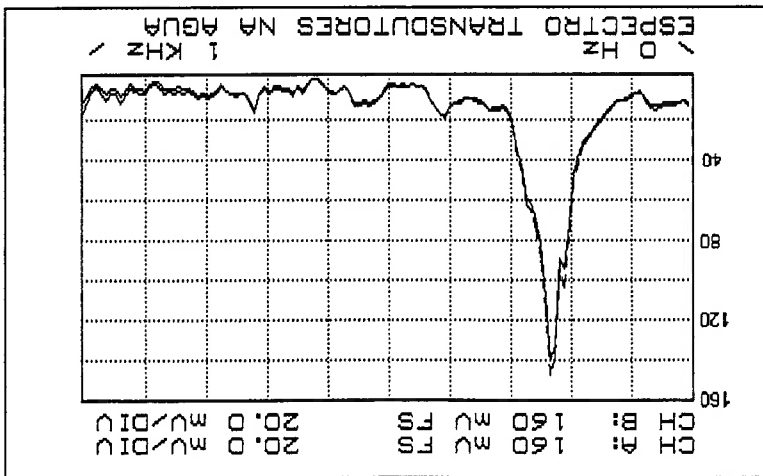


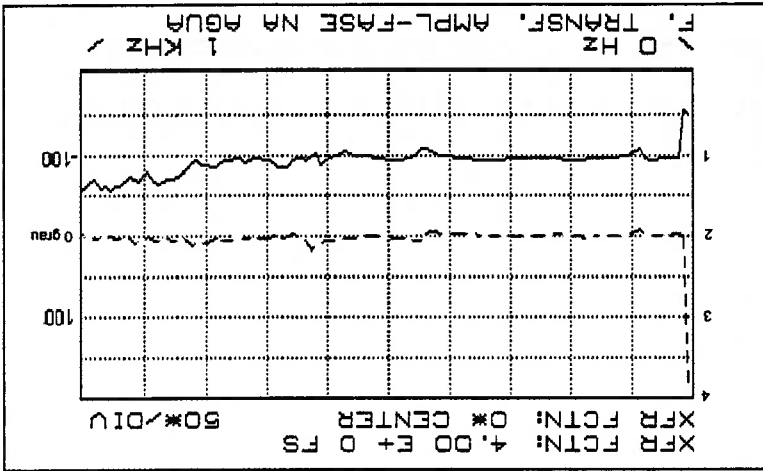
Figura 3.7: Espectro de frequência dos dois transdutores em água.
 - linha contínua: espectro do transdutor 1
 - linha tracejada: espectro do transdutor 2



Pode-se perceber no registro do espectro da Figura 3.7, que novamente há superposição dos dois registros de resposta em frequência dos transdutores, sendo esta a representação da curva característica de resposta em frequência do dispositivo aferidor preenchido com água.

Figura 3.8: Função de transferência em ganho e fase entre os dois transdutores

- linha contínua: ganho da função de transferência
- linha tracejada: fase da função de transferência



Na Figura 3.8 a função de transferência (linha contínua) apresenta equivalência unitária entre os dois transdutores até a faixa de frequência de 600 Hz com tolerância de $\pm 5\%$. A fase da função de transferência (linha tracejada) permanece próxima de zero grau. Mais uma vez ocorreram desvios de zero (*off set*) nos condicionadores de sinal em baixa frequência, que não são devido ao sistema aferidor.

Constatou-se nos resultados destes ensaios que os transdutores utilizados apresentam resposta em frequência equivalentes em ar numa faixa até 3,5 KHz, e que em meio água, considerando as vibrações no recipiente do dispositivo aferidor e da coluna de água, os transdutores tiveram um desempenho equivalente pelo menos até a frequência de 600 Hertz dentro de uma tolerância de $\pm 5\%$.

Como a resposta a estes estímulos se apresentaram equivalentes para os dois transdutores escolhidos, pode-se concluir que estes apresentam características similares. É possível considerar também que a frente de onda de pressão que incide sobre eles no fundo do recipiente seja plana, pois se propagou pelo recipiente do aferidor até atingir os transdutores no mesmo instante, com igual intensidade e sem desvios de fase, até a faixa considerada de desempenho.

3.5 Aferição do sistema tubo transdutor

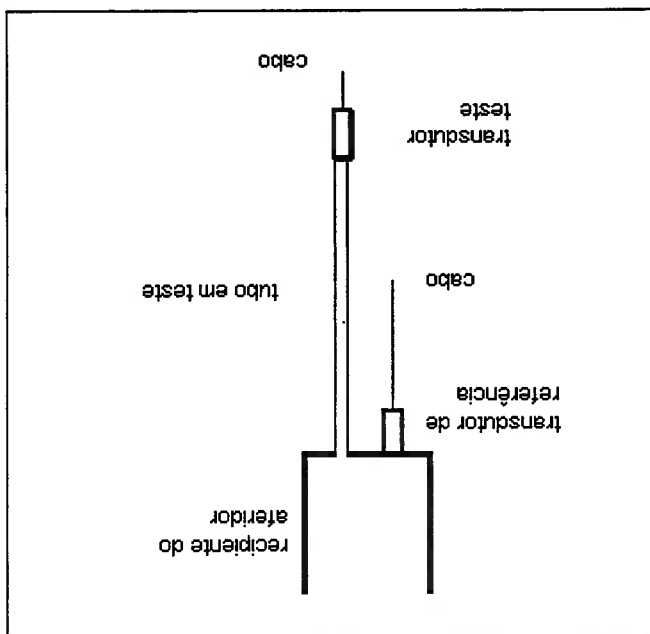
Uma vez constatado que os transdutores apresentam o mesmo desempenho para a faixa de frequência de interesse, conforme a verificação experimental, um deles foi tomado como referência e o outro passou a ser denominado transdutor teste. Para os ensaios com tubo, o transdutor teste é transferido para a extremidade final do tubo. A entrada do tubo é instalada no fundo do recipiente, conforme Figura 3.9.

Foram escolhidos quatro tubos de diferentes características, sendo dois deles de uso comum nos ensaios de modelos reduzidos hidráulicos, e os outros dois tubos de tipos diferentes de material, utilizados para auxiliar no entendimento do comportamento destes sistemas transmissores. Os quatro tipos de tubos são os seguintes: mangueira de polícoreto de vinila ou PVC flexível

3.6 Tipos de tubos utilizados nos ensaios

Ao se medir a pressão no final do tubo foi possível relacioná-la com a pressão na entrada do tubo, medida pelo transdutor de referência, podendo-se então, verificar a influência da propagação de pressão transmitida ao longo do tubo. Esta metodologia foi usada para os vários tipos de tubos ensaiados, seguindo a configuração do sistema aferidor dinâmico de pressão apresentado na Figura 3.9. Uma vez que, o dispositivo aferidor atende as faixas de pressão e frequência relacionadas ao transdutor tomado como referência, este foi considerado adequado para atender a necessidade de aferição de transdutores e transmissores de pressão normalmente utilizados para monitorar as pressões em modelos reduzidos hidráulicos.

Figura 3.9: Esquema de conexão dos transdutores de referência e teste



(mangueira cristal); tubo de polietileno (tubo polifilo); tubo de poliamida 11 (tubo de nylon) e tubo de cobre. As dimensões nominais fornecidas pelos fabricantes de cada tubo estão relacionados na Tabela 3.1 a seguir:

Tabela 3.1: Dimensões nominais dos tubos

TUBOS/DIÂMETROS (mm)	dn (nom - pol)	de (externo)	e (espessura)	d (interno)
CRISTAL	1/4"	10.35	2.00	6.35
CRISTAL	5/16"	11.93	2.00	7.93
CRISTAL	3/8"	13.52	2.00	9.52
POLIFLO	1/4"	6.35	1.00	4.35
POLIFLO	5/16"	7.93	1.57	4.79
POLIFLO	3/8"	9.52	1.57	6.38
NYLON	1/4"	6.35	1.00	4.35
NYLON	5/16"	7.93	1.00	5.93
NYLON	3/8"	9.52	1.57	6.38
COBRE	1/4"	6.35	0.79	4.77
COBRE	5/16"	7.93	0.79	6.35
COBRE	3/8"	9.52	0.79	7.94

São propostas diversas condições de ensaio para que se pudesse verificar as influências devido ao comprimento, ao diâmetro e a rigidez destes sistemas transmissores de pressão. Para tanto, foram utilizados tubos de quatro diferentes comprimentos; 0,5; 1; 2 e 4 m, exceto para o tubo de cobre em que não foi utilizado o tubo de 4 m, e três diâmetros diferentes para cada tipo de tubo com as dimensões da Tabela 3.1.

Na montagem os tubos foram conectados sem a utilização de adaptadores ou qualquer tipo de restrição, seja junto ao recipiente do aferidor ou na extremidade do tubo junto ao transdutor.

As características de rigidez de cada tipo de tubo foram medidas experimentalmente através da medição da variação volumétrica em função da pressão aplicada ao tubo, denominada de Cvp (constante de variação volumétrica

em relação a variação de elasticidade foram obtidos em tabelas de características de metais e materiais plásticos fornecidas pelos fabricantes dos tubos. O diâmetro do tubo foi obtido medindo-se o volume destes para um determinado comprimento, e obtendo-se o diâmetro médio ao longo do tubo. A Tabela 3.2 lista os valores dos módulos de elasticidade, as constantes Cvp por unidade de metro de tubo e os diâmetros médios dos tubos:

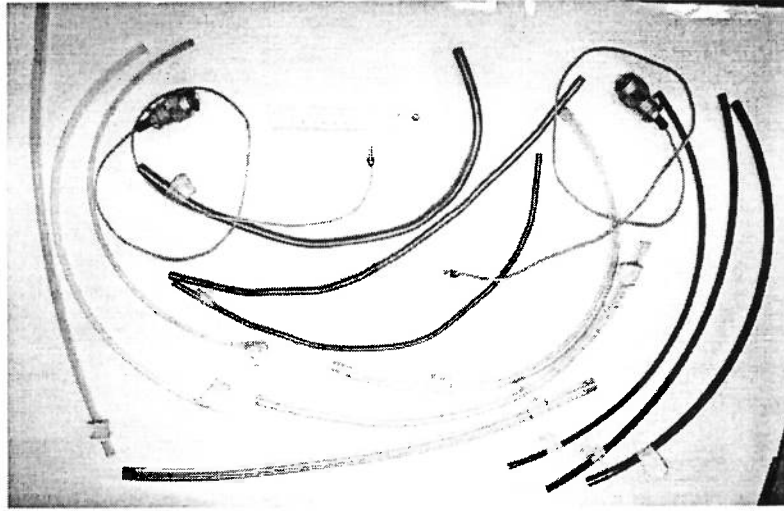
Tabela 3.2: Valores médios medidos experimentalmente e os módulos de elasticidade

TPO DE TUBO	MÓDULO DE ELASTICIDADE	DÍAMETRO MEDIDO	VARIAÇÃO DE VOLUME POR PRESSÃO POR METRO DE TUBO
	E (Pa)	dm (m)	Cvp (m ³ /Pa)/m
CRISTAL 1/4"	1.20E+07	6.15E-03	6.00E-12
CRISTAL 5/16"	1.20E+07	7.93E-03	8.55E-12
CRISTAL 3/8"	1.20E+07	9.41E-03	1.78E-11
POLIFLO 1/4"	7.10E+07	4.30E-03	7.73E-13
POLIFLO 5/16"	7.10E+07	4.39E-03	5.96E-13
POLIFLO 3/8"	7.10E+07	6.37E-03	7.73E-13
NYLON 1/4"	8.00E+07	4.37E-03	1.59E-13
NYLON 5/16"	8.00E+07	5.98E-03	6.75E-13
NYLON 3/8"	8.00E+07	6.43E-03	3.00E-13
COBRE 1/4"	1.07E+09	4.83E-03	6.95E-14
COBRE 5/16"	1.07E+09	6.25E-03	9.90E-14
COBRE 3/8"	1.07E+09	7.95E-03	1.33E-13

Os erros de diâmetro encontrados entre os valores nominais e os medidos foram menores do que 1%, sendo que foram usados os valores experimentalmente medidos de cada tubo. O módulo de elasticidade da manguiteira cristal é tomado para um alongamento de 100%, e os módulos dos tubos poliflo e nylon para alongamentos de 25% e 26% respectivamente.

As constantes de variação volumétrica por pressão foram medidas nos próprios tubos contidos com água, e conectados a uma bomba de pressão. Os tubos são solicitados a cargas de pressão, e em seguida mede-se a variação

volumétrica total no tubo, por várias vezes e com cargas diferentes. A fotografia 3.3 mostra os vários tipos de tubos utilizados nos ensaios.



Fotografia 3.3: Tipos de tubos utilizados e os dois transdutores

3.7 Sinal de excitação de pressão

Há diversos tipos de sinais típicos que podem ser utilizados no dispositivo aferidor para estimular transdutores ou sistemas transmissores de pressão a serem estudados. Alguns destes sinais como os periódicos ou impulsivos permitem verificar a resposta temporal do sistema, comparando o quanto rápido o sistema acompanha o sinal de excitação sem provocar atrasos, atenuação ou distorção. O sinal randômico, utilizado neste trabalho, possibilita excitar o sistema em teste numa gama grande de frequências, com seu espectro apresentando resposta plana no domínio da frequência.

Este sinal juntamente com o recurso matemático da função de transferência, permite comparar diretamente a saída de sinal do sistema, em relação ao estímulo randômico de entrada, obtendo-se a curva de resposta em frequência do sistema testado. Obtém-se de forma prática a característica de desempenho dinâmico do sistema transdutor ou transmissor de pressão.

O tipo de sinal de entrada utilizado para estimular o dispositivo aferidor dinâmico deve ser estudado, um vez que, essas perturbações de pressão induzem um fluxo ao fluido dentro da tubulação. Em escoamentos de conduto forçado, dependendo da variação de pressão induzida ao fluido, este pode comportar-se como em regime laminar ou turbulento em função do número de Reynolds. Esta diferença de regimes modifica a distribuição de velocidade do fluido, influenciando diretamente na lei que rege a perda de carga ao longo do tubo. A perda de carga representa uma característica resistiva e restritiva do sistema, que dependendo do seu valor pode influenciar a ganho da resposta em frequência do sistema tubular.

No sentido de verificar a ocorrência de distorções devido ao tipo de estímulo de pressão, realizou-se um estudo comparativo entre dois tipos de sinais de pressão, atuando em um mesmo sistema, para avaliar as possíveis diferenças de comportamento que poderiam ocorrer, com respeito a função de transferência em amplitude e fase no sistema transmissor tubular.

A comparação do tipo de entrada foi feita utilizando as fontes de excitação de pressão de sinal senoidal e randômico. A montagem do ensaio usa o transdutor de referência, instalado junto a entrada do tubo no fundo do dispositivo aferidor. O transdutor teste foi instalado na extremidade final de um tubo polifio 1/4" de 6,35 mm de diâmetro interno, 1 mm de espessura de parede e 1 metro de comprimento. Nesta montagem, primeiramente, foi utilizada a fonte de excitação de pressão senoidal variando várias frequências discretas, medindo-se os valores do sinal dos transdutores de referência e de teste.

Estes sinais foram medidos no voltímetro *rms*, determinando-se assim a função de transferência do sistema. Em seguida, com esta mesma montagem, excita-se o sistema com um sinal randômico, obtendo-se a função de

transfêrencia atravês do analisador de espectro. Os resultados foram registrados no gráfico da Figura 3.10, onde pode-se comparar o comportamento das funções de transfêrencia devido aos dois tipos de estímulos de pressão.

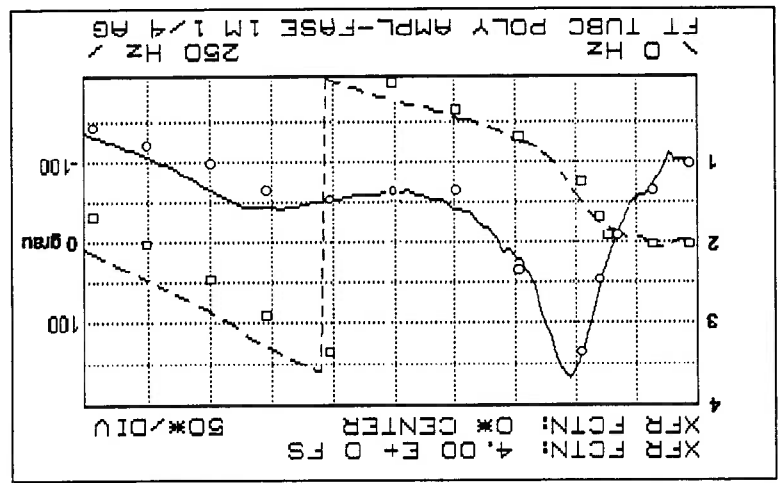


Figura 3.10: Comparação do transmissor excitado por sinal senoidal e randômico

- (°): ganho do sistema com excitação senoidal.
- (□): fase do sistema com excitação senoidal.
- (—): linha contínua: ganho do sistema com excitação randômica.
- (- - -): linha tracejada: fase do sistema com excitação randômica.

Para o sistema tubo transdutor ensaiado, percebe-se uma equivalência entre os ganhos das funções de transfêrencia na faixa de frequência até o primeiro pico de ressonância (54Hz), e acompanhando até cerca de 150Hz. O sistema excitado por senoide, apresenta uma pequena atenuação acima do segundo pico de ressonância (em torno de 170Hz). As fases apresentam desvios crescentes para as frequências acima do primeiro pico de ressonância para o sistema excitado por pressão senoidal.

Devido aos pequenos desvios observados, pode-se considerar o sistema ensaiado com características equivalentes até pelo menos 150 Hz, sendo a resposta em frequência em ganho e fase indiferente ao tipo de estímulo utilizado. Como a faixa de maior interesse está abaixo de 150Hz, o método randômico

47

pode ser empregado sem maiores problemas para a identificação da resposta em frequência dos sistemas.

4 RESULTADO DOS ENSAIOS

Os resultados de ensaios contido neste capítulo, foram obtidos de acordo com a metodologia descrita no capítulo anterior. Os ensaios estão organizados por tipo de tubo, apresentados de forma gráfica e resumidos em tabelas. As figuras dos ensaios contêm as seguintes registos: espectros de frequência dos transdutores de referência e de teste, as funções de transferência entre estes transdutores, e as funções de coerência. Os tubos de policloreto de vinila (PVC flexível), polietileno, poliamida 11 e cobre foram ensaiados com três diâmetros diferentes. Cada um destes tubos possui quatro comprimentos diferentes, sendo que apenas o tubo de cobre não foi ensaiado com comprimento de 4 m, totalizando 45 ensaios, registados em 180 figuras. Para não tornar este capítulo muito extenso, serão apresentadas e comentadas apenas um conjunto de figuras típicas relativas a um ensaio completo. Para os demais tubos serão apresentadas as tabelas contendo os resultados resumidos, e demais que contenham aspectos relevantes para o entendimento dos resultados. Os resultados dos ensaios complementares encontram-se no Anexo B. A Tabela 1 do Anexo A, apresenta o resumo geral dos resultados dos ensaios.

Ensaio-se tubos com quatro tipos diferentes de materiais para avaliar os seus respectivos comportamentos segundo as suas propriedades elásticas. Quatro comprimentos diferentes e três diâmetros foram selecionados para associar o comportamento da resposta em frequência à estas propriedades.

As montagens e conexões dos tubos foram feitas sem adaptadores ou restritores de qualquer tipo. Os encaixes do tubo ao recipiente foram feitos de maneira externa ao tubo. Entre o tubo e o transdutor, foi usada uma luva com tubo de menor diâmetro rosqueado ao transdutor e encaixado internamente no tubo teste. Desta forma pôde-se obter registos referentes somente ao efeito do tubo transmissor de pressão.

Alguns aspectos operacionais do equipamentos são relevantes para esclarecer detalhes dos resultados dos ensaios. Os níveis do sinal de saída dos dois condicionadores, para tensão contínua, foram ajustados com um valor de tensão de alguns milivolts. Isto evita valores relativos muito pequenos no cálculo da função de transferência, podendo ocorrer em alguns ensaios, desvios próximos ao sinal contínuo.

Foram estipuladas certas condições de ensaio para estimular os vários sistemas transmissores, de forma a manter um padrão idêntico para todos os ensaios. Estas condições foram: a pressão média aplicada aos transdutores foi fixada em 1000 pascal (aprox. 0,1 mca). A amplitude do sinal de entrada medido pelo transdutor de referência foi fixada em 0.01 volts (*rms*), equivalente a 50 Pascal de oscilação de pressão, na frequência de 10Hz. Estas condições foram mantidas para a maioria dos ensaios realizados.

As figuras com os espectros de frequência apresentam a resposta de amplitude (*rms*), no eixo vertical à esquerda do gráfico, com unidade em volts, e a fase, escala à direita do gráfico, com unidade em grau. As figuras das funções de transferência apresentam o ganho, eixo vertical à esquerda, representando quanto o sinal do transdutor teste é maior do que o sinal do transdutor de referência. Adicionalmente na escala à direita do gráfico a fase entre eles, em grau. Os gráficos da função de coerência dos tubos possuem escala unitária.

O dispositivo aferidor dinâmico de pressão foi fixado em uma coluna, para que suas vibrações não influenciassem os ensaios. O transdutor teste na extremidade do tubo, foi rigidamente fixado na mesma altura do transdutor de referência.

Foram reconhecidos nos gráficos das funções de transferência, um padrão similar ao comportamento de sistemas diferenciais de segunda ordem. Em alguns ensaios com tubos mais rígidos, observa-se desvios na curva de resposta, localizados em estreitas faixas de frequência. Estes desvios estão associados a vibrações do conjunto dispositivo aferidor e tubo rígido, que não foram possíveis de serem eliminadas. Estas vibrações são observadas na função de coerência para as mesmas frequências.

4.1 Resultados dos ensaios com mangueiras PVC flexível

Os tubos de policloreto de vinila (PVC flexível), são denominados de mangueiras do tipo cristal por sua característica translúcida e flexibilidade. As mangueiras do tipo cristal utilizadas tem diâmetros de 1/4", 5/16" e 3/8" e foram cortadas, montadas e preenchidas com água, em quatro comprimentos nominais (0,5 , 1, 2 e 4 m), para não se ter discrepâncias entre as medidas de tubos obtidos comercialmente de vários fabricantes. Estas propriedades são denominadas por valores nominais, apenas para melhor organizar este trabalho, pois os seus valores medidos encontram-se na Tabela 4.1.

O primeiro ensaio com mangueira cristal 1/4" de 0,5 m, será descrito de forma abrangente, identificando-se os comportamentos comuns para todos os ensaios e fazendo-se uma análise genérica dos resultados obtidos das funções observadas nas figuras.

As Figura 4.1 e Figura 4.2, apresentam os espectros de frequência dos transdutores de referência e de teste respectivamente, dos ensaios com o sistema transmissor do tipo mangueira cristal de 1/4" com 0,5 m. Pode-se notar que a resposta do espectro de frequência do transdutor de referência se manteve constante ao longo da faixa de frequência mostrada na Figura 4.1, com valores aproximados de 0.01 volts (*rms*), cerca de 50 Pascal de oscilação de pressão,

sendo este um comportamento semelhante para todos os ensaios, pois é a característica de dispositivo aferidor.

Constatou-se desvios para sinais contínuos, próximos de zero, devido ao ajuste de *off set* nos condicionadores. Esta característica é comum a alguns ensaios.

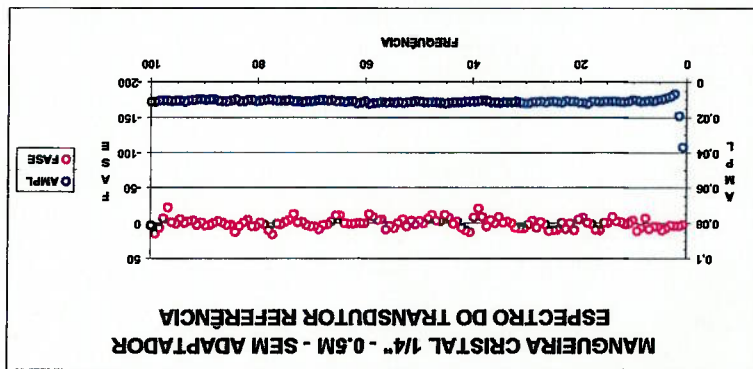


Figura 4.1: Espectro de frequência do transdutor de referência

Quanto a resposta do espectro do transdutor teste, visto na Figura 4.2, nota-se uma elevação da amplitude do sinal na faixa de frequência próxima de 80 Hz, com valor de 0,05 volts (*rms*), cerca de 250 Pascal. Esta é a resposta característica do dispositivo aferidor acrescido da característica própria da mangueteira, para a faixa de frequência de 100Hz.

A fase dos espectros dos dois transdutores, se mostram constantes com pequenos desvios em torno de zero grau, sendo que este comportamento apresentou-se da mesma forma para todos os espectro dos ensaios realizados.

A fase da função de transferência está em torno de zero grau na região de baixas frequências, sofrendo crescentes atrasos a medida que a frequência aumenta. Esta curva apresenta variações lentas e graduais, sendo que o valor de 90 graus corresponde a frequência de ressonância. O comportamento apresentado na Figura 4.3 é semelhante para todos os tubos ensaiados.

tabela 4.1.

O formato da curva de função de transferência é semelhante em todos os ensaios, cujo ganho representa quantas vezes o sinal do transdutor teste, localizado na extremidade do tubo, é maior do que o sinal do transdutor de referência, medindo na entrada do tubo, sendo esta quantidade diferente para cada tubo. Pode-se identificar duas características básicas para este ensaio: o pico mais alto da curva é o ganho correspondente ao ponto de ressonância, e a frequência deste ponto é a frequência de ressonância do tubo. Estes valores são característicos da resposta em frequência dos ensaios, e estão apresentados na

Figura 4.3, apresenta a função de transferência do sistema transmissor. Pode-se observar um formato de curva característica, mostrando uma região na faixa de baixa frequência onde o ganho está próximo da unidade, e na sequência, há um progressivo aumento deste até alcançar o pico de ganho de 4,8, para a frequência de 78,1 Hz, decaindo em seguida.

Figura 4.2: Espectro de frequência do transdutor teste

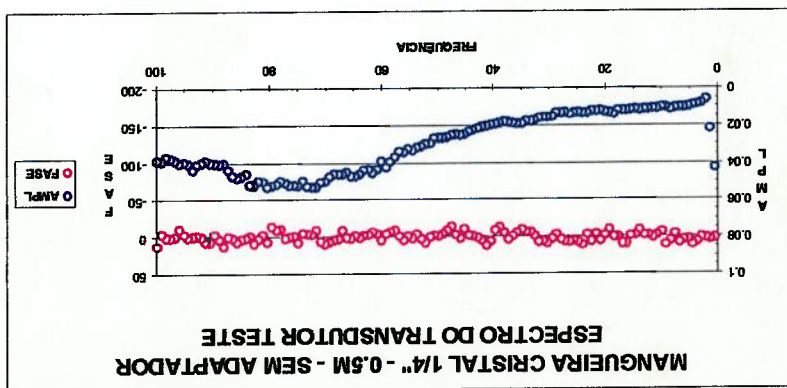
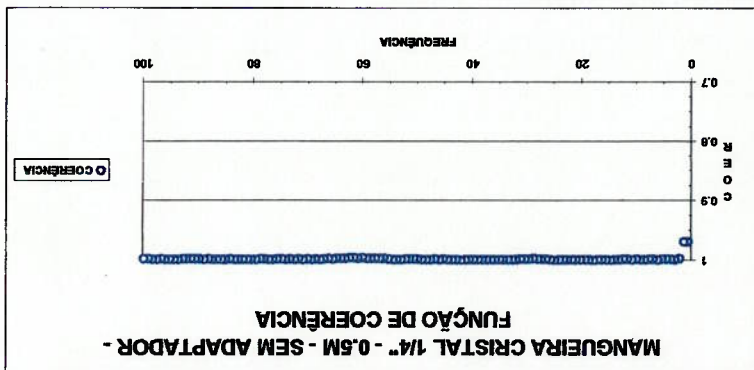


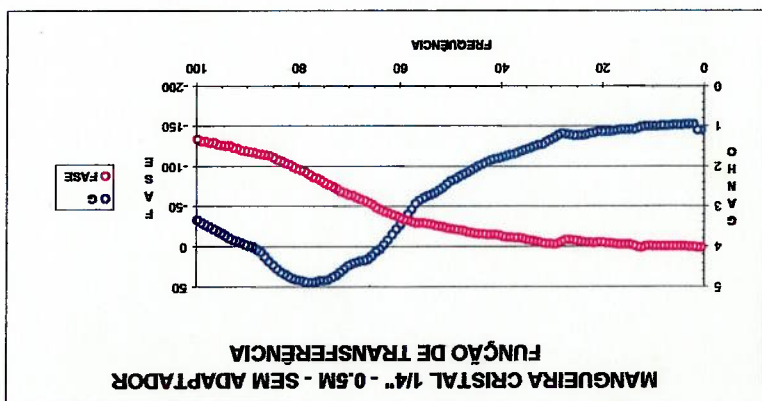
Figura 4.4: Função de coerência do sistema tubo transmissor



condicionadores.

A função de coerência, vista na Figura 4.4, está próxima da unidade em toda a faixa de frequência registrada. Isto significa que toda a energia fornecida na entrada do tubo, está sendo transferida para a saída sem interferências de ruído ou vibrações externas ao sistema. Este comportamento se mostrou idêntico na maioria dos ensaios realizados, exceto em alguns ensaios com tubos rígidos, onde se registrou vibrações do dispositivo aferidor. Há uma pequena queda no valor da coerência quando a frequência tende a zero, que é devido aos ajustes dos condicionadores.

Figura 4.3: Função de transferência entre os transdutores de referência e teste



Os ensaios realizados para os outros comprimentos de mangueira e diâmetros do tubo, apresentaram curvas características semelhantes as curvas vistas neste ensaio. Tal semelhança permitiu identificar os pontos típicos do valor da frequência de ressonância e ganho de amplitude na ressonância de cada ensaio e produzindo uma tabela.

A Tabela 4.1, contém os valores de comprimento (l), os diâmetro internos (d), a frequência de ressonância (f_r) e os ganhos dos picos da frequência de ressonância (G), que caracterizam o comportamento destes sistemas. Estão relacionados nesta tabela todos os ensaios com mangueira cristal, sendo que as tabelas e as figuras relativas aos demais ensaios estão apresentadas nos Anexos A e B, respectivamente.

Tabela 4.1: Tabela com os resultados dos ensaios com mangueira cristal

TUBO TIPO	COMPRIMENTO	DIÂMETRO INTERNO	FREQÜÊNCIA RESSONÂNCIA	GANHO DO PICO
$l =$ (m)	$d =$ (m)	$f_r =$ (Hz)	G	
CRISTAL ¼"	0.52	0.00615	78.10	4.87
CRISTAL ¼"	1.03	0.00615	39.50	3.47
CRISTAL ¼"	2.00	0.00615	18.80	2.95
CRISTAL ¼"	3.96	0.00615	8.40	2.77
CRISTAL 5/16"	0.49	0.00793	97.70	4.00
CRISTAL 5/16"	0.99	0.00793	46.90	3.86
CRISTAL 5/16"	1.97	0.00793	23.80	3.05
CRISTAL 5/16"	3.95	0.00793	10.50	2.92
CRISTAL 3/8"	0.53	0.00941	74.20	3.41
CRISTAL 3/8"	0.99	0.00941	39.10	3.28
CRISTAL 3/8"	2.00	0.00941	17.20	2.98
CRISTAL 3/8"	3.88	0.00941	7.81	2.71

Observando-se a tabela 4.1, pôde-se verificar nos resultados dos ensaios algumas tendências no comportamento destes sistemas. Percebe-se a diminuição da frequência de ressonância em função do aumento do comprimento do tubo.

Nota-se uma diminuição do pico de ressonância em função do aumento do comprimento. Com os valores da frequência de ressonância e de comprimento do tubo foi construído o gráfico da Figura 4.5, onde se verifica claramente o comportamento de diminuição da frequência de ressonância, para os três diâmetros da mangueira cristal ensaiados.

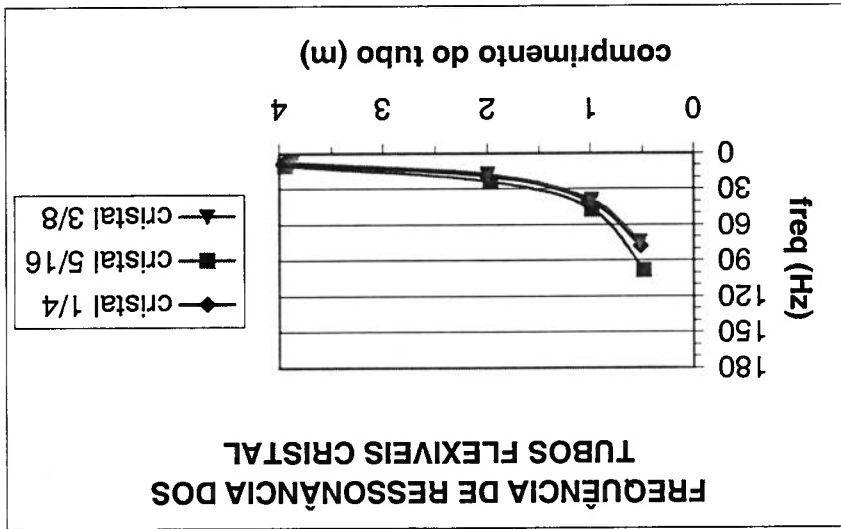


Figura 4.5: Frequência de ressonância em relação ao comprimento das mangueiras cristal

Construiu-se o gráfico da Figura 4.6, que relaciona o comportamento da frequência de ressonância com a variação do diâmetro para os valores de comprimento. Percebe-se uma inflexão destas curvas, em que a maior frequência de ressonância é observada para os tubos de diâmetro intermediário, não se podendo identificar uma relação direta entre estas variáveis.

Os resultados dos ensaios com tubo polifio estão no Anexo B, cujos pontos característicos foram utilizados para se montar a Tabela 4.2. Pode-se verificar a seguinte tendência do comportamento destes ensaios: diminuição da frequência de ressonância em função do aumento do comprimento do tubo, e a diminuição do pico de ressonância em função do aumento do comprimento do tubo, exceto para o caso do tubo de diâmetro 5/16" com 1 m, onde a diminuição do pico não ocorreu.

Os tubos de polietileno são denominados por tubo polifio, tem cor branca, consistência de plástico rígido, e foram ensaiados preenchidos com água. Os tubos polifio utilizados de diâmetros de 1/4", 5/16" e 3/8", foram cortadas, de um mesmo tubo, em quatro comprimentos nominais de 0,5, 1, 2 e 4 m, para não se ter discrepâncias entre os diâmetros dos tubos. Os valores medidos para estes tubos encontram-se na Tabela 4.2.

4.2 Resultado dos ensaios com tubo de polietileno

Figura 4.6: Frequência de ressonância em relação ao diâmetro das mangueiras cristal

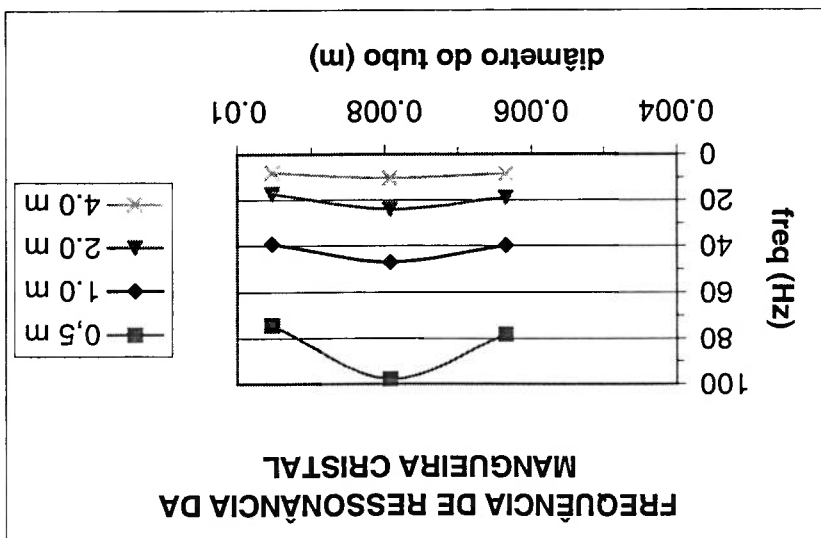


Tabela 4.2: Tabela com os resultados dos ensaios com tubos poliflo

TUBO TIPO	COMPRIMENTO	DIÂMETRO INTERNO	FREQÜÊNCIA RESSONÂNCIA	PICO
	l= (m)	D= (m)	f _r = (Hz)	G
POLIFLO 1/4"	0.48	0.00430	145.00	20.20
POLIFLO 1/4"	0.97	0.00430	75.80	16.00
POLIFLO 1/4"	2.01	0.00430	35.90	9.73
POLIFLO 1/4"	3.97	0.00430	19.30	5.02
POLIFLO 5/16"	0.50	0.00439	121.00	12.70
POLIFLO 5/16"	0.99	0.00439	71.10	13.40
POLIFLO 5/16"	1.97	0.00439	36.30	10.00
POLIFLO 5/16"	3.96	0.00439	19.50	7.34
POLIFLO 3/8"	0.49	0.00637	137.00	28.00
POLIFLO 3/8"	0.99	0.00637	64.80	15.30
POLIFLO 3/8"	1.99	0.00637	34.40	9.66
POLIFLO 3/8"	4.01	0.00637	17.40	8.32

Com os valores da frequência de ressonância e de comprimento apresentados na tabela 4.2, foi construído o gráfico da Figura 4.7, onde se verifica claramente o comportamento de diminuição da frequência de ressonância, para os três diâmetros do tubo poliflo ensaiados, em função do aumento do comprimento do tubo. Verifica-se também que as frequências de ressonância foram maiores do que as verificadas para a mangueira cristal.

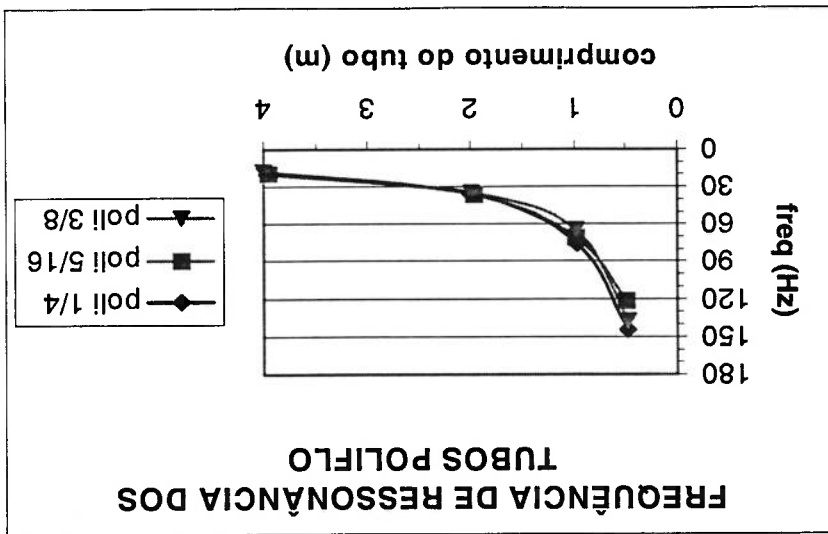


Figura 4.7: Frequência de ressonância em relação ao comprimento dos tubos do tipo poliflo

Quanto ao comportamento da frequência de ressonância segundo a variação do diâmetro, construiu-se o gráfico da Figura 4.8, para os três diâmetros. Percebe-se para grandes comprimentos valores quase constantes da frequência de ressonância em função do aumento do diâmetro. Este fenômeno não se observa para os tubos de 0,5 m. Deve-se lembrar que, a espessura da parede do tubo de 1/4" é menor do que a espessura de parede dos tubos de menor diâmetro.

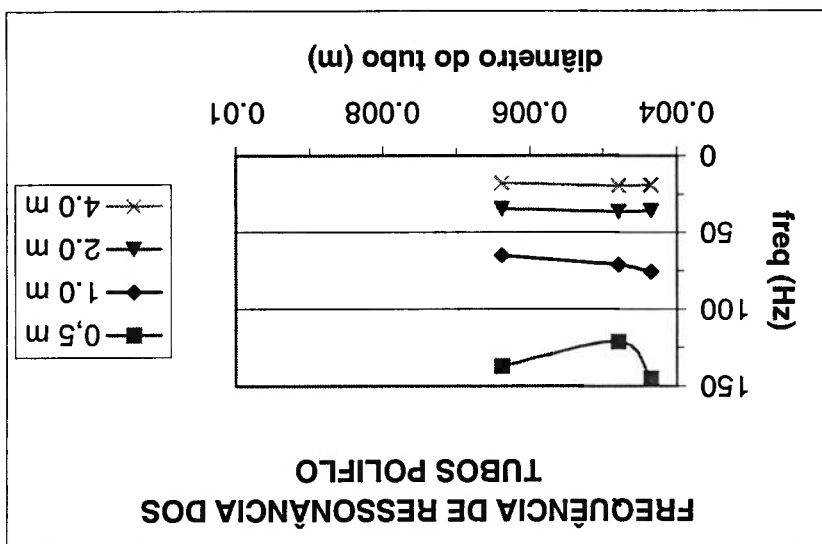


Figura 4.8: Frequência de ressonância em relação ao diâmetro dos tubos poliflo

4.3 Resultado do ensaio com os tubos de poliamida 11

Os tubos de poliamida 11, foram denominados por tubo de nylon, tem cor preta, consistência de plástico rígido e foram preenchidos com água. Os tubos de nylon utilizados tem diâmetros nominais de 1/4", 5/16" e 3/8" e foram cortados, de um mesmo tubo, em quatro comprimentos de 0,5, 1, 2 e 4 m, para não se ter discrepâncias entre os diâmetros dos tubos. Os seus respectivos valores medidos encontram-se na Tabela 4.3. As figuras com os resultados dos ensaios em tubos de nylon estão no Anexo B, cujos pontos característicos foram utilizados para se montar a Tabela 4.3.

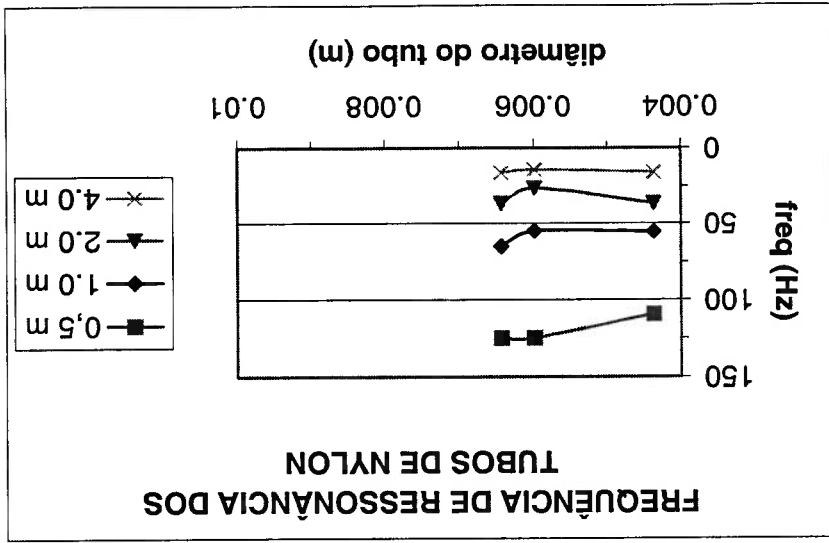
Com os valores da frequência de ressonância e de comprimento da tabela 4.3, foi construído o gráfico da Figura 4.9, onde se verifica novamente o comportamento de diminuição da frequência de ressonância, para os três diâmetros do tubo de nylon ensaiados, em função do aumento do comprimento do tubo. As frequências de ressonância contidas neste gráfico são da ordem de grandeza daquelas verificadas para os tubos do tipo polifio.

TUBO TIPO	COMPRIIMENTO	d = (m)	Fr = (Hz)	PICO
NYLON 1/4"	0.49	0.00437	109.00	12.00
NYLON 1/4"	0.99	0.00437	55.50	7.95
NYLON 1/4"	1.99	0.00437	32.00	7.31
NYLON 1/4"	4.00	0.00437	15.80	6.27
NYLON 5/16"	0.49	0.00598	125.00	11.90
NYLON 5/16"	0.99	0.00598	54.70	10.80
NYLON 5/16"	1.99	0.00598	26.20	7.48
NYLON 5/16"	4.00	0.00598	14.30	6.28
NYLON 3/8"	0.49	0.00643	125.00	11.00
NYLON 3/8"	0.99	0.00643	65.00	15.50
NYLON 3/8"	1.99	0.00643	36.60	9.36
NYLON 3/8"	4.00	0.00643	16.40	6.20

Tabela 4.3: Tabela com os resultados dos ensaios com tubos de nylon

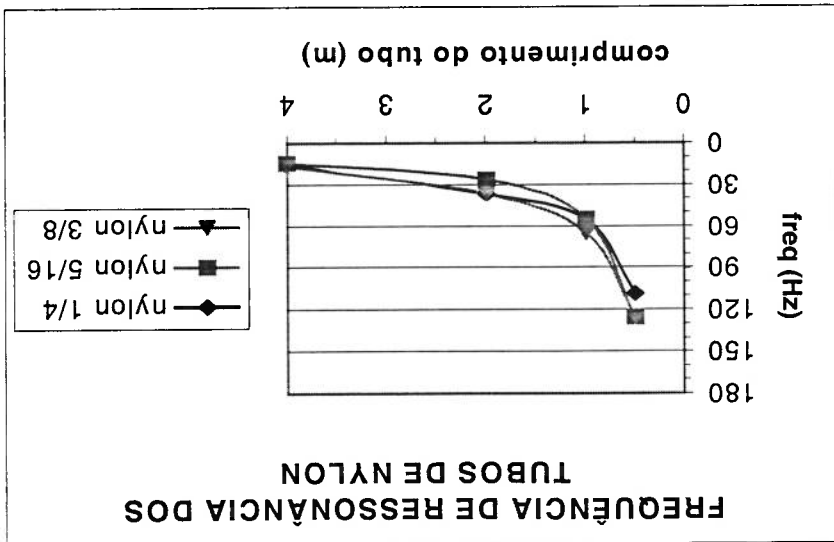
Novamente observa-se na Tabela 4.3, as seguintes tendências do comportamento destes ensaios: diminuição da frequência de ressonância em função do aumento do comprimento do tubo, a diminuição do pico de ressonância em função do aumento do comprimento (exceto para o caso do tubo de diâmetro 3/8" com 1m, onde a diminuição do pico não ocorreu).

Figura 4.10: Freqüência de ressonância em relação ao diâmetro dos tubos de nylon



Quantos ao comportamento da frequência de ressonância segundo a variação do diâmetro, pode ser visto no gráfico da Figura 4.10, para os três diâmetros, onde se percebe um valor quase constante da frequência de ressonância em função do aumento do diâmetro. Deve-se observar que, a espessura da parede do tubo de 3/8" é maior do que a espessura da parede dos tubos de menor diâmetro.

Figura 4.9: Freqüência de ressonância em relação ao comprimento dos tubos nylon



4.4 Resultado do ensaio com tubos de cobre

Os tubos de cobre, são de material com maior rigidez do que os anteriores, e foram preenchidos com água. Os tubos de cobre utilizados tem diâmetros nominais de 1/4", 5/16" e 3/8" e foram cortadas, de um mesmo tubo, em quatro comprimentos nominais de 0,5 , 1 e 2 m, para obedecer os mesmos critérios para todos os ensaios. Seus valores medidos e pontos característicos verificados nos ensaios encontram-se na Tabela 4.4, e as figuras com os ensaios dos tubos de cobre estão no Anexo B.

Pode-se observar, segundo a Tabela 4.4, as seguintes tendências de comportamento destes ensaios: diminuição da frequência de ressonância em função do aumento do comprimento do tubo; quanto ao pico de ressonância não há uma tendência definida relevante.

Tabela 4.4: Tabela com os resultados dos ensaios com tubos de cobre

TUBO TIPO	COMPRIENTO	DIÂMETRO	FREQUÊNCIA RESSONÂNCIA	GANHO DO PICO
	l= (m)	d= (m)	f _r = (Hz)	G
COBRE 1/4"	0.51	0.00483	135.00	4.66
COBRE 1/4"	1.02	0.00483	105.00	5.97
COBRE 1/4"	1.98	0.00483	71.10	5.91
COBRE 5/16"	0.49	0.00625	158.00	30.90
COBRE 5/16"	0.99	0.00625	113.00	14.70
COBRE 5/16"	2.04	0.00625	68.00	20.00
COBRE 3/8"	0.48	0.00795	172.00	19.80
COBRE 3/8"	1.03	0.00795	133.00	20.30
COBRE 3/8"	2.02	0.00795	78.90	41.10

Com os valores da frequência de ressonância e de comprimento da tabela 4.4, foi construído o gráfico da Figura 4.11, onde se verifica claramente o comportamento de diminuição da frequência de ressonância, para os três diâmetros do tubo de cobre ensaiados, em função do aumento do comprimento

do tubo. Este material apresenta frequências de ressonância maiores do que as observadas para os tubos políftio e de nylon.

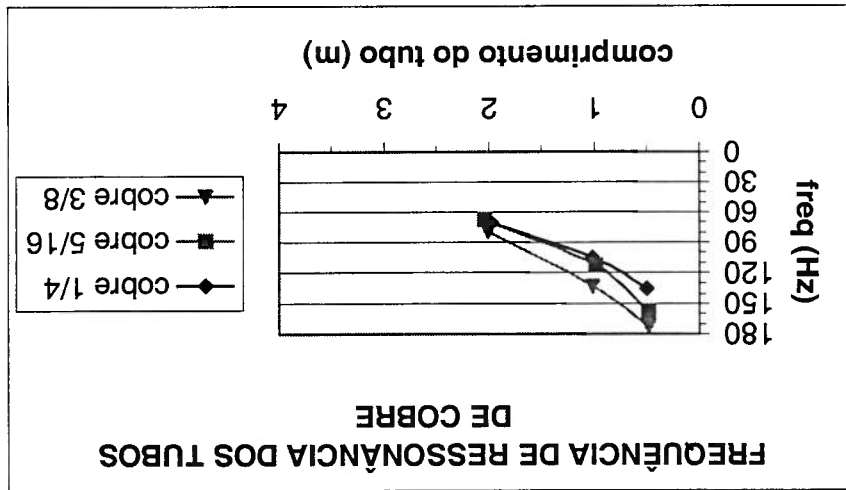
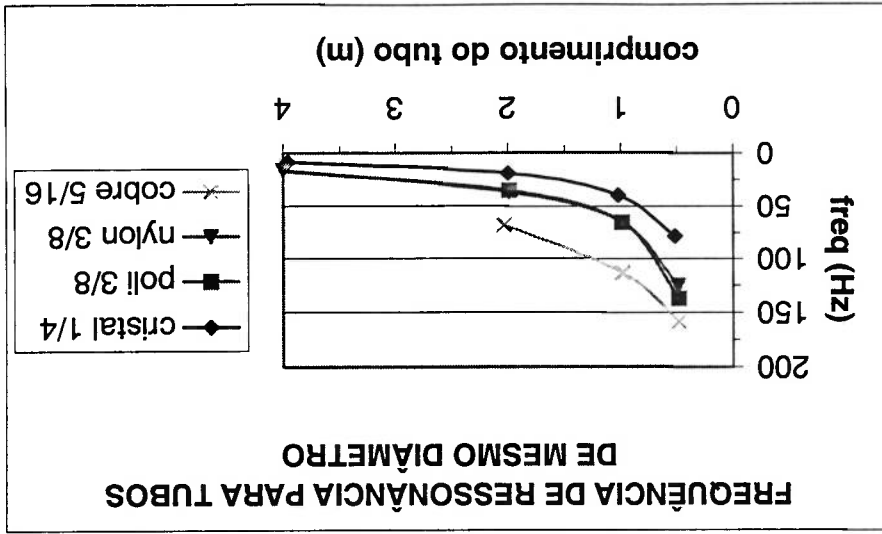


Figura 4.11: Frequência de ressonância em relação ao comprimento dos tubos de cobre

Construiu-se o gráfico da Figura 4.12, relacionando o comportamento da frequência de ressonância segundo a variação do diâmetro, para os três diâmetros. Percebe-se uma pequena elevação da frequência de ressonância em função do aumento do diâmetro. Deve-se salientar, que o tubo apresentou espessuras irregulares devido a excentricidade entre as diâmetros externo e interno do tubo.

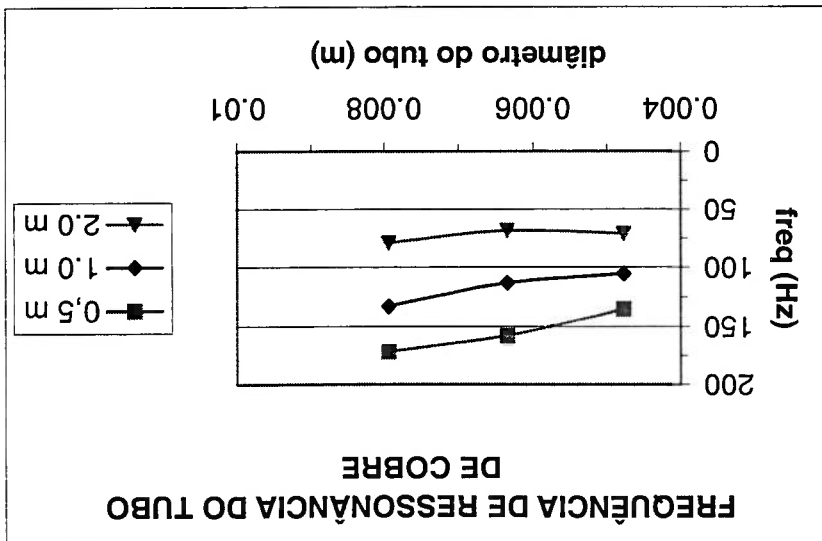
Figura 4.13: Frequência de ressonância de tubos de mesmo diâmetros em relação ao comprimento



A Figura 4.13, ilustra o comportamento da frequência de ressonância para tubos de mesmo diâmetro de sistemas transmissores de pressão de quatro tipos de materiais. Na escala vertical tem-se a frequência do primeiro pico de ressonância do tubo em função do comprimento do tubo no eixo horizontal.

4.5 Comparação de resultados em tubos de mesmo diâmetro

Figura 4.12: Frequência de ressonância em relação ao diâmetro dos tubos de cobre



Outros dois aspectos importantes referem-se a diminuição da frequência de ressonância em função do aumento do comprimento e ao aumento da frequência de ressonância em função da maior rigidez do tubo. Estes aspectos também são típicos de um sistema de segunda ordem, para os quais pode-se utilizar uma equação diferencial para representá-los. As características típicas destes sistemas estão apresentadas nos gráficos da Figura 4.14, vista a seguir:

Observou-se nos resultados experimentais, que a curva de resposta em frequência possui um comportamento típico de sistemas de segunda ordem, onde se observa uma faixa de frequência de resposta unitária e posteriormente um pico de ressonância.

4.6 Análise dos resultados

Pode-se notar que a frequência de ressonância aumenta quanto maior a rigidez do tubo, para um mesmo comprimento. Para a mangueira cristal flexível percebe-se as menores frequências de ressonância, enquanto para o tubo de cobre as maiores em todos os comprimentos. Os tubos polífilo e nylon apresentaram frequências próximas por terem módulo de elasticidade e espessura de parede do tubo próximos.

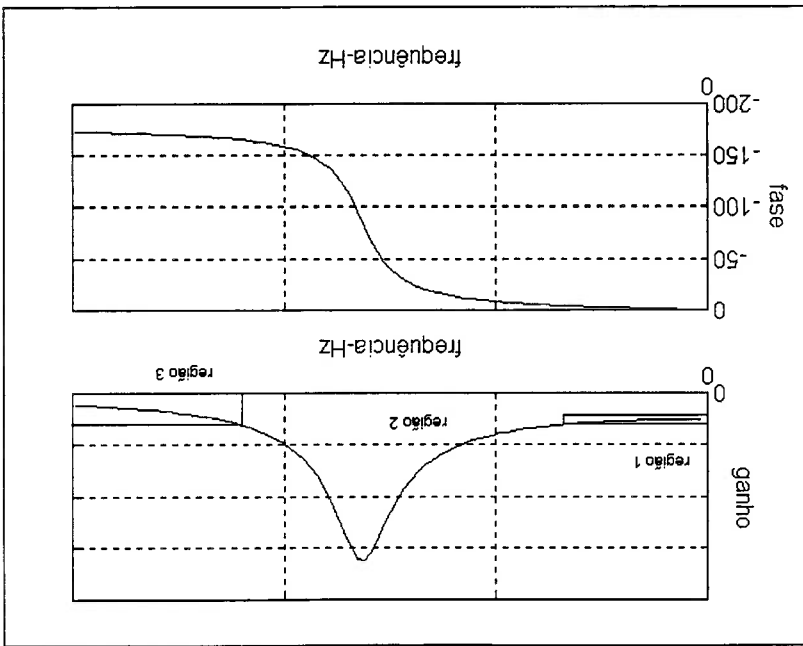
Como foram conservadas as mesmas montagens para os tubos ensaiados, mantendo-se constante a densidade, a massa, a temperatura, a viscosidade do fluido e os diâmetros, a característica influente passa a ser apenas a rigidez do tubo.

Pode-se observar nesta curva três regiões distintas: a região 1, quase plana, localizada na faixa das baixas frequências, que em termos de resposta em frequência representa a relação unitária entre o sinal de saída e o sinal de entrada

O ganho da parte mais alta da curva típica está associado ao fator de amortecimento, e quanto menor o seu valor de pico mais amortecido é o sistema representado, por outro lado, quanto maior o pico menos amortecido é o sistema. A frequência associada a este pico é denominada frequência de ressonância e representa a frequência com que o sistema oscila com maior amplitude. Esta curva pode representar portanto, a função de transferência do sistema transmissor de pressão do tipo tubo cilíndrico elástico.

Esta curva apresenta em seu formato características típicas que são associadas aos pontos identificados experimentalmente. A frequência de ressonância e o ganho do pico da frequência de ressonância são características da curva, que quando tomados com parâmetros definem os termos da equação diferencial.

Figura 4.14: Curva típica da resposta em frequência de sistemas de segunda ordem



do sistema. A região 2, a mais elevada da curva, corresponde a faixa de frequência onde o sistema ressona com maior intensidade. É definida uma terceira região onde o ganho da curva decresce. Um ponto característico da fase é quanto esta apresenta o valor de -90 graus equivalente a frequência de ressonância.

Esta caracterização é adequada para se definir uma faixa de frequência conveniente na utilização de sistemas transmissores de pressão em medições, onde é esperado que não ocorram atenuações e nem amplificações do sinal. Portanto, é aconselhável utilizar a região 1 da curva para a medição de pressão dinâmica.

A tolerância quanto a largura de faixa de ganho, depende da aplicação para a qual se deseja medir as oscilações de pressão e da precisão desejada. A faixa de tolerância aqui adotada, admitindo um erro de $\pm 5\%$, razoável para medições experimentais. Disto resulta uma faixa útil (região 1), para tubos elásticos ensaiados de um percentual médio de 20% da frequência de ressonância. Este valor depende do fator de amortecimento que altera a faixa de influência do pico de ressonância, variando a faixa de uso.

5 MODELO MATEMÁTICO

Entre as características observadas nos resultados dos ensaios apresentados no capítulo anterior, pôde-se verificar a tendência das curvas de resposta em frequência registradas, em que as funções de transferência dos vários tubos ensaiados, mostraram uma semelhança de forma com as equações diferenciais de segunda ordem. Esta semelhança sugere que os sistemas transmissores de pressão possam ser modelados por uma equação diferencial, pelo menos até a faixa de frequência que envolve o pico de ressonância.

Sendo assim, é possível a elaboração um modelo matemático, em que as características observadas nos ensaios pudessem ser levadas em conta para estabelecer uma equivalência teórico/experimental. As características a serem consideradas são as propriedades físicas dos tubos estudados em termos de comprimento, diâmetro e rigidez, utilizados nos ensaios experimentais realizados.

No sentido de procurar um modelo que melhor represente os sistemas transmissores do tipo tubo-transdutor foram identificados alguns modelos, descritos na revisão bibliográfica, que pudessem ser adaptados e representassem adequadamente os sistema tubo transmissor com tubos de elásticos.

No modelo de BERGH (1965), citado por HOLMES; LEWIS (1986) foi verificado que este tem características abrangentes para ser utilizado em diversas áreas da engenharia. Este modelo, empregado na aeronáutica e em túneis de vento, é de grande complexidade e utiliza a montagem do tipo tubo-câmara encadeados, fugindo ao objetivo deste estudo que utiliza a montagem tubo-transdutor.

A análise de energia de sistemas transmissores em fluidos feita por DOEBELIN (1975), além de considerar o tubo rígido, utiliza a montagem com tubo, câmara e transdutor, onde a energia cinética que flui através do tubo é transmitida na totalidade para a membrana do transdutor. Tal abordagem se torna complicada de ser implementada ao se considerar a elasticidade do tubo, sendo portanto descartada para utilização neste estudo.

Encontrou-se no modelo de parâmetros distribuídos descrito por FRY (1960), a possibilidade de inclusão do parâmetro de rigidez do tubo, que acomoda o sistema tubo elástico, possibilitando adequá-lo a este estudo.

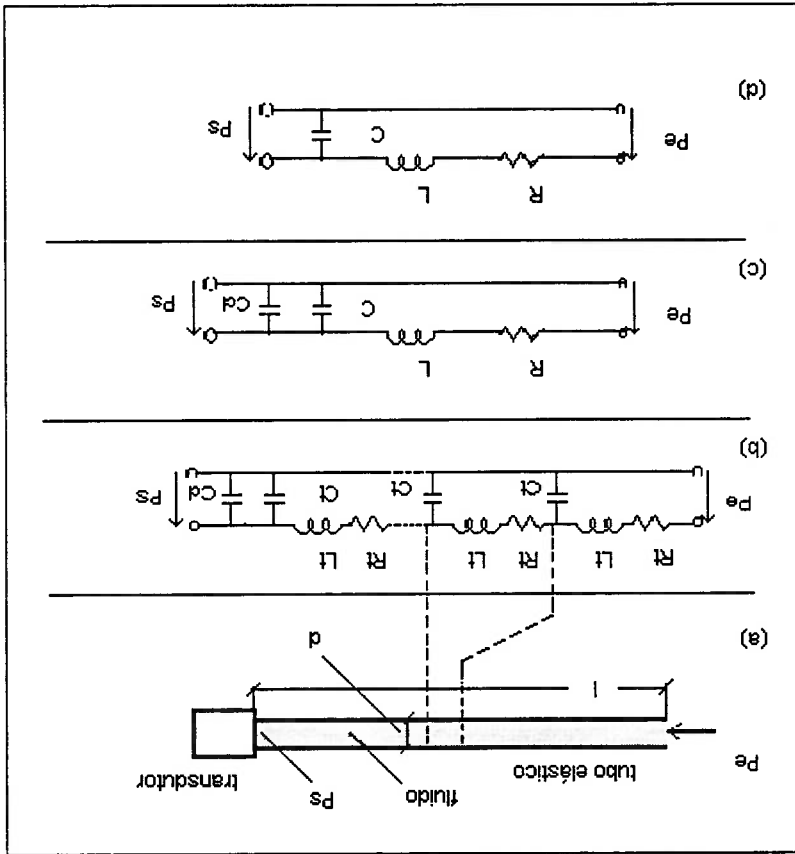


Figura 5.1: Simplificações do modelo de parâmetros distribuídos de equivalência elétrica

Assumindo este modelo como referência, conforme descrito no capítulo de revisão bibliográfica, propôs-se um novo esquema de parâmetros distribuídos. Este esquema utiliza a montagem tubo-transdutor apresentada na Figura 5.1(a), onde os parâmetros foram distribuídos na forma de n elementos discretos, visto em (b). Fazendo-se os devidos agrupamentos de elementos reduz-se a sistema para parâmetros equivalentes concentrados (c), para então simplificar o modelo e obter sua configuração final mostrada na figura (d).

A Figura 5.1(a) apresenta fisicamente o sistema transmissor contendo um tubo contínuo de comprimento l , diâmetro interno d , preenchido com fluido e um transdutor em sua extremidade de entrada do tubo é aplicada a pressão de excitação p_e , e na outra é obtida a pressão de saída p_s , medida pelo transdutor. Este sistema pode ser representado por elementos discretos de tubo que possuem constantes de resistência do fluido dentro do tubo, de inércia da massa de fluido e de elasticidade do tubo. Estas constantes, segundo analogia com sistemas elétricos, são:

- Lt – inércia do tubo devido a inércia da massa do fluido, e equivalente a indutância elétrica.
- Rt – resistência do tubo devido ao atrito e a viscosidade no sistema, equivalente a resistência elétrica.
- Ct – complância do tubo devido as propriedades elásticas deste, equivalente a capacitância elétrica.

Estas constantes são idênticas para todos os n elementos discretos ao longo do tubo. As pressões de entrada e saída do tubo são representadas com a mesma simbologia elétrica e dadas por:

- p_e - diferença de pressão na entrada do tubo, equivalente a diferença de potencial elétrico.

- p_s - diferença de pressão na saída do tubo, equivalente a diferença de

potencial elétrico.

A constante característica do transdutor é dada por:

- Cd - compliância da membrana do transdutor devido as suas propriedades elásticas, e equivalente a capacitância elétrica.

A Figura 5.1(b) mostra a topologia elétrica do sistema, com elementos discretos dispostos de forma a representar convenientemente o sistema transmissor através de um circuito de parâmetros elétrico RLC. Neste caso ainda se tem um sistema discreto com n elementos representando um sistema contínuo. As considerações e simplificações feitas no modelo de parâmetros distribuídos, adaptado a topologia de equivalência elétrica, mostradas na Figura 5.1, acompanham os critérios descritos no desenvolvimento deste modelo na revisão, conforme o Capítulo 2.

Os parâmetros discretos do tubo são agrupados como mostra a Figura 5.1(c), mantendo-se a estrutura RLC. Assim sendo, os valores de resistência R_t do tubo foram concentrados para R, os valores de inércia L_t para L e os de compliância C_t para C. Observa-se que a elasticidade do tubo é muito maior do que a do transdutor, sendo seu valor dominante, portanto pode-se desprezar a elasticidade do transdutor Cd chegando a configuração mostrado na Figura 5.1(d).

Na representação do circuito elétrico da Figura 5.1(d), reconhece-se um sistema diferencial de segunda ordem, a partir do qual é obtida a função de transferência do modelo fluido dinâmico do sistema tubo-transdutor no domínio s da transformada de Laplace, dada a seguir:

- ρ - massa específica do fluido;
 - p - variação da pressão no tempo;
 - t - tempo;
 - c - celeridade da onda no meio fluido;
 - v - velocidade do fluido;
 - x - deslocamento ao longo do tubo de comprimento l
- onde:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (5.2)$$

A inércia do fluido é calculada a partir da equação da continuidade, aplicada a um conduto forçado sob a condição de fechamento total e instantâneo de uma válvula, de acordo com SOUZA et al. (1991), e dada por:

$$R = \frac{128 \mu l}{\pi d^4}$$

obtem-se por substituição destas expressões o valor da resistência do fluido, o mesmo apresentado em WEBSTER (1978) descrito na revisão bibliográfica, dada por (2.17), lembrada aqui:

$$\Delta p = \frac{32 \mu l v_m}{d^2}$$

A resistência do fluido no tubo é dada por: $R = \Delta p / \tilde{Q}$, considerando o escoamento em regime permanente laminar e em fluido incompressível, pode-se utilizar a equação da continuidade na forma: $\tilde{Q} = v_m A$, e também a equação de Poiseuille para determinar a queda de pressão ao longo do tubo [ver GILLES (1974)], já referenciada no Capítulo 2 e dado por (2.16):

$$\frac{p^s(s)}{1} = \frac{p^e(s)}{\frac{LC}{1} + s^2 + \frac{R}{LC} + \frac{1}{LC}} \quad (5.1)$$

Considerando a velocidade somente na direção de x e as variações temporais da pressão e da velocidade lineares, desenvolve-se a expressão 5.2 em termos de vazão, aplicando para o comprimento total do tubo, tem-se:

$$(5.3) \quad \frac{\Delta p}{\Delta t} = -c^2 \rho \frac{\Delta Q}{A l}$$

A celeridade é a velocidade de propagação de pressão ao longo do tubo em um intervalo de tempo Δt , obtém-se: $c = l / \Delta t$. Substituindo na expressão acima e rearranjando, obtém-se:

$$(5.4) \quad \frac{\Delta p}{\Delta t} = - \frac{l \rho}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

onde a variação de pressão dividida pela variação de vazão no tempo é a expressão da inércia do fluido. Desconsiderando o sinal que representa o sentido de propagação de pressão, chega-se a mesma expressão obtida na revisão (2.18) desenvolvida por outro procedimento e dada por:

$$L = \frac{\pi \rho l}{4 \rho^2}$$

Considerando que o valor da compliância ou elasticidade do tubo, (parâmetro C), obtido para este modelo, foi medido experimentalmente e definido por C_{vp} , conclui-se que: $C = C_{vp}$. Sendo os valores da resistência R , inércia L e compliância do tubo C_{vp} conhecidos, pode-se substituí-los na equação 5.1, obtendo-se a função de transferência do sistema.

A função de transferência obtida é similar a função de transferência genérica para sistemas de segunda ordem, adaptada para sistemas dinâmicos e apresentadas em OGATA (1982) e DISTEFANO (1979), e descrita por:

Com o modelo da equação 5.1, denominado modelo RLC, obtido em função das propriedades do tubo, foi possível modelar o sistema tubo transmissor elástico com montagem tubo-transdutor. A partir deste modelo será feita uma comparação entre os resultados teóricos e os ensaios experimentais.

$$\zeta = \frac{32\mu}{\sqrt{1 C_{vp}}} \sqrt{\pi d} \quad (5.9)$$

$$f_n = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{1}{\pi d 1 C_{vp}}} \quad (5.8)$$

Substituindo os parâmetros R, L e Cvp nas expressões 5.6 e 5.7, obtêm-se a frequência natural do sistema f_n e o fator de amortecimento ζ :

$$\zeta = \frac{2L\omega_n}{R} \quad (5.7)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC_{vp}}} \quad (5.6)$$

e o fator de amortecimento ζ :

novos modelos são dados por:

Esta função no domínio da frequência contém o valor da frequência natural do sistema, dada por: $f_n = \omega_n / 2\pi$, onde ω_n por comparação com o este

- O(s) - saída do sistema;
- I(s) - entrada do sistema;
- ω_n - frequência angular natural não amortecida;
- ζ - fator de amortecimento.

$$\frac{O(s)}{I(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.5)$$

5.1 Comparação entre o experimento e o modelo

De modo a fazer um estudo comparativo entre os resultados obtidos nos ensaios com o modelo matemático adotado para representar o sistema transmissor, foram apresentadas as curvas de resposta em frequência teórica, e comparadas com as curvas de resposta em frequência experimentais.

O ensaio escolhida para esta comparação, utiliza as características da mangueira cristal 1/4" de 0,5 m. O cálculo da resposta em frequência do modelo matemático foi obtida com o auxílio do programa MATLAB. A Figura 5.2 apresenta as curvas de resposta em frequência experimental (a) e teóricas (b).

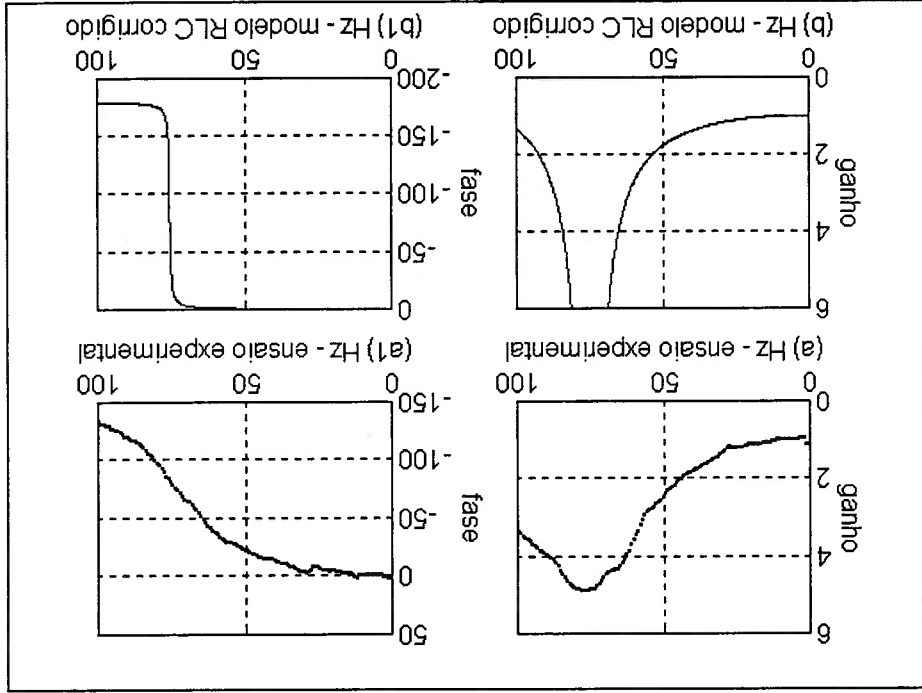


Figura 5.2: Comparação entre os dados experimentais e modelo corrigido

Observa-se nos gráficos, boa coincidência da frequência de ressonância entre o modelo teórico e o experimental. Na região de baixa frequência (até 25 Hz), correspondente a 1/3 da frequência de ressonância, observou-se equivalência entre a resposta em frequência teórica e experimental, como visto

nas curvas (a) e (b) da Figura 5.2. Entretanto o valor do ganho no pico da frequência de ressonância foi maior no caso do modelo. Os desvios de fase de 90 graus estão em frequência praticamente coincidentes, sendo que a fase dos ensaios experimentais desviou-se gradualmente.

No modelo teórico simplificado adotado, representando o sistema tubo-transdutor elástico de parâmetros concentrados, utilizou-se os valores obtidos experimentalmente de comprimento, diâmetro e rigidez do tubo. Os valores da massa específica, viscosidade foram obtidos da literatura.

Este modelo apresenta limitações pois representa um sistema contínuo, de forma discreta. Nos modelos analisados no Capítulo 2, a montagem tubo-câmara-transdutor, permite que a massa de fluido contida no tubo flua para a câmara, devido a sua elasticidade. Este não é o caso para a montagem do tipo tubo elástico fechado na extremidade por um transdutor, pois devido a elasticidade do tubo a massa não se movimenta uniformemente em seu interior.

Em função desta limitação de representação do modelo, adota-se um parâmetro equivalente de forma a corrigir o modelo de acordo com os ensaios experimentais. Este parâmetro equivalente é empregado na inércia, para representar adequadamente os sistemas transmissores de pressão do tipo tubo-transdutor elástico, dado por: $L_e = L K$, onde L_e é a inércia equivalente e o fator de equivalência (K) é o valor que deve ser aplicado a inércia nominal para obter-se a equivalência teórico/experimental em termos da frequência de natural, como mostrado na Figura 5.2.

O valor de K é obtido experimentalmente sendo calculado através da expressão dada por:

$$K = \frac{(2\pi f_n)^2 L C_{vp}}{1} \quad (5.10)$$

Os valores do fator de equivalência para mangueira cristal encontram-se na Tabela 5.1:

TIPO	DIAMETRO	COMPRIMENTO	Cvp	fr	FATOR K
pol. nom.	D = (m)	l = (m)	Cvp=(m ³ /Pa)	Hz	
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	0.52	3.00E-12	78.10	0.08
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	1.03	6.00E-12	39.50	0.08
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	2.00	1.20E-11	18.80	0.09
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	3.96	2.40E-11	8.40	0.11
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	0.49	4.28E-12	97.70	0.06
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	0.99	8.55E-12	46.90	0.07
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	1.97	1.71E-11	23.80	0.07
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	3.95	3.42E-11	10.50	0.08
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	0.53	8.92E-12	74.20	0.07
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	0.99	1.78E-11	39.10	0.07
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	2.00	3.57E-11	17.20	0.08
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	3.88	7.13E-11	7.81	0.10

Tabela 5.1: Tabela do cálculo do fator de equivalência K.

Perceber-se que em todos os casos ensaiados de mangueira cristal, o fator de equivalência apresenta pequenas variações. Para os outros tipos de tubo de equivalência para todos os ensaios realizados encontram-se na tabela do Anexo A.

5.2 Discussão sobre o modelo equivalente

A representação de um sistema contínuo por um modelo de parâmetro concentrados expresso por apenas uma equação diferencial de segunda ordem, apresenta limitações.

Como a perturbação dentro do tubo elástico é variável ao longo deste, isto dificulta a escolha do valor da inércia, sendo necessário adotar um valor equivalente.

Apesar das limitações apontadas, os resultados obtidos através do modelo matemático simplificado equivalente, com parâmetros concentrados ajustado para este caso, mostraram-se promissores no sentido de prever o comportamento dinâmico de sistema de tubos elásticos.

6 CONCLUSÕES

Este estudo consistiu na avaliação do sistema transmissor de pressão do tipo tubo elástico, para ser utilizado na medição de pressão dinâmica. Foi elaborada uma metodologia de ensaio para verificar experimentalmente o comportamento deste sistema. Construiu-se um dispositivo aferidor dinâmico de pressão, onde foram realizados um conjunto extenso de ensaios, com várias configurações de tubos elásticos.

Utilizando o dispositivo aferidor e aplicando a metodologia de ensaio proposta, foram obtidas curvas de resposta em frequência dos casos ensaiados. Como resultado, foi determinada uma faixa de frequência útil, adequada para utilizar o sistema transmissor na medição de oscilações de pressão em modelos hidráulicos.

Elaborou-se um modelo matemático simplificado, com parâmetros concentrados equivalentes, representando estes sistemas, para a previsão de seu comportamento dinâmico e identificação de uma faixa útil em frequência. Em seguida, foram confrontadas as curvas teóricas de resposta em frequência com as obtidas experimentalmente.

Das análises realizadas no transcorrer deste estudo, pôde-se concluir que:

- O dispositivo aferidor dinâmico de pressão mostrou-se adequado para a realização dos ensaios experimentais com tubos elásticos. O dispositivo utiliza um transdutor como referência, tendo este sido verificado e considerado aceitável, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo três. Foi possível aproveitar a capacidade do dispositivo, segundo essa técnica, para ensaiar transdutores e sistemas tubulares com pequenas amplitudes de pressão, em uma faixa de frequência de até 600 Hz.

- O modelo matemático de parâmetros concentrados adotado, utilizando parâmetro experimental equivalente para a inércia, representa utilizada.
- No aspecto experimental a utilização do sinal randômico, como excitação para o dispositivo, seguindo a metodologia elaborada para a aferição de sistema transmissor, é uma forma direta e rápida de ser implementada. De acordo com o resultado do ensaio comparativo entre excitação randômica e senoidal, o uso de excitação randômica é aceitável para a faixa de frequência utilizada.
- Considerando que a faixa plana de resposta em frequência permite utilizar o sistema tubo-transdutor para medições de oscilações de pressão, quanto maior a frequência de ressonância maior a faixa plana útil de medição. Isto pode ser obtido, segundo as análises realizadas no capítulo quatro, usando tubos mais curtos e mais rígidos, aumentando a frequência de ressonância do sistema.
- As curvas de resposta em frequência destes tubos, permitiram identificar a faixa de frequência útil para realizar medidas dinâmicas de pressão. Esta faixa é aquela em que o sistema transmissor apresentou resposta de ganho unitária, determinando uma faixa de frequência plana utilizável de até 20% da primeira frequência de ressonância do sistema, considerando uma tolerância de $\pm 5\%$ de variação no valor do ganho.
- A metodologia e o tratamento de dados utilizando a análise matemática com auxílio de séries de *Fourier*, empregando a técnica de função de transferência e aplicando excitação de sinal randômico, mostrou-se adequada para identificar e visualizar a resposta em frequência de forma contínua dos tubos ensaiados.

Por fim, pôde-se através deste estudo, elaborar uma metodologia de aferição dinâmica de sistemas transmissores de pressão, e determinar a faixa de resposta em frequência útil desses sistemas, utilizados para medidas dinâmicas de pressão em várias áreas da engenharia.

- A elaboração de novos e melhores modelos matemáticos são de fundamental importância para a completa representação teórica do sistema transmissor.
- Estudos com o uso de restritores ou adaptadores nos tubo e as montagens do tipo tubo-câmara-transdutor apresenta um campo de interesse.
- Os ensaios foram realizados variando as propriedades de comprimento, diâmetro e rigidez dos tubos preenchidos com água. Outras propriedades tais como: massa específica do fluido, viscosidade do fluido, rugosidade da parede do tubo, temperatura do fluido, etc., não foram objeto deste estudo, podendo ser um campo para estudos futuros.

Recomendações

- Este modelo permitiu calcular a frequência de ressonância que define a faixa utilizável para medidas dinâmicas com sistema transmissor com tubo elástico, conforme comparação experimental apresentada no Capítulo 4. Isto permite dimensionar a instrumentação utilizada medida de pressão dinâmica, em modelos hidráulicos reduzidos.
- Este modelo permitiu calcular a frequência de ressonância que define a faixa utilizável para medidas dinâmicas com sistema transmissor com tubo elástico, conforme comparação experimental apresentada no Capítulo 4. Isto permite dimensionar a instrumentação utilizada medida de pressão dinâmica, em modelos hidráulicos reduzidos.

Tabelas de dados experimentais

ANEXO A

TIPO	ESPESSURA	DIAMETRO	COMPIMENTO	CVP	f	Hz	GANHO
pol. nom.	e (m)	d (m)	= (m)	CVP=(m ³ /Pa)	f	Hz	f
CRISTAL 1/4"	2.00E-03	6.15E-03	1.03	3.00E-12	78.10	4.87	
CRISTAL 1/4"	2.00E-03	6.15E-03	1.03	6.00E-12	39.50	3.47	
CRISTAL 1/4"	2.00E-03	6.15E-03	2.00	1.20E-11	18.80	2.95	
CRISTAL 1/4"	2.00E-03	6.15E-03	3.96	2.40E-11	8.40	2.77	
CRISTAL 5/16"	2.00E-03	7.93E-03	0.49	4.28E-12	97.70	4.00	
CRISTAL 5/16"	2.00E-03	7.93E-03	0.99	8.55E-12	46.90	3.86	
CRISTAL 5/16"	2.00E-03	7.93E-03	1.97	1.71E-11	23.80	3.05	
CRISTAL 5/16"	2.00E-03	7.93E-03	3.95	3.42E-11	10.50	2.92	
CRISTAL 3/8"	2.00E-03	9.41E-03	0.53	8.92E-12	74.20	3.41	
CRISTAL 3/8"	2.00E-03	9.41E-03	0.99	1.78E-11	39.10	3.28	
CRISTAL 3/8"	2.00E-03	9.41E-03	2.00	3.57E-11	17.20	2.98	
CRISTAL 3/8"	2.00E-03	9.41E-03	3.88	7.13E-11	7.81	2.71	
POLIFLO 1/4"	1.00E-03	4.30E-03	0.48	3.86E-13	145.00	20.20	
POLIFLO 1/4"	1.00E-03	4.30E-03	0.97	7.73E-13	75.80	16.00	
POLIFLO 1/4"	1.00E-03	4.30E-03	2.01	1.55E-12	35.90	9.73	
POLIFLO 1/4"	1.00E-03	4.30E-03	3.97	3.09E-12	19.30	5.02	
POLIFLO 5/16"	1.57E-03	4.39E-03	0.50	2.98E-13	121.00	12.70	
POLIFLO 5/16"	1.57E-03	4.39E-03	0.99	5.96E-13	71.10	13.40	
POLIFLO 5/16"	1.57E-03	4.39E-03	1.97	1.19E-12	36.30	10.00	
POLIFLO 5/16"	1.57E-03	4.39E-03	3.96	2.39E-12	19.50	7.34	
POLIFLO 3/8"	1.57E-03	6.37E-03	0.49	3.86E-13	137.00	28.00	
POLIFLO 3/8"	1.57E-03	6.37E-03	0.99	7.73E-13	64.80	15.30	
POLIFLO 3/8"	1.57E-03	6.37E-03	1.99	1.55E-12	34.40	9.66	
POLIFLO 3/8"	1.57E-03	6.37E-03	4.01	3.09E-12	17.40	8.32	
NYLON 1/4"	1.00E-03	4.37E-03	0.49	7.95E-14	109.00	12.00	
NYLON 1/4"	1.00E-03	4.37E-03	0.99	1.59E-13	56.60	7.95	
NYLON 1/4"	1.00E-03	4.37E-03	1.99	3.18E-13	18.00	7.31	
NYLON 1/4"	1.00E-03	4.37E-03	4.00	6.36E-13	16.80	6.27	
NYLON 5/16"	1.00E-03	5.98E-03	0.49	3.38E-13	126.00	11.90	
NYLON 5/16"	1.00E-03	5.98E-03	0.99	6.75E-13	64.70	10.80	
NYLON 5/16"	1.00E-03	5.98E-03	1.99	1.35E-12	26.20	7.48	
NYLON 5/16"	1.00E-03	5.98E-03	4.00	2.70E-12	14.30	6.28	
NYLON 3/8"	1.57E-03	6.43E-03	0.49	1.50E-13	126.00	11.00	
NYLON 3/8"	1.57E-03	6.43E-03	0.99	3.00E-13	66.00		
NYLON 3/8"	1.57E-03	6.43E-03	1.99	6.00E-13	36.60	9.36	
NYLON 3/8"	1.57E-03	6.43E-03	4.00	1.20E-12	16.40	6.20	
COBRE 1/4"	7.90E-04	4.83E-03	0.51	3.48E-14	135.00	4.66	
COBRE 1/4"	7.90E-04	4.83E-03	1.02	6.95E-14	105.00	5.97	
COBRE 1/4"	7.90E-04	4.83E-03	1.98	1.39E-13	71.10	5.91	
COBRE 5/16"	7.90E-04	6.25E-03	0.49	4.95E-14	168.00	30.90	
COBRE 5/16"	7.90E-04	6.25E-03	0.99	9.90E-14	113.00	14.70	
COBRE 5/16"	7.90E-04	6.25E-03	2.04	1.98E-13	68.00	20.00	
COBRE 3/8"	7.90E-04	7.95E-03	0.48	6.63E-14	172.00	19.80	
COBRE 3/8"	7.90E-04	7.95E-03	1.03	1.33E-13	133.00	20.30	
COBRE 3/8"	7.90E-04	7.95E-03	2.02	2.65E-13	78.90	41.10	

Tabela 1: Valores medidos experimentalmente

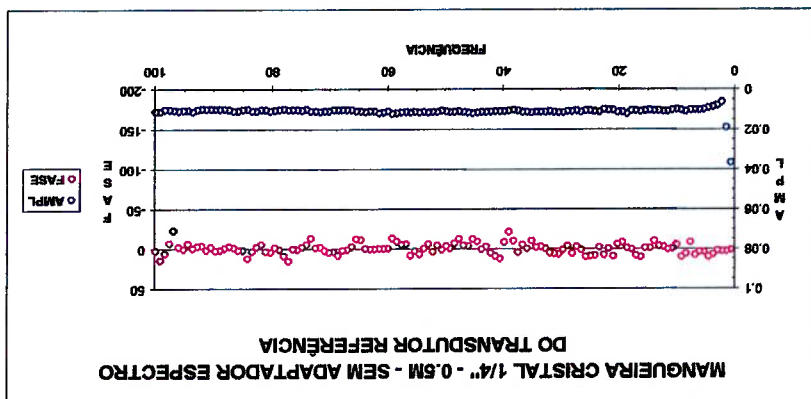
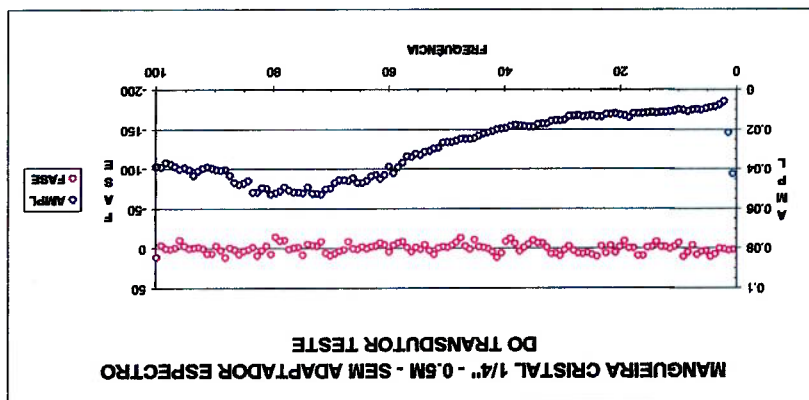
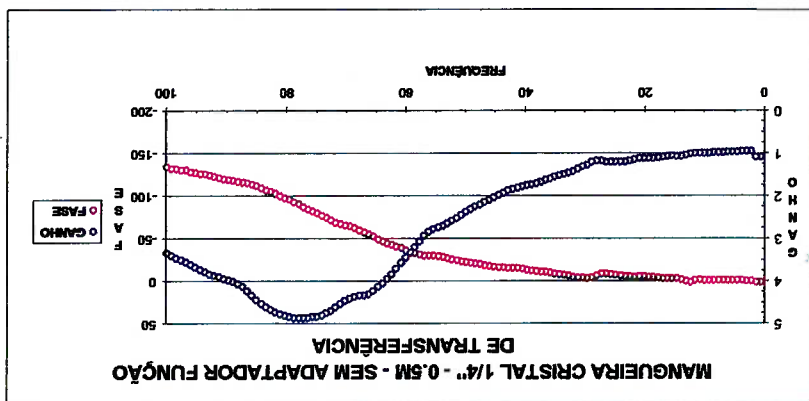
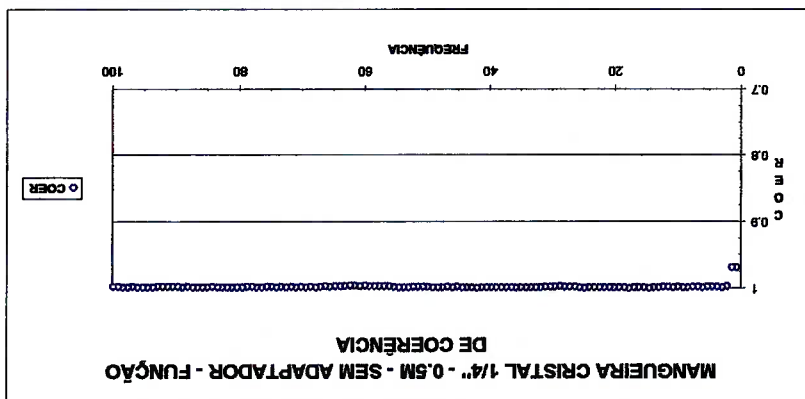
Tabela 2: Cálculo do fator de equivalência K

TIPO	DIAMETRO	COMPRIMENTO	Cvp	L CALCULADO	f	FATOR K
pol nom	d= (m)	l= (m)	Cvp=(m ³ /Pa)		Hz	
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	0.52	3.00E-12	1.75E+07	78.10	0.08
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	1.03	6.00E-12	3.45E+07	39.50	0.08
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	2.00	1.20E-11	6.74E+07	18.80	0.09
CRISTAL 1/4"	6.15E-03	3.96	2.40E-11	1.33E+08	8.40	0.11
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	0.49	4.28E-12	9.91E+06	97.70	0.06
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	0.99	8.55E-12	2.00E+07	46.90	0.07
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	1.97	1.71E-11	3.99E+07	23.80	0.07
CRISTAL 5/16"	7.93E-03	3.95	3.42E-11	7.98E+07	10.50	0.08
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	0.53	8.92E-12	7.54E+06	74.20	0.07
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	0.99	1.78E-11	1.42E+07	39.10	0.07
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	2.00	3.57E-11	2.87E+07	17.20	0.08
CRISTAL 3/8"	9.41E-03	3.88	7.13E-11	5.55E+07	7.81	0.10
POLIFLO 1/4"	4.30E-03	0.48	3.86E-13	3.31E+07	145.00	0.09
POLIFLO 1/4"	4.30E-03	0.97	7.73E-13	6.69E+07	75.80	0.09
POLIFLO 1/4"	4.30E-03	2.01	1.55E-12	1.38E+08	35.90	0.09
POLIFLO 1/4"	4.30E-03	3.97	3.09E-12	2.73E+08	19.30	0.08
POLIFLO 5/16"	4.39E-03	0.50	2.98E-13	3.26E+07	121.00	0.18
POLIFLO 5/16"	4.39E-03	0.99	5.96E-13	6.53E+07	71.10	0.13
POLIFLO 5/16"	4.39E-03	1.97	1.19E-12	1.30E+08	36.30	0.12
POLIFLO 5/16"	4.39E-03	3.96	2.39E-12	2.61E+08	19.50	0.11
POLIFLO 3/8"	6.37E-03	0.49	3.86E-13	1.52E+07	137.00	0.23
POLIFLO 3/8"	6.37E-03	0.99	7.73E-13	3.11E+07	64.80	0.25
POLIFLO 3/8"	6.37E-03	1.99	1.55E-12	6.25E+07	34.40	0.22
POLIFLO 3/8"	6.37E-03	4.01	3.09E-12	1.26E+08	17.40	0.22
NYLON 1/4"	4.37E-03	0.49	7.95E-14	3.27E+07	109.00	0.82
NYLON 1/4"	4.37E-03	0.99	1.59E-13	6.60E+07	55.50	0.78
NYLON 1/4"	4.37E-03	1.99	3.18E-13	1.33E+08	36.50	0.45
NYLON 1/4"	4.37E-03	4.00	6.35E-13	2.67E+08	18.50	0.60
NYLON 5/16"	5.98E-03	0.49	3.39E-13	1.74E+07	125.00	0.28
NYLON 5/16"	5.98E-03	0.99	6.75E-13	3.52E+07	54.70	0.36
NYLON 5/16"	5.98E-03	1.99	1.35E-12	7.08E+07	26.20	0.39
NYLON 5/16"	5.98E-03	4.00	2.70E-12	1.42E+08	14.30	0.32
NYLON 3/8"	6.43E-03	0.49	1.50E-13	1.51E+07	125.00	0.72
NYLON 3/8"	6.43E-03	0.99	3.00E-13	3.05E+07	65.00	0.66
NYLON 3/8"	6.43E-03	1.99	6.00E-13	6.12E+07	36.50	0.51
NYLON 3/8"	6.43E-03	4.00	1.20E-12	1.23E+08	16.40	0.64
COBRE 1/4"	4.83E-03	0.51	3.48E-14	2.78E+07	135.00	1.44
COBRE 1/4"	4.83E-03	1.02	6.95E-14	5.56E+07	105.00	0.59
COBRE 1/4"	4.83E-03	1.98	1.39E-13	1.08E+08	71.10	0.33
COBRE 5/16"	6.25E-03	0.49	4.95E-14	1.58E+07	158.00	1.29
COBRE 5/16"	6.25E-03	0.99	9.90E-14	3.22E+07	113.00	0.62
COBRE 5/16"	6.25E-03	2.04	1.98E-13	6.66E+07	68.00	0.42
COBRE 3/8"	7.95E-03	0.48	6.63E-14	9.67E+06	172.00	1.34
COBRE 3/8"	7.95E-03	1.03	1.33E-13	2.07E+07	133.00	0.52
COBRE 3/8"	7.95E-03	2.02	2.65E-13	4.06E+07	78.90	0.38

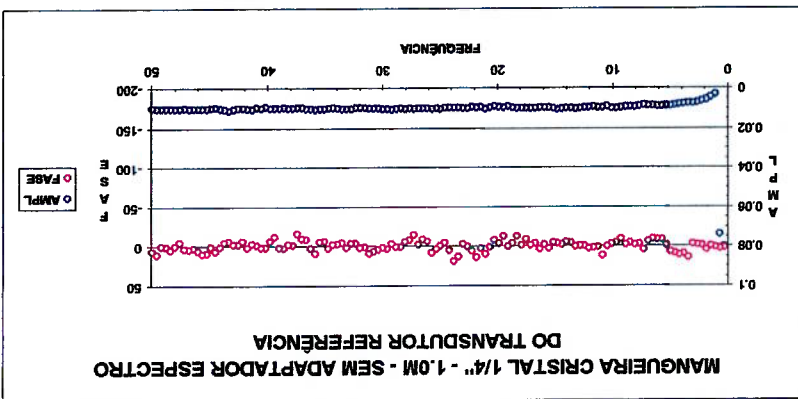
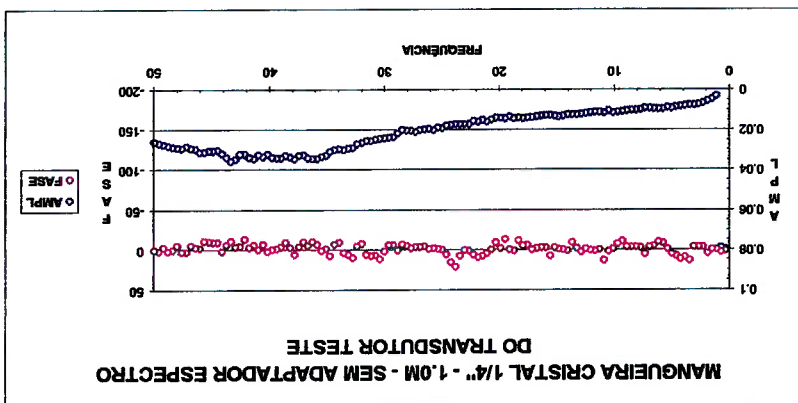
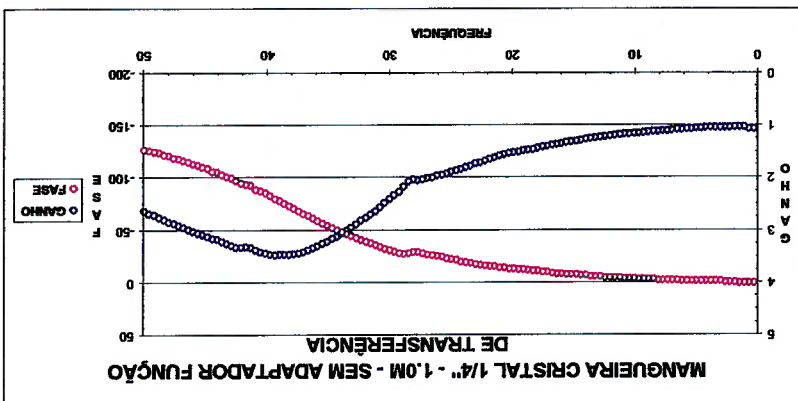
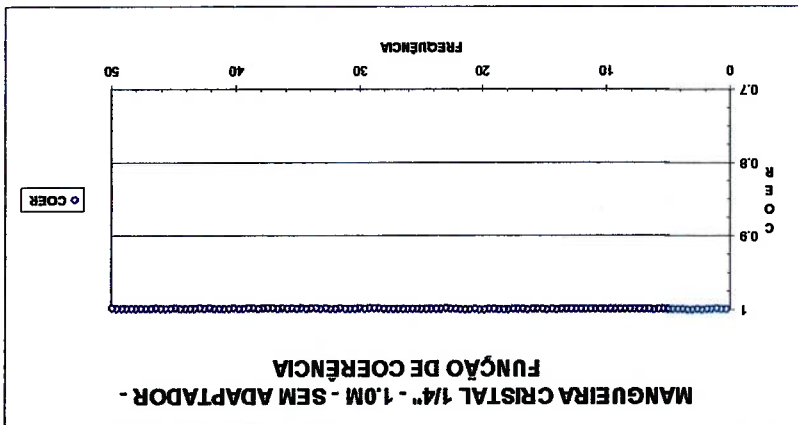
Figuras dos ensaios

ANEXO B

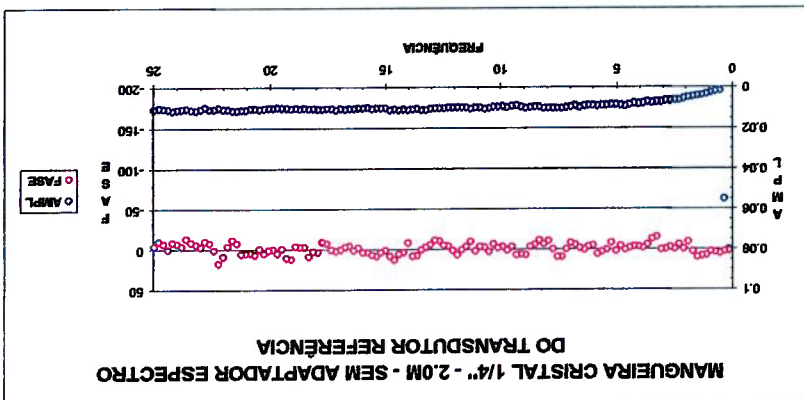
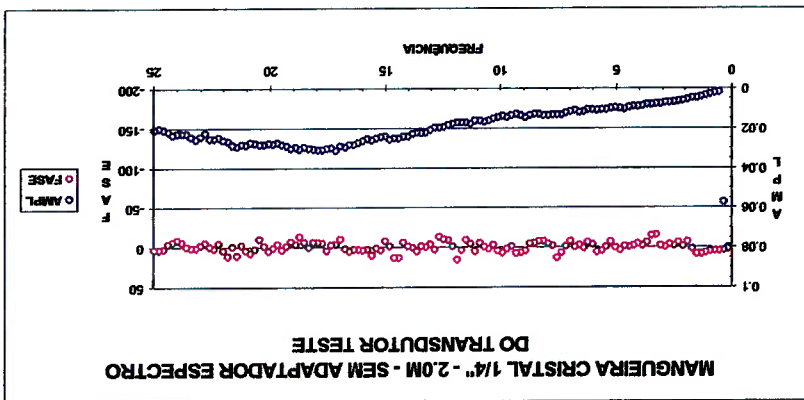
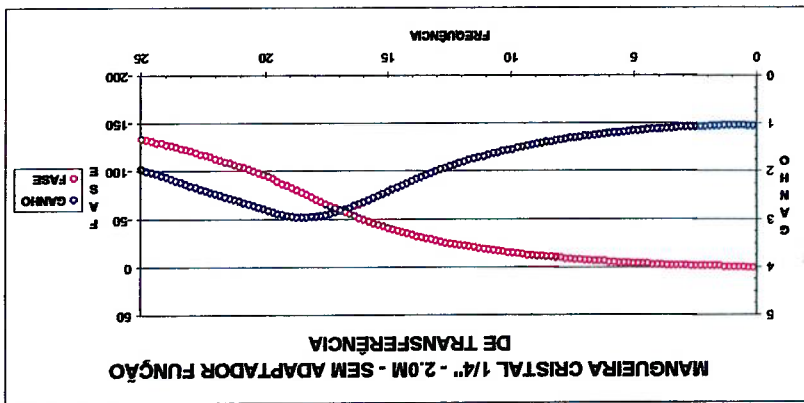
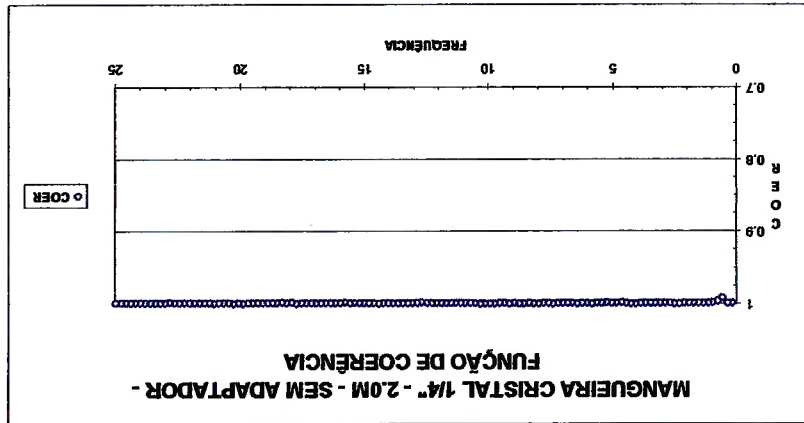
mangueira cristal 1/4" - 0,5 m



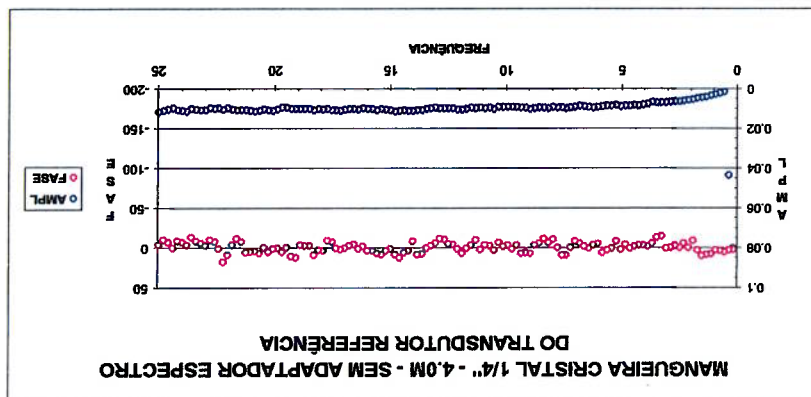
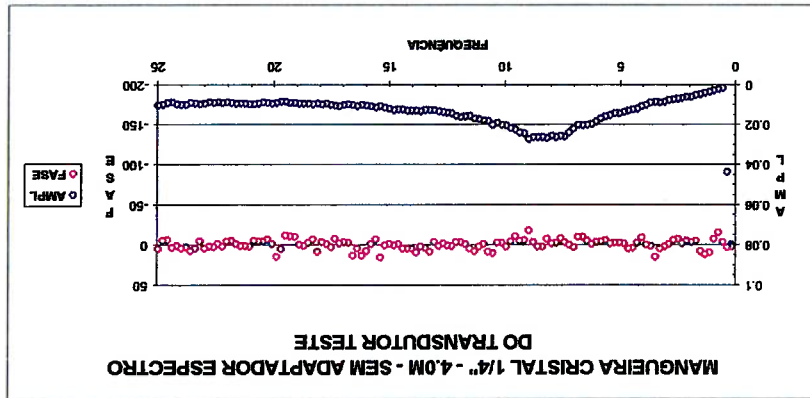
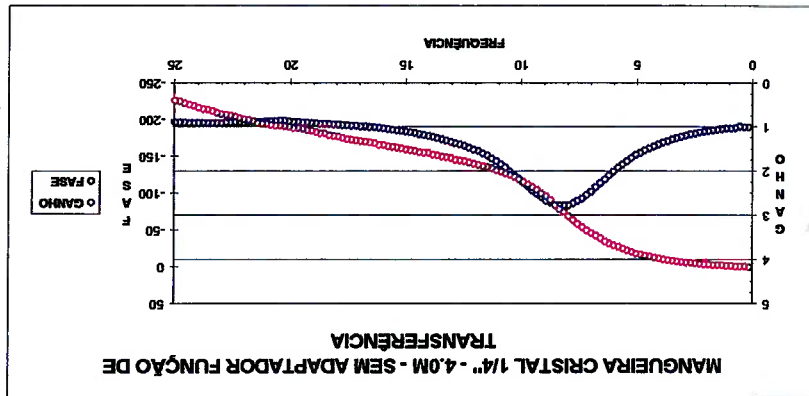
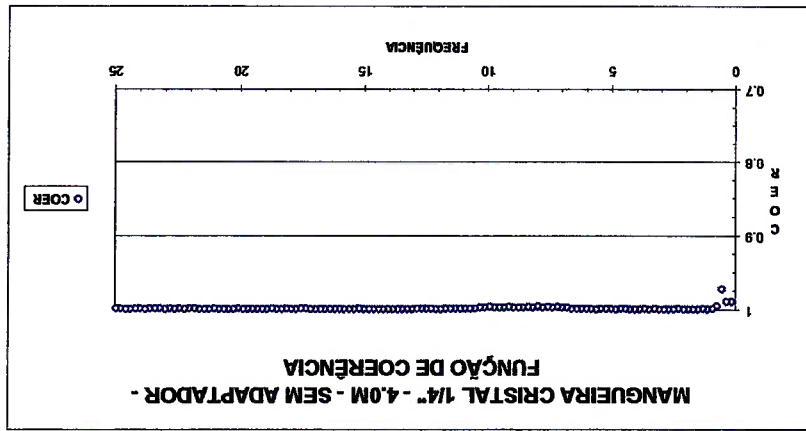
mangueira cristal 1/4" - 1,0 m



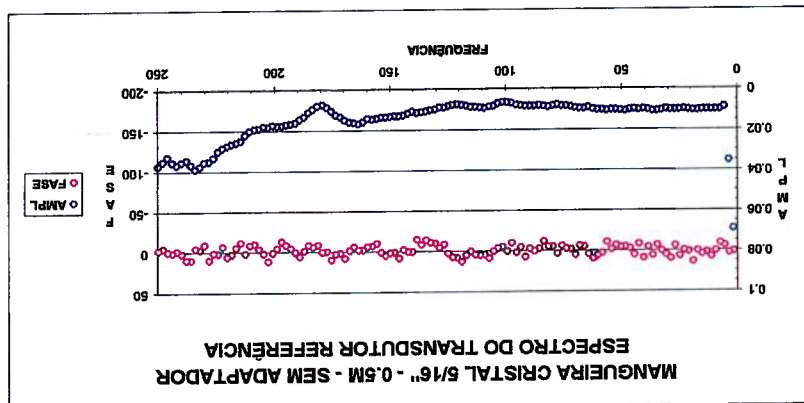
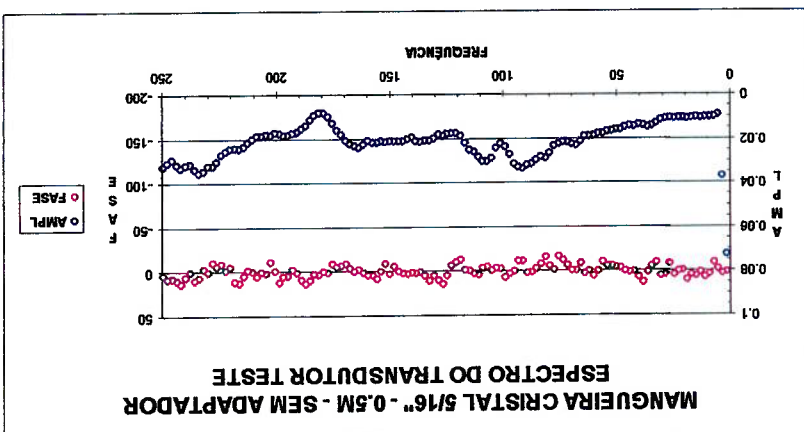
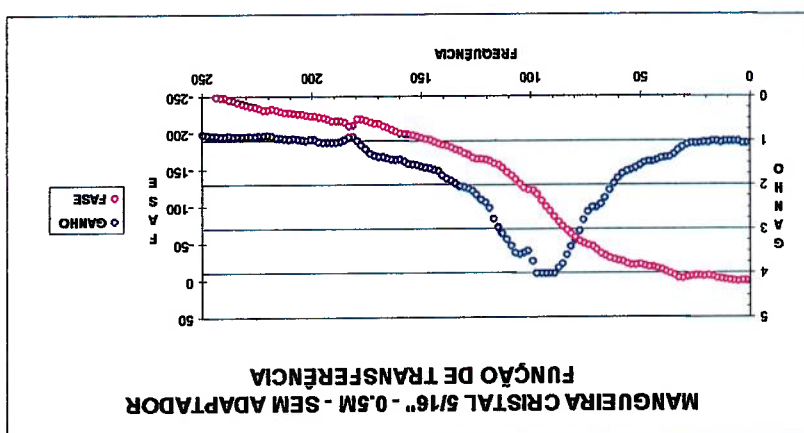
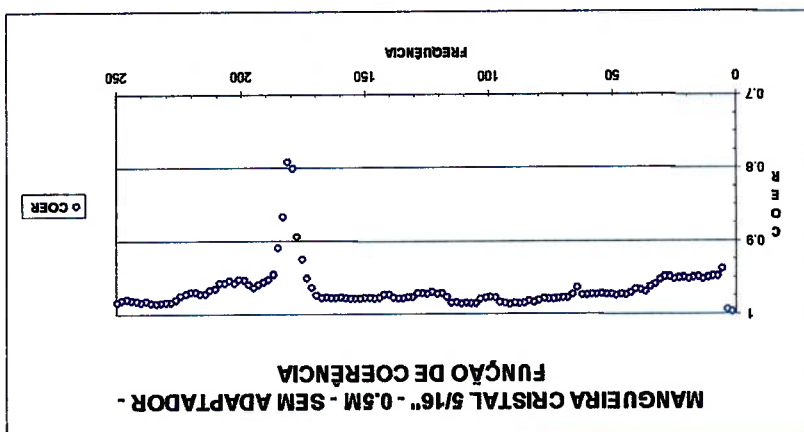
mangueira cristal 1/4" - 2,0 m



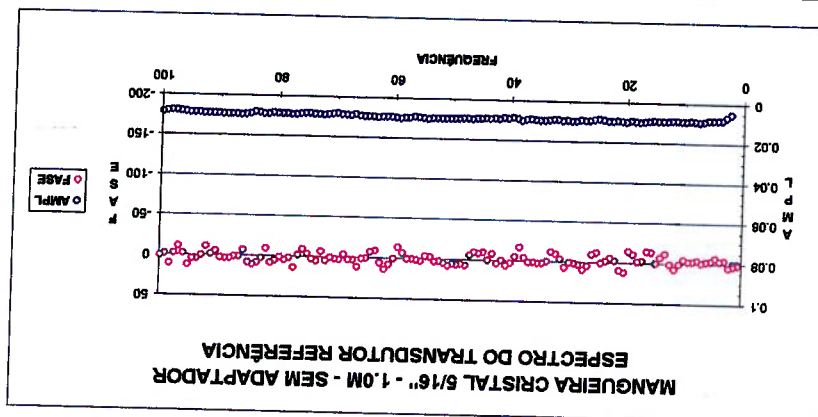
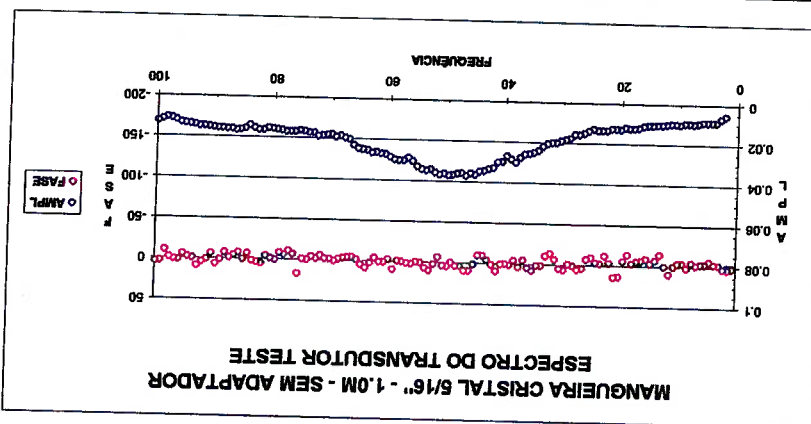
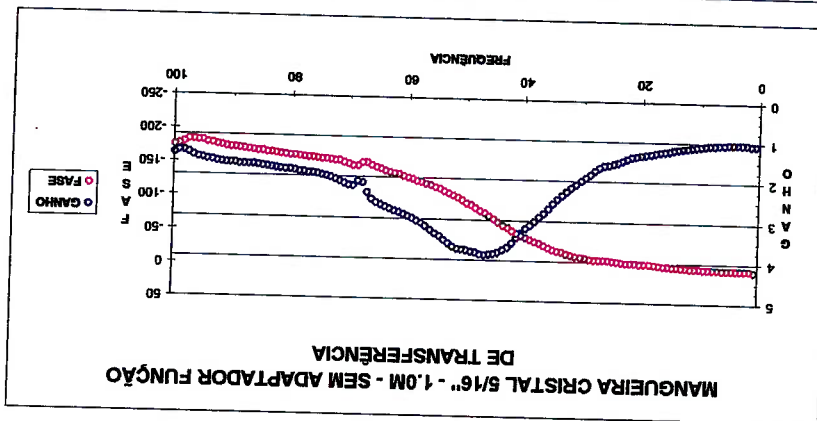
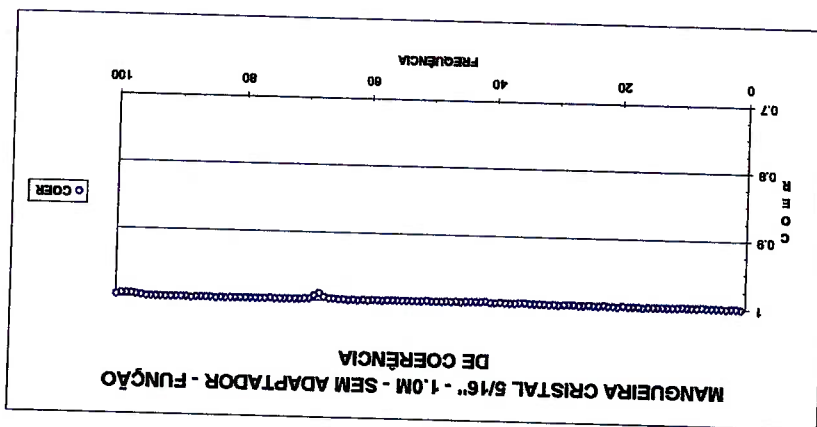
mangueira cristal 1/4" - 4,0 m



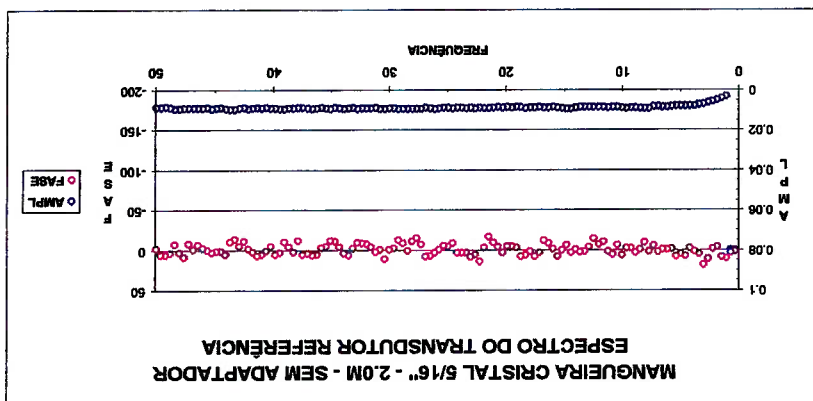
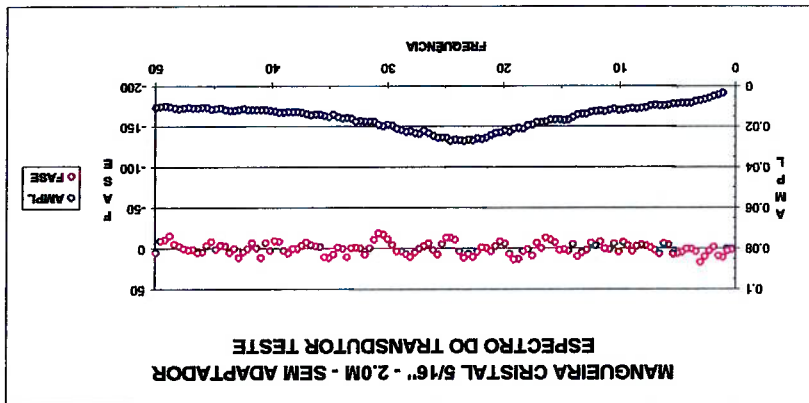
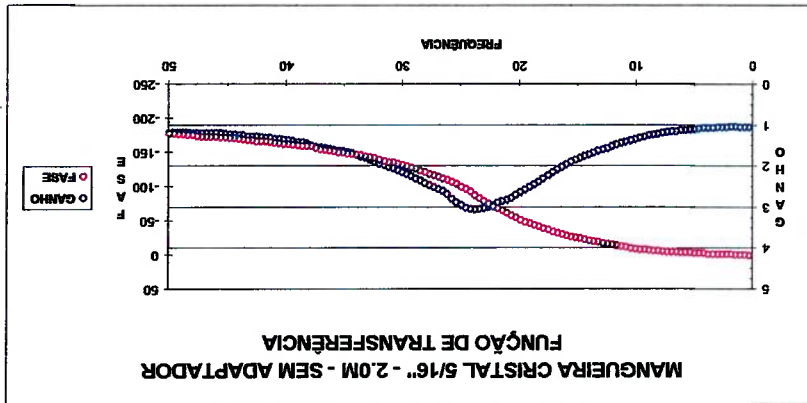
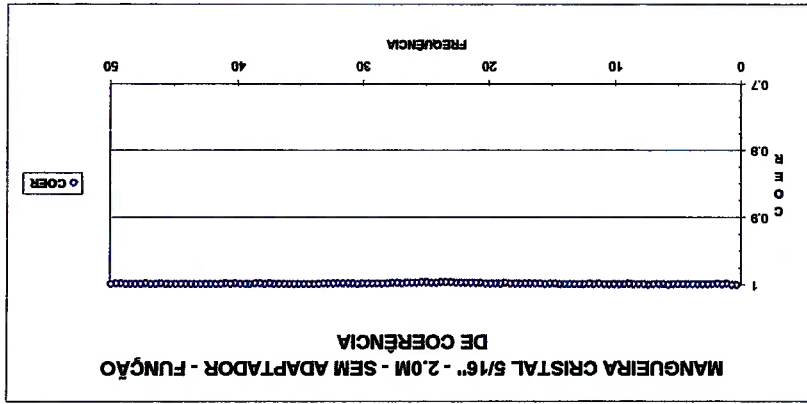
mangueira cristal 5/16" - 0,5 m



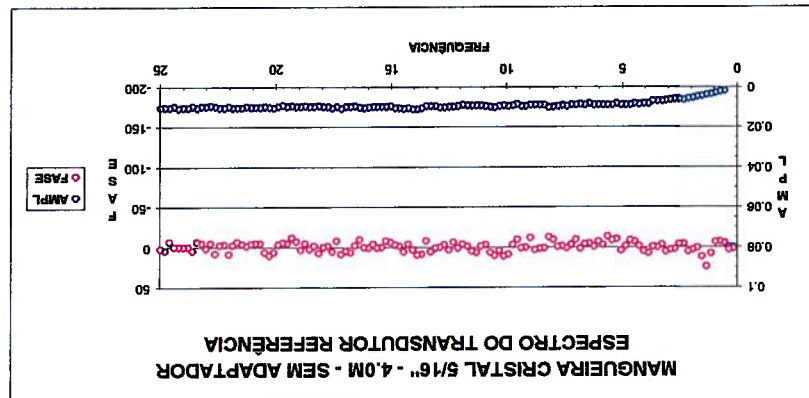
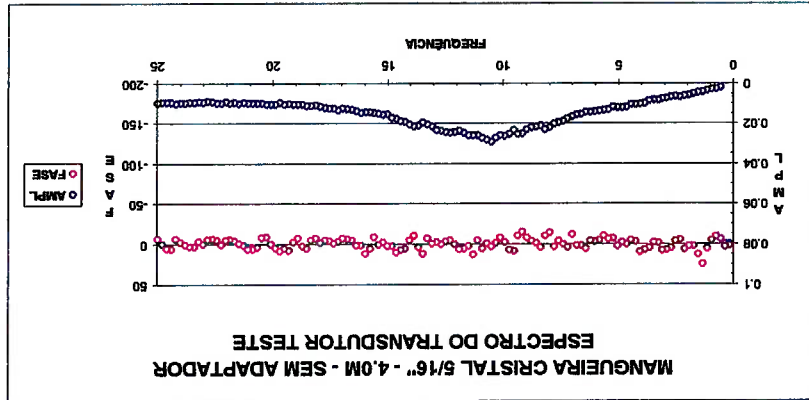
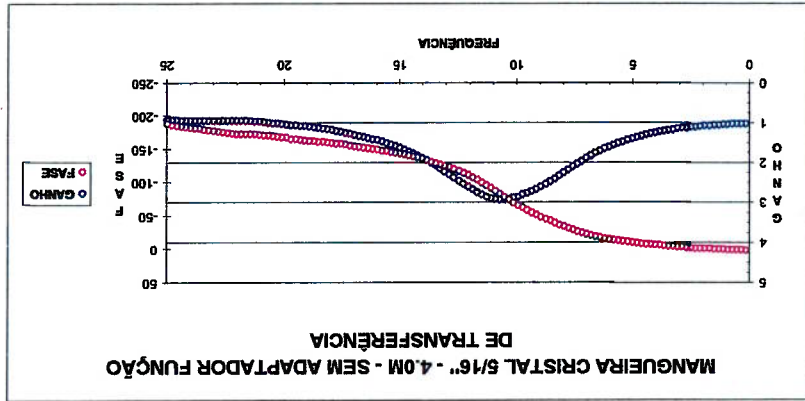
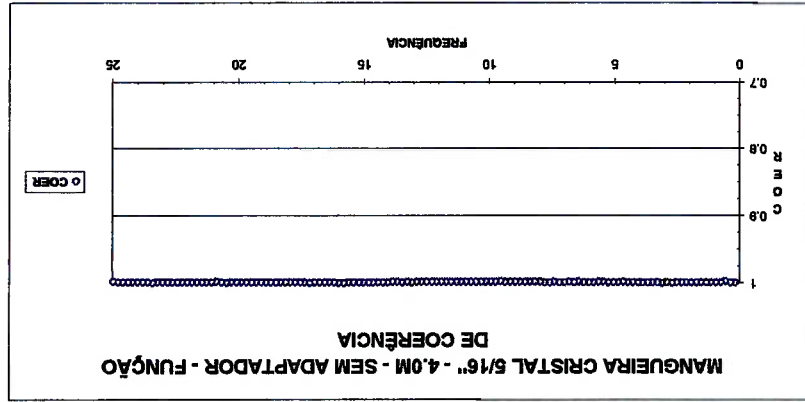
mangueira cristal 5/16" - 1,0 m



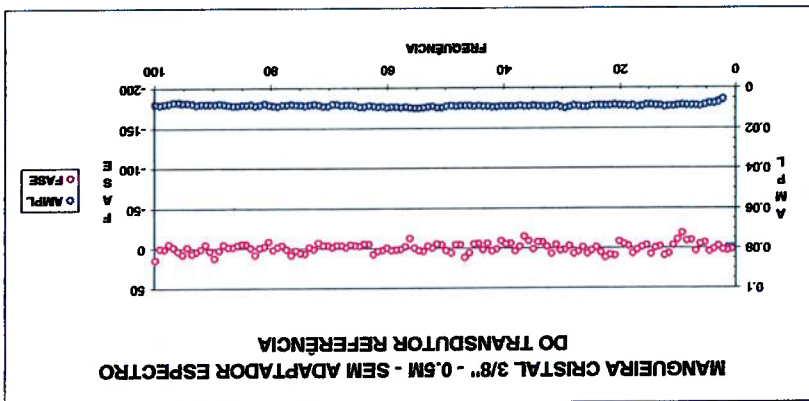
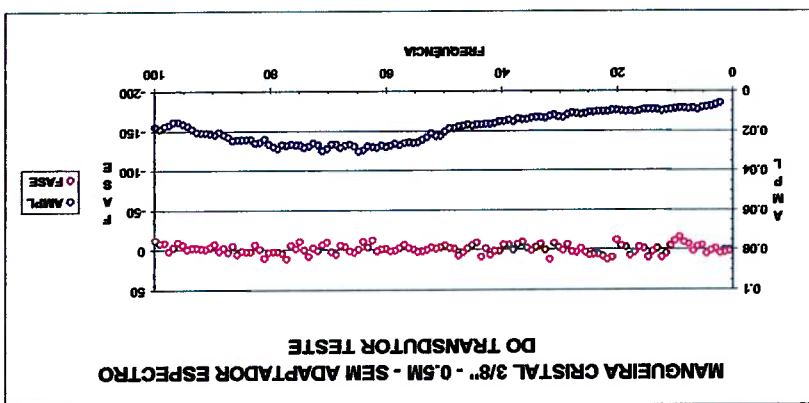
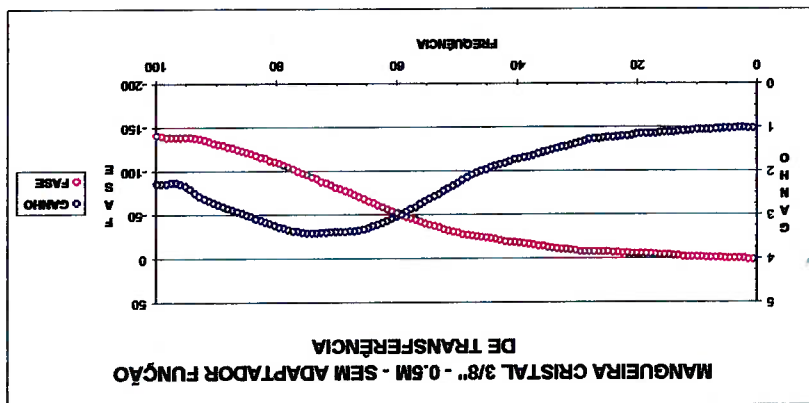
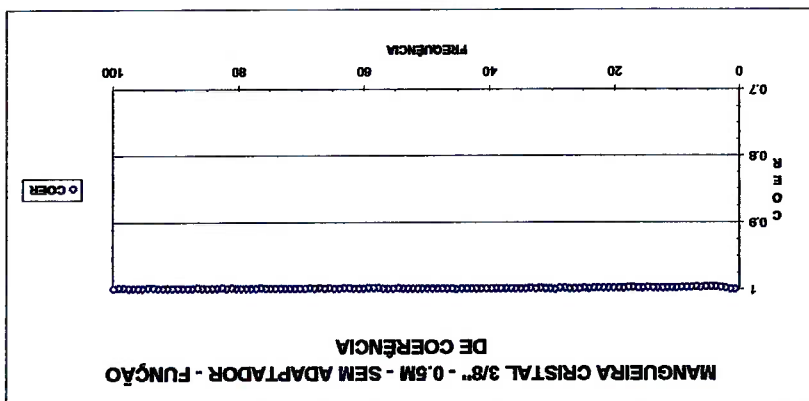
mangueira cristal 5/16" - 2,0 m



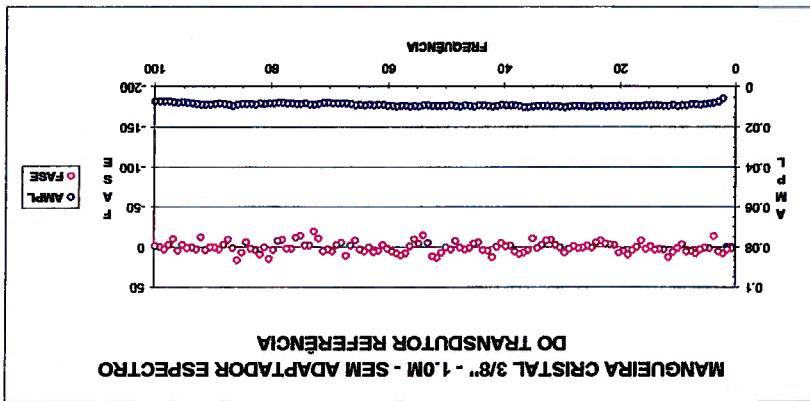
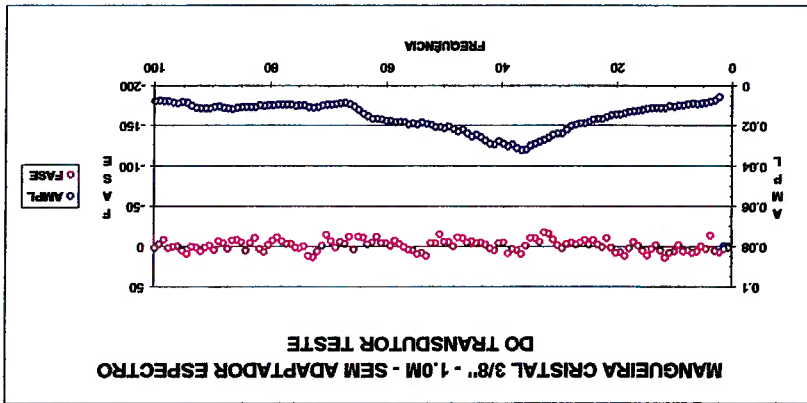
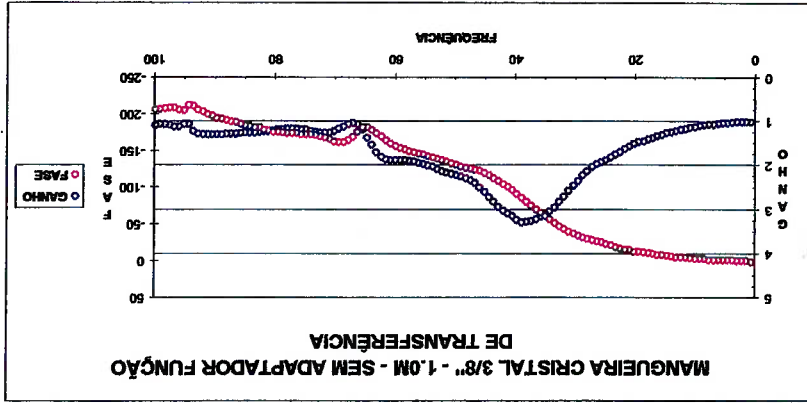
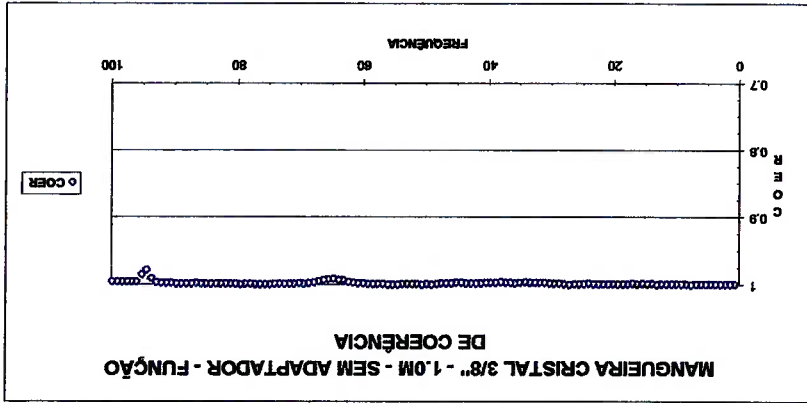
mangueira cristal 5/16" - 4,0 m



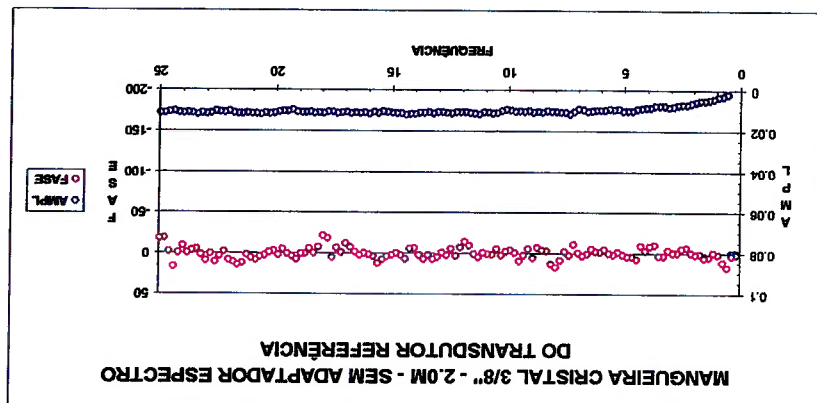
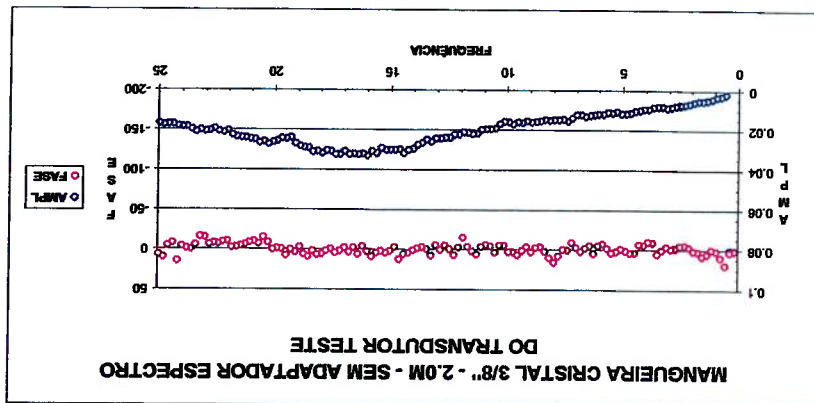
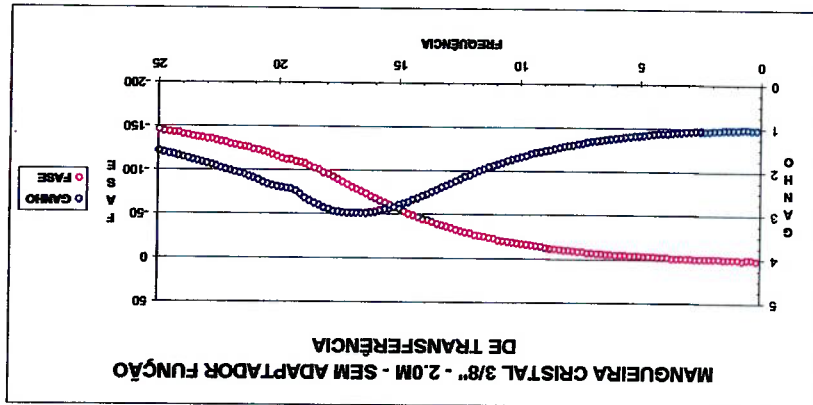
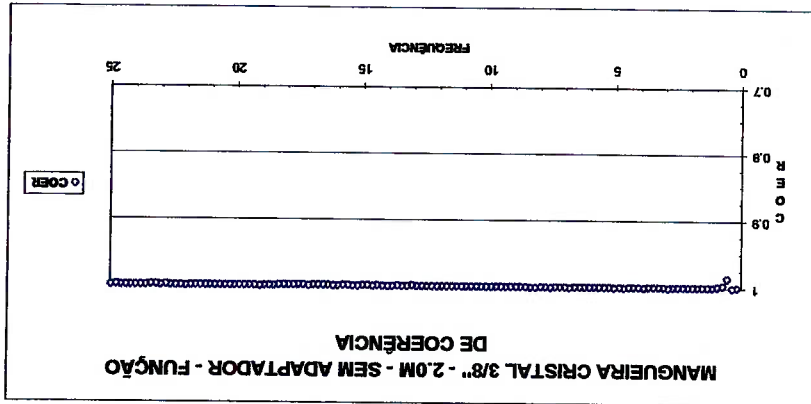
mangueira cristal 3/8" - 0,5 m



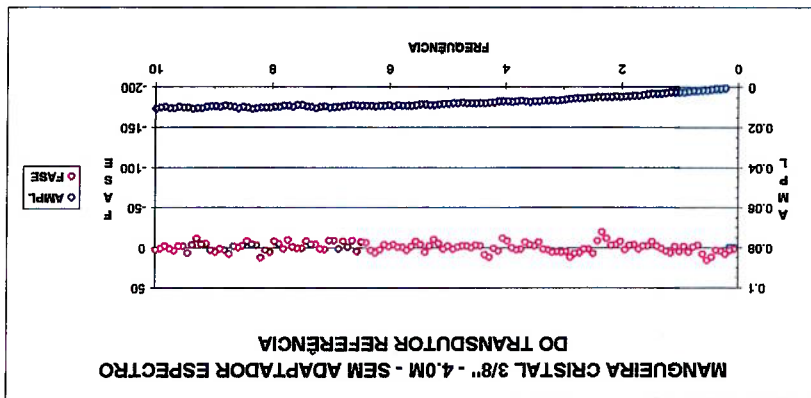
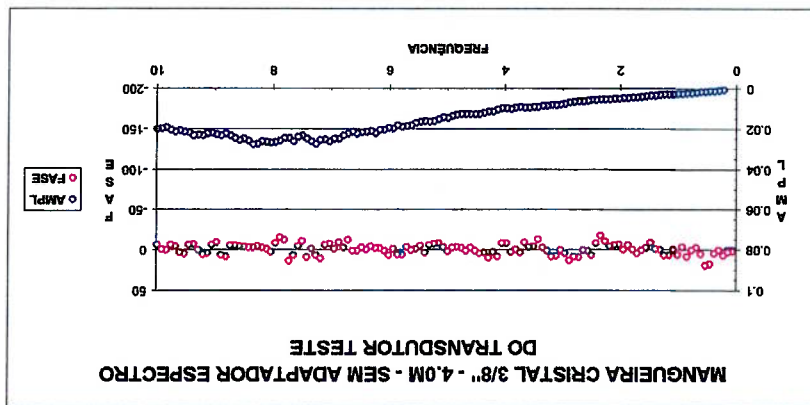
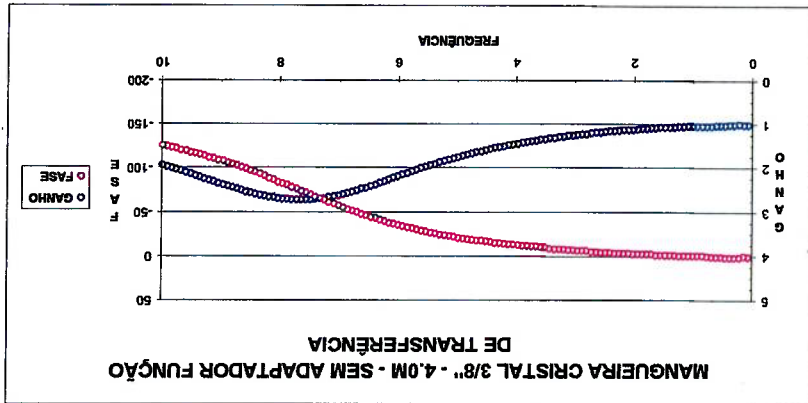
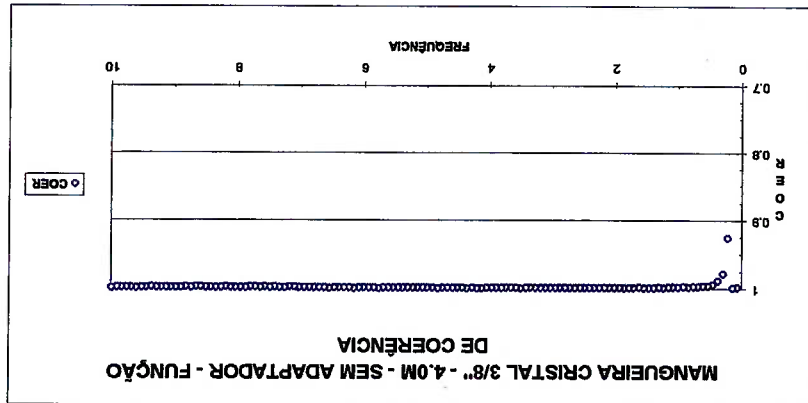
mangueira cristal 3/8" - 1,0 m



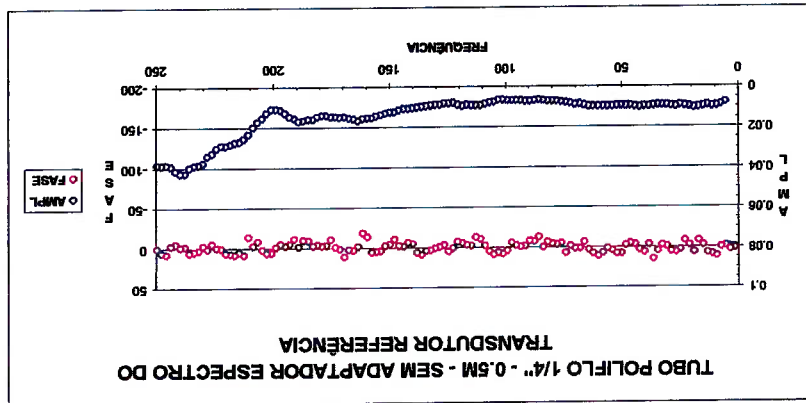
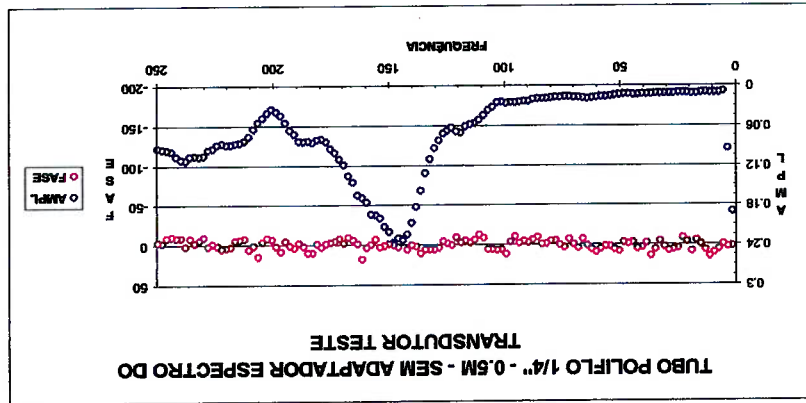
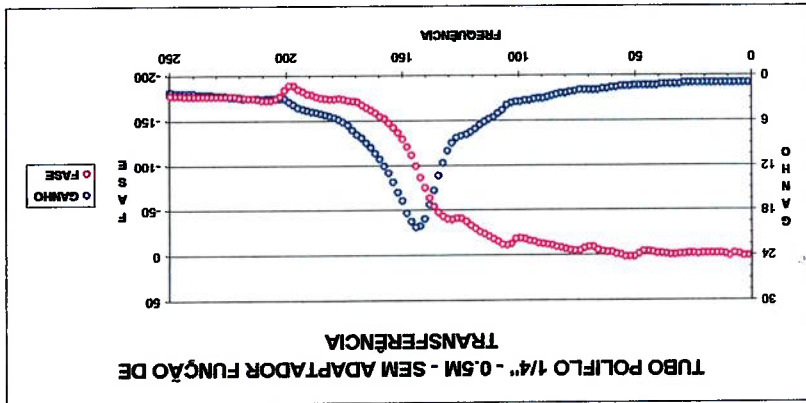
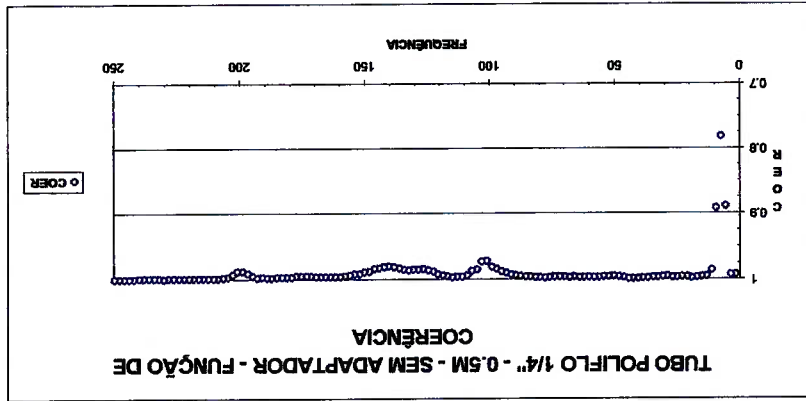
mangueira cristal 3/8" - 2,0 m



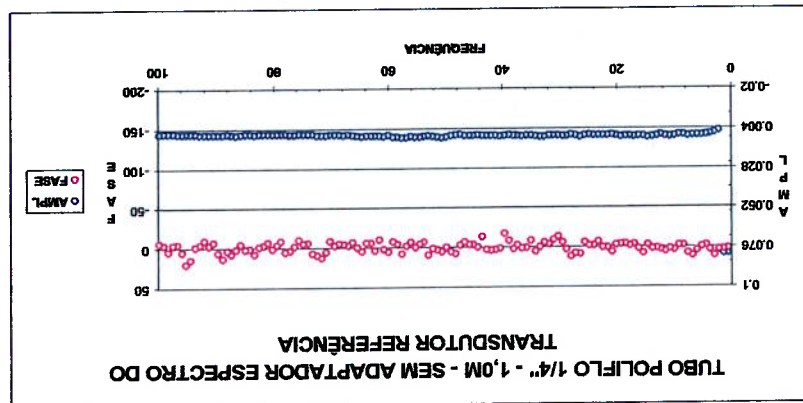
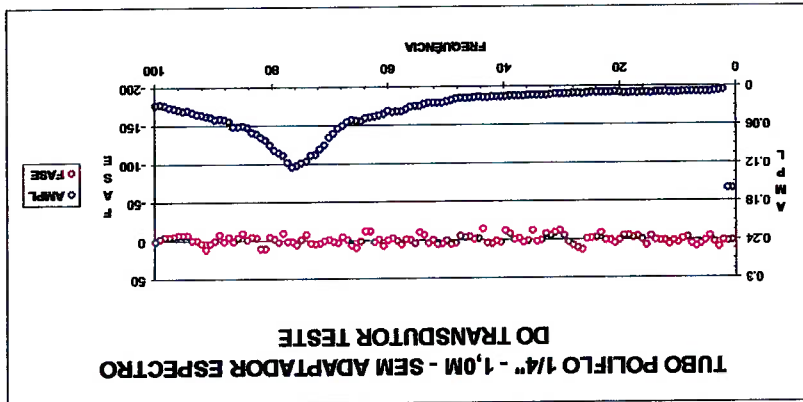
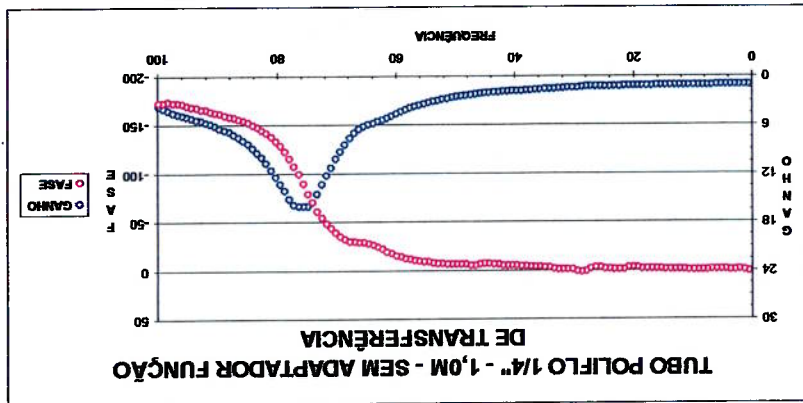
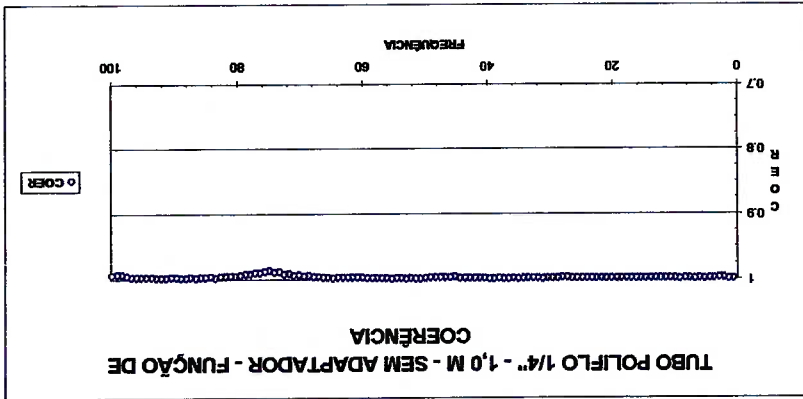
mangueira cristal 3/8" - 4,0 m



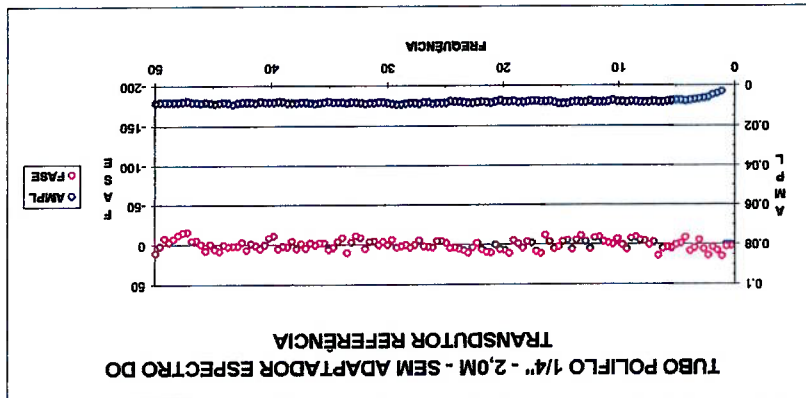
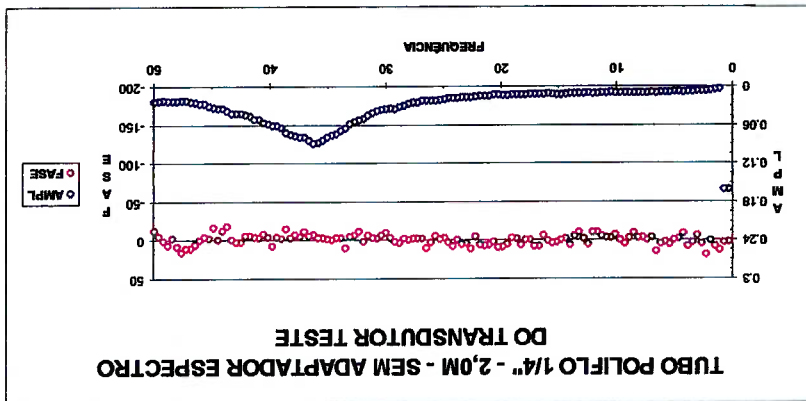
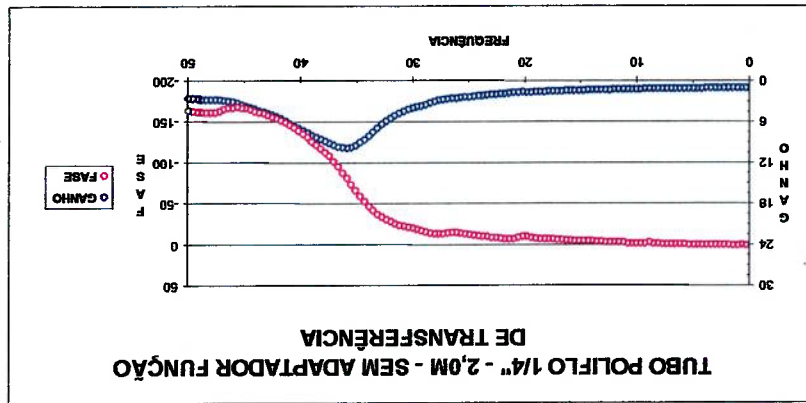
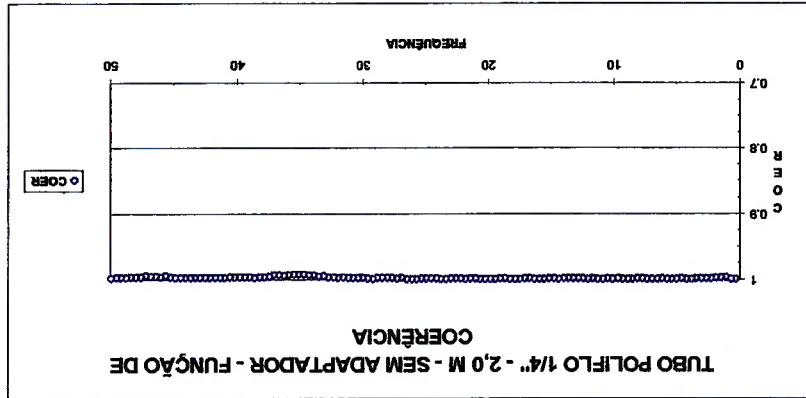
tubo polifilo 1/4" - 0,5 m

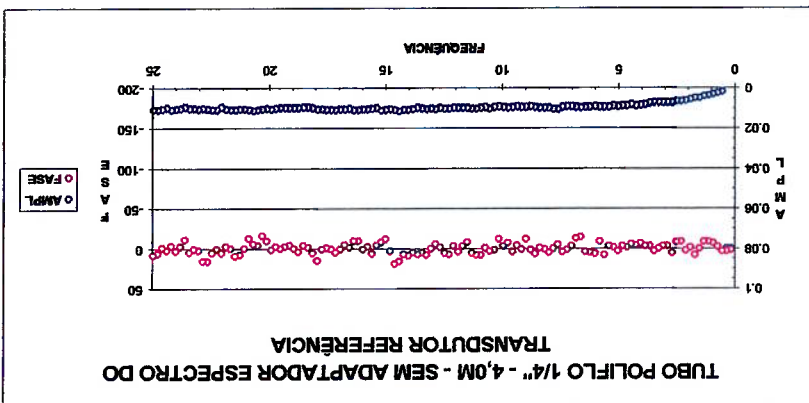
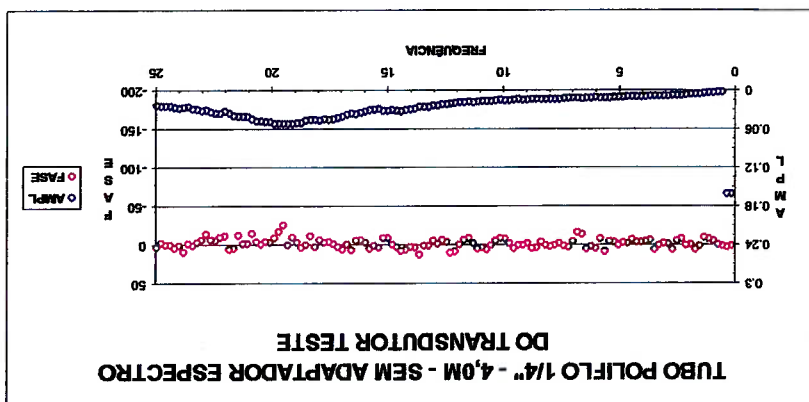
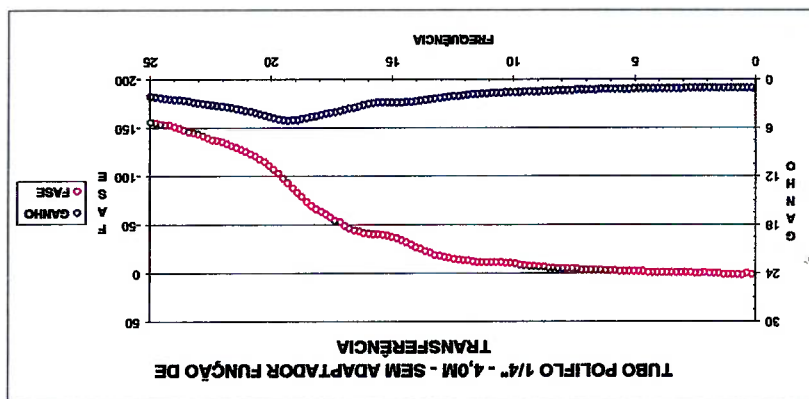
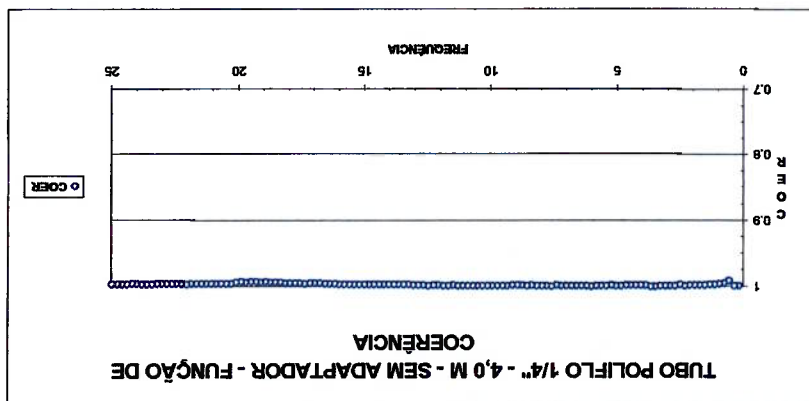


tubo poliflo 1/4" - 1.0 m

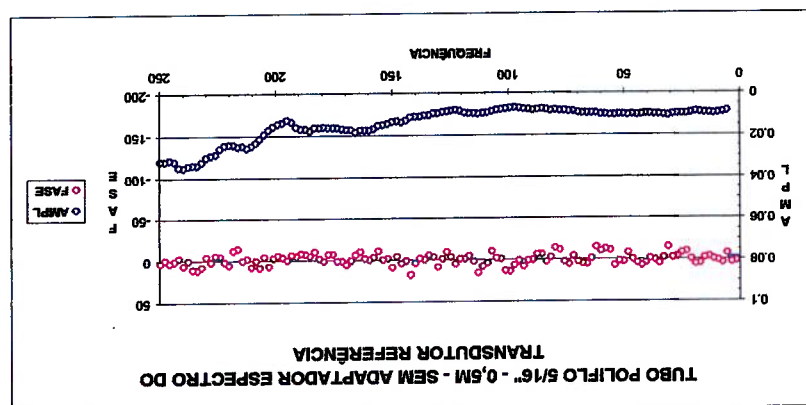
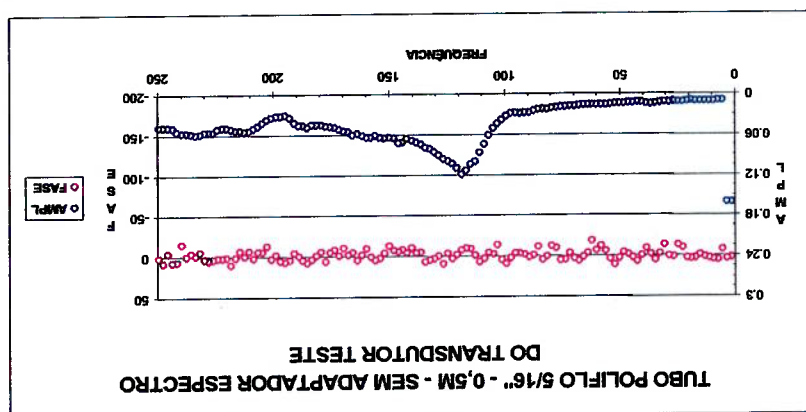
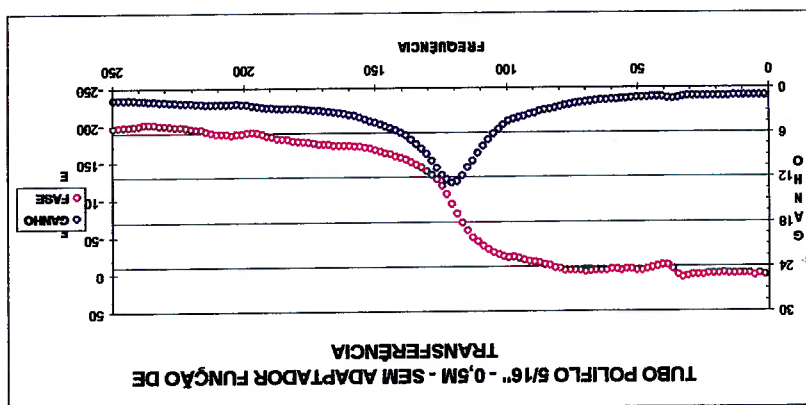
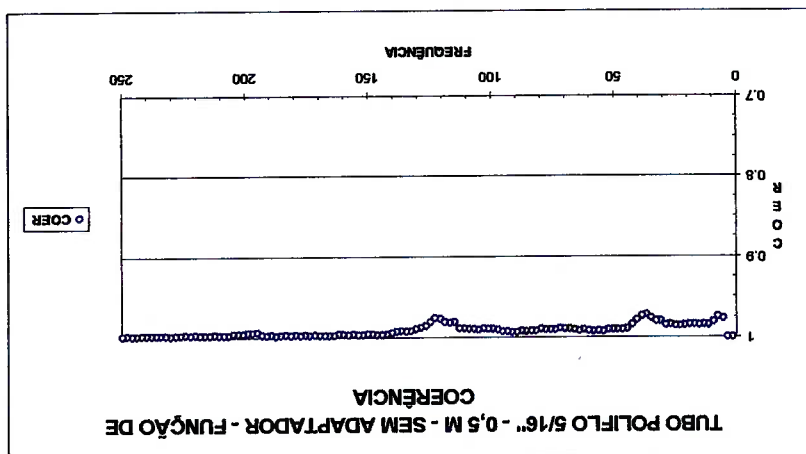


tubo poliflo 1/4" - 2.0 m

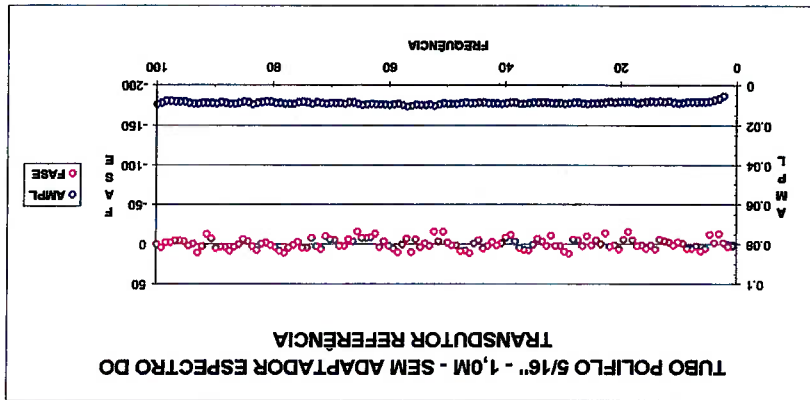
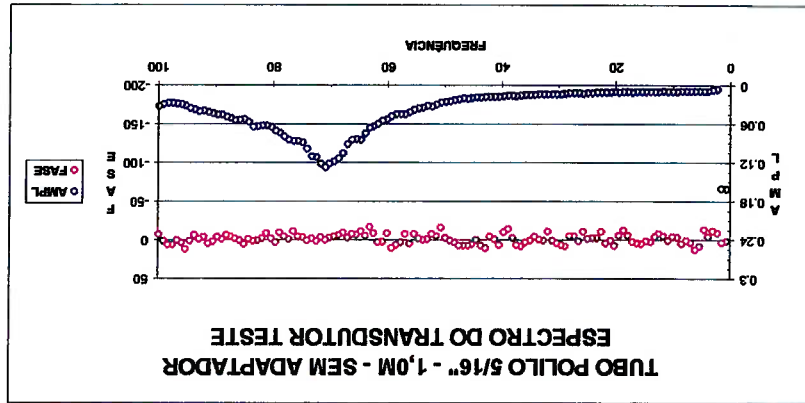
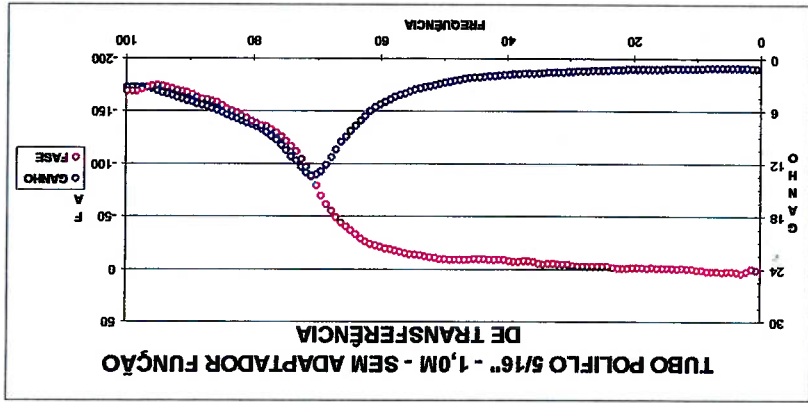
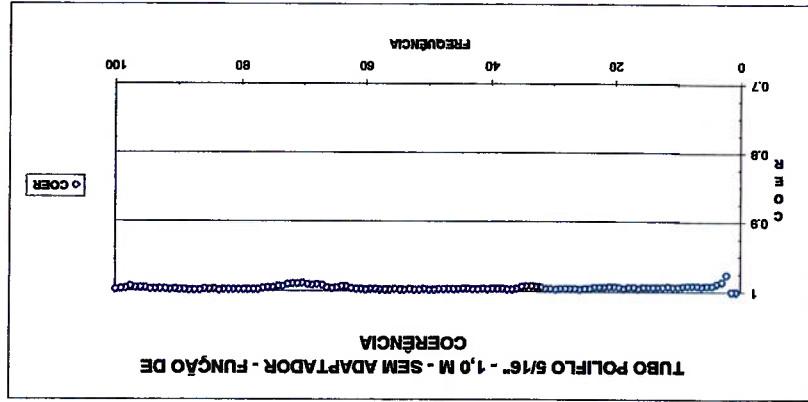




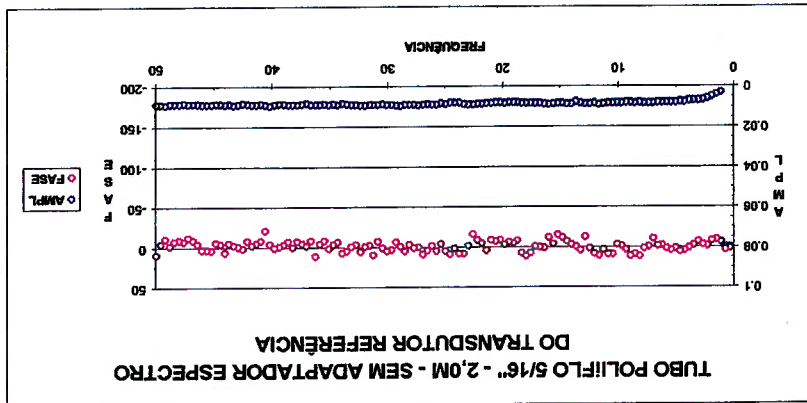
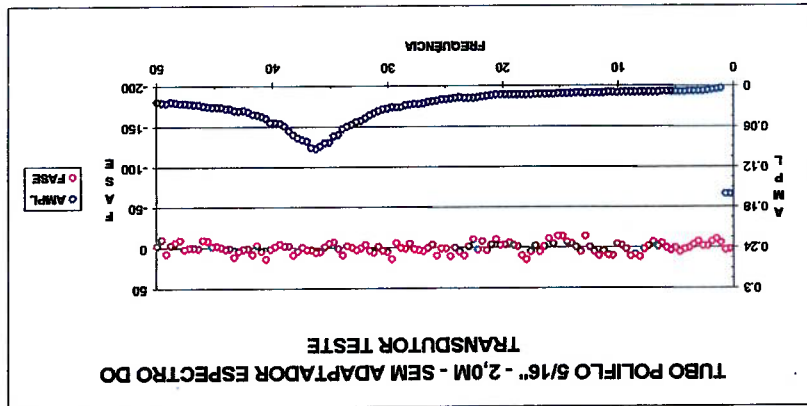
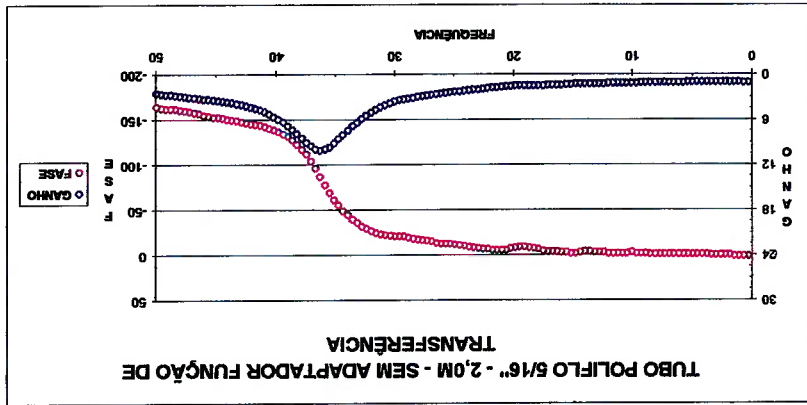
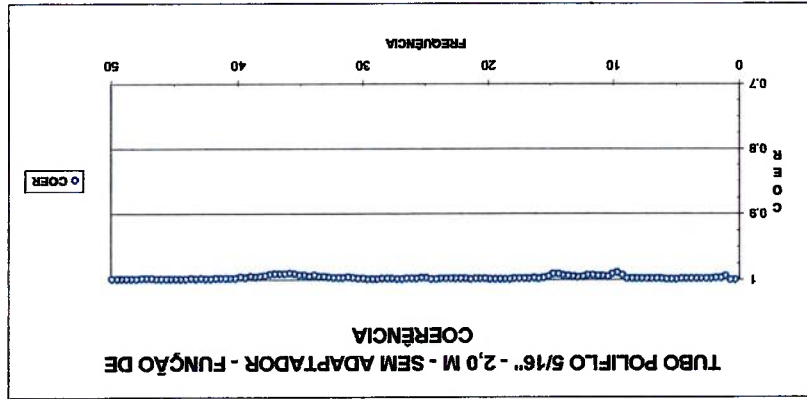
Tubo polido 5/16" - 0,5 m



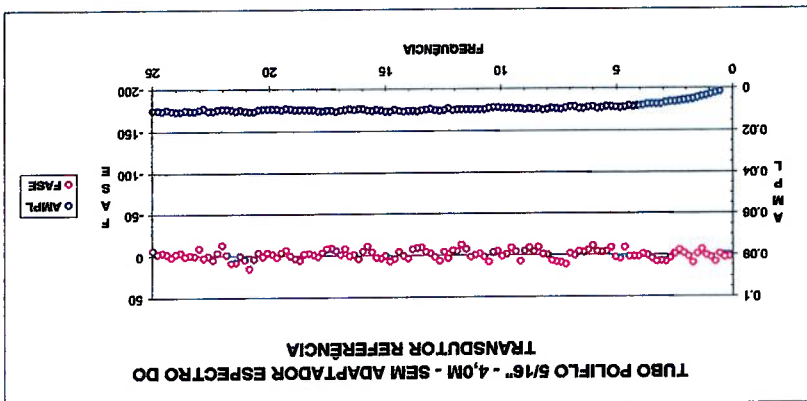
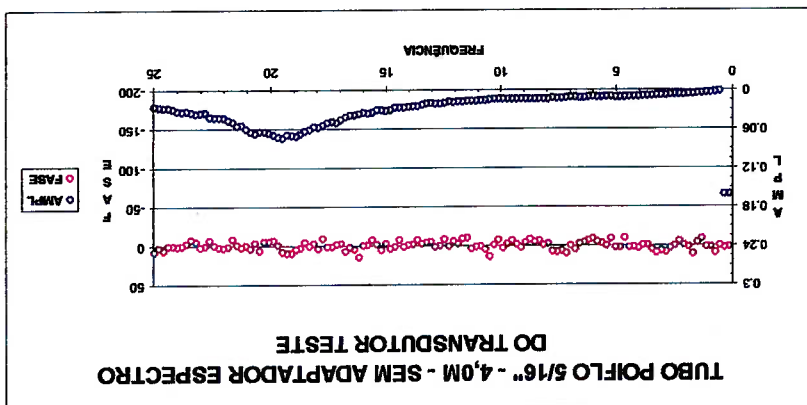
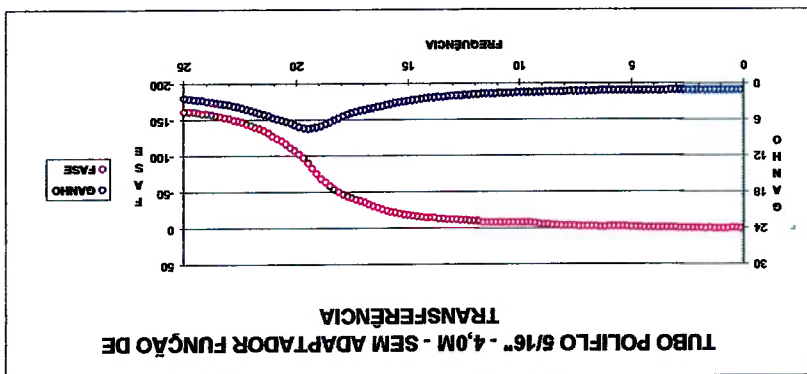
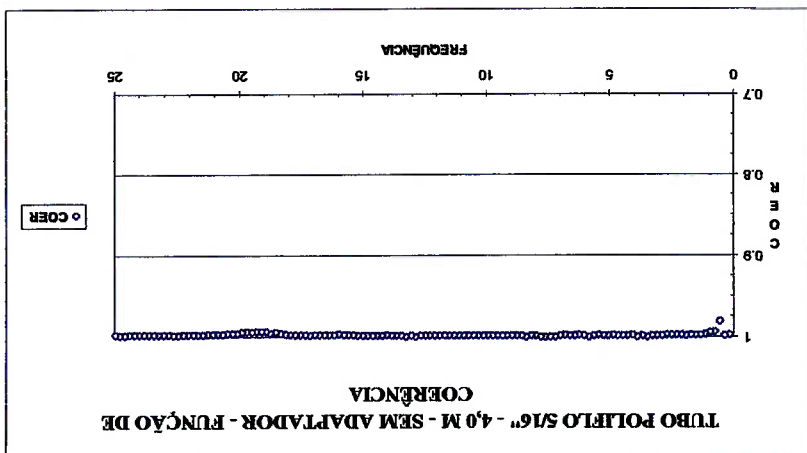
tubo poliffo 5/16" - 1,0 m



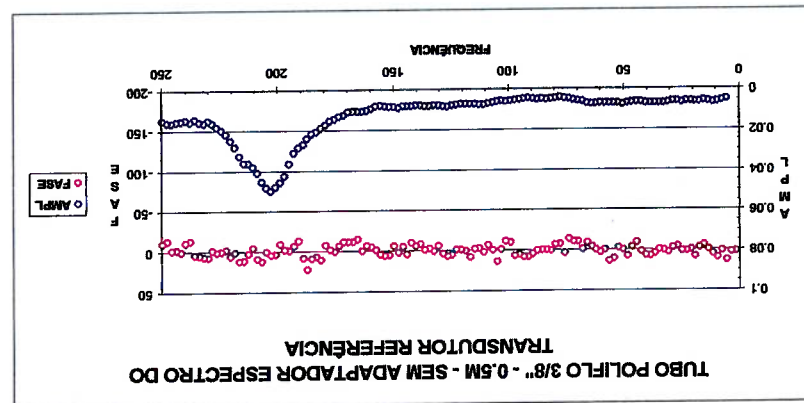
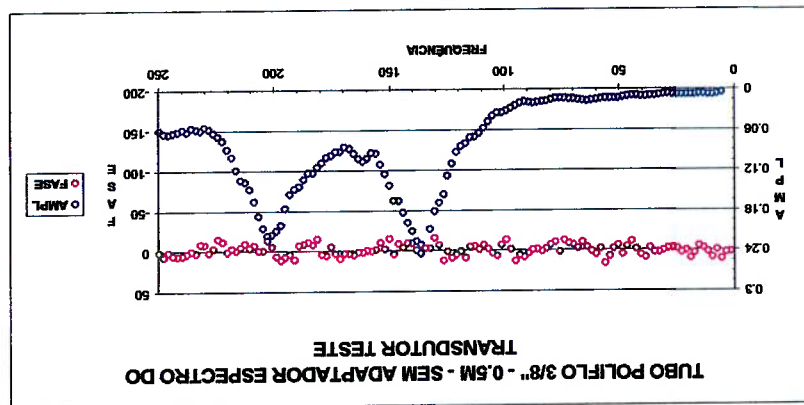
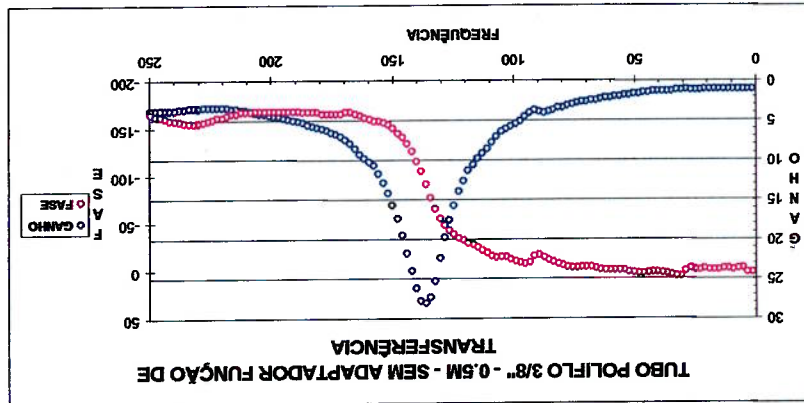
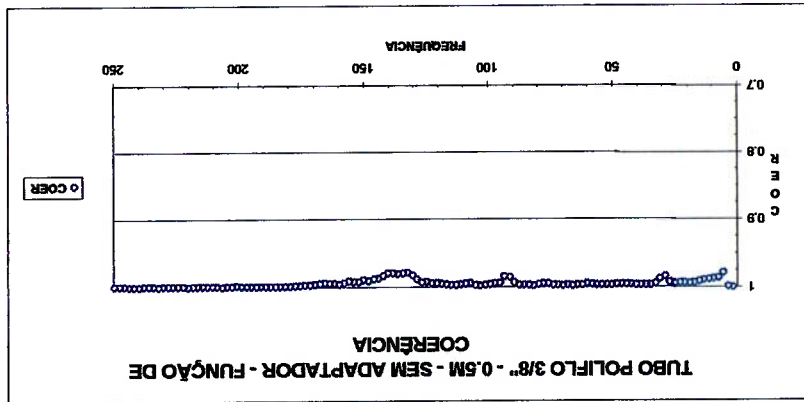
tubo poliffo 5/16" - 2.0 m



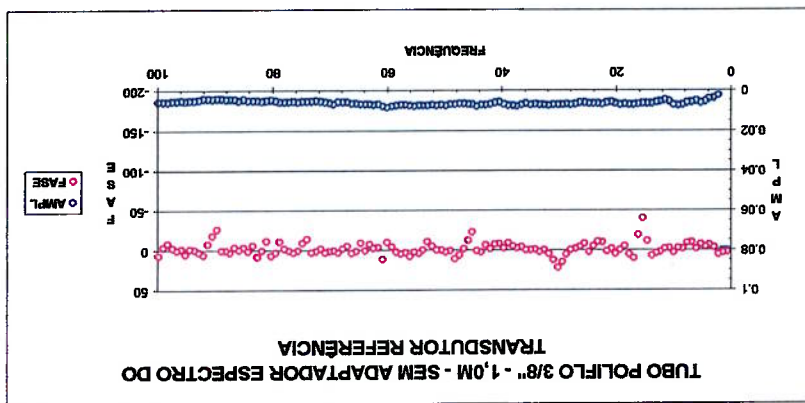
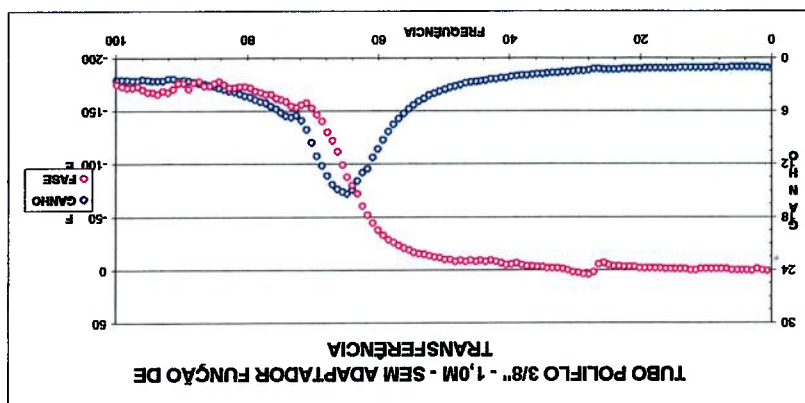
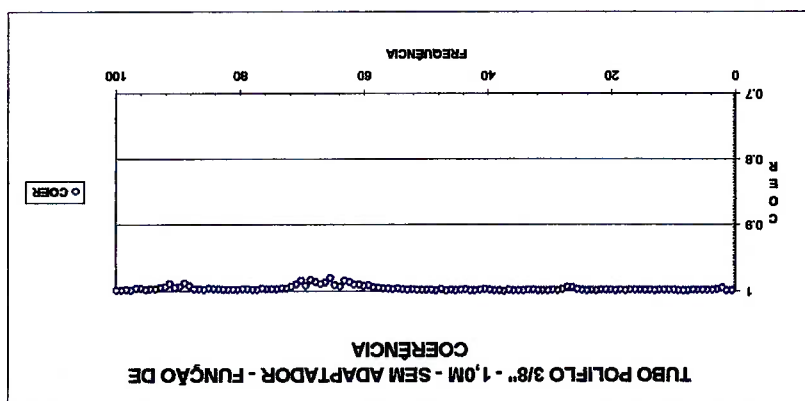
tubo poliflo 5/16" - 4,0 m



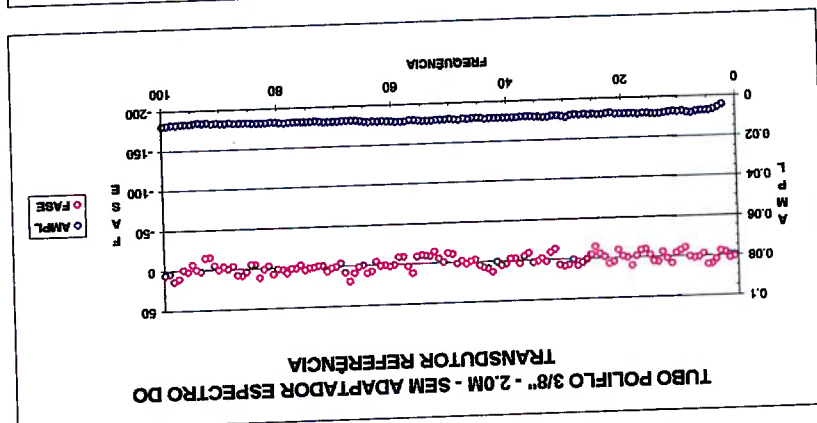
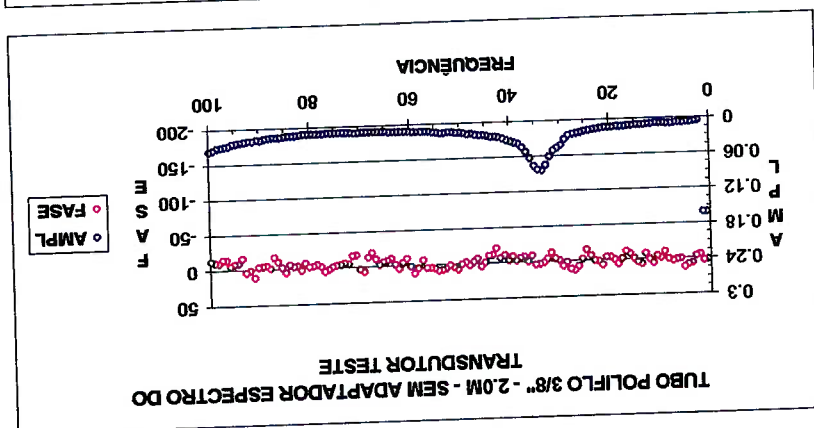
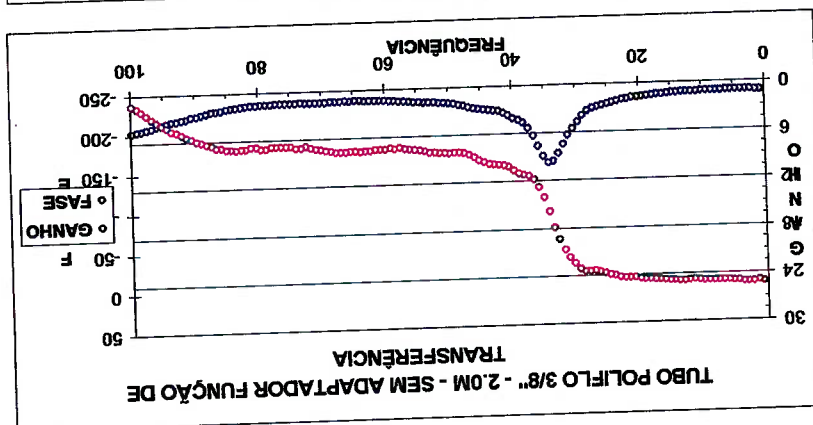
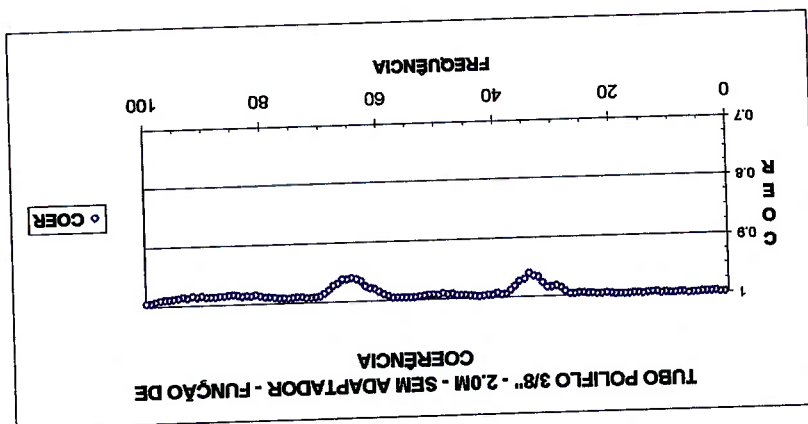
tubo poliflo 3/8" - 0.5 m



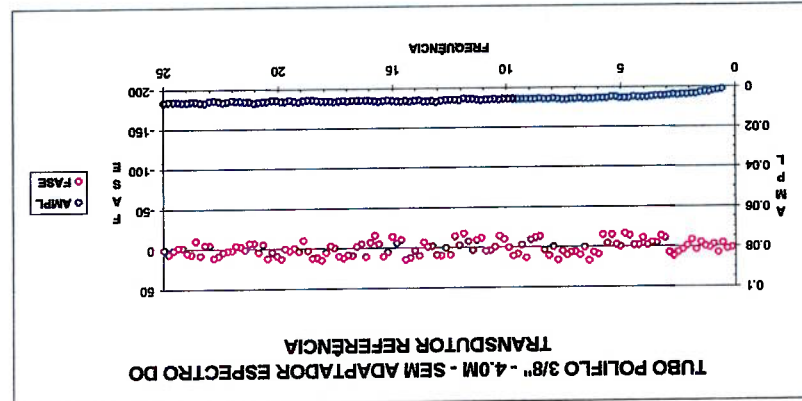
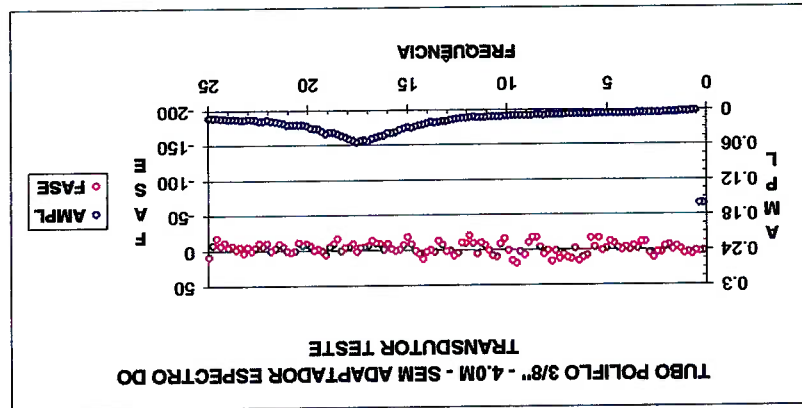
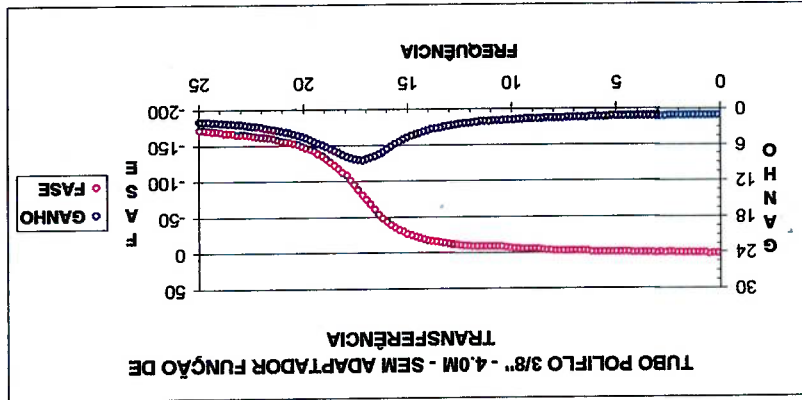
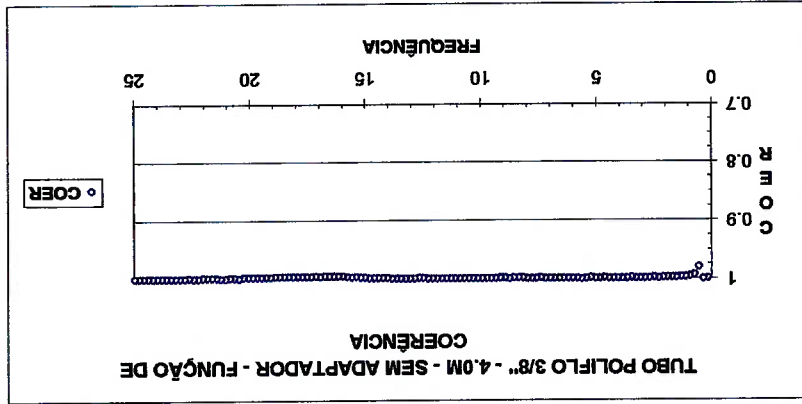
tubo poliflo 3/8" - 1.0 m



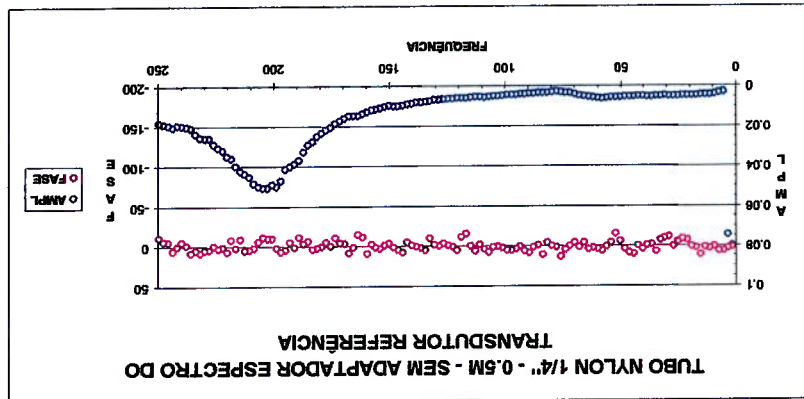
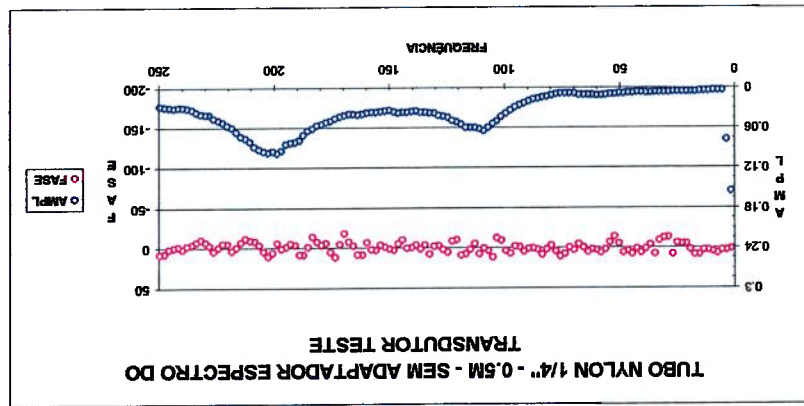
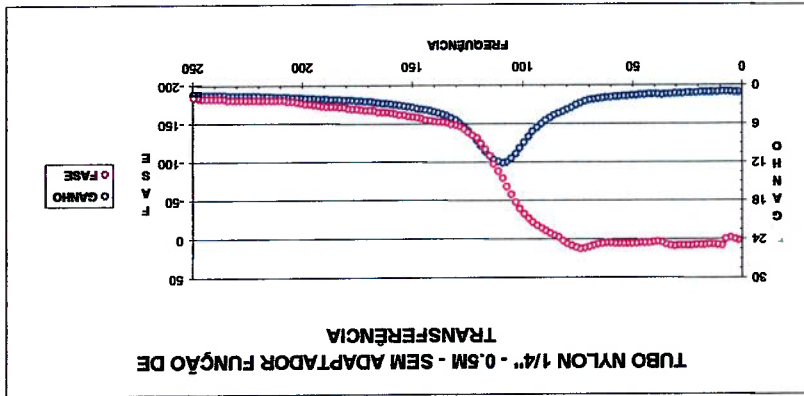
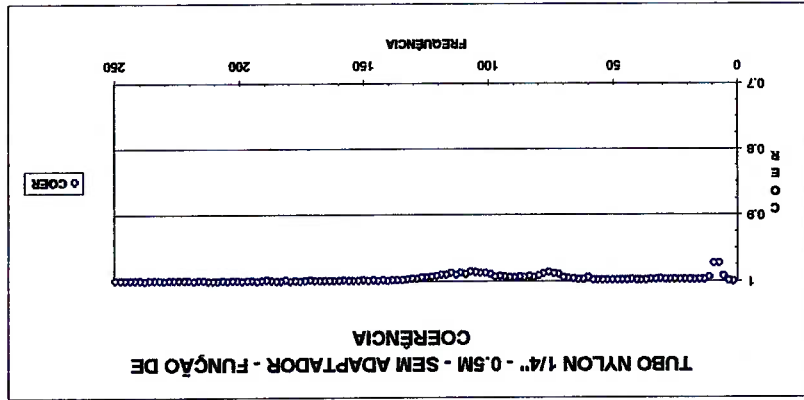
tubo poliflo 3/8" - 2.0 m



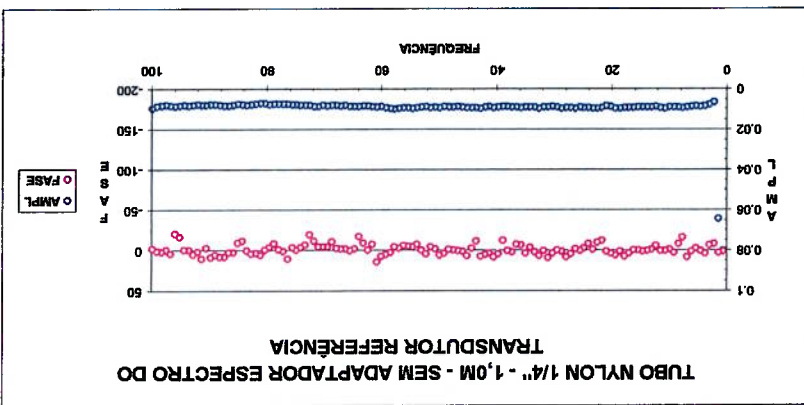
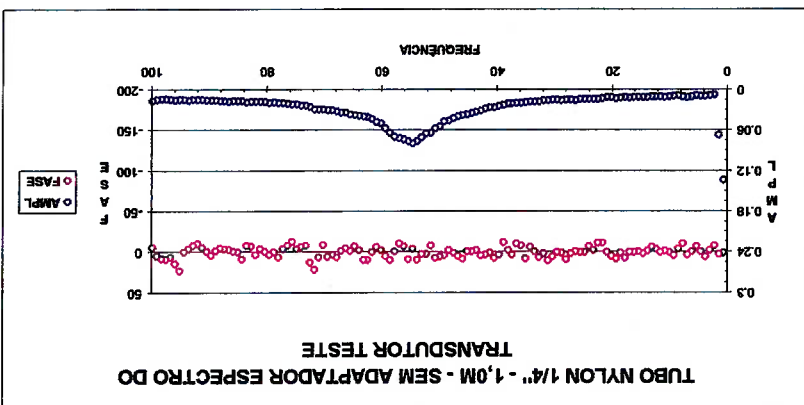
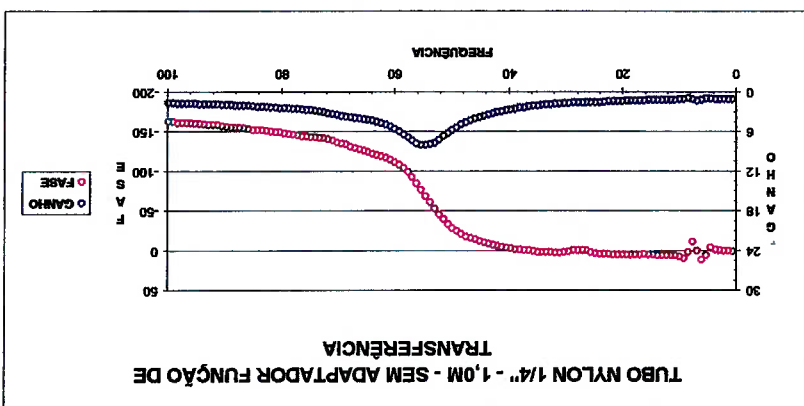
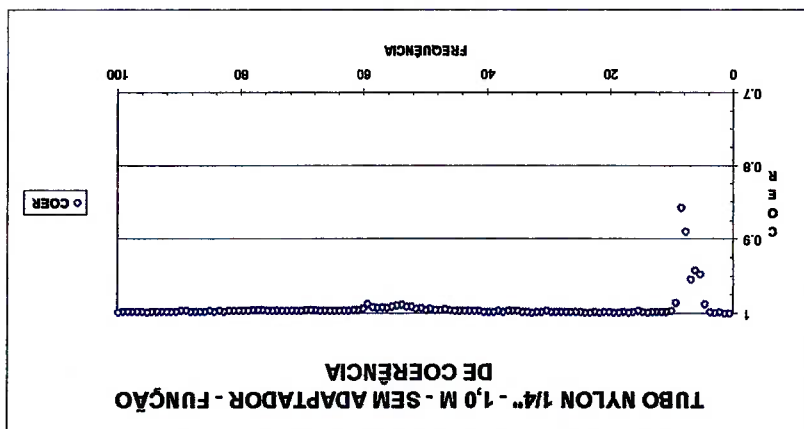
tubo polifio 3/8" - 4.0 m



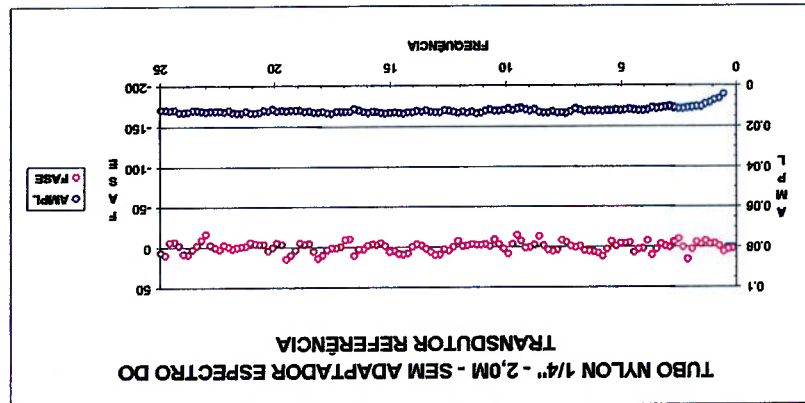
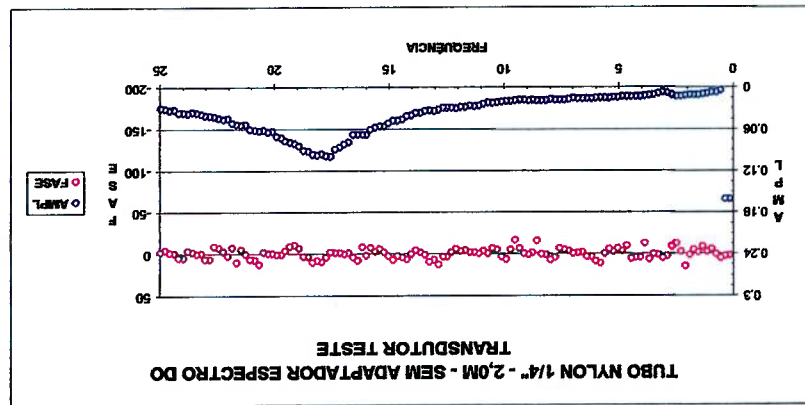
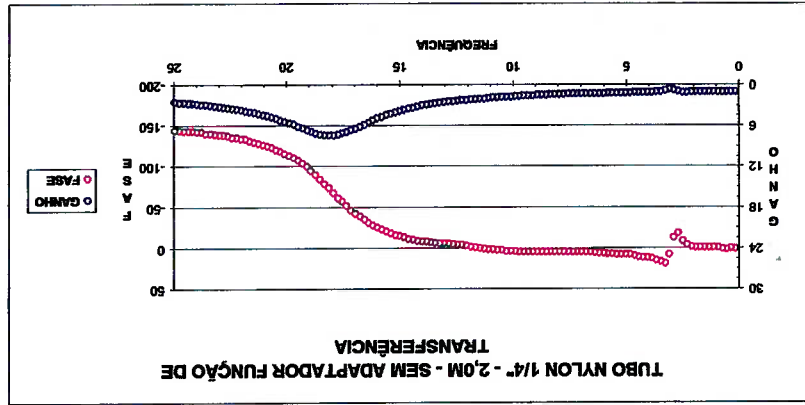
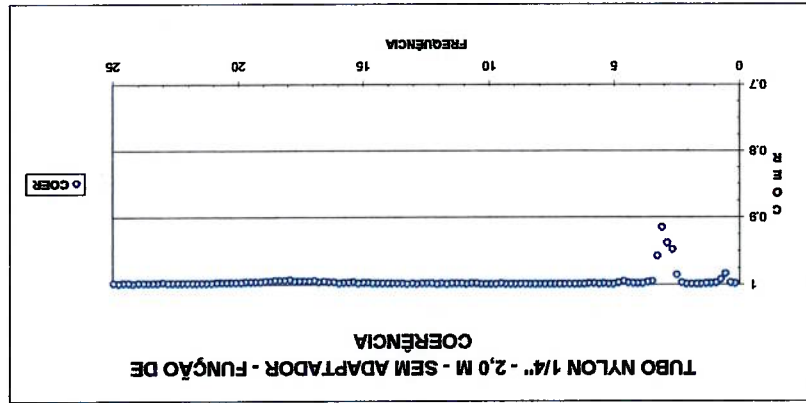
tubo de nylon 1/4" - 0,5 m



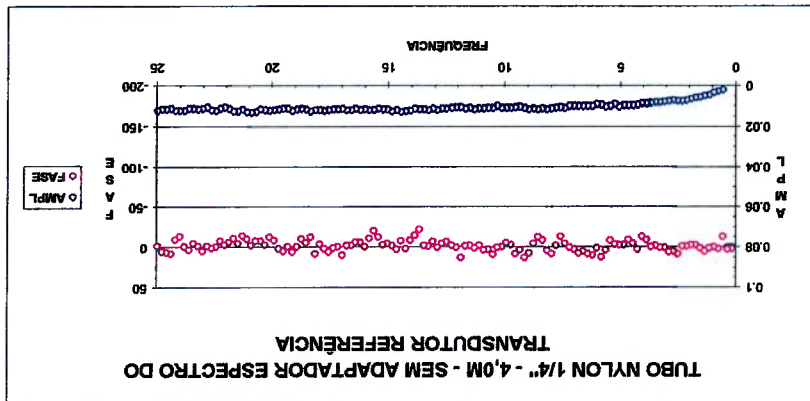
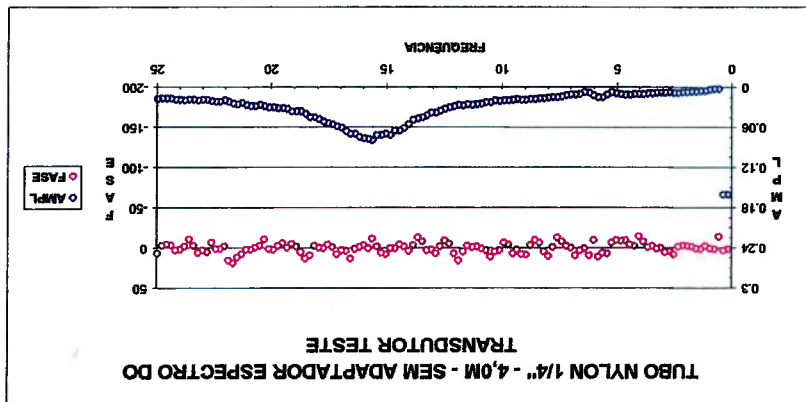
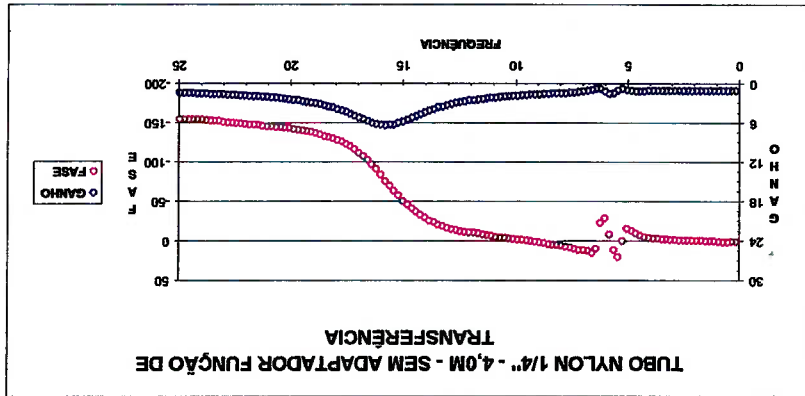
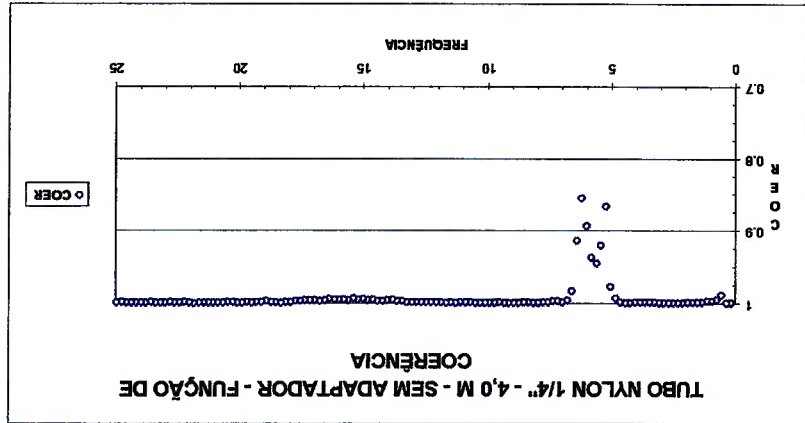
tubo de nylon 1/4" - 1.0 m



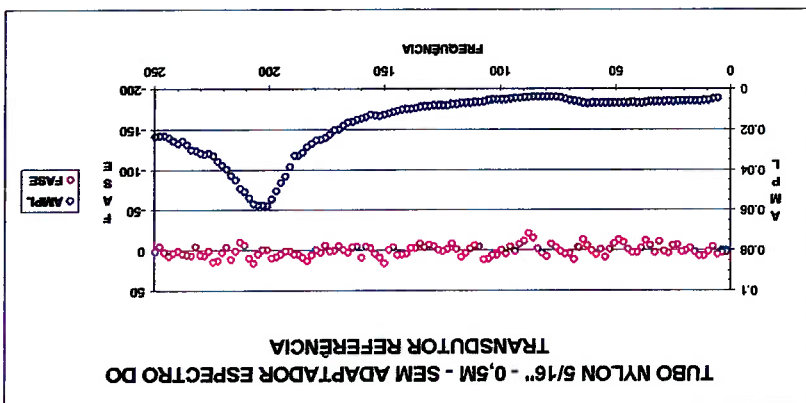
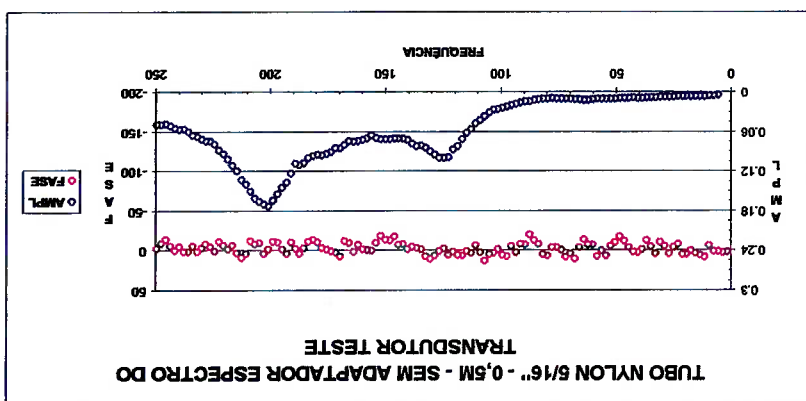
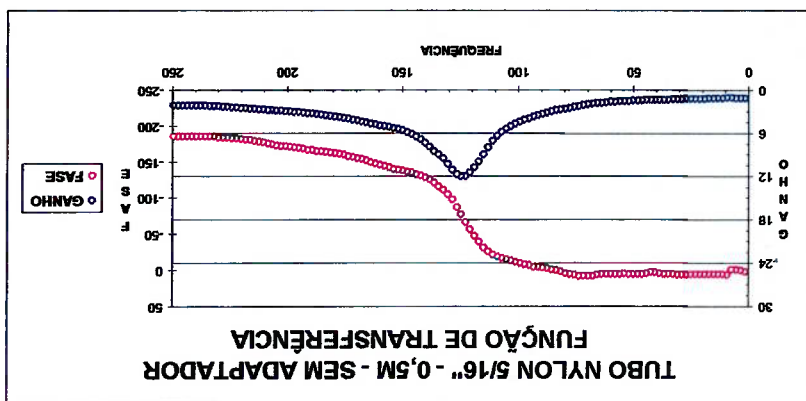
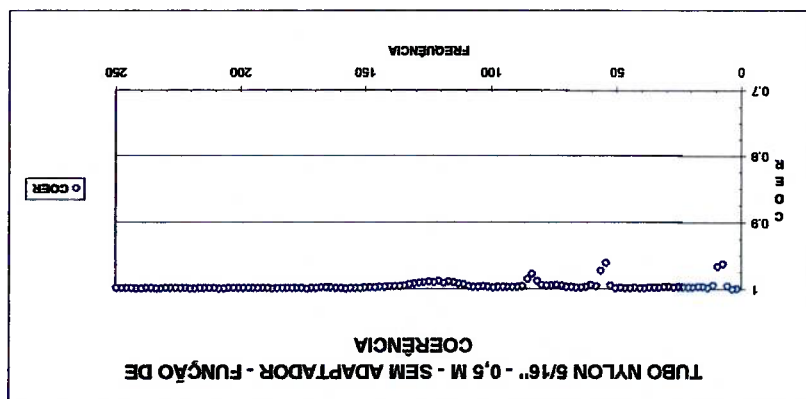
tubo de nylon 1/4" - 2.0 m



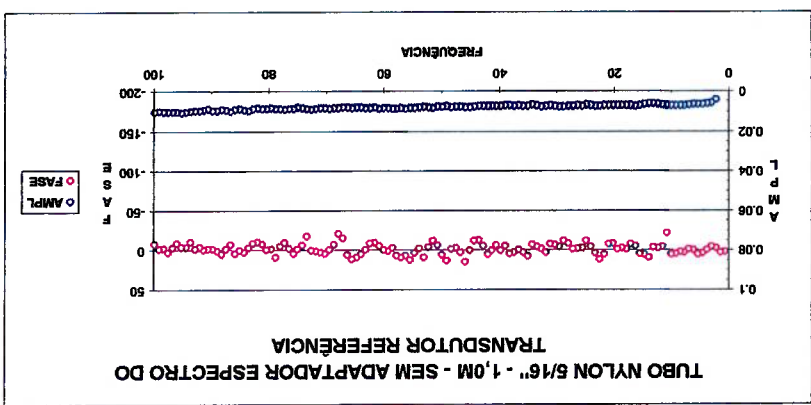
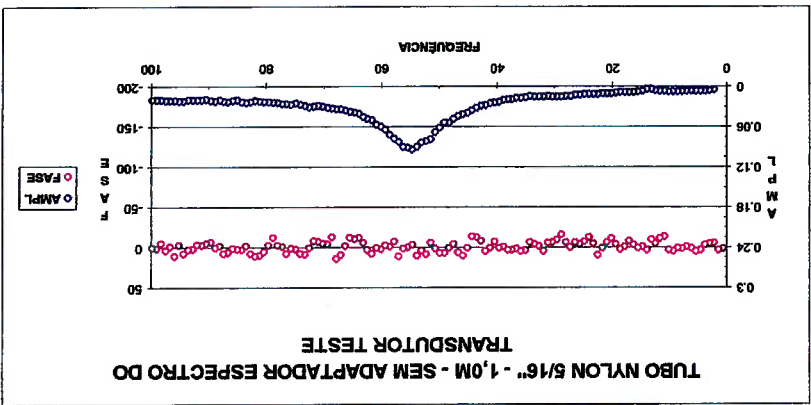
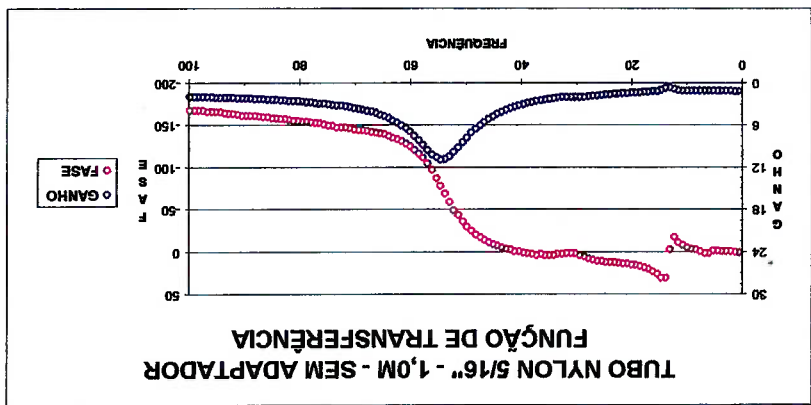
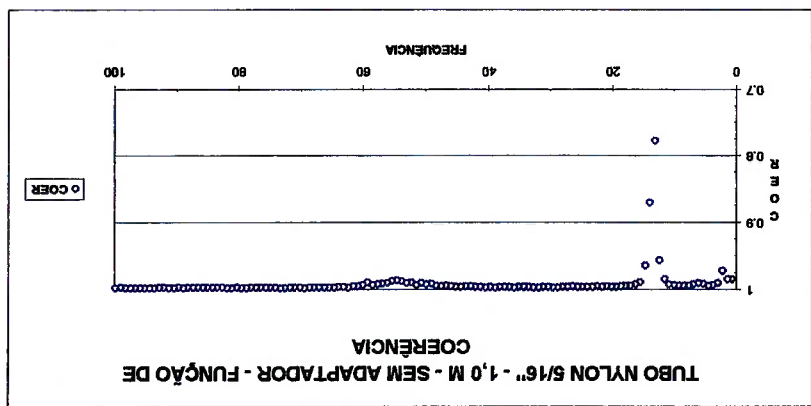
tubo de nylon 1/4" - 4.0 m



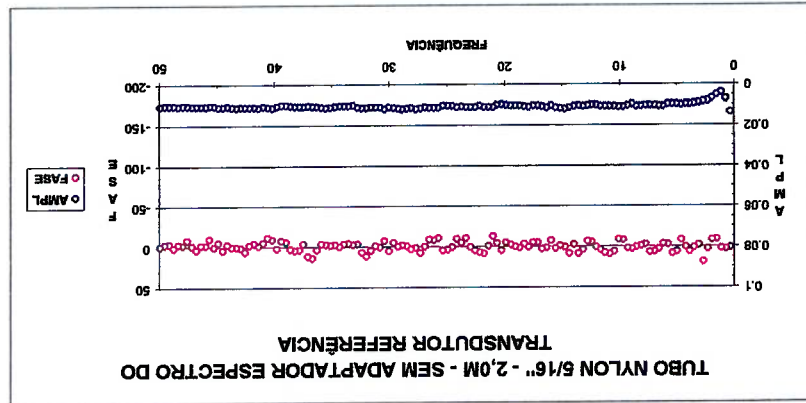
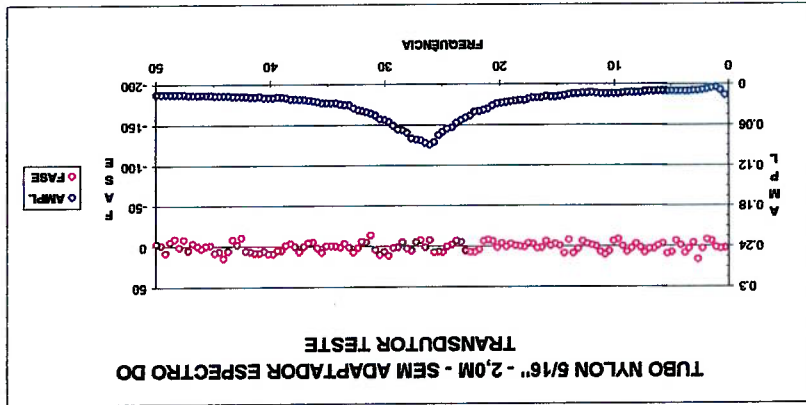
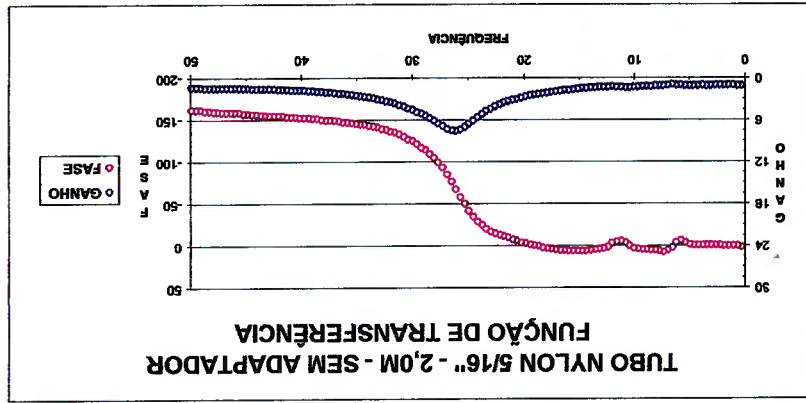
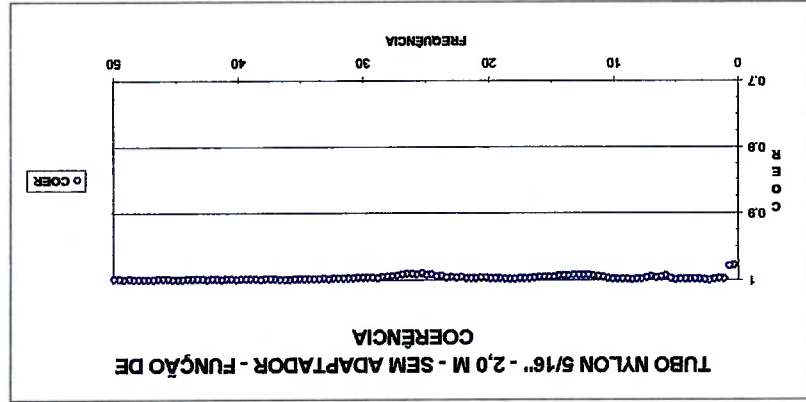
tubo de nylon 5/16 - 0,5 m



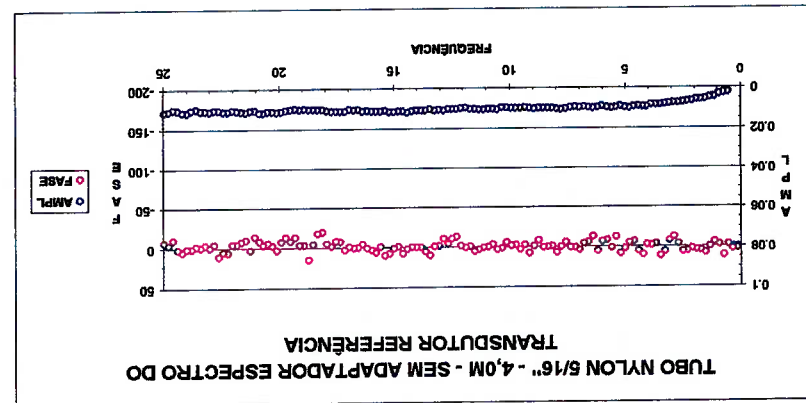
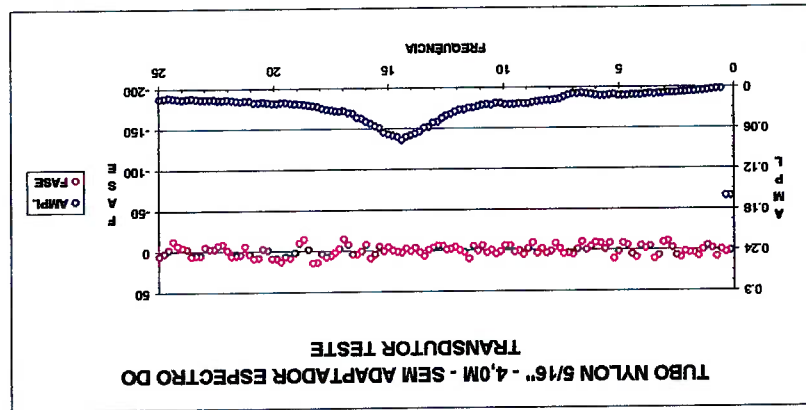
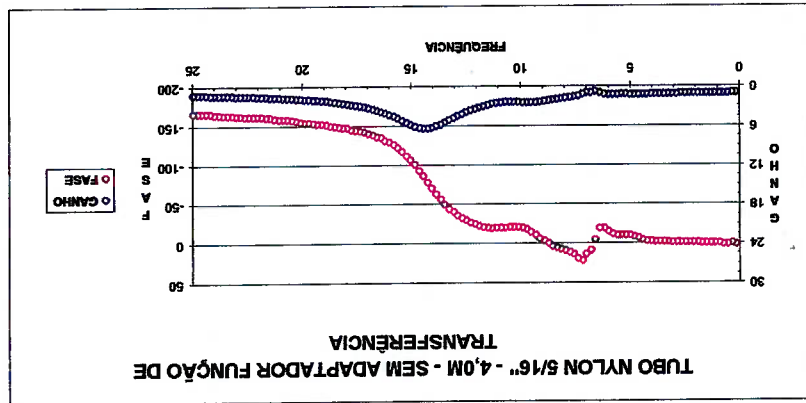
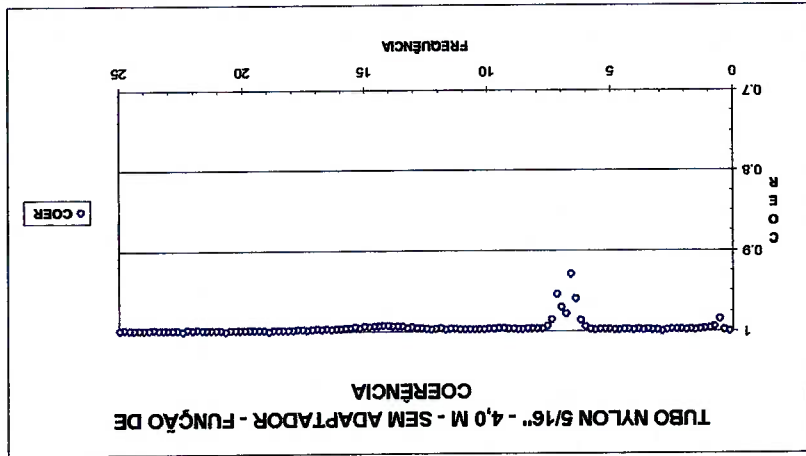
tubo de nylon 5/16" - 1,0 m



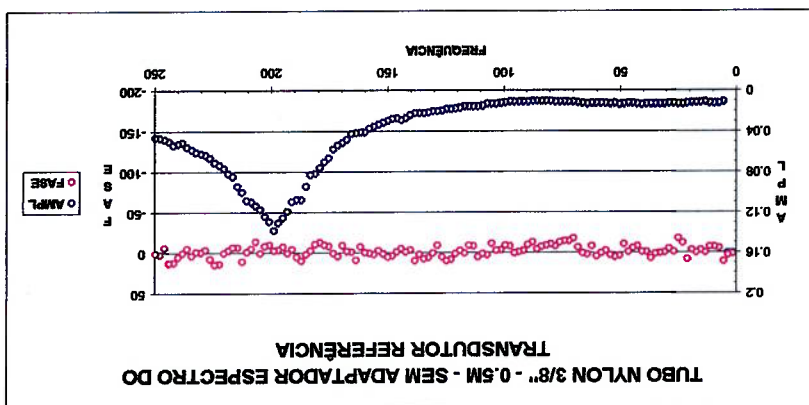
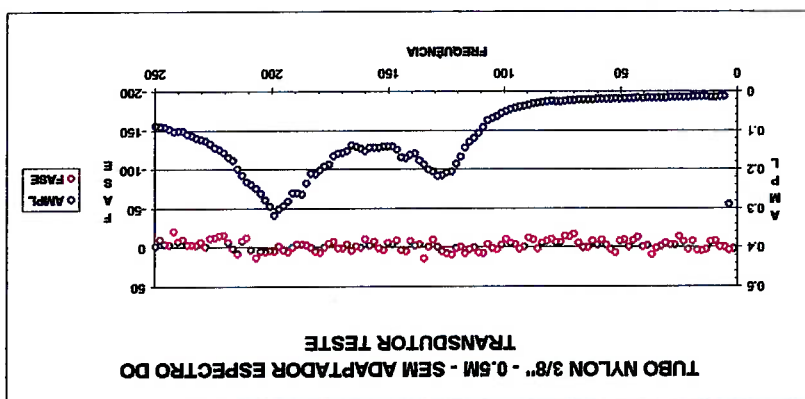
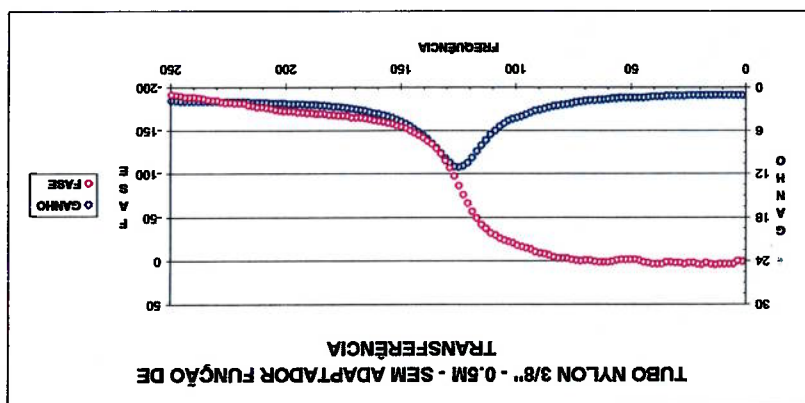
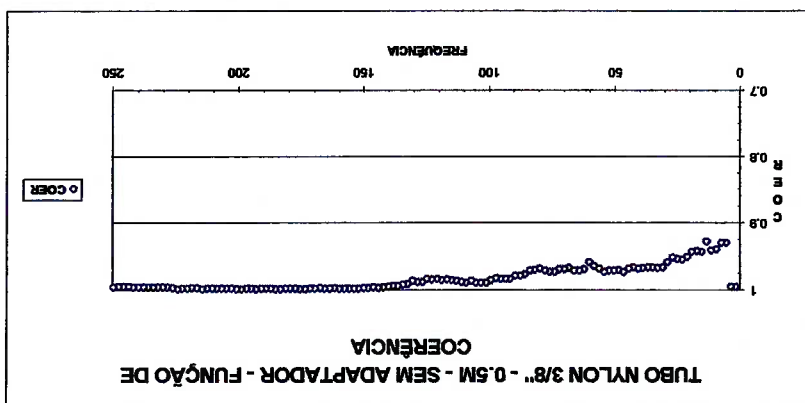
tubo de nylon 5/16" - 2,0 m



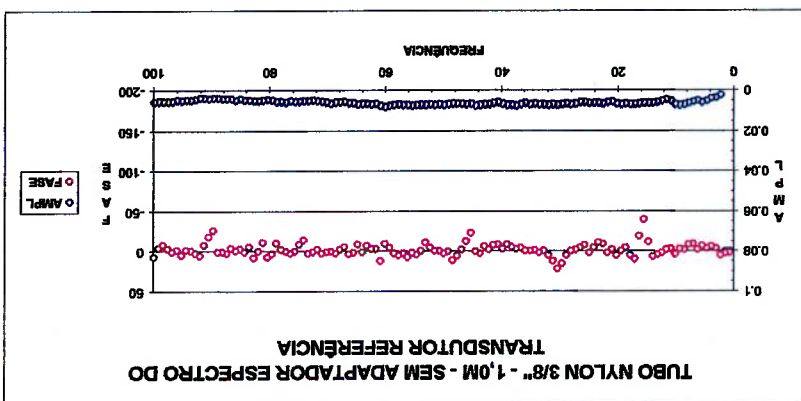
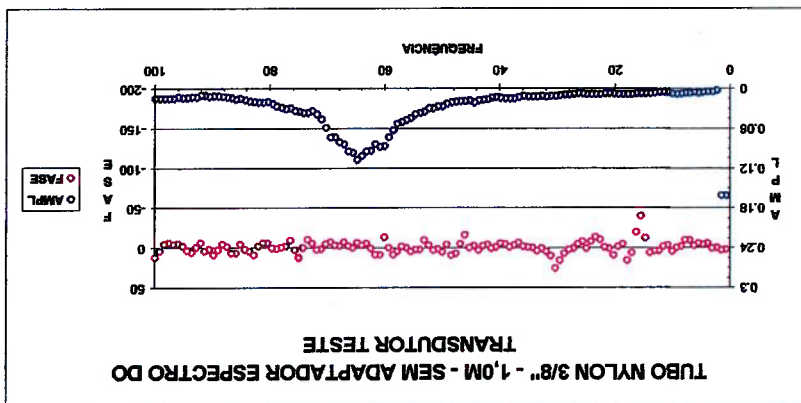
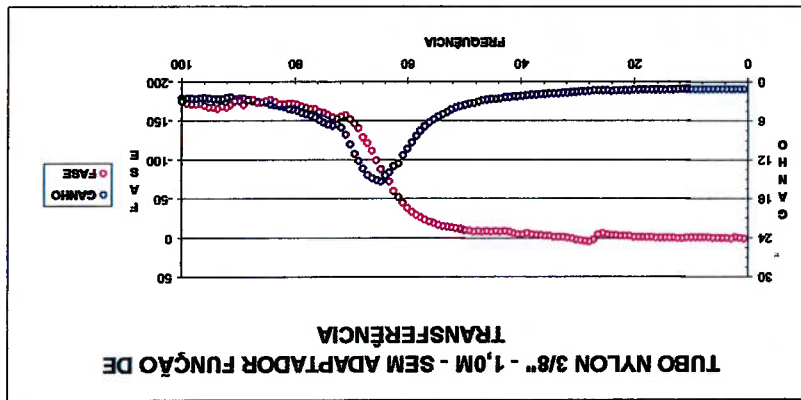
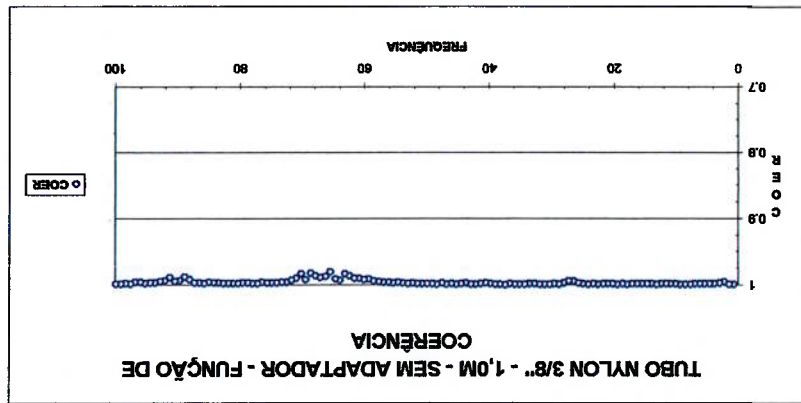
tubo de nylon 5/16" - 4,0 m



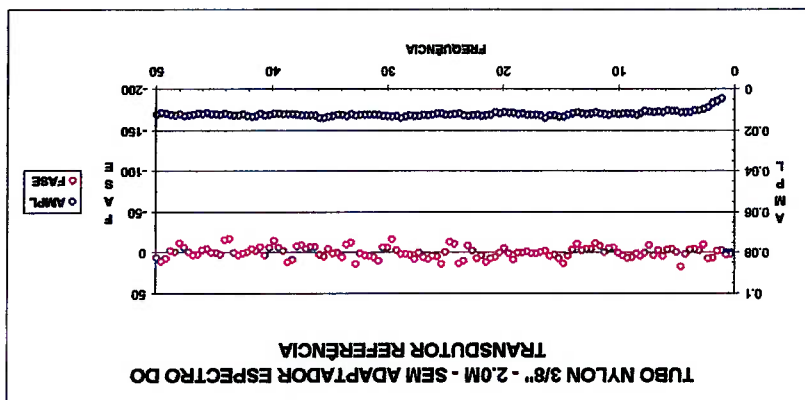
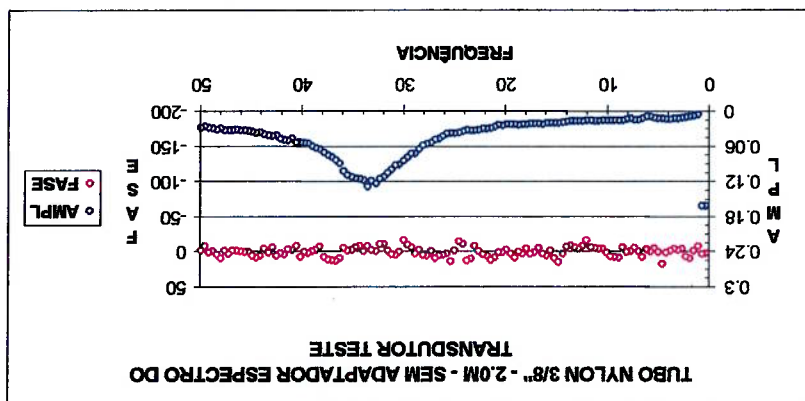
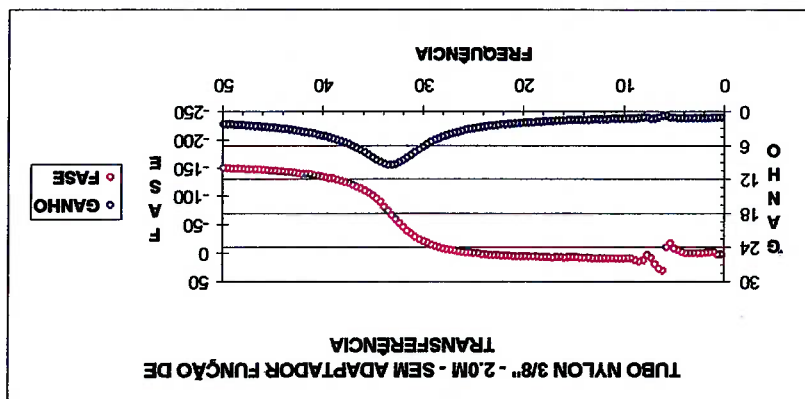
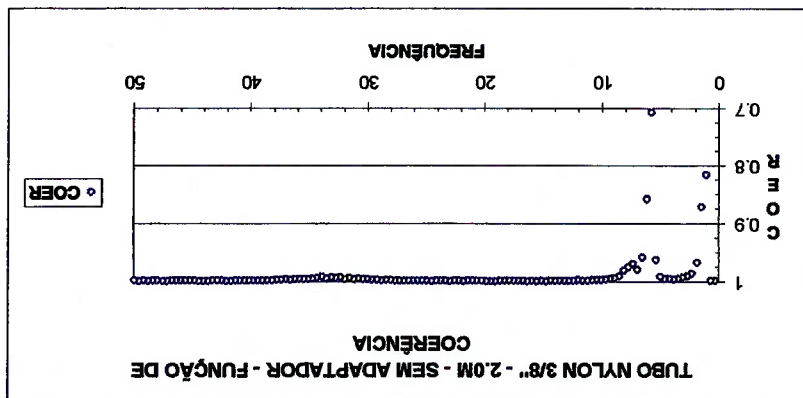
tubo de nylon 3/8 - 0,5 m



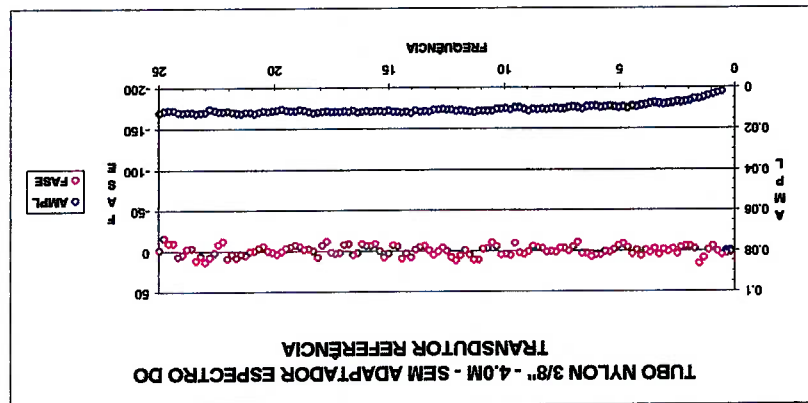
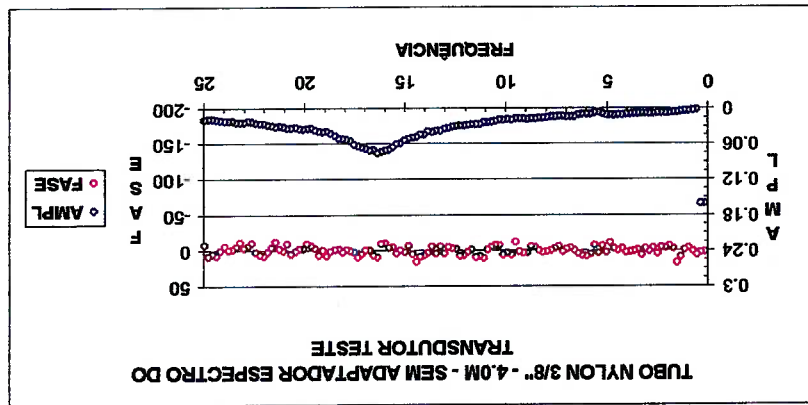
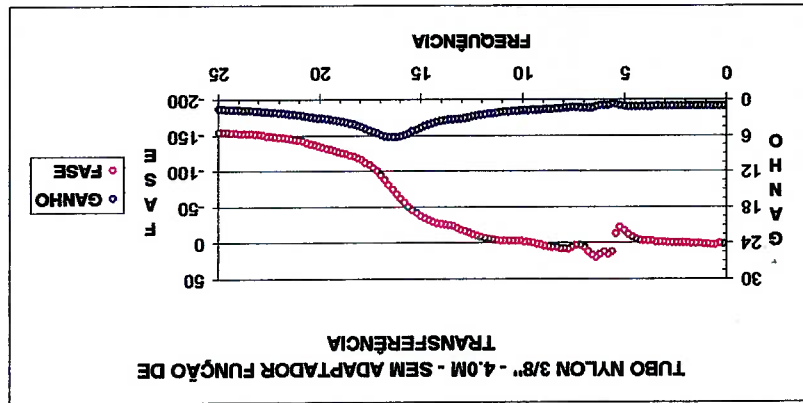
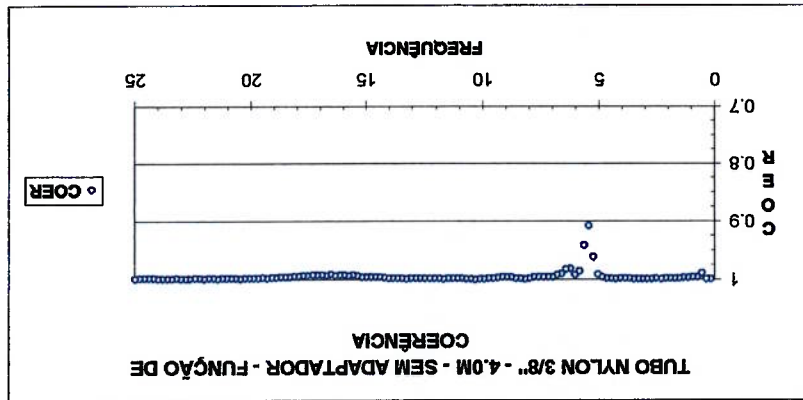
tubo de nylon 3/8" - 1,0 m



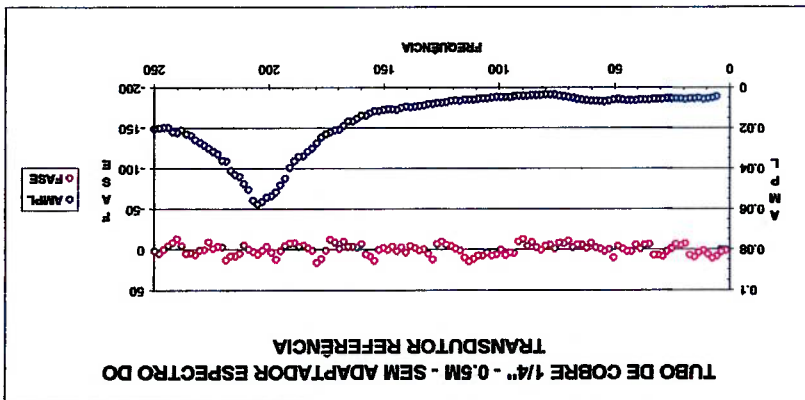
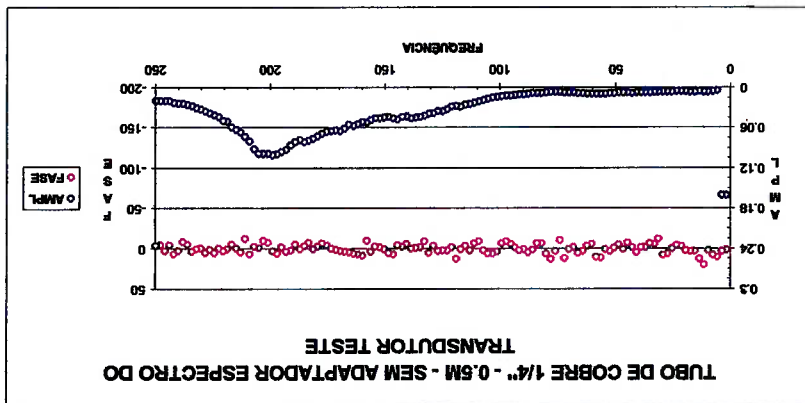
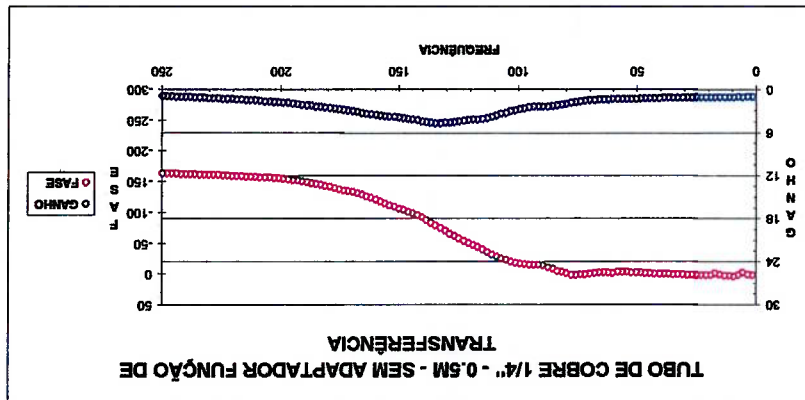
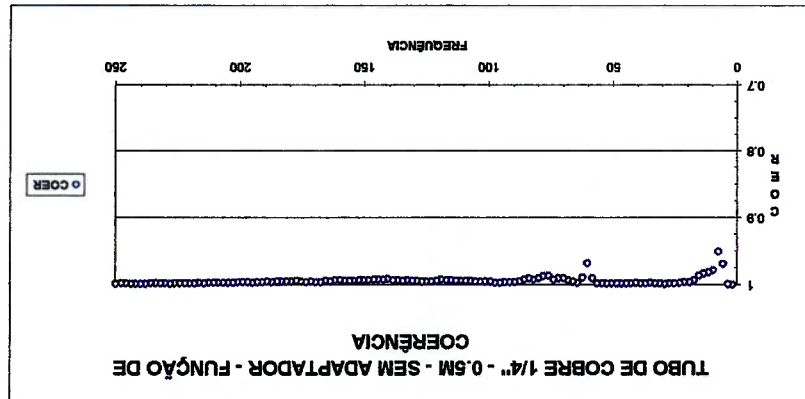
tubo de nylon 3/8" - 2,0 m



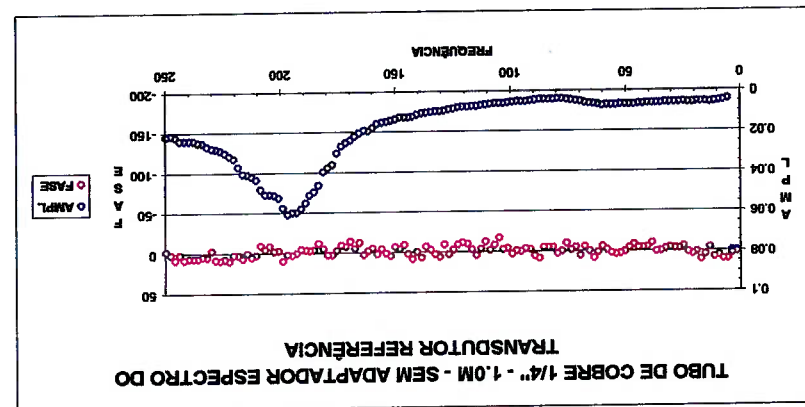
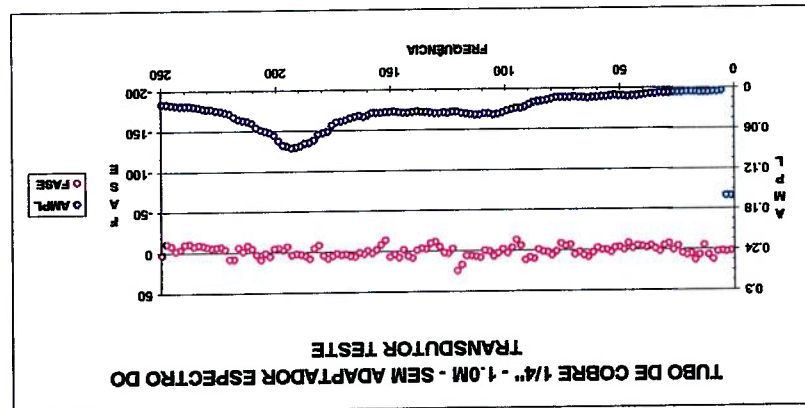
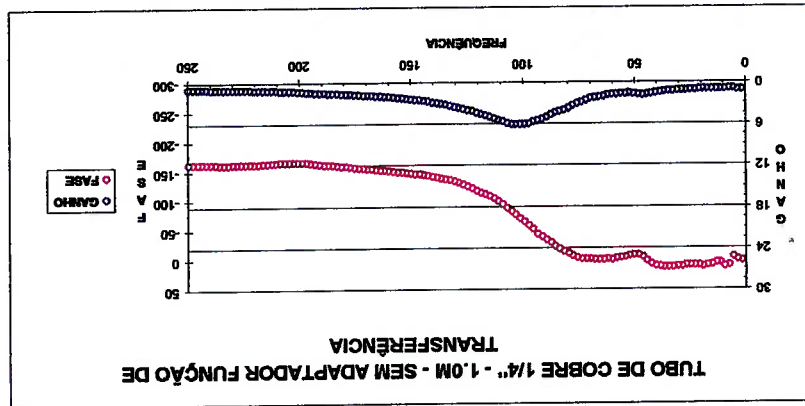
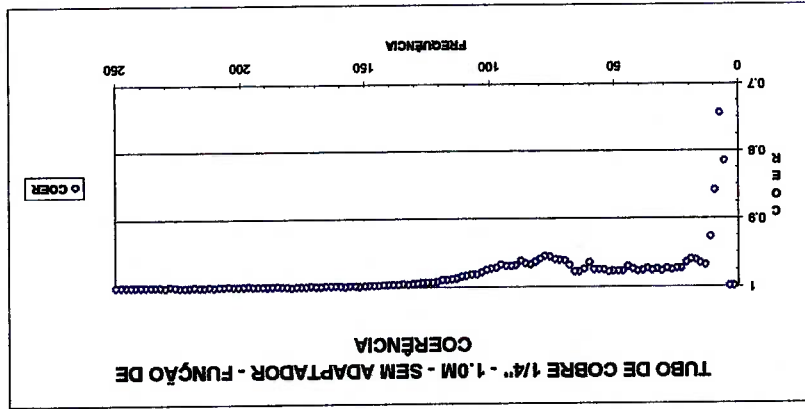
tubo de nylon 3/8 - 4,0 m



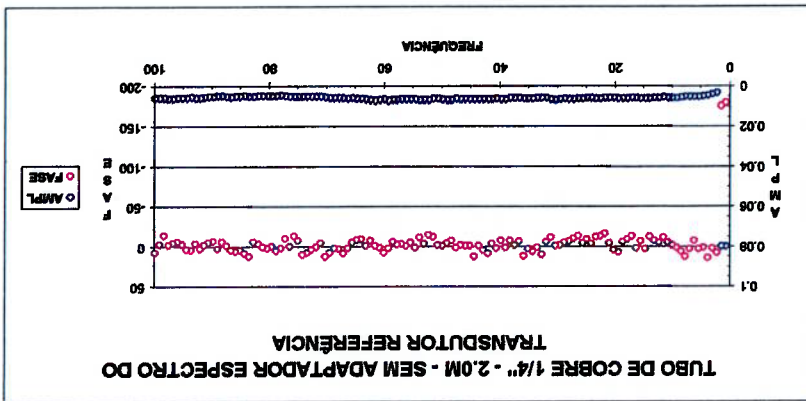
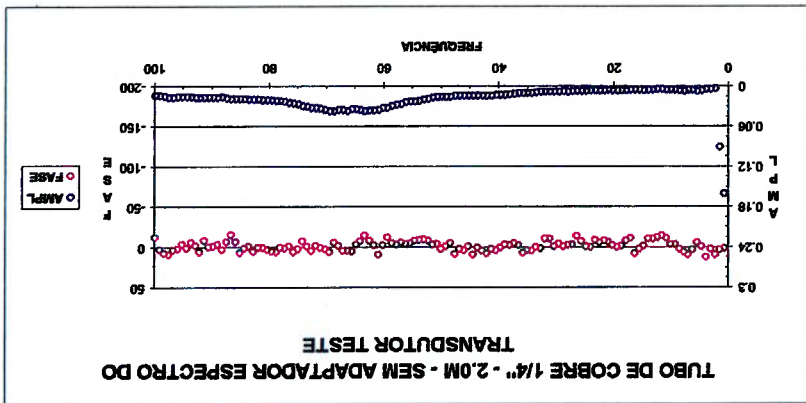
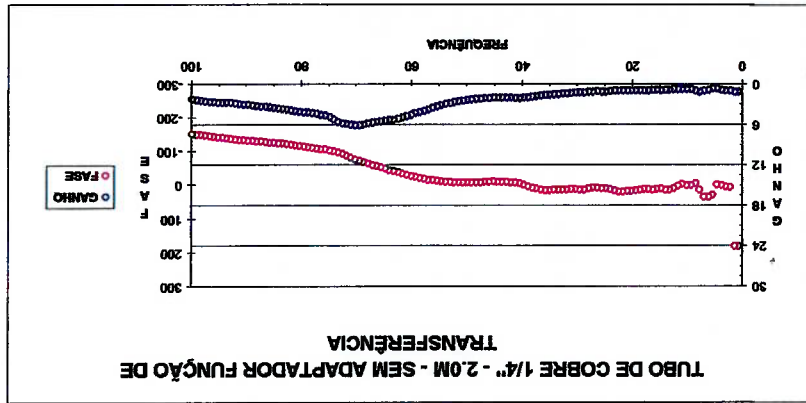
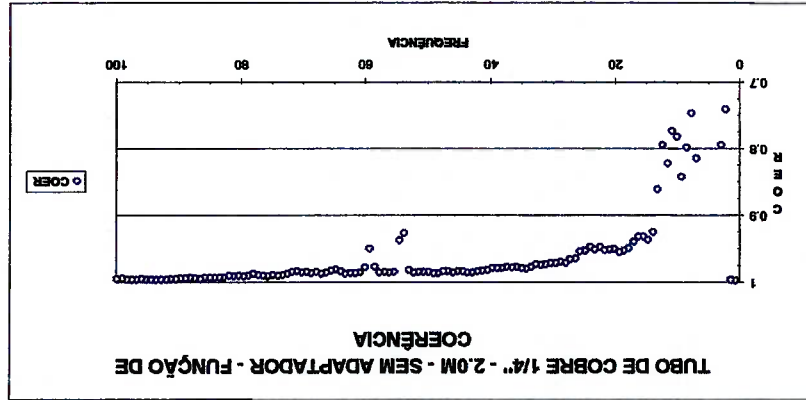
tubo de cobre 1/4" - 0,5 m



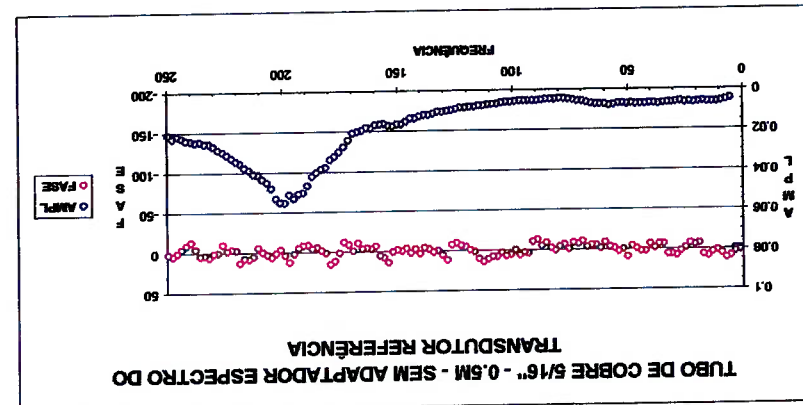
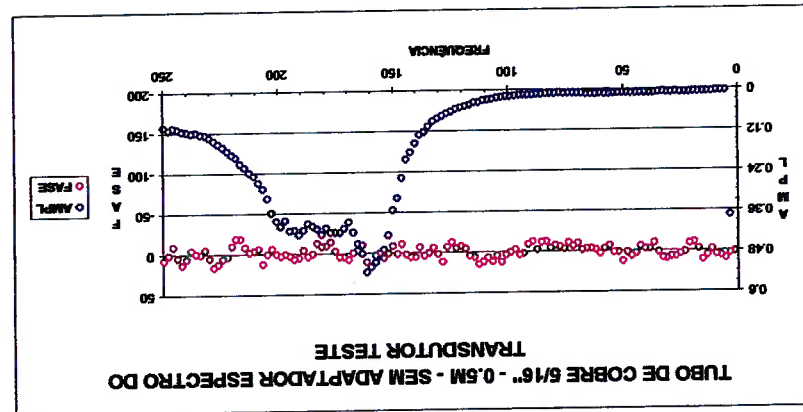
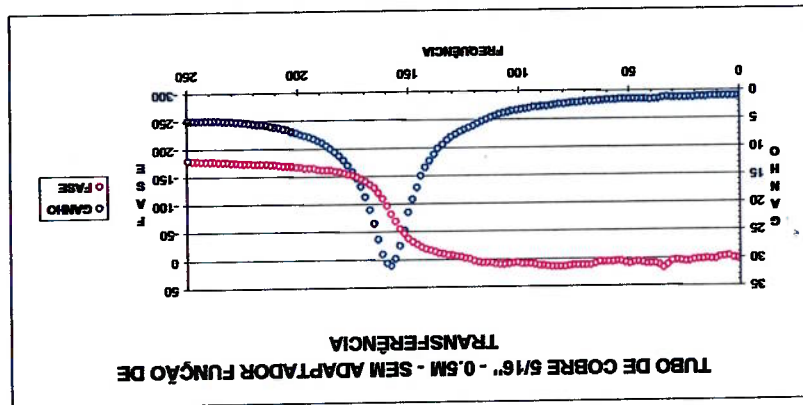
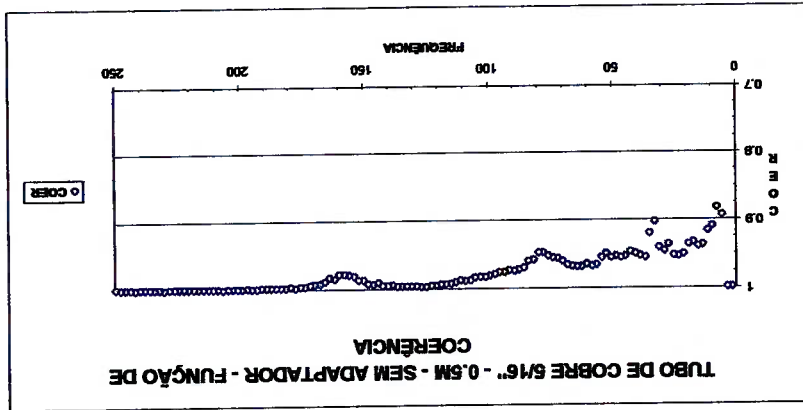
tubo de cobre 1/4" - 1,0 m



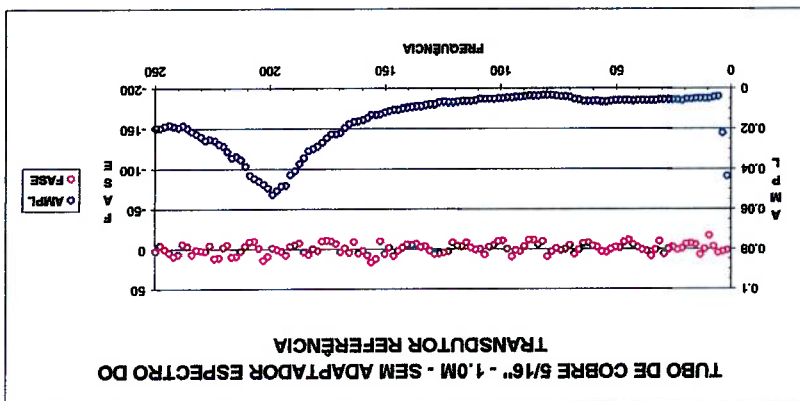
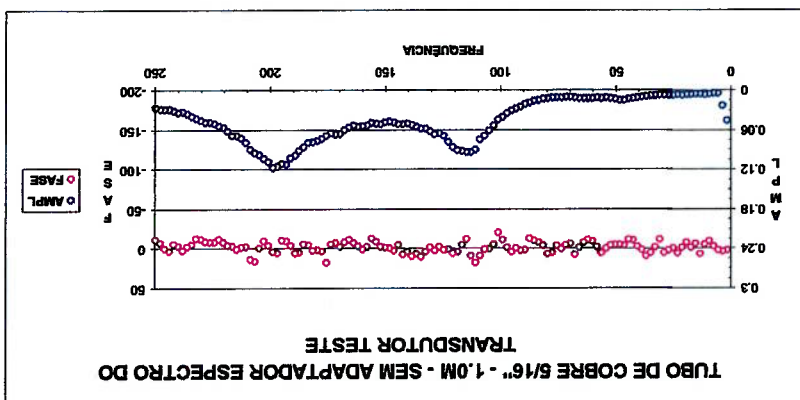
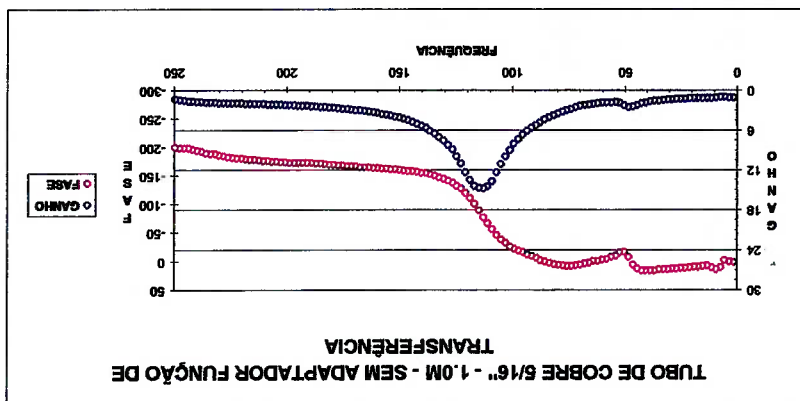
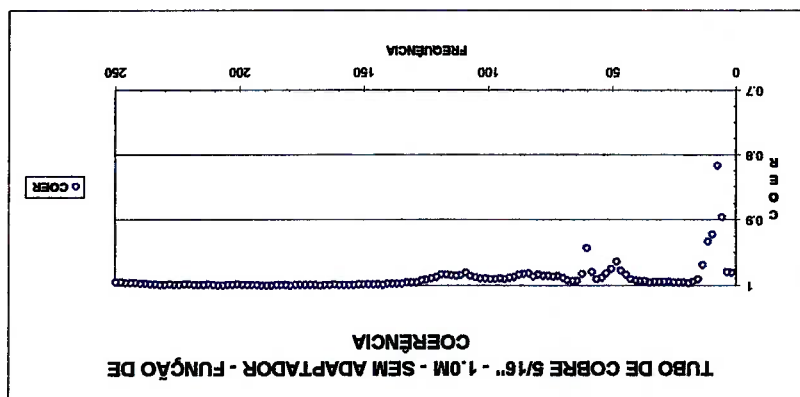
tubo de cobre 1/4" - 2,0 m



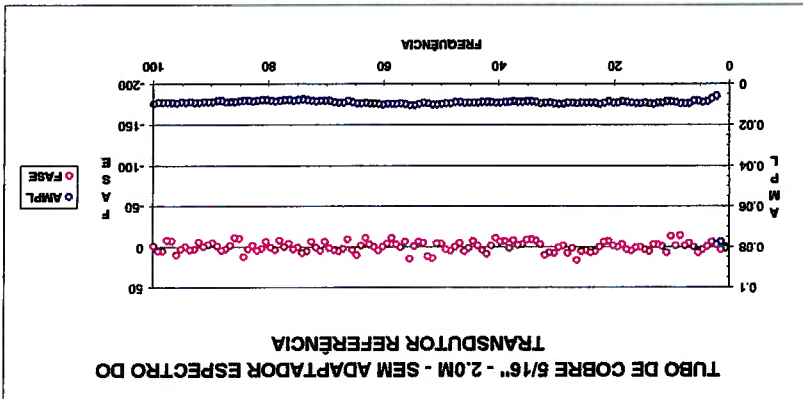
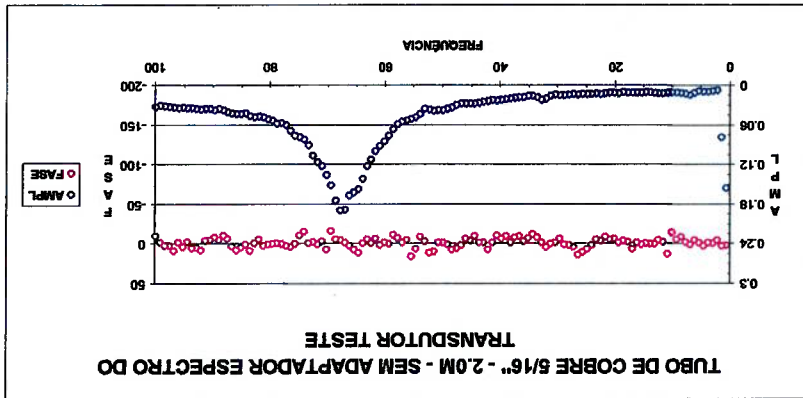
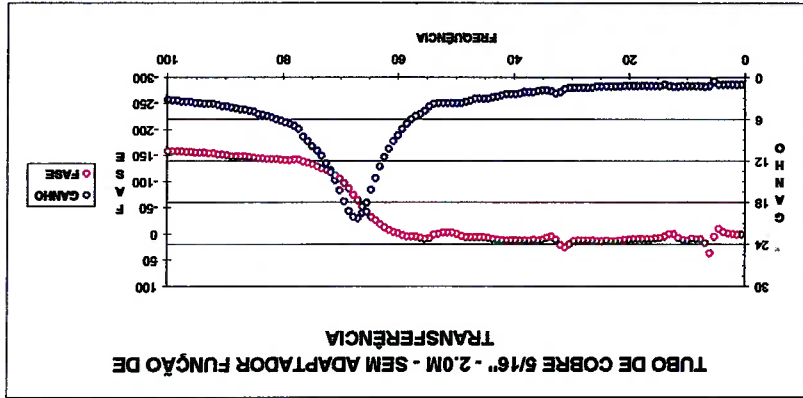
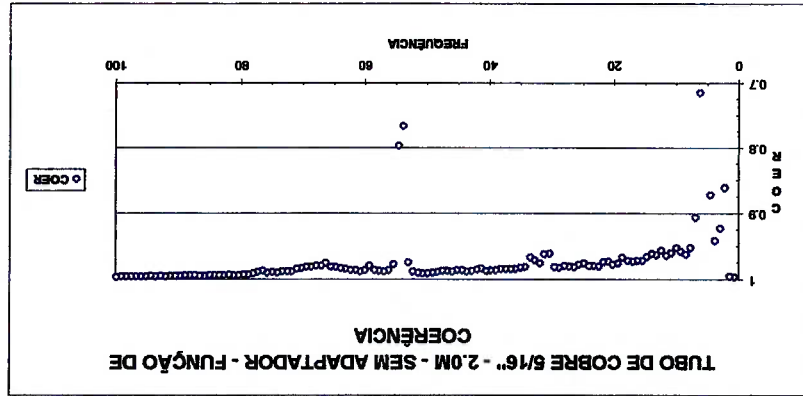
tubo de cobre 5/16" - 0,5 m



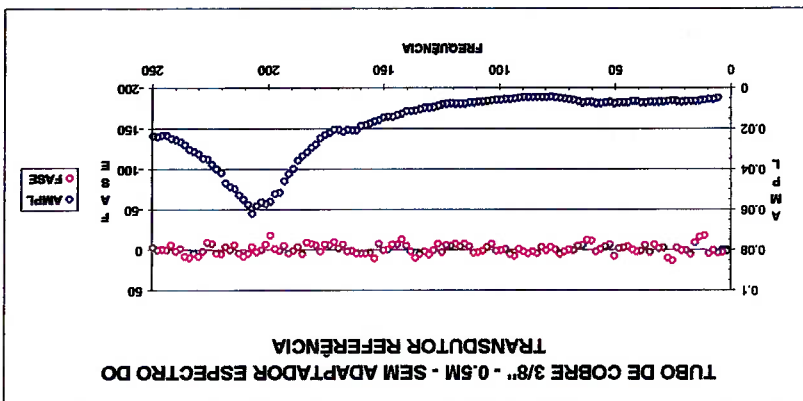
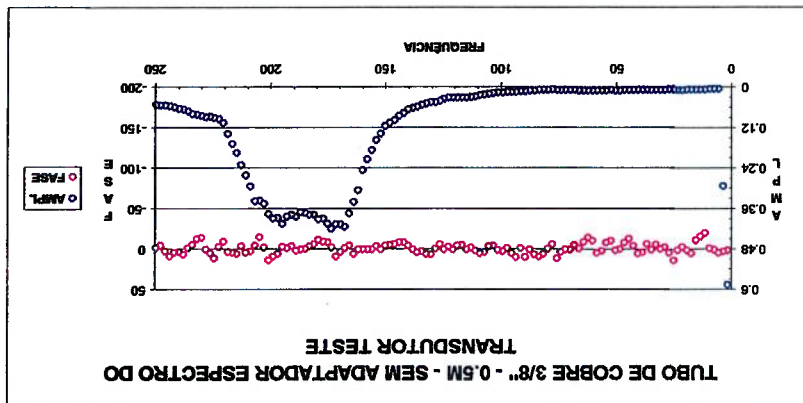
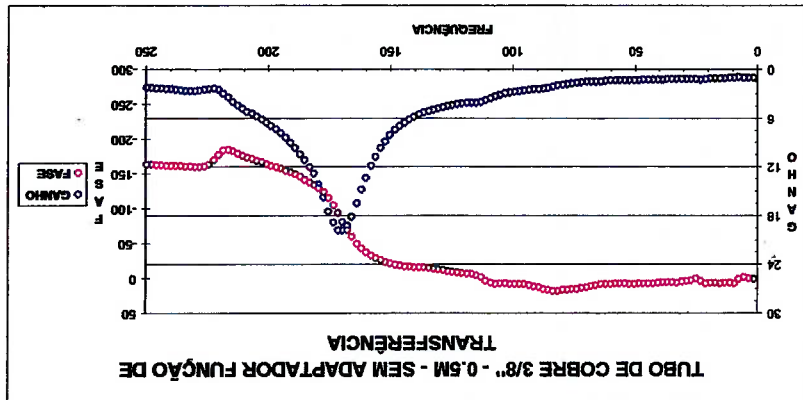
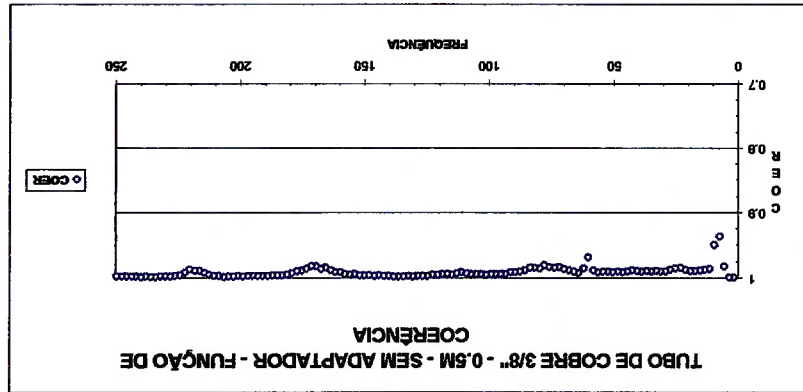
tubo de cobre 5/16" - 1,0 m



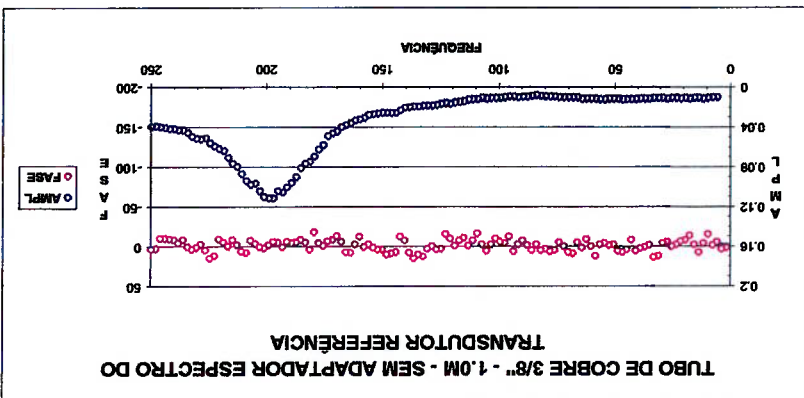
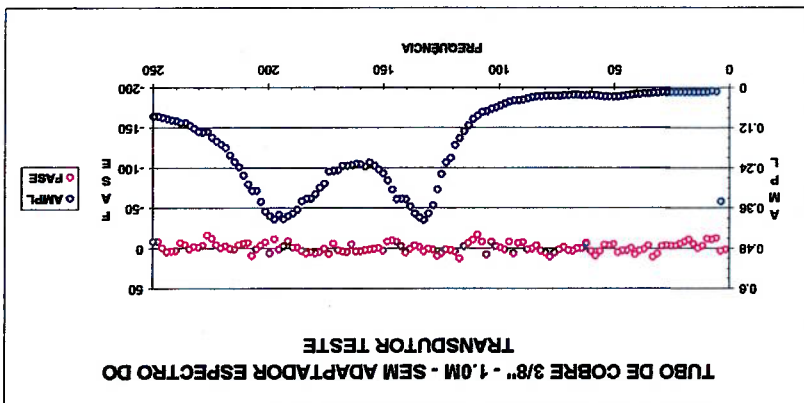
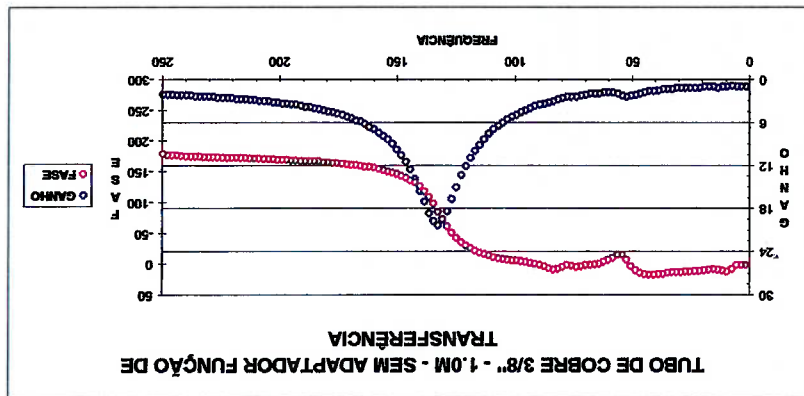
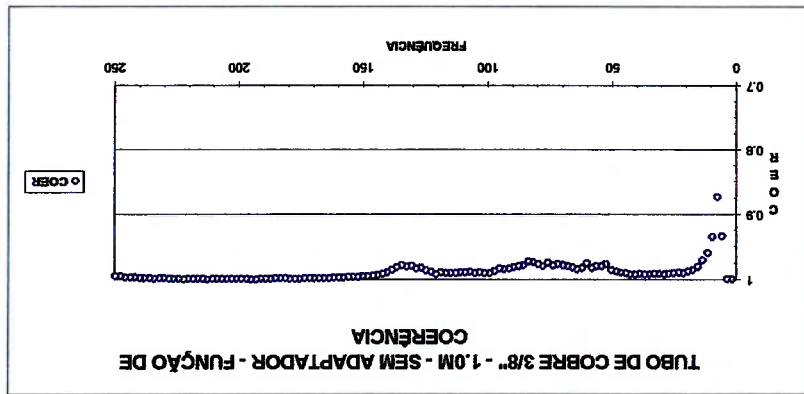
tubo de cobre 5/16" - 2,0 m



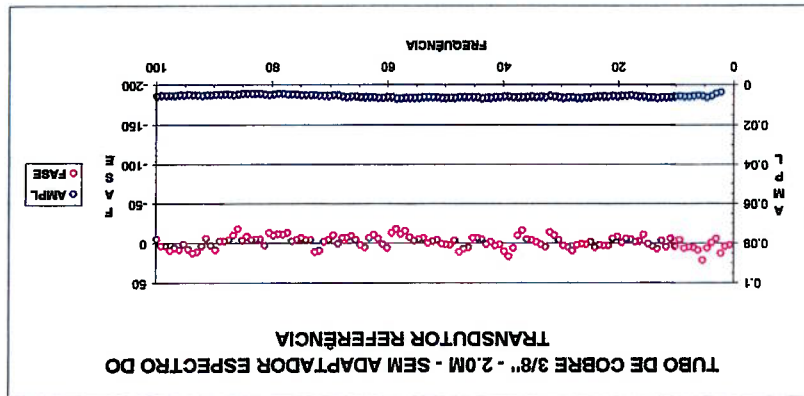
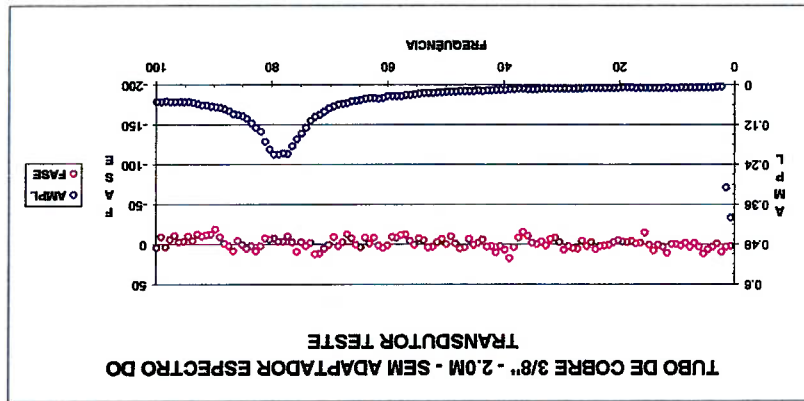
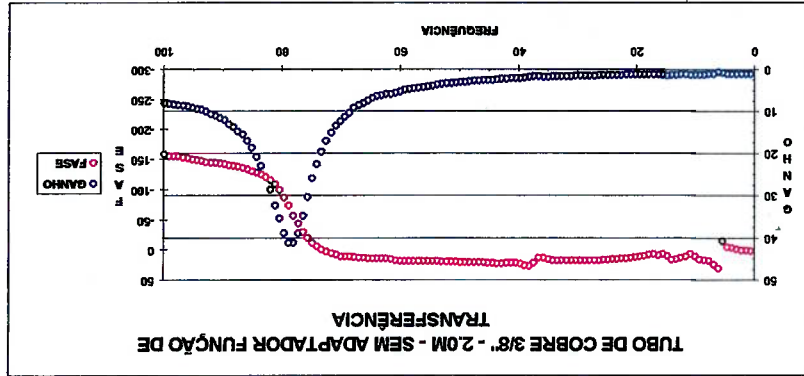
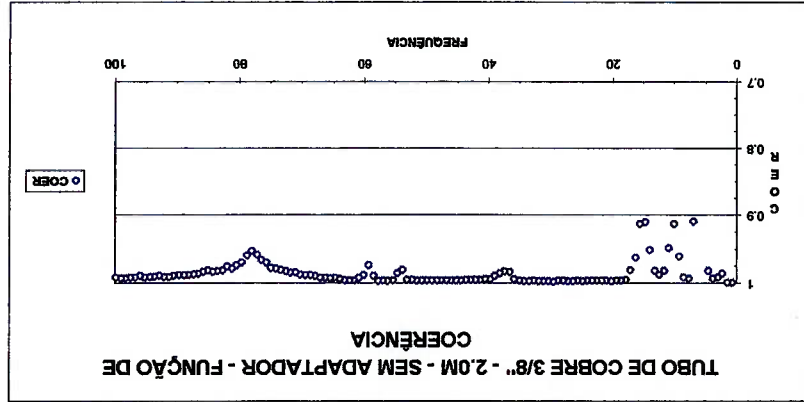
tubo de cobre 3/8" - 0,5 m



tubo de cobre 3/8" - 1,0 m



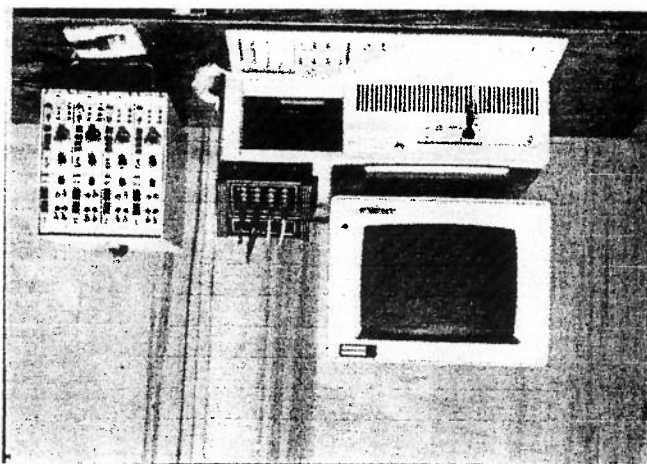
tubo de cobre 3/8" - 2,0 m



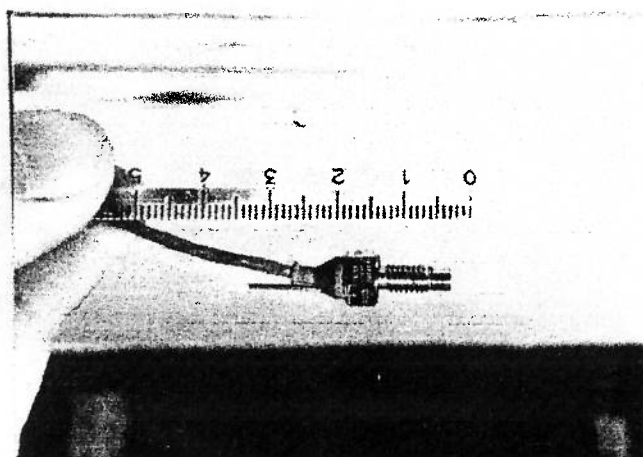
Fotografias

ANEXO C

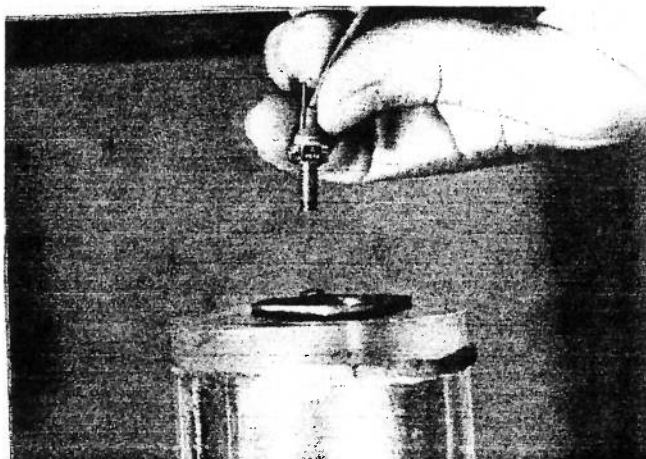
Fotografia 3: Amplificadores e microcomputador



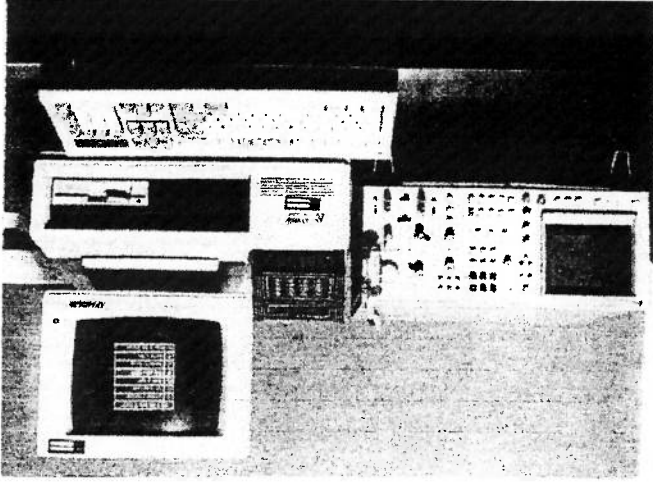
Fotografia 2: Dimensões do transdutor de pressão



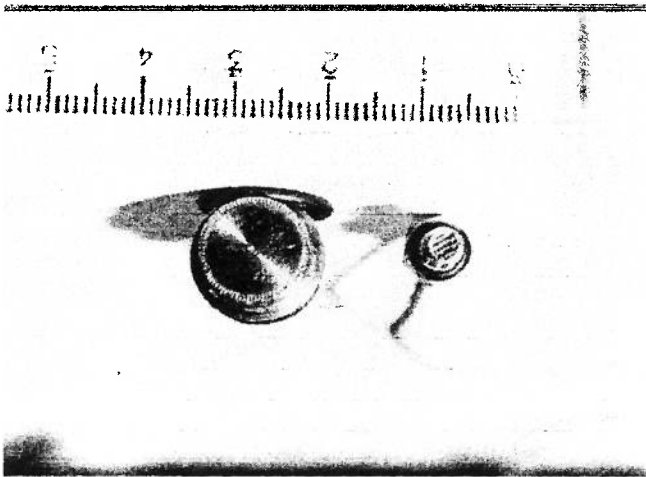
Fotografia 1: Instalação do transdutor de pressão



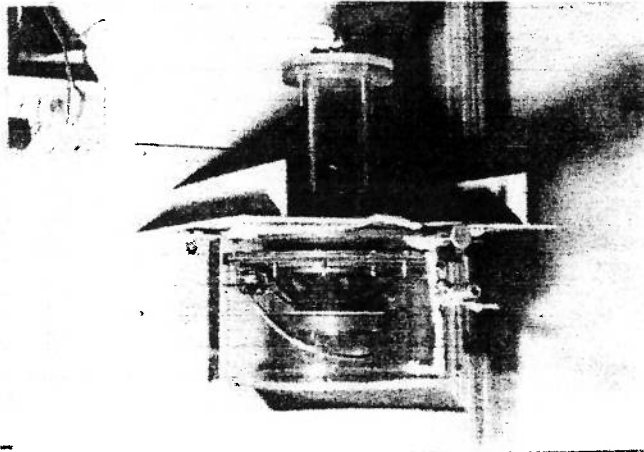
Fotografia 6: Micro e Analisador de espectro



Fotografia 5: Dimensão da membrana do transdutor



Fotografia 4: Recipiente do aferidor dinâmico



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, F. S. & ORTIZ, J. P. Resposta dinâmica de transdutor elétrico de pressão para estabelecimento de critérios de ensaios em laboratório de hidráulica. In: Conferência Internacional Exposição e Programa de Treinamento, ISA Show Brasil/95, São Paulo, SP., Dez. 1995. Anais. São Paulo, 1995. IV., p.617-626.
- BERGH, H. & TIJDEMAN, H. Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring system. National Aero and Aeronautical Research Institute, Rep. NLR-TR F.238, 1965.
- CHAUDHRY, M. H. Applied hydraulic transients. New York: Van Nostrand Reinhold, 1979. 503p.
- CRUL, F. J. Measurement of arterial pressure. ACTA ANAESTH.SCAND, v.6, p.135-169, 1962.
- DINIZ, A. C. G. C. Gerador periódico para calibração dinâmica de transdutores de pressão. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica apresentada a Universidade de Brasília, 1994.
- DISTEFANO, J. J. & STUBBERUD, A. R. Sistemas de retroação e controle., São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1979. (Coleção Schaum)
- DOEBELIN, E. O. Measurement systems: application and design. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1975. 772p.

- FARELL, C. & SITHEEQ, M. M. Analysis of frequency response characteristics of pressure transducer-tube systems. In: 8th U. S. National Conference on Wind Engineering, 8th, Baltimore, Maryland, June 1997b.
- FARELL, C.; SITHEEQ, M. M. & IYENGAR, A. K. S. Experimental and theoretical analysis of dynamic response characteristics of pressure transducer-tube systems. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL sobre INSTRUMENTAÇÃO, 43rd, Orlando, Florida, Maio 1997. Proceedings of the 43rd International Instrumentation Symposium. Orlando, May 1997a.
- FARRE, R., PESTLIN, R., NAVAJAS, D., GALLINA, C. & SUKI, B. Analysis of the dynamic characteristics of pressure transducers for studying respiratory mechanics at high frequencies. MED.& BIOL. ENG., v.27, p. 531-537, 1989.
- FRY, D. L. Physiologic recording by modern instruments with particular reference to pressure recording. PHYSIOLOGICAL REVIEWS, v.40, 1962.
- GARCIA, C.. Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos. São Paulo: EDUSP, 1997. 458p. (Acadêmica, 11)
- GILES, R. V. Mecânica dos fluidos e hidráulica. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1974. 401p. (Coleção Schaum)
- HARRIS, C. M. Handbook of noise control. New York: McGraw-Hill Book, 1957. Iv.
- HEWLETT PACKARD. Spectrum analyzer model 3582^A. Pasadena, s.d. (Operating and Service Manual)

- HEWLETT PACKARD. The fundamentals of signal analysis. S.l.p., 1982. 57p. (Application Note 243)
- HOLMES, J. D. and LEWIS, R. E.. Optimization of dynamic-pressure-measurement systems. I: single point measurements. Melbourne, CSIRO Division of Building Research, 1986.
- JONES, H. B. Jr, KNAUER, R. C., LAYTON, J. P. & THOMAS, J. P. Transient pressure measurements in liquid propellant rocket thrust chambers: Laboratories for the aerospace propulsion sciences. ISA TRANSACTIONS, Princeton, p.116-131, Apr.1965.
- LEDERER, P. S. Performance-Testing pressure transducer. NATIONAL BUREAU of STANDARDS. INSTRUMENTS & CONTROL, p.93-99, Sept.1967.
- MELVILLE, A. W. Hydraulic oscillator for the dynamic calibration of pressure recording systems. JOURNAL of SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Auckland, v.36, p.422-424, Oct.1959.
- NORMANN, R. A. Principles of bioinstrumentation. New York: John Wiley, 1988.
- OGATA, K. Engenharia de controle moderno. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1982. 929p.

ORTIZ, J. P. & BARBOSA, F. S. **Aferidor dinâmico de pressão** – Relatório nº 2. Estabelecimento de um transdutor padrão para o CTH a partir da comparação dos resultados entre os transdutores ENDEVCO Modelo 8510 B e Millar – Modelo PC 471. São Paulo: FCTH/EPUSP/DAEE/CTH, 1992. 44p.

ORTIZ, J. P., BARBOSA, F. S. & SALTARA, F. **Crítérios de escolha de transdutores elétricos de pressão como padrão para laboratório de hidráulica.** In: CONGRESSO LATINOAMERICANO de HIDRÁULICA, AIRH, 15º, Colombia, 1992. Memórias del XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica /e/ X Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrologia. Cartagena: AIRH, 1992. v.3, p.487-498.

ORTIZ, J. P. & BARBOSA, F. S. **Crítérios de escolha de transdutores elétricos de pressão como padrão para laboratório de hidráulica.** In: Simpósio Brasileiro de Medição de Vazão, 2º. IPT, Mar.1995. Anais. São Paulo: IPT, 1995. 1v., pg 415-424.

ORTIZ, J. P., BARBOSA, F. S. & PORSCH, M. C. **Aferidor dinâmico de pressão. Desenvolvimento de um sistema de aferição dinâmico de transdutores elétricos de pressão para medição de pressões instantâneas em fenômenos hidráulicos.** Relatório nº1. São Paulo: FCTH-EPUSP-DAEE-CTH, 1990. 82p.

REID, J. R. and KOPS, M. E. **Dynamics response of remote pressure pickups.** INSTRUMENTS & CONTROL SYSTEMS, Convat, v.32, 1959 p.1202-1204.

SCHWEPPE, J. L. **Calibration of pressure transducers with aperiodic input-function generators.** ISA Transactions, Houston Engineering Research Corporation, Jan. 1964, p.72-79.

- SOUZA, P. A., MARTINS, J. R. S. & FADIGA, F. M. Jr. **Métodos computacionais aplicados à engenharia hidráulica.** São Paulo: EPUSP-DAEE-CTH, 1991. 170p.
- STREETER, V. L. **Handbook of fluid dynamics.** New York: McGraw-Hill Book, 1961.
- TJDEMAN, H. **On the propagation of sound waves in cylindrical tubes. J. Sound Vib., 39, 1-33, (1975)**
- UEDA, S. **A análise de escoamento em tubo elástico.** Dissertação de apresentada à EPUSP, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. São Paulo, 1988. 124p.
- WEBSTER, J. G. **Medical Instrumentation: application and design.** Boston: Houghton Mifflin, 1978.
- WYLIE, B. E. & STREETER, V. L. **Fluid transients.** New York: McGraw-Hill, 1978. 384p.