

FD-3228

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
BIBLIOTECA DE DOCUMENTOS

1999

São Paulo

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

DE POTÊNCIA

MODELAGEM DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS

MARCELO YASSUNORI MATUDA

**São Paulo**  
**1999**

**Orientador:**  
**Julio Cezar Adamowski**

**Área de Concentração:**  
**Engenharia Mecânica**

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

**DE POTÊNCIA**

**MODELAGEM DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS**

**MARCELO YASSUNORI MATUDA**

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Rubens A. Sigelmann, pela contribuição na modelagem do transdutor pelo *chain matrix*.

A FAPESP e à FINEP que financiaram os equipamentos e materiais utilizados neste

trabalho, e a vinda do professor Rubens A. Sigelmann da Universidade de Washington.

Ao CENPES - PETROBRAS, pelo apoio nas verificações experimentais.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida para a realização deste trabalho.

Ao professor Julio Cezar Adamowski pelo encorajamento e pela orientação.

# SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS	
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	
	LISTA DE SÍMBOLOS	
	RESUMO	
	ABSTRACT	
	1 INTRODUÇÃO	1
	1.1 Motivação	1
	1.2 Organização do trabalho	5
	1.3 Materiais e métodos	6
	2 TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS	7
	2.1 Propagação de ondas	7
	2.1.1 Equações fundamentais para materiais piezoeletricos e metais	7
	2.1.2 Impedância acustica	13
	2.1.3 Equações fundamentais para fluidos	14
	2.1.4 Modo de barra	16
	2.1.5 Impedância vista por um pistão plano circular circundado por uma superfície plana rígida infinita e imerso em um meio fluido infinito	18
	2.2 Cerâmicas piezoeletricas	19
	2.3 Transdutores piezoeletricos tipo sanduiche	24
	3 MÉTODO DAS MATRIZES EM CADEIA	30
	4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	50
	4.1 Formulação	50
	4.1.1 Simulação de barra estreita infinita	51
	4.1.1.1 Simulação de barra estreita infinita com elementos estruturais	52
	4.1.1.2 Simulação de barra estreita infinita com elementos de fluido com interface fluido-estrutura	55
	4.1.2 Aplicação de impedância	56
	4.2 Modelo de transdutor simétrico	58
	4.3 Modelo de conjunto adaptador-tubo axisimétrico	59

63	4.4 Modelo de conjunto adaptador-tubo não-axisimétrico
69	4.5 Modelo de transdutor não-simétrico
71	<b>5 RESULTADOS TEÓRICOS E VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS</b>
72	5.1 Transdutor sanduíche simétrico
72	5.1.1 Protótipos: transdutores simétricos
75	5.1.2 Modelos MMC dos transdutores simétricos
76	5.1.3 Modelos MEF dos transdutores simétricos
77	5.1.4 Metodologia e resultados dos transdutores simétricos
81	5.1.5 Discussão dos resultados para os transdutores simétricos
82	5.2 Transdutor acoplado a um conjunto adaptador-tubo
82	5.2.1 Protótipos: transdutor acoplado a conjuntos adaptador-tubo
85	5.2.2 Modelos MEF dos conjuntos adaptador-tubo
89	5.2.3 Modelo MMC do transdutor não-simétrico
89	5.2.4 Modelo MEF do transdutor não-simétrico
90	5.2.5 Metodologia e resultados do transdutor acoplado a conjuntos adaptador-tubo
96	5.2.6 Discussão dos resultados para o transdutor acoplado aos conjuntos adaptador-tubo
98	<b>6 CONCLUSÃO</b>
98	6.1 Discussão dos resultados
101	6.2 Conclusões
103	6.3 Propostas de trabalhos futuros
104	ANEXO A - Malha do modelo MEF do transdutor simétrico
105	ANEXO B - Malha do modelo MEF do conjunto adaptador-tubo axisimétrico
106	ANEXO C - Malha do modelo MEF do transdutor não-simétrico
107	<b>BIBLIOGRAFIA</b>
	APÊNDICE A - Constantes dos materiais
	APÊNDICE B - Listagens dos programas MEF
	APÊNDICE C - Listagens dos programas MMC
	APÊNDICE D - Foto de um dos transdutores simétricos
	APÊNDICE E - Fotos do conjunto transdutor-adaptador-tubo com o adaptador de 220 mm

## LISTA DE FIGURAS

7	2.1.1.1 Sistema de coordenadas
8	2.1.1.2 Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal. Somente as tensões nas direções 11, 12 e 13 estão indicadas; as tensões nas outras direções são obtidas por analogia
18	2.1.5.1 Pistão plano envolvido por semivolume com fluido e por refletor infinito
24	2.3.1 Transdutor sanduíche visto em corte
30	3.1 Transdutor piezoeletrico sanduíche
32	3.2 Camada com variáveis das faces
41	3.3 Camadas em série
43	3.4 Camadas em série, sobreposição de dois casos
43	3.5 Camadas em série, resultado da superposição de dois casos.
45	3.6 Camada representando o parafuso de pré-tensão
47	3.7 Massa adicional à direita
47	3.8 Massa adicional à esquerda
49	3.9 Modelo MMC utilizado nas simulações
52	4.1.1.1.1 Barra estreita infinita
53	4.1.1.1.2 Substituição por um elemento finito
55	4.1.1.2.1 Colocação de uma camada de elementos de fluido
56	4.1.2.1 Elemento massa-mola-amortecedor
56	4.1.2.2 Montagem do elemento para a aplicação da impedância
58	4.2.1 Metade da seção do transdutor simétrico
59	4.3.1 Seção superior do conjunto adaptador-tubo axisssimétrico
64	4.4.1a Detalhe da malha MEF do conjunto adaptador-tubo não-axisssimétrico
64	4.4.1b Detalhe da malha MEF do conjunto adaptador-tubo não-axisssimétrico
65	4.4.1c Malha MEF do conjunto adaptador-tubo não-axisssimétrico, na simulação de tubo infinito
65	4.4.2 Seção superior do conjunto adaptador-tubo não-axisssimétrico
67	4.4.3 Pré-adaptador destacado do adaptador (fora de escala)
69	4.5.1 Metade da seção do transdutor não-simétrico
72	5.1.1.1 Seção superior do transdutor simétrico (fora de escala)
78	5.1.4.1 Comparação entre as curvas experimentais do módulo da impedância elétrica de três montagens de transdutores sanduíche simétricos com quatro cerâmicas, com mesmos materiais e medidas, e com uma das extremidades em água
79	5.1.4.2 Comparação entre as curvas de módulo e de fase da impedância elétrica de um transdutor simétrico com quatro cerâmicas e uma das extremidades em água, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC
80	5.1.4.3 Comparação entre as curvas de módulo e de fase da impedância elétrica de um transdutor simétrico com seis cerâmicas e uma das extremidades em água, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC

82	5.2.1.1a	Vista superior do conjunto transdutor-adaptador-tubo
82	5.2.1.1b	Vista frontal do conjunto transdutor-adaptador-tubo
83	5.2.1.2	Vista lateral com as dimensões dos adaptadores (fora de escala)
84	5.2.1.3	Posição do conjunto transdutor-adaptador em relação ao conjunto de dois tubos
84	5.2.1.4	Dimensões do transdutor não-simétrico
87	5.2.2.1	Curvas de módulo e de fase da impedância do conjunto adaptador-tubo com adaptador de 220 mm, obtidas pelo MEF, para os casos de tubo finito e infinito
88	5.2.2.2	Curvas de módulo e de fase da impedância do conjunto adaptador-tubo com adaptador de 420mm, obtidas pelo MEF, para os casos de tubo finito e infinito
92	5.2.5.1	Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um transdutor com quatro cerâmicas, conectado através de um adaptador de 220 mm a um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um tubo infinito
93	5.2.5.2	Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um transdutor com quatro cerâmicas, conectado através de um adaptador de 420 mm a um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um tubo infinito
94	5.2.5.3	Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um transdutor com quatro cerâmicas, conectado através de um adaptador de 220 mm a um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um tubo finito
95	5.2.5.4	Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um transdutor com quatro cerâmicas, conectado através de um adaptador de 420 mm a um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um tubo finito

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

MEF	método dos elementos finitos
MMC	método das matrizes em cadeia
SPF	sensor permanente de fundo
eq.	equação
fig.	figura
aprox.	aproximadamente



## LISTA DE SIMBOLOS

A	área
ANGUI	parâmetro
$a_r$	raio
a	constante
b	constante
B	constante
$C_0$	constante
c	matriz elementar inversa
$c_i$	matriz elementar inversa
$c_{ij}$	matriz elementar inversa resultado de multiplicação em cadeia
$c_{ij}^E$	componentes de matriz elementar inversa para $E$ constante
$c_E^E$	tensor de rigidez para $E$ constante
$c_E^{E_{ij}}$	rigidez para $E$ constante
$c_E^{E_{33}}$	rigidez para $E$ constante, modificada
$c_{uu}$	matriz de rigidez mecânica
$c_{u\phi}$	matriz de acoplamento piezoeletrico
$c_{\phi\phi}$	matriz de rigidez dieletrica
$c_p$	matriz de rigidez de fluido
c	constante de rigidez
$C_1, C_2,$ $C_3, C_4,$ $C_5, C_6, C_7$	parâmetros
<b>D</b>	vetor deslocamento elétrico
$D_i$	deslocamento elétrico
$D_3$	fasor deslocamento elétrico
$D_1, D_T$	parâmetros
<b>E</b>	vetor campo elétrico
$E_i$	campo elétrico
$E_3$	fasor campo elétrico
$E_1, E_2,$ $E_3, E_4$	parâmetros
<b>e</b>	tensor de coeficientes piezoeletricos
$e_{ijk}$	coeficiente piezoeletrico
$e_{ij}$	coeficiente piezoeletrico
$e'_{33}$	coeficiente piezoeletrico, modificado
<b>F</b>	vetor de forças externas
$F_i$	fasor força da face $i$
$F$	força

parâmetro	F1
frequência de anti-ressonância	$f_a$
frequência de ressonância	$f_r$
fasor corrente elétrica da face $i$	$I_i$
corrente total	$I_t$
vetor de correntes	$\mathbf{I}$
$\sqrt{-1}$	$j$
número de onda	$k$
comprimento	$L$
parâmetros	$L1, L2, L3,$ $L4, L5, L6$
massa	$m$
matriz de massa estrutural	$m^{uu}$
matriz de massa de fluido	$m^p$
constante	$M$
constante	$N$
vetor normal	$\hat{n}$
potência	$P$
pressão acústica	$p$
pressão aplicada	$p$
vetor de cargas elétricas	$\mathbf{Q}$
função resistência de pistão	$R_1$
matriz de acoplamento fluido-estrutura	$\mathbf{R}$
matriz de amortecimento estrutural	$r^{uu}$
matriz de amortecimento de fluido	$r^p$
amortecimento	$r$
parâmetros	$R1, R2,$ $R3, R4$
tensor de deformações	$S$
deformação	$S_{ij}$
deformação	$S_i$
tensor de tensões	$T$
tensão	$T_{ij}$
tensão	$T_i$
tensão	$T$
fasor tensão	$T_{ij}$
fasor tensão	$T_3$
período	$T$
vetor deslocamento	$u$
fasor velocidade da face $i$	$v_i$
fasor velocidade	$v_3$
fasor potencial elétrico da face $i$	$V_i$
fasor diferença de potencial elétrico	$\Delta V_i$
vetor de voltagens	$V$

tensão de excitação	$V_i$
velocidade de propagação em fluido	$V_f$
velocidade de propagação em sólido	$V_s$
função reatância de pistão	$X_1$
vetor posição	$\mathbf{x}$
posição	$x$
posição na coordenada $i$	$x_i$
vetor $x$	$\hat{x}$
posição	$y$
vetor $y$	$\hat{y}$
módulo de Young	$Y, Y_0$
posição	$z$
vetor $z$	$\hat{z}$
matriz de impedâncias	$Z_c$
elemento de matriz de impedâncias	$Z_{ij}$
impedância elétrica do transdutor	$Z_t$
impedância do meio externo à direita	$Z_{er}$
impedância do meio externo à esquerda	$Z_{el}$
constante	$Z_0$
impedância acústica	$Z$
impedância acústica	$Z$
impedância, parte real	$Z_R$
impedância, parte imaginária	$Z_I$
constante de amortecimento	$\alpha$
constante de amortecimento	$\beta$
constante	$\beta_r$
constante	$\beta_c$
permissividade elétrica	$\epsilon$
tensor de permissividades elétricas para S constante	$\epsilon_s$
permissividade elétrica para S constante	$\epsilon_s^{ij}$
permissividade elétrica para S constante, modificada	$\epsilon_s^{33}$
alongamento na direção $i$	$\epsilon_i$
vetor de potenciais elétricos	$\phi$
distorção no plano $ij$	$\gamma_{ij}$
densidade	$\rho$
densidade de repouso de fluido	$\rho_0$
velocidade angular	$\omega$

## RESUMO

Apresenta-se uma aplicação do método dos elementos finitos (MEF) e do método das matrizes em cadeia (MMC) no projeto de transdutores piezoelétricos de potência para transmissão acústica de sinais.

O MEF é um método geral, capaz de resolver problemas tridimensionais complexos, e o MMC é um método unidimensional, que portanto é limitado pelas condições de simetria do problema, mas que apresenta uma simplicidade maior em relação ao MEF.

Adapta-se o MMC para o modo de barra, para funcionamento no caso onde o comprimento de onda é muito maior que as dimensões transversais do meio de propagação; originalmente o MMC foi criado para o modo de espessura.

Utilizam-se o MEF e o MMC na modelagem de transdutores piezoelétricos cilíndricos tipo sanduíche, e comparam-se os resultados, com a finalidade de se verificar se o MMC pode substituir o MEF neste tipo de problema.

Modela-se uma estrutura complexa por meio do MEF, e empregando-se a análise conjunta com submodelos de transdutores cilíndricos calculados por meio do MEF e do MMC, simula-se a propagação de ondas na estrutura complexa excitada pelo transdutor. O objetivo é testar formas de redução no esforço computacional necessário.

Comparam-se os resultados teóricos com resultados de experimentos com protótipos, concentrando-se nas respostas em frequência da impedância elétrica dos transdutores. Discutem-se as limitações dos procedimentos utilizados, e os resultados da utilização conjunta do MEF e do MMC.

## ABSTRACT

The present work describes an approach to design piezoelectric power transducers for acoustic data transmission. In oil production pipelines, acoustic waves can be used to transmit data from a down-hole pressure sensor to surface. The acoustic waves generated by a piezoelectric transducer propagate through the wall of the oil production pipeline, making up a wireless transmission system.

The design of the piezoelectric transducer and its acoustic coupling with the pipeline is carried on using ANSYS, a finite element (FE) software and an one-dimensional method called chain matrix (CM), which is therefore limited by the symmetry conditions of the problem. This transducer is composed of a stack of piezoelectric ceramics terminated at the two extremities with steel end masses. The piezoelectric ceramics are actually rings connected by a bolt that passes through the hole of the rings and is clamped at both ends. This bolt applies stress to the stack. This planar multi-layered transducer is axi-symmetric and may be solved by the CM method, which is very efficient. In this method, electric and acoustic matrices describe the interactions between successive layers, and chaining these matrices provides a model of the complete transducer. As this transducer behaves as a thin bar, that is, the wavelength is many orders bigger than its diameter, the CM method was adapted to bar mode to model the transducer, because it was originally developed to model thickness mode transducers. The results of the CM model are compared with the results of a FE model and with experimental results of two prototypes of the symmetric sandwich transducer.

The FE method is used to model a complex structure, composed by a steel tube and an acoustic coupling, to compute the acoustic impedance presented to the transducer. This procedure is computer intensive, but is obtained only once for a frequency range. The electric impedance of the transducer loaded with the computed acoustic impedance is obtained both by the CM method and the FE method. Theoretical and experimental results are compared, concentrating on the electrical impedance curve of each transducer assembly. The limitations of each approach, and the results of the integration of the FE and CM models are discussed.

# I INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Transdutores piezoeletricos de potência têm sido utilizados em diversas aplicações [GALLEGO (1989)], tais como: limpeza de peças, soldagem de plásticos e metais, aglomeração de partículas, sonares, etc. Existem estudos para a aplicação da transmissão acústica de dados em colunas de perfuração de petróleo [DRUMHELLER (1989, 1993), DRUMHELLER, KNUDSEN (1995)], para a telemetria de dados provenientes de sensores de orientação instalados próximos à broca de perfuração. Em colunas de produção de petróleo, as paredes do tubo central de aço também podem ser utilizadas como meio de propagação de ondas acústicas, para a telemetria em tempo real dos dados gerados por sensores permanentes de fundo (SPF). Estes sensores, utilizados na monitoração de pressão e temperatura no fundo de poços petrolíferos, são basicamente de dois tipos. O primeiro, utilizado no início da produção, é do tipo autônomo (*data logger*) e serve para registrar as pressões até a estabilização do poço. O tempo de estabilização varia de um poço para outro, e como os dados só podem ser lidos após a retirada do fundo do poço, o tempo de aquisição é superdimensionado para o pior caso. O outro tipo, utilizado ao longo da vida útil do poço, é conectado à superfície através de um cabo elétrico, permitindo a monitoração periódica das condições no fundo. A transmissão acústica tem como vantagens a

monitoração em tempo real, que o *data logger* não permite, e a eliminação do cabo elétrico, o que permite uma redução nos custos.

Este tipo de sistema de transmissão de dados apresenta várias dificuldades. A tubulação central, utilizada como meio de transmissão, é formada geralmente por tubos de cerca de 10 m de comprimento, conectados entre si por luvas rosqueadas; estas descontinuidades nas junções entre os tubos causam variações de área da seção transversal, provocando reflexões indesejáveis. O contato entre as superfícies nas roscas não é perfeito, o que também influi na transmissão. Como resultado, a tubulação funciona como um filtro complexo, apresentando múltiplas bandas estreitas passantes e não-passantes lado a lado. DRUMHELLER (1989, 1993) e DRUMHELLER, KNUDSEN (1995) fizeram estudos sobre as características das colunas utilizadas em poços de petróleo. O comprimento dessas colunas pode atingir vários quilômetros, por este motivo a atenuação por perdas nos materiais é significativa. Há também perdas para os meios que envolvem a tubulação, através de fluidos ou por contato direto com as paredes externas do poço. O transdutor, gerador das ondas acústicas que transportam a informação, deve suportar os choques na instalação, vibrações contínuas e altas temperaturas, que podem chegar a 100 °C. O espaço disponível lateralmente é pequeno, e a energia tem que ser fornecida por baterias elétricas que suportem o ambiente hostil e tenham alta durabilidade. O sistema deve funcionar por mais ou menos 5 anos, o que representa aproximadamente 50000 ciclos para o transdutor.

Em vista dos problemas apresentados, o projeto do transdutor é de vital importância. O transdutor deve aproveitar com eficiência a carga das baterias, e ao mesmo tempo excitar ondas acústicas com energia suficiente para atravessar a tubulação e chegar à superfície com uma relação sinal/ruído suficiente. Um transdutor piezoeletrico

No projeto de um transdutor de potência, busca-se uma boa relação entre a potência de saída e a potência de entrada. São importantes nessa relação, entre outros fatores: a capacidade da cerâmica de converter energia elétrica em mecânica e vice-versa; as perdas nos materiais do transdutor; o acoplamento acústico com o meio de propagação externo, caracterizado pelas relações entre as impedâncias acústicas; e as características vibracionais do transdutor em contato com o meio externo. Todos esses fatores podem ser analisados por simulações matemáticas, que permitem a redução da quantidade de protótipos e a obtenção de valores dificilmente acessíveis experimentalmente, como o valor da tensão mecânica em um ponto interno do transdutor. Curvas de impedância elétrica, eficiência de transmissão, modos de vibração, frequências de ressonância e anti-ressonância, para diferentes dimensões, materiais e formatos do transdutor podem ser facilmente obtidos, com uma simples mudança de parâmetros. O acesso a valores de tensões e deformações mecânicas, deslocamentos,

trabalho.

do transdutor são escolhidas de modo a colocá-lo em ressonância na frequência de tensões mecânicas e deformações, devidas ao efeito piezoeletrico inverso. As dimensões direto. Aplicando-se uma tensão elétrica entre os eletrodos da cerâmica, esta sofre mecânico externo, ocorre uma polarização em seu interior devida ao efeito piezoeletrico cada extremidade. Quando uma cerâmica piezoeletrica é deformada por um esforço de cerâmicas piezoeletricas empilhadas e pré-tensionadas, com uma massa metálica em construídos em geral na forma de um sanduíche [GALLEGO (1989)], com um conjunto também por meio de ondas acústicas. Os transdutores piezoeletricos de potência são moduladas pelos dados dos SPF, e como sensor, para receber comandos da superfície, de potência pode ser utilizado como atuador, com a função de emitir ondas acústicas



velocidades e acelerações, campos e deslocamentos elétricos, no interior do transdutor, é limitado somente pelo programa de computador utilizado. Apesar de os cálculos destas simulações poderem ser feitos manualmente, um computador é necessário para a viabilidade dos modelos mais complexos.

Uma simulação matemática pode ser dividida em duas partes fundamentais, o modelo matemático e o método de solução deste modelo. O modelo matemático contém, basicamente, em um problema de piezoelectricidade, equações constitutivas que representam os materiais, equações de equilíbrio, relações entre tensões e deformações mecânicas, equações do eletromagnetismo e equações que definem as condições de contorno. Um método de solução é o método das matrizes em cadeia (*chain matrix method*) [KRASZEWSKI et al. (1991a, 1999b)], que é analítico e unidimensional, e que por causa destas características é econômico no processamento. Outro método é o método dos elementos finitos [BATHÉ (1982)], um método numérico geral, capaz de resolver problemas uni, bi ou tridimensionais. O MMC é um método muito mais simples que o MEF. É interessante a investigação de casos em que o MMC pode substituir o MEF, sem muita perda de precisão e com vantagens em termos de velocidade de processamento. A utilização conjunta destes dois métodos, através de submodelos MEF para as partes mais complexas e submodelos MMC para partes mais simples pode também ter resultados positivos, sob certas condições.

## 1.2 Organização do trabalho

No capítulo 2 apresentam-se as características básicas das cerâmicas piezoeletricas e de transdutores piezoeletricos de potência do tipo sanduiche. Apresentam-se também algumas definições utilizadas nos capitulos seguintes.

O capítulo 3 apresenta a adaptação do MMC para o modo de barra, utilizado quando o comprimento de onda é muito maior que as dimensões transversais do transdutor ou do meio de propagação; originalmente o MMC foi criado para o modo de espessura. Implementa-se um modelo de um transdutor piezoeletrico sanduiche carregado por impedâncias acusticas em suas extremidades.

No capítulo 4 utiliza-se o MEF em quatro modelos: um transdutor piezoeletrico de potência sanduiche, simétrico, carregado em uma das extremidades por uma impedância acustica; um conjunto adaptador-tubo axisssimétrico, sendo este o único modelo não utilizado em comparações com resultados experimentais; um conjunto adaptador-tubo não-axisssimétrico; e um transdutor piezoeletrico de potência sanduiche, não-simétrico, carregado em uma das extremidades por uma impedância acustica.

No capítulo 5 descrevem-se os protótipos construídos: um transdutor simétrico com quatro cerâmicas e outro com seis cerâmicas, e um transdutor não-simétrico acoplado a um conjunto adaptador-tubo não-axisssimétrico. Foram construídos dois adaptadores, de comprimentos diferentes. Nos modelos de transdutores simétricos, o MEF serve de referência para o MMC modificado para o modo de barra. Acoplam-se os submodelos MEF e MMC do transdutor não-simétrico ao sub-modelo MEF do conjunto adaptador-tubo não-axisssimétrico. Utiliza-se para este propósito a impedância acustica equivalente do conjunto adaptador-tubo como impedância do meio externo para os

submodelos do transdutor não-simétrico. Mostram-se as constantes utilizadas nas simulações, e os resultados obtidos. Comparam-se os resultados dos experimentos com os resultados teóricos, obtidos pelo MEF e pelo MMC, concentrando-se nas curvas de impedância elétrica dos transdutores.

### 1.3 Materiais e métodos

Utilizou-se como comparação entre os resultados experimentais e teóricos a curva de impedância elétrica do transdutor, em torno da primeira frequência de ressonância. As curvas de impedância foram medidas com impedômetros fasoriais. Concentrou-se na região em torno da primeira frequência de ressonância, pois é a região de trabalho dos transdutores utilizados.

Os modelos MEF foram criados no programa ANSYS 5.1, em uma estação SUN SPARC 5, através de programas-roteiro escritos em linguagem APDL (*Ansys Parametric Design Language*), a linguagem de roteiro do ANSYS. Para se processar o modelo com constantes diferentes, basta a alteração das constantes no programa-roteiro e a reexecução do mesmo. O critério de convergência utilizado foi a estabilização da curva de impedância, elétrica ou acústica.

Os modelos MMC foram implementados com programas-roteiro na linguagem do MATLAB, processados na mesma estação SPARC 5 ou em microcomputadores compatíveis com PC IBM, utilizando-se os programas MATLAB ou OCTAVE.

Neste trabalho considera-se que os materiais têm comportamento linear e não têm perdas. Os protótipos funcionam em regime de baixa solicitação, e os modelos consideram as propriedades dos materiais para sinais pequenos à temperatura ambiente.

## 2 TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS

### 2.1 Propagação de ondas

#### 2.1.1 Equações fundamentais para materiais piezoeletricos e metais

Neste trabalho considera-se a hipótese de que as deformações e os deslocamentos são pequenos, e a de que os materiais têm características lineares. Adota-se então a Teoria da Elasticidade Linear [ZAGOTTIS (1982)], cujas equações serão utilizadas nas definições a seguir.

#### Vetor posição

O vetor posição  $\mathbf{x}$  (eq. 2.1.1.1) contém as coordenadas de um ponto no sistema de coordenadas da fig. 2.1.1.1.

$$\mathbf{x} = [x \ y \ z]^T = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T \quad (2.1.1.1)$$

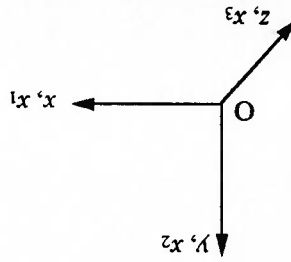


Fig. 2.1.1.1 Sistema de coordenadas

**Vector deslocamento**

O vector deslocamento  $\mathbf{u}$  (eq. 2.1.1.2) é o vector posição atual menos o vector posição inicial.

$$\mathbf{u} = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T \quad (2.1.1.2)$$

**Tensor de tensões**

A tensão em um plano com normal definida pelo vector  $\hat{\mathbf{n}}$  é calculada por  $\mathbf{T} \cdot \hat{\mathbf{n}}$ , onde  $\mathbf{T}$  é o tensor de tensões (eq. 2.1.1.3 e fig. 2.1.1.2).

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{xy} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{xz} & T_{yz} & T_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{12} & T_{22} & T_{23} \\ T_{13} & T_{23} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (2.1.1.3)$$

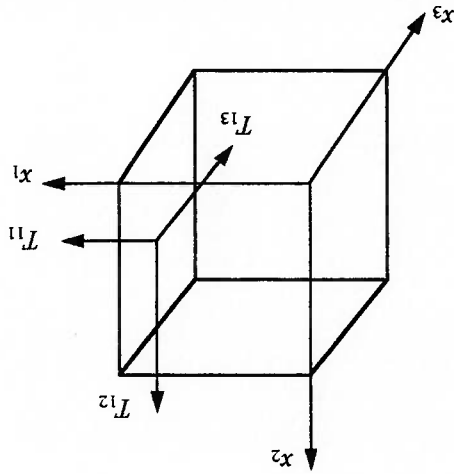


Fig. 2.1.1.2 Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal. Somente as tensões nas direções 1, 2 e 3 estão indicadas; as tensões nas outras direções são obtidas por analogia

### Tensor de deformações

O tensor de deformações  $\mathbf{S}$  (eq. 2.1.1.4a e 2.1.1.4b) relaciona-se com os alongamentos  $\epsilon_i$  pela relação  $\epsilon_i = S_{ii}$ , para  $i=1,2,3$  e com as distorções  $\gamma_{ij}$  pela relação

$$\gamma_{ij} = 2S_{ij}, \text{ para } i,j=1,2,3 \text{ e } i \neq j.$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix}$$

(2.1.1.4a)

$$\text{onde } S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i,j=1,2,3$$

(2.1.1.4b)

### Vector deslocamento elétrico

O divergente do deslocamento elétrico  $\mathbf{D}$  (eq. 2.1.1.5) é igual à densidade de cargas livres. Em um material isolante,  $\text{div}(\mathbf{D})=0$ .

$$\mathbf{D} = [D_x \ D_y \ D_z]^T = [D_1 \ D_2 \ D_3]^T$$

(2.1.1.5)

### Vector campo elétrico

O campo elétrico  $\mathbf{E}$  (eq. 2.1.1.6) relaciona-se com o deslocamento elétrico pela relação  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ , onde  $\epsilon$  é a permissividade elétrica do meio. O campo elétrico também é igual a menos o gradiente do potencial elétrico.

$$\mathbf{E} = [E_x \ E_y \ E_z]^T = [E_1 \ E_2 \ E_3]^T \quad (2.1.1.6)$$

### Equações constitutivas para um material piezoeletrico

As equações constitutivas 2.1.1.7a e 2.1.1.7b definem o comportamento de um material piezoeletrico linear [MAILLON (1983)].

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}_E^T : \mathbf{S} - \mathbf{e} \cdot \mathbf{E}$$

(2.1.1.7a)

$$\text{ou } T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e} : \mathbf{S} + \mathbf{\epsilon}_S \cdot \mathbf{E}$$

(2.1.1.7b)

$$\text{ou } D_i = e_{ihl} S_{hl} + \epsilon_{is}^S E_s$$

onde  $\mathbf{e}$  é o tensor de coeficientes piezoeletricos, com elementos  $e_{ijk}^E (i,j,k=1,2,3)$ ,  $\mathbf{\epsilon}_S$  o

tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante, com elementos

$\epsilon_{ij}^E (i,j=1,2,3)$  e  $\mathbf{c}_E$  o tensor de rigidez medido com campo elétrico constante, com

elementos  $c_{ijkl}^E (i,j,k,l=1,2,3)$ . Assume-se uma condição quase-eletróstática, desprezando-

se efeitos magnéticos, pois as ondas eletromagnéticas têm velocidade de propagação

muito superior à das ondas mecânicas [ANSI/IEEE (1996)].

Tabela 2.1.1.1 Conversão de índices da notação normal para a notação reduzida

Notação normal	Notação reduzida
xx	1
yy	2
zz	3
yz	4
xz	5
xy	6

onde foi utilizada a seguinte equivalência de índices:

$$\mathbf{S} = [S_{xx} \quad S_{yy} \quad S_{zz} \quad 2S_{yz} \quad 2S_{xz} \quad 2S_{xy}]^T = [S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_4 \quad S_5 \quad S_6]^T \quad (2.1.1.10)$$

$$\mathbf{T} = [T_{xx} \quad T_{yy} \quad T_{zz} \quad T_{yz} \quad T_{xz} \quad T_{xy}]^T = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5 \quad T_6]^T \quad (2.1.1.9)$$

Os tensores  $\mathbf{T}$  e  $\mathbf{S}$  podem ser escritos em notação reduzida:

**Notação reduzida**

onde  $p$  é a densidade.

$$\text{ou} \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{xx}}{\partial T_{xx}} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial T_{yz}} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} & \frac{\partial T_{xx}}{\partial T_{yz}} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial T_{xz}} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} & \frac{\partial T_{xx}}{\partial T_{yz}} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial T_{xz}} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} \\ \frac{\partial T_{xy}}{\partial T_{yz}} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} & \frac{\partial T_{xy}}{\partial T_{xz}} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} & \frac{\partial T_{xy}}{\partial T_{xz}} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} \\ \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} & \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} & \frac{\partial T_{xz}}{\partial T_{yz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (2.1.1.8b)$$

$$\text{div}(\mathbf{T}) = \mathbf{p} \cdot \mathbf{u} \quad (2.1.1.8a)$$

A equação de equilíbrio, desconsiderando-se as forças de volume, é dada por:

**Equação de equilíbrio**



Considerando-se a simetria de  $S$ ,  $T$  e do tensor de rigidez, utilizando-se um material com comportamento eletromecânico semelhante ao da cerâmica PZT-8, e com simetria no plano  $xy$  e polarização na direção  $z$ , as equações 2.1.1.7a e 2.1.1.7b podem ser simplificadas para:

$$(2.1.1.11a) \quad \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_E^{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_E^{12} & C_E^{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_E^{13} & C_E^{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_E^{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_E^{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_E^{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

$$(2.1.1.11b) \quad \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_S^{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \epsilon_S^{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \epsilon_S^{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

As equações 2.1.1.11a e 2.1.1.11b adotam a conversão da tabela 2.1.1.1. No caso de um material não-piezoeletrico, como um metal, utiliza-se a eq. 2.1.1.11a, com constantes elétricas e eletromecânicas nulas, como equação constitutiva.

## 2.1.2 Impedância acústica

A impedância acústica é uma grandeza que caracteriza a propagação de ondas acústicas, análoga à impedância do eletromagnetismo. Quando uma onda sente uma variação na impedância ao longo de sua rota, ocorre uma reflexão parcial.

Em sólidos, para uma onda longitudinal, a impedância acústica específica  $Z$  é

definida por:

$$Z = \pm \frac{T}{u}$$

(2.1.2.1)

onde  $u$  é a velocidade na direção de propagação,  $T$  é a tensão na direção de propagação, o sinal de menos é para o caso onde o sentido de propagação da onda é o sentido positivo, e o sinal de mais é para o caso oposto.

Em fluidos, para uma onda longitudinal, a impedância acústica específica  $Z$  é

definida por:

$$Z = \pm \frac{p}{u}$$

(2.1.2.2)

onde  $u$  é a velocidade na direção de propagação e  $p$  é a pressão acústica, o sinal de mais é para o caso onde o sentido de propagação da onda é o sentido positivo, e o sinal de menos é para o caso oposto. Os sinais são invertidos em relação aos sólidos porque em sólidos tensão positiva significa tração.

Embora os sinais nas fórmulas acima sejam definidos de forma diferente em outros textos [KINO (1987)], neste texto os sinais são tais que a parte real das impedâncias é sempre positiva, parte real positiva significando que o meio consome energia.

As impedâncias acima citadas são chamadas de específicas porque, segundo uma possível explicação, multiplicadas por uma velocidade, têm unidade de watt por metro quadrado, ou potência por unidade de área. Multiplicando-se estas impedâncias pela área transversal do meio de propagação, obtêm-se impedâncias que têm uma maior significância para ondas extensionais, existentes quando o comprimento de onda é muito maior que as dimensões transversais do meio de propagação.

### 2.1.3 Equações fundamentais para fluidos

Um fluido não-viscoso, compressível, com densidade e pressão médias uniformes, e sem fluxo médio, é descrito pelas seguintes equações [SILVA (1993)]:

#### Equação de onda

A equação de onda (eq. 2.1.3.1) descreve a propagação de ondas no interior do fluido.

$$\Delta^2 p = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

(2.1.3.1)

onde  $p$  é a pressão acústica e  $v$  a velocidade de propagação no fluido.

### Interface fluido-estrutura

A eq. 2.1.3.2 fornece a condição de contorno numa interface fluido-estrutura e é obtida através da condição de continuidade na interface e do equilíbrio de forças na mesma interface. Como não há cisalhamento no fluido, somente os deslocamentos da interface na direção perpendicular à mesma se relacionam com a pressão no fluido.

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p + \rho_0 \mathbf{n} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1.3.2)$$

onde  $\mathbf{n}$  é o versor normal à interface,  $\mathbf{u}$  o vetor deslocamento e  $\rho_0$  a densidade de repouso do fluido.

### Absorção acústica

A equação 2.1.3.3 permite a simulação de um material externo ao fluido, com uma impedância acústica  $Z$ . Quando a frente de onda é paralela à interface entre o fluido e o meio externo simulado, existe um valor de  $Z$  para o qual a onda acústica não sofre reflexão na interface, simulando-se deste modo um fluido infinito, com absorção total das ondas incidentes.

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p + \beta \frac{\partial v^j}{\partial t} = 0 \quad (2.1.3.3)$$

onde  $\beta = \rho_0 v^j / Z$ , sendo  $Z$  a impedância acústica do material externo simulado.

## 2.1.4 Modo de barra

Em transdutores que trabalham em frequências muito altas, onde o comprimento

de onda é muito menor que as dimensões transversais, as ondas que se propagam na direção longitudinal comportam-se aproximadamente como ondas planas ou longitudinais, no modo de espessura. Ondas planas são ondas que possuem deformações angulares e transversais nulas, e frente de onda plana. Já em transdutores que trabalham em frequências baixas, onde o comprimento de onda é muito superior às dimensões transversais, propagam-se ondas extensionais na direção longitudinal, no modo de barra.

As ondas extensionais caracterizam-se por terem tensões de cisalhamento e transversais pequenas, com deformações angulares e transversais não nulas. As tensões de cisalhamento são pequenas pois o gradiente de deformações na direção longitudinal é pequeno devido ao grande comprimento de onda. As tensões na direção transversal são nulas na periferia do transdutor, por causa do equilíbrio de forças, e o grande comprimento de onda, em comparação com as dimensões transversais do transdutor, não permite grandes variações de tensão em direção ao eixo do transdutor. Por isso, e também por causa das baixas tensões de cisalhamento, as tensões longitudinais predominam.

O que foi dito vale principalmente para transdutores feitos com um único material, isotrópico e uniforme, e com área transversal constante. Quando há dois materiais com características acústicas diferentes, as tensões de cisalhamento e transversais são maiores, o que ocorre também quando há variação da área transversal. Há a possibilidade de estes fatores terem um efeito limitado sobre as características do transdutor, se as perturbações forem restritas a pequenas regiões.

Quando se deseja simular o comportamento das ondas extensionais, pode-se utilizar um modelo onde as tensões de cisalhamento e transversais são nulas. Nesse modelo, considerando-se uma fatia de espessura infinitesimal do transdutor, a situação é semelhante ao caso estático. No caso estático, quando a distribuição de tensões longitudinal em uma seção transversal de área constante é uniforme, as tensões de cisalhamento e transversais são nulas, e as deformações transversais relacionam-se às deformações longitudinais pelo coeficiente de Poisson. Esta situação, onde as tensões longitudinais são constantes na seção transversal, só é possível no caso estático, porém é uma boa aproximação do que ocorre quando o comprimento de onda é muito superior às dimensões transversais. Utilizam-se as hipóteses, portanto, de que a tensão na direção longitudinal é constante em cada seção transversal, mas variável no tempo, e de que as tensões nas direções transversais e de cisalhamento são nulas.

Quando o material é piezoeletrico, outras considerações têm que ser feitas, principalmente com os valores de campo e deslocamento elétricos no interior do material [ANSI/IEEE (1996)].

**2.1.5 Impedância vista por um pistão plano circular circundado por uma superfície plana rígida infinita e imerso em um meio fluido infinito**

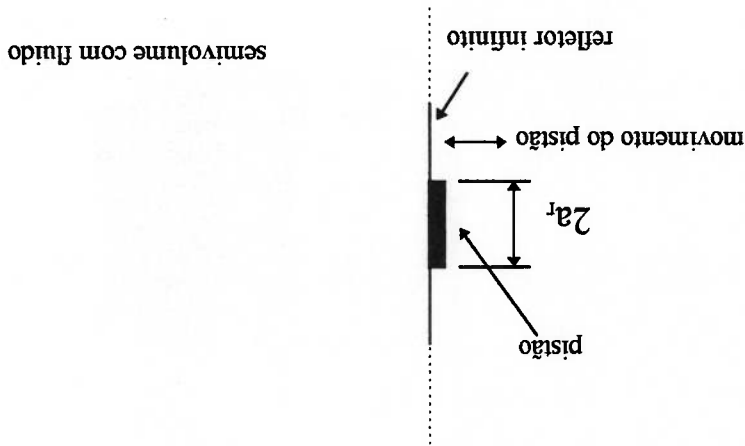


Fig. 2.1.5.1 Pistão plano envolvido por semivolume com fluido e por refletor infinito

A impedância vista pelo pistão na fig. 2.1.5.1 é calculada por [KINSLER (1962)]:

$$Z = \rho_0 v_r \pi a_r^2 [R_1(2ka_r) + jX_1(2ka_r)] \quad (2.1.5.1)$$

onde  $2a_r$  é o diâmetro do pistão plano,  $v_r$  é a velocidade de propagação no fluido,  $\omega$  é a velocidade angular,  $k = \omega/v_r$  é o número de onda,  $\rho_0$  é a densidade do fluido em repouso e  $R_1$ , função resistência de pistão, e  $X_1$ , função reatância de pistão, podem ser calculados por:

$$R_1(x) = \frac{2.4}{x^2} - \frac{2.42 \cdot 6}{x^4} + \frac{2.42 \cdot 62 \cdot 8}{x^6} - \dots \quad (2.1.5.2)$$

Materiais piezoeletricos são materiais que apresentam relação entre variáveis mecânicas, como tensão mecânica e deformação, e variáveis elétricas, como campo elétrico e deslocamento elétrico. O efeito piezoeletrico ocorre naturalmente em certos cristais, e podem ser induzidas artificialmente, através de um processo de polarização elétrica, em materiais policristalinos como as cerâmicas da família PZT (titanato-zirconato de chumbo). No PZT existem dipolos elétricos em seu interior, orientados aleatoriamente antes da polarização. Neste estado o material não é piezoeletrico. A polarização consiste no aquecimento da cerâmica até a temperatura Curie, que é uma temperatura limite acima da qual as propriedades piezoeletricas são perdidas. Em seguida um intenso campo elétrico é aplicado, o que faz com que os dipolos se alinhem. A orientação do campo determina a orientação das propriedades piezoeletricas obtidas. Mantendo-se o campo e resfriando-se o material lentamente, obtém-se finalmente um material piezoeletrico, cujos dipolos mantêm-se alinhados mesmo retirando-se o campo elétrico; por causa desta característica o PZT é um material ferroeletrico, em analogia aos materiais ferromagnéticos. O processo de polarização deforma permanentemente o material. Todos os materiais ferroeletricos são piezoeletricos, mas nem todos os

## 2.2 Cerâmicas piezoeletricas

Esta impedância é utilizada neste trabalho como uma aproximação de um tanque com água presente nos experimentos com transdutores simétricos.

$$X_1(x) = \frac{\pi}{4} \left( \frac{3}{x} - \frac{3^2 \cdot 5}{x^3} + \frac{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7}{x^5} - \dots \right) \quad (2.1.5.3)$$



O comportamento dos materiais piezeletricos está intimamente relacionado com a sua estrutura cristalina [RISTIC (1983)]. Em termos simples, um material é piezeletrico se, na ocorrência de uma deformação, os centros das cargas positivas movem-se de modo diferente dos centros das cargas negativas, de modo que o efeito somado de todos os dipolos formados provoca o aparecimento de uma polarização no material. Embora as cerâmicas ferroeletricas tenham um comportamento não-linear complexo, pode-se utilizar com sucesso uma aproximação linear, como a apresentada pelas eq. 2.1.1.7a e 2.1.1.7b, no estudo de suas propriedades, em muitas aplicações. A não-linearidade das cerâmicas ferroeletricas deve ser levada em conta em aplicações de alta potência, pois as propriedades do material dependem da temperatura de operação, e das solicitações mecânicas e elétricas às quais as cerâmicas são submetidas. Por exemplo, em altas temperaturas o desempenho piezeletrico piora, e a resistência mecânica diminui [MORGAN (a)]. ARNOLD (1995) discute o efeito do pré-tensionamento sobre as propriedades de cerâmicas piezeletricas. As cerâmicas ferroeletricas apresentam piroeletricidade, em que são geradas cargas elétricas quando o material é aquecido uniformemente. O comportamento sob carga estática das cerâmicas ferroeletricas é

possível com os materiais piezeletricos mais antigos.

promovem o conceito de ajustar o material de acordo com a aplicação, o que não era fortes características piezeletricas, entre outros fatores. Materiais como o PZT muito utilizado, por causa de sua versatilidade, sua alta temperatura Curie e de suas processo de fabricação por aglomeração de partículas. O PZT é um material piezeletrico. Elas podem ainda ser confeccionadas em uma infinidade de formatos, por causa do características físicas, químicas e piezeletricas podem ser ajustadas conforme a aplicação. A vantagem das cerâmicas como o PZT é que as suas

caracterizado por fluência (*creep*), onde a deformação varia lentamente mesmo quando é aplicada uma tensão elétrica constante; estas cerâmicas apresentam também histerese, que faz com que as curvas de deslocamento em função da tensão elétrica, por exemplo, apresentem caminhos diferentes para cada sentido de movimentação.

Dois problemas na utilização de cerâmicas ferroelétricas são as tolerâncias das propriedades mecânicas, elétricas e piezeleétricas destes materiais, e o envelhecimento. As propriedades das cerâmicas são definidas pela mistura dos componentes no processo de fabricação e pela polarização. A tolerância padrão de fabricantes de cerâmicas piezeleétricas pode ser alta, por exemplo de  $\pm 20\%$  [MORGAN (a)]. Alia-se a isso a dependência das propriedades às condições de operação. Estes materiais sofrem envelhecimento, ou a variação de suas propriedades ao longo do tempo; por exemplo, as propriedades piezeleétricas entram em desacordo, fenômeno chamado de despolarização. O envelhecimento é comumente especificado em porcentagem por década de tempo; em outras palavras, quanto maior o tempo percorrido após a polarização da cerâmica, maior a sua estabilidade. O envelhecimento é acelerado por altas temperaturas, por altos níveis de tensão mecânica, e por fortes campos elétricos de sentido oposto ao do campo com o qual a cerâmica foi polarizada. Dependendo da intensidade destas condições, a despolarização pode ser rápida, ou até instantânea. Ou seja, em aplicações de potência, a resistência da cerâmica ao envelhecimento é muito importante quando a cerâmica tem que funcionar por longos períodos. Por tudo isto, as propriedades têm que ser medidas individualmente ou por lote de cerâmicas, se for necessária uma alta precisão, e os valores obtidos são válidos somente durante um período de tempo limitado.

Dois materiais cerâmicos adequados para uso em transdutores de potência são o PZT-4 e o PZT-8, semelhantes entre si, que possuem baixas perdas mecânicas, alta

resistência mecânica, alta resistência à despolarização sob tensão mecânica, temperatura Curie ao redor de 300 °C e baixas perdas dielétricas sob altos regimes de excitação elétrica. O PZT-8, em relação ao PZT-4, apresenta perdas dielétricas muito menores sob altos regimes de excitação elétrica e maior resistência à despolarização, em compensação possui constante dielétrica e acoplamento eletromecânico ligeiramente inferiores [MORGAN (b)].

As propriedades dos materiais piezoeletricos são em geral medidas em peças de geometria simples, utilizando-se equações constitutivas lineares como as eq. 2.1.1.7a e 2.1.1.7b e aplicando-se as devidas condições de contorno e de carregamento [ANSI/IEEE (1996)]. Neste processo as constantes do sistema linear de equações formado pelas eq. 2.1.1.7a e 2.1.1.7b são medidas. O sistema de equações constitutivas pode ser rearranjado, portanto há outros sistemas equivalentes, com outras constantes de materiais. As tabelas de materiais de fabricantes contêm as constantes, porém não todas, pois as referentes a sistemas de equações constitutivas diferentes podem ser convertidas por meio de relações simples [GALLEGO (1989)], e quando há simetria somente as constantes absolutamente necessárias são mostradas, em geral. Embora os sistemas de equações constitutivas rearranjadas sejam equivalentes, a conversão de constantes dos materiais aumenta os erros provenientes das medições, por este e outros motivos é vantagem a utilização do sistema mais adequado [ANSI/IEEE (1996)]. Além das constantes do modelo linear, os materiais piezoeletricos são selecionados também pelas perdas mecânicas e dielétricas; sensibilidade à temperatura, aos esforços mecânicos e à excitação elétrica; taxa de envelhecimento; características físicas, químicas; temperatura Curie; etc. As constantes de materiais fornecidas pelos fabricantes são medidas em geral a temperatura ambiente, sob baixa sollicitação.

O eixo z é comumente utilizado como a direção da polarização em um material

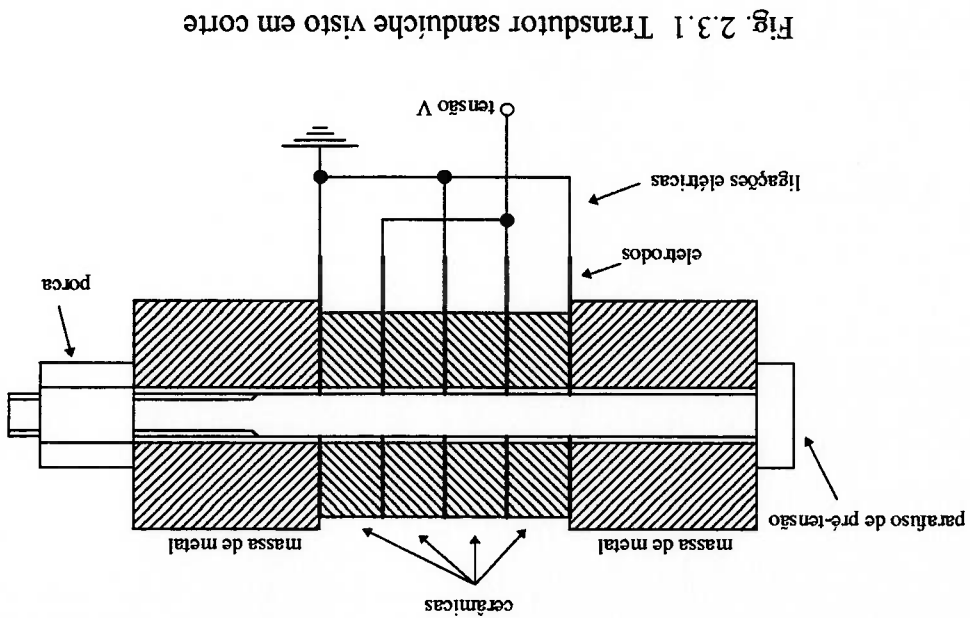
piezoeletrico.

Um importante parâmetro dos materiais piezoeletricos é o coeficiente de acoplamento eletromecânico, que pode ser definido pela raiz quadrada da razão entre a energia disponível na forma elétrica (mecânica) e a energia fornecida por uma fonte mecânica (elétrica). Sendo um numero adimensional, pode ser utilizado com vantagens na comparação entre as capacidades de conversão de energia de diferentes cerâmicas, porém não define diretamente a eficiência, pois não considera as perdas no material [GALLEGO (1989)].

Os fatores de qualidade mecânico e elétrico de um material relacionam-se com as perdas. Quanto maiores os seus valores, menores as perdas. Materiais com alto fator de qualidade são adequados para aplicações de alta potência. Um material sem perdas teria um fator de qualidade infinito. Os fatores de qualidade dos materiais do transdutor não devem ser confundidos com o fator de qualidade do transdutor, pois um transdutor feito de materiais com baixas perdas pode ter um fator de qualidade baixo, pois altas transferências de potência para o meio de propagação externo baixam o fator de qualidade do transdutor.

## Construção

Os transdutores de potência piezoeletricos são construídos comumente na forma de um sanduíche, com as cerâmicas piezoeletricas comprimidas entre duas massas metálicas por um parafuso (fig. 2.3.1). As cerâmicas são polarizadas na direção longitudinal, com sentidos de polarização alternados a cada cerâmica. Entre as cerâmicas e entre as cerâmicas e as massas metálicas há eletrodos, que são utilizados para a aplicação de voltagem, ligados em paralelo. O parafuso de pré-tensão serve para manter as cerâmicas sempre sob compressão, com o transdutor em funcionamento, para se reduzir a chance de quebras, pois as cerâmicas são frágeis. A pré-tensão tem um valor típico de 30 MPa [GALLEGO (1989)]. Quando as várias partes são conectadas por pressão e não por adesivos ou solda, é clara a necessidade de se evitar que haja tração. O uso de adesivos pode interferir no comportamento do transdutor. O bom contato entre



## 2.3 Transdutores piezoeletricos tipo sanduíche

os vários componentes é vital, para que o comportamento do transdutor seja previsível e adequado; DUBUS (1991) estudou a necessidade de um limite de tolerância na fabricação das cerâmicas para um bom contato.

Das vantagens deste tipo de construção são que as perdas nos metais podem ser muito menores que nas cerâmicas, dependendo dos materiais escolhidos, o que é importante em aplicações de potência; e como o comprimento do transdutor é determinado pela frequência de trabalho, o uso de metal ao invés de somente cerâmicas reduz o custo do transdutor. Outras vantagens: a dissipação térmica é favorecida; a pré-tensão pode ser melhor distribuída na superfície das cerâmicas; e um transdutor feito inteiramente de cerâmicas tende a ser mais suscetível a quebras que um transdutor sanduíche, pois as cerâmicas são materiais frágeis. Essa configuração de transdutor em sanduíche tem comportamento bem conhecido e é adequada para se verificar os modelos MEF e MMC.

Deve-se tomar o cuidado de se fazer a rosca, no parafuso de pré-tensão, com um raio nos sulcos para se minimizar problemas de fadiga. Deve ser utilizado um material isolante, como teflon ou fenolite, no furo da cerâmica para permitir uma boa isolamento elétrica em relação ao parafuso. O valor aproximado da pré-tensão pode ser avaliado por um medidor de deformação colocado na lateral do transdutor.

Quando aumenta-se o número de cerâmicas, a impedância do transdutor é reduzida, pois são mais elementos ligados eletricamente em paralelo.

## Funcionamento

Quando o transdutor está envolvido por materiais com impedâncias acústicas relativamente pequenas, as diferenças de impedância nas extremidades provocam fortes reflexões. Se a massa dianteira estiver em contato com água, por exemplo, e a massa traseira estiver em ar, a massa traseira reflete praticamente toda a energia, funcionando apenas como um apoio dinâmico para as cerâmicas. A massa dianteira funciona quase do mesmo modo, com a diferença de que uma pequena parcela da energia flui para a água em cada oscilação. Basicamente as ondas ficam retidas por um longo tempo no interior do transdutor. Na ressonância, em um transdutor simétrico, os deslocamentos são máximos nas extremidades e nulos no centro, enquanto as tensões são máximas no centro e pequenas nas extremidades. O comprimento do transdutor é, a grosso modo, igual a meio comprimento de onda. O fator de qualidade do transdutor é alto nesta configuração.

Já quando o meio externo tem impedância acústica alta, como no caso de um meio metálico, o comportamento do transdutor torna-se mais complexo. O ponto de máxima tensão desloca-se do centro, e a curva de impedância elétrica pode ser inundada por picos e vales de ressonância causados pelas características do meio externo.

A impedância elétrica, por causa dos efeitos piezoelétricos, reflete as características de ressonância do transdutor. Nas frequências afastadas das frequências de ressonância, o transdutor comporta-se como um capacitor. Há pontos onde o módulo da impedância tem valor mínimo local, nas chamadas frequências de ressonância ( $f_1$ ), e pontos onde o módulo da impedância tem valor máximo local, nas chamadas frequências de anti-ressonância ( $f_2$ ). Nestas frequências a impedância é puramente resistiva, ou seja, a parte imaginária da impedância é nula. Na frequência de ressonância o transdutor

funciona como se estivesse sendo excitado por carga elétrica, e na frequência de anti-ressonância o transdutor funciona como se estivesse sendo excitado por voltagem elétrica.

Em geral, uma frequência de anti-ressonância vem logo após uma frequência de ressonância, o que não acontece quando há modos de vibração muito próximos.

### **Largura de banda**

Em uma aplicação de transmissão de sinais existe uma exigência de largura de banda mínima; neste caso, pode ser necessário o aumento da largura de banda, ou em outras palavras, a redução do fator de qualidade do transdutor. Para isso, pode-se utilizar uma ou mais camadas de casamento de impedâncias de quarto de onda [KINSLER et al. (1982)] na saída do transdutor, ou um circuito elétrico de compensação entre a fonte de energia e o transdutor [COATES; MATHAMS (1988)]. O primeiro método é limitado, em aplicações de baixa frequência, pelo espaço disponível ou pela disponibilidade de material com a impedância desejada. O segundo pode precisar de componentes com especificações difíceis de serem encontradas, e o circuito é dependente da carga; e como nenhum componente elétrico é perfeito, cada componente a mais representa uma perda adicional. O ideal é que, com um projeto adequado, estes artificios não sejam necessários. Quando o meio externo é metálico, existe a possibilidade de se definir uma geometria que atenda aos requisitos de largura de banda sem artificios.



## Eficiência

A eficiência do transdutor tem que ser considerada com a fonte de energia, o transdutor e o meio externo conectados. A eficiência é calculada pela razão entre a potência disponível no meio externo e a potência aplicada pela fonte de energia. Para a fonte de energia, uma carga resistiva é vantajosa, pois não utiliza corrente elétrica em vão. Como dito anteriormente, nas frequências de ressonância e anti-ressonância a impedância é puramente resistiva, o que é favorável. Na anti-ressonância a exigência de corrente é menor, porém as altas tensões necessárias podem ser difíceis de se obter.

Um fator de qualidade muito alto do transdutor pode significar que uma parte significativa da energia está sendo dissipada pelas perdas nos materiais do transdutor. Quando utilizam-se materiais com baixas perdas, um fator de qualidade baixo significa que uma boa parte da energia está indo para o meio externo, que é o que se procura.

## Métodos de projeto

Por causa da complexidade do projeto de um transdutor, métodos computacionais podem ser muito úteis, sobretudo em uma otimização. Uma otimização exige cálculos para diferentes materiais, dimensões, condições de contorno, geometrias, etc. Há vários métodos analíticos e numéricos disponíveis, como o método das matrizes em cadeia (MMC) [KRASZEWSKI (1991a, 1991b)], que é analítico e unidimensional, e o método dos elementos finitos (MEF) [BATHÉ (1982)], um método numérico de uso geral. Quando o problema pode ser tratado unidimensionalmente com adequada precisão, os métodos analíticos têm a seu favor a sua economia de processamento. Em problemas mais complexos, o MEF é um dos métodos mais utilizados, pela sua versatilidade, e pela facilidade de uso quando se tem um programa de computador adequado.

O transdutor pode ser modelado também por um circuito elétrico equivalente. Os circuitos mais simples só funcionam até a primeira ressonância, e para o transdutor sem carga e sem perdas. Com a adição de elementos no circuito, o modelo pode-se tornar mais completo, mas, em comparação, o MMC gera resultados com sentido físico, como por exemplo as velocidades e forças nas seções do transdutor, além das variáveis elétricas.

Pode-se utilizar o MEF na simulação de uma estrutura complexa, e em seguida calcular a impedância acústica equivalente da estrutura. Esta impedância pode então ser colocada como impedância do meio externo no modelo de um transdutor, para a simulação deste transdutor excitando a estrutura complexa. Procedimento semelhante foi adotado por DECARPIGNY (1985). Como o tamanho do transdutor é definido por tentativa e erro, a partir das especificações da resposta em frequência desejada, ocorre uma imensa economia de processamento, pois cada iteração envolve a solução do modelo do transdutor, e não de um modelo do conjunto transdutor-estrutura.

### 3 MÉTODO DAS MATRIZES EM CADEIA

O método das matrizes em cadeia [KRASZEWSKI et al. (1991a, 1991b)] é um método analítico unidimensional, que pode ser aplicado na simulação de transdutores piezétricos. Este método considera o transdutor como um conjunto camadas, sendo que cada camada tem seção transversal com área constante (fig. 3.1). Os contatos entre as camadas adjacentes são perfeitos, ou seja, não há descolamento, nem substâncias indesejáveis entre as superfícies de contato, por exemplo ar.

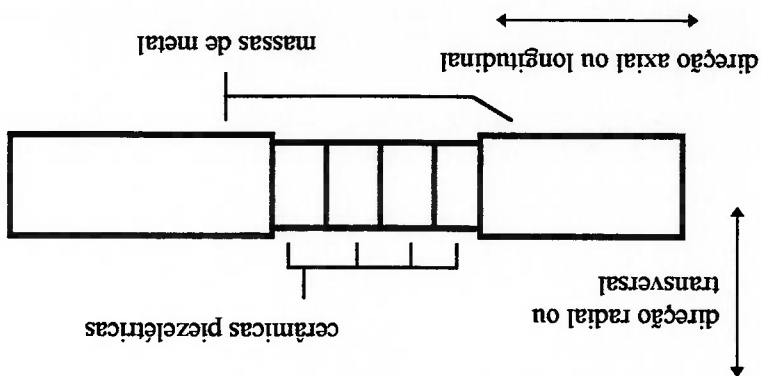


Fig. 3.1 Transdutor piezétrico sanduíche

Neste método, as ondas que percorrem o transdutor podem ser tratadas como ondas planas, no modo de vibração de espessura, ou como ondas extensionais, no modo de vibração de barra (seção 2.1.4). Nos dois casos a propagação é na direção longitudinal, com excitação senoidal e velocidade angular  $\omega$ . A formulação do MMC para o modo de espessura é apresentada por KRASZEWSKI et al. (1991a, 1991b), e

neste texto será apresentada a formulação para o modo de barra, que melhor modela os transdutores considerados neste trabalho. O MMC pode considerar o efeito de perdas, através da utilização de componentes imaginárias (referindo-se a números complexos) nas constantes dos materiais, porém estas perdas não serão consideradas, devido à baixa frequência de operação e ao tipo de transmissão acústica, onde o meio de propagação externo é água ou uma grande massa metálica, pois espera-se que a transmissão de energia para os meios externos seja muito superior às perdas internas.

No modelo matemático unidimensional utilizado, que aproxima o modo de barra, as variáveis do problema são consideradas constantes em cada seção transversal. Cada camada que forma o transdutor tem área de seção transversal constante  $A$ , comprimento  $L$  e faces à esquerda e à direita. As faces são compartilhadas entre camadas adjacentes. A figura 3.2 mostra uma camada com as faces nos extremos esquerdo e direito numeradas por 1 e 2, respectivamente. Cada camada possui um único material, no caso de um material piezoeletrico a polarização é na direção  $z$ . Cerâmicas piezoeletricas com polarizações em sentidos opostos devem ser separadas em camadas distintas. No desenvolvimento a seguir será utilizada a notação fasorial, na qual uma função senoidal com velocidade angular  $\omega$ ,  $f(t)=real(G \cdot e^{i\omega t})$ , é representada pelo fasor  $G$ , um número complexo. A função  $real(x)$  devolve a parte real de  $x$ .

As forças em cada face são aplicadas pela camada à esquerda à direita, isto é,  $F_1$  é a força aplicada pela camada à esquerda, e  $F_2$  é a força aplicada na camada à direita. Os índices indicam a respectiva face, não a direção, pois todos os vetores no modelo têm a direção de  $z$ , ou direção 3. As velocidades das faces são indicadas por  $v_1$  e  $v_2$ , as correntes que entram nas faces ou saem delas são indicadas por  $I_1$  e  $I_2$ , e os potenciais elétricos por  $V_1$  e  $V_2$ . Os sentidos das forças, velocidades e correntes são os indicados na fig. 3.2. É importante saber que  $I_1$  e  $I_2$  pertencem às camadas, isto é, cada face contém duas correntes diferentes, uma da camada à esquerda e outra da camada à direita. A corrente total que entra ou sai de cada face é a diferença destas correntes. As outras variáveis são compartilhadas pelas camadas à esquerda e à direita.

Através da solução analítica das equações que regem o problema, considerando-se uma camada isoladamente, e o valor das variáveis das suas faces como condições de contorno, podem ser definidas as relações entre as variáveis das faces e as velocidades, tensões e potenciais em cada seção transversal no interior da camada.

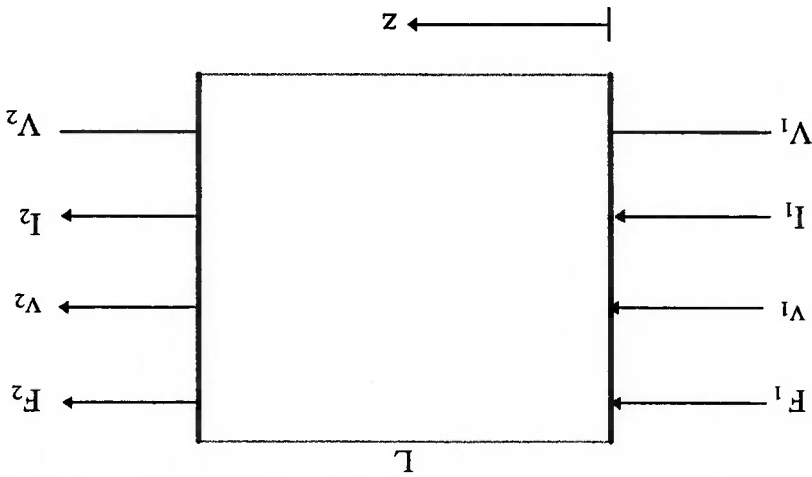


Fig. 3.2 Camada com variáveis das faces

As equações constitutivas lineares tridimensionais para um material piezoeletrico com caracteristicas da ceramica PZT-8 (eq. 2.1.1.11a e 2.1.1.11b), a equação de equilibrio (eq. 2.1.1.8a e 2.1.1.8b) e a definição de deformação (eq. 2.1.1.4a e 2.1.1.4b) serão utilizadas a seguir, como as equações fundamentais do método das matrizes em cadeia para o modo de barra. Os indices que indicam as direções utilizam a notação reduzida (tabela 2.1.1.1).

**Obtenção das equações constitutivas simplificadas**

Para a aplicação da aproximação de ondas extensionais, considera-se que  $T_1=T_2=T_3=T_4=T_5=T_6=0$  (tensões transversais e de cisalhamento nulas) [ANSI/IEEE (1996)].

Das equações constitutivas e das hipóteses simplificadoras:

$$(3.1) \quad \begin{cases} 0 = c_{11}^E S_1 + c_{12}^E S_2 + c_{13}^E S_3 - e_{31} E_3 \\ 0 = c_{12}^E S_1 + c_{11}^E S_2 + c_{13}^E S_3 - e_{31} E_3 \\ T_3 = c_{13}^E S_1 + c_{13}^E S_2 + c_{33}^E S_3 - e_{33} E_3 \end{cases}$$

Considerando-se as duas primeiras equações do sistema anterior (3.1/1 e 3.1/2):

$$(3.2) \quad S_1 = S_2 = \left( \frac{-c_{13}^E}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right) S_3 + \left( \frac{e_{31}}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right) E_3$$

e utilizando-se a eq. 3.2 na eq. 3.1/3:

$$(3.3) \quad T_3 = \left[ c_{33}^E - 2 \frac{c_{13}^E (c_{11}^E + c_{12}^E)}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right] S_3 - \left[ e_{33} - 2 \frac{c_{13}^E e_{31}}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right] E_3 = c_{33}^E S_3 - e_{33}^E E_3$$

Das equações constitutivas e das hipóteses simplificadoras:

$$D_3 = e_{31}S_1 + e_{31}S_2 + e_{33}S_3 + e_{33}F_3 \quad (3.4)$$

Com a utilização da eq. 3.2 na eq. 3.4:

$$D_3 = \left[ e_{33} - 2 \frac{c_{13}^E e_{31}^E}{c_{11}^E + c_{12}^E} \right] S_3 + \left( e_{33}^S + 2 \frac{c_{11}^E + c_{12}^E}{e_{31}^E} \right) F_3 = e_{33}^S S_3 + e_{33}^S F_3 \quad (3.5)$$

As equações 3.3 e 3.5 podem ser utilizadas como equações constitutivas

simplificadas. As constantes  $e_{33}^S$ ,  $e_{33}^E$  e  $c_{33}^E$  são calculadas a partir das propriedades do

material. Se fosse considerada a propagação de ondas planas, as equações simplificadas

obtidas teriam a mesma forma, só que essas constantes seriam iguais às propriedades  $e_{33}^S$ ,

$e_{33}^E$  e  $c_{33}^E$ , respectivamente.

**Obtenção da matriz elementar inversa**

O problema, agora, pode ser reduzido ao seguinte conjunto de equações:

- (3.6)  $T_3 = c_{33}^R S_3 - e_{33}^T E_3$  (equação constitutiva simplificada)
- (3.7)  $D_3 = e_{33}^R S_3 + \epsilon_{33}^T E_3$  (equação constitutiva simplificada)
- (3.8)  $\frac{\partial T_3}{\partial z} = -\omega_2 p u_3$  (equação de equilíbrio)
- (3.9)  $\frac{\partial D_3}{\partial z} = 0$  (deslocamento elétrico constante)
- (3.10)  $S_3 = \frac{\partial u_3}{\partial z}$  (relação deformação-deslocamento)

As equações constitutivas simplificadas são as obtidas pela aproximação  $T_1=T_2=T_4=T_5=T_6=0$ . A equação de equilíbrio é obtida considerando-se somente a direção z. Nas direções x e y, o equilíbrio não é satisfeito para a aproximação  $T_1=T_2=T_4=T_5=T_6=0$ , pois neste caso há ao mesmo tempo acelerações não nulas e tensões nulas, nas direções diferentes da direção longitudinal. Na realidade as tensões nas direções diferentes da direção longitudinal não são nulas, mas podem ser consideradas desprezíveis, assim como as acelerações na direção radial. Em outras palavras, as energias envolvidas nas vibrações nas direções x, y e xy são muito pequenas em relação às energias envolvidas nas vibrações longitudinais. Adota-se a aproximação onde o deslocamento elétrico é constante no interior das cerâmicas piezoeletricas; na verdade o comportamento do deslocamento elétrico depende da geometria e das condições de carregamento da cerâmica [ANSI/IEEE (1996)]. A equação que vale para todos os casos, mas que deixaria os cálculos mais complexos, é  $div(\mathbf{D})=0$ , válida no interior de um



material isolante. A relação deformação-deslocamento é a definida pela Elasticidade

Linear.

Da eq. 3.7, obtêm-se  $E_3$ , que é colocado na eq. 3.6, que por sua vez gera, com a

utilização da eq. 3.10:

$$T_3 = \left( c'_{33} + \frac{e'_{33}}{\epsilon'_{33}} \frac{\partial z}{\partial u_3} - \frac{e'_{33}}{\epsilon'_{33}} D_3 \right) \quad (3.11)$$

Derivando-se a eq. 3.11 em  $z$ , e considerando-se as eq. 3.8 e 3.9, obtêm-se a

equação de onda:

$$v_s^2 \frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} = -\omega^2 u_3 \quad (3.12)$$

Onde a velocidade de propagação  $v_s$  é dada por:

$$v_s = \sqrt{\frac{c'_{33} + \frac{e'_{33}}{\epsilon'_{33}}}{\rho}} \quad (3.13)$$

onde  $a = \cos(kL)$  e  $b = \sin(kL)$ .

$$u_3 = \frac{j\omega}{V_1} \cos(kz) + \frac{j\omega b}{V_2 - V_1 a} \sin(kz) \quad (3.21)$$

N podem ser determinadas, chegando-se ao valor de  $u_3$ :

Considerando-se a relação  $v_3 = j\omega u_3$ , e as eq. 3.14, 3.15 e 3.16, as constantes M e

$$I_1 = I_2 = j\omega D_3 A \quad (3.20) \quad \text{(correntes entrando ou saindo das faces)}$$

$$V_1 - V_2 = \int_1^0 E_3 dz \quad (3.19) \quad \text{(diferença de potencial elétrico entre as faces)}$$

$$F_2 = -T_3(z=L) A \quad (3.18) \quad \text{(força na face 2)}$$

$$F_1 = -T_3(z=0) A \quad (3.17) \quad \text{(força na face 1)}$$

$$v_2 = j\omega u_3(z=L) \quad (3.16) \quad \text{(velocidade na face 2)}$$

$$v_1 = j\omega u_3(z=0) \quad (3.15) \quad \text{(velocidade na face 1)}$$

As condições de contorno do problema são:

$$u_3 = M \cos(kz) + N \sin(kz) \quad (3.14)$$

forma geral:

A solução da eq. de onda, considerando-se  $k = \frac{\omega}{V_s}$  (número de onda), tem a

Das eq. 3.11 e 3.20, tem-se:

$$T_3 = p v_s^2 \frac{\partial u_3}{\partial z} + j \frac{A}{\beta_c} I_2 \quad (3.22)$$

$$\text{onde } \beta_c = \frac{\epsilon'_{33} \omega}{\epsilon'_{33} \omega}$$

A partir das eq. 3.18, 3.21 e 3.22, tem-se:

$$v_1 = \left[ j b \frac{Z}{\beta_c} F_2 + [a] v_2 + \left[ -\frac{Z}{\beta_c b} \right] I_2 \right] \quad (3.23)$$

onde  $Z = p v_s A$  é a impedância acústica característica.

Utilizando-se as eq. 3.17, 3.21 e 3.22, e o valor de  $v_1$  da eq. 3.23:

$$F_1 = [a] F_2 + [j Z b] v_2 + [j \beta_c (a - 1)] I_2 \quad (3.24)$$

Das eq. 3.7 e 3.10:

$$F_3 = D_3 \frac{\epsilon'_{33} \omega}{\epsilon'_{33} \omega} - \frac{\epsilon'_{33} \omega}{\epsilon'_{33} \omega} \frac{\partial u_3}{\partial z} \quad (3.25)$$

Integrando-se a eq. 3.25 em  $z$  de 0 a  $L$ , e utilizando-se as eq. 3.19, 3.20 e 3.21,

obtem-se:

$$V_1 = \left[ \beta_c b \frac{Z}{F_2} + [j\beta_c(1-a)]V_2 + V_2 + \left[ \frac{j\omega C_0}{1} + j\beta_c b \frac{Z}{F_2} \right] I_2 \right] \quad (3.26)$$

$$\text{onde } C_0 = \frac{\epsilon_{33}^s A}{L}.$$

Finalmente, reunindo-se as eq. 3.20, 3.23, 3.24 e 3.26 em um sistema matricial, e reunindo-se as variáveis das faces em vetores, obtêm-se a matriz elementar inversa  $c$ :

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} F_2 \\ V_2 \\ V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & 0 & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & 1 & c_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ V_2 \\ V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

A matriz elementar inversa, como o próprio nome diz, é a inversa da matriz elementar direta. Neste texto é utilizada somente a matriz inversa. Esta inversão pode ser realizada trocando-se o sinal de  $L$ .

Para um material metálico, os elementos da matriz elementar  $c$  que contém

propriedades elétricas ou eletro-mecânicas são nulos. Para a inversão da polaridade da

cerâmica, basta a troca do sinal de  $\epsilon_{33}$ . As variáveis de força, velocidade e potencial

elétrico são compartilhadas pelas camadas adjacentes. As correntes, porém, pertencem a

uma única camada. Quando são unidas duas camadas, com faces 1, 2 e 3, sendo a face 2

compartilhada, há uma corrente  $I_2$  saindo da camada à esquerda, não necessariamente

igual à corrente  $I_2'$  entrando na camada à direita. Se as correntes são iguais, o vetor

$$[F_2 \quad V_2 \quad I_2]' = c2 \cdot [F_3 \quad V_3 \quad I_3]'$$

$$\text{pode ser substituído na equação } [F_1 \quad V_1 \quad I_1]' = c1 \cdot [F_2 \quad V_2 \quad I_2]'$$

### transdutor sanduiche com n cerâmicas

### Montagem das matrizes elementares em cadeia para a modelagem de um

$$\text{onde: } a = \cos(kL), b = \sin(kL), v_s = \sqrt{\frac{e'_{33} + \frac{e'_{12} e'_{33}}{e'_{11}}}{\rho}}, Z = p v_s A, \beta = \frac{e'_{33}}{e'_{11} A}, C_0 = \frac{L}{e'_{33} A}$$

$$(3.28) \quad \begin{bmatrix} F_1 \\ V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & \frac{j\beta}{Z} & 0 \\ j\beta b & \frac{Z}{\beta b} & 0 \\ 0 & \beta b(1-a) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left[ \frac{j\omega C_0}{1 + j\beta_c \frac{Z}{b}} \right] \begin{bmatrix} I_2 \\ V_2 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

Com a expansão de  $c$  na eq. 3.27:

resultando a equação  $[F_1 \ V_1 \ I_1]^T = c12 \cdot [F_3 \ V_3 \ I_3]^T$ . Neste caso a matriz  $c12$ , produto das matrizes  $c1$  e  $c2$ , relaciona as variáveis das faces 1 e 3. Se as correntes não são iguais, utilizam-se as propriedades lineares dos sistemas matriciais. Considerando-se as seguintes camadas colocadas em série, cada uma representando uma

camada do transdutor:

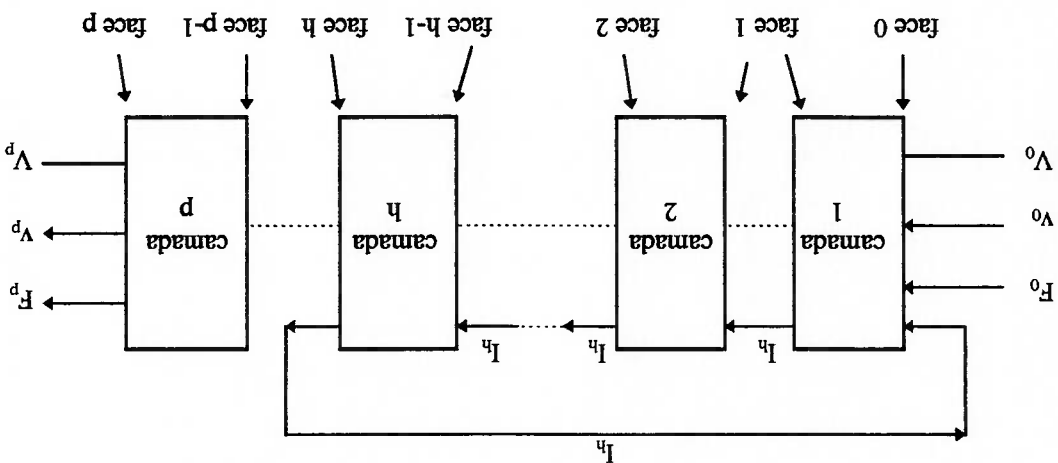


Fig. 3.3 Camadas em série

Nas camadas de 1 a h, as correntes são iguais, portanto as matrizes elementares

podem ser multiplicadas em cadeia:

$$(3.29) \quad \begin{bmatrix} I_h \\ V_0 \\ V_0 \\ F_0 \end{bmatrix} = c1h \begin{bmatrix} I_h \\ V_h \\ V_h \\ F_h \end{bmatrix} = c1 \cdot c2 \dots ch \begin{bmatrix} I_h \\ V_h \\ V_h \\ F_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c1h_{31} & c1h_{21} & c1h_{11} \\ 0 & c1h_{32} & c1h_{22} & c1h_{12} \\ 1 & c1h_{34} & c1h_{24} & c1h_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_h \\ V_h \\ V_h \\ F_h \end{bmatrix}$$

Como visto,  $c1h$  significa o produto das matrizes  $c1$  a  $ch$  em cadeia. Um detalhe

importante é que numa matriz elementar  $c$ ,  $c11=c22$ , o que não vale necessariamente para

o produto de duas ou mais matrizes elementares em cadeia. O vetor das variáveis da face  $h$  pode ser dividido em duas partes:

$$(3.30) \quad \begin{bmatrix} F_h \\ V_h \\ I_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_h \\ V_h \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_h \end{bmatrix}$$

E a eq. 3.29 pode ser expandida com o auxílio da eq. 3.30:

$$(3.31) \quad \begin{bmatrix} F_0 \\ V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{h11} & c_{h12} & 0 \\ c_{h21} & c_{h22} & 0 \\ c_{h31} & c_{h32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h \\ V_h \\ I_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{h14} & c_{h24} & c_{h34} \\ c_{h14} & c_{h24} & c_{h34} \\ c_{h14} & c_{h24} & c_{h34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ V_p \\ I_p \end{bmatrix}$$

Nas faces  $h+1$  até  $p$  as correntes são nulas, mas o vetor  $[F_h \ V_h \ I_h]^T$  também

possui corrente nula. Portanto pode-se continuar o encadeamento das matrizes, a partir

deste vetor. O vetor  $[0 \ 0 \ 0 \ I_h]^T$  permanece inalterado. O resultado é o sistema:

$$(3.32) \quad \begin{bmatrix} F_0 \\ V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{h11} & c_{h12} & 0 \\ c_{h21} & c_{h22} & 0 \\ c_{h31} & c_{h32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h \\ V_h \\ I_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{h14} & c_{h24} & c_{h34} \\ c_{h14} & c_{h24} & c_{h34} \\ c_{h14} & c_{h24} & c_{h34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ V_p \\ I_p \end{bmatrix}$$

Neste caso a série de camadas com correntes iguais começa na camada 1 e termina numa camada qualquer. Ao se sobrepor dois destes casos, com correntes de valores iguais mas sinais opostos, pode-se obter um modelo em que a série de camadas

com corrente começa numa camada qualquer e termina na mesma camada ou numa camada à sua direita:

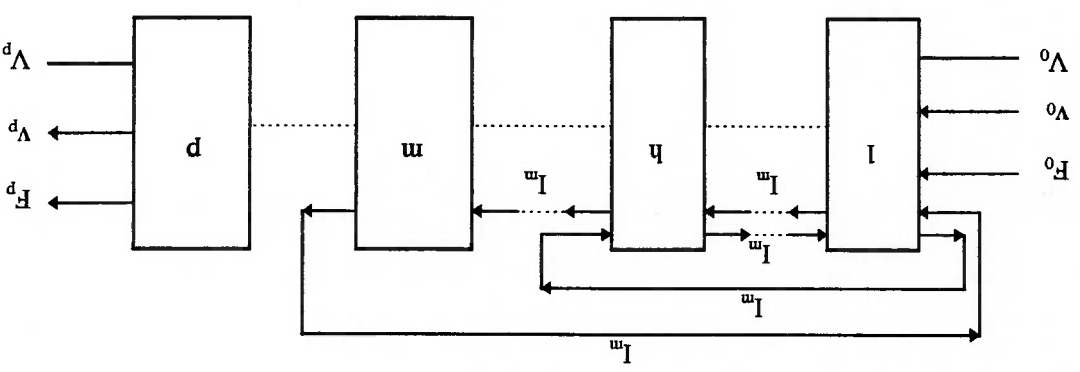


Fig. 3.4 Camadas em série, sobreposição de dois casos

que é equivalente ao modelo:

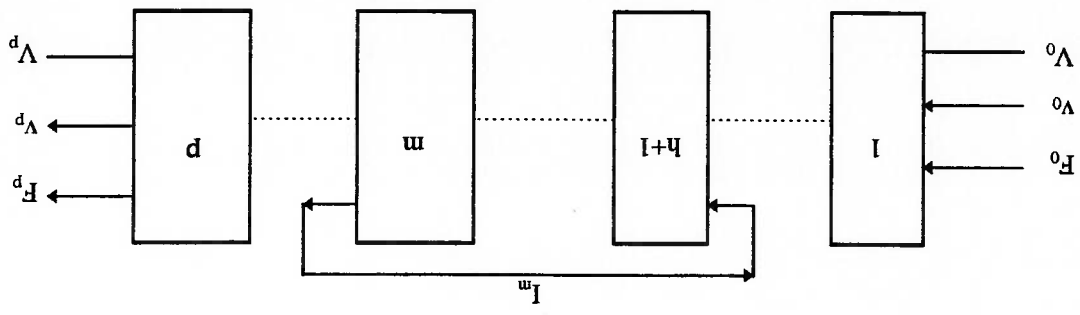


Fig. 3.5. Camadas em série, resultado da sobreposição de dois casos



onde a corrente  $I_m$  ( $m=1\dots n$ ) é a corrente que sai e entra na cerâmica  $m$ ; a diferença de potencial elétrico  $\Delta V_m$  ( $m=1\dots n$ ) é o potencial da face esquerda da cerâmica  $m$  menos o potencial da sua face direita; e  $Z_{hm}$  ( $h,m=1\dots n$ ) equivale ao valor de  $\Delta V_h$  quando  $I_m=1$  A

$$(3.34) \quad \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \text{ ou } \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{V}$$

As variáveis das faces na eq. 3.33 são as somas das variáveis relativas aos dois casos componentes. Com este sistema, dados os valores das variáveis de uma face qualquer do transdutor e o valor da corrente, onde a corrente possui somente uma entrada e uma saída no transdutor, as variáveis das outras faces podem ser determinadas. Considerando-se um modelo onde a camada 1 representa a massa esquerda de um transdutor sanduíche, a camada  $p$  a massa direita, e as camadas intermediárias as  $n$  cerâmicas do transdutor, e tendo-se consequentemente  $p=n+2$ , pode-se calcular a impedância elétrica do transdutor com o sistema:

$$(3.33) \quad \begin{bmatrix} F_0 \\ V_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{lp11} & c_{lp12} & 0 & c_{lp14} \\ c_{lp21} & c_{lp22} & 0 & c_{lp24} \\ c_{lp31} & c_{lp32} & 0 & c_{lp34} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ V_p \\ V_p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{lm14} - c_{lh14} \\ c_{lm24} - c_{lh24} \\ c_{lm34} - c_{lh34} \\ 0 \end{bmatrix} I_m$$

O sistema resultante, soma dos dois sistemas matriciais relativos aos casos componentes, é dado por:

(um ampère) e as outras correntes são nulas, e  $I$  V (um volt) é trocado por  $I \Omega$  (um

ohm).

O parafuso de pré-tensão pode ser representado por uma camada de metal:



Fig. 3.6 Camada representando o parafuso de pré-tensão

Considera-se a aproximação onde a face 0 do parafuso move-se com a mesma

velocidade da face 0 do transdutor, e a face p move-se com a mesma velocidade da

face p. Com isso as velocidades das faces do parafuso são as mesmas das faces externas

do transdutor. Esta condição refere-se ao caso em que o parafuso está apoiado nas

massas nas faces 0 e p, seja com uma cabeça de parafuso ou com porcas. Na face 0, a

massa esquerda sofre duas forças, a força  $-F^0$  devida ao parafuso e a força  $-Z_0 v_0$  devida

à impedância do meio à esquerda e de massas adicionais, como porcas, por exemplo. Na

face p, a massa direita sofre também duas forças, a força  $-F^p$  devida ao parafuso e a

força  $Z_p v_p$  devida à impedância do meio à direita e de massas adicionais. O

comportamento do parafuso é descrito pela seguinte equação, resultado da simplificação

de uma matriz elementar inversa para o caso de materiais metálicos:

(3.35)

$$\begin{bmatrix} F_0^0 \\ V_0^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cb_{11} & cb_{21} \\ cb_{12} & cb_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F^p \\ V^p \end{bmatrix}$$

Utilizando-se a eq. 3.33, as condições de contorno descritas no parágrafo anterior, a eq. 3.35, e colocando-se corrente unitária somente na camada  $m$ , ou em outras palavras tendo-se  $h=m-1$  na figura 3.5, e definindo-se arbitrariamente que  $V_p=0$ , obtém-se o sistema:

$$(3.36) \quad \begin{bmatrix} [-Z_0 \cdot cb_{z1} - cb_{11} + c1p_{11}] & [c1p_{31}] \\ [-Z_0 \cdot cb_{z2} - cb_{12} - (c1p_{11} \cdot Z_p + c1p_{12})] & [c1p_{21} + c1p_{22}] \\ [-cb_{z2} - (c1p_{21} \cdot Z_p + c1p_{22})] & [-(c1p_{31} \cdot Z_p + c1p_{32})] \\ 0 & [F_p^p] \\ 0 & [V_p^p] \\ 1 & [V_0^p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c1m_{14} - c1h_{14} \\ c1m_{24} - c1h_{24} \\ c1m_{34} - c1h_{34} \end{bmatrix}$$

A partir do sistema 3.36 são obtidos os valores das variáveis das faces 0 e p. Com a utilização do sistema 3.33, obtêm-se as variáveis das outras faces. Para cada elemento da matriz  $Z_c$  na equação 3.34 é feito o mesmo cálculo. Se o número de cerâmicas for par, e se estas estiverem ligadas eletricamente em paralelo, polarizadas em sentidos alternados, o vetor de potenciais no sistema 3.34 é igual a  $[-V_1 \ V_1 \ -V_1 \ \dots \ -V_1 \ V_1]^T$  onde  $V_1$  é a amplitude da tensão de excitação. Com o vetor resultado I do sistema 3.34, a corrente total é determinada por  $I_t = -I_1 + I_2 - I_3 + \dots + I_n$ . A impedância do transdutor é calculada por  $Z_t = V_t / I_t$  e todo o processo é repetido para cada frequência de interesse.

**Outros componentes do transdutor**

Nos cálculos anteriores foi considerado que as faces nas extremidades são carregadas por meios com certa impedância acústica. Em casos onde há trechos das massas laterais além dos pontos de apoio do parafuso, as impedâncias nas faces externas do transdutor devem ser combinadas com os efeitos dessas massas extras. Para uma camada de metal à direita da camada p na figura 3.5, com impedância  $Z_{gr}$  aplicada na face externa:

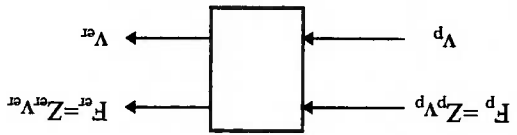


Fig. 3.7 Massa adicional à direita

As correntes e potenciais elétricos não são necessários neste caso, pois a massa é de metal, e através da utilização de uma matriz elementar inversa simplificada, a impedância  $Z_p$  vista pela face p pode ser determinada por:

$$(3.37) \quad \begin{bmatrix} Z_p & V_p \\ V_p & Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{gr} & V_{gr} \\ V_{gr} & Z_{gr} \end{bmatrix} \Rightarrow Z_p = \frac{c_{11}Z_{gr} + c_{12}}{c_{21}Z_{gr} + c_{22}}$$

No caso em que a massa está à esquerda:

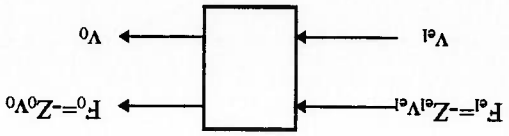


Fig. 3.8 Massa adicional à esquerda

Podem-se considerar também massas adicionais como porcas, e partes visíveis do parafuso. Por meio das eq. 3.37 e 3.38, com  $Z_{er}$  e  $Z_{ei}$  nulos, obtêm-se as impedâncias equivalentes dessas massas. Essas impedâncias podem ser somadas às impedâncias agindo nas faces de apoio destas massas. As impedâncias são somadas pois a soma das forças externas numa dada seção é igual à soma das impedâncias dos meios externos multiplicada pela velocidade da face.

Os eletrodos podem ser modelados como finas camadas de metal, onde a matriz da camada à esquerda do eletrodo é multiplicada pela matriz elementar de um eletrodo. Cada combinação metal-eletrodo ou cerâmica-eletrodo pode ser utilizada como se fosse uma camada simples.

$$(3.38) \quad \begin{bmatrix} -Z_{ei}V_{ei} \\ V_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} \\ c_{12} & c_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -Z_0V_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow Z_0 = \frac{c_{22}Z_{ei} + c_{12}}{c_{21}Z_{ei} + c_{11}}$$

A impedância  $Z_0$  vista pela face 0 é calculada por:

### Modelos de um transdutor sanduíche com número par de cerâmicas

Implementou-se o programa *te.m* (apêndice C), considerando-se o modelo geral mostrado na figura 3.9. O parafuso de pré-tensão está mostrado separado, para melhor visualização das interligações entre os elementos; na verdade não há a dimensão transversal, pois o modelo é unidimensional. As linhas com setas duplas mostram que as extremidades do parafuso estão conectadas às extremidades das massas laterais. No caso das massas laterais e das cerâmicas é utilizada a área da seção transversal anular de um transdutor sanduíche. As impedâncias dos meios externos são aplicadas nas mesmas faces onde o parafuso entra em contato com as massas laterais.

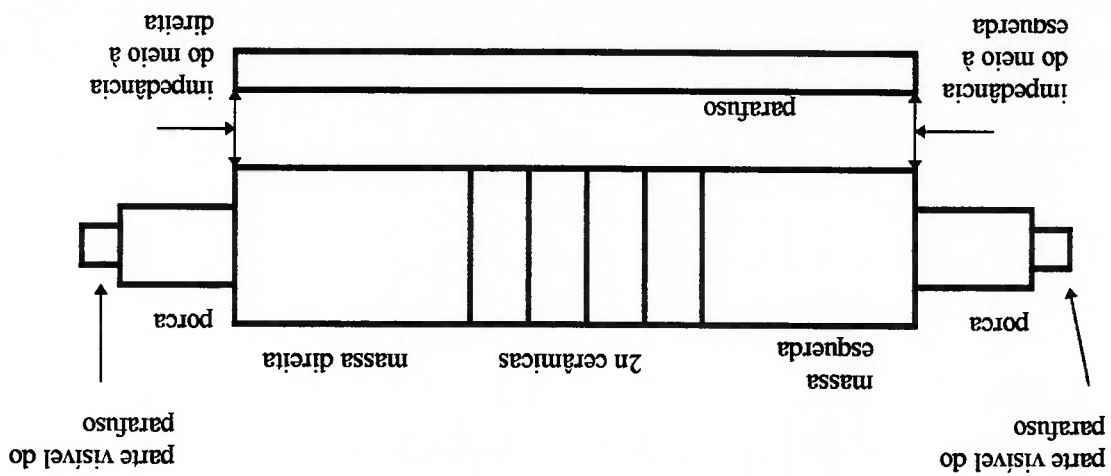


Fig. 3.9 Modelo MMC utilizado nas simulações

## 4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

### 4.1 Formulação

Supõe-se o conhecimento básico do método de elementos finitos para a leitura deste texto. BATHE (1982) apresenta uma extensa introdução ao método.

A partir das equações apresentadas na seção 2.1.1, e utilizando-se procedimentos como os apresentados por MAILLON (1983), obtêm-se o seguinte sistema, para um

elemento piezeletrico sem perdas:

$$(4.11) \quad \begin{pmatrix} m_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_{uu} & c_{u\phi} \\ c_{\phi u} & -c_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix}$$

onde  $c_{uu}$ ,  $c_{u\phi}$ ,  $c_{\phi u}$ ,  $c_{\phi\phi}$ ,  $m_{uu}$  são respectivamente as matrizes de rigidez mecânica, de acoplamento piezeletrico, de rigidez dieletrica e de massa; e  $u$ ,  $F$ ,  $Q$  e  $\phi$  são respectivamente os vetores deslocamento, força externa, carga elétrica e potencial elétrico, que contêm as variáveis dos nós. No caso particular de um elemento não-piezeletrico, o sistema é simplificado para:

$$(4.12) \quad m_{uu} \cdot \ddot{u} + c_{uu} \cdot \dot{u} = F$$

Um programa MEF pode criar uma matriz de amortecimento de Rayleigh [BATHE (1982)]  $r_{uu} = \alpha m_{uu} + \beta c_{uu}$ , com constantes arbitrárias  $\alpha$  e  $\beta$ , obtendo um elemento não-piezométrico com perdas:

$$m_{uu} \cdot \ddot{u} + r_{uu} \cdot \dot{u} + c_{uu} \cdot u = F \quad (4.1.3)$$

No caso de um elemento fluido com interface fluido-estrutura, obtém-se, a partir

das equações apresentadas nas seções 2.1.1 e 2.1.3 [SILVA (1993)]:

$$\begin{pmatrix} m_{uu} & 0 \\ 0 & m_p R^t \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} r_{uu} & 0 \\ 0 & r_p \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} c_{uu} & 0 \\ 0 & -c_p \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.1.4)$$

onde  $m_p$  é a matriz de massa do fluido,  $r_p$  a matriz de amortecimento do fluido,  $R$  a matriz de acoplamento fluido-estrutura e  $c_p$  a matriz de rigidez do fluido.

#### 4.1.1 Simulação de barra estreita infinita

Muitas vezes é necessária a simulação de uma barra estreita infinita. Um modo é criar uma estrutura comprida com perdas no material, para que as ondas sejam amortecidas progressivamente, sem reflexões fortes. Esta solução tem um custo de processamento muito alto. Outras opções são a utilização de elementos estruturais ou elementos de fluido com interface fluido-estrutura.



#### 4.1.1.1 Simulação de barra estreita infinita com elementos estruturais

Considerando-se uma barra estreita infinita com área de seção transversal A constante, orientada na direção x, com ondas extensionais propagando-se somente para a direita (fig. 4.1.1.1), a equação de onda é  $\ddot{u} = v_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ , com velocidade de propagação  $v_s = \sqrt{\frac{Y_0}{\rho}}$ , onde  $Y_0$ =módulo de Young e  $\rho$ =densidade.

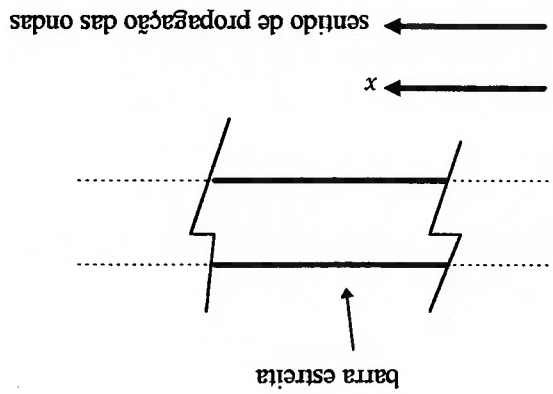


Fig. 4.1.1.1 Barra estreita infinita

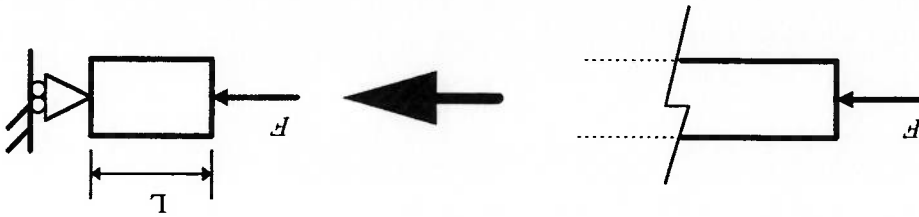
A solução para ondas que propagam-se somente da esquerda para a direita, em notação fasorial, é da forma:

$$u = B e^{-j k x} \quad (4.1.1.1)$$

sendo B uma constante de valor arbitrário,  $\omega$ =frequência e  $k=\omega/v_s$ . A relação tensão-deformação é  $T_x = Y_0 \frac{\partial u}{\partial x}$ , sendo  $T_x$  a tensão. Fazendo-se um corte transversal na barra

Na prática a substituição é feita por um conjunto de elementos finitos, com a condição de que a interface se mova aproximadamente em fase. Se for escolhida uma densidade nula para o elemento, e o coeficiente de amortecimento for dado por  $\alpha m + \beta c$ , onde  $m$ =massa,  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes, e  $c$ =constante de rigidez, o elemento finito obedecerá à equação  $F = \beta c \dot{u} + c u$ . No caso de elementos bi ou tridimensionais, esta

Fig. 4.1.1.1.2 Substituição por um elemento finito



e área de seção A:

A parte da direita pode ser substituída por um elemento finito de comprimento L. Ondas se propagassem somente para a esquerda.

Essa força é a mesma que a parte da direita aplicaria na parte da esquerda se as

$$F = -AY_0 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4.1.1.1.2)$$

pode ser reescrita como:

$$F = -AY_0 \frac{\partial v}{\partial x}, \text{ com valor positivo para a direita. Com o auxílio de 4.1.1.1.1, a força}$$

aplica na parte da direita. A força vale, de acordo com a relação tensão-deformação, estreita, separando-a em duas partes, pode-se calcular a força que a parte da esquerda

equação unidimensional é uma simplificação das equações matriciais destes elementos, mas que pode ser utilizada para o desenvolvimento por causa das hipóteses utilizadas. Se

forem também escolhidos  $c = \frac{L}{AY_0}c_0$ , onde  $c_0$  é uma constante com valor bem pequeno,

e  $\beta = \frac{L}{V}c_0^s$ , a equação do elemento resultará em  $F = \frac{AY_0}{V}n + \frac{L}{AY_0}c_0n$ . Como o valor de

$c_0$  é pequeno, pode-se desprezar o termo relativo ao deslocamento. Comparando-se a

última equação com a eq. 4.1.1.1.2, vê-se que o elemento assim ajustado serve como

simulação de uma barra estreita infinita, dentro das condições apresentadas.

Em geral não se escolhe o valor  $c$  do elemento diretamente, no caso de elementos

bi e tridimensionais, mas sim o valor de  $Y$ , o módulo de Young. Em vez de  $c = \frac{L}{AY_0}c_0$ ,

escolhe-se  $Y = Y_0c_0$ ; os valores de  $A$  e  $L$  são definidos na construção geométrica do

modelo. Deve-se tomar cuidado com o risco de erros de precisão numérica, por causa do

artifício utilizado. Os mesmos valores das constantes funcionam quando o elemento

finito é colocado à esquerda, com as ondas propagando-se somente para a esquerda.

#### 4.1.1.2 Simulação de barra estreita infinita com elementos de fluido com interface fluido-estrutura

Considerando-se novamente uma barra estreita infinita, como na seção 4.1.1.1, e cortando-a também em duas metades, descartando-se a parte da direita, e em seguida colocando-se uma camada de elementos finitos de fluido na seção à direita da parte que sobrou:

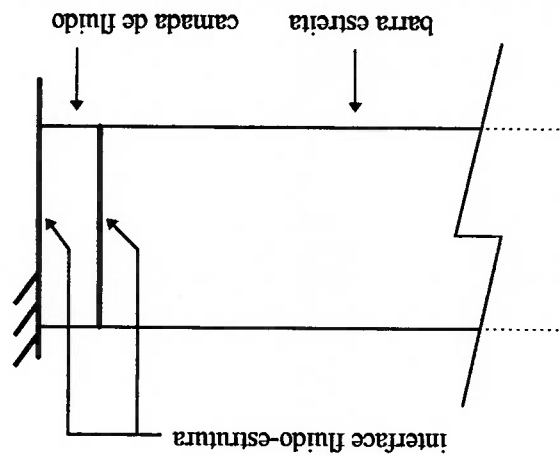


Fig. 4.1.1.2.1 Colocação de uma camada de elementos de fluido

A interface fluido-estrutura é ativada na interface entre os elementos de fluido e a barra estreita, e nos nós engastados. Se os valores de densidade e velocidade de propagação no fluido forem iguais aos do material da barra estreita, a transmissão de potência pela interface entre o fluido e a barra estreita é total, contanto que as ondas sejam ondas extensionais.

O último passo é fazer com que a superfície engastada do fluido absorva as ondas transmitidas pela outra interface. Basta configurar a interface fluido-estrutura na

superfície para absorção total (seção 2.1.3). Esta absorção só funciona perfeitamente para ondas com frente de onda em fase. Se a propagação da onda for em modo de barra, esta interface absorverá a maior parte das ondas incidentes.

#### 4.1.2 Aplicação de impedância

Com a utilização de um elemento massa-mola-amortecedor (fig. 4.1.2.1) pode-se

aplicar uma impedância arbitrária a uma estrutura. Sendo  $r$  o amortecimento do elemento,  $c$  a rigidez da mola e  $m/2$  as massas concentradas nas extremidades do elemento, e a impedância  $Z = Z_R + jZ_I$  a impedância desejada, monta-se o elemento de

acordo com a fig. 4.1.2.2.

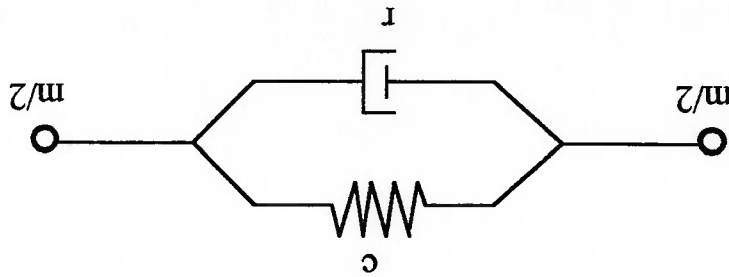


Fig. 4.1.2.1 Elemento massa-mola-amortecedor

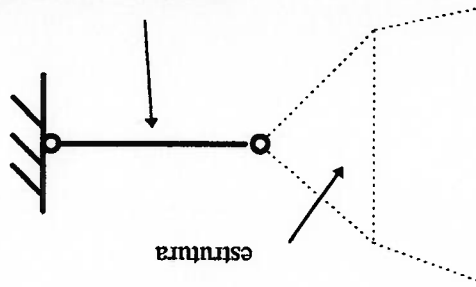


Fig. 4.1.2.2 Montagem do elemento para a aplicação da impedância

Como a estrutura enxerga neste caso uma impedância  $Z = r + j(\omega m/2 - c/\omega)$ , as

constantes do elemento são configuradas da seguinte forma, sendo  $Z_0$  uma constante

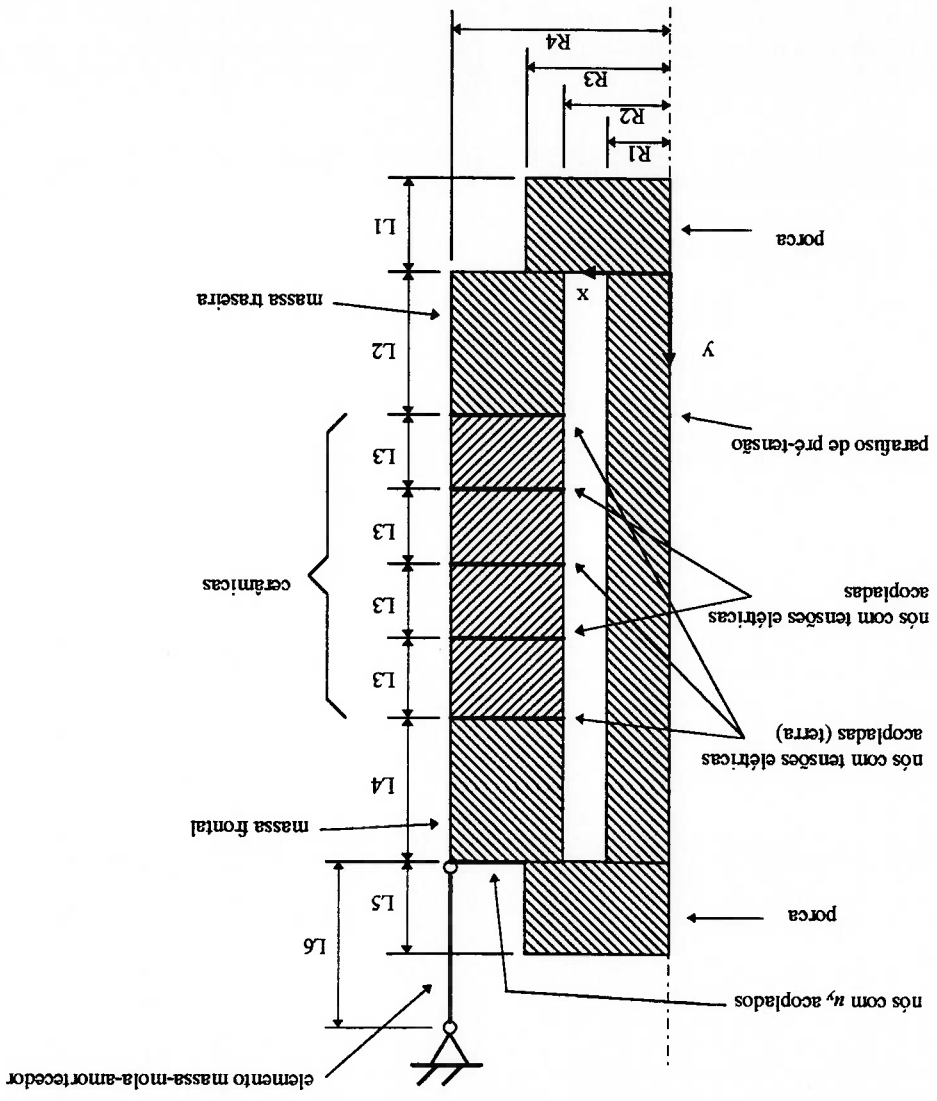
negativa cujo módulo equivale a uma impedância acústica muito pequena:

- $r = Z_R$  ( $Z_R$  deve ser positiva ou nula).
- Se  $Z_I < 0$ :  $m = 0$  e  $c = \omega(-Z_I - Z_0)$
- Se  $Z_I = 0$ :  $m = 0$  e  $c = \omega(-Z_0)$
- Se  $Z_I > 0$ :  $m = (2Z_I)/\omega$  e  $c = \omega(-Z_0)$

A constante  $Z_0$  serve para proporcionar uma rigidez mínima.

A seção do modelo do transdutor simétrico pode ser vista na fig. 4.2.1. A malha representada por elementos estruturais axissimétricos de quatro nós. As cerâmicas são representadas por elementos piezoeletricos axissimétricos de quatro nós. Um elemento massa-mola-amortecedor é configurado de modo a simular uma impedância acustica

Fig. 4.2.1 Metade da seção do transdutor simétrico



4.2 Modelo de transdutor simétrico

arbitrária (seção 4.1.2). As cerâmicas são polarizadas na direção  $y$ . O diâmetro externo do transdutor no modelo é constante.

O acoplamento dos nós em  $n_y$ , na parte superior da fig. 4.2.1, é para se distribuir melhor a tensão provocada pelo elemento massa-mola-amortecedor.

Utiliza-se uma malha (de elementos finitos) de densidade constante, pois a distribuição de tensões varia para cada frequência.

### 4.3 Modelo de conjunto adaptador-tubo axisssimétrico

Para a familiarização com o problema foi feito um modelo de um conjunto

adaptador-tubo axisssimétrico pelo MEF. A seção do conjunto pode ser vista na

fig. 4.3.1.

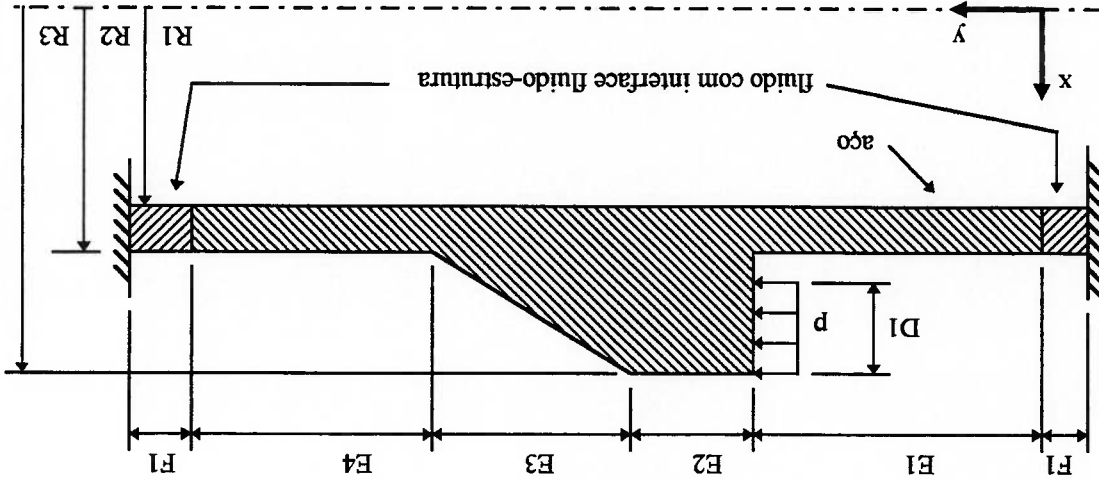


Fig. 4.3.1 Seção superior do conjunto adaptador-tubo axisssimétrico

Para o fluido, utiliza-se um elemento fluido axisssimétrico com quatro nós, com

interface fluido-estrutura, e para o aço, um elemento estrutural axisssimétrico com quatro



nós. A malha pode ser vista no anexo B, onde pode-se observar elementos triangulares. Estes elementos são os mesmos elementos de quatro nós, mas com dois nós coincidentes. As camadas de fluido são configuradas de modo a simular um tubo infinito, com interface fluido-estrutura (seção 4.1.1.2). A interface fluido-estrutura é ativada nos nós em contato com o aço e nos nós engastados (fig. 4.3.1).

Foram feitas análises harmônicas com esse modelo (implementado no programa-roteiro `propag9.mac`, no apêndice B), com uma pressão  $p$  de 1 Pa simulando um transdutor axissimétrico, para vários valores de E2 e E3. Os valores de F1, E1 e E4 foram variados no início, para se verificar a não-interferência nos resultados; após esta verificação, foram fixados em F1=3 mm, E1=100 mm e E4=100 mm. Foram fixados também D1=25 mm, R1=50 mm, R2=57 mm e R3=87 mm.

Para se checar a condição de transmissão total de ondas acústicas nas interfaces fluido-aço, necessitaria para que o tubo seja considerado infinito, tomaram-se os módulos das tensões e dos deslocamentos em  $y$  ao longo da linha média do tubo. Na transmissão total, esses valores são aproximadamente constantes, mas não nulos, nas regiões próximas aos elementos fluidos. A região de módulos constantes precisa ter, nesse caso, comprimento de pelo menos alguns comprimentos de onda. Após esta verificação, o comprimento pode ser diminuído, com a condição de que o comportamento do modelo não se modifique, para economia do tempo de processamento. Qualquer oscilação na curva de módulos, perto das extremidades, indica reflexões existentes. As tensões em  $x$ ,  $z$  e  $xy$  precisam ser muito pequenas nas regiões próximas aos elementos fluidos, o que foi observado.

A pressão aplicada vê uma impedância acústica diferente para cada valor de E3. A potência média que é transmitida pela área de aplicação da pressão e pelas interfaces fluido-ago na frente e na traseira pode ser calculada por:

$$P = \int_1^s \left[ \int_0^T T_{zz}(t) u_z(t) dt \right] dS = \frac{1}{2} \int_1^s \left[ T_{zz} \cdot u_z^* \right] dS = \frac{1}{2} \int_1^s \left[ T_{zzR} u_{zR} + T_{zzI} u_{zI} \right] dS \quad (4.3.1)$$

onde  $T_{zz} = T_{zzR} + jT_{zzI}$  e  $u_z = u_{zR} + ju_{zI}$ .

As potências na frente e na traseira puderam ser facilmente calculadas, pois as tensões e deslocamentos são aproximadamente constantes nas seções perpendiculares ao eixo do tubo, perto das extremidades. Já na área onde a pressão é aplicada, isso não ocorre, e a força aplicada em cada nó nessa área é obtida pelo valor da pressão multiplicado pela área anular delimitada pelos pontos médios dos elementos adjacentes a esse nó. A tabela 4.3.1 mostra a parcela de potência de potência que vai para a frente, em porcentagem da potência de entrada, variando-se E3 e mantendo-se fixo E2=20 mm.

Tabela 4.3.1 Parcela da potência que vai para a frente em função do comprimento E3

E3 (mm)	Potência que vai para a frente (%)
50	50
100	53
200	64
300	81
400	93
500	90
600	83
700	80
800	82
900	88
1000	90

Para E3=400 mm, a potência aplicada é a menor, e a porcentagem de potência que vai para a frente é máxima, cerca de 93%. Após este pico, esta porcentagem começa a decair, começa a aumentar novamente, e assim por diante, numa oscilação com amplitude decrescente à medida que E3 aumenta; a porcentagem, para grandes valores de E3, é em torno de 86%. Percebe-se que para E3 pequeno as potências que vão para a frente e para a traseira são bem próximas. As porcentagens de potência que vão para a frente e para a traseira, somadas, resultam na potência aplicada pela pressão p, o que era esperado pois não são consideradas perdas no aço.

Embora este modelo não tenha sido comparado com um protótipo experimental, os resultados mostram o interessante fato de que a potência pode ser direcionada, dependendo do formato do adaptador. Este adaptador apresenta uma frente com redução gradual da área transversal, o que leva à redução gradual da impedância acústica. Essa redução gradual é desfavorável à reflexão de ondas acústicas. Na traseira do adaptador a situação é bem diferente, pois a redução de área é abrupta, o que provoca forte reflexão. Quanto maior o comprimento do adaptador, mais suave o decaimento da sua área transversal, o que representa uma possível explicação para os resultados obtidos.

#### 4.4 Modelo de conjunto adaptador-tubo não-axissimétrico

Foram feitos vários modelos de transdutores com massas frontais de diferentes formatos e condições de contorno. Percebeu-se que quando se foge do formato cilíndrico de diâmetro constante, ou quando o transdutor é conectado a um meio de alta impedância, os resultados em geral tornam-se muito complexos, sem uma relação simples entre um caso e outro. Foi decidida a construção de um protótipo de um adaptador não-axissimétrico e um respectivo modelo MEF tridimensional, para verificação experimental. A partir do formato básico indicado pelo modelo do adaptador axissimétrico, o formato do adaptador foi escolhido de modo a facilitar a construção do protótipo e a modelagem pelo MEF.

O modelo tridimensional do adaptador foi feito separado do transdutor. Desse modo, na busca pela frequência de ressonância desejada, através da variação das medidas do transdutor, a análise harmônica não tem que incluir toda a complexidade do adaptador. Com o cálculo da impedância equivalente do conjunto adaptador-tubo, esta pode ser aplicada em um modelo MEF ou MMC. O formato do adaptador pode ser visto nas fig. 5.2.1.1a e 5.2.1.1b. Embora o protótipo do adaptador tenha sido feito em duas metades, o modelo considera um adaptador em peça única, totalmente integrado ao tubo. Alguns detalhes da malha podem ser vistos nas fig. 4.4.1a, 4.4.1b e 4.4.1c. Aproveitando a simetria lateral, o modelo MEF contém somente metade do conjunto.

Fig. 4.4.1b Detalhe da malha MEF do conjunto adaptador-tubo não-axissimétrico

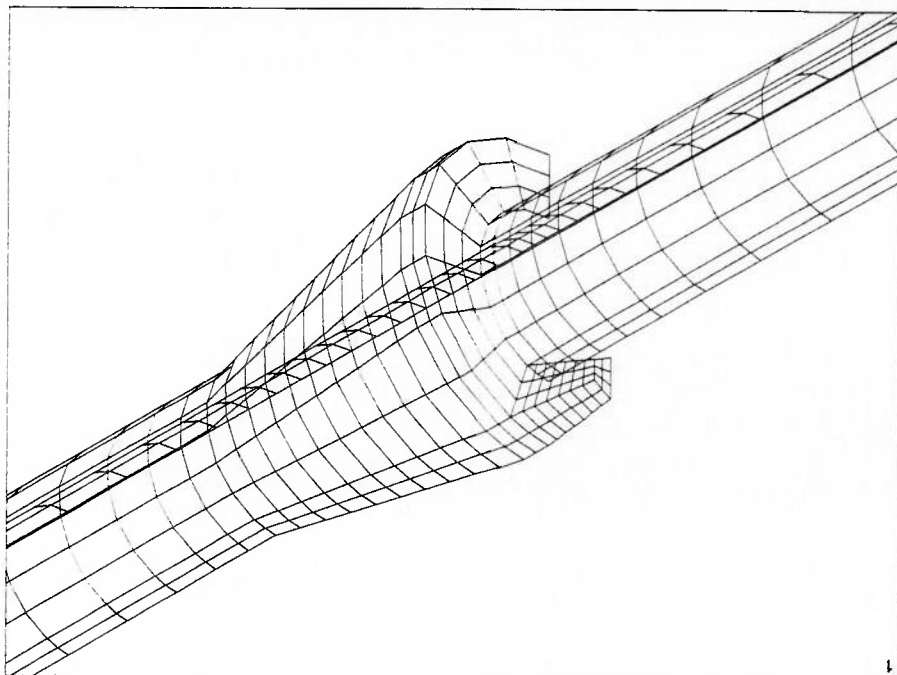


Fig. 4.4.1a Detalhe da malha MEF do conjunto adaptador-tubo não-axissimétrico

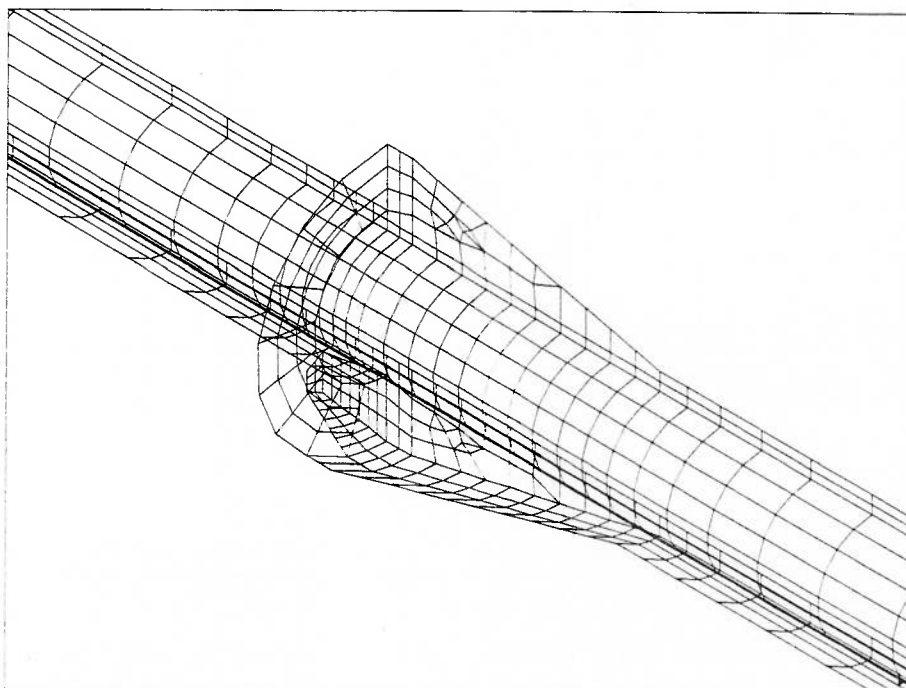


Fig. 4.4.2. Seção superior do conjunto adaptador-tubo não-axissimétrico

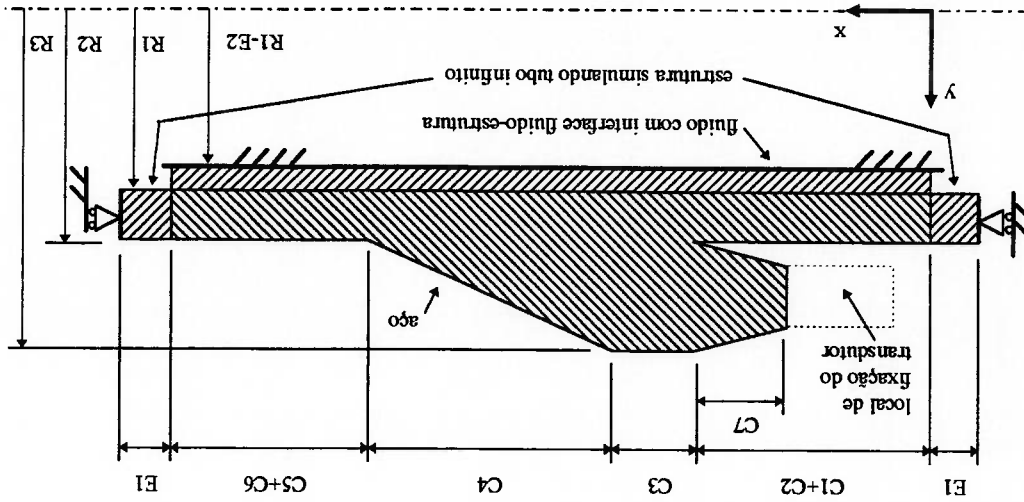
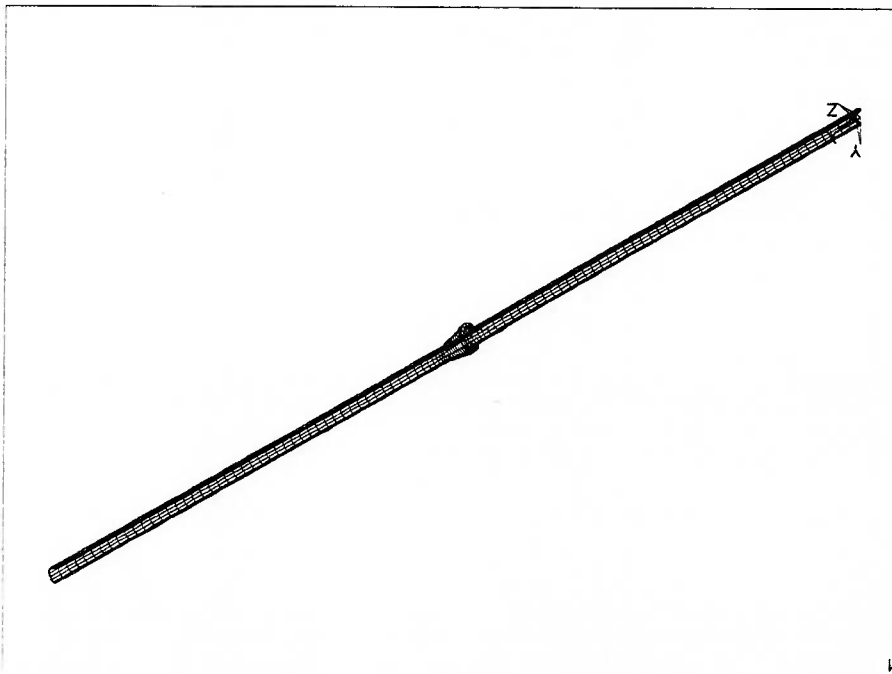


Fig. 4.4.1c Malha MEF do conjunto adaptador-tubo não-axissimétrico, na simulação de tubo infinito



A seção do conjunto pode ser vista na fig. 4.4.2. O tubo é modelado de duas formas distintas: como um tubo infinito e como um tubo finito. O aço é representado por elementos estruturais com oito nós. Na malha da fig. 4.4.1a podem ser vistos elementos com faces triangulares; nestes elementos, duas arestas são coincidentes. Pelo critério de Nyquist, os elementos poderiam ser bem maiores, porém as concentrações de tensões e as variações de área pediram elementos menores. Os elementos não puderam ser maiores também para que se mantivesse o formato cilíndrico do tubo. Elementos estruturais nas extremidades simulam absorção total (seção 4.1.1.1), no modelo de tubo infinito. Para que esta absorção total funcionasse, foi preciso colocar uma camada de fluido com interface fluido-estrutura com perdas, na superfície interna do tubo, ao contrário do modelo do adaptador axissimétrico. Utilizaram-se para isso elementos fluidos de oito nós, com interface fluido-estrutura. O fluido foi configurado com as características da água. Nos nós nas superfícies em contato com o tubo e nos nós engastados foi ativada a interface fluido-estrutura. Nos nós engastados foi configurada absorção total. Esta absorção no fluido só funciona totalmente para ondas em fase; se funcionasse perfeitamente, essa camada se comportaria como um volume de água infinito. Mas no caso do modelo, a absorção de ondas é menor; isto é aceitável pois o objetivo não era simular um volume de água infinito, mas sim simular uma perda pequena ao longo do tubo, para amortecer as ondas de flexão e de cisalhamento. Essa perda poderia também ser modelada por perdas no aço. Se a camada fosse colocada na superfície externa do tubo os resultados seriam semelhantes, mas a posição da camada na parte interna facilitou muito a implementação do modelo. Com um comprimento de tubo de no mínimo 3 m para frente e para trás, as ondas transversais sofrem redução de amplitude progressiva, a partir do adaptador, até quase desaparecer nas extremidades. Para a

verificação do funcionamento da simulação de tubo infinito, basta observar se o módulo da tensão, ou do deslocamento, na direção longitudinal é constante perto das extremidades. Este trecho de módulo constante precisa ter comprimento de alguns comprimentos de onda. Após a confirmação, pode-se encurtar o modelo a fim de economizar tempo de processamento, verificando sempre se o resultado se mantém. Numa situação real, com o transdutor no fundo de um poço de extração de petróleo, o tubo estaria envolvido por lama, pelo menos na região próxima ao transdutor. Por isto é interessante a consideração de uma camada de fluido ao redor do tubo.

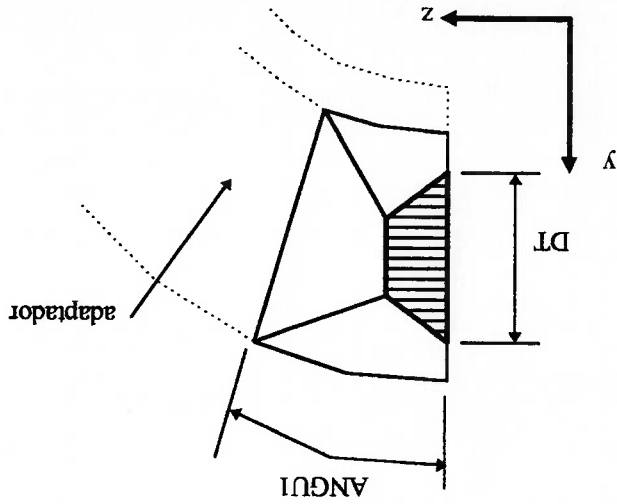


Fig. 4.4.3 Pré-adaptador destacado do adaptador (fora de escala)

O pré-adaptador, ou a massa frontal do transdutor, pode ser visto nas fig. 4.4.1a, 4.4.1b e 4.4.3. É o elemento que conecta o transdutor ao adaptador. A área destacada na fig. 4.4.3 é a área de contato com o transdutor. Esta área no protótipo (fig. 5.2.1.4) é circular, mas foi aproximada no modelo por um hexágono regular de área equivalente, incluindo-se a área da seção do parafuso de pré-tensão. Do mesmo modo, a área de contato entre o pré-adaptador e o adaptador foi aproximada por um setor de anel de



mesma área que a do protótipo, considerando-se também as áreas das seções dos parafusos de fixação. O comprimento C7 é o mesmo do protótipo.

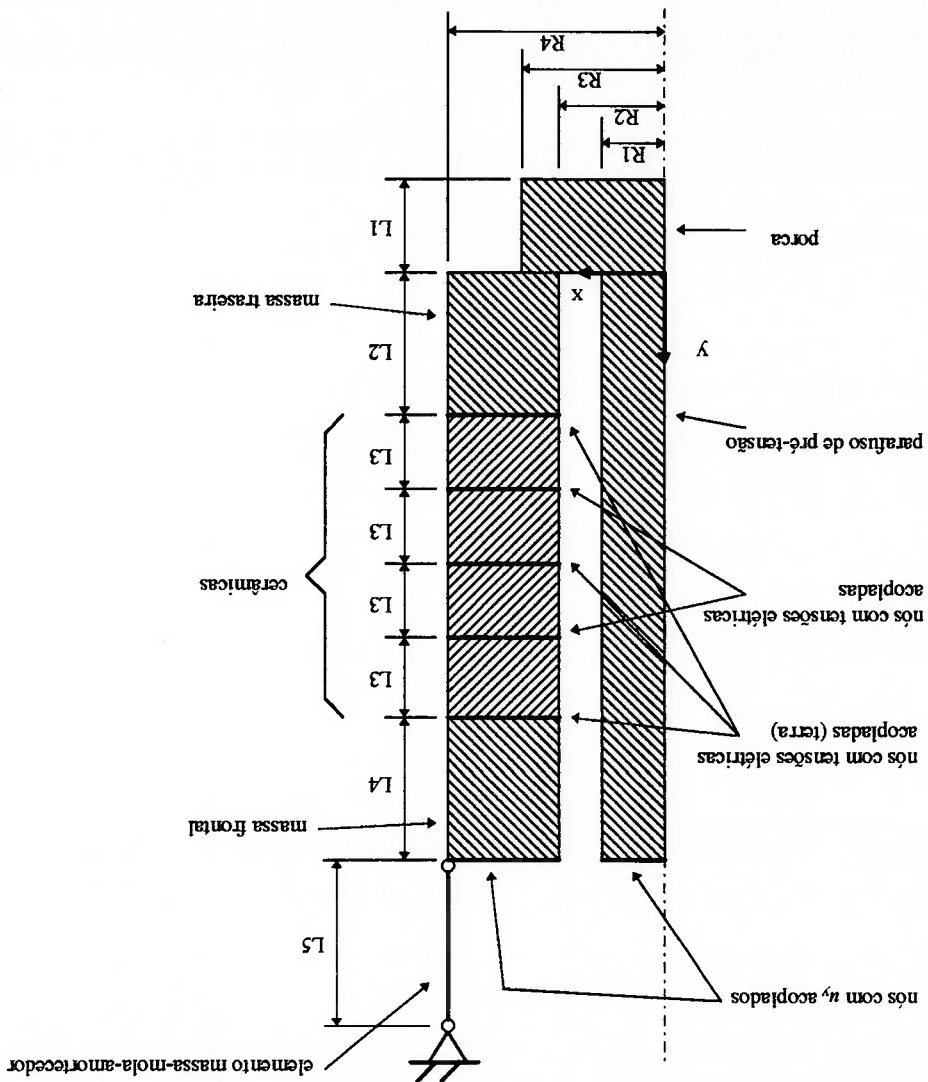
Na análise harmônica, é aplicada uma pressão na área em destaque na fig. 4.4.3.

Os deslocamentos na direção x dos nós nesta área são acoplados. Com isto, obtêm-se compatibilidade com o modelo unidimensional MMC, onde os pontos em cada seção transversal movem-se em fase. Esta aproximação não poderia ser utilizada se o comprimento de onda não fosse muito maior que o diâmetro da área ou se a seção estivesse mais próxima da zona de concentração de tensão na junção entre o adaptador e o tubo, a que apresenta um ângulo de junção de  $90^\circ$ . No protótipo, esta área deve sofrer tensões não-uniformes e momentos fletores, com a área deixando de ser plana. O erro desta aproximação pode ser analisado através de um modelo unificado do conjunto transdutor-adaptador-tubo.

Os deslocamentos da área que representa a interface entre o adaptador e o transdutor, obtidos pela análise harmônica, podem ser convertidos em velocidade, que por sua vez, com o valor da pressão aplicada, permite o cálculo da impedância vista pelo transdutor.

A seção do modelo do transdutor não-simétrico pode ser vista na fig. 4.5.1. A malha pode ser vista no anexo C. O parafuso, a porca e as massas frontal e traseira são representados por elementos estruturais axissimétricos de quatro nós. As cerâmicas são representadas por elementos piezoeletricos axissimétricos de quatro nós. Um elemento de massa-mola-amortecedor é configurado de modo a simular uma impedância arbitrária

Fig. 4.5.1 Metade da seção do transdutor não-simétrico



#### 4.5 Modelo de transdutor não-simétrico

(seção 4.1.2). As cerâmicas são polarizadas na direção  $y$ . Este modelo foi criado para receber a impedância calculada pelo modelo do conjunto adaptador-tubo não-axissimétrico.

O acoplamento dos nós em  $u_y$ , na parte superior da fig. 4.5.1, serve para distribuir as tensões causadas pelo elemento massa-mola-amortecedor. Esse artifício também aproxima o modelo MEF do modelo MMC.

## 5 RESULTADOS TEÓRICOS E VERIFICAÇÕES EXPERIMENTAIS

Foram construídos dois protótipos de transdutores piezoeletricos simétricos, um com quatro e outro com seis cerâmicas. Utilizaram-se dois casos, com número diferente de cerâmicas, para se verificar a repetibilidade dos resultados. Modelos MEF e MMC destes transdutores foram feitos e seus resultados comparados com os resultados experimentais. Estes transdutores são chamados de simétricos pois as massas laterais têm comprimentos iguais.

Construiu-se também o protótipo de um transdutor acoplado a uma tubulação por meio de um adaptador. O conjunto formado pelo adaptador e pelo tubo foi modelado pelo MEF, enquanto o transdutor foi modelado pelo MEF e também pelo MMC. O modelo do conjunto adaptador-tubo gerou uma impedância acústica equivalente, para cada frequência de interesse. Esta impedância, representando o conjunto adaptador-tubo, foi aplicada nos modelos do transdutor. Compararam-se então os resultados experimentais e teóricos.

## 5.1 Transdutor sanduíche simétrico

### 5.1.1 Protótipos: transdutores simétricos

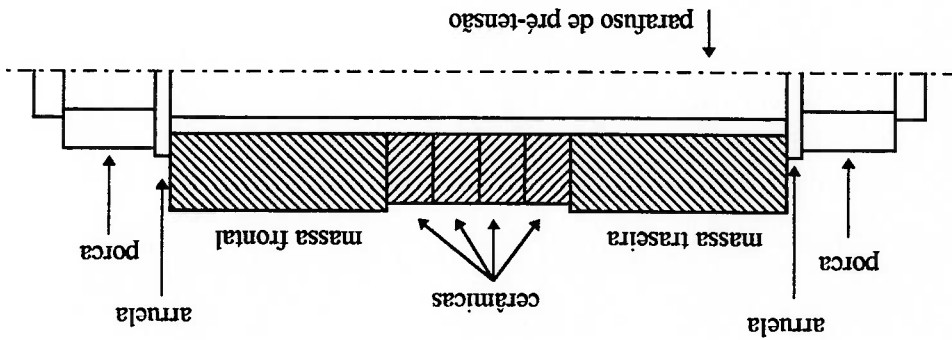


Fig. 5.1.1.1 Seção superior do transdutor simétrico (fora de escala)

Foram construídos dois transdutores sanduíche simétricos, um com quatro e outro com seis cerâmicas de PZT-8. A seção do transdutor com quatro cerâmicas pode ser vista na fig. 5.1.1.1. O de quatro cerâmicas foi feito com as seguintes medidas, em

milímetros:

7,5	diâmetro interno das massas frontal e traseira (material: aço)
27,5	diâmetro externo das massas frontal e traseira
70	comprimento das massas frontal e traseira
7,7	diâmetro interno das cerâmicas (material: PZT-8)
27,3	diâmetro externo das cerâmicas
9,95	espessura das cerâmicas
7	diâmetro do parafuso de pré-tensão (material: aço)
210	comprimento do parafuso de pré-tensão
22	comprimento das porcas (material: aço)
13	diâmetro médio das porcas
0,1	espessura dos eletrodos (material: cobre)

Tabela 5.1.1.1 Dimensões do transdutor simétrico de quatro cerâmicas

No transdutor de seis cerâmicas, a única medida diferente é o comprimento das massas, 60 mm. Como resultado, os comprimentos totais dos dois transdutores são praticamente iguais.

Não há nenhuma substância entre as massas, os eletrodos e as cerâmicas. Os eletrodos são fabricados por um processo de corrosão química, no qual uma máscara, no formato do eletrodo, é produzida sobre uma chapa de metal, com o auxílio de um fotolito. O cobre sob a máscara sobrevive a um banho de ácido, formando o eletrodo. Este processo permite um bom acabamento. O aperto do parafuso de pré-tensão é feito com chaves manuais, colocando-se o transdutor verticalmente, a porca inferior presa numa morsa. Para evitar que a massa superior gire com a porca superior, utilizam-se alicates de pressão ou grampos tipo C, prendendo a massa superior transversalmente, e segurando-os com a mão. Realizam-se várias montagens, com e sem óleo lubrificante nas rosca do parafuso de pré-tensão, e com e sem arruelas entre as porcas e as massas. O efeito foi a variação da força necessária para o aperto. Foram utilizados parafusos de pré-tensão de 200 a 220 mm de comprimento; esta variação foi desprezada nos cálculos teóricos, e adotada a média. Os parafusos são de aço 4340, de alta resistência, para suportar uma pressão estática de cerca de 400 MPa, na seção transversal. As tensões nos filetes das rosca podem ser ainda maiores. Alguns parafusos quebraram no processo de aperto, na região das rosca. Algumas cerâmicas também quebraram, com as fendas de modo geral partindo do centro em direção à periferia. Estas quebras podem ter sido provocadas pelo método de aperto manual utilizado, que não evita momentos fletores no transdutor, ou por excessiva pré-tensão, a qual não foi monitorada. O critério para a limitação do aperto foi a estabilização da resposta em frequência do transdutor.

As medições de resposta em frequência foram efetuadas com a porca frontal do

transdutor, e uma porção da massa frontal, em torno de 30 mm, imersas num tanque

retangular com aproximadamente 20 cm de profundidade, 50 cm de largura e 100 cm de

comprimento, ou 100 litros de água. O transdutor é colocado inclinado em relação às

paredes do tanque, de acrílico sem revestimento, para que sejam reduzidas as reflexões

diretas. O transdutor foi preso por uma mão, o que produziu variações na largura de

banda, conforme a localização dos pontos de contato entre a mão e o transdutor, e o tipo

de contato, direto ou com algum material intermediário; por outro lado, não houve

variação significativa dos valores de  $f_a$  e  $f_r$ , com a mão segurando o transdutor pelo meio,

na região das cerâmicas. Em comparação com o transdutor no ar, o transdutor na água

apresentou uma largura de banda ligeiramente maior, variando de acordo com a direção

do transdutor em relação ao tanque, mas sem diferenças significativas em  $f_a$  e  $f_r$ .

O aperto no parafuso de pré-tensão influíu na curva de impedância, de acordo

com o seguinte comportamento: dentro dos limites de aperto atingidos nos

experimentos, quanto maior o aperto, maiores as frequências  $f_r$  e  $f_a$  obtidas.

Após a montagem de um transdutor, as curvas de impedância mudavam ao longo

do tempo, sendo as variações perceptíveis depois de alguns minutos. No dia seguinte

após a montagem, as frequências de ressonância e anti-ressonância apresentavam um

acréscimo de aproximadamente 200 Hz, com  $f_r$  e  $f_a$  em torno de 11 kHz. Como exemplo,

um transdutor de seis cerâmicas teve um acréscimo de 240 Hz na  $f_r$  e de 220 Hz na  $f_a$ ;

outro transdutor, de quatro cerâmicas, teve um acréscimo de 160 Hz na  $f_r$  e de 200 Hz

na  $f_a$ .

Outro efeito de longo prazo pôde ser percebido logo após cada aperto do

parafuso de pré-tensão, sendo o aperto realizado com os terminais elétricos em curto:

deixando-se os terminais elétricos do transdutor em aberto por alguns segundos, e em seguida colocando-se novamente os terminais em curto, no momento do contato aparecem faíscas e um som de impacto, sinal de vibração das cerâmicas.

Estes fatos demonstram algumas das características do comportamento de longo prazo das cerâmicas utilizadas.

No apêndice D há a foto de um dos transdutores simétricos, onde pode-se perceber as cerâmicas envolvidas por plástico preto termo-retrátil, para maior proteção e facilidade de manuseio do transdutor.

### **5.1.2 Modelos MMC dos transdutores simétricos**

O procedimento descrito no capítulo 3 foi implementado no programa-roteiro tem (apêndice C), que realiza os cálculos para um transdutor simétrico ou não-simétrico com número par de cerâmicas, igual ou superior a dois, sendo carregado na extremidade frontal (à direita, no programa) por uma impedância de um meio fluido infinito vista por um pistão plano circundado por um refletor rígido plano infinito (seção 2.1.5), para simular a grosso modo o tanque de água dos experimentos. O meio fluido é água, e o diâmetro do pistão é igual ao diâmetro externo da massa frontal. O meio à esquerda tem impedância nula. Utilizam-se as dimensões dos transdutores-protótipo. As partes visíveis do parafuso foram desconsideradas, definindo-se um comprimento nulo para elas. O parafuso, as porcas e as massas frontal e traseira são configurados como aço comum, e as cerâmicas como PZT-8, as constantes utilizadas para estes materiais estão no apêndice A.



Os resultados do modelo do transdutor simétrico com quatro cerâmicas mostram que as tensões nas direções transversais e as tensões de cisalhamento nos planos longitudinais são muito pequenas em relação à tensão na direção longitudinal, na maior parte do transdutor. As exceções são as interfaces entre as cerâmicas e as massas de metal, por causa das diferenças de características vibracionais entre um material e outro; e as extremidades, pela variação brusca da área de seção entre as massas e as porcas, e

neste texto, muito semelhante ao th2.mac.

modelo de seis cerâmicas foi gerado por um outro programa-roteiro, não apresentado roteiro th2.mac (apêndice B) foi utilizado para gerar o modelo de quatro cerâmicas. O água, e o diâmetro do pistão é igual ao diâmetro externo da massa frontal. O programa-refletor rígido plano infinito (seção 2.1.5), como no modelo MMC. O meio fluido é pela impedância de um meio fluido infinito vista por um pistão plano circundado por um frontal e traseira e nas cerâmicas nos modelos MEF. A extremidade frontal é carregada são utilizados os diâmetros externo e interno da massa frontal dos protótipos nas massas diâmetros internos e externos das massas frontal e traseira e das cerâmicas são iguais, modelo MMC, com a seguinte diferença: como esses modelos MEF consideram que os Os modelos são os descritos na seção 4.2, com materiais e medidas como no

### 5.1.3 Modelos MEF dos transdutores simétricos

A consideração dos eletrodos reduziu a  $f_r$  e a  $f_a$  em aprox. 0,4%. A consideração dos parafusos aumentou a  $f_r$  em aprox. 2%, e a  $f_a$  em aprox. 1%.  
bastando simples mudanças de constantes.  
O mesmo modelo serviu para o transdutor de quatro e para o de seis cerâmicas,

pelo fato de que as tensões longitudinais são maiores no centro e atingem o mínimo nas extremidades, na ressonância. O pior caso ocorre nas interfaces entre as cerâmicas e as massas, em regiões com espessura equivalente à de duas cerâmicas, centradas nas interfaces. Nestas regiões há picos de tensão transversal de cerca de 5 a 20 % do valor da tensão longitudinal. Esta porcentagem parece ser maior na frequência de ressonância, em relação à anti-ressonância. Com relação a deslocamentos, na região das cerâmicas ocorrem deslocamentos transversais maiores que nas massas de aço.

#### **5.1.4 Metodologia e resultados dos transdutores simétricos**

Os materiais foram definidos previamente. Para os diâmetros das massas foram escolhidos diâmetros semelhantes aos diâmetros das cerâmicas disponíveis. Definiram-se para o diâmetro do parafuso de pré-tensão um valor ligeiramente inferior ao diâmetro interno das cerâmicas, sendo a diferença suficiente para permitir uma camada de isolante. Nos modelos MEF e MMC do transdutor de quatro cerâmicas, o comprimento das massas foi variado até que se obtivesse uma frequência de ressonância em torno de 10 kHz. O protótipo de quatro cerâmicas foi então construído aproximadamente com as dimensões calculadas pelo MEF e pelo MMC. O protótipo de seis cerâmicas foi construído de modo a ter aproximadamente o mesmo comprimento do de quatro, para que as frequências de ressonância dos dois transdutores resultassem próximas.

A montagem, o acoplamento com o meio externo e as características deste interferem nas curvas de impedância elétrica, o que pode ser observado na fig. 5.1.4.1. Na figura, observam-se as diferenças nas frequências de ressonância e anti-ressonância, e na largura de banda, para três montagens diferentes do transdutor com quatro cerâmicas.

As fig. 5.1.4.2 e 5.1.4.3 mostram as comparações entre os resultados teóricos e experimentais do transdutor de quatro e do de seis cerâmicas, respectivamente. As frequências de ressonância e anti-ressonância do transdutor de seis cerâmicas resultaram menores nos transdutores-protótipo e nos modelos.

Fig. 5.1.4.1 Comparação entre as curvas experimentais do módulo da impedância elétrica de três montagens de transdutores sanduíche simétricos com quatro cerâmicas, com mesmos materiais e medidas, e com uma das extremidades em água

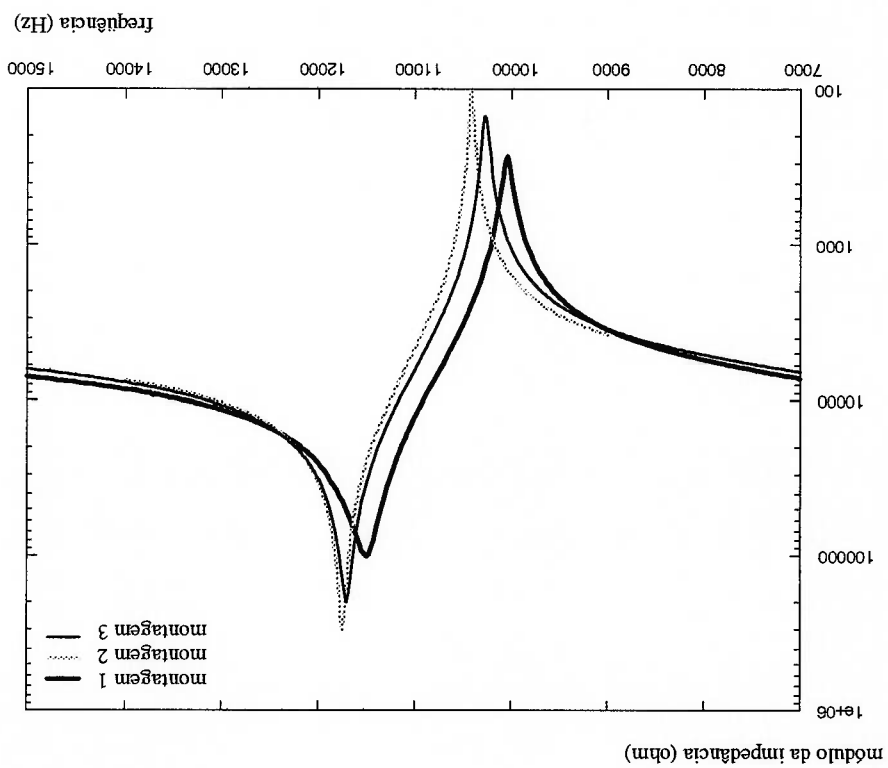


Fig. 5.1.4.2 Comparação entre as curvas de módulo e de fase da impedância elétrica de um transdutor simétrico com quatro cerâmicas e uma das extremidades em água, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC

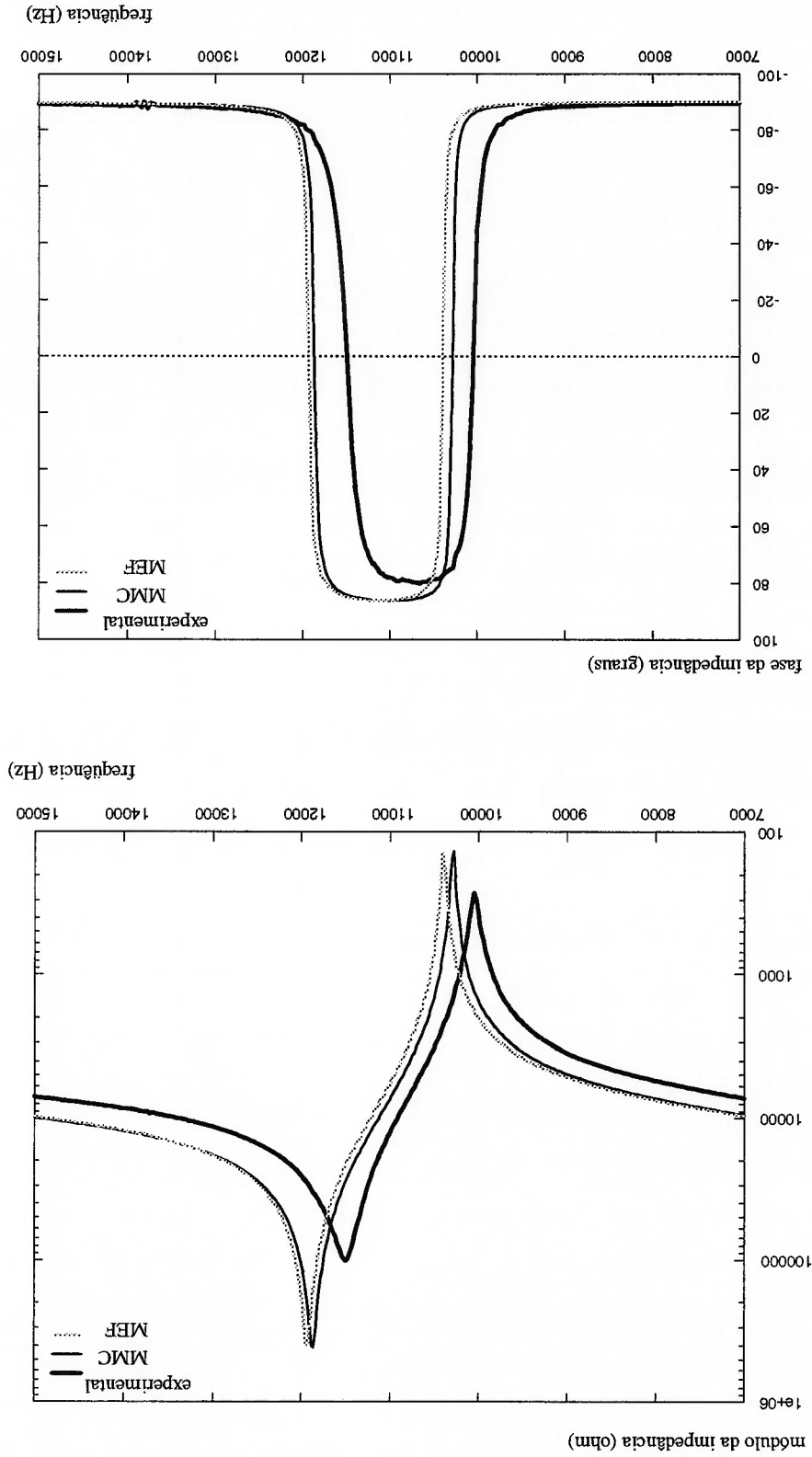
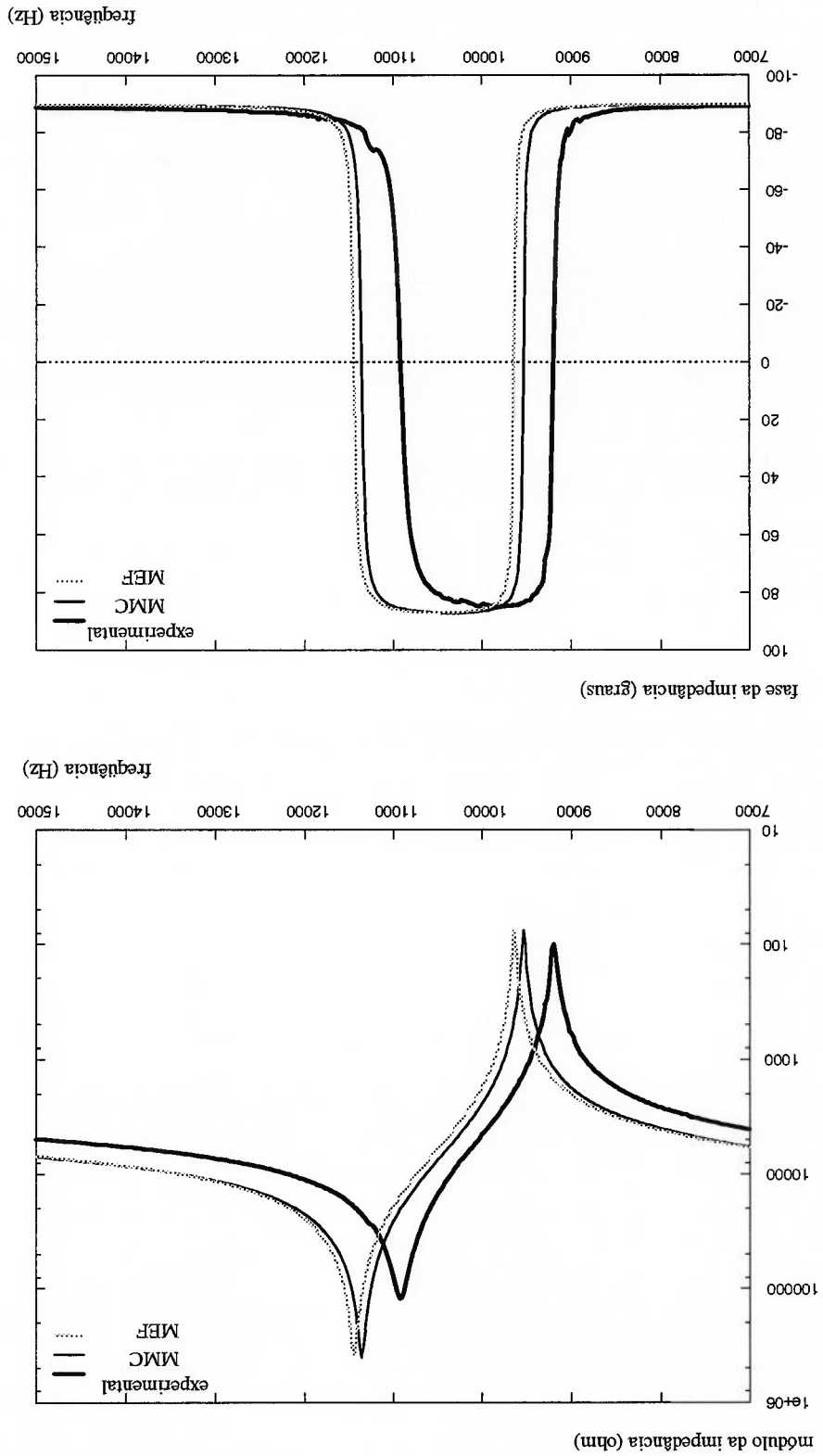


Fig. 5.1.4.3 Comparação entre as curvas de módulo e de fase da impedância elétrica de um transdutor simétrico com seis cerâmicas e uma das extremidades em água, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC



## 5.1.5 Discussão dos resultados para os transdutores simétricos

A fig. 5.1.4.1 mostra que o efeito da montagem pode ser significativo. Diferença na frequência de ressonância de até 3 %, e diferença no valor do módulo da impedância de até 9 dB não são desprezíveis.

Nas fig. 5.1.4.2 e 5.1.4.3, as diferenças de largura de banda entre as curvas teóricas e experimentais podem ser explicadas pelas perdas nos materiais, que não foram consideradas nos modelos. No caso dos transdutores simétricos considerados, as perdas nos materiais não podem ser desprezadas, por causa do acoplamento acústico desfavorável com o meio externo. Percebe-se que as frequências de ressonância nos modelos MMC resultaram menores em relação ao MEF. Isto já era esperado pois no modo de barra consideram-se somente as tensões na direção longitudinal, o que leva a uma rigidez longitudinal menor. Pode-se observar um erro constante no valor do módulo da impedância de cerca de 3 dB, tomando-se por exemplo a impedância nas frequências 7000 e 15000 Hz. Esse mesmo erro aparece nos resultados dos conjuntos transdutor-adaptador-tubo; provavelmente está ligado a imprecisões na modelagem do transdutor.

## 5.2 Transdutor acoplado a um conjunto adaptador-tubo

### 5.2.1 Protótipos: transdutor acoplado a conjuntos adaptador-tubo

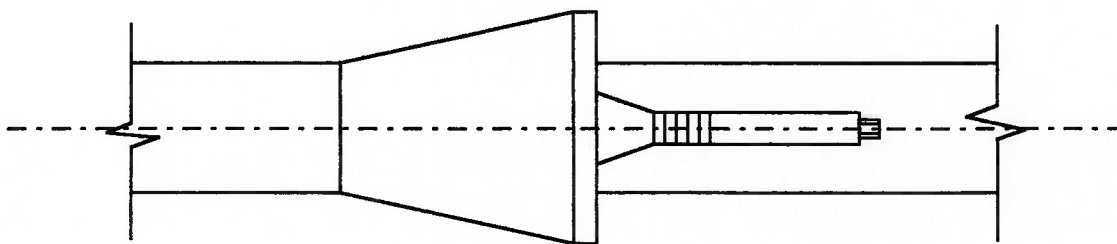


Fig. 5.2.1.1a Vista superior do conjunto transdutor-adaptador-tubo

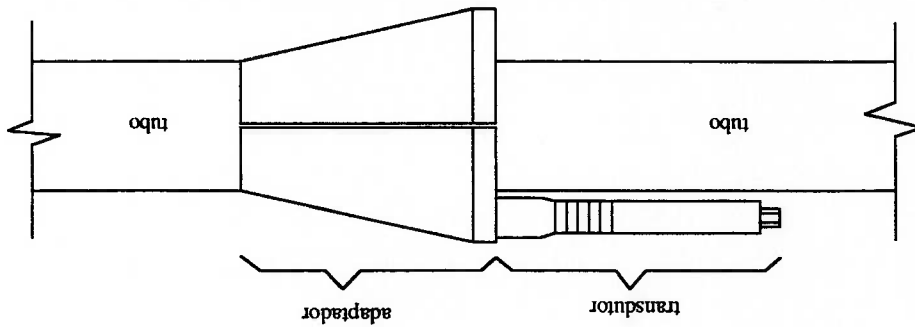
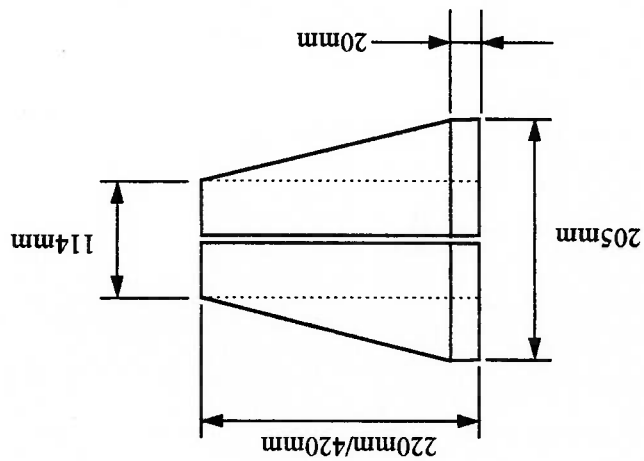


Fig. 5.2.1.1b Vista frontal do conjunto transdutor-adaptador-tubo

Um transdutor sanduíche foi acoplado a uma tubulação por um adaptador. A tubulação é formada por dois tubos de aço idênticos, unidos por rosqueamento com o auxílio de uma luva. O comprimento total da tubulação é de 18,8 m, e os tubos têm diâmetro externo, longe das extremidades, de 114 mm, e diâmetro interno de aprox. 100 mm. Nas extremidades os diâmetros dos tubos são maiores, mas nos modelos MEF os diâmetros do tubo são considerados constantes. Foram construídos dois adaptadores

O adaptador é feito em duas metades, para que fosse possível a colocação. Entre o adaptador e a tubulação coloca-se vaselina para facilitar a colocação e para melhorar o contato. A superfície externa do tubo é bem irregular. Fixam-se as duas metades do adaptador com parafusos, cujas cabeças são apoiadas em rebaixos nas laterais da parte inferior. As rosças são feitas diretamente na parte superior. Após a fixação, restam frestas de aprox. 2 mm entre as duas partes do adaptador, em contraste com o modelo MEF do adaptador. Mas o contato entre o adaptador e o tubo é considerado adequado, principalmente pelo aperto provido pelos parafusos de fixação. O adaptador é fixado em um dos tubos na posição mostrada na fig. 5.2.1.3. Os tubos são apoiados em cavaletes de madeira.

Fig. 5.2.1.2 Vista lateral com as dimensões dos adaptadores (fora de escala)

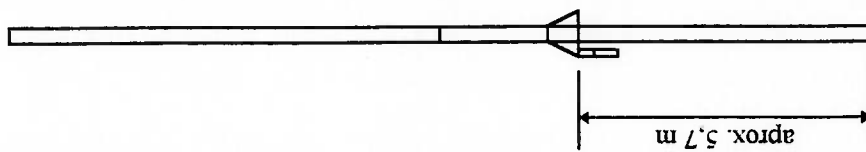


(fig. 5.2.1.2).

(fig. 5.2.1.1a e 5.2.1.1b), um com comprimento de 220 mm e outro com 420 mm



Fig. 5.2.1.3 Posição do conjunto transdutor-adaptador em relação ao conjunto de dois tubos



O transdutor tem as dimensões da fig. 5.2.1.4 (em milímetros).

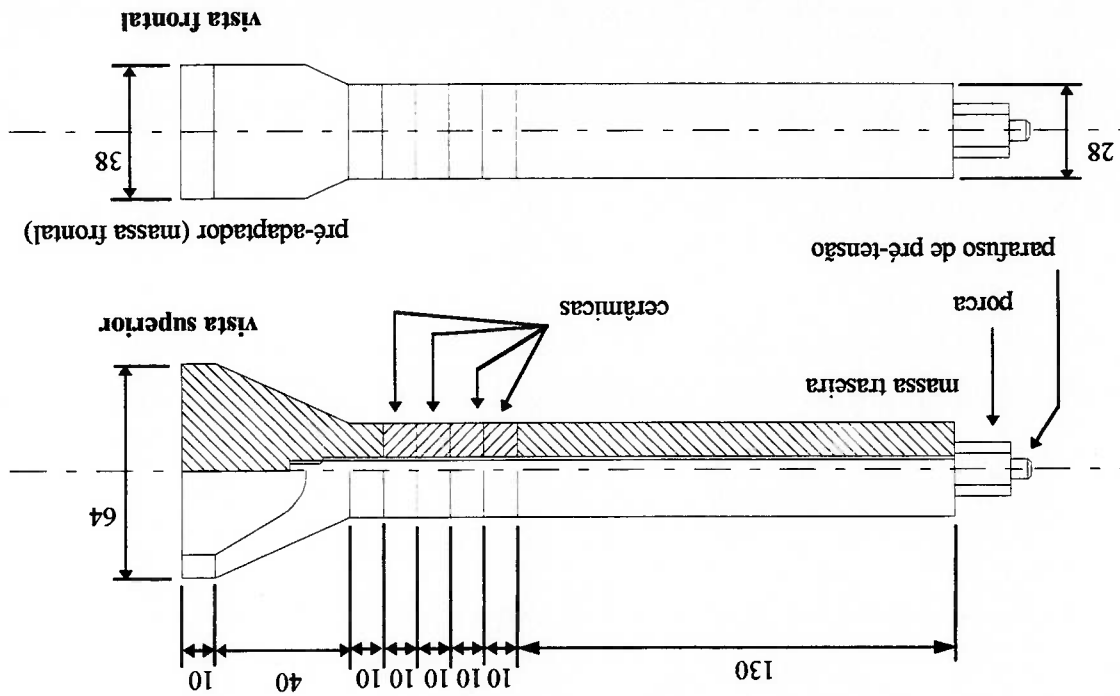


Fig. 5.2.1.4 Dimensões do transdutor não-simétrico

Outras dimensões do transdutor, em milímetros:

Tabela 5.2.1.1 Dimensões do transdutor não-simétrico

7	diâmetro do parafuso de pré-tensão
7,5	diâmetro interno das cerâmicas
27,5	diâmetro externo das cerâmicas
9,95	espessura das cerâmicas
13,3	diâmetro externo médio da porca
21,7	comprimento da porca
0,1	espessura dos eletrodos (material: cobre)

O parafuso de pré-tensão prende-se ao pré-adaptador por meio de uma rosca. A

rosca não começa da borda, mas sim a partir de certa profundidade, para melhor

distribuição da pré-tensão. O transdutor é parafusado no adaptador por meio de dois

parafusos laterais; apoiam-se as cabeças dos parafusos em rebaxos nas laterais mais

largas do pré-adaptador, e as roscas são feitas no adaptador. Colocam-se as superfícies

de apoio das cabeças dos parafusos a uma certa distância da superfície de contato com o

adaptador, novamente para melhor distribuição das tensões.

No apêndice E há duas fotos do conjunto transdutor-adaptador-tubo com o

adaptador de 220 mm. As cerâmicas podem ser vistas pois não foram cobertas.

## 5.2.2 Modelos MEF dos conjuntos adaptador-tubo

O modelo MEF é descrito na seção 4.4. Utiliza-se aço como material. No modelo

com tubo infinito, são utilizadas as medidas  $C1+C2=3,3$  m e  $C5+C6=3,3$  m (fig. 4.4.2).

No com tubo finito,  $C1+C2=12,95$  m e  $C5+C6=5,63$  m. Em ambos,  $C3=20$  mm,

$C7=50$  mm,  $R1=50$  mm,  $R2=57$  mm,  $R3=102,5$  mm,  $E1=7$  mm,  $E2=7$  mm,

$ANGU1=18^\circ$  e  $DT=30,2$  mm. Para o adaptador maior,  $C4=400$  mm, e para o menor,

C4=200 mm. Foi cometido um erro no modelo com tubo finito: os comprimentos dos tubos estão trocados, em relação à fig. 5.2.1.3. E como se o adaptador tivesse sido colocado orientado para o lado contrário. Portanto, os resultados do modelo MEF do tubo finito devem ser considerados não-confiáveis. Entretanto, podem pelo menos servir para a observação dos efeitos da ausência de absorção nas extremidades.

No modelo com tubo infinito, os deslocamentos na direção  $x$  dos nós nas superfícies extremas da camada de simulação de tubo infinito são fixos em zero, conforme a fig. 4.4.2. No modelo com tubo finito, esses deslocamentos são livres, desativando com isso a absorção nas pontas.

O programa-roteiro `propag19.mac` (apêndice B) foi utilizado para gerar os modelos com os dois tamanhos de adaptador, gerando as curvas de impedância das fig. 5.2.2.1 e 5.2.2.2.

Fig. 5.2.2.1 Curvas de módulo e de fase da impedância do conjunto adaptador-tubo com adaptador de 220 mm, obtidas pelo MEF, para os casos de tubo finito e infinito

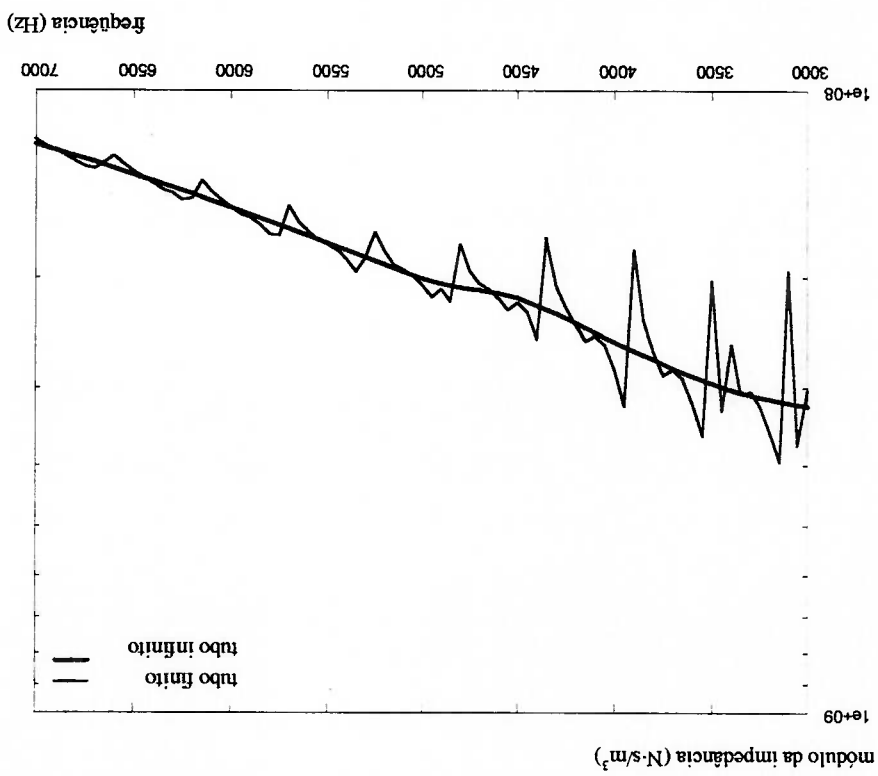
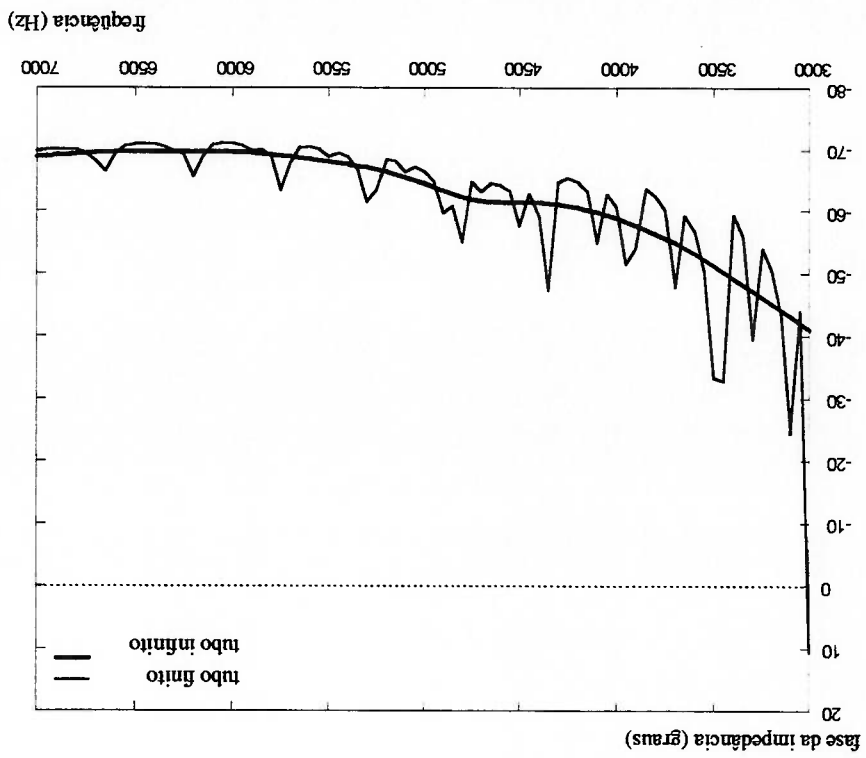
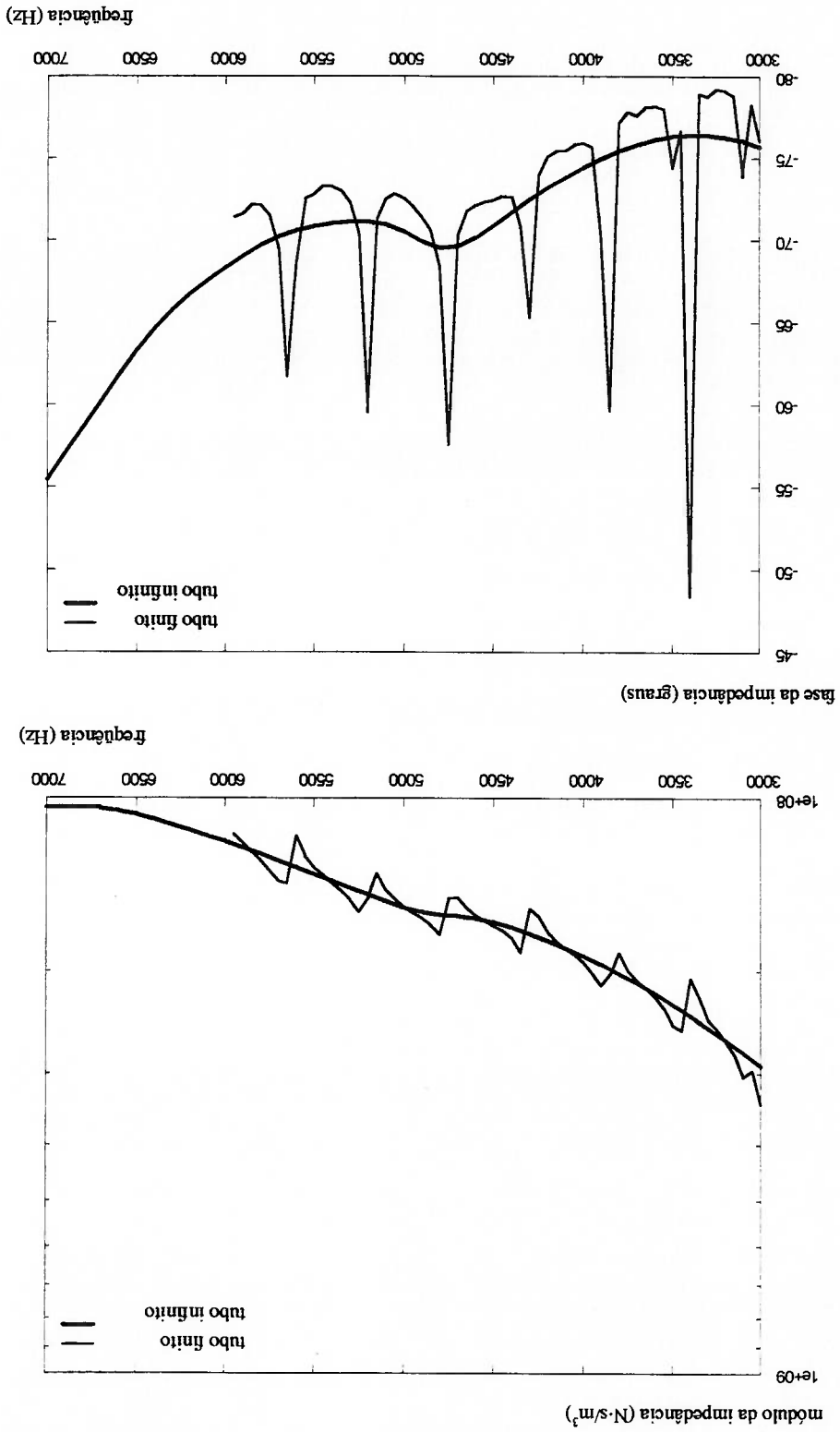


Fig. 5.2.2 Curvas de módulo e de fase da impedância do conjunto adaptador-tubo com adaptador de 420mm, obtidas pelo MEF, para os casos de tubo finito e infinito



### 5.2.3 Modelo MMC do transdutor não-simétrico

O procedimento descrito no capítulo 3 foi implementado no programa-roteiro te.m (apêndice C), que realiza os cálculos para um transdutor com número par de cerâmicas, igual ou superior a dois, sendo carregado na extremidade frontal (à direita) por uma impedância equivalente à de um meio fluido infinito agindo sobre um pistão plano circundado por um refletor rígido plano infinito. Para a simulação do transdutor não-simétrico, a impedância do fluido é substituída pela impedância do adaptador obtida na seção 5.2.2. A área para o cálculo da impedância é a área circular com diâmetro igual ao diâmetro externo da massa frontal. O meio à esquerda tem impedância nula. Como o modelo do adaptador inclui a parte cônica do pré-adaptador, a massa frontal é configurada com um comprimento de 10 mm (ver fig. 5.2.1.4), correspondente à parte cilíndrica do pré-adaptador. As partes visíveis do parafuso foram desconsideradas, assim como a porca direita. Utilizam-se as dimensões do transdutor-protótipo (fig. 5.2.1.4). O parafuso, as porcas e as massas frontal e traseira são configurados como aço comum, e as cerâmicas como PZT-8. As constantes dos materiais estão no anexo A.

### 5.2.4 Modelo MEF do transdutor não-simétrico

O modelo é descrito na seção 4.5. A massa frontal, como no caso do modelo MMC, foi configurada com um comprimento de 10 mm. A impedância acústica obtida na seção 5.2.2 é aplicada por um elemento massa-mola-amortecedor (fig. 4.5.1) no modelo do transdutor não-simétrico. A área para o cálculo da impedância é a área circular com diâmetro igual ao diâmetro externo da massa frontal. Os materiais e medidas são

configurados como no modelo MMC, mas são utilizados os diâmetros externo e interno da massa frontal dos protótipos nas massas frontal e traseira e nas cerâmicas no modelo MEF. O programa-roteiro th4.mac (apêndice B) foi utilizado para gerar o modelo.

### **5.2.5 Metodologia e resultados do transdutor acoplado a conjuntos adaptador-**

**tubo**

Os materiais foram definidos previamente. Os diâmetros do transdutor e do parafuso de pré-tensão foram escolhidos pelos mesmos critérios usados nos transdutores simétricos. O formato do adaptador foi inspirado no modelo do adaptador axisssimétrico, sendo que o diâmetro externo foi determinado pelo espaço necessário para a fixação do transdutor. O pré-adaptador tem um formato com variação gradual da área transversal, para se diminuir o impacto da diferença de área entre as cerâmicas e o adaptador. Além disso, também influenciaram no formato do pré-adaptador a necessidade de fixação por parafusos e o espaço disponível. Foram escolhidos valores razoáveis para as medidas do pré-adaptador, dentro das limitações impostas pelo formato.

A impedância do conjunto adaptador-tubo obtida pelo modelo MEF foi aplicada nos modelos MEF e MMC do transdutor não-simétrico (seção 4.5), e os comprimentos das massas frontal e traseira foram ajustados, por tentativa e erro, para que as cerâmicas ficassem na região de máxima tensão longitudinal, e a primeira frequência de ressonância resultasse em torno de 5 KHz.

As cerâmicas foram colocadas próximas do pré-adaptador, com 10 mm de massa frontal. Essa pequena massa frontal foi colocada porque a região próxima à interface entre as cerâmicas e a massa frontal é problemática, pois lá as tensões não são uniformes;

uma das hipóteses utilizadas na integração entre os submodelos do adaptador e do transdutor é a de que a interface entre os submodelos permanece aproximadamente plana.

A comparação entre os resultados teóricos e experimentais pode ser vista nas fig. 5.2.5.1 a 5.2.5.4.



Fig. 5.2.5.1 Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um transdutor com quatro cerâmicas, conectado através de um adaptador de 220 mm a um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um tubo infinito

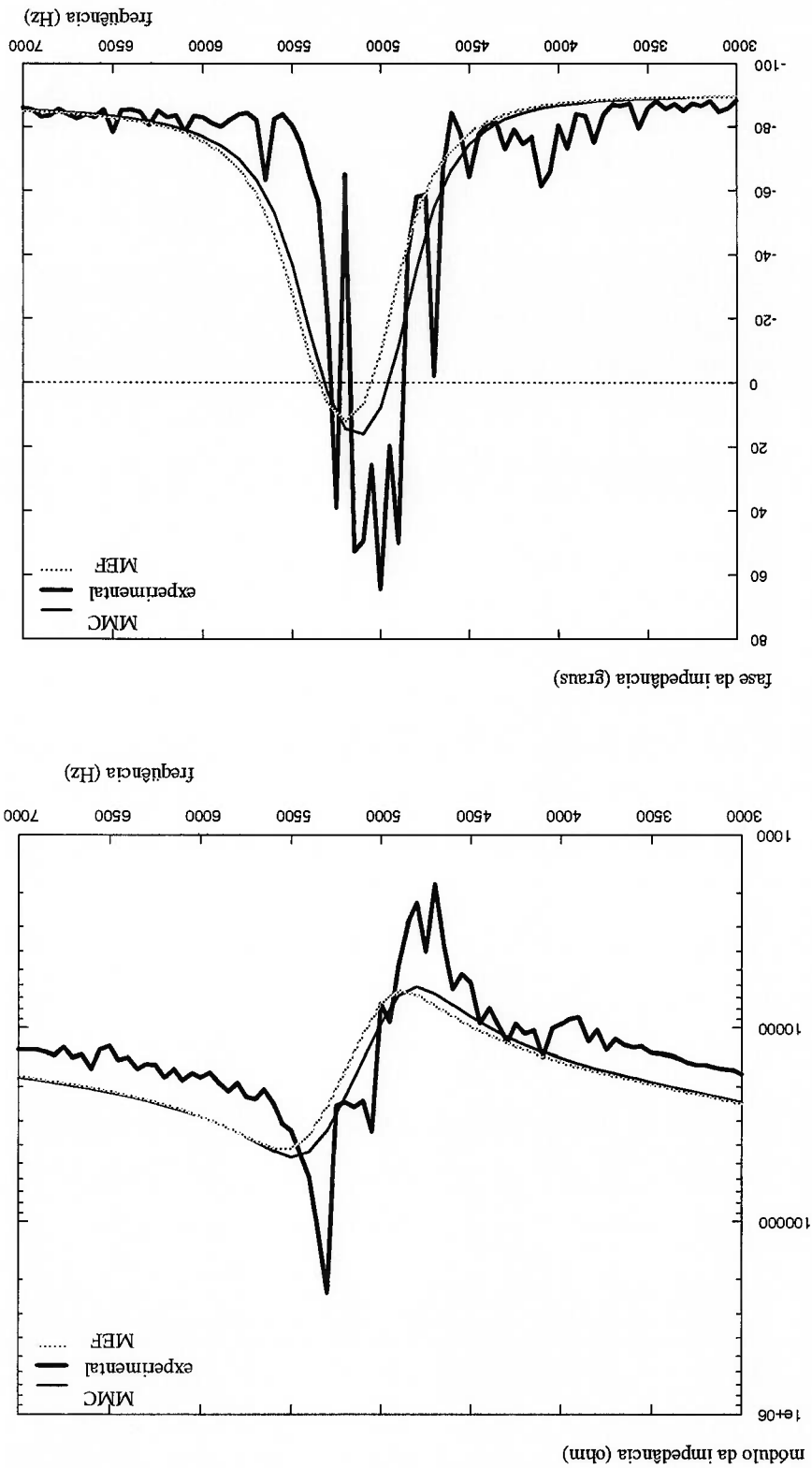


Fig. 5.2.5.2 Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um tubo infinito

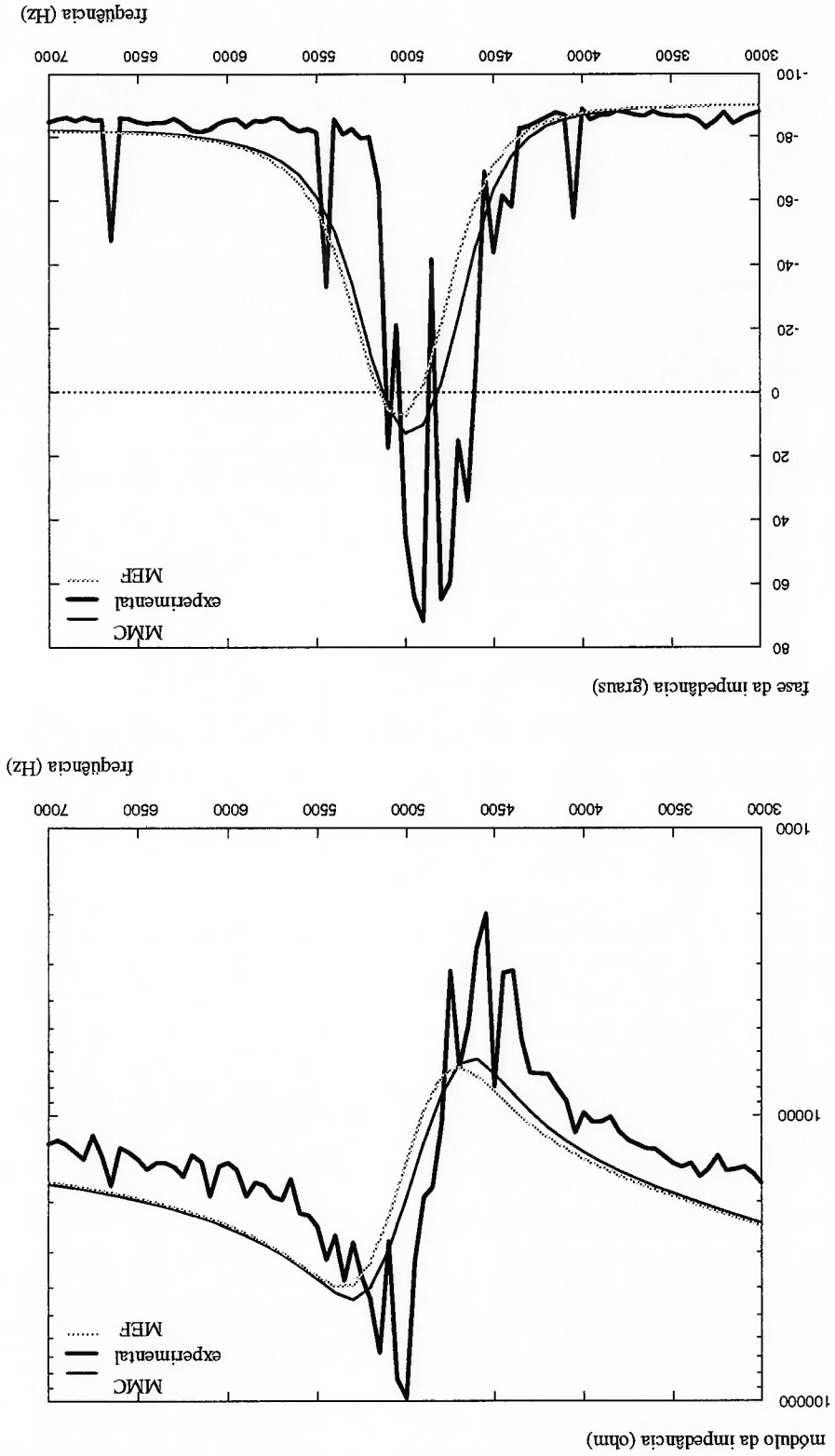


Fig. 5.2.5.3 Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um transdutor com quatro cerâmicas, conectado através de um adaptador de 220 mm a um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um

tubo finito

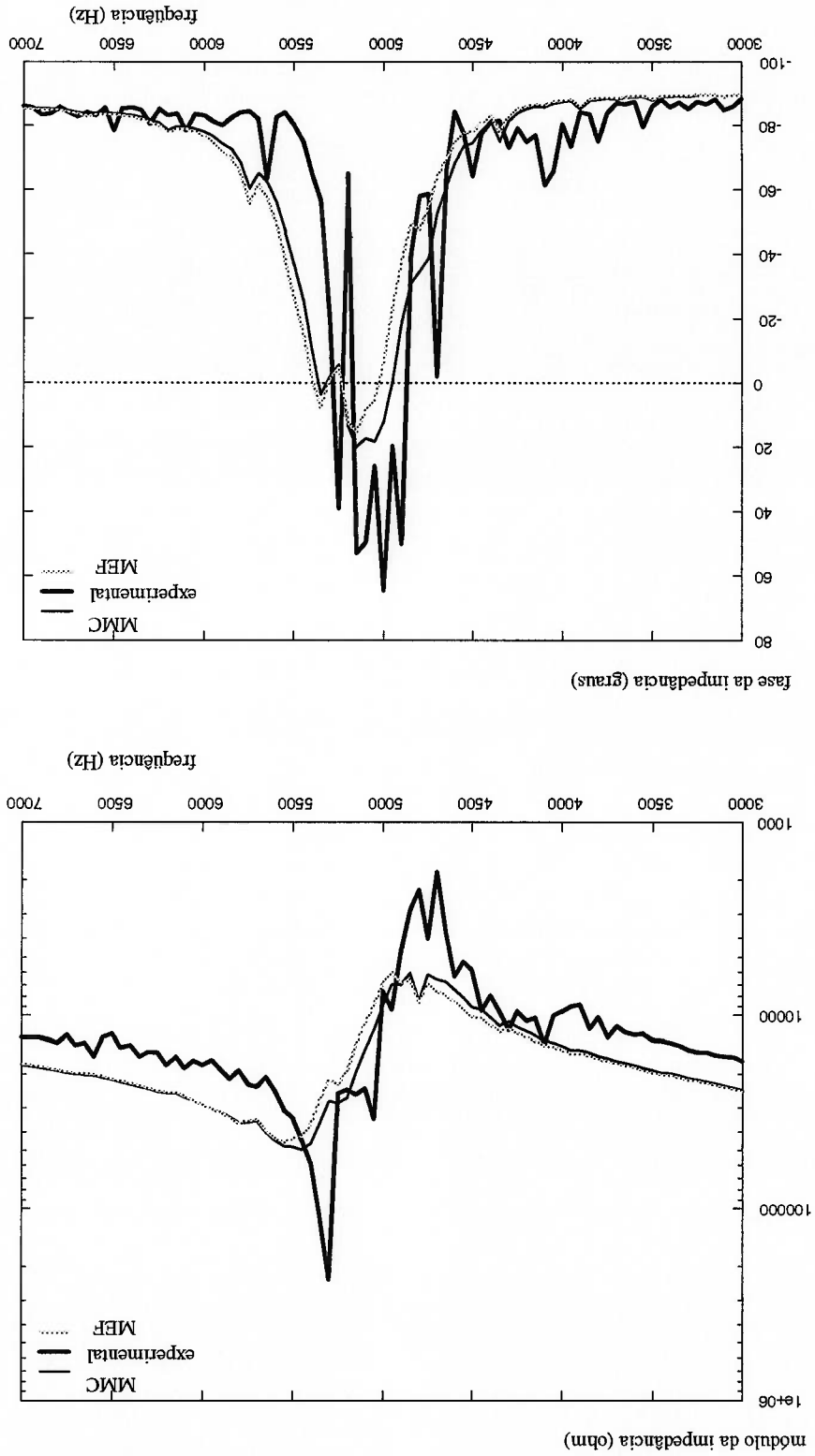
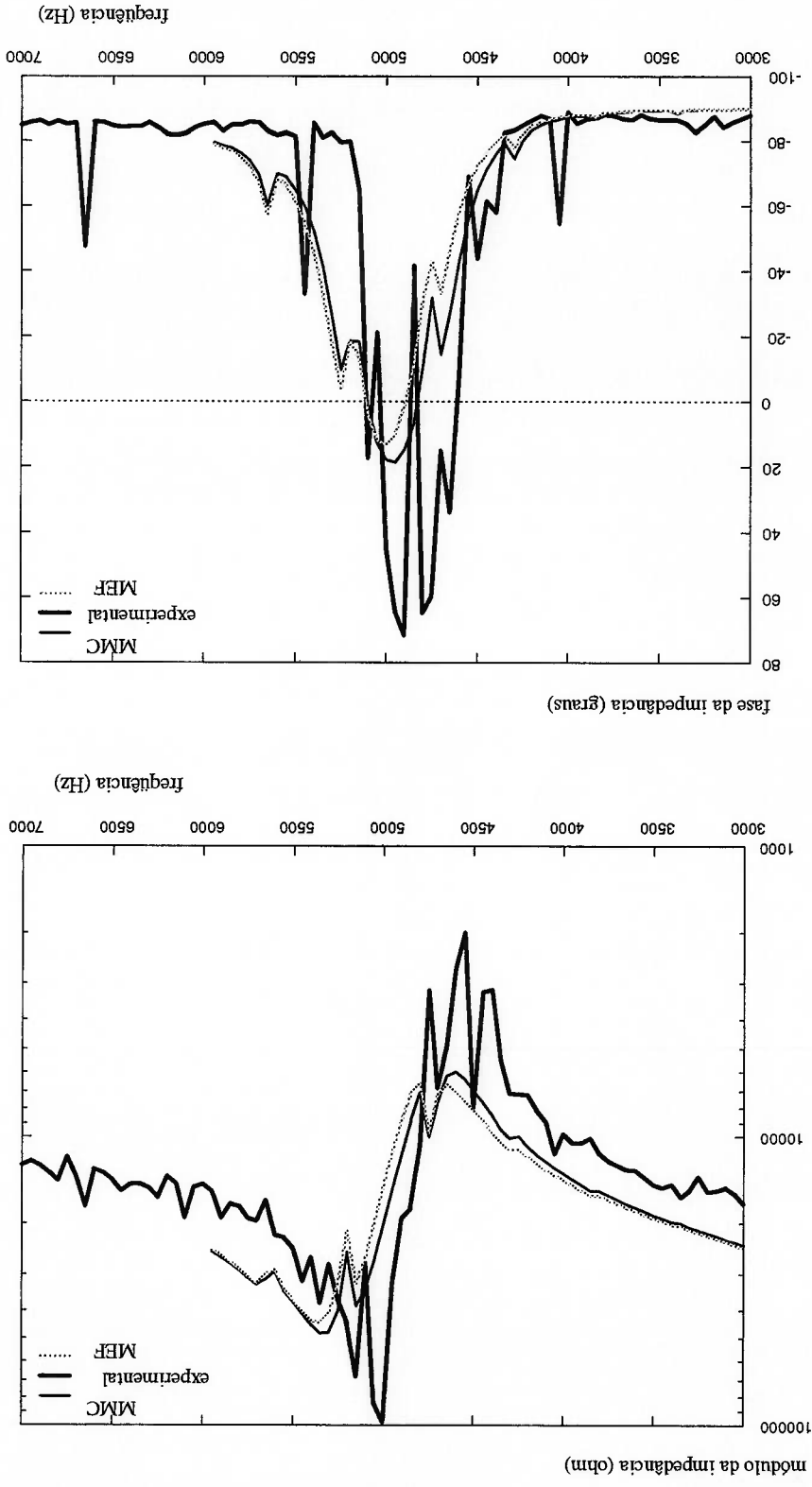


Fig. 5.2.5.4 Comparação entre as curvas de módulo e fase da impedância elétrica de um transdutor com quatro cerâmicas, conectado através de um adaptador de 420 mm a um tubo, obtidas experimentalmente, pelo MEF e pelo MMC. Os modelos consideram um tubo finito



**adaptador-tubo**

Nas fig. 5.2.2.1 e 5.2.2.2, podem-se observar os efeitos das reflexões nas extremidades dos tubos. Os picos e vales nas curvas dos casos de tubo finito são resultados das reflexões. Teoricamente, quanto maior o comprimento da tubulação, menos espaçadas são as frequências dos picos e vales. Nas figuras não é possível visualizar direito o período destas perturbações, devido à baixa resolução no eixo da frequência. As curvas dos casos de tubo infinito acompanham de modo aproximado as curvas dos casos de tubo finito, apesar da inversão do modelo do tubo finito (seção 5.2.2). Provavelmente isto acontece porque os tubos têm comprimento equivalente a vários comprimentos de onda. O conjunto adaptador-tubo apresentou uma impedância relativamente alta, com o valor do módulo em torno de 3 a 5 vezes a impedância característica do aço, na frequência de 5 kHz; por este resultado, teoricamente o transdutor deve ter uma impedância acústica de saída igualmente alta, para que haja boa transferência de potência.

Pelas fig. 5.2.5.1 a 5.2.5.4 as frequências de ressonância e anti-ressonância dos

modelos resultaram, a grosso modo, em cerca de 3 a 6 % acima das frequências experimentais, como no caso dos transdutores simétricos. Considerando-se que a montagem pode gerar diferenças de 3 % ou mais, a incerteza nos dados dos materiais, e as hipóteses simplificadoras adotadas, estes resultados podem ser considerados interessantes, mas não definitivos; os experimentos precisam ser repetidos para outras dimensões, formatos e materiais, para se conhecer os reais efeitos de cada fator envolvido. As curvas dos modelos dos tubos finitos e dos tubos infinitos resultaram bem

parecidas, principalmente pela suavização dos picos e vales na impedância do conjunto adaptador-tubo, discutida a seguir.

Comparando-se as fig. 5.2.2.1 e 5.2.2.2 com as fig. 5.2.5.3 e 5.2.5.4, nota-se que as curvas teóricas do conjunto transdutor-adaptador-tubo são ligeiramente mais suaves que as curvas do conjunto adaptador-tubo, o que significa que o transdutor não é muito sensível à impedância do conjunto adaptador-tubo. A suavização é menor em torno das frequências de ressonância e anti-ressonância, pois em torno destas frequências a impedância acústica de saída é mais alta, promovendo uma transferência de potência maior com o adaptador e aumentando a interação com este.

A absorção devida à camada de fluido interna à tubulação mostrou-se excessiva. Felizmente, esta perda adicional não modificou demasiadamente as frequências de ressonância.

## 6 CONCLUSÃO

### 6.1 Discussão dos resultados

#### Adaptador axissimétrico

O modelo do adaptador axissimétrico demonstrou a possibilidade de direcionamento da potência em um tubo, e a importância da variação gradual da área transversal. Também serviu de base para os adaptadores não-axissimétricos.

#### Transdutores simétricos

A fig. 5.1.4.1 mostra que o efeito da montagem pode ser significativo. Diferença na frequência de ressonância de até 3%, e diferença no valor do módulo da impedância de até 9 dB não são desprezíveis.

Nas fig. 5.1.4.2 e 5.1.4.3, as diferenças de largura de banda entre as curvas teóricas e experimentais podem ser explicadas pelas perdas nos materiais, que não foram consideradas nos modelos. No caso dos transdutores simétricos considerados, as perdas nos materiais não podem ser desprezadas, por causa do acoplamento acústico desfavorável com o meio externo. Percebe-se que as frequências de ressonância nos modelos MIMC resultaram menores em relação ao MEF. Isto já era esperado pois no modo de barra consideram-se somente as tensões na direção longitudinal, o que leva a uma rigidez longitudinal menor. Pode-se observar um erro constante no valor do módulo da impedância de cerca de 3 dB, tomando-se por exemplo a impedância nas frequências

7000 e 15000 Hz. Esse mesmo erro aparece nos resultados dos conjuntos transdutor-adaptador-tubo; provavelmente está ligado a imprecisões na modelagem do transdutor.

#### **Transdutor acoplado a conjuntos adaptador-tubo**

Nas fig. 5.2.2.1 e 5.2.2.2, podem-se observar os efeitos das reflexões nas extremidades dos tubos. Os picos e vales nas curvas dos casos de tubo finito são resultados das reflexões. Estes fenômenos são da mesma natureza que os estudados por DRUMHELLER (1989, 1993) e DRUMHELLER; KNUDSEN (1995). Teoricamente, quanto maior o comprimento da tubulação, menos espaçadas são as frequências dos picos e vales. Nas figuras não é possível visualizar direito o período destas perturbações, devido à baixa resolução no eixo da frequência. As curvas dos casos de tubo infinito acompanham de modo aproximado as curvas dos casos de tubo finito, apesar da inversão do modelo do tubo finito (seção 5.2.2). Provavelmente isto acontece porque os tubos têm comprimento equivalente a vários comprimentos de onda. O conjunto adaptador-tubo apresentou uma impedância relativamente alta, com o valor do módulo em torno de 3 a 5 vezes a impedância característica do aço, na frequência de 5 kHz; por este resultado, teoricamente o transdutor deve ter uma impedância acústica de saída igualmente alta, para que haja boa transferência de potência.

Pelas fig. 5.2.5.1 a 5.2.5.4 as frequências de ressonância e anti-ressonância dos modelos resultaram, a grosso modo, em cerca de 3 a 6 % acima das frequências experimentais, como no caso dos transdutores simétricos. Considerando-se que a montagem pode gerar diferenças de 3 % ou mais, a incerteza nos dados dos materiais, e as hipóteses simplificadoras adotadas, estes resultados podem ser considerados interessantes, mas não definitivos; os experimentos precisam ser repetidos para outras dimensões, formatos e materiais, para se conhecer os reais efeitos de cada fator



envolvido. As curvas dos modelos dos tubos finitos e dos tubos infinitos resultaram bem parecidas, principalmente pela suavização dos picos e vales na impedância do conjunto

adaptador-tubo, discutida a seguir.

Comparando-se as fig. 5.2.2.1 e 5.2.2.2 com as fig. 5.2.5.3 e 5.2.5.4, nota-se que as curvas teóricas do conjunto transdutor-adaptador-tubo são ligeiramente mais suaves que as curvas do conjunto adaptador-tubo, o que significa que o transdutor não é muito sensível à impedância do conjunto adaptador-tubo. A suavização é menor em torno das frequências de ressonância e anti-ressonância, pois em torno destas frequências a impedância acústica de saída é mais alta, promovendo uma transferência de potência maior com o adaptador e aumentando a interação com este.

A absorção devida à camada de fluido interna à tubulação mostrou-se excessiva. Felizmente, esta perda adicional não modificou demasiadamente as frequências de ressonância.

### **Velocidade de processamento**

O tempo de processamento depende basicamente de fatores como o computador utilizado, os programas, o sistema operacional, os algoritmos e métodos, e as pessoas que operam o sistema. Todos estes fatores estão interligados, o que dificulta uma comparação justa entre o MMC e o MEF em termos de velocidade de processamento. O programa utilizado para o MEF neste trabalho é de uso geral; um programa feito especialmente para resolver o problema do transdutor de potência poderia ser mais rápido. Já os modelos MMC foram calculados por interpretação dos comandos de um roteiro. Se fosse utilizada compilação, o processamento provavelmente seria mais rápido. Mas pode-se esperar que o MMC seja muito mais rápido que o MEF na maioria dos

casos. Para os modelos dos transdutores utilizados, os tempos de processamento do MMC foram da ordem de alguns segundos, e os do MEF da ordem de vários minutos.

## 6.2 Conclusões

Fatores como montagem e materiais podem influir sensivelmente nos resultados.

Os modelos MEF e MMC e MMC dos transdutores simétricos e não-simétricos produziram resultados bem próximos, o que indica que o MMC pode substituir o MEF em casos onde o comprimento de onda é muito maior que as dimensões transversais do meio de propagação, com ganho de tempo considerável. Embora o MMC tenha funcionado para as dimensões utilizadas, é preciso um estudo mais detalhado para se saber os limites para a eficácia do método. O MEF foi uma ferramenta muito útil para a verificação dos resultados do MMC.

Conclui-se que a adaptação do MMC para o modo de barra foi aparentemente bem sucedida. A hipótese de deslocamento elétrico constante deve ser estudada mais profundamente.

A utilização conjunta do MMC e do MEF, com o MEF modelando uma estrutura complexa, e o MMC e o MEF modelando um transdutor, sendo a impedância da estrutura complexa passada para o transdutor por meio de regras simples, produziu resultados interessantes. Percebeu-se o efeito das reflexões nas extremidades da tubulação. Os resultados dos experimentos e dos modelos razoavelmente próximos, apesar de todas as simplificações, indicam que o procedimento utilizado pode ser útil no projeto ou análise de problemas desta natureza, e pode até obter resultados mais precisos se for refinado.

O MEF naturalmente apresentou resultados mais detalhados que o MMC, permitindo um melhor entendimento do problema, e a verificação de algumas hipóteses. A hipótese de que poderia ser utilizada a aproximação por modo de barra foi aceita por causa dos resultados dos métodos MEF e MMC, bem parecidos. A explicação foi dada pelo MEF, que indicou tensões indesejadas apenas em regiões limitadas, ao redor das interfaces entre as cerâmicas e as massas de metal, e com valor razoavelmente pequeno, 20 % das tensões longitudinais ou menos. Essas regiões são locais de possíveis problemas, como deslizamentos entre as superfícies e concentração de tensões. Deve-se portanto ter um cuidado maior nestas regiões.

Os resultados mostram que a não-consideração das perdas nos materiais teve um impacto pequeno nas frequências de ressonância e anti-ressonância. Nos casos dos transdutores simétricos, a curva de impedância mostrou uma largura de banda significativamente maior nos protótipos, em relação aos modelos, indicando que, quando não há boa transferência de potência para o meio externo, a consideração das perdas nos materiais é vital, se o valor da impedância for importante. Já no conjunto transdutor-adaptador-tubo, a suavidade maior nas curvas de impedância dos modelos mostra que a utilização de camada absorvedora interna ao tubo representou uma perda excessiva, mascarando a não-consideração das perdas nos materiais. Isto indica que, quando a transferência de potência do transdutor para o meio externo é relativamente grande, as perdas nos materiais podem, dentro de certos limites, ser desprezadas.

### 6.3 Propostas de trabalhos futuros

Este trabalho apresentou soluções parciais para um problema muito complexo. É preciso o estudo dos demais fatores envolvidos, bem como o refinamento das soluções apresentadas.

Seria interessante a implementação de modelos MEF do conjunto transdutor-adaptador-tubo, e a comparação com os resultados obtidos pela utilização conjunta de submodelos MEF e MMC.

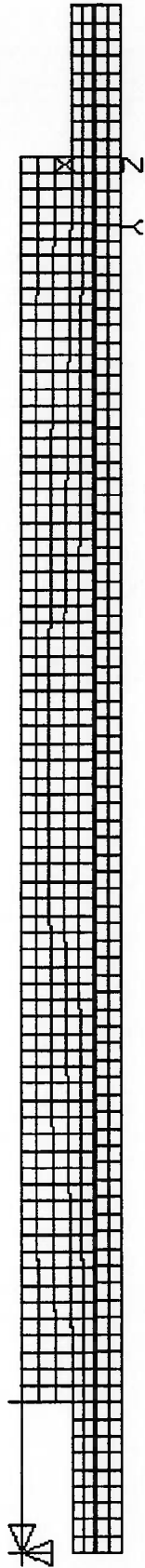
É preciso um estudo mais extenso sobre os limites da utilização do MMC para o modo de barra, com relação a dimensões e geometrias.

Considerou-se o transdutor operando em temperatura ambiente, portanto um estudo sobre a operação em temperaturas mais elevadas é necessário para a utilização em poços de petróleo.

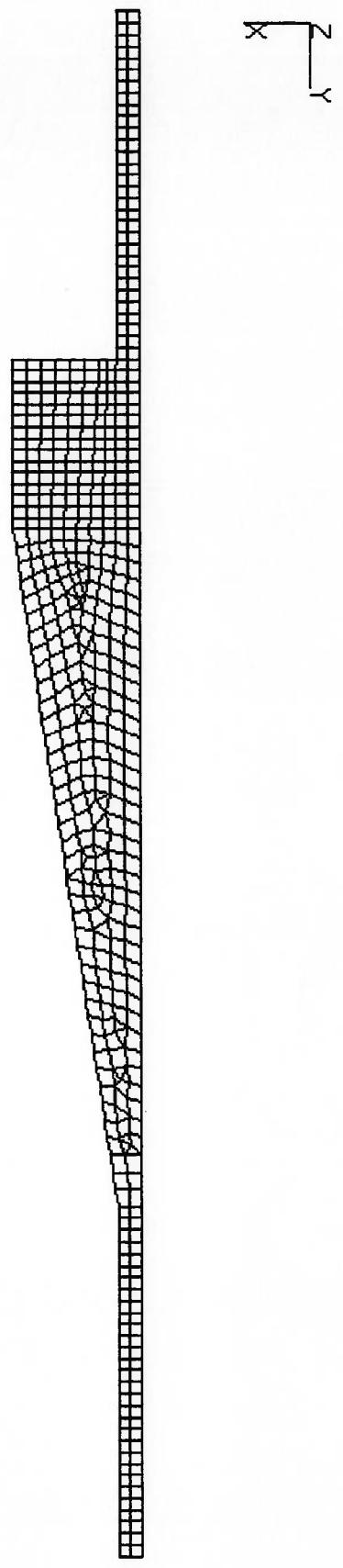
As constantes dos materiais utilizadas nos modelos foram as fornecidas pelos fabricantes, logo, para uma maior precisão dos resultados, pode-se medir as propriedades das cerâmicas, inclusive em várias temperaturas e regimes de utilização. Em altas temperaturas é necessário o estudo do envelhecimento das cerâmicas.

Certamente desenhos mais eficientes de transdutores podem ser obtidos, principalmente com técnicas de otimização, pois neste trabalho não houve ênfase na busca por melhor desempenho do transdutor.

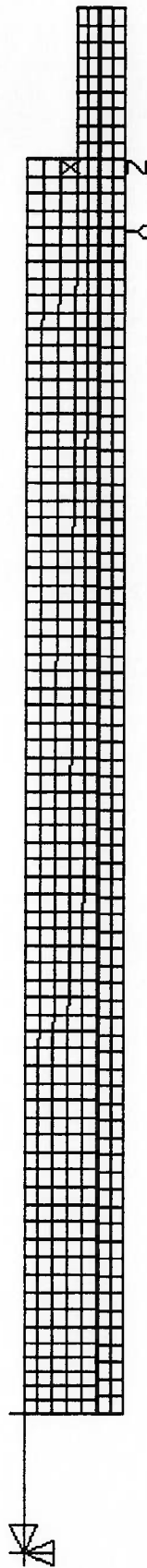
**ANEXO A - Malha do modelo MEF do transdutor simétrico**



**ANEXO B - Malha do modelo MEF do conjunto adaptador-tubo axisimétrico**



**ANEXO C - Malha do modelo MEF do transdutor não-simétrico**



## BIBLIOGRAFIA

- ANSI/IEEE. Publication and proposed revision of ANSI/IEEE standard 176-1987 "ANSI/IEEE standard on piezoelectricity". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.43, n.5, p.717-72, set. 1996.
- ARNOLD, F.J. O pré-tensionamento mecânico em transdutores piezoelétricos. Campinas, 1995. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas.
- BATHE, K.J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. New Jersey, EUA, Prentice-Hall, 1982.
- COATES, R.; MATHAMS, R.F. Design of Matching Networks for Acoustic Transducers. Ultrasonics, v.26, p.59-64, mar. 1988.
- DECARPIGNY, J.N.; DEBUS, J.C.; TOCQUET, B.; BOUCHER, D. In-air analysis of piezoelectric tonpilz transducers in a wide frequency band using a mixed finite element - plane wave method. J. Acoust. Soc. Am., v.78, n.5, p.1499-507, nov. 1985.
- DRUMHELLER, D.S. Acoustical Properties of Drill Strings, J. Acoust. Soc. Am., v.85, n.3, p.1048-64, mar. 1989.
- DRUMHELLER, D.S. The Attenuation of Sound Waves in Drill Strings. J. Acoust. Soc. Am., v.94, n.4, p.2387-96, out. 1993.
- DRUMHELLER, D.S.; KNUDSEN, S.D. The propagation of sound waves in drill strings. J. Acoust. Soc. Am., v.97, n.4, p. 2116-25, abr. 1995.
- DUBUS, B.; DEBUS, J.C.; DECARPIGNY, J.N.; BOUCHER, D. Analysis of mechanical limitations of high power piezoelectric transducers using finite element modelling. Ultrasonics, v.29, p.201-7, maio 1991.
- GALLIGO-JUAREZ, J.A. Piezoelectric Ceramics and Ultrasonic Transducers. J. Phys. E: Sci. Instrum., v.22, p.804-16, 1989.



- KINO, G.S. **Acoustic Waves - Devices, Imaging and Analog Signal Processing.** EUA, Prentice-Hall, 1987.
- KINSLER, L.E.; FREY, A.R. **Fundamentals of Acoustics.** 2.ed. EUA, John Wiley, 1962.
- KINSLER, L.E.; COPPENS, A.B.; FREY, A.R.; SANDERS, J.V. **Fundamentals of acoustics.** 3.ed. EUA, John Wiley, 1982.
- KRASZEWSKI, R.J.; SIGELMANN, R.A.; HERBERTZ, J.; LEE, M. A chain matrix model for an acoustically coupled, lead zirconate titanate core, electrical transformer. **J. Acoust. Soc. Am.**, v.90, n.5, p. 2763-8, nov. 1991.
- KRASZEWSKI, R.J.; SIGELMANN, R.A.; HERBERTZ, J. Electrical multipport transfer functions and efficiency in layered media of piezoelectric and/or nonpiezoelectric materials. **J. Acoust. Soc. Am.**, v.90, n.5, p. 2769-74, nov. 1991.
- MORGAN MATROC INC. **Guide to Modern Piezoelectric Ceramics.** USA, rev. 7-91. (Manual da Morgan Matroc)
- MORGAN MATROC INC. **Piezoelectric technology - data for designers.** USA. (Manual da Morgan Matroc)
- MAILLON, M.; COURSAINT, R.H.; BESNIER, F. Analysis of piezoelectric structures by a finite element method. **Acta Electronica**, v.25, n.4, p.341-62, 1983.
- RISTIC, V.M. **Principles of acoustic devices.** EUA, John Wiley, 1983.
- SILVA, E.C.N. **Modelagem vibracional de transdutores de ultra-som piezoelétricos pelo método de elementos finitos.** São Paulo, 1993. 107p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ZAGOTTIS, D. DE **Introdução à teoria das estruturas.** São Paulo, 1982. (Apostila - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo)

## Bibliografia recomendada

- ADAMOWSKI, J.C.; MATUDA, M.Y.; BUIOCHI, F.; FURUKAWA, C.M. Modelagem de transdutores piezoeletricos de potência. [Anais (CDROM) do XIV COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABCM, Bauru, São Paulo, 1997]
- ADAMOWSKI, J.C.; MATUDA, M.Y.; BUIOCHI, F.; FURUKAWA, C.M. Modelagem de transdutores piezoeletricos de potência. (Anais do III ETAS - Encontro de Tecnologia em Acústica Submarina, IPQM, Rio de Janeiro, set. 1997)
- ADAMOWSKI, J.C.; BUIOCHI, F.; SIMÕES, F.G.; FURUKAWA, C.M.; KUCHPIL, C. Transmissão acústica de dados em colunas de produção de petróleo. (Anais do III INDUSCON, IEEE-Industry Applications Society, p.66-70, São Paulo, set. 1998)
- ANSYS ANSYS User's Manual. (Manual do ANSYS versão 5.1)
- COATES, R.F.W. The design of transducers and arrays for underwater data transmission. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v.16, n.1, p.123-35, Jan. 1991.
- DECARPIGNY, J.N.; HAMONIC, B.; WILSON JR., O.B. The design of low-frequency underwater acoustic projectors: present status and future trends. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v.16, n.1, p.107-22, Jan. 1991.
- MORGAN MATROC INC.; BERLINCOURT, D. TP-225 Power Limitations of Piezoelectric Ceramics in Radiating Transducers. (Artigo Técnico da Morgan Matroc)
- MORGAN MATROC INC. TP-235 The Design of Piezoelectric Sandwich Transducers. (Artigo Técnico da Morgan Matroc)

APÊNDICE A - Constantes dos materiais

Aço

Isotrópico

$E=207$  GPa

$\nu=0,3$

$\rho=7800$  kg/m<sup>3</sup>

(densidade)

(coeficiente de Poisson)

(módulo de Young)

PZT-8

Simétrico no plano perpendicular à direção de polarização

$d_{31} = -100 \cdot 10^{-12}$  C/N

$d_{33} = 220 \cdot 10^{-12}$  C/N

$d_{15} = 320 \cdot 10^{-12}$  C/N

$s_{E11} = 10,4 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/N

$s_{E12} = -3,7 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/N

$s_{E13} = -4,8 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/N

$s_{E33} = 13,5 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/N

$s_{E44} = 31,9 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/N

$e_{31} = -6,63$  C/m<sup>2</sup>

$e_{33} = 11,6$  C/m<sup>2</sup>

$e_{15} = 10,0$  C/m<sup>2</sup>

$s_{E66} = s_{E44}$  (valor arbitrário, pois esta constante não influi nos modelos)

$c_{E11} = 188$  GPa

$c_{E12} = 117$  GPa

$c_{E13} = 108$  GPa

$c_{E33} = 151$  GPa

$c_{E44} = 31,3$  GPa

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m

(permissividade elétrica no vácuo)

$\epsilon_{S11} = 900 \cdot \epsilon_0$

$\epsilon_{S33} = 600 \cdot \epsilon_0$

$\rho = 7600$  kg/m<sup>3</sup>

**APÊNDICE B - Listagens dos programas MEF**

th2.mac

Transdutor sanduíche de 4 cerâmicas com água em uma das extremidades

propag9.mac

Conjunto adaptador-tubo axissimétrico

propag19.mac

Conjunto adaptador-tubo não-axissimétrico

th4.mac

Transdutor sanduíche de 4 cerâmicas sob a ação de uma impedância acústica em uma das extremidades

```

th2.mac
-----
! Sandwich transducer with 4 piezoelectric ceramic disks.
! Harmonic analysis.
! Considers pre-stress bolt, nuts and an acoustic impedance at
! the front end of the transducer (radiation impedance of a fluid medium
! as seen by a flat piston surrounded by an infinite baffle).
!
! Script for ANSYS 5.1
!
! Marcelo Y. Matuda
-----
! (to avoid /CLE? prompts, just run this program in background)
/FILNAME, th2
/UNITS, SI
PI=3.141592654
PI2=PI*2
----- parameters
EQ_MIN=7000
EQ_MAX=15000
! min. freq.
! max. freq.
EQ_N=101
! number of frequencies (minimum of 2)
R1=0.007/2
! bolt's radius
R2=0.0075/2
! transducer's internal radius
R4=0.0275/2
! transducer's external radius
R3=0.0133/2
! nut's external radius
L1=0.0217
! back nut's length
L2=0.070
! back metal mass' length
L3=0.00995
! piezoelectric ceramic disks' length
L4=0.070
! front metal mass' length
L5=L1
! front nut's length
EXCV=300
! excitation voltage
EL SIZE=L3/4
! desired element size
L6=L5
! length of the element that simulates the impedance
----- initialization
*DIM, ZR1, TABLE, EQ_N
! and final results
*DIM, ZI1, TABLE, EQ_N
*DIM, IIR1, TABLE, EQ_N
*DIM, IIR2, TABLE, EQ_N
*DIM, MODZ, TABLE, EQ_N
*DIM, TMP1, ARRAY, EQ_N
*DIM, TMP2, ARRAY, EQ_N
*DIM, TMP3, ARRAY, EQ_N
! --- fills the index row of the tables
ZR1(0,1)=1
ZI1(0,1)=1
IIR1(0,1)=1
IIR2(0,1)=1
MODZ(0,1)=1
IIR1(0,1)=1
IIR2(0,1)=1
MODZ(0,1)=1
IIR1(0,1)=1
IIR2(0,1)=1
MODZ(0,1)=1
*DO, EQ, EQ_MIN, EQ_MAX, (EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ_N-1)
  ZR1(EQ,0)=EQ
  ZI1(EQ,0)=EQ
  IIR1(EQ,0)=EQ
  IIR2(EQ,0)=EQ
  MODZ(EQ,0)=EQ
  II=II+1
*ENDDO
----- radiation impedance of the fluid medium
*DIM, ZR, ARRAY, EQ_N
*DIM, ZI, ARRAY, EQ_N
*DO, EQ, EQ_MIN, EQ_MAX, (EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ_N-1)
  ! x=2*kr=2(w/c)*r
  X=2*(2*PI*EQ/1500)*R4
  ! considers the external radius of the metal masses
  XZ=X*X
  ! complete series
  ! R1(x)=x^2/(2^4)-x^4/(2^4*2^6)+x^6/(2^4*2^6*2^8)-...
  ! X1(x)=(4/PI)*(x^3-x^3/(3^2*5)+x^5/(3^2*5*2*7)-...
  ! the equations below give good results only for small x values
  ! (e.g. for x<=3.0), because of the limited number of terms
  ! R1 TMP1=1-(XZ/48)*(1-(XZ/80)*(1-(XZ/120)))
  ! R1 TMP1=(XZ/8)*(1-(XZ/24)*R1 TMP1)
  ! temporary

```

```

X11 Tmp1=1-(X2/35)*(1-(X2/63))*(1-(X2/99)) ; temporary
X11=(4/PI)*(X/3)*(1-(X2/15))*X1 Tmp1
; Z=density*c*area*(R1+)]*X1 (radiation impedance)
; fluid is water (density=1000 kg/m3, c=1500 m/s)
ZR(II)=1000*1500*(PI*R4*R4)*R1 ; real part of the impedance
ZI(II)=1000*1500*(PI*R4*R4)*XX1 ; imaginary part of the impedance
II=II+1
*ENDDO

---- definition of the constants of the element simulating the impedance
DIM,KEQ,ARRAY,EQ,N
DIM,CEQ,ARRAY,EQ,N
DIM,MEQ,ARRAY,EQ,N
ZILOW=-0.1 ; a very low acoustic impedance
II=1
*DO,EQ,EQ_MIN,EQ_MAX,(EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ_N-1)
*IF,ZI(II),LT,0,THEN
KEQ(II)=-ZI(II)-ZILOW*(2*PI*EQ)
CEQ(II)=ZR(II)
MEQ(II)=0
*ELSEIF,ZI(II),EQ,0
KEQ(II)=-ZILOW*(2*PI*EQ)
CEQ(II)=ZR(II)
MEQ(II)=0
*ELSE
KEQ(II)=-ZILOW*(2*PI*EQ)
CEQ(II)=ZR(II)
MEQ(II)=0
; ZI positive
*ENDIF
MEQ(II)=ZI(II)*2/(2*PI*EQ)
*ENDIF
II=II+1
*ENDDO

*DO,EQ,EQ_MIN,EQ_MAX,(EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ_N-1)
; saves parameters
PARSAV,ALL,tz,par
/CLEAR
PARRES,NBW,tz,par
; and restores the parameters
----- PRE-PROCESSING -----
/PREP7

----- elements -----
E1,1,PLANE13,7,1,1 ; piezoelectric axisymmetric
E1,2,PLANE12,1,1,1 ; structural axisymmetric
E1,3,LINK11 ; mass-spring-damper
----- material properties -----
material 1
; piezoelectric ceramic - PZT-8
E31=-6.63 ; polarization direction is 3
E33=11.6 ; 4=yz,5=xz,6=xy
E15=10.0
C11=188E9
C12=117E9
C13=108E9
C33=151E9
C44=31.3E9
C66=C44 ; arbitrary
EPS1=900*8.854E-12
EPS3=600*8.854E-12
; fills piezoelectric matrix
TB,PIEZ,1
TBDATA,2,E31
TBDATA,5,E33
TBDATA,8,E31
TBDATA,10,E15
TBDATA,15,E15
; fills stiffness matrix
TB,ANEL,1
TBDATA,1,C11,C13,C13
TBDATA,7,C33,C13
TBDATA,12,C11
TBDATA,16,C44
TBDATA,19,C44
TBDATA,21,C66

```

```

---- density
MP,DENS,1,7600
---- fills dielectric matrix
MP,PERX,1,EPS11
MP,PERY,1,EPS33
MP,PERZ,1,EPS11
----- material 2
MP,DENS,2,7800
MP,EX,2,207E9
---- steel (back metal mass)
MP,DENS,3,7800
MP,EX,3,207E9
---- steel (front metal mass)
MP,DENS,4,7800
MP,EX,4,207E9
---- material 4
MP,DENS,4,7800
MP,EX,4,207E9
R,1
R,2,KEQ(II),CEQ(II),MEQ(II) ; constants of the element simulating the impedance
REAL,1
----- geometric model generation
RECTNG,0,R1,0,-L1
RECTNG,0,R1,R2,0,-L1
RECTNG,R2,R3,0,-L1
RECTNG,0,R1,R1,0,L2+4*L3+L4
RECTNG,R2,R4,0,L2
RECTNG,R2,R4,L2,L2+L3
RECTNG,R2,R4,L2+L3,L2+2*L3
RECTNG,R2,R4,L2+L3,L2+3*L3
RECTNG,R2,R4,L2+2*L3,L2+3*L3
RECTNG,R2,R4,L2+4*L3,L2+4*L3
RECTNG,R2,R4,L2+4*L3,L2+4*L3+L4
RECTNG,R2,R4,L2+4*L3,L2+4*L3+L4
RECTNG,0,R1,L2+4*L3+L4,L2+4*L3+L4+L5
RECTNG,0,R1,L2+4*L3+L4,L2+4*L3+L4+L5
RECTNG,R2,R3,L2+4*L3+L4,L2+4*L3+L4+L5
AGLUE,ALL
APLOT
----- mesh generation
LESIZE,ALL,EL SIZE ; desired element size
ESHAPE,2 ; quadrilaterals only
---- ceramic disks
TYPE,1
MAT,1
AMESH,18
AMESH,20
LOCAL,11,0,0,0,0,180,0,0
ESYS,11
AMESH,19
AMESH,21
CSYS,0
ESYS,0
---- bolt and nuts
TYPE,2
MAT,4
AMESH,1
AMESH,14
AMESH,15
AMESH,16
AMESH,17
AMESH,22
AMESH,23
LCCAT,58,75
---- back metal mass
TYPE,2
MAT,2
AMESH,24
LCCAT,70,78
---- front metal mass
TYPE,2
MAT,3
AMESH,25

```

```

LDELE,5
LDELE,7
NUMMRG,ALL
----- element simulating the impedance
fixed node
N,NX(NODE(R4,L2+4*L3+L4,0)),NY(NODE(R4,L2+4*L3+L4,0))+L6
----- element
TYPE,3
REAL,2
E,NODE(R4,L2+4*L3+L4,0),NODE(R4,L2+4*L3+L4+L6,0)
----- boundary conditions
D,NODE(R4,L2+4*L3+L4,0),UZ,0
D,NODE(R4,L2+4*L3+L4+L6,0),UY,0,UX,UZ
----- boundary conditions
E,NODE(R4,L2+4*L3+L4,0),NODE(R4,L2+4*L3+L4+L6,0)
----- boundary conditions
D,NODE(R4,L2+4*L3+L4,0),UZ,0
D,NODE(R4,L2+4*L3+L4+L6,0),UY,0,UX,UZ
----- boundary conditions
LSEL,S,,,19
LSEL,A,,,27
LSEL,A,,,35
NSLT,S,1
CP,NEXT,VOLT,ALL
*GET,GROUND,NODE,,NUM,MIN
LSEL,S,,,23
LSEL,A,,,31
NSLT,S,1
CP,NEXT,VOLT,ALL
*GET,LIVE,NODE,,NUM,MIN
LSEL,S,,,78
LSEL,S,1
NSLT,S,1
CP,NEXT,UY,ALT
*GET,N1,NODE,,NUM,MIN
NSEL,ALL
LSEL,ALL
SAVE
FINISH
----- SOLVING -----
/SOLU
ANTYPE,HARM
HROPT,FULL
KBC,1
HROUT,ON
D,GROUND,VOLT,0
D,LIVE,VOLT,EXCV
! boundary condition - live electrodes
! boundary condition - ground electrodes
SAVE
HARREQ,EQ
SOLVE
FINISH
----- POST-PROCESSING -----
/POST26
RFORCE,2,LIVE,AMPS
! electric displacement flux in live electrodes (charge)
RPROD,3,2,1,,MHOS,,PI2
! multiplies by frequencies
VGET,I1(I1),3,EQ,0
! imaginary part of the current with changed sign
VGET,I1(I1),3,EQ,1
! real part of the current
*VOPER,TMP1(1),IRI(1),MULT,IRI(1)
*VOPER,TMP2(1),I1(1),MULT,I1(1)
*VOPER,TMP3(1),ADD,TMP2(1)
*VEFACT,EXCV
*VOPER,ZR1(1),DIV,TMP3(1)
! real part of the impedance
*VEFACT,EXCV
*VOPER,ZI1(1),DIV,TMP3(1)
! imaginary part of the impedance
*VEFACT,1
*VOPER,TMP1(1),ZR1(1),MULT,ZR1(1)
*VOPER,TMP2(1),MULT,ZI1(1)
*VOPER,TMP3(1),ADD,TMP2(1)
! modulus of the current, squared
*VEFACT,EXCV
*VOPER,TMP3(1),MULT,TMP2(1)
! modulus of the impedance
*VOPER,TMP3(1),SQRT,TMP3(1)
FINISH
PARSAV,ALL,th2,par
! saves all parameters
II=II+1
*ENDDO
===== MAIN LOOP END =====

```



```

propag9.mac ----- model of an adaptor-tube assembly.
! Axisymmetric model of an adaptor-tube assembly.
! Harmonic analysis.
! Fluid layers at the ends simulate an infinite tube.
! Calculates the transmission efficiency, with no internal losses,
! for various E3 (cone length) values.
! Script for ANSYS 5.1
!
!
!----- parameters
PI=3.14159265359
E1=100E-3 ! back tube's length
E2=20E-3
E3MIN=50E-3 ! minimum E3
E3MAX=150E-3 ! maximum E3
E3INC=50E-3 ! E3 step
! cone length E3
E4=100E-3 ! front tube's length
R1=50E-3 ! tube's internal radius
R2=57E-3 ! tube's external radius
R3=87E-3 ! biggest radius of the cone
NDIV1=2 ! number of elements along the tube's thickness
LDIV2=(R2-R1)/NDIV1
LDIV3=(R2-R1)/NDIV1
LDIV4=LDIV3*1.5
LDIV5=LDIV2
NDIV6=6
NDIV7=2
NDIV8=1 ! fixed
NDIV9=1 ! fixed
E1=(R2-R1)/NDIV1
D1=0.025
E2=D1/NDIV6 ! constant
EQ=4500 ! excitation frequency
PRESS=1 ! excitation pressure
!----- some initializations
*DIM,EF,FW,TABLE,NINT((E3MAX-E3MIN)/E3INC+1)
*DIM,EF_BW,TABLE,NINT((E3MAX-E3MIN)/E3INC+1)
II=1
EF_FW(0,1)=1
EF_BW(0,1)=1
*DO,E3,E3MIN,E3MAX,E3INC
EF_FW(II,0)=E3
EF_BW(II,0)=E3
II=II+1
*ENDDO
II=1
===== MAIN LOOP =====
*DO,E3,E3MIN,E3MAX,E3INC
PARSAV,ALL,propag9,par
/CLAR
PARRES,NEW,propag9,par
/PREP7
!----- elements
ET,1,PLANE42,0,1,1 ! axisymmetric structural
ET,2,FLUID29,0,1 ! acoustic fluid with fluid-structure interface
!----- materials
! steel - material 1
MP,EX,1,207E9
MP,DENS,1,7800
! fluid with total absorption - material 2
MP,DENS,2,7800
MP,MU,2,1
MP,SONC,2,5150

```

```

!----- geometric model
K,1,R1,E1+E2
K,2,R3,E1+E2
K,3,R2,E1+E2+E3
K,4,R1,E1+E2+E3
A,1,2,3,4
RECTNG,R1,R2,-F1,0
RECTNG,R1,R2,0,E1
RECTNG,R1,R2,E1+E2+E3
RECTNG,R1,R2,E1+E2+E3+E4
RECTNG,R1,R2,E1+E2+E3+E4,E1+E2+E3+E4+E1
RECTNG,R3-D1,R3,E1-F2,E1
AGLUE,ALL
APLOT
LESIZE,23,,NDIV1
LESIZE,19,,NDIV1
LESIZE,3,,NDIV1
LESIZE,7,,NDIV1
LESIZE,11,,NDIV1
LESIZE,5,,NDIV1
LESIZE,31,LDIV2
LESIZE,32,LDIV2
LESIZE,37,LDIV3
LESIZE,38,LDIV3
LESIZE,2,LDIV4
LESIZE,4,LDIV4
LESIZE,29,LDIV5
LESIZE,30,LDIV5
LESIZE,36,,NDIV6
LESIZE,25,,NDIV6
LESIZE,39,,NDIV7
LESIZE,6,,NDIV8
LESIZE,8,,NDIV8
LESIZE,33,,NDIV8
LESIZE,34,,NDIV8
LESIZE,35,,NDIV9
LESIZE,35,,NDIV9
LESIZE,1,,NDIV1+NDIV6+NDIV7
TYPE,2
MAT,2
ESHAPE,2
! quadrilaterals only
AMESH,2
AMESH,10
AMESH,11
LESIZE,S,,23
LESIZE,A,,5
NSLL,S,1
! internal nodes and keypoints
SF,ALL,IMPD,1
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
LESIZE,S,,25
NSLL,S,1
SF,ALL,FSI
SF,ALL,IMPD,1
LESIZE,S,,19
LESIZE,A,,7
LESIZE,A,,36
NSLL,S,1
! internal nodes and keypoints
SF,ALL,FSI
SF,ALL,IMPD,0
NSEL,ALL
LESIZE,ALT
TYPE,1
MAT,1
AMESH,8
AMESH,9

```

```

LSEL,S,,,11
LSEL,S,,,39
LSEL,S,,,36
LCAT,ALL
LSEL,ALL
LSEL,1C
AMESH,1C
ESHAPE,0 ; quadrilaterals or triangles
AMESH,1
LDELE,3
NUMMRG,ALL
EPILOT
FINISH
----- SOLVING -----
/ SOLU
ANTYPE,HARM
HROPT,FULL
KBC,1
HROUT,ON ; output in real-imaginary
HARFEQ,EQ
SFL,36,PRES,PRESS
NSEL,ALL
LSEL,ALL
SOLVE
FINISH
----- POST-PROCESSING -----
/POST1
SET,,,0,EQ ; loads solution - real part
LCDEF,1,,,1 ; creates LOADCASE with the imaginary part
LCOPER,SRSS,1 ; calculates modulus
LPATH,6,9 ; valid only for the mesh NDIV1=2 NDIV6=6 NDIV7=2
PDEF,S,Y,SX
PDEF,S,Y
PDEF,S,X
PDEF,S,Y,SX
PDEF,S,X
PDEF,U,Y,UY
PDEF,U,Y,UY
PLPATH,U,Y
----- power -----
NFW=9 ; if only E3 is changed, these values don't change
NBM=6
N1=21
N2=26
N3=25
N4=24
N5=23
N6=22
N7=20
OMEGA=2*PI*F0
STEP=C1/NDIV6
R1=R3-STEP-5*STEP
R2=R3-STEP/2-5*STEP
R3=R3-STEP/2-4*STEP
R4=R3-STEP/2-3*STEP
R5=R3-STEP/2-2*STEP
R6=R3-STEP/2-STEP
R7=R3-STEP/2
R8=R3
AREA1=PI*(R2**2-R1**2) ; annular areas
AREA2=PI*(R3**2-R2**2)
AREA3=PI*(R4**2-R3**2)
AREA4=PI*(R5**2-R4**2)
AREA5=PI*(R6**2-R5**2)
AREA6=PI*(R7**2-R6**2)
AREA7=PI*(R8**2-R7**2)
AREA0=PI*(R2**2-R1**2) ; tube transversal section area

```

```

=====
; loads solution - real part
SET, , , 0, EQ
*GET, SYR, FM, NODE, N, FM, S, Y
*GET, SYR, BM, NODE, N, BM, S, Y
*GET, UVR, FM, NODE, N, FM, U, Y
*GET, UVR, BM, NODE, N, BM, U, Y
; loads solution - imaginary part
SET, , , 1, EQ
*GET, SYI, FM, NODE, N, FM, S, Y
*GET, SYI, BM, NODE, N, BM, S, Y
*GET, UVI, FM, NODE, N, FM, U, Y
*GET, UVI, BM, NODE, N, BM, U, Y
*GET, UYI1, NODE, N1, U, Y
*GET, UYI2, NODE, N2, U, Y
*GET, UYI3, NODE, N3, U, Y
*GET, UYI4, NODE, N4, U, Y
*GET, UYI5, NODE, N5, U, Y
*GET, UYI6, NODE, N6, U, Y
*GET, UYI7, NODE, N7, U, Y
VR1=-OMEGA*UYI1
VR2=-OMEGA*UYI2
VR3=-OMEGA*UYI3
VR4=-OMEGA*UYI4
VR5=-OMEGA*UYI5
VR6=-OMEGA*UYI6
VR7=-OMEGA*UYI7
P1=AREA1*VR1
P2=AREA2*VR2
P3=AREA3*VR3
P4=AREA4*VR4
P5=AREA5*VR5
P6=AREA6*VR6
P7=AREA7*VR7
P_BM=AREA0*(-SYR, FM*OMEGA*UYI, FM+SYI, BM*OMEGA*UYR, BM)/2
P_FM=AREA0*(-SYR, FM*OMEGA*UYI, FM+SYI, FM*OMEGA*UYR, FM)/2
PT=(P1+P2+P3+P4+P5+P6+P7)/2
EF_FM_T=P_FM/PT*100
EF_BM_T=P_BM/PT*100
; temporary
; temporary
FINISH
EF_FM(II)=ABS(EF_FM_T)
EF_BM(II)=ABS(EF_BM_T)
; forward efficiency
; backward efficiency
PARSAV, ALL, propag9, par
II=II+1
*ENDDO
=====
MAIN LOOP END
=====

```

```

; Propag19.mac ----- calculates the reactive impedance of an adaptor-tube assembly.
; Harmonic analysis.
; Layers of structural elements at the ends simulating damping.
; Internal layer of fluid with absorption.
;
; Script for ANSYS 5.1
;
; Marcelo Y. Matuda
-----
/FILENAME,propag19
/TITLE,propag19
/UNITS,SI
/CONFIG,NVRAG,256 ; more memory to the database (44.4 Mbyte)
/SIZ_VPAG=45504 (182018 byte)
; workspace=56
/CONFIG,STAT
PI=3.1416
;----- parameters
C1=300E-3
C2=300E-3
C3=20E-3
C4=20E-3
C5=300E-3
C6=300E-3
C7=50E-3
DT=30.2E-3
R1=50E-3
R2=57E-3
R3=102.5E-3
E1=(R2-R1)
E2=E1
NDIV1=1
LDIV1=(R2-R1)/NDIV1
LDIV2=(R2-R1)*10
LDIV3=(R2-R1)*1.5
LDIV4=(R2-R1)*1
LDIV5=(R2-R1)*1.5
LDIV6=(R2-R1)*1
LDIV7=2
LDIV8=6
LDIV9=NINT(C7/LDIV10)
EQ_MIN=3000
EQ_MAX=7000
EQ_N=41
*DIM,ZR,TABLE,EQ_N
*DIM,ZI,TABLE,EQ_N
P_RESS=1
ANGUI=18
; excitation pressure
;----- steel and other parameters
EEX=207E9 ; steel's Young's modulus
DDENS=7800 ; steel's density
CC=SQRT(EEX/DDENS) ; steel's propagation velocity
A=1E8 ; damping parameters
BETA=A*E1/CC
; some initializations
ZR(0,1)=1
ZI(0,1)=1
II=1
*DO,EQ,EQ_MAX,(EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ_N-1)
ZR(II,0)=EQ
ZI(II,0)=EQ
II=II+1
*ENDDO

```



```

!----- steel cylindrical tube and fluid layers
      C1
      R1,R2
      RECTNG,C1
      C1+C2
      R1,R2
      RECTNG,C1
      C1+C2+C3
      R1,R2
      RECTNG,C1+C2
      C1+C2+C3
      R1,R1-E2
      RECTNG,C1
      C1+C2
      R1,R1-E2
      RECTNG,0
      C1
      R1,R1-E2
      ! fluid
      RECTNG,C1
      C1+C2+C3-C4
      R1,R2
      RECTNG,C1+C2+C3
      C1+C2+C3
      R1,R3
      RECTNG,C1+C2
      C1+C2+C3-C4
      R1,R2
      RECTNG,C1+C2+C3+C4
      C1+C2+C3+C4+C5
      R1,R2
      RECTNG,C1+C2+C3+C4
      C1+C2+C3+C4+C5
      R1,R1-E2
      RECTNG,C1+C2+C3+C4
      C1+C2+C3+C4+C5
      R1,R1-E2
      RECTNG,C1+C2+C3+C4+C5
      C1+C2+C3+C4+C5+C6
      R1,R1-E2
      RECTNG,C1+C2+C3+C4+C5+C6
      R1,R2
      ASEL,S,,,29
      ASEL,A,,,34
      ASEL,A,,,35
      ASEL,A,,,36
      ASEL,A,,,37
      AGLUE,ALL
      ASEL,ALL
      ASEL,S,,,38
      ASEL,A,,,39
      ASEL,A,,,40
      ASEL,A,,,41
      ASEL,A,,,42
      ASEL,A,,,43
      AGLUE,ALL
      ASEL,ALL
      ASEL,S,,,52
      ! steel
      LSEL,S,,,50
      LSEL,A,,,50
      LSEL,A,,,58
      LSEL,A,,,72
      LSEL,A,,,70
      LSEL,A,,,74
      LSEL,S,,,80
      ! fluid
      LSEL,A,,,78
      LSEL,A,,,82
      LSEL,A,,,86
      LSEL,A,,,90
      LSEL,A,,,94
      LSEL,A,,,98
      LSEL,S,,,1
      LSEL,S,,,49
      ! steel
      LSEL,A,,,51
      LSEL,A,,,77
      LSEL,A,,,79
      LSEL,S,,,105
      ! fluid
      LSEL,A,,,60
      LSEL,A,,,65
      LSEL,S,,,73
      ! fluid
      LSEL,A,,,68
      LSEL,S,,,103
      ! steel
      LSEL,A,,,104
      LSEL,A,,,107
      ! fluid
      LSEL,A,,,108
      LSEL,S,,,106
      ! steel
      LSEL,S,,,66
      ! steel
      LSEL,S,,,66
      LSEL,S,,,NDIV1+NDIV6
      LSEL,ALL
      ESHAPE,2
      TYPE,1
      AMESH,29
      AMESH,45
      LCCAT,58,106
      AMESH,46
      LDELETE,81

```

VR0TAT,146,143,144,145,147,148,9,10,ANGU1-180,2  
ESIZE,,NDIV8  
MAT,3  
TYPE,4  
ASEL,ALL  
ARSYM,Y,ALL  
ASEL,A,,,48  
ASEL,A,,,47  
ASEL,A,,,37  
ASEL,A,,,35  
ASEL,A,,,34  
ASEL,S,,,38

VR0TAT,38,34,35,37,47,48,9,10,ANGU1  
ESIZE,,NDIV7  
MAT,3  
TYPE,4  
i fluid

VR0TAT,67,69,71,68,70,,9,10,ANGU1-180,2  
ESIZE,,NDIV8  
MAT,1  
TYPE,2

ASEL,ALL  
ARSYM,Y,ALL  
ASEL,A,,,45  
ASEL,A,,,36  
ASEL,A,,,46  
ASEL,A,,,44  
ASEL,S,,,29

VR0TAT,29,44,46,36,45,,9,10,ANGU1  
ESIZE,,NDIV7  
MAT,1  
TYPE,2  
i 3D generation

AMESH,48  
AMESH,47  
AMESH,37  
AMESH,35  
AMESH,34  
AMESH,38  
TYPE,3

ESHAP,2  
i fluid  
i quadrilaterals only  
AMESH,44  
AMESH,36

KESE,36,LDIV2  
i steel  
KESE,37,LDIV2  
KESE,56,LDIV2  
i fluid  
KESE,40,LDIV3  
i steel  
KESE,41,LDIV3  
KESE,60,LDIV3  
i fluid  
KESE,61,LDIV3  
KESE,47,LDIV4  
i steel  
KESE,50,LDIV4  
KESE,50,LDIV4  
i fluid  
KESE,68,LDIV4  
KESE,69,LDIV4  
i fluid  
KESE,48,LDIV5  
i steel  
KESE,49,LDIV5  
KESE,72,LDIV5  
i fluid  
KESE,73,LDIV5  
AMESH,44  
AMESH,36



```

!----- steel - conical section
A,45,44,47,50
LSEL,S,,,330
LSEL,A,,,329
LSEL,ALL,LDIV4
ESHAPE,0 ; quadrilaterals and triangles
TYPE,2
MAT,1
ESIZE,,NDIV7
VROTAT,199,,,,,9,10,ANGU1
ASEL,S,,,199
ARSYM,Y,ALL
ASEL,ALL
TYPE,2
MAT,1
ESIZE,,NDIV8
VROTAT,205,,,,,9,10,ANGU1-180,2
NUMMRG,ALL
ACLEAR,ALL ; deletes plane elements
!----- transducer's front metal mass
K,0,C1+C2-C7,((R3+R2)/2)+(DT/2),0
K,0,C1+C2-C7,((R3+R2)/2)-(DT/2),0
K,0,C1+C2-C7,((R3+R2)/2)+(DT/4),1.732*DT/4
K,0,C1+C2-C7,((R3+R2)/2)-(DT/4),1.732*DT/4
V,46,66,59,41,35,39,51,38
LSEL,S,,,79
LSEL,A,,,101
LSEL,A,,,106
LSEL,A,,,110
LSEL,ALL,NDIV6
LSEL,S,,,113
LSEL,A,,,97
LSEL,A,,,74
LSEL,A,,,87
LSEL,ALL,NDIV7
LSEL,S,,,76
LSEL,A,,,52
LSEL,A,,,85
LSEL,A,,,91
LSEL,ALL,NDIV9
LSEL,ALL
ESHAPE,2 ; quadrilaterals only
TYPE,2
MAT,1
VMESH,43
NUMMRG,ALL
!-----
! loads at the fluid elements
! obs.: doesn't work with SEM
ESEL,S,TYPE,,4 ; selects the fluid elements only
ASEL,S,,,39 ; external
ASEL,A,,,75
ASEL,A,,,49
ASEL,A,,,102
ASEL,A,,,79
ASEL,A,,,53
ASEL,A,,,107
ASEL,A,,,84
ASEL,A,,,133
ASEL,A,,,187
ASEL,A,,,162

```



```

ASEL,S,,,95
NSLA,S,1
CP,NEXT,UX,ALL
*GET,NN,NODE,,NUM,MIN
NSEL,ALL
ASEL,ALL
----- SOLVING -----
/SOLU
ANTYPE,HARM
HROPT,FULL
KBC,1
HROUT,ON
; real-imaginary
HARREQ,EQ
NSEL,S,LOC,Z,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
ASEL,S,,,95
NSLA,S,1
SF,ALL,PRESS,PRESS
NSEL,ALL
ASEL,S,,,95
NSLA,S,1
ASEL,S,1
SF,ALL,PRESS,PRESS
NSEL,ALL
ASEL,ALL
SAVE
SOLVE
FINISH
----- POST-PROCESSING -----
/POST1
; loads solution - real part
SET,,,0,EQ
UXR=UX(NN)
; loads solution - imaginary part
SET,,,1,EQ
UXI=UX(NN)
FINISH
VXR=-2*PI*EQ*UXI
VXI=2*PI*EQ*UXR
; velocity
ZR(II)=VXR/(VXR*VXR+VXI*VXI)
ZR(II)=-VXI/(VXR*VXR+VXI*VXI)
; reactive impedance
PARSAV,ALL,propag19,par
II=II+1
*ENDDO
===== MAIN LOOP END =====

```

```

th4.mac -----
! Sandwich transducer with 4 ceramic disks.
! Harmonic analysis.
! Considers pre-stress bolt, nuts and an acoustic impedance at
! the front end of the transducer.
! Script for ANSYS 5.1
!
! Marcelo Y. Matuda
-----
/FILNAME,th4
/TITLE,th4
/UNITS,SI
PARRES,NBW,th4_1,par
! loads the acoustic impedance
! EQ_MIN
! EQ_MAX
! EQ_N
! number of frequencies (minimum of 2)
! ZR(EQ_N)
! real part of the specific impedance
! ZI(EQ_N)
! imaginary part of the specific impedance
! th4_1.par contains ANSYS commands that set the needed parameters
PI=3.141592654
PI2=PI*2
!----- parameters
R1=0.007/2
! bolt's radius
R2=0.0075/2
! transducer's internal radius
R4=0.0275/2
! transducer's external radius
R3=0.0133/2
! nut's external radius
L1=0.0217
! nut's length
L2=0.130
! back mass' length
L3=0.00995
! ceramic disks' length
L4=0.010
! front mass' length
EXCV=300
! excitation voltage
ET SIZE=L3/4
! desired element size
L5=0.02
! length of the element that simulates impedance
!----- initialization
! DIM,ZR1,TABLE,EQ_N
! DIM,ZI1,TABLE,EQ_N
! and final results
! DIM,IR1,TABLE,EQ_N
! DIM,I11,TABLE,EQ_N
! DIM,MODZ,TABLE,EQ_N
! DIM,TMP1,ARRAY,EQ_N
! DIM,TMP2,ARRAY,EQ_N
! DIM,TMP3,ARRAY,EQ_N
!--- fills the index row of the tables
ZR1(0,1)=1
ZI1(0,1)=1
IR1(0,1)=1
I11(0,1)=1
MODZ(0,1)=1
II=1
! DO,EQ,EQ_MIN,EQ_MAX,(EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ_N-1)
ZR1(II,0)=EQ
ZI1(II,0)=EQ
IR1(II,0)=EQ
I11(II,0)=EQ
MODZ(II,0)=EQ
II=II+1
*ENDDO
! DIM,Z_I,ARRAY,EQ_N
! important - allows the impedances to be accessed
*VOPER,Z_I(1),ZI(1),ADD
*VOPER,Z_R(1),ZR(1),ADD
!---- definition of the constants of the element simulating the impedance
! DIM,KEQ,ARRAY,EQ_N
! DIM,CEQ,ARRAY,EQ_N
! DIM,MEQ,ARRAY,EQ_N
ZIIOW=-0.1*PI*R4*R4
! a very low acoustic impedance

```

```

II=1
*DO, EQ, EQ_MIN, EQ_MAX, (EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ-N-1)
*IF, Z, I(II), LT, 0, THEN
KEQ(II) = (-Z_I(II)*PI*R4*R4-ZILOW)*(2*PI*EQ)
CEQ(II) = Z_R(II)*PI*R4*R4
MEQ(II) = 0
*ELSEIF, Z, I(II), EQ, 0
MEQ(II) = 0
CEQ(II) = (-ZILOW)*(2*PI*EQ)
KEQ(II) = Z_R(II)*PI*R4*R4
*ELSE
MEQ(II) = 0
CEQ(II) = Z_R(II)*PI*R4*R4
MEQ(II) = Z_I(II)*PI*R4*R4/(2*PI*EQ)
*ENDIF
II=II+1
*ENDDO
=====
MAIN LOOP =====
*DO, EQ, EQ_MIN, EQ_MAX, (EQ_MAX-EQ_MIN)/(EQ-N-1)
PARSAV, ALL, TH4, PAR
/CLEAR
PARRES, NEW, TH4, PAR
-----
/PREP7
-----
elements
ET, 1, PLANE13, 7, 1, 1 ; piezoelectric axisymmetric
ET, 2, PLANE42, , 1, 1 ; structural axisymmetric
ET, 3, LINK11 ; mass-spring-damper
-----
material properties
material 1
; piezoelectric ceramic - PZT-8
E31=-6.63 ; polarization direction is 3
E33=11.6 ;  $\epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{xy}$ 
E15=10.0
C11=188E9
C12=117E9
C13=108E9
C33=151E9
C44=31.3E9
; arbitrary
C66=C44
EPS11=900*8.854E-12
EPS33=600*8.854E-12
; fill piezoelectric matrix
TB, PIEZ, 1
TBDATA, 2, E31
TBDATA, 5, E33
TBDATA, 8, E31
TBDATA, 10, E15
TBDATA, 15, E15
; fill stiffness matrix
TB, ANEL, 1
TBDATA, 1, C11, C13, C12
TBDATA, 7, C33, C13
TBDATA, 12, C11
TBDATA, 16, C44
TBDATA, 19, C44
TBDATA, 21, C66
; density
MP, DENS, 1, 7600
; fill dielectric matrix
MP, PERX, 1, EPS11
MP, PERX, 1, EPS11
MP, PERZ, 1, EPS11
-----
material 2
; steel (back metal mass)
MP, DENS, 2, 7800
MP, EX, 2, 207E9
-----
material 3
; steel (front metal mass)
MP, DENS, 3, 7800
MP, EX, 3, 207E9

```

```

*GET,GROUND,NODE,NUM,MIN
CP,NEXT,VOLT,ALL
NSLL,S,1
LSEL,A,,,35
LSEL,A,,,27
LSEL,S,,,19
----- boundary conditions
D,NODE(R4,L2+4*L3+L4,0),UZ,0
D,NODE(R4,L2+4*L3+L4+L5,0),UX,UZ
----- boundary conditions
E,NODE(R4,L2+4*L3+L4,0),NODE(R4,L2+4*L3+L4+L5,0)
REAL,2
TYPE,3
----- element
N,NX(NODE(R4,L2+4*L3+L4,0)),NY(NODE(R4,L2+4*L3+L4,0))+L5
----- fixed node
----- element simulating impedance
NUMMRG,ALL
LDELETE,5
AMESH,18
MAT,3
TYPE,2
----- front mass
AMESH,19
MAT,2
TYPE,2
----- back mass
LCCAT,46,58
AMESH,13
AMESH,12
AMESH,11
AMESH,1
MAT,4
TYPE,2
----- bolt and nuts
ESYS,0
CSYS,0
AMESH,17
AMESH,15
ESYS,11
LOCAL,11,0,0,0,0,180,0,0
AMESH,16
AMESH,14
MAT,1
TYPE,1
----- ceramic disks
ESHAPF,2
LESIZE,ALL,EL_SIZE
----- mesh generation
APLOT
AGLUE,ALL
RECTNG,R2,R4,L2+4*L3,L2+4*L3+L4
RECTNG,R2,R4,L2+3*L3,L2+4*L3
RECTNG,R2,R4,L2+2*L3,L2+3*L3
RECTNG,R2,R4,L2+L3,L2+2*L3
RECTNG,R2,R4,L2,L2+L3
RECTNG,R2,R4,0,L2
RECTNG,0,R1,0,L2+4*L3+L4
RECTNG,R2,R3,0,-L1
RECTNG,R1,R2,0,-L1
RECTNG,0,R1,0,-L1
----- geometric model generation
R,1
R,2,KEQ(II),CEQ(II),MEQ(II)
; constants of the element simulating the impedance
REAL,1
MP,EX,4,207E9
MP,DENS,4,7800
; bolt and nuts
----- material 4

```

```

LSEL,S,,,23
LSEL,A,,,31
NSLL,S,1
CP,NEXT,VOLT,ALL
*GET,LIVE,NODE,,NUM,MIN
LSEL,S,,,15
LSEL,A,,,39
*GET,NODE,,NUM,MIN
LSEL,S,,,1
CP,NEXT,UY,ALL
*GET,N1,NODE,,NUM,MIN
NSLL,S,1
LSEL,ALL
LSEL,ALL
SAVE
FINISH
----- SOLVING -----
ANTYPE,HARM
HROPT,FULL
KBC,1
HROUT,ON
D,GROUND,VOLT,0
D,LIVE,VOLT,EXCV
HARFREQ,FQ
SAVE
SOLVE
FINISH
----- POST-PROCESSING -----
/POST26
RFORCE,2,LIVE,AMPS ; electric displacement flux in live electrodes (charge)
PRD,3,2,1,,MHOS,,,PI2 ; multiplies by frequencies
VGET,III(II),3,FQ,0 ; imaginary part of the current with changed sign
VGET,IRI(II),3,FQ,1 ; real part of the current
*VOPER,TMP1(1),IRI(1),MULT,IRI(1)
*VOPER,TMP2(1),III(1),MULT,III(1)
*VOPER,TMP3(1),ADD,TMP2(1)
*VEACT,EXCV
*VOPER,ZRI(1),DIV,TMP3(1)
*VEACT,EXCV
*VOPER,ZII(1),III(1),DIV,TMP3(1)
*VEACT,1
*VOPER,TMP1(1),ZRI(1),MULT,ZRI(1)
*VOPER,TMP2(1),ZII(1),MULT,ZII(1)
*VOPER,TMP3(1),ADD,TMP2(1)
*VFUN,MODZ(1),SORT,TMP3(1)
; modulus of the impedance
FINISH
PARSAV,ALL,th4,par
II=II+1
*ENDDO
===== MAIN LOOP END =====

```

**APÉNDICE C - Listagens dos programas MMC**

te.m

lchain.m

ri\_R1.m

ri\_X1.m



```

% tem (MATLAB script)
% (transducer) e(xtensional)
% Chain matrix model of a sandwich transducer with
% 2n piezoelectric ceramic disks and two metal masses,
% extensional vibration mode, considers pre-stress bolt.
% Considers electrodes, nuts and visible parts of bolt too.
% Loaded by a reactive impedance of a fluid medium, as seen by a
% flat piston surrounded by an infinite baffle.
% Requires ichain.m, ri_RI.m and ri_XI.m
% You may change this program provided that you
% acknowledge the source.
% Rubens A. Sigelmann
% February 26, 1996
% Extensional mode modifications by Marcelo Y. Matuda
clear;
nCer=4; % number of ceramic disks, must be even and non-zero
if (nCer<2)|(rem(nCer,2)~=0);
error('Number of ceramics must be 2 or more and be even!');
end
% ----- frequencies -----
FMin=7000; % lowest frequency
FMax=15000; % highest frequency
nFreq=401; % number of frequencies (minimum of 2)
for n=1:nFreq,
F(n)=FMin+(n-1)*(FMax-FMin)/(nFreq-1); % fills frequency vector
end
% ----- external impedances -----
% infinite fluid medium, interface considered to be a flat piston
% surrounded by an infinite baffle
% fluid: water
mF_d=1000; % mass density
mF_c=1500; % propagation velocity
mF_r=0.0275/2; % radius of the interface area
% --- reactive impedance of the fluid medium
mF_2kr=2*(2*pi*c)/mF_r;
% impedance of the medium on the right
Zexternal_r=mF_d*pi*(mF_r^2)*(ri_RI(mF_2kr)+(j*ri_XI(mF_2kr)));
Zexternal_l=Zexternal_r; % impedance of the medium on the left
Zexternal_l=zeros(1,nFreq);
% ----- material properties -----
% piezoelectric ceramics material: PZT-8
mC=zeros(1,10); % initialzes material properties and dimension vector
mC(1)=188e9; % CE11
mC(2)=117e9; % CE12
mC(3)=108e9; % CE13
mC(4)=151e9; % CE33
mC(5)=-6.63; % e31
mC(6)=11.6; % e33
mC(7)=600*8.854e-12; % eps33
mC(8)=7600; % permittivity
mC(9)=0.00995; % mass density
mC(10)=pi*((0.0273^2)-(0.0077^2))/4; % section area
mC1=mC; % ceramic with inverted polarity
mC1(5)=-mC1(5); % changes sign of e31
mC1(6)=-mC1(6); % changes sign of e33
% --- material of the mass on the right: steel
mMr=zeros(1,10); % initialzes material properties and dimension vector
mMr(1)=278.6e9; % CE11
mMr(2)=119.4e9; % CE12
mMr(3)=mMr(2); % CE13
mMr(4)=mMr(1); % CE33
mMr(5)=0; % e31
mMr(6)=0; % e33
% piezoelectric matrix
mMr(6)=0;

```

```

nmr(7)=0; % eps33
nmr(8)=7800; % mass density
nmr(9)=0.070; % length
nmr(10)=pi*(0.0275^2)-(0.0075^2)/4; % section area

% --- material of the mass on the left: steel
mM1=zeros(1,10);
mM1(1)=278.6e9; % CE11
mM1(2)=119.4e9; % CE12
mM1(3)=mM1(2); % CE13
mM1(4)=mM1(1); % CE33
mM1(5)=0; % e31
mM1(6)=0; % e33
mM1(7)=0; % eps33
mM1(8)=7800; % mass density
mM1(9)=0.070; % length
mM1(10)=pi*(0.0275^2)-(0.0075^2)/4; % section area

% initializes material properties and dimension vector
% elastic stiffness matrix
mM1=zeros(1,10);
mE(1)=1.46*119e9; % CE11
mE(2)=0.706*119e9; % CE12
mE(3)=mE(2); % CE13
mE(4)=mE(1); % CE33
mE(5)=0; % e31
mE(6)=0; % e33
mE(7)=0; % eps33
mE(8)=8908; % mass density
mE(9)=0.0001; % length
mE(10)=pi*(0.0273^2)-(0.0077^2)/4; % section area

% --- bolt material: steel
mB=zeros(1,10);
mB(1)=278.6e9; % CE11
mB(2)=119.4e9; % CE12
mB(3)=mB(2); % CE13
mB(4)=mB(1); % CE33
mB(5)=0; % e31
mB(6)=0; % e33
mB(7)=0; % eps33
mB(8)=7800; % mass density
mB(9)=0.0217; % length
mB(10)=pi*(0.0133^2)/4; % section area

% --- visible part of the bolt
% on the left
mB1=mB; % length
% on the right
mB2=mB; % length
% nuts material: same as bolt's
mN=mB;
mN(9)=0.0217; % length
mN(10)=pi*(0.0133^2)/4; % section area

% --- some initializations
% transducer's excitation voltage column matrix
V=zeros(nCsr,1);
for n1=0:(nCsr/2)-1,
    V((2*n1)+1,1)=-1;
    V((2*n1)+2,1)=1;
end

===== MAIN LOOP =====
for n=1:nFreq,
% --- obtains the inverse chain matrices
c_mass_l=ichain(mM1,I(n)); % mass on the left's inv. chain matrix
c_mass_r=ichain(mM2,I(n)); % mass on the right's inv. chain matrix
c_el=ichain(mB,I(n)); % electrodes' inv. chain matrix
c_bo=ichain(mB,I(n)); % bolt's inverse chain matrix

% includes leftmost electrode effect
c_mass_l=c_mass_l*c_el;

% bolt's inverse chain matrix
end

```

```

c_nut=ichain(mv,f(n)); % nuts' inv. chain matrix
c_vbo_l=ichain(mbl,f(n)); % visible part of the bolt on the left's inv. ch. matrix
c_vbo_r=ichain(mbr,f(n)); % visible part of the bolt on the right's inv. ch. matrix
c_extra_l=c_vbo_l*c_nut; % ch. matrix of nut + visible part of the bolt on the left
c_extra_r=c_vbo_r*c_nut; % ch. matrix of nut + visible part of the bolt on the right
Zextra_l=c_extra_l(1,2)/c_extra_r(2,2); % impedances due to nuts and visible parts
Zextra_r=c_extra_r(1,2)/c_extra_r(2,2); % of the bolt
Z_l=Zexternal_l(n)+Zextra_l; % imped. of the medium on the left + extra impedances
Z_r=Zexternal_r(n)+Zextra_r; % imped. of the medium on the right + extra impedances
c1=ichain(mcl,f(n)); % odd ceramics' inv. chain matrix
c2=ichain(mcr,f(n)); % even ceramics' inv. chain matrix
c1=c1*c_e1; % includes electrodes effects, each ceramic have
c2=c2*c_e2; % an electrode on its right face
% --- pre-multiplication of ch. mat. (c1_1 c1_2 ... c1_n c2_2 c2_3 ... c2_n ... cn_n)
for n1=(nCer+2):-1:1,
% --- c1=c1
if n1=1
c1=c_mass_l;
else if n1==(nCer+2)
c1=c_mass_r;
else if rem(n1,2)=0
% tests if even
command=sprintf('c%d_%d=c1;','n1,n1');
eval(command);
else
command=sprintf('c%d_%d=c2;','n1,n1');
eval(command);
% even piezoelectric disks
command=sprintf('c%d_%d=c1;','n1,n1');
eval(command);
% odd piezoelectric disks
end
end
% --- c1=c1*...*c1
for n2=(n1+1):(nCer+2),
command=sprintf('c%d_%d=c%d_%d*c%d_%d;','n1,n2,n1,n2-1,n2,n2');
eval(command);
end
end
% --- rearranged system matrix
command=sprintf('c=c1_%d;','nCer+2');
eval(command);
% temporary: c=c1_n
Z=zeros(nCer); % initializes impedance matrix
% ---- for each piezoelectric layer, IA current in that layer and zero in the others
for m=2:(nCer+1),
% rearranged system excitation column matrix
% E(1,m)=c1_m(1,4)-c1_m-1(1,4)
% E(2,m)=c1_m(2,4)-c1_m-1(2,4)
% E(3,m)=c1_m(3,4)-c1_m-1(3,4)
for ml=1:3,
command=sprintf('E(%d,m)=c1_%d(%d,%d)-c1_%d(%d,%d);','ml,m,ml,m-1,ml');
eval(command);
end
% solves rearranged system to find parameters at the end faces
eip=R\E; % eip=[F'n vn V0]' end faces' parameters
% initializes VI
VI=zeros(nCer,1); % voltage at face 1 due to current in ceramic m-1 is equal to voltage at face 0
VI(1)=eip(3,1);
% --- for each face from 2 to n-2 (voltages at faces 0,1,n-1,n already calculated)
for h=3:(nCer+1),
command=sprintf('c_tmp=c%d_%d;','h,nCer+2');
eval(command);
% temporary: c_tmp=c_h_n
end

```

```

% ----- calculation of transducer's electric impedance -----
end
% calculates impedance matrix elements:
% voltage differences between electrodes in each ceramic
for h=2:nCer,
  Z(h-1,m-1)=Vi(h)-Vi(h);
end
Z(nCer,m-1)=Vi(nCer);
end
% -----
end
% solves system
I=Z\V;
% sums the currents to obtain the total current
It=0;
for n1=0:(nCer/2-1),
  It=It+I((2*n1)+1,1);
  It=It+I((2*n1)+2,1);
end
zt(n)=1/It;
yt(n)=It;
% transducer electrical admittance
message=('Loop ' num2str(n) ' done. ');
end
% for each frequency
===== END OF MAIN LOOP =====

```

```

function [icm]=ichain(m,f)
% ichain.m (MATLAB script)
%
% function [icm]=ichain(m,f)
%
% icm(4x4) inverse chain matrix
%
% material properties and dimension vector
% m(1) CE11 elastic stiffness matrix
% m(2) CE12
% m(3) CE13
% m(4) CE33 piezoelectric matrix
% m(5) e31
% m(6) e33 piezoelectric matrix
% m(7) eps33 permittivity
% m(8) mass density
% m(9) length
% m(10) section area
%
% F frequency
%
% Calculates the elements of the inverse chain matrix. To invert
% the matrix just change the sign of the length.
% Extensional vibration mode.
% Accepts only metals and piezoelectric ceramics.
%
% You may copy and change this program provided that you
% acknowledge the source.
%
% Rubens A. Sigelmann
% June 12, 1995
%
% Extensional mode modifications by Marcelo Y. Matuda
%
% initializes the chain matrix as an identity matrix
icm=eye(4);
% auxiliar
% auxiliar
% angular frequency
w=2*pi*f;
CEdiv=m(1)+m(2);
%
% If m(6)=0 ----- metal
if m(6)==0
    e33m=m(4)-(2*(m(3)^2)/CEdiv);
    CE33m=m(4)-(2*(m(3)^2)/CEdiv);
    c=sqrt(CE33m/m(8));
    Z=m(8)*c*m(10);
    k1=(w/c)*m(9);
    cosk1=cos(k1);
    sink1=sin(k1);
    icm(1,1)=cosk1;
    icm(1,2)=j*sink1*Z;
    icm(2,1)=j*sink1/Z;
    icm(2,2)=cosk1;
else % ----- piezoelectric ceramic
    e33m=m(6)-(2*m(5)*m(3)/CEdiv);
    e33m=m(4)-(2*(m(3)^2)/CEdiv);
    CE33m=m(4)-(2*(m(3)^2)/CEdiv);
    c=sqrt(CE33m/m(8));
    Z=m(8)*c*m(10);
    k1=(w/c)*m(9);
    cosk1=cos(k1);
    sink1=sin(k1);
    icm(1,1)=cosk1;
    icm(1,2)=j*sink1*Z;
    icm(2,1)=j*sink1/Z;
    icm(2,2)=cosk1;
    eps33m=m(7)+(2*(m(5)^2)/CEdiv);
    eps33=c/sqrt((eps33m+(eps33m^2)/eps33m)/m(8));
    bt=eps33m/(w*eps33m);
    C=(eps33m*(10))/m(9);
    Z=m(8)*c*m(10);
    k1=(w/c)*m(9);
    cosk1=cos(k1);
    sink1=sin(k1);
    icm(1,1)=cosk1;
    icm(1,2)=j*sink1*Z;
    icm(2,1)=j*sink1/Z;
    icm(2,2)=cosk1;
    icm(1,2)=j*sink1*Z;
    icm(1,4)=j*bt*(cosk1-1);
    icm(2,1)=j*sink1/Z;
    icm(2,2)=cosk1;
    icm(3,1)=bt*sink1/Z;
    icm(3,2)=j*bt*(1-cosk1);
    icm(3,4)=(1/(j*w*C))+((j*sink1*(bt^2))/Z);
    icm(3,4)=1/(j*w*C)+((j*sink1*(bt^2))/Z);
end

```

```

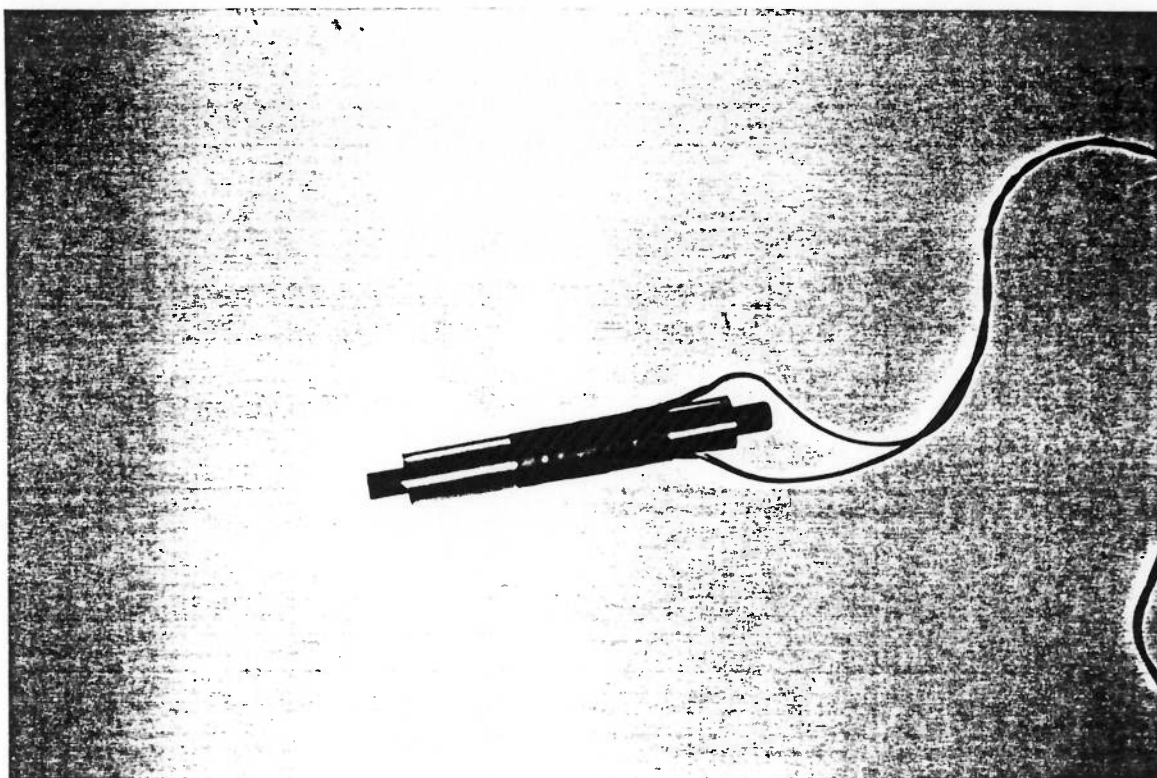
function Y=ri_X1(x)
% ri_X1.m (MATLAB script)
%
% function Y=ri_X1(x)
%
% R1 multiplied by the characteristic impedance of the medium and
% by the area of the piston, gives the reactance of radiation
% impedance.
% You may copy and change this program provided that you acknowledge
% the source.
% Rubens A. Sigelmann, October 10 1997
%
% calculates the number of components in the input vector
% performs the integration for each component of the vector
% sets the limits of integration and the steps
% auxlliar
% auxlliar
for n=1:2;
    I1=sin(x(n)*cos_a1).*sin_a1_2;
    a(n)=(4/pi)*sum(I1);
% calculates the value for each step
% performs the summation of the values
% empirical correction to improve accuracy
end
Y=a;

```

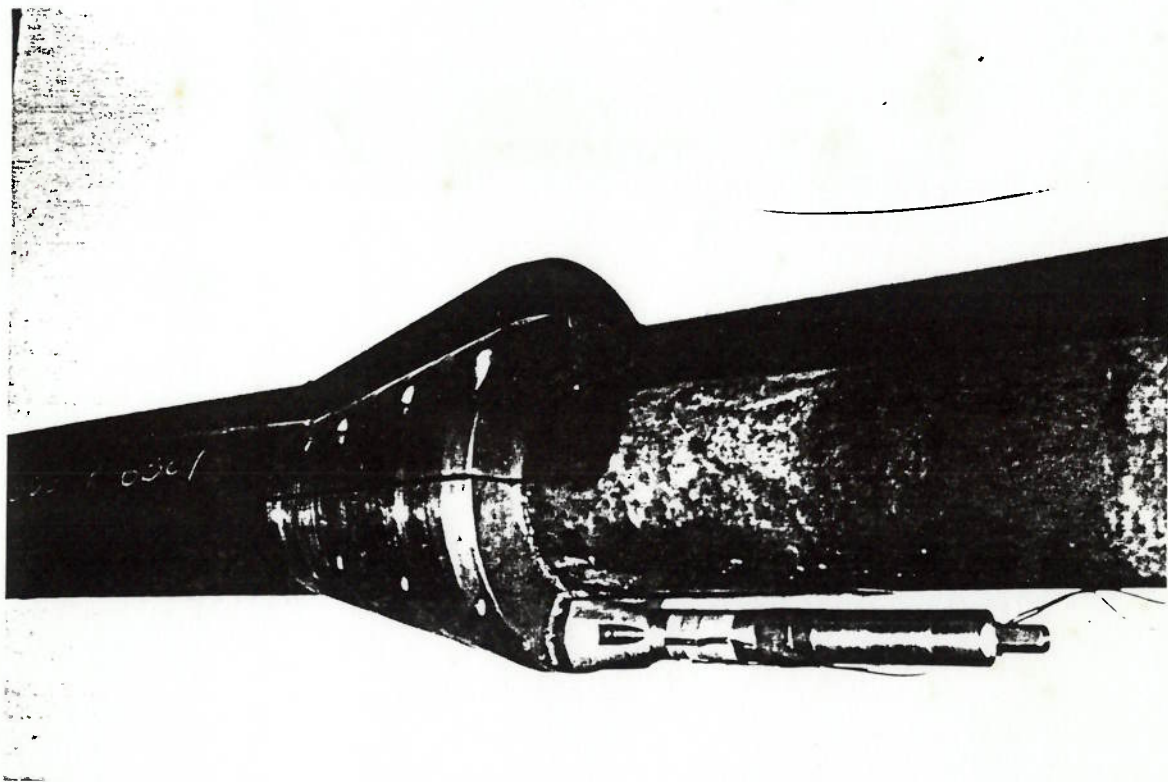
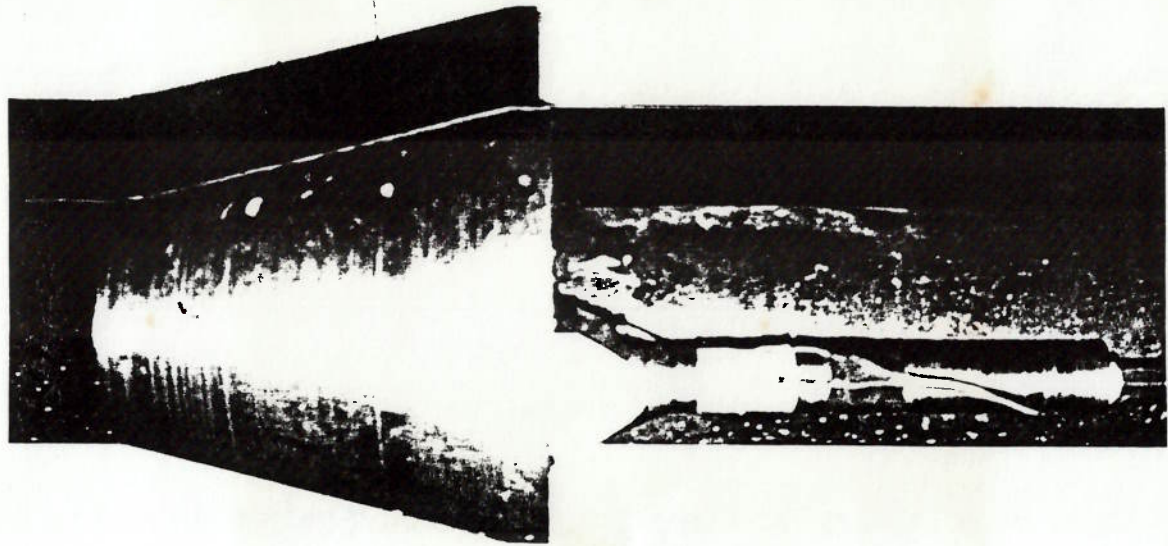
```

function Y=ri_R1(x)
% ri_R1.m (MATLAB script)
%
% function Y=ri_R1(x)
%
% R1 multiplied by the characteristic impedance of the medium and
% by the area of the piston, gives the resistance of radiation
% impedance.
% You may copy and change this program provided that you acknowledge
% the source.
% Rubens A. Sigelmann, October 7 1997.
%
% Y=1-(2*bessel(1,x+eps)./(x+eps));

```



**APÊNDICE D - Foto de um dos transdutores simétricos**



de 220 mm

APÊNDICE E - Fotos do conjunto transdutor-adaptador-tubo com o adaptador

111  
BC  
00/000000  
019  
D...