

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE GERAÇÃO DE RUÍDO EM REATORES DE NÚCLEO DE AR

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO ANTONIO FIORENTIN

Florianópolis, outubro de 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE GERAÇÃO DE RUÍDO EM REATORES DE NÚCLEO DE AR

THIAGO ANTONIO FIORENTIN

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHERIA MECÂNICA**

sendo aprovada em sua forma final.

Arcanjo Lenzi, Ph.D. – Orientador

Fernando Cabral, Ph.D. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Edison da Rosa, Dr. Eng.

Roberto Jordan, Dr. Eng.

Jorge Claudio da Silva Pinto, Dr.Eng.

“A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, inspiração e sabedoria recebidas no desenvolvimento deste trabalho.

A minha mãe, meu pai e meu irmão pelo amor, carinho, paciência e oportunidades oferecidas.

Ao orientador e amigo Arcanjo Lenzi, pela grande contribuição na minha formação profissional e pessoal.

Aos membros do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA), em especial à equipe do Grupo de Tecnologia em Vibrações e Acústica (GTVA) pelo companheirismo e ajuda.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à AREVA T&D pela infra-estrutura proporcionada.

Por último, a todos que, de maneira positiva ou negativa, contribuíram para o desenvolvimento dessa atividade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
SIMBOLOGIA	xii
RESUMO	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO 1 - Introdução	1
CAPÍTULO 2 - Características gerais dos reatores	3
2.1) Principais aplicações.....	4
2.1.1) Limitador de corrente de curto circuito	4
2.1.2) Alisamento ou <i>smoothing</i>	4
2.1.3) Fornos a arco elétrico	4
2.1.4) Filtro de harmônicas	5
2.1.5) Compensador estático.....	5
2.1.6) Partida de motores	5
2.2) Tecnologias de montagem.....	6
2.2.1) Tecnologia <i>FED (Fiber Encapsuled Design)</i>	6
2.2.2) Tecnologia <i>OSD (Open Style Design)</i>	7
CAPÍTULO 3 - Avaliação experimental de um protótipo	8
3.1) Características geométricas do reator analisado	8
3.2) Análise modal experimental	9
3.2.1) Procedimento de medição.....	10
3.2.2) Visualização.....	11
3.2.3) Resultados.....	13
3.3) <i>ODS (Operational Deflection Shape)</i>	15
3.3.1) Procedimento de medição.....	16
3.3.2) Visualização.....	18
3.3.3) Resultados.....	19
3.4) Medição de potência sonora através do nível de pressão sonora.....	20
3.4.1) Metodologia.....	21
a) IEEE C57.16-1996.....	21
b) IEC 60076-10	22
3.4.2) Procedimento de medição.....	23

3.4.3) Resultados.....	26
3.5) Medição de potência sonora através da sonda de intensidade.....	28
3.5.1) Metodologia.....	29
3.5.2) Procedimento de medição.....	29
3.5.3) Resultados.....	31
CAPÍTULO 4 - Forças de excitação.....	33
4.1) Introdução.....	33
4.2) Força eletromagnética radial.....	35
4.2.1) Indução do eixo de uma espira.....	35
4.2.2) Indução do eixo de uma bobina.....	36
4.2.3) Força eletromagnética radial.....	37
4.3) Força eletromagnética axial.....	38
4.3.1) Indução de um condutor retilíneo.....	38
4.3.2) Indução em uma bobina com <i>nbr</i> espiras.....	38
4.3.3) Força axial.....	41
CAPÍTULO 5 - Determinação experimental das propriedades elásticas dos materiais das paredes do reator.....	42
5.1) Método da viga livre-livre.....	43
5.1.1) Descrição do experimento.....	43
a) Frequência de ressonância do modo de flexão.....	44
b) Frequência de Ressonância do Modo de Torção.....	45
5.1.2) Procedimento Experimental.....	46
a) Módulo de Elasticidade para Viga a 90°.....	47
b) Módulo de Cisalhamento para Viga a 90°.....	48
c) Módulo de Elasticidade para Viga a 0°.....	50
d) Módulo de Cisalhamento para Viga a 0°.....	51
5.1.3) Resultados.....	52
5.2) Método da viga engastada.....	53
5.2.1) Descrição do experimento.....	53
5.2.2) Procedimento experimental.....	54
a) Módulo de Elasticidade para Viga a 90°.....	56
b) Módulo de Elasticidade para Viga a 0°.....	57
5.2.3) Resultados.....	58
5.3) Princípio de Arquimedes.....	58

5.4) Coeficiente de Poisson.....	61
CAPÍTULO 6 - Modelo analítico de vibração e de radiação sonora do reator.....	66
6.1) Modo de vibração radial	66
6.1.1) Deslocamento radial	66
6.1.2) Velocidade radial	68
6.1.3) Potência acústica na direção radial	69
6.2) Modo de vibração axial	70
6.2.1) Deslocamento axial.....	70
6.2.2) Velocidade axial	72
6.2.3) Potência acústica na direção axial	72
6.3) Nível de potência global	72
6.4) Nível de pressão sonora.....	73
CAPÍTULO 7 - Modelo numérico de vibração e de radiação sonora do reator	75
7.1) Modelo numérico estrutural.....	75
7.1.1) Forças de excitação.....	75
a) Força radial	75
b) Força Axial	77
7.1.2) Definição das propriedades mecânicas.....	77
7.1.3) Definição das condições de contorno	78
7.1.4) Resultados.....	79
7.2) Modelo numérico de radiação sonora (FEM).....	80
7.2.1) Definição das condições de contorno	81
7.2.2) Resultados.....	82
7.3) Modelo numérico de radiação sonora (BEM)	82
7.3.1) Definição das condições de contorno	83
7.3.2) Resultados.....	84
7.4) Comparação entre os Níveis de Potência Sonora	84
CAPÍTULO 8 - Conclusões	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Efeito torcional em um eixo de gerador devido à presença de correntes harmônicas [3]	5
Figura 2 – Desenho esquemático dos reatores com tecnologia <i>FED</i> [3].....	6
Figura 3 – Desenho esquemático dos reatores com tecnologia <i>OSD</i> [3].....	7
Figura 4 – Características geométricas do reator avaliado experimentalmente.....	9
Figura 5 – Vista dos pontos utilizados para obter as FRF's da estrutura.....	10
Figura 6 – FRF do ponto 37(força) em relação ao ponto 33(aceleração).	10
Figura 7 – Modelo da geometria utilizada para visualização da análise modal.....	11
Figura 8 – Espectro de força do martelo, função resposta em frequência (FRF) e coerência do ponto 37 em relação ao ponto 33(fixo).....	12
Figura 9 – Curva soma das FRF's, após o processo de estabilização.....	13
Figura 10 – Primeiro modo de vibração do reator, frequência de 46 Hz.....	14
Figura 11 – Segundo modo de vibração do reator, frequência de 76 Hz.....	14
Figura 12 – Quarto modo de vibração do reator, frequência de 105 Hz.....	15
Figura 13 – Quinto modo de vibração do reator, frequência de 170 Hz.....	15
Figura 14 - Alguns pontos onde foram feitas as medições de aceleração.	17
Figura 15 – Acelerômetro fixado no ponto de referência.	17
Figura 16 – Acelerômetro responsável pela aquisição dos sinais em todos os pontos, em detalhe ponto 111.	18
Figura 17 – Modelo da geometria utilizada para visualização da <i>ODS</i>	19
Figura 18 – <i>Crosspower Spectrum</i> resultante dos 150 pontos.....	19
Figura 19 – Forma de vibração do reator na frequência de 120 Hz, <i>breathing mode</i> , em branco a estrutura normal e em vermelho ela deformada.	20
Figura 20 – Distribuição dos pontos de medição do nível de pressão sonora ao longo do reator.	23
Figura 21 – Posicionamento do reator e microfone para medição do nível de pressão sonora	24
Figura 22 – Painel de controle elétrico, analisador e computador utilizados para aquisição dos sinais.....	24
Figura 23 – Nível de pressão sonora médio do reator em funcionamento a 0,3 m da superfície externa.	27

Figura 24 – Nível de potência sonora do reator em funcionamento com corrente elétrica de 200 Ampéres na frequência de 60 Hz, através de medições do nível de pressão sonora.....	27
Figura 25 – Densidade de fluxo de energia através de uma área elementar.....	28
Figura 26 – Nível de potência sonora do reator em funcionamento com corrente elétrica de 200 Ampéres na frequência de 60 Hz, através de medições de intensidade. ..	31
Figura 27 – Distribuição do campo magnético em torno de uma espira [13].....	33
Figura 28 – Indução magnética axial em uma espira.....	35
Figura 29 – Indução magnética em um ponto P do eixo da bobina.....	36
Figura 30 - Distribuição espacial de indução no eixo da bobina.....	37
Figura 31 – Distribuição da força e do campo magnético no domínio do tempo.....	38
Figura 32 – Distribuição de indução de um condutor retilíneo.....	38
Figura 33 – Indução radial da primeira espira.....	39
Figura 34 – Indução radial na bobina.....	40
Figura 35 – Sistema de eixos de ortotropia.....	42
Figura 36 - Diagrama com os equipamentos necessários para realizar o teste [15].	44
Figura 37 – Posição dos componentes para medir o modo de flexão [15].	45
Figura 38 – Posições para excitar o modo torcional [15].	46
Figura 39 – Modo de flexão da viga a 90°.....	47
Figura 40 – Curva de resposta em frequência da viga a 90° na condição livre-livre e apoios na posição para flexão.....	48
Figura 41 – Viga de material composto com fibras perpendiculares (90°) ao eixo 1.....	48
Figura 42 – Modo de torção da viga a 90°.....	49
Figura 43 – Curva de resposta em frequência da viga a 90° na condição livre-livre e apoios na posição para torção.....	50
Figura 44 – Modo de flexão da viga à 0°.....	50
Figura 45 – Curva de resposta em frequência da viga livre-livre a 0° e apoios na posição para flexão.....	51
Figura 46 – Viga de material composto com fibras paralelas (0°) ao eixo 1.....	51
Figura 47 – Modo de torção da viga à 0°.....	52
Figura 48 – Curva de resposta em frequência da viga a 0° na condição livre-livre e apoios na posição para torção.....	52
Figura 49 - Diagrama com os equipamentos necessários para realizar o teste.....	54
Figura 50 – Posição dos transdutores para medir o modo de flexão.....	54

Figura 51 – Curva de resposta em frequência da viga a 90° na condição engastada.	56
Figura 52 – Primeiro modo de vibração da viga (Fios 90°).....	57
Figura 53 – Curva de resposta em frequência da viga a 0° na condição engastada.	57
Figura 54 – Primeiro modo de vibração da vigas com fios a 0°.	58
Figura 55 – Determinação da massa do corpo de prova no ar.	59
Figura 56 - Determinação da massa aparente do corpo de prova.	60
Figura 57 – Malha de elementos finitos do reator formado por um cilindro.....	61
Figura 58 – Forma de deformação radial do reator.....	67
Figura 59 – Forma de radiação sonora quando submetido a uma força radial.	69
Figura 60 – Forma de deformação axial do reator.....	70
Figura 61 – Modelo de um sistema massa-mola-massa-mola.	70
Figura 62 – Área de contato entre dois condutores.....	71
Figura 63 – Distribuição do campo axial e da força radial ao longo da altura do reator. .	76
Figura 64 – Distribuição do campo radial e da força axial ao longo da altura do reator. .	76
Figura 65 – Sistema de coordenadas dos elementos da malha.	78
Figura 66 – Distribuição das componentes das forças radiais.	79
Figura 67 – Distribuição das forças axiais.....	79
Figura 68 – Deslocamento equivalente da parede do reator.	80
Figura 69 – Malha em elementos finitos utilizada para o modelo de radiação sonora.	80
Figura 70 – Condição de contorno de impedância.....	81
Figura 71 – Condição de contorno de painel vibrante aplicada no interior da malha.	81
Figura 72 – Distribuição dos níveis de pressão sonora.....	82
Figura 73 – Malha em elementos de contorno utilizada no modelo de radiação sonora. .	83
Figura 74 – Condição de contorno de painel vibrante.....	83
Figura 75 – Malha de <i>field points</i> criada em volta da malha de elementos de contorno. .	84
Figura 76 – Distribuição dos níveis de pressão sonora ao redor do reator.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características geométricas do reator.	8
Tabela 2 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.....	11
Tabela 3 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.....	18
Tabela 4 – Fatores de correção do nível de pressão sonora gerado pelo reator.....	21
Tabela 5 – Critérios para aceitação das medições efetuadas.	23
Tabela 6 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.....	24
Tabela 7 – Níveis de pressão sonora calculados em dB e dB(A).	26
Tabela 8 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.....	30
Tabela 9 – Equipamentos utilizados para realizar as análises.	46
Tabela 10 – Propriedades das amostras utilizadas no ensaio.....	46
Tabela 11 – Módulo de elasticidade e de cisalhamento calculados a partir dos testes.....	53
Tabela 12 – Equipamentos utilizados para realizar as análises.	55
Tabela 13 – Propriedades das amostras utilizadas no ensaio.....	56
Tabela 14 – Módulo de elasticidade calculado a partir das frequências naturais e propriedades das vigas.	58
Tabela 15 – Resultados da densidade para os diferentes corpos de prova.....	60
Tabela 16 – Variações do coeficiente de Poisson.....	62
Tabela 17 – Variações na densidade do material.....	63
Tabela 18 – Alterações do módulo de elasticidade na direção E_x	63
Tabela 19 – Alterações do módulo de elasticidade na direção E_y	64
Tabela 20 – Alteração do módulo de cisalhamento G_{xy}	64
Tabela 21 – Propriedades mecânicas utilizadas no modelo.....	78
Tabela 22 – Condições de operação do reator.	79
Tabela 23 – Níveis de Potência Sonora.	85

SIMBOLOGIA

A	Área (m ²)
A_1	Fator de correção para a torção;
A_2	Fator de correção para a torção;
b	Largura da viga (mm);
B	Campo de indução magnética (T);
\vec{B}	Vetor campo de indução magnética (T);
\vec{B}_x	Vetor campo de indução magnética na direção x (T);
\vec{B}_y	Vetor campo de indução magnética na direção y (T);
\vec{B}_z	Vetor campo de indução magnética na direção z (T);
B_{axial}	Campo de indução magnética axial (T);
$B_{médio,z}$	Campo de indução magnética médio na direção axial (T);
B_{radial}	Campo de indução magnética radial (T);
$B_{x,1}$	Campo de indução magnética na direção x na primeira espira (T);
$B_{x,2}$	Campo de indução magnética na direção x na segunda espira (T);
$B_{x,linear}$	Campo de indução magnética linearizado na direção x (T);
$B_{x,max}$	Campo de indução magnética máximo na direção x (T);
$B_{x,médio}$	Campo de indução magnética médio na direção x (T);
B_z	Campo de indução magnética na direção z (T);
c	Velocidade do som no ar (m/s);
C_c	Eficiência de radiação;
C_{cw1}	Coefficiente agrupando os termos constantes da potência sonora na radial;
C_{cw2}	Coefficiente agrupando os termos constantes da potência sonora na axial;
C_n	Coefficiente para o n modo de flexão;
C_{pcil}	Coefficiente agrupando os termos constantes da fonte cilíndrica;
C_{pesf}	Coefficiente agrupando os termos constantes da fonte esférica;

e	Espessura do cilindro (m);
e_{axial}	Deslocamento axial (m);
e_{fibra}	Espessura da fibra de vidro (m);
e_{radial}	Deslocamento radial (m);
E	Módulo de elasticidade (Pa);
E_{al}	Módulo de elasticidade do alumínio (Pa);
E_{eq}	Módulo de elasticidade equivalente (Pa);
E_{fv}	Módulo de elasticidade da fibra de vidro (Pa);
E_{iso}	Módulo de elasticidade do material que reveste o condutor (Pa);
E_x	Módulo de elasticidade na direção circunferencial ao reator (Pa);
E_y	Módulo de elasticidade axial do reator (Pa);
E_z	Módulo de elasticidade na direção radial do reator (Pa);
f_f	Frequência fundamental de ressonância da viga em flexão (Hz);
f_n	Frequência de ressonância do n modo de flexão da viga (Hz);
f_t	Frequência fundamental de ressonância da viga em torção (Hz);
\vec{F}	Vetor força eletromagnética (N);
F_{axial}	Força eletromagnética por unidade de comprimento na direção axial (N/m);
F_{radial}	Força eletromagnética por unidade de comprimento na direção radial (N/m);
$F_{Z,média}$	Força eletromagnética média por unidade de comprimento na direção z (N/m);
G	Módulo de cisalhamento (Pa);
G_{xy}	Módulo de cisalhamento no plano xy (Pa);
G_{xz}	Módulo de cisalhamento no plano xz (Pa);
G_{yz}	Módulo de cisalhamento no plano yz (Pa);
H	Altura da bobina elétrica (m);
h	Altura do reator sem as cruzetas (m);
i	Corrente elétrica (A);
is	Segmento is ;
\vec{I}	Vetor intensidade (W/ m ²);

I_{eff}	Corrente elétrica efetiva (A);
I_n	Intensidade sonora (W/m^2);
I_{nis}	Intensidade sonora do segmento is (W/m^2);
j	Contador;
K	Rigidez do material (N/m);
K_{alu}	Rigidez do alumínio (N/m);
K_{eq}	Rigidez equivalente (N/m);
K_{fibra}	Rigidez da fibra de vidro (N/m);
K_{fibra1}	Rigidez da fibra de vidro 1 (N/m);
K_{fibra2}	Rigidez da fibra de vidro 2 (N/m);
K_{iso}	Rigidez do material que reveste o fio (N/m);
\vec{l}	Vetor comprimento da espira (m);
l	Perímetro da superfície de medição (m);
l_c	Altura do material (m);
L	Comprimento da viga (mm);
Lp	Nível de pressão sonora (dB);
$Lp_{bg} (Antes)$	Nível de pressão sonora do ruído de fundo antes da medição (dB);
$Lp_{bgA} (Antes)$	Nível de pressão sonora do ruído de fundo antes da medição com a curva de ponderação A (dB(A));
$Lp_{bg} (Depois)$	Nível de pressão sonora do ruído de fundo depois da medição (dB);
$Lp_{bgA} (Depois)$	Nível de pressão sonora do ruído de fundo depois da medição com a curva de ponderação A (dB(A));
Lp_0	Nível de pressão Sonora do reator em funcionamento (dB);
Lp_{A0}	Nível de pressão Sonora do reator em funcionamento com a curva de ponderação A (dB(A));
L_w	Nível de potência sonora (dB);
m	Massa da viga (g);
m_c	Massa do corpo de prova (kg);
m_{ap}	Massa do corpo no líquido (kg);
n	número do modo de flexão da viga;
\hat{n}	Vetor do elemento de área;

N	Número de espiras por unidade de comprimento (1/m);
nbr	Número de espiras;
$n\text{espira}$	Número da espira onde está sendo determinado o campo magnético (T);
ns	Número total de segmentos;
NPS	Nível de pressão sonora (dB);
NWS	Nível de potência sonora (dB);
p	Pressão sonora (Pa);
p_{eff}	Pressão Sonora efetiva (Pa)
p_0	Pressão sonora de referência (Pa);
\vec{r}	Vetor distância de um ponto qualquer ao condutor (m);
r	Distância de um ponto qualquer ao condutor (m);
r_f	Distância da fonte sonora ao receptor (m);
R	Raio do cilindro (m);
S	Área da superfície de medição (m ²);
S_0	Área da superfície de referência (m ²);
S_{al}	Área da superfície de alumínio na seção transversal (m ²);
$S_{alu-iso}$	Área de contato entre o alumínio e o isolante (m ²);
$S_{fibra-fibra}$	Área de contato entre as fibras (m ²);
S_c	Área de contato entre os materiais (m ²);
S_{fv}	Área da superfície de fibra de vidro na seção transversal (m ²);
S_{is}	Área do segmento is (m ²);
S_{sv}	Área da superfície vibrante (m ²);
S_{total}	Área total da seção transversal (m ²);
t	Tempo (s);
t_K	Espessura da viga (mm);
T	Força de tração (N);
T_1	Fator de correção para o modo de flexão;
v	Velocidade da superfície vibrante (m/s);
v_{axial}	Velocidade na direção axial (m/s);

v_{radial}	Velocidade na direção radial (m/s);
W	Potência sonora (W);
W_0	Potência sonora de referência (W);
W_{axial}	Potência sonora na direção axial (W);
W_{is}	Potência sonora através do segmento is (W);
W_{rad}	Potência sonora na direção radial (W);
z	Distância do centro da espira a um ponto qualquer na direção z (m);
α	Ângulo de revolução (rad);
Δf	Variação de frequência (Hz);
ΔH	Aumento da altura (deslocamento) (m);
ΔR	Aumento do raio (deslocamento) (m);
ε	Deformação;
μ	Coefficiente de Poisson;
μ_0	Permeabilidade do meio (T.m/A);
μ_{xy}	Coefficiente de Poisson no plano xy ;
μ_{xz}	Coefficiente de Poisson no plano xz ;
μ_{yz}	Coefficiente de Poisson no plano yz ;
ρ	Densidade do material do reator (kg/m^3);
ρ_{ar}	Densidade do ar (kg/m^3);
ρ_C	Densidade do material da viga (kg/m^3);
ρ_L	Densidade do material do líquido (kg/m^3);
Σ	Área (m^2);
σ	Tensão (Pa);
ϕ	Diâmetro do condutor (m);
ψ	Ângulo entre a espira em um ponto qualquer distante dela (rad);
ψ_1	Ângulo entre a primeira espira em um ponto qualquer distante dela (rad);
ψ_2	Ângulo entre a última espira em um ponto qualquer distante dela (rad);
ω	Frequência (rad/s);

RESUMO

Reatores elétricos são equipamentos utilizados principalmente para limitar a corrente de curto-circuito ao longo de alguns sistemas, inibir a formação de tensões muito instáveis em fornos a arco durante o processo de fundição de ferro e reduzir as correntes harmônicas em sistemas de distribuição de energia. Como hoje em dia as subestações e as indústrias que utilizam esses equipamentos estão mais próximas aos centros urbanos, órgãos ambientais, principalmente na Europa e Estados Unidos, passaram a exigir a especificação do nível de potência sonora gerado por reatores elétricos. Dessa maneira, um estudo é realizado para caracterizar as forças de excitação que provocam a vibração das paredes do reator e geram ruído. Como as paredes dos reatores são formadas por fios de alumínio bobinados e encapsulados por resina e fibra de vidro, ensaios dinâmicos são realizados para caracterizar as propriedades mecânicas desse conjunto de materiais. Uma avaliação experimental de um protótipo é realizada para caracterizar os modos naturais de vibração, a forma de vibração do equipamento em funcionamento e o nível de potência sonora radiado. Para determinar a vibração das paredes do reator são desenvolvidos modelos analíticos e em elementos finitos. Já para determinar o nível de potência sonora são utilizados modelos analíticos, em elementos finitos e elementos de contorno. Na seqüência, os modelos de radiação sonora são comparados com resultados experimentais apresentando boa concordância. Dessa forma, é possível concluir que apesar de conterem algumas simplificações os modelos fornecem bons resultados.

ABSTRACT

Air core reactors are equipments used mainly to limit the current of short-circuit over some systems, inhibit the formation of tensions very unstable in the arc furnaces during the process of iron and reducing the current harmonics in power distribution systems. As nowadays the substation and the industries that use this equipment are close to the urban centers, environmental agencies, mainly in Europe and the United States, began to require the specification of the sound power level generated by air core reactors. Thus, a study is performed to characterize the forces that excite the walls of the reactor and produce vibration and noise. As the walls of the reactors are formed by wires of aluminum encapsulated by resin and fiberglass, dynamic tests are conducted to characterize the mechanical properties of this material. An experimental evaluation of the prototype is conducted to characterize the natural modes of vibration, the vibration shape in operation and the sound power level radiated. To determine the vibration of the walls of the reactor are developed analytical and finite element models, but to determine the sound power level are used analytical, finite elements and boundary elements models. Next the models of sound radiation are compared with experimental results showing good agreement. Thus, it can be concluded that even though the models contain some simplifications it can provide good results.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O crescimento econômico, populacional e o uso crescente de energia elétrica aumentaram progressivamente a demanda pela construção de linhas de transmissão. A falta de espaço, a necessidade das linhas estarem próximas dos grandes centros de consumo e o crescimento natural das cidades fazem com que itens deste sistema se tornem vizinhos a algumas comunidades. Basicamente, um sistema de transmissão é formado por linhas, cabos e subestações, que tem como principal função fazer a distribuição da energia gerada.

Em função da proximidade das subestações aos centros urbanos, órgãos ambientais, principalmente na Europa e Estados Unidos, passaram a exigir dos fabricantes de equipamentos para essas unidades a especificação do nível de potência sonora gerado por estes produtos. Entre os equipamentos necessários para o funcionamento de uma subestação podem ser destacados como as principais fontes de ruído os autotransformadores e os reatores elétricos.

Buscando auxiliar a empresa AREVA T&D a satisfazer as exigências dos órgãos ambientais e também melhorar a qualidade de vida da população vizinha às subestações, a presente dissertação tem como objetivo fornecer informações técnicas que permitam prever o nível de ruído gerado por reatores.

O material utilizado, forma construtiva, condições de operação, entre outros fatores, podem influenciar no nível de ruído radiado pelo reator. Dessa maneira uma análise dos parâmetros mais significativos será realizada.

Também, serão apresentados modelos teóricos utilizados para caracterizar as forças que excitam o reator, destacando-se as leis de Faraday e Lenz [1]. Faraday observou que sempre que houver uma variação de fluxo magnético através de uma espira, surge nela uma força eletromotriz (f.e.m) induzida. Já através de medições experimentais foi observado que a força induzida depende da intensidade da perturbação sofrida pelo fluxo que abraça a espira e também do número de espiras existentes. A explicação para esse fenômeno foi dada pelo físico alemão Lenz, sendo conhecida como Lei de Lenz.

Na seqüência, através de ensaios mecânicos serão determinadas as propriedades equivalentes do material em cada direção. A influência dessas propriedades na

resposta da estrutura também será analisada para avaliar como incertezas nas medições das propriedades podem afetar o modelo.

Além disso, será apresentada a avaliação experimental de um protótipo, pois através dela será possível caracterizar a forma de vibração de um reator nas condições normais de operação e também a capacidade de radiação sonora.

Modelos numéricos e analíticos serão desenvolvidos tanto para prever a resposta da estrutura como para determinar o nível de potência sonora gerado pelo reator. Comparações entre resultados numéricos e experimentais serão realizadas para verificar precisão e sensibilidade dos modelos.

Por fim, os resultados obtidos serão avaliados para verificar se atendem os objetivos propostos no início da dissertação. Além disso, serão apresentadas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS REATORES

Os reatores são dispositivos fabricados para introduzir indutância em um circuito elétrico, consistindo de uma série de espiras de um fio condutor bobinado capaz de produzir um fluxo magnético quando conduz corrente. As espiras podem ser enroladas em torno de um material magnético ou ter núcleo de ar. Utilizando um núcleo magnético, é capaz de armazenar uma quantidade maior de energia por unidade de corrente do que com ar.

O princípio de funcionamento do reator é baseado nas leis de Faraday e Lenz [1]. Através de experiências, Faraday observou que sempre que houver uma variação de fluxo magnético através de uma espira, surge nesta espira uma f.e.m. induzida. A este fenômeno foi dado o nome de indução eletromagnética. Esta força, em qualquer hipótese, é temporária e cessa quando se interrompe a variação do valor do fluxo que atravessa a espira. Através de medições, foi observado que a f.e.m. induzida depende da intensidade da perturbação sofrida pelo fluxo que abraça a espira e também do número de espiras existentes. A lei que permite obter a força é conhecida por Lei de Faraday. No entanto, esta f.e.m. induzida está em oposição com a causa que lhe deu origem e foi explicada inicialmente pelo físico alemão H.L.E.Lenz, sendo conhecida como Lei de Lenz.

Segundo Ferreira [2], uma f.e.m. pode ser induzida em um condutor ou em uma bobina, quando há uma variação na corrente que percorre o próprio elemento. Como se sabe, uma corrente fluindo ao longo de um condutor produz, em torno deste, um campo magnético. Quando a corrente muda de valor, o campo varia e induz no condutor uma f.e.m. Este efeito é chamado de auto-indução e a força a ele associada é conhecida como f.e.m. auto-induzida. Esta corrente percorrendo o fio produz um campo magnético que é capaz de armazenar energia. Se o campo magnético produzido por esta corrente está em um meio não ferromagnético, ou seja, em um meio no qual não existe material magnético nas vizinhanças, então o fluxo de ligação do circuito é proporcional à corrente que o produziu. A relação entre o fluxo e a corrente, ou seja, a constante de proporcionalidade é chamada de auto-indutância, indutância própria, ou simplesmente indutância da bobina.

A indutância do reator depende do formato do mesmo (área e comprimento), permeabilidade do material do qual é feito o núcleo, número de espiras, distância entre as espiras, forma como estas espiras são enroladas e outros fatores.

As principais partes constituintes de um reator são:

- o núcleo, que pode ser de ar ou de ferro;
- os enrolamentos que podem ser em disco, disco entrelaçado, helicoidal ou em camadas;
- o isolamento, que pode ser em mylar, nomex ou esmalte para o isolamento entre camadas/espiras.

2.1) Principais aplicações

Os reatores com núcleo de ar oferecem uma resposta linear de impedância versus corrente, o que é essencial para inúmeras aplicações. Segundo Alves [3], as principais aplicações são:

2.1.1) Limitador de corrente de curto circuito

Em sistemas de potência, quando se desejam reduzir possíveis correntes de curto-circuito causadas principalmente pela existência de um grande número de unidades geradoras, ou de unidades geradoras de porte elevado, em pontos específicos de um sistema, utilizam-se reatores em série. Nestas condições tem como função limitar correntes, salvaguardando a operação de componentes como disjuntores, chaves seccionadoras, TCs, etc.

2.1.2) Alisamento ou *smoothing*

Reatores de alisamento são utilizados para reduzir as correntes harmônicas e as sobrecorrentes transitórias em sistemas de corrente contínua.

Normalmente são usados em sistemas de transmissão de alta tensão em corrente contínua (HVDC) e aplicações industriais (retificadores, sistemas de tração,...).

2.1.3) Fornos a arco elétrico

Este reator provê a necessária correção do fator de potência e limita as correntes e tensões muito instáveis (*flicker*) do forno a arco, especialmente durante o processo de fundição.

Os fornos a arco direto (arco entre os três eletrodos verticais e a carga de resíduos ou o banho fluido) são os mais empregados para a produção de aço. A temperatura do arco alcança valores superiores a 3000°C.

As harmônicas produzidas por um forno a arco, usado na produção de aço, são imprevisíveis devido à variação aleatória do arco.

2.1.4) Filtro de harmônicas

O reator, em conjunto com capacitores e, ocasionalmente, com resistores (filtro amortecido), cria um circuito de filtro sintonizado em uma determinada frequência (frequência de ressonância) para reduzir, bloquear ou prover um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. A Figura 1 mostra o efeito resultante da presença de harmônicas em um eixo de um gerador.



Figura 1– Efeito torcional em um eixo de gerador devido à presença de correntes harmônicas [3].

2.1.5) Compensador estático

Os compensadores estáticos, que são controladores em paralelo, basicamente são compostos de bancos de capacitores e reatores. Através de controles adequados são inseridos e retirados estes bancos de tal modo que o compensador possa gerar (capacitor) ou absorver (reator) potência reativa.

2.1.6) Partida de motores

Conectados em série com o motor, limita as correntes de partida a valores pertinentes com a proteção instalada.

2.2) Tecnologias de montagem

Nesse trabalho serão modelados apenas os reatores elétricos com núcleo de ar tipo *FED*. No entanto, as duas tecnologias de montagem mais usadas e disponíveis no mercado são:

2.2.1) Tecnologia *FED* (*Fiber Encapsuled Design*)

O reator ou indutor consiste basicamente de uma bobina cujas espiras são formadas por vários condutores (fios) de alumínio ou cobre de pequena bitola, isoladas com filme de poliéster conectados em paralelo. Estes condutores são mecanicamente immobilizados e encapsulados por meio de um enrolamento de fibra de vidro, formando cilindros.

Dependendo da potência do reator, são utilizados um ou mais cilindros conectados em paralelo e distanciados entre si por meio de espaçadores de fibra de vidro, os quais promovem o resfriamento axial dos cilindros do reator. Nos extremos dos cilindros são colocadas duas cruzetas de alumínio que são firmemente interligadas por meio de amarrações isoladas de fibra de vidro. Todos os materiais empregados na fabricação dos reatores correspondem à classe B de isolamento, cuja temperatura máxima é de 130° C.

Para realizar a energização o reator pode ser ligado em qualquer polaridade. O cabo de linha é ligado através de conectores ao terminal de barra chata soldado nas cruzetas. A Figura 2 apresenta as partes de um reator tipo *FED*.

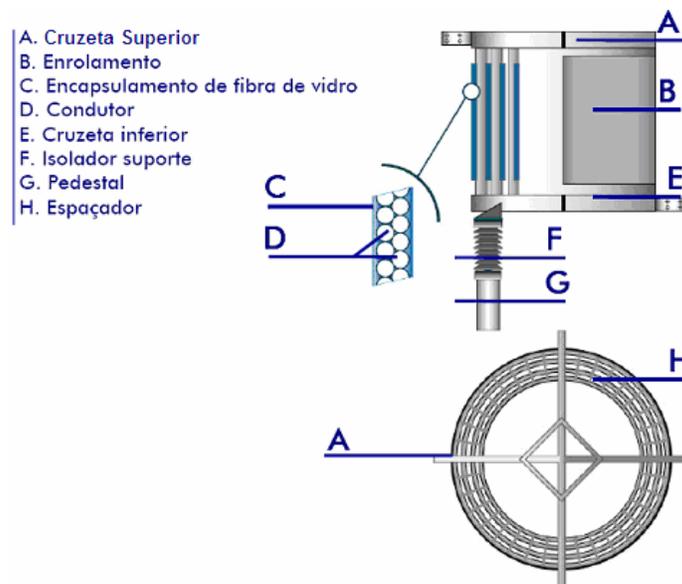


Figura 2 – Desenho esquemático dos reatores com tecnologia *FED* [3].

2.2.2) Tecnologia *OSD* (*Open Style Design*)

O reator ou indutor consiste basicamente de uma bobina cujas espiras são feitas de um perfil de alumínio de seção retangular. Este condutor de alumínio suporta a corrente da linha de transmissão e por isso é dimensionado de acordo com:

- corrente nominal da linha;
- correntes Harmônicas;
- nível de isolamento;
- classe de tensão.

As espiras são separadas em intervalos iguais por meio de calços de fibra de vidro de alta resistência mecânica. Na parte extrema dos enrolamentos, as duas cruzetas de alumínio são firmemente interligadas por meio de um ou mais tirantes isolados de fibra de vidro. Todos dos materiais utilizados correspondem à classe de isolamento de temperatura máxima de 155° C.

Essa montagem do reator também pode ser ligada em qualquer polaridade. O cabo de linha também deve ser ligado através de conectores ao terminal de barra chata soldado nas cruzetas. Na Figura 3 são apresentadas as partes de um reator tipo *OSD*.

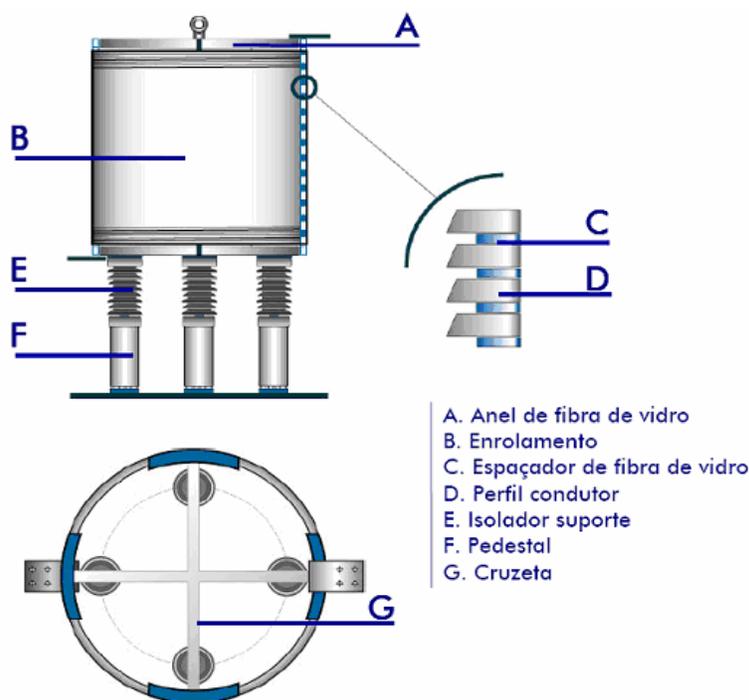


Figura 3 – Desenho esquemático dos reatores com tecnologia *OSD* [3].

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM PROTÓTIPO

Neste capítulo serão apresentadas as características físicas do reator analisado, bem como uma descrição detalhada dos métodos empregados para determinar seus modos naturais de vibração, comportamento dinâmico em funcionamento e nível de ruído gerado.

Ao longo de cada seção será feita a descrição geral do ensaio, procedimento de medição e resultados obtidos. Essa avaliação experimental é importante, pois alguns modelos dependem desses resultados para serem elaborados e também porque alguns resultados numérico/experimental serão confrontados.

3.1) Características geométricas do reator analisado

O reator utilizado nessa dissertação para avaliação experimental, bem como, para os modelos analíticos e numéricos apresenta as características geométricas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características geométricas do reator.

Descrição	Quantidade
Diâmetro do condutor [mm]	4,9
Diâmetro interno do reator [m]	1,084
Diâmetro externo do reator [m]	1,1
Altura total do reator [m]	1,515
Massa total do reator [kg]	93,0
Espessura do isolante [mm]	0,17
Número de espiras	122
Número de camadas	1
Número de fios na axial	2
Altura de espiras [m]	1,280
Número de cilindros concêntricos	1

A Figura 4 tem como objetivo auxiliar o entendimento das características apresentadas na Tabela 1.

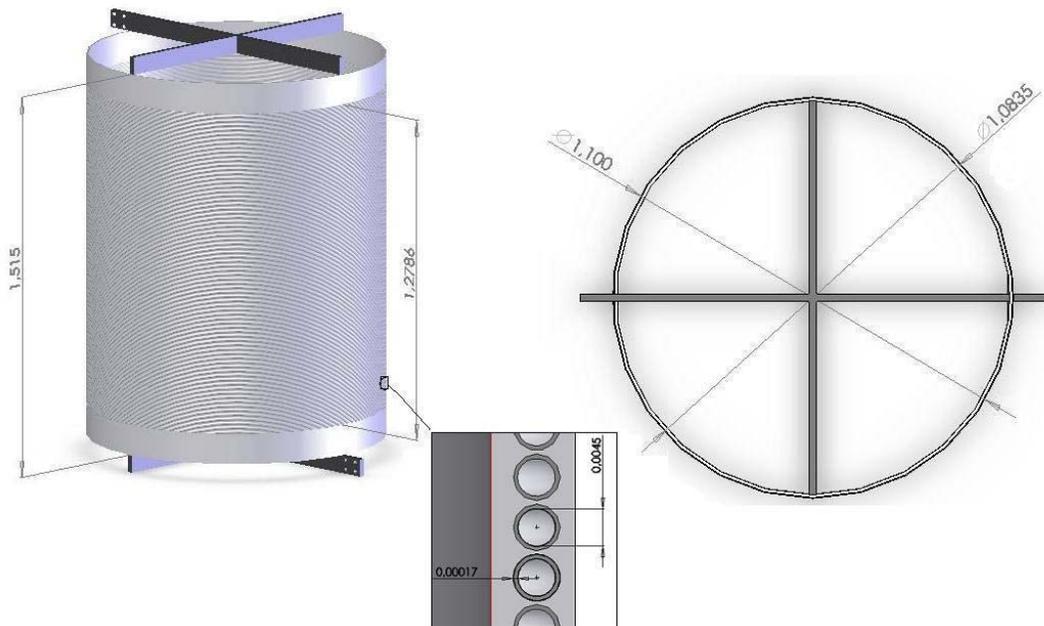


Figura 4 – Características geométricas do reator avaliado experimentalmente.

3.2) Análise modal experimental

Segundo Jordan [4], a análise modal experimental visa identificar os parâmetros modais da estrutura, a partir das respostas que a mesma apresenta quando submetida à excitação externa.

Os modos de vibração de uma estrutura são maneiras peculiares pelas quais o sistema tende a vibrar, sendo caracterizados normalmente por uma forma de vibração, uma frequência natural de vibração e um coeficiente de amortecimento. Quando vibrações são excitadas em uma estrutura, a sua resposta pode ser expressa através da combinação dos seus modos de vibração. Há, portanto, uma superposição das formas de vibração, com a presença simultânea de várias frequências naturais.

No procedimento analítico são geradas as matrizes de massa e de rigidez da estrutura e montado um problema de autovalores e autovetores. Experimentalmente, através das FRF's, também é possível encontrar a solução para esse problema. Os autovalores resultantes estão relacionados às frequências naturais dos modos de vibração e os autovetores representam as correspondentes formas de vibração.

3.2.1) Procedimento de medição

Desejando estabelecer os pontos nos quais seriam efetuadas as medições e obter bons resultados até a frequência de 800 Hz, foram marcados 10 pontos em cada uma das 15 linhas verticais, totalizando 150 pontos de medição, igualmente distribuídos. Depois de marcados foram numerados de 1 a 150, de baixo para cima em linhas verticais, como mostra a Figura 5.



Figura 5 – Vista dos pontos utilizados para obter as FRF's da estrutura.

Basicamente, o procedimento de medição consiste em impactar cinco vezes cada um dos 150 pontos com um martelo equipado com um transdutor de força e medir a aceleração da estrutura no ponto 33, fixo durante todas as medições. O ponto 33 foi escolhido para a medição das respostas, pois após alguns testes foi verificado que ele não corresponde a um nó de uma ou mais formas modais. Desta forma, o transdutor de força presente no martelo, responsável pela medição da força de excitação da estrutura, e o acelerômetro, responsável pela medição da aceleração, permitem calcular as funções resposta em frequência (FRF's) necessárias para determinar as frequências naturais (os autovalores) e os modos de vibração (os autovetores) do reator.



Figura 6 – FRF do ponto 37(força) em relação ao ponto 33(aceleração).

Através da Figura 6 é possível verificar o procedimento para a determinação de uma função resposta em frequência (FRF), com impactação no ponto 37 e aquisição do sinal de aceleração no ponto fixo 33.

Para realizar a aquisição dos sinais foi definida uma faixa de frequências máxima até 800 Hz, com 800 linhas espectrais. No sinal de excitação foi aplicada uma janela tipo força, no sinal de resposta foi utilizada a janela tipo exponencial e foram utilizadas 5 amostras no cálculo da FRF média em cada ponto de impactação. Os equipamentos utilizados e alguns dados técnicos importantes deles estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.

Item	Quantidade	Equipamento	Fabricante	Modelo	Sensibilidade
1	1	Analizador de sinais	LMS	Scadas III	
2	1	Computador			
3	1	Martelo de impacto	PCB	086D05	0,23 mV/N
4	1	Acelerômetro	PCB	353B33	10,25 mV/ms-2

3.2.2) Visualização

Uma geometria virtual, Figura 7, utilizando as mesmas coordenadas, sistema de referência e nomenclatura dos pontos experimentais foi construída no software LMS Test.Lab responsável pelo pós processamento da análise modal.

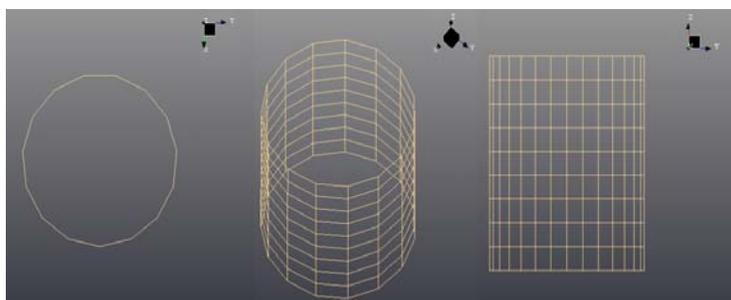


Figura 7 – Modelo da geometria utilizada para visualização da análise modal.

Após a construção da geometria, cada FRF foi indexada ao respectivo ponto. Neste caso foram obtidas inertâncias, ou seja, o sinal de aceleração (resposta) dividido pelo sinal de força (excitação). A Figura 8 mostra o espectro da força aplicada, a função resposta em frequência e a coerência correspondente ao ponto 37, relativa ao ponto 33 (fixo).

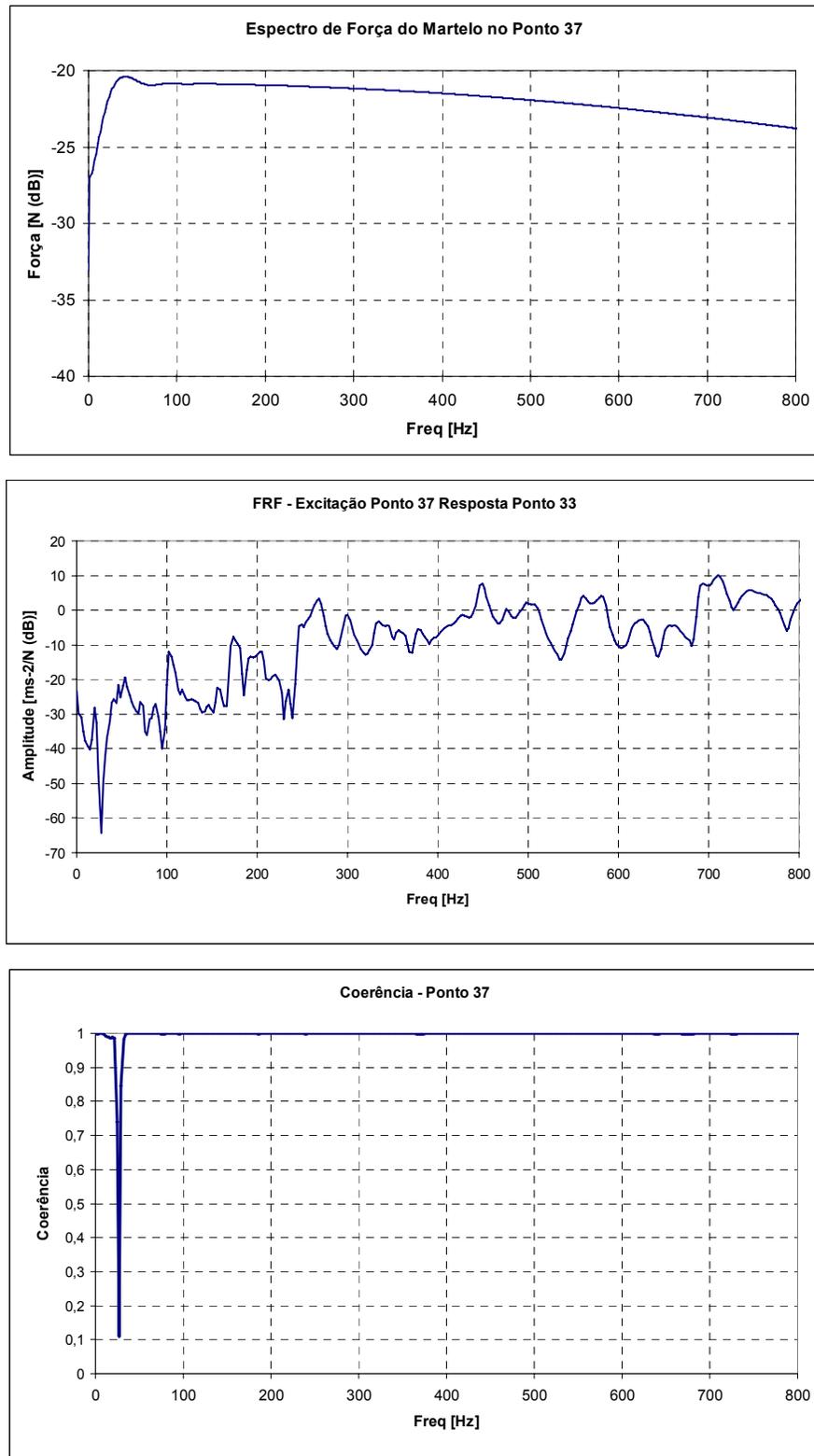


Figura 8 – Espectro de força do martelo, função resposta em frequência (FRF) e coerência do ponto 37 em relação ao ponto 33(fixo).

De acordo com a LMS [5], o software possui uma rotina interna que a partir das FRF's medidas gera uma curva soma de FRFs. Na seqüência utilizando o método da *Polyreference*, disponível no software *Test.Lab7a*, ocorre a indentificação das funções modais. No diagrama de estabilização gerado pelo software os possíveis modos de vibração são indicados por “s” conforme pode ser visualizado na Figura 9. Além das freqüências de vibração e da forma modal também é possível identificar o amortecimento estrutural.

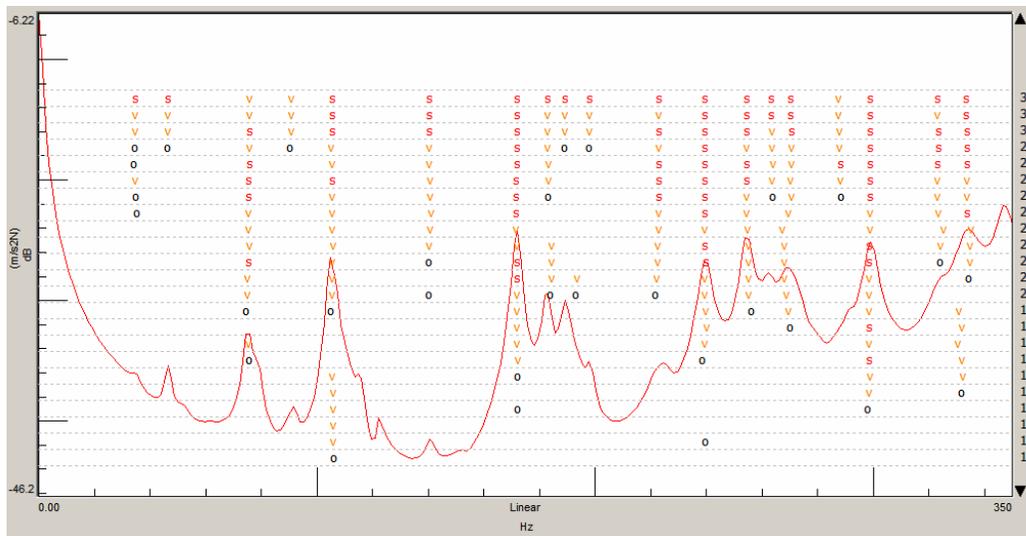


Figura 9 – Curva soma das FRF's, após o processo de estabilização.

3.2.3) Resultados

Nessa seção serão apresentados alguns modos de vibração obtidos através dessa análise modal experimental. Os modos mostrados nas Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13 estão na faixa de freqüência de 40 Hz a 200 Hz, pois nesta região é que estão as freqüências com os maiores valores de corrente elétrica que alimentam o reator.

Na seqüência serão mostrados o primeiro e o segundo modo que estão próximos a freqüência de 60 Hz, e o quarto e o quinto que estão próximos a freqüência de 120 Hz. Como o terceiro modo não está próximo a freqüência fundamental nem a primeira harmônica ele não será mostrado, no entanto ele foi determinado nessa análise modal experimental.

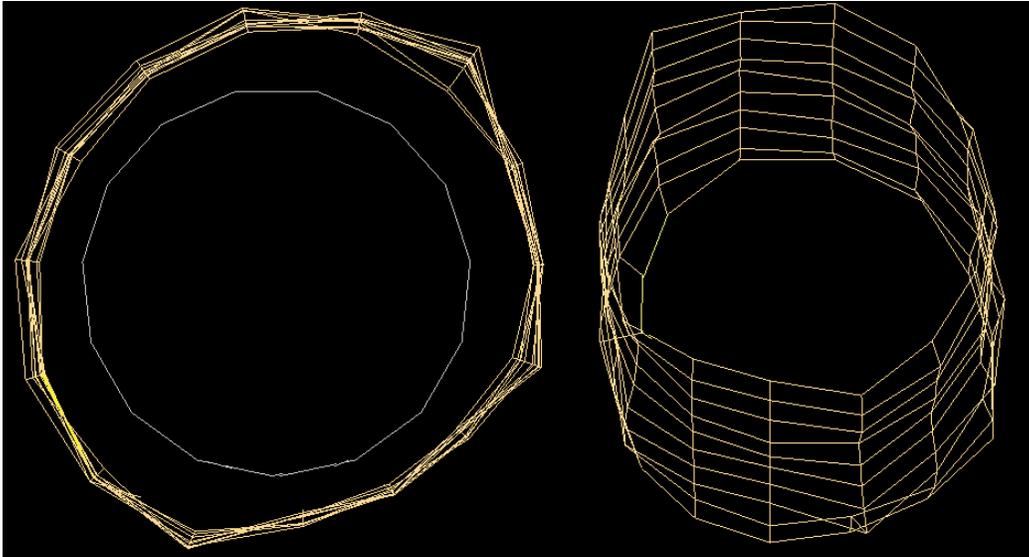


Figura 10 – Primeiro modo de vibração do reator, frequência de 46 Hz.

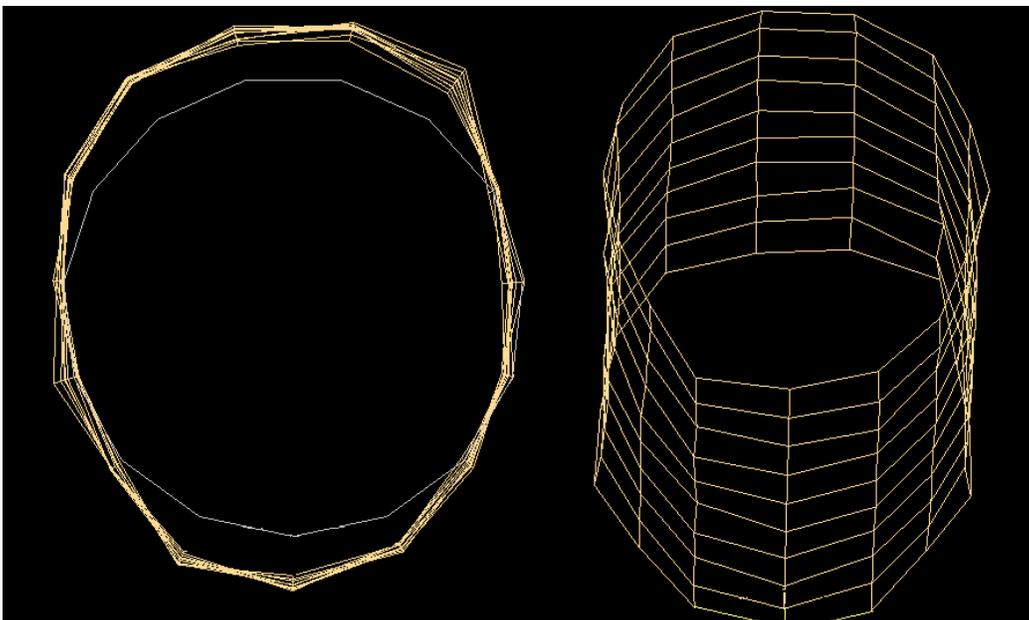


Figura 11 – Segundo modo de vibração do reator, frequência de 76 Hz.

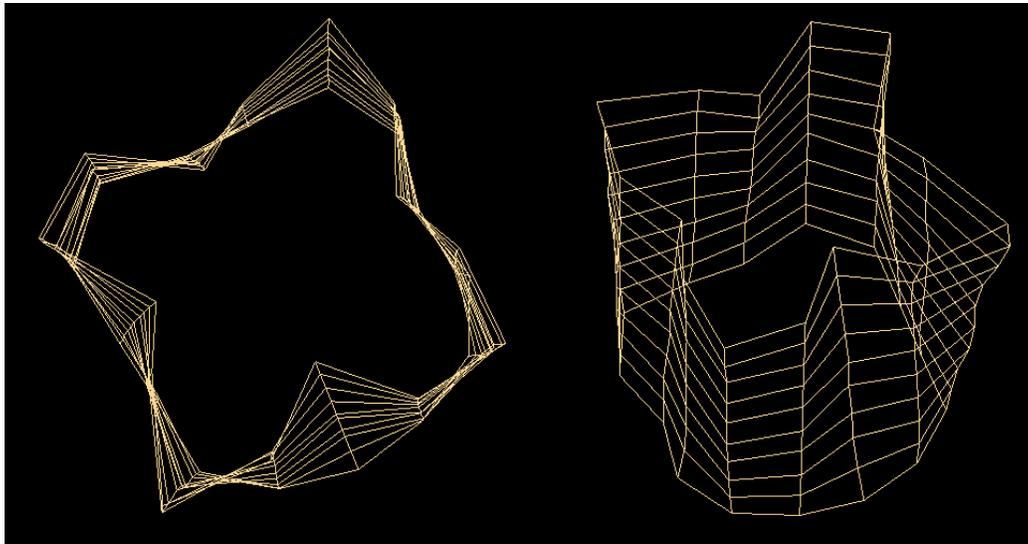


Figura 12 – Quarto modo de vibração do reator, frequência de 105 Hz.

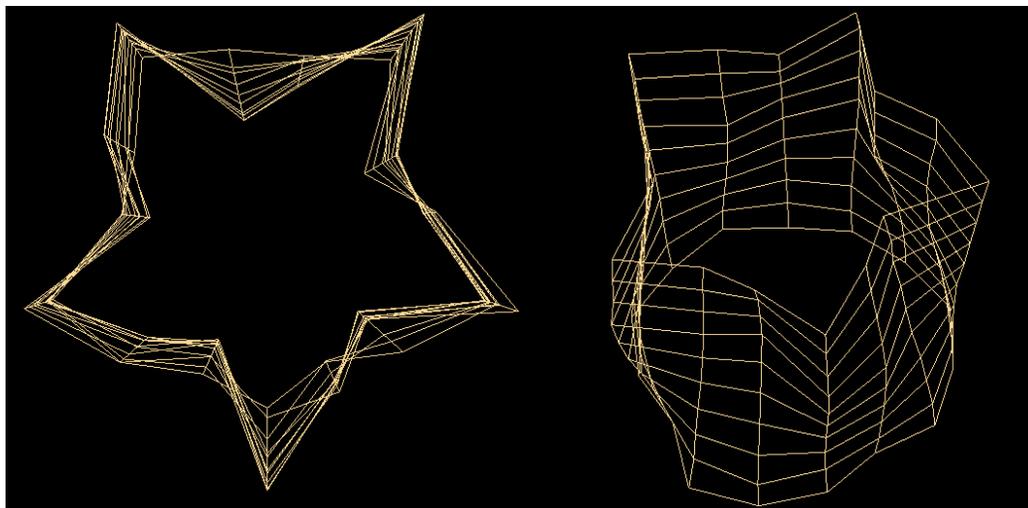


Figura 13 – Quinto modo de vibração do reator, frequência de 170 Hz.

3.3) *ODS (Operational Deflection Shape)*

Segundo Richardson [6], tradicionalmente a *ODS* pode ser definida como a deflexão da estrutura em uma determinada frequência. No entanto, pode ser definido mais genericamente como qualquer movimento forçado de dois ou mais pontos de uma estrutura.

Para realizar uma *ODS* são feitas medições da aceleração de alguns pontos em relação a uma referência nas condições normais de operação. Na sequência, é criada

uma malha com esse conjunto de pontos, os respectivos níveis de vibração são indexados e o movimento no domínio da frequência é animado.

No entanto, é interessante mostrar a diferença entre uma análise modal e a uma *ODS*. A análise modal detecta os modos próprios de vibração da estrutura, não dependem das forças ou das cargas que atuam sobre ela. Os modos são alterados somente se as propriedades dos materiais (massa, rigidez e amortecimento) ou as condições de contorno sofrerem alguma variação.

A *ODS* depende das forças e do carregamento que é aplicado sobre a estrutura. Os resultados variam somente se o carregamento for alterado. Para realizar a animação do comportamento vibratório da estrutura podem ser utilizados dados de deslocamento, velocidade, aceleração ou deslocamento por força. Esta análise expressa uma combinação das forças que atuam na estrutura com as propriedades dinâmicas.

Nesse trabalho, a *ODS* tem como objetivo verificar se o reator vibra em algum modo natural da estrutura ou apresenta resposta forçada em função das forças que atuam sobre o equipamento.

3.3.1) Procedimento de medição

De acordo com Kromulski [7], o procedimento consiste em definir um acelerômetro como referência e fixá-lo em um ponto da estrutura, enquanto o outro faz aquisição dos sinais nos pontos especificados. Como resultados são obtidos os *CrossPower Spectrum* dos sinais de aceleração ou as funções de transmissibilidade (aceleração/aceleração). No entanto, a fase entre qualquer ponto da estrutura e o ponto de referência deve ser sempre preservada.

Para realização da *ODS* foi criada uma malha no reator com os pontos de medição da aceleração. Foram marcados e numerados 15 pontos ao longo da circunferência que se repetem em 10 alturas diferentes do reator, como pode ser observado na Figura 14.



Figura 14 – Alguns pontos onde foram feitas as medições de aceleração.

As medições foram realizadas usando 2 acelerômetros, sendo um deles fixado no ponto 33, definido como referência, conforme se observa na Figura 15, enquanto que o outro era deslocado ao longo dos 150 pontos marcados na superfície externa do reator. Na Figura 16 é possível observar o acelerômetro responsável por medir os 150 pontos quando fixado no ponto 111.



Figura 15 – Acelerômetro fixado no ponto de referência.



Figura 16 – Acelerômetro responsável pela aquisição dos sinais em todos os pontos, em detalhe ponto 111.

No final da medição foi obtido o *CrossPower Spectrum* dos 150 pontos da estrutura, tendo como referência o ponto 33. A referência deve ser mantida constante, pois ao visualizar o comportamento dinâmico da estrutura a fase de todos os sinais deve estar em relação ao mesmo ponto e, dessa maneira, o movimento do conjunto de pontos será ordenado.

Para realizar as medições foi utilizada a faixa de frequências até 1,25 kHz, 1024 linhas espectrais, janela *Hanning* e 100 médias do sinal de aceleração por ponto. Os equipamentos utilizados para realizar a *ODS* estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.

Item	Quantidade	Equipamento	Fabricante	Modelo	Sensibilidade
1	1	Analisador de sinais	LMS	Pimento	
2	1	Computador			
3	2	Acelerômetro	B&K	4366	4,54 pC/ms ⁻²
4	2	Amplificador de carga	PCB	422E12	10 mV/pC

3.3.2) Visualização

Para visualizar a *ODS* foi criada a geometria correspondente ao reator analisado, Figura 17. Nesta geometria virtual a quantidade, posição, nomenclatura e orientação dos pontos utilizados são idênticas as do procedimento experimental. Esses pontos serão conectados por linhas para facilitar a visualização das formas de vibração. Na

seqüência os dados das medições experimentais são importados e indexados aos respectivos pontos.

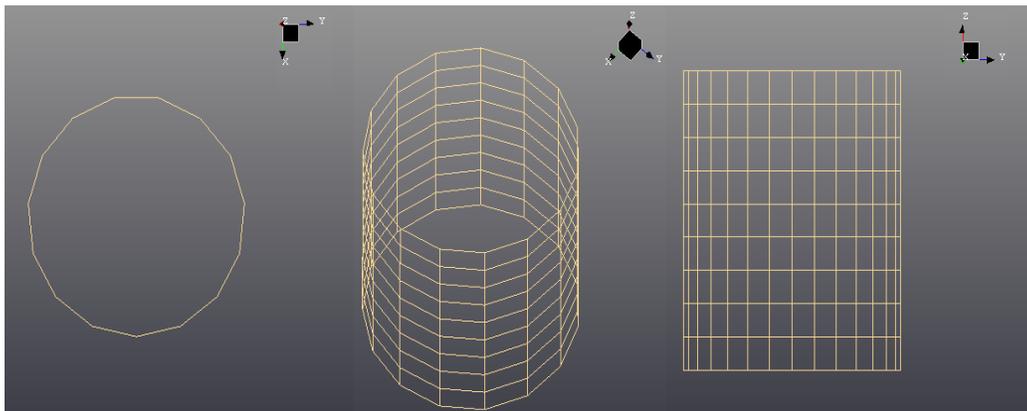


Figura 17 – Modelo da geometria utilizada para visualização da *ODS*.

Após a indexação dos dados experimentais aos pontos da geometria virtual é possível selecionar na curva do *Crosspower Spectrum* resultante a frequência na qual será animado o movimento da estrutura.

3.3.3) Resultados

Para realizar essa *ODS* o reator foi alimentado com uma corrente elétrica de 200 Amperes na frequência de 60 Hz. No entanto, como pode ser observado na Figura 18, a maior resposta da estrutura ocorre na frequência de 120 Hz.

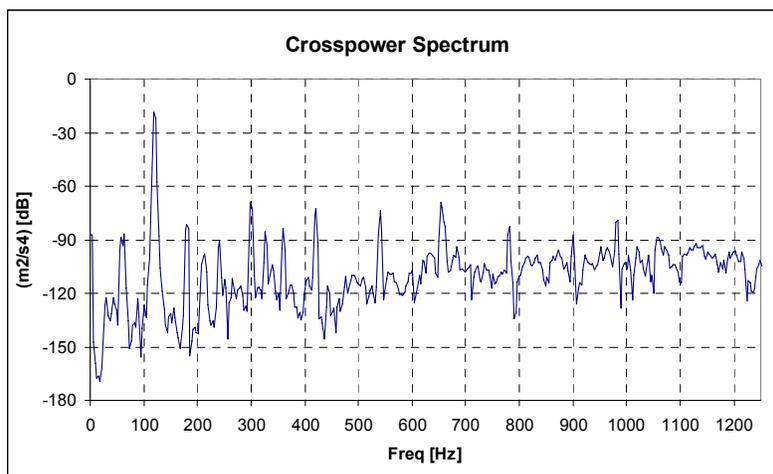


Figura 18 – *Crosspower Spectrum* resultante dos 150 pontos.

De acordo com Smede [8], o reator quando energizado apresenta uma forma de vibração dominada pelas forças eletromagnéticas conhecida como *breathing mode*

isto é, uma forma pulsante do cilindro. Através da Figura 19, na seqüência, é possível observar a forma de vibração do reator na freqüência de 120 Hz.

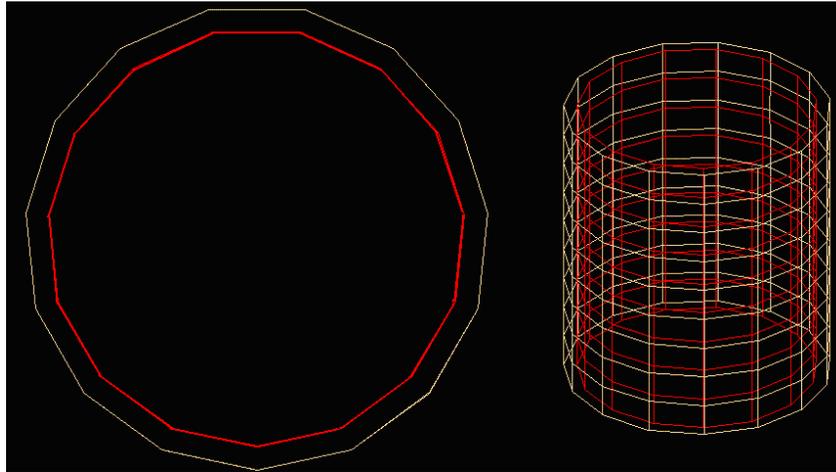


Figura 19 – Forma de vibração do reator na freqüência de 120 Hz, *breathing mode*, em branco a estrutura normal e em vermelho ela deformada.

3.4) Medição de potência sonora através do nível de pressão sonora

Nesta seção será apresentado o procedimento experimental utilizado para determinar o nível de potência sonora gerado pelo reator.

De acordo com Gerges [9], define-se nível de pressão sonora L_p como:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3.1)$$

onde, p corresponde à pressão sonora em Pa e p_0 a pressão de referência, (20 μPa).

O nível de potência sonora é definido pela seguinte equação:

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3.2)$$

onde, W corresponde a potência sonora da fonte em Watts (W) e W_0 a potência de referência, 10^{-12} W. Particularmente para o caso do reator, a equação do nível de potência sonora pode ser escrita da seguinte forma aproximada:

$$L_w = L_p + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3.3)$$

onde, L_p corresponde ao valor médio do nível de pressão sonora em dB, S a área da superfície de medição em m^2 e S_0 a área de referência 1 m^2 .

3.4.1) Metodologia

Para realizar as medições de potência sonora foram utilizados os procedimentos descritos nas normas técnicas IEC 60076-10 [10] e IEEE C57.16-1996 [11]. Como as duas normas diferem em alguns aspectos, o procedimento adotado para realizar as medições dos reatores contempla os itens mais rigorosos de cada uma delas, de forma que o procedimento seja o mais detalhado e exigente possível.

A seguir são apresentados os principais procedimentos empregados em cada uma das duas normas técnicas utilizadas.

a) IEEE C57.16-1996

- i. Calibrar o microfone antes e depois do experimento. Caso exista uma diferença maior que 1 dB possivelmente o transdutor foi afetado pelo campo magnético e as medições devem ser repetidas.
- ii. Verificar a diferença do nível de pressão sonora gerado pelo reator e aquele do ambiente. Caso a diferença seja inferior a 10 dB, deverá ser feita uma correção baseada na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de correção do nível de pressão sonora gerado pelo reator.

Diferença entre o nível de pressão sonora médio do reator mais o ambiente e o nível pressão sonora médio do ambiente (dB).	Correção a ser aplicada ao nível de pressão sonora médio do reator mais o ambiente (dB).
5	1,6
6	1,3
7	1,0
8	0,8
9	0,6
10	0,4
Acima de 10	0,0

- iii. O reator deve ser posicionado de tal forma que o microfone fique afastado pelo menos 3 m de superfícies refletoras (paredes, muros...).
- iv. O reator deverá ser ligado na sua respectiva corrente e frequência de trabalho. Caso o reator seja projetado no sentido de ajuste de impedância, ele deverá ser ajustado para trabalhar nesta respectiva impedância.
- v. As medições devem ser efetuadas após a estabilização do regime de trabalho.
- vi. Para reatores com altura inferior a 2,4 m, na direção axial os microfones devem ser posicionados à meia altura do reator. Para reatores com altura superior a 2,4 m os microfones devem ser posicionados a 1/3 e 2/3 de sua altura.
- vii. Na direção radial os microfones devem ficar 3 m afastados da superfície externa do reator.
- viii. Na direção circunferencial propõe-se um afastamento de 22,5° entre as posições dos microfones, ou seja, 16 posições no mínimo.
- ix. Caso o ambiente esteja exposto a ventos, recomenda-se o uso do protetor de vento no microfone.

b) IEC 60076-10

- i. O microfone deve ser calibrado antes e depois da medição, caso a diferença seja maior que 0,3 dB, as medições deverão ser repetidas.
- ii. Na direção radial os microfones podem ser posicionados a 0,3 m, 1m, e 2 m da superfície externa do reator, dependendo das características do ambiente no qual serão realizadas as medições.
- iii. Para reatores com altura inferior a 2,5 m, na direção axial os microfones devem ser posicionados à meia altura do reator. Para reatores com altura superior a 2,5 m os microfones devem ser posicionados a 1/3 e 2/3 de sua altura.
- iv. Na direção circunferencial propõe-se um número mínimo de 6 posições, com um espaçamento não maior que 1 m entre elas.
- v. O nível de pressão sonora do ambiente deve ser medido antes e imediatamente após o término da medição do reator em funcionamento. Caso a diferença entre ruído de fundo e do reator (L_{pA0}) seja maior que 10 dB, a medição do ruído de fundo poderá ser realizada num só ponto, caso contrário

a medição deverá ser feita no mínimo 10 pontos, de tal forma que se tenha um valor médio do ruído de fundo (L_{bgA}). Dependendo das diferenças encontradas, as medições podem ou não ser aceitas, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Critérios para aceitação das medições efetuadas.

Média do nível de pressão sonora do reator em funcionamento menos a média do maior ruído de fundo	Média do nível de pressão sonora do ruído de fundo antes da medição menos média depois da medição	Decisão
≥ 8 dB	-	Aceitar o teste
< 8 dB	< 3 dB	Aceitar o teste
< 8 dB	> 3 dB	Repetir o teste
< 3 dB	-	Repetir o teste

- vi. As medições devem ser efetuadas após a estabilização do regime de trabalho e rapidamente de forma que o aumento da temperatura não influencie os resultados obtidos.

3.4.2) Procedimento de medição

Uma vez posicionado o reator, a superfície de medição foi definida traçando no chão uma circunferência, cujo raio corresponde ao raio externo do reator adicionado de um afastamento de 0,3 m. O perímetro total da superfície de medição foi dividido em 16 pontos, pois desta maneira é possível obter uma melhor discretização da fonte, Figura 20. Na direção axial a superfície se encontrava a uma altura em relação ao solo, que pode ser definida como a soma da altura dos isoladores elétricos mais a metade da altura do cilindro do reator, totalizando 1,239 m.

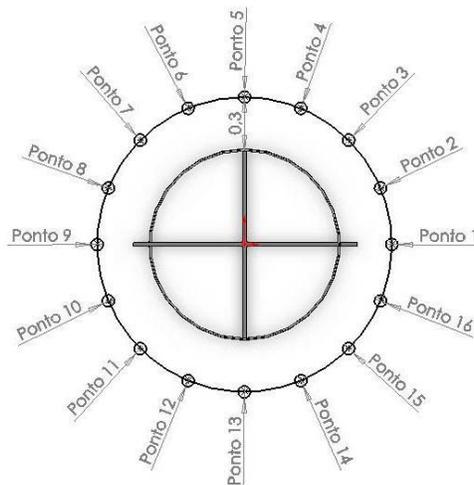


Figura 20 – Distribuição dos pontos de medição do nível de pressão sonora ao longo do reator.

Na Figura 21 e Figura 22 são observadas algumas imagens correspondentes ao posicionamento do reator e infra-estrutura utilizada para realizar os ensaios.



Figura 21 – Posicionamento do reator e microfone para medição do nível de pressão sonora.



Figura 22 – Painel de controle elétrico, analisador e computador utilizados para aquisição dos sinais.

Basicamente, os equipamentos utilizados para realizar as medições estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.

Item	Quantidade	Equipamento	Fabricante	Modelo	Sensibilidade
1	1	Analisador de sinais	LMS	Pimento	
2	1	Computador			
3	2	Microfone	B&K	4189	52,0 mV/ms-2
4	1	Calibrador de microfone	B&K	4231	

Entre os ajustes principais do software de aquisição de sinais destacam-se o tempo de aquisição de 1 minuto e a faixa de frequência em banda de terço de oitava (50 Hz até 1 kHz).

Antes de iniciar as medições, os microfones foram calibrados, para que no final pudesse ser verificado se houve ou não influência do campo eletromagnético. As análises mostraram que não houve uma influência significativa do campo sobre os microfones, uma vez que a sensibilidade ajustada, usando o calibrador no início das medições (canal 1: 52,3 mV/Pa e canal 2: 51,3 mV/Pa, para 94 dB em 1000 Hz) e no final das mesmas (canal 1: 52,3 mV/Pa e canal 2: 51,3 mV/Pa, resultando em 94 dB e 93,9 dB em 1000Hz), teve uma variação muito pequena, abaixo de 0,3 dB.

Inicialmente, foi medida, ao longo dos 16 pontos, a pressão sonora referente ao ambiente no qual as medições seriam realizadas. Em seguida, o reator foi alimentado com corrente alternada de 200 Amperes na frequência de 60 Hz para que a pressão sonora gerada pelo mesmo pudesse ser medida ao longo dos 16 pontos da superfície de medição. Por fim, o ruído do ambiente foi medido novamente nos 16 pontos.

O valor médio da pressão sonora foi medido nas três situações descritas acima de acordo com a referência [10].

A partir da Equação (3.1) são calculados os níveis de pressão sonora em dB para cada uma das frequências centrais da banda de terço de oitava e, posteriormente, os mesmos são corrigidos em função da sensibilidade da audição humana, através da curva de ponderação A.

Após as medições, os níveis de pressão sonora obtidos com o reator em funcionamento foram comparados com os níveis do ruído fundo. Para verificar se as medições realizadas poderiam ser consideradas válidas, foram submetidas aos critérios de aceitação impostos pela norma IEC 60076-10 [10]. Na seqüência, através dos níveis de pressão sonora de cada faixa de frequências, foi possível calcular os níveis de potência sonora a partir da Equação (3.3), usando o valor de área calculado pela equação:

$$S = 1,25hl \quad (3.4)$$

onde h corresponde a altura do reator sem as cruzetas, l o perímetro da superfície de medição e 1,25 um fator empírico definido pela referência [10] para considerar o ruído radiado pelas extremidades do reator. A Equação (3.4) só pode ser usada para

um afastamento de 0,3 m da superfície do reator; para os demais afastamentos as normas definem outras expressões.

3.4.3) Resultados

A Tabela 7 apresenta o nível médio de pressão sonora do ruído de fundo antes (Lp_{bg} (Antes)), depois (Lp_{bg} (Depois)) e o valor médio do reator em funcionamento (Lp_0). Em seguida estes valores foram corrigidos pela curva de ponderação A, sendo representados, respectivamente, por Lp_{bgA} (Antes), Lp_{bgA} (Depois) e Lp_{A0} .

Tabela 7 – Níveis de pressão sonora calculados em dB e dB(A).

Frequência	Lp_{bg} (Antes) [dB]	Lp_{bg} (Depois) [dB]	Lp_0 [dB]	Pond. A	Lp_{bgA} (Antes) [dB(A)]	Lp_{bgA} (Depois) [dB(A)]	Lp_{A0} [dB(A)]
50	49,3	48,4	50,10	-32,2	17,1	16,2	17,9
63	48,0	49,5	53,00	-26,2	21,8	23,3	26,8
80	48,5	49,5	49,6	-22,5	26,0	27,0	27,1
100	52,6	51,9	55,2	-19,1	33,5	32,8	36,1
125	52,5	52,9	62,5	-16,1	36,4	36,8	46,4
160	52,1	53,2	53,1	-13,4	38,7	39,8	39,7
200	50,5	49,5	50,6	-10,9	39,6	38,6	39,7
250	48,4	49,0	47,5	-8,9	39,5	40,1	38,6
315	49,7	48,0	49,9	-6,6	43,1	41,4	43,3
400	48,2	49,3	51,2	-4,8	43,4	44,5	46,4
500	47,9	49,1	49,6	-3,2	44,7	45,9	46,4
630	46,2	47,6	48,1	-1,9	44,3	45,7	46,2
800	46,8	47,5	46,9	-0,8	46,0	46,7	46,1
1000	45,7	46,3	46,8	0,0	45,7	46,3	46,8

A Figura 23 apresenta o nível médio de pressão sonora registrado quando o reator é colocado em funcionamento. Conforme esperado, na banda de 125 Hz é registrado o maior Nível de Pressão Sonora, 62,5 dB, uma vez que ao energizar o reator na frequência de 60 Hz proporciona-se o surgimento de uma força eletromagnética em 120 Hz, a qual é a principal responsável pela vibração das paredes do reator.

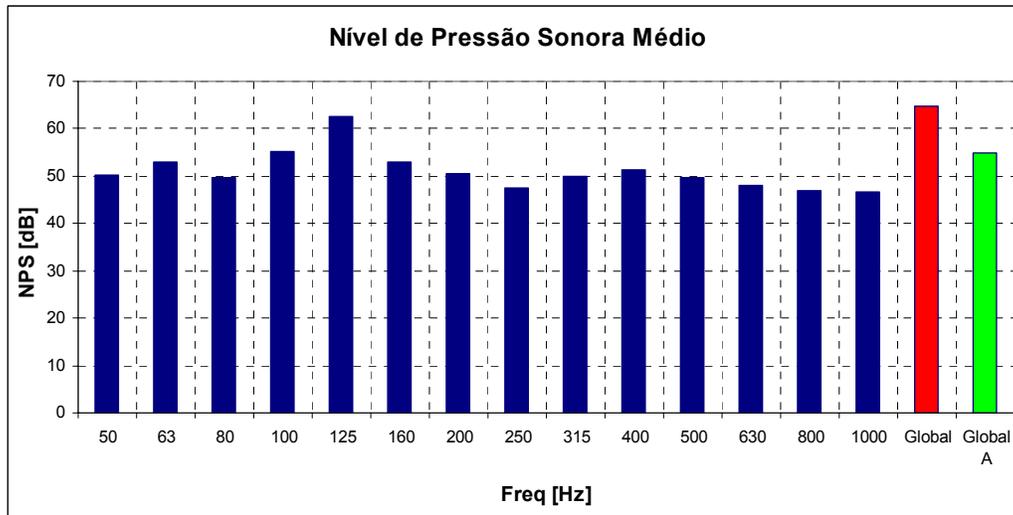


Figura 23 – Nível de pressão sonora médio do reator em funcionamento a 0,3 m da superfície externa.

A Figura 24 apresenta o gráfico correspondente aos níveis de potência sonora gerados pelo reator analisado, calculados a partir da Equação (3.3) usando o valor de área calculado pela Equação (3.4), onde, $h = 1,36$ m e $l = 2,67$ m. O maior nível de potência é registrado na banda de 125 Hz, com valor de 72,1 dB; já o nível global é de 74,9 dB.

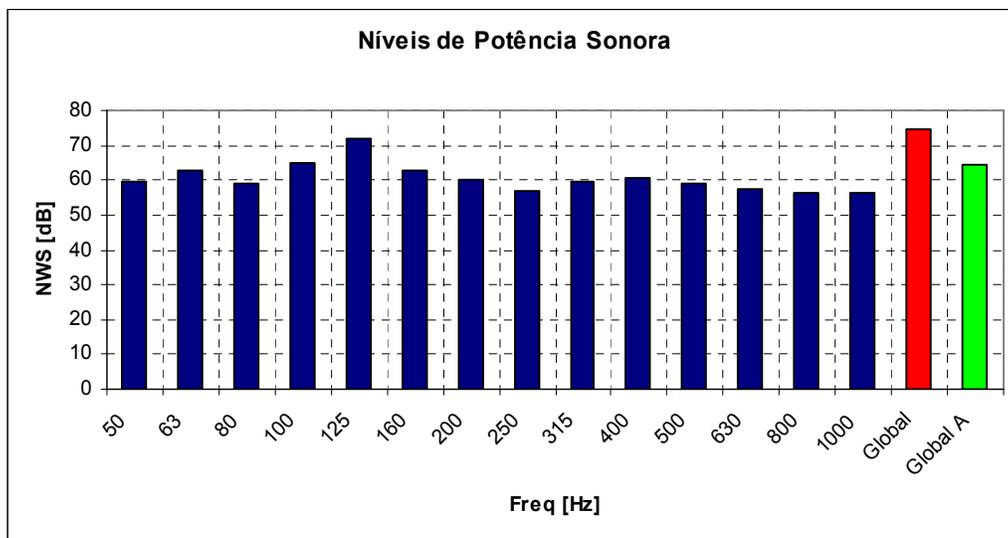


Figura 24 – Níveis de potência sonora do reator em funcionamento com corrente elétrica de 200 Amperes na frequência de 60 Hz, através de medições do nível de pressão sonora.

3.5) Medição de potência sonora através da sonda de intensidade

Por motivos de segurança não foi possível energizar um reator dentro de uma câmara semi-aneecóica ou reverberante. A potência sonora foi, então, determinada através de medições de pressão sonora de acordo com as normas citadas na seção 3.4 referências [10] e [11], que não especificam um ambiente para medição. No entanto, era necessário verificar a qualidade desses resultados, pois serão utilizados para validar os modelos analítico e numérico.

Segundo Yang [12], a única maneira de determinar com precisão a potência sonora de uma fonte em operação quando outras fontes estão operando simultaneamente é através de medições de intensidade sonora. Dessa maneira, é possível determinar a potência sonora de máquinas em ambientes com ruído de fundo muito alto, como por exemplo, fábricas. Outra vantagem dessa técnica é que as medições podem ser realizadas sem a necessidade da fonte estar dentro uma câmara semi-aneecóica ou reverberante. Com essas vantagens torna-se a alternativa mais viável para verificar a qualidade do nível de potência sonora do reator medido anteriormente.

De acordo com a norma ISO 9614 [13], a potência sonora W radiada por uma fonte é definida como a soma total do fluxo de energia sonora através de uma área que envolve completamente essa fonte, Figura 25. Matematicamente pode ser definido como:

$$W = \oint_{\Sigma} (\text{densidade de fluxo}) dS \quad (3.5)$$

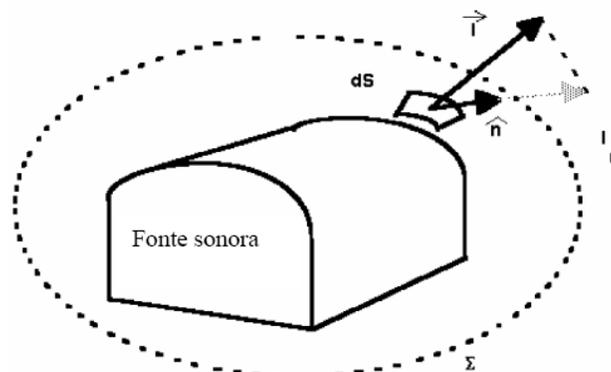


Figura 25 – Densidade de fluxo de energia através de uma área elementar.

A densidade de fluxo através da área (Σ) corresponde à componente do vetor intensidade \vec{I} segundo a normal ao elemento de área dS :

$$(\text{densidade de fluxo}) = \vec{I} \cdot \hat{n} = I_n \quad (3.6)$$

onde, I_n é a intensidade acústica.

3.5.1) Metodologia

Segundo a referência [13], alguns procedimentos devem ser seguidos para determinar a potência sonora através de medições de intensidade.

- i. calibrar os microfones com relação ao nível de pressão sonora;
- ii. calibrar a fase entre os microfones da sonda;
- iii. posicionar a sonda de intensidade em um provável ponto de medição, com o eixo orientado normal à superfície da fonte, e fazer a aquisição da intensidade sonora com a fonte ligada. Rotacionar a sonda de medição em 180° em relação sobre um eixo normal ao eixo de medição, colocar na mesma posição anterior e fazer a aquisição da intensidade sonora novamente. Os níveis de intensidade obtidos nas duas medições devem ter sinais contrários e, no máximo, 1,5 dB de diferença;
- iv. a distância entre a superfície de medição e a superfície externa da fonte deve ser maior que 0,5 m;
- v. as dimensões da fonte devem ser conhecidas, pois as posições e a quantidade de pontos de medição dependem desses valores;
- vi. a forma da superfície de medição depende das dimensões e do formato da fonte;
- vii. as medições devem ser realizadas de acordo com uma ordem.

3.5.2) Procedimento de medição

Em função das dimensões do reator, o software de medição de intensidade sonora indica a utilização de um paralelepípedo como superfície de medição e especifica 28 pontos de medição, sendo 6 pontos em cada lateral e 4 na superfície de topo. Os pontos das laterais são medidos a $1/3$ e $2/3$ da altura do reator acima dos isoladores elétricos, e a 1 m da superfície externa do reator.

Basicamente, os equipamentos utilizados para realizar as medições estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Descrição dos equipamentos da cadeia de medição.

Item	Quantidade	Equipamento	Fabricante	Modelo
1	1	Analizador de sinais	01dB	Orchestra
2	1	Computador		
3	1	Sonda de Intensidade	GRAS	51AB
4	1	Calibrador de microfone	B&K	4231
5	1	Calibrador da sonda de intensdade	GRAS	40AI

Para realizar as medições foi utilizado o espaçador de 12 mm entre os microfones da sonda, permitindo medições de 25 Hz a 4 kHz. No entanto, as medições foram feitas na faixa de frequências de 50 Hz a 1000 Hz, com tempo de aquisição de 1 minuto por ponto.

Antes de iniciar as medições os microfones foram calibrados separadamente com relação à pressão sonora. Além disso, os microfones, já na posição de medição, foram calibrados com relação à fase entre eles.

Pelo fato da sonda medir a intensidade da fonte em relação a qual ela está posicionada, não foi necessário realizar medições com o reator desligado. Para fazer a aquisição dos sinais o reator foi alimentado com corrente elétrica alternada de 200 Ampéres na frequência de 60 Hz. As medições de intensidade foram realizadas nos 28 pontos seguindo a ordem e o posicionamento indicado pelo software de medição de intensidade.

Após realizar as medições nos 28 pontos é possível obter o valor de potência sonora, para cada faixa de frequências, a partir da expressão:

$$W_{is} = I_{nis} S_{is} \quad (3.7)$$

onde W_{is} é a potência sonora no segmento is , I_{nis} é a magnitude da intensidade sonora medida no segmento is e S_{is} é ao valor da área do segmento is .

No entanto, para determinar o nível de potência sonora da fonte é necessário utilizar a expressão:

$$L_W = 10 \log \sum_{i=1}^{ns} \frac{W_{is}}{W_0} \text{ [dB]} \quad (3.8)$$

onde W_{is} é a potência sonora de cada segmento, W_0 é a potência sonora de referência ($10^{-12} W$) e ns é o número total de segmentos.

3.5.3) Resultados

A Figura 26 apresenta os níveis de potência sonora registrados quando o reator é colocado em funcionamento. Como esperado, na banda de 125 Hz é registrado o maior Nível de Potência Sonora, 70,7 dB, uma vez que ao energizar o reator na frequência de 60 Hz proporciona-se o surgimento de uma força eletromagnética em 120 Hz, a qual é a principal responsável pela vibração das paredes do reator.

Para cálculo do nível de potência sonora foram utilizadas as medições da sonda de intensidade e as Equações (3.7) e (3.8).

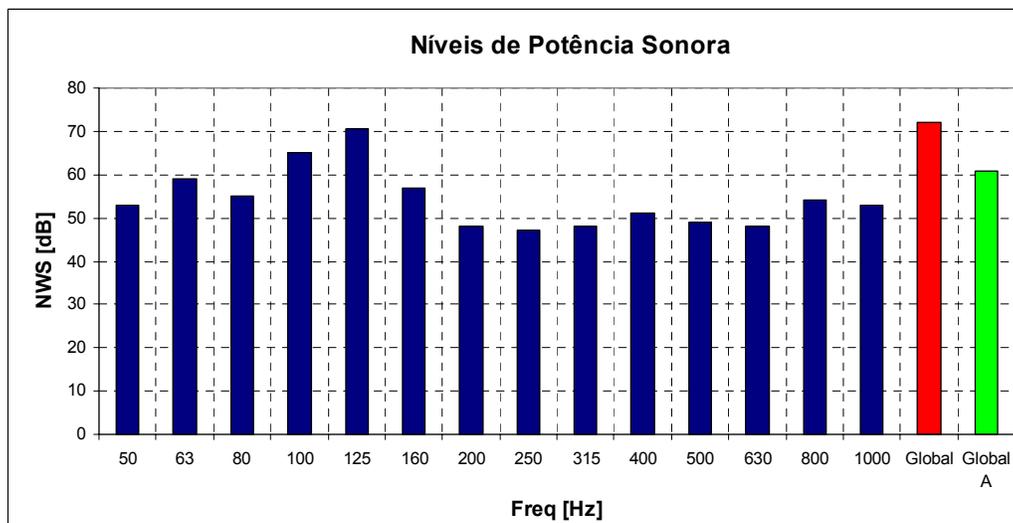


Figura 26 – Níveis de potência sonora do reator em funcionamento com corrente elétrica de 200 Ampères na frequência de 60 Hz, através de medições de intensidade.

O valor do nível de potência sonora global medido através da sonda de intensidade é de 72,7 dB, já o obtido através do nível de pressão sonora é 74,9 dB. Dessa maneira as medições podem ser consideradas válidas, pois uma diferença de 2,2 dB em medições realizadas em ambientes não controlados é aceitável. Além disso, o espectro final de potência sonora nos dois métodos apresenta as mesmas características.

Dessa maneira, após a realização da avaliação experimental do protótipo, é possível começar a desenvolver os modelos de vibração e de radiação sonora.

CAPÍTULO 4

FORÇAS DE EXCITAÇÃO

Para determinar as expressões das forças que atuam nas paredes do reator é necessário analisar os campos elétrico e magnético que agem sobre ele. Isso é importante, pois somente a partir dessas expressões é que será possível determinar a velocidade de vibração das paredes do reator e, conseqüentemente, a potência sonora radiada pelo mesmo.

4.1) Introdução

Segundo Lorrain [14], ao ser percorrido por uma corrente elétrica alternada, o reator produz simultaneamente um campo elétrico (devido à carga elétrica) e um campo magnético (devido ao movimento das cargas). A interação entre os campos elétrico e magnético resulta na criação de uma força eletromagnética alternada, que faz com que as paredes do reator vibrem.

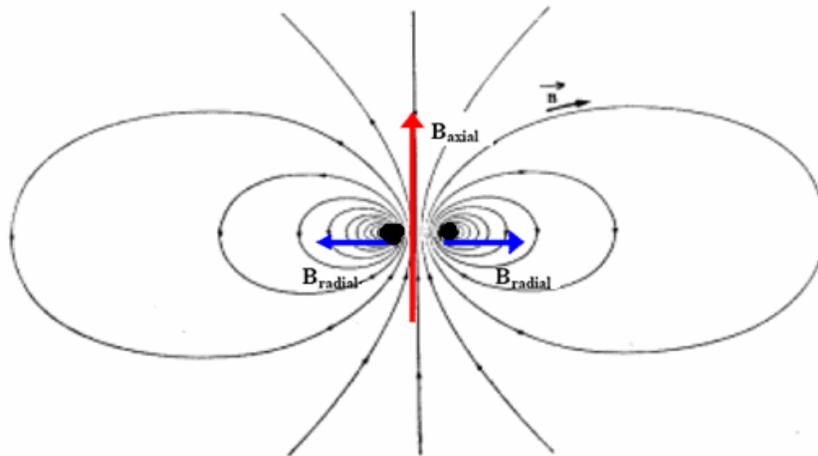


Figura 27 – Distribuição do campo magnético em torno de uma espira [13].

A determinação da expressão do campo de indução magnética em todos os pontos da bobina depende da solução de equações numéricas complexas. Desta forma, o campo de indução magnética será dividido em campo de indução radial (B_{radial}) e campo de indução axial (B_{axial}), (Figura 27).

O sistema permite dividir o problema em duas parcelas:

1ª) Parcela radial: Consiste no cálculo do campo de indução magnética na direção axial, causado pela corrente, que produz uma força eletromagnética radial (F_{radial}).

2ª) Parcela axial: Corresponde ao cálculo do campo de indução magnética na direção radial, causado pela corrente, que produz uma força eletromagnética axial (F_{axial}).

A determinação dos campos de indução axial e radial torna-se possível a partir da utilização das seguintes relações:

a) Lei de Biot e Savart, [14]: expressa o valor do campo de indução magnética \vec{B} criado por um elemento $d\vec{l}$ percorrido por uma corrente $i(t)$, em um ponto distante r do condutor:

$$\vec{B}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} i(t) \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (4.1)$$

b) Teorema de Ampere, [14]: relaciona o campo de indução magnética \vec{B} sobre um laço, com a corrente $i(t)$, que passa através desse laço, onde μ_0 é a permeabilidade magnética do meio.

$$\oint \vec{B}(t) d\vec{l} = \mu_0 i(t) \quad (4.2)$$

c) Força eletromagnética, [14]: determina a força eletromagnética que atua no condutor de comprimento $d\vec{l}$ percorrido por uma corrente e submetido a um campo de indução magnética.

$$\vec{F}(t) = \oint i(t) d\vec{l} \times \vec{B} \quad (4.3)$$

A corrente que circula no condutor pode ser representada como uma função senoidal de frequência ω variando com o tempo (t), na forma:

$$i(t) = \sqrt{2} I_{eff} \text{sen}(\omega t) \quad (4.4)$$

onde I_{eff} é a corrente efetiva.

4.2) Força eletromagnética radial

Para facilitar o desenvolvimento das equações, será calculado o campo de indução axial no eixo da bobina. Considera-se que o mesmo seja distribuído uniformemente no enrolamento e nos condutores.

4.2.1) Indução do eixo de uma espira

Inicialmente, é determinado o campo magnético no eixo de um anel, ou uma espira (Figura 28), para posteriormente generalizá-lo para uma bobina.

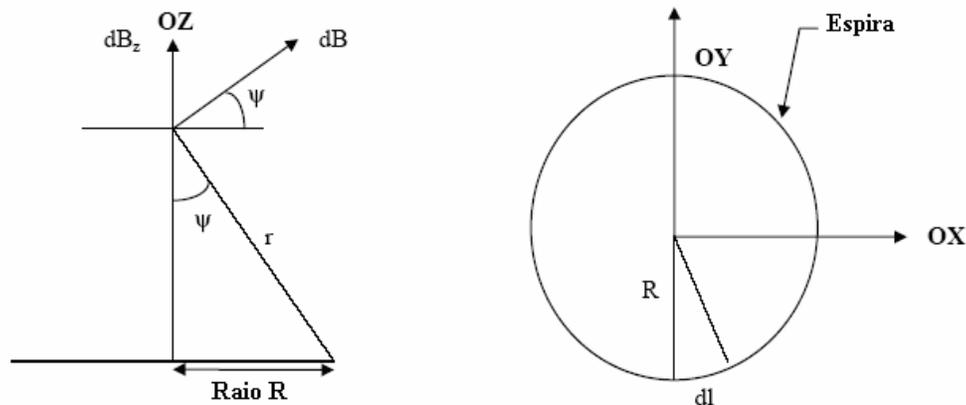


Figura 28 – Indução magnética axial em uma espira.

Observação, na Figura 28 e em algumas expressões desse capítulo o campo eletromagnético infinitesimal é definido como dB . Não confundir com dB utilizado como unidade acústica.

Por simetria, os componentes perpendiculares ao eixo serão cancelados, enquanto os paralelos serão somados.

$$dB_z = dB \cos(\psi); \quad dB_x = 0; \quad dB_y = 0 \quad (4.5)$$

Onde

$$\cos(\psi) = \frac{R}{r} \quad (4.6)$$

Usando a Lei de Biot e Savart (4.1) e as relações (4.5) e (4.6), obtém-se:

$$B_z(t) = \frac{\mu_0 i(t) R \cos(\psi)}{2r^2} = \frac{\mu_0 i(t) R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 i(t) \cos^3(\psi)}{2R} \quad (4.7)$$

Aplicando o Teorema de Pitágoras, $r^2 = R^2 + z^2$, a expressão que define o campo magnético para uma espira é:

$$B_z(t) = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff} R^2 \text{sen}(\omega t)}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (4.8)$$

4.2.2) Indução do eixo de uma bobina

Agora, a expressão de indução para uma espira será generalizada para nbr espiras, ou seja, para uma bobina (Figura 29).

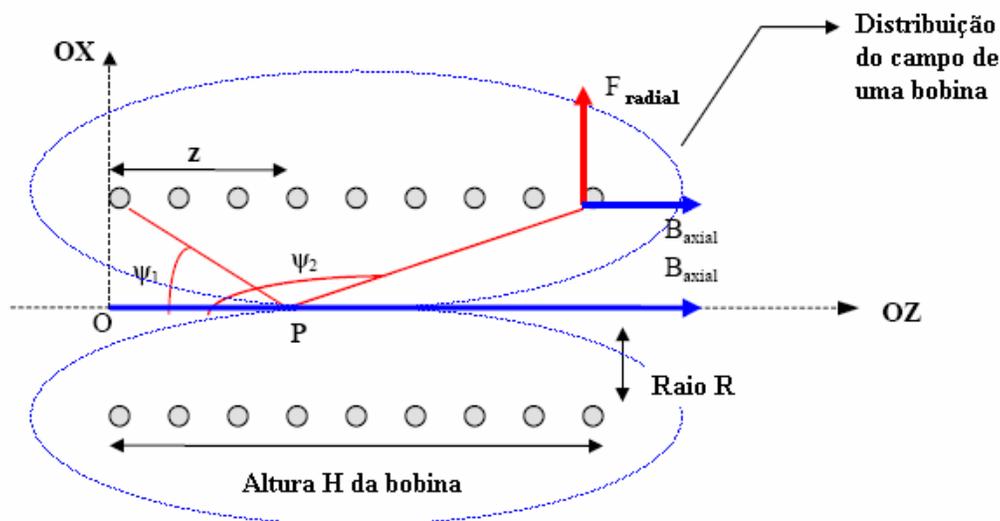


Figura 29 – Indução magnética em um ponto P do eixo da bobina.

Para um número de N espiras por unidade de comprimento, a equação do campo magnético, Equação (4.7), fica:

$$dB_z(t) = \frac{\mu_0 i(t) \text{sen}^3(\psi)}{2R} N dz \quad (4.9)$$

Se $\text{tg}(\psi) = \frac{R}{z}$ e definindo $dz = -\frac{R}{\sin^2 \psi} d\psi$, então:

$$dB_z(t) = -\frac{\mu_0 i(t) \text{sen}(\psi) N R d\psi}{2R} \quad (4.10)$$

Integrando a Equação (4.10) de $[\psi_1; \psi_2]$ o campo magnético torna-se:

$$B_z(t) = \frac{\mu_0 i(t) N}{2} (\cos \psi_2 - \cos \psi_1) \quad (4.11)$$

A expressão do campo de indução B_z em um ponto qualquer do eixo da bobina é:

$$B(z, t) = \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{eff} N}{2} \left(\frac{z}{(R^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{(H - z)}{(R^2 + (H - z)^2)^{1/2}} \right) \text{sen}(\omega t) \quad (4.12)$$

A partir da Equação (4.12) pode-se estabelecer uma expressão mais compacta para o campo magnético, ou seja, o campo de indução magnética médio:

$$B_{axial}(t) = B_{médio,z}(t) = \frac{\sqrt{2} \mu_0 I_{eff} N}{H} \left((R^2 + (H)^2)^{1/2} - R \right) \text{sen}(\omega t) \quad (4.13)$$

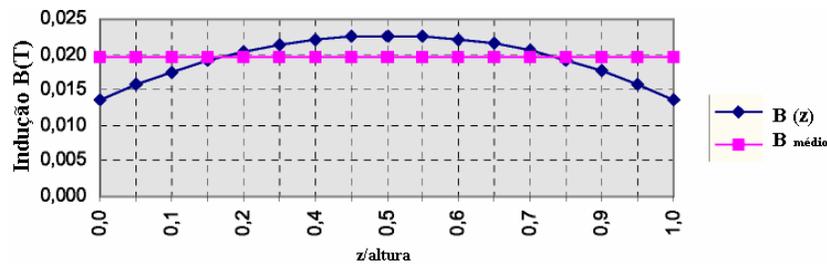


Figura 30 – Distribuição espacial de indução no eixo da bobina.

Como o campo magnético no eixo de um solenóide é máximo no centro e mínimo nas extremidades, (Figura 30), o uso do valor médio faz com que o valor do campo magnético nas extremidades seja superestimado, uma vez que o valor médio é um pouco superior ao valor real.

4.2.3) Força eletromagnética radial

As espiras da bobina são submetidas a um campo magnético médio $B_{médio,z}(t)$. Dessa maneira, a força radial por unidade de comprimento que atua na bobina, calculada a partir da Equação (4.3), se torna:

$$F_{radial}(t) = \frac{2 \mu_0 I_{eff}^2 N}{H} \left((R^2 + (H)^2)^{1/2} - R \right) \text{sen}^2(\omega t) \quad (4.14)$$

Propriedades da força:

- a) a força é proporcional ao quadrado da corrente;
- b) a força é proporcional ao número de espiras por unidade de comprimento;
- c) a frequência da força média é o dobro frequência da corrente e do campo

magnético (Figura 31).

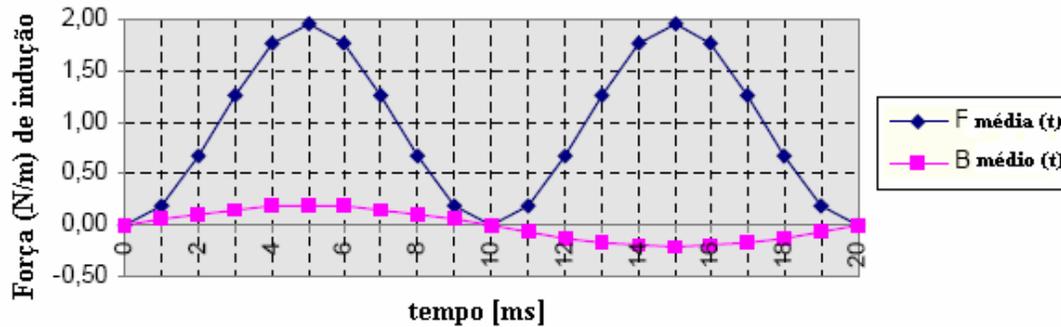


Figura 31 – Distribuição da força e do campo magnético no domínio do tempo.

4.3) Força eletromagnética axial

4.3.1) Indução de um condutor retilíneo

A indução criada por um condutor retilíneo, mostrado na Figura 32, é expressa da seguinte forma:

$$B(t) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r} \quad (4.15)$$

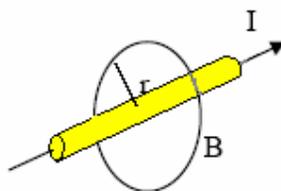


Figura 32 – Distribuição de indução de um condutor retilíneo.

4.3.2) Indução em uma bobina com *nbr* espiras

Supondo que a bobina possui quatro espiras paralelas dispostas uma contra as outras, como mostra a Figura 33, a concentração do campo radial excitada no primeiro anel é equivalente à soma da contribuição do campo criado pelas outras espiras.

$$B_{x,1}(t) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \left(\frac{1}{\phi} + \frac{1}{2\phi} + \frac{1}{3\phi} \right) = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi\phi} = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi\phi} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{j} \quad (4.16)$$

Onde ϕ é a distância entre centros de cada anel. Também corresponde ao diâmetro do condutor.

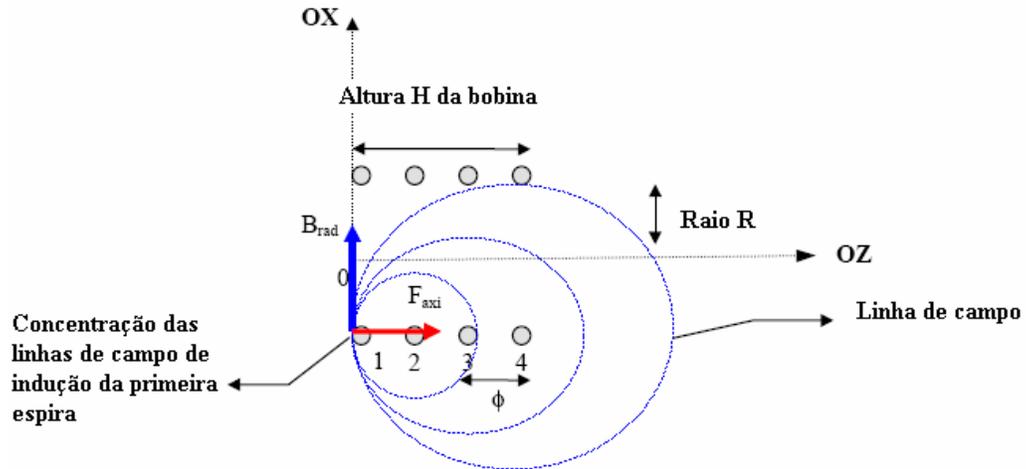


Figura 33 – Indução radial da primeira espira.

É possível que para a segunda espira o campo resultante dos anéis 1 e 3 se anule por simetria. Como não existe condutor além da quarta espira, o campo no condutor 2 pode ser simplificado para:

$$B_{x,2}(t) = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \left(\frac{1}{2\phi} \right) \quad (4.17)$$

Caso exista uma espira no meio de uma bobina, o campo resultante sobre ela é nulo. Generalizando a expressão para uma bobina com nbr espiras, obtêm-se as seguintes equações:

$$B_{x,\max}(t) = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{2\pi\phi} \sum_{j=1}^{nbr-1} \frac{1}{j} \text{sen}(\omega t) \quad z = 0 \quad (4.18)$$

$$B_x(t) = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{2\pi\phi} \sum_{j=nespira}^{nbr-(nespira-1)} \frac{1}{j} \text{sen}(\omega t) \quad z < H/2 \quad (4.19)$$

$$B_x(t) = 0 \quad z = H/2 \quad (4.20)$$

$$B_x(t) = -\frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{2\pi\phi} \sum_{j=nbr-nespira+1}^{(nespira-1)} \frac{1}{j} \text{sen}(\omega t) \quad z > H/2 \quad (4.21)$$

$$B_{x,max}(t) = -\frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{2\pi\phi} \sum_{j=1}^{nbr-1} \frac{1}{j} \text{sen}(\omega t) \quad z = H \quad (4.22)$$

onde “*nespira*” é o número da espira em que está sendo determinado o campo magnético.

São obtidos os valores máximos em $z = 0$ e $z = H$, bem como um valor nulo para $z = H/2$.

A presença de séries matemáticas torna estas expressões difíceis de serem transformadas em expressões analíticas. Apenas as séries $\sum_{j=1}^{nbr-1} \frac{1}{j}$ permitem uma primeira aproximação na forma $\ln(nbr)$. Dessa forma a curva $B(z)$ será linearizada a partir de dois pontos, o ponto de máximo e de mínimo, passando pelo centro $z = 0,5H$, como pode ser observado na Figura 34.

$$B_{radial}(t) = B_{x,linear}(t) = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{2\pi\phi} \ln(nbr) \left(\frac{-2z}{H} + 1 \right) \text{sen}(\omega t) \quad (4.23)$$

Logo, a expressão final para indução radial média pode ser calculada por:

$$B_{radial}(t) = B_{x,m\u00e9dio}(t) = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{4\pi\phi} \ln(nbr) \text{sen}(\omega t) \Rightarrow z < H/2 \quad (4.24)$$

$$B_{radial}(t) = B_{x,m\u00e9dio}(t) = -\frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{4\pi\phi} \ln(nbr) \text{sen}(\omega t) \Rightarrow z > H/2 \quad (4.25)$$

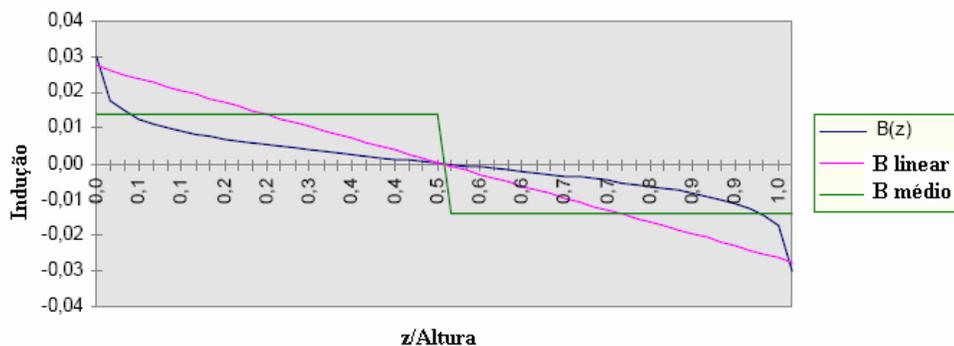


Figura 34 – Indução radial na bobina.

A Figura 34 mostra a aproximação utilizada para obter uma relação simplificada.

4.3.3) Força axial

Será considerada uma indução radial média na bobina. Cada espira será submetida a uma força axial por unidade de comprimento determinada por:

$$F_{axial}(t) = F_{Z,média}(t) = \left\{ \frac{\mu_0 I_{eff}^2 \ln(nbr) \text{sen}^2(\omega t)}{2\pi\phi} \right\} \quad z < H/2 \quad (4.26)$$

$$F_{axial}(t) = F_{Z,média}(t) = \left\{ \frac{-\mu_0 I_{eff}^2 \ln(nbr) \text{sen}^2(\omega t)}{2\pi\phi} \right\} \quad z > H/2 \quad (4.27)$$

$$F_{axial}(t) = F_{Z,média}(t) = 0 \quad z = H/2 \quad (4.28)$$

com as seguintes propriedades:

- a) a amplitude da força é proporcional a corrente ao quadrado (I_{eff});
- b) a frequência da força é o dobro da frequência da corrente;
- c) a distribuição de força comprime a bobina.

Neste capítulo foram determinadas as forças que atuam nas direções axial e radial do reator. Para facilitar a manipulação matemática, serão utilizados os valores médios dessas expressões. Nos próximos capítulos elas serão utilizadas como condição de contorno dos modelos analítico e numérico de vibração.

CAPÍTULO 5

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS DOS MATERIAIS DAS PAREDES DO REATOR

O material que compõe o cilindro do reator pode ser considerado um material composto. De acordo com Pereira [15], um material composto é formado pela união de dois ou mais materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de desempenho superior àqueles de seus componentes individuais. Este material resultante é um arranjo de fibras impregnado em uma matriz. A fibra é o elemento constituinte que confere ao material composto suas características de rigidez, resistência à ruptura, etc. Já a matriz tem como função principal transferir as solicitações mecânicas às fibras e protegê-las do ambiente externo.

Pelo fato de um material composto ser formado pela união de materiais com diferentes propriedades mecânicas, o mesmo não terá um comportamento isotrópico, ou seja, as suas propriedades mecânicas dependem da direção na qual o esforço é aplicado. A anisotropia dos materiais compostos é mais facilmente trabalhada do que os casos mais gerais de materiais anisotrópicos. Para materiais compostos, pode-se definir um sistema de eixos ortogonais, com relação ao qual as propriedades mecânicas são identificadas, sendo que um dos eixos, denominado 1, é colocado longitudinalmente às fibras, um outro denominado 2 é colocado transversalmente às fibras e um terceiro é colocado ortogonalmente aos dois anteriores. Para um melhor entendimento da definição do sistema de eixos de ortotropia, observe-se a Figura 35.

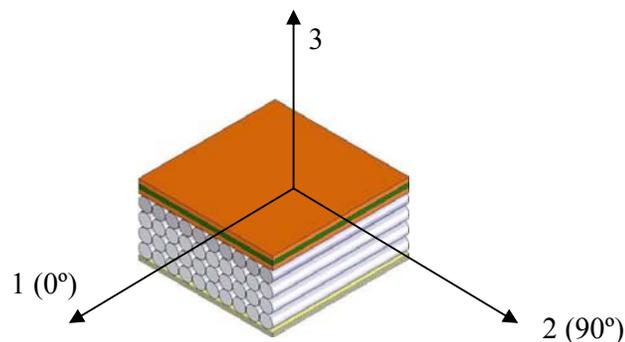


Figura 35 – Sistema de eixos de ortotropia.

Portanto, os métodos utilizados para determinar as propriedades mecânicas do material que constitui os reatores deverão ser conduzidos de maneira que possam ser determinadas as propriedades mecânicas nos eixos de ortotropia.

A seguir serão explicados detalhadamente os métodos empregados para determinar as propriedades mecânicas do material composto que constitui as paredes do reator.

5.1) Método da viga livre-livre

Esse método é baseado na norma ASTM E 1876-01 [16] cujo objetivo consiste em determinar as propriedades dinâmicas de materiais elásticos à temperatura ambiente. Amostras desses materiais possuem frequências de ressonância específicas que são determinadas a partir do seu módulo de elasticidade, massa e geometria. O módulo de elasticidade é determinado utilizando a frequência de ressonância do modo de flexão da viga, enquanto que o módulo de cisalhamento é obtido através da frequência de ressonância do modo torcional.

Neste método, a frequência de ressonância de uma amostra com uma determinada geometria é obtida através da excitação por um martelo de impacto. Um acelerômetro capta essa vibração transformando-a em sinal elétrico que será adquirido e processado pelo analisador de sinais. O suporte, local de impactação e ponto de aquisição do sinal são definidos pela norma com o objetivo de medir apenas um modo específico.

Este método é utilizado para determinar as propriedades de materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos. No entanto pode, também, ser utilizado para materiais compostos, desde que considerados os efeitos de anisotropia.

5.1.1) Descrição do experimento

Os equipamentos necessários estão mostrados na Figura 36. Basicamente, se utiliza um martelo, um acelerômetro, um analisador de sinais, um sistema de suporte que caracterize a amostra na condição livre-livre e um corpo de prova do material na forma de viga.

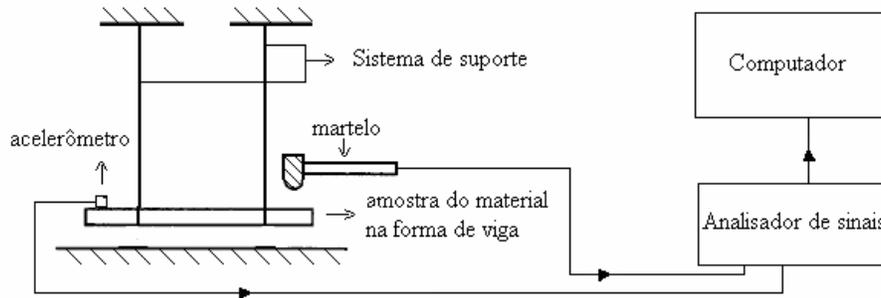


Figura 36 - Diagrama com os equipamentos necessários para realizar o teste [16].

a) Frequência de ressonância do modo de flexão

Os dois suportes devem ser posicionados a uma distância de $0,224L$ das extremidades da viga, onde L representa o comprimento da amostra. Essa distância é importante, pois os suportes estarão posicionados sobre as linhas nodais, ou seja, os pontos da viga que não apresentam deslocamento no primeiro modo de flexão. O acelerômetro também deve estar na posição indicada pela referência [16], pois isso permite medir facilmente o deslocamento apenas na frequência de interesse. A posição de impactação do martelo também deve seguir a indicação da norma. Desta forma, será garantido que o modo de flexão é o mais excitado. Deve ser feita a média de cinco funções resposta em frequência para então determinar a frequência de ressonância em flexão. Na Figura 37 é possível observar os pontos de fixação dos apoios, do acelerômetro e de impactação da viga.

Para verificar a influência da massa do acelerômetro foram obtidas duas FRF's. A primeira foi medida com o acelerômetro fixado à estrutura, no ponto desejado. Na segunda medição adicionou-se um acelerômetro igual, desligado, próximo ao acelerômetro ativo. As FRF's resultantes não indicaram diferenças significativas, ou seja, o acelerômetro ativo sozinho não causa modificação no comportamento da estrutura.

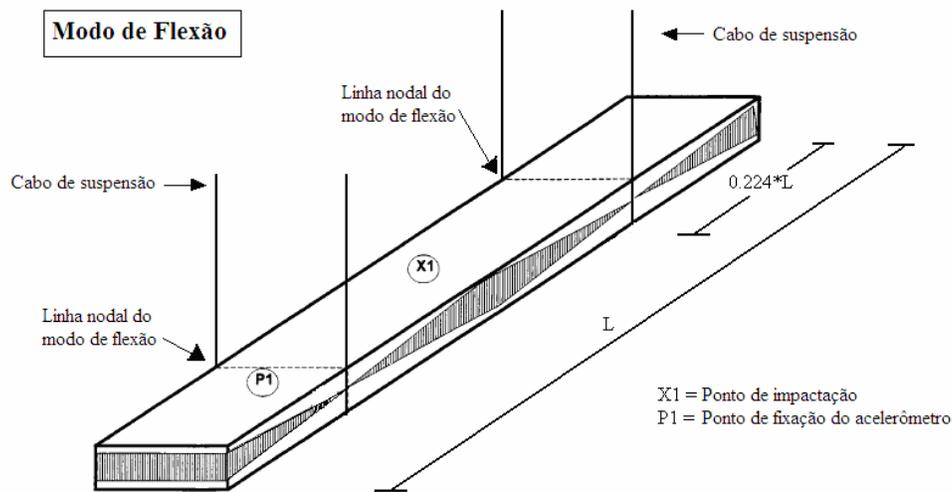


Figura 37 – Posição dos componentes para medir o modo de flexão [16].

b) Frequência de Ressonância do Modo de Torção

Os suportes da viga devem estar posicionados no ponto médio da largura e do comprimento da viga. O acelerômetro deve ser posicionado em um quadrante da viga, a uma distância de $0,224L$ da extremidade. Pelo fato de se tratar de um ponto nodal do modo de flexão, a possibilidade de detecção desse modo durante a análise de torção é minimizada. A impactação deve ser realizada no quadrante oposto diagonalmente ao acelerômetro, a uma distância de $0,224L$ da extremidade da viga. Esse posicionamento é para evitar que o modo de flexão seja excitado. Deve ser feita a média de cinco aquisições para então determinar a frequência de ressonância do modo torcional. Na Figura 38 é possível observar os pontos de fixação dos apoios, do acelerômetro e de impactação para a detecção da frequência de ressonância correspondente ao modo torcional.

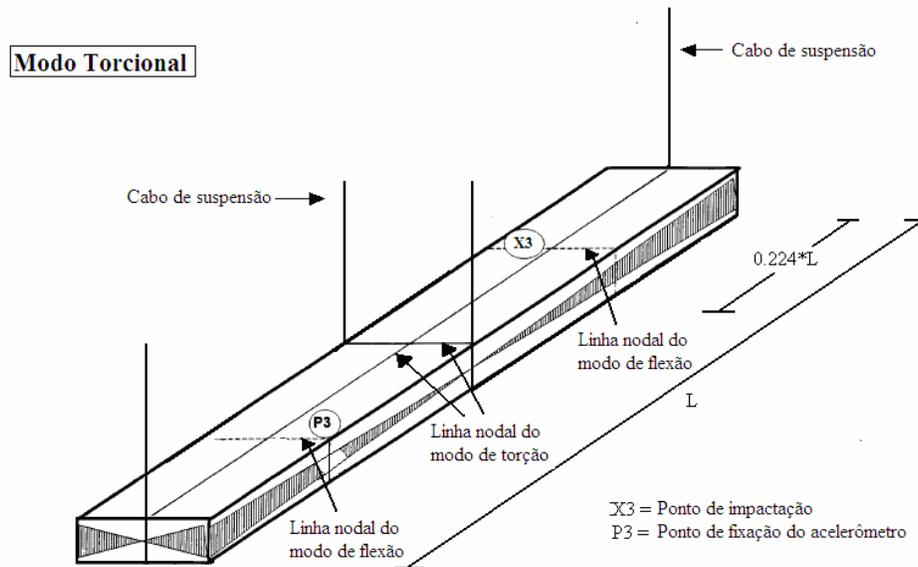


Figura 38 – Posições para excitar o modo torcional [16].

5.1.2) Procedimento Experimental

Os equipamentos utilizados para realizar as medições, bem como, algumas informações técnicas estão listadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Equipamentos utilizados para realizar as análises.

Item	Quantidade	Equipamento	Fabricante	Modelo	Sensibilidade
1	1	Analisador de sinais	LMS	Scadas III	
2	1	Computador			
3	1	Martelo de impacto	PCB	086C01	12 mV/N
4	1	Acelerômetro	B&K	4519-00	1,037 mV/ms-2

As amostras utilizadas para determinar as propriedades mecânicas nas duas direções apresentam as características geométricas e as massas descritas na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades das amostras utilizadas no ensaio.

Amostra	Orientação das fibras	Comprimento da viga (L)	Largura da viga (b)	Espessura da viga (t_K)	Massa da viga (m)
1	0°	237 mm	23 mm	13 mm	172 g
2	90°	200 mm	23 mm	13 mm	126 g

a) Módulo de Elasticidade para Viga a 90°

Para uma viga na condição de apoio livre-livre, como mostrado na Figura 37, que vibra na frequência fundamental de flexão (Figura 39) é possível determinar o módulo de elasticidade do material através da equação:

$$E = 0,9465(mf_f^2 / b)(L^3 / t_K^3)T_1 \quad (5.1)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade (Pa), m a massa da viga (g), b a largura da viga (mm), L comprimento (mm), t_K a espessura (mm), f_f a frequência fundamental de ressonância da viga em flexão (Hz), indicada na Figura 40, e T_1 um fator de correção para o modo de flexão que está relacionado com o coeficiente de Poisson, definido pela referência [16] como:

$$T_1 = 1 + 6,585(1 + 0,752\mu + 0,8109\mu^2)(t_K / L)^2 - 0,868(t_K / L)^4 - \left[\frac{8,340(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2)(t_K / L)^4}{1,000 + 6,338(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2)(t_K / L)^2} \right] \quad (5.2)$$

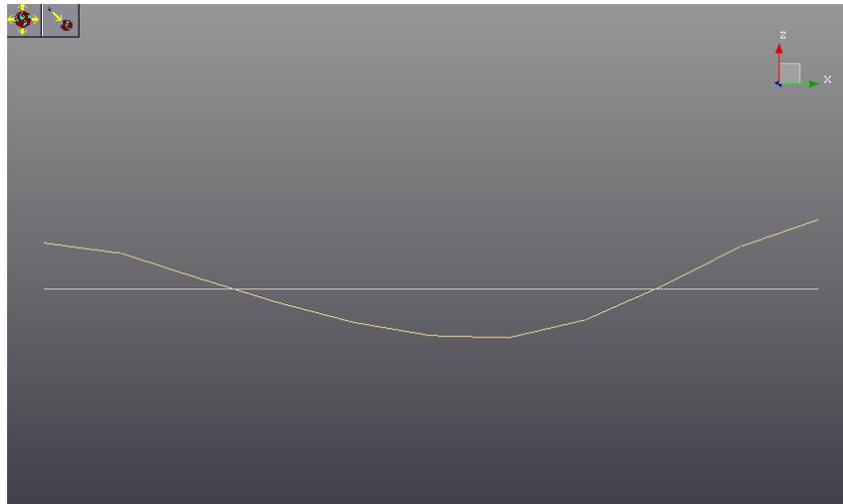


Figura 39 – Modo de flexão da viga a 90°.

A Figura 39, bem como as demais figuras desse capítulo que mostram os modos de flexão ou de torção foram obtidas através de análise modal experimental.

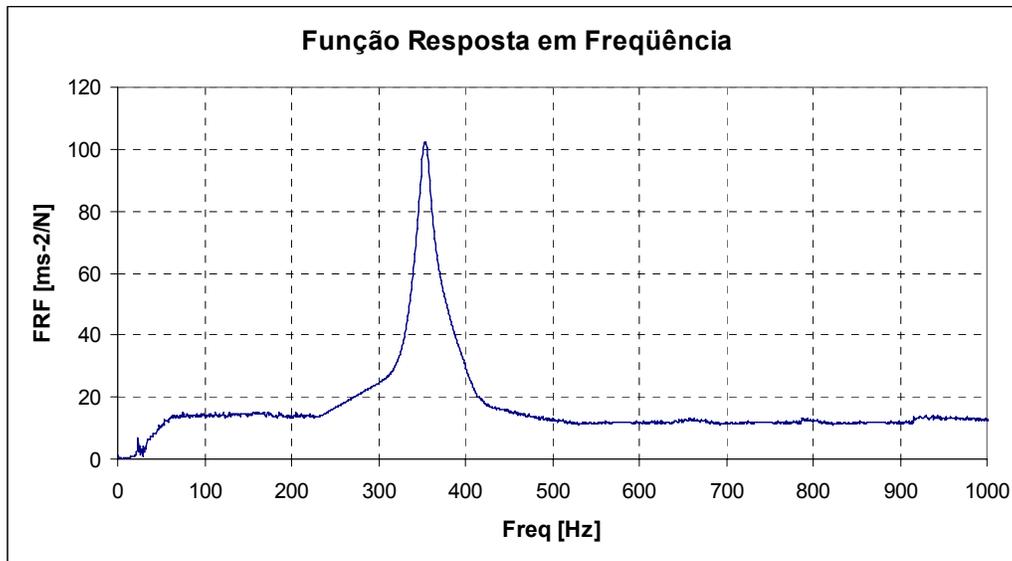


Figura 40 – Curva de resposta em frequência da viga a 90° na condição livre-livre e apoios na posição para flexão.

Na Figura 41, é possível observar as fibras de material composto perpendicular ao eixo 1, o que caracteriza a viga a 90° .

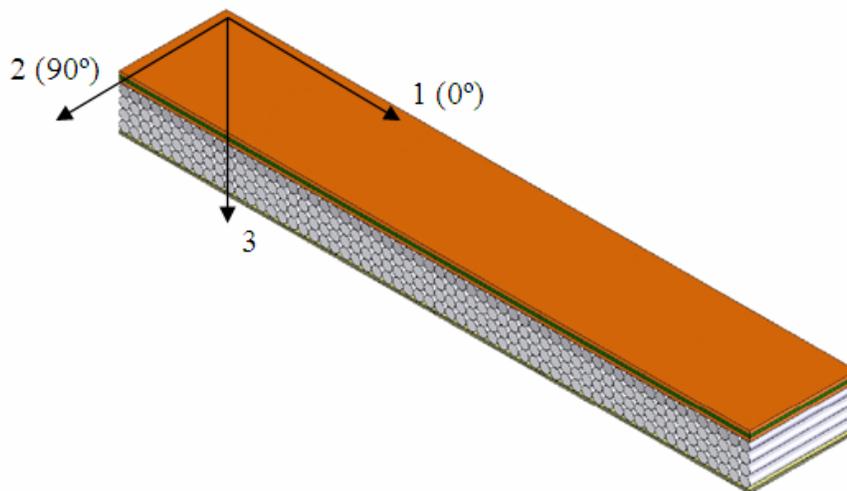


Figura 41 – Viga de material composto com fibras perpendiculares (90°) ao eixo 1.

b) Módulo de Cisalhamento para Viga a 90°

Uma viga livre-livre com os apoios na posição observada na Figura 38 ao ser excitada faz com que somente o modo torcional fundamental (mostrado na Figura 42), seja excitado. Desta maneira pode-se determinar o módulo de cisalhamento do material através da equação:

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt_K} [A_1 / (1 + A_2)] \quad (5.3)$$

onde G corresponde ao módulo de cisalhamento (Pa), f_t a frequência fundamental do modo de torção (Hz), indicada na Figura 43, e A_1 e A_2 correspondem aos fatores de correção que dependem da razão entre largura e espessura e são definidos pela referência [16] como:

$$A_1 = \left[\frac{b/t_K + t_K/b}{4(t_K/b) - 2,52(t_K/b)^2 + 0,21(t_K/b)^6} \right] \quad (5.4)$$

$$A_2 = \frac{[0,5062 - 0,8778(b/t_K) + 0,3504(b/t_K)^2 - 0,0078(b/t_K)^3]}{[12,03(b/t_K) + 9,892(b/t_K)^2]} \quad (5.5)$$

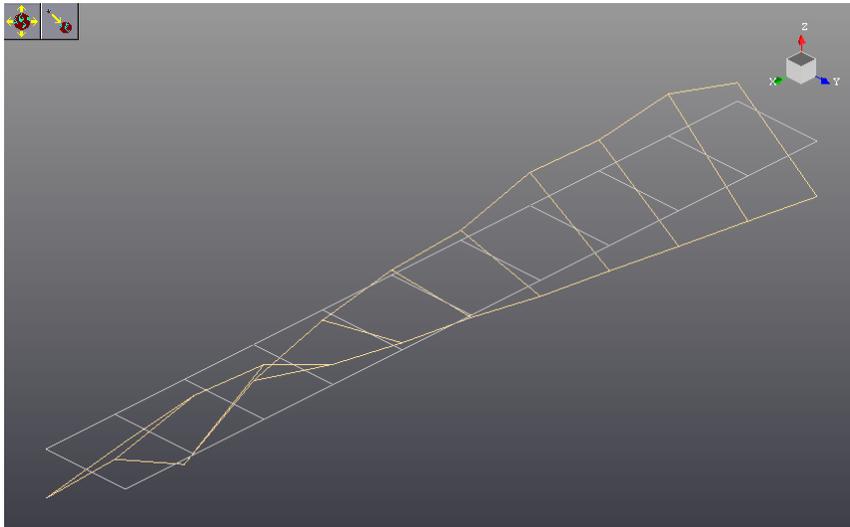


Figura 42 – Modo de torção da viga a 90°.

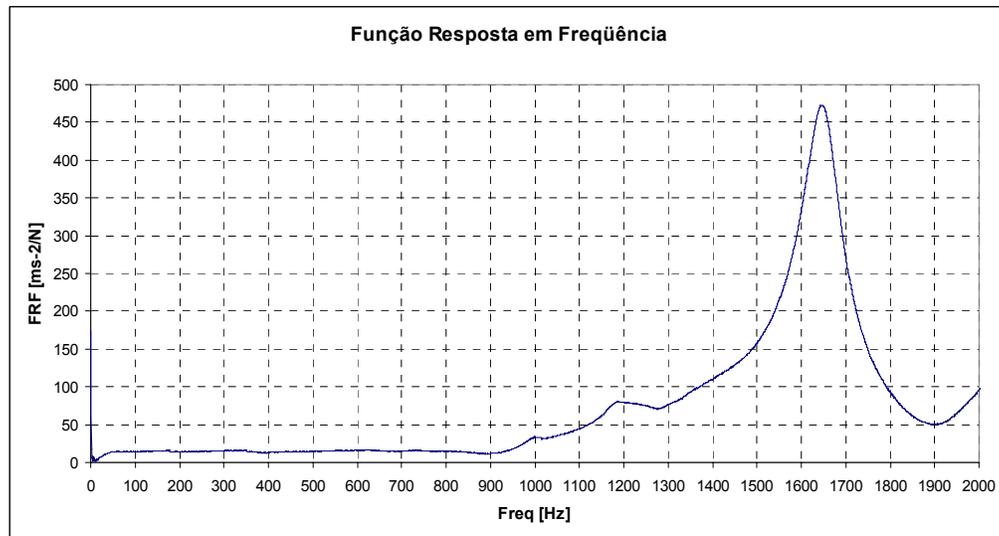


Figura 43 – Curva de resposta em freqüência da viga a 90° na condição livre-livre e apoios na posição para torção.

c) Módulo de Elasticidade para Viga a 0°

As Equações (5.1) e (5.2) utilizadas para obter o módulo de elasticidade da viga a 90° também serão utilizadas para determinar o módulo de elasticidade da viga a 0° .

Na Figura 44 é apresentada a análise modal da viga 0° e na Figura 45 a resposta em freqüência nos pontos de impactação e resposta indicados pela norma.

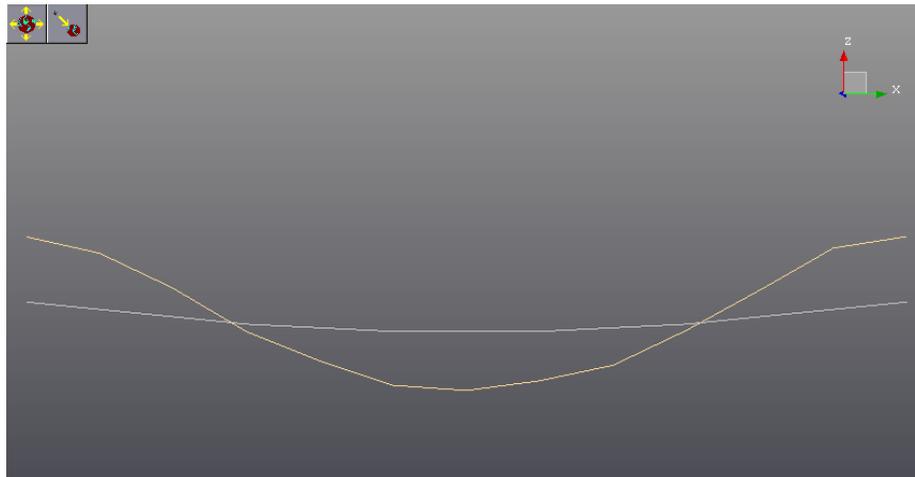


Figura 44 – Modo de flexão da viga a 0° .

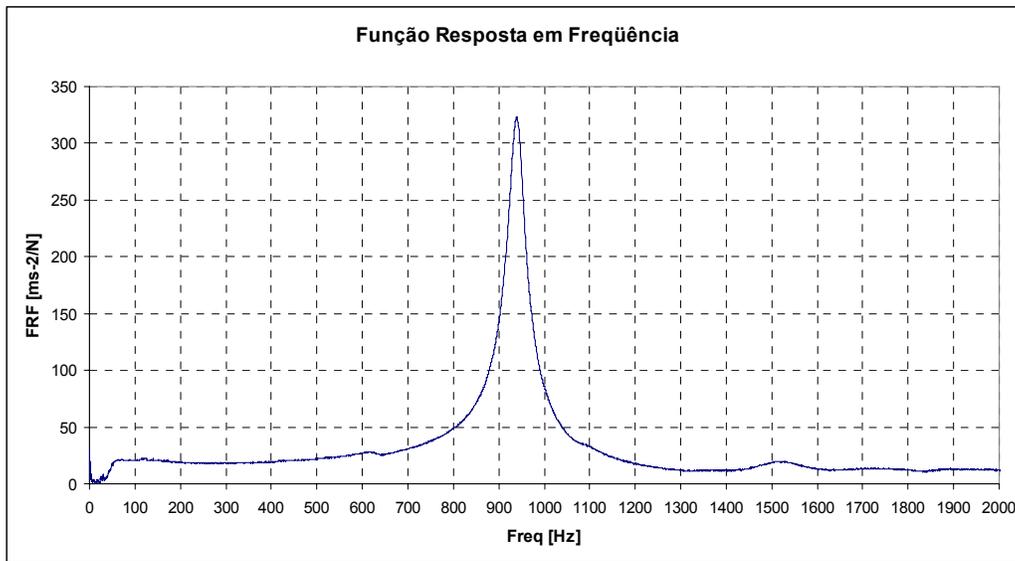


Figura 45 – Curva de resposta em freqüência da viga livre-livre a 0° e apoios na posição para flexão.

Na Figura 46 é possível observar as fibras do material composto paralelas ao eixo, caracterizando a orientação da viga a 0° .

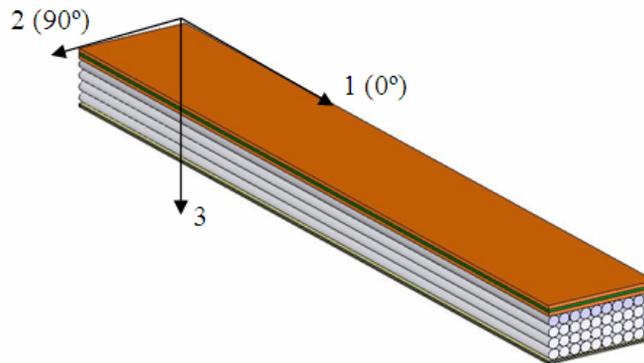


Figura 46 – Viga de material composto com fibras paralelas (0°) ao eixo 1.

d) Módulo de Cisalhamento para Viga a 0°

Também neste caso torna-se possível obter o módulo de cisalhamento da viga a 0° através das expressões 5.3, 5.4 e 5.5.

Na Figura 47 é apresentado o modo torcional da viga a 0° obtido através de uma análise modal experimental. Já a Figura 48 apresenta uma resposta em freqüência da viga a 0° nos pontos indicados pela norma.

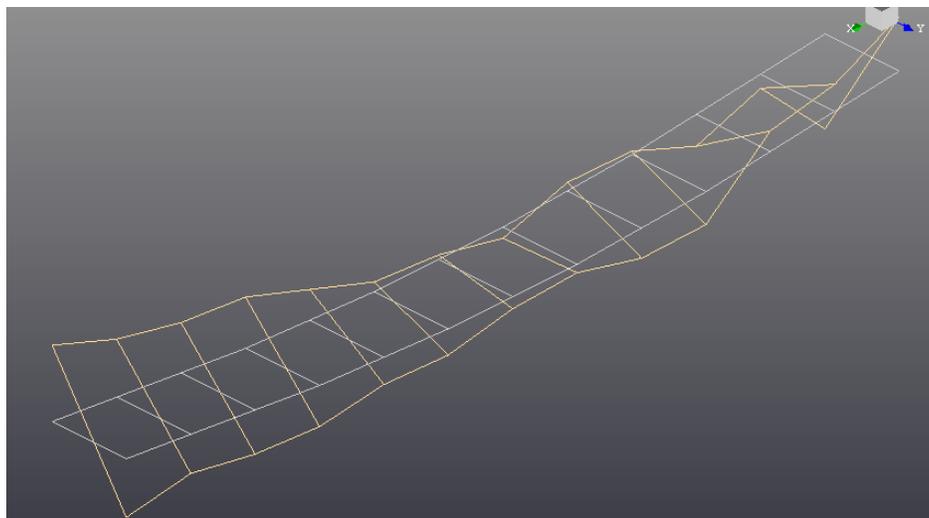


Figura 47 – Modo de torção da viga à 0°.

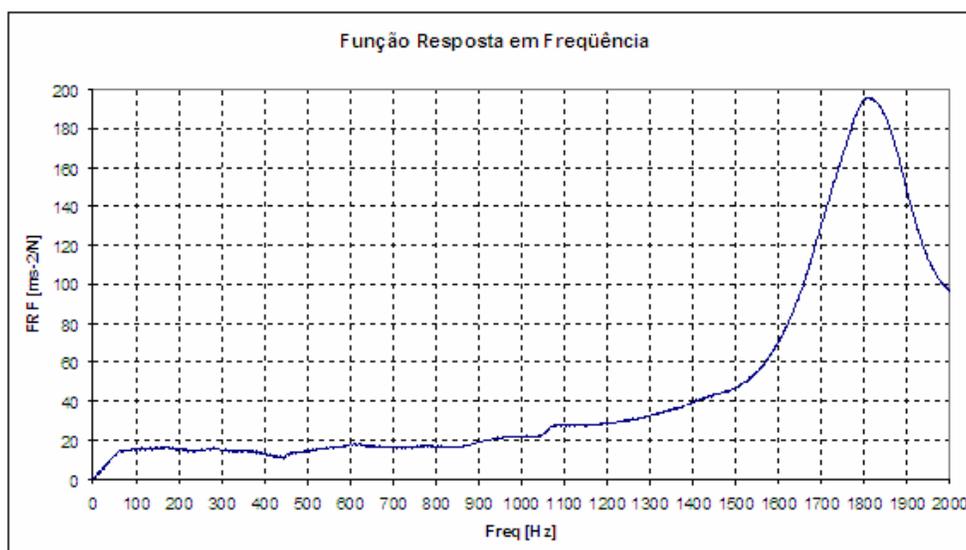


Figura 48 – Curva de resposta em frequência da viga a 0° na condição livre-livre e apoios na posição para torção.

5.1.3) Resultados

Os resultados obtidos são decorrentes da análise de exemplares retirados da amostra enviada pela Areva, ou seja, são corpos de prova que faziam parte da parede do reator. As frequências naturais dos modos de vibração e os respectivos módulos de elasticidade e de cisalhamento são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Módulo de elasticidade e de cisalhamento calculados a partir dos testes.

Orientação	f_f (Hz)	f_t (Hz)	E (Mpa)	G (Mpa)
0°	929,722	1756,442	29820,0	2283,0
90°	346,425	1649,113	2429,0	1561,0

Os resultados obtidos neste ensaio serão comparados com os da viga engastada para verificar a concordância entre os resultados.

5.2) Método da viga engastada

O método descrito na Norma ASTM E 756-98 [17] é freqüentemente utilizado para determinar as propriedades mecânicas de materiais viscos-elásticos, tais como fator de perda, módulo de elasticidade e módulo de cisalhamento. No entanto também pode ser utilizado para determinar as propriedades de materiais compostos, desde que respeitada a anisotropia do material.

Nesta seção o método da viga engastada será utilizado para determinar o módulo de elasticidade do material da parede do reator. Na seqüência, esse valor será comparado ao da viga livre-livre.

Para determinar a freqüência de ressonância de flexão, a viga deve ser fixada em um suporte que caracterize um engaste rígido. Na seqüência, a amostra é excitada por um martelo equipado com um transdutor de força. O acelerômetro fixado na viga converte a vibração em um sinal elétrico que será processado pelo analisador. No entanto, para conseguir determinar o módulo de elasticidade do material, é necessário, além da freqüência de ressonância do modo de flexão, as dimensões geométricas e a densidade do material da amostra.

5.2.1) Descrição do experimento

Para realizar o experimento foram utilizados os equipamentos mostrados na Figura 49. Basicamente, se utiliza um martelo com célula de força, um acelerômetro, um analisador de sinais, um sistema de suporte que caracterize um engaste rígido numa das extremidades da amostra e um corpo de prova do material na forma de viga.

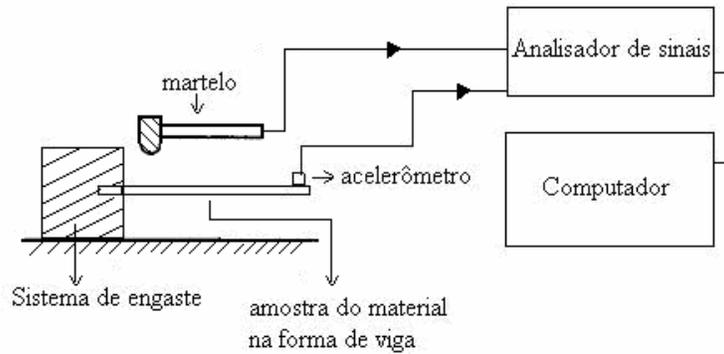


Figura 49 - Diagrama com os equipamentos necessários para realizar o teste.

A viga deve ser posicionada e apertada até que o suporte garanta a condição de engaste perfeito. O sistema de fixação é muito importante, pois caso a condição de engaste não seja obedecida, isto poderá comprometer a qualidade dos resultados. O acelerômetro deve ser posicionado bem próximo à extremidade livre da viga, pois é nessa região o ponto de maior deslocamento do modo de flexão. Já a impactação deve ser realizada em um ponto bem próximo ao engaste, pois essa é uma região mais rígida. A princípio para determinar a frequência de ressonância são realizadas 5 medições e calculada a média. A Figura 50 mostra o ponto de fixação do acelerômetro, impactação e o primeiro modo de flexão da viga engastada.

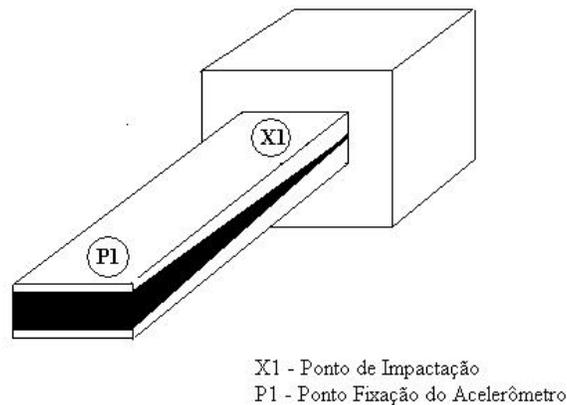


Figura 50 – Posição dos transdutores para medir o modo de flexão.

5.2.2) Procedimento experimental

Para o cálculo das propriedades mecânicas são necessárias as frequências de ressonância de cada modo de vibração, as propriedades geométricas e a densidade do material da viga submetida ao ensaio. Particularmente, o módulo de elasticidade é obtido a partir da equação:

$$E = \frac{(12\rho L^4 f_n^2)}{(t_k^2 C_n^2)} \quad (5.6)$$

onde, E corresponde ao módulo de elasticidade do material que compõe a viga (Pa), ρ a densidade do material (kg/m^3), L o comprimento da viga (m), n o número do modo de vibração, f_n frequência de ressonância do modo n em flexão (Hz), t_k espessura da viga (m), e C_n o coeficiente para o modo n . Considerando uma viga engastada, os coeficientes dos modos de vibração, de acordo com a referência [17], correspondem a:

$$C_1 = 0,55959;$$

$$C_2 = 3,5069;$$

$$C_3 = 9,8194;$$

$$C_4 = 19,242;$$

$$C_5 = 31,809.$$

E para $n > 5$:

$$C_n = \left(\frac{\pi}{2}\right)(n - 0,5)^2 \quad (5.7)$$

Os equipamentos utilizados para realizar as medições, bem como, algumas informações técnicas estão listadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Equipamentos utilizados para realizar as análises.

Item	Quantidade	Equipamento	Fabricante	Modelo	Sensibilidade
1	1	Analisador de sinais	LMS	Scadas III	
2	1	Computador			
3	1	Martelo de impacto	PCB	086C01	12 mV/N
4	1	Acelerômetro	B&K	4519-00	1,037 mV/ms-2

Como mencionado anteriormente, o material analisado não é isotrópico, logo, fez-se necessário preparar dois tipos de corpos de prova, um com os fios de alumínio orientados a 0° (direção circunferencial do reator) e o outro a 90° (direção axial do reator). Desta forma foi possível determinar as propriedades da viga em diferentes direções. As amostras utilizadas para determinar as propriedades mecânicas nas duas direções apresentam características geométricas e massa descrita na Tabela 13.

Tabela 13 – Propriedades das amostras utilizadas no ensaio.

Amostra	Orientação das fibras	Comprimento da viga (L)	Largura da viga (b)	Espessura da viga (t_K)	Densidade (ρ)
1	0°	217 mm	23 mm	13 mm	2110 kg/m ³
2	90°	180 mm	23 mm	13 mm	2110 kg/m ³

Medindo a força aplicada no ponto de excitação e a aceleração em cada ponto de resposta é obtida a curva de resposta e frequência.

a) Módulo de Elasticidade para Viga a 90°

Na Figura 51 é mostrada a resposta em frequência da viga a 90° segundo os pontos de impactação e resposta mostrados na Figura 50. Já na Figura 52 é apresentada a análise modal realizada para verificar se o modo de flexão ocorre na frequência indicada pela FRF.

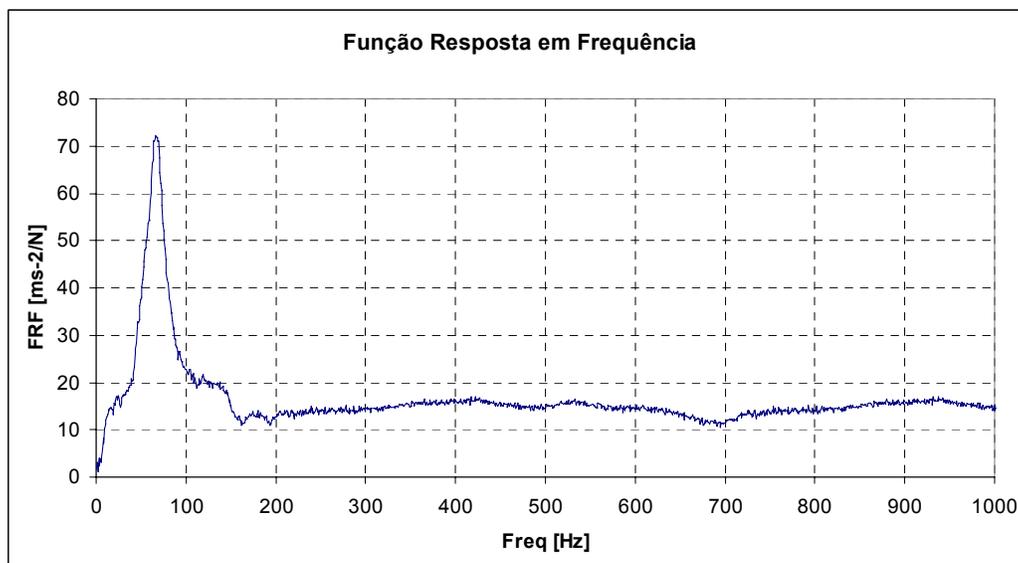


Figura 51 – Curva de resposta em frequência da viga a 90° na condição engastada.

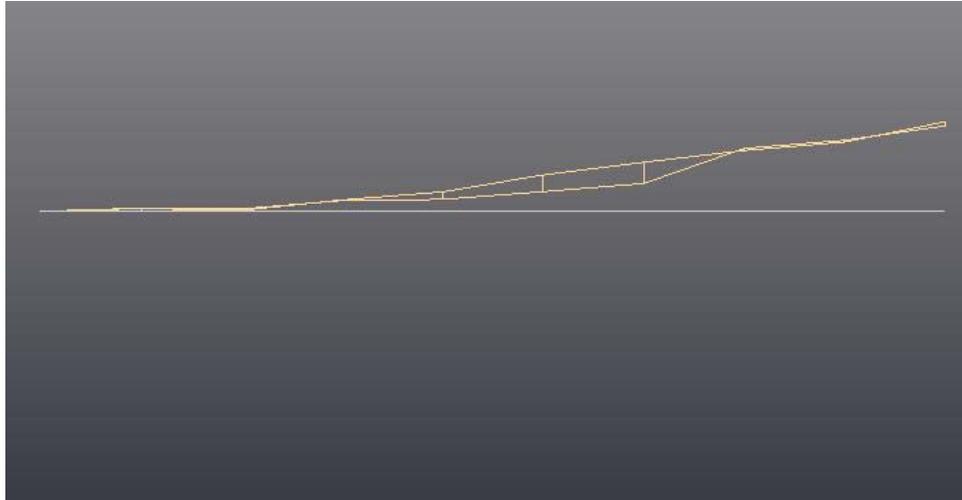


Figura 52 – Primeiro modo de vibração da viga (Fios 90°).

b) Módulo de Elasticidade para Viga a 0°

Na Figura 53 é mostrada a resposta em frequência da viga a 0°, enquanto que na Figura 54 é apresentada a análise modal dessa amostra. A análise modal foi realizada para verificar se a frequência de ressonância obtida na resposta em frequência correspondia mesmo ao primeiro modo de flexão.

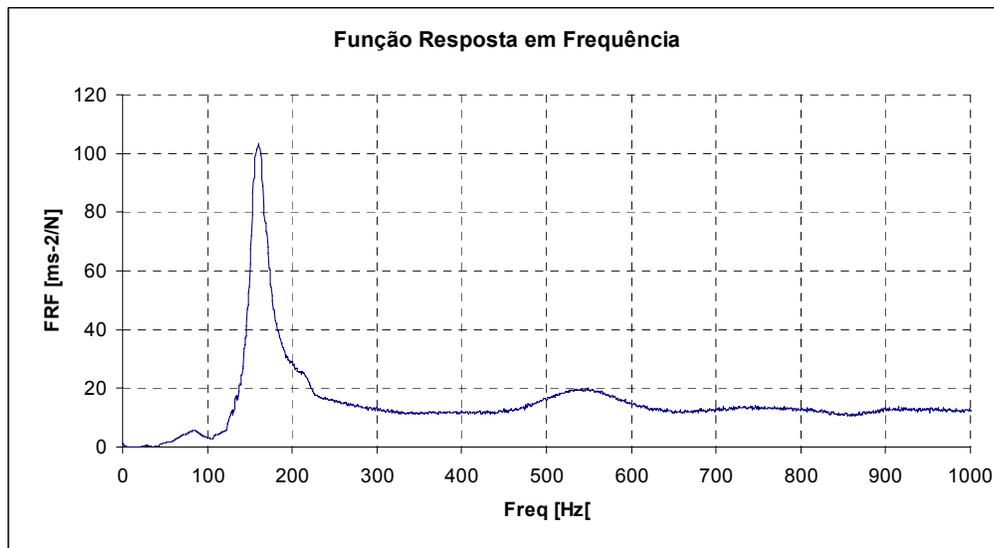


Figura 53 – Curva de resposta em frequência da viga a 0° na condição engastada.

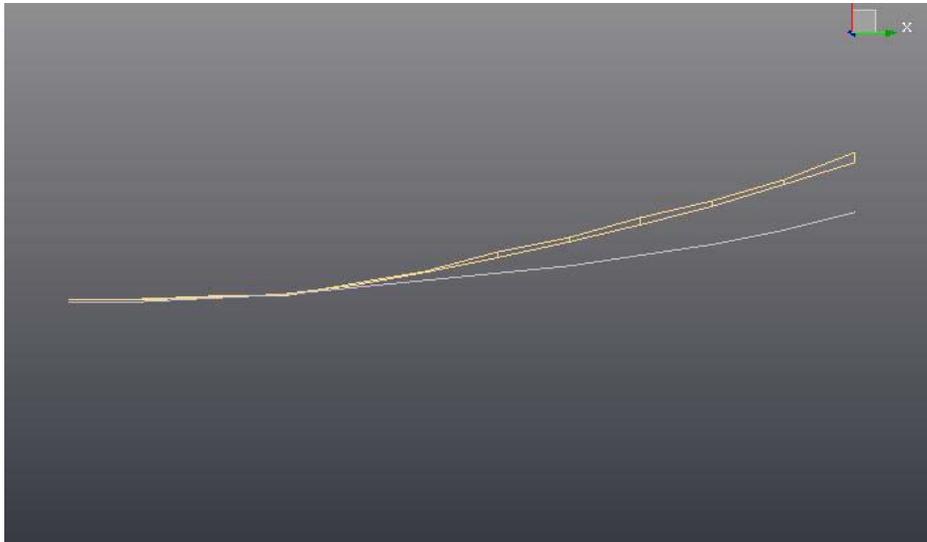


Figura 54 – Primeiro modo de vibração da vigas com fios a 0°.

5.2.3) Resultados

Na Tabela 14 são apresentadas as frequências correspondentes ao primeiro modo de flexão da viga em cada uma das orientações. Também é apresentado o módulo de elasticidade calculado a partir da Equação 5.6.

Tabela 14 – Módulo de elasticidade calculado a partir das frequências naturais e propriedades das vigas.

Orientação	f_f	E (MPa)
Viga 0°	164,30	28699,04
Viga 90°	67,00	2259,39

5.3) Princípio de Arquimedes

De acordo com Mazali [18], Arquimedes descobriu que um corpo imerso na água se torna mais leve devido a uma força, exercida pelo líquido sobre o corpo, vertical e para cima, que alivia o peso do corpo. Essa força do líquido sobre o corpo, é denominada empuxo. Desta forma foi estabelecido o Princípio de Arquimedes: "Todo corpo mergulhado num fluido sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo." Baseado neste princípio é possível obter a densidade de um determinado material, seja ele sólido ou líquido a partir da utilização da equação:

$$\rho_c = \left(\frac{m_c}{m_c - m_{ap}} \right) \rho_L \quad (5.8)$$

onde m_c [kg] corresponde a massa do corpo, m_{ap} [kg] a massa aparente do corpo, ou seja, a sua massa quando imerso em água e ρ_L [kg/m³] a densidade do líquido.

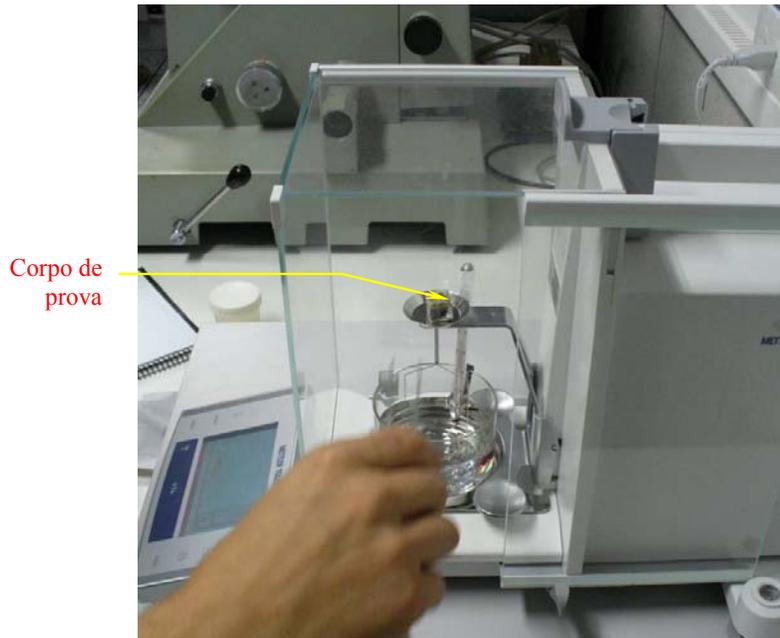


Figura 55 – Determinação da massa do corpo de prova no ar.

O equipamento utilizado para realizar a análise foi uma balança Mettler Toledo AX-204 (capacidade de 220 g e precisão de 0,0001 g). Basicamente, o processo de medição é formado por duas etapas sendo que na primeira é determinada a massa do corpo de prova no ar, como se observa na Figura 55, e na segunda, determina-se a massa do corpo de prova quando submerso na água (Figura 56). Desta forma, o equipamento fornece automaticamente a densidade do corpo de prova analisado.

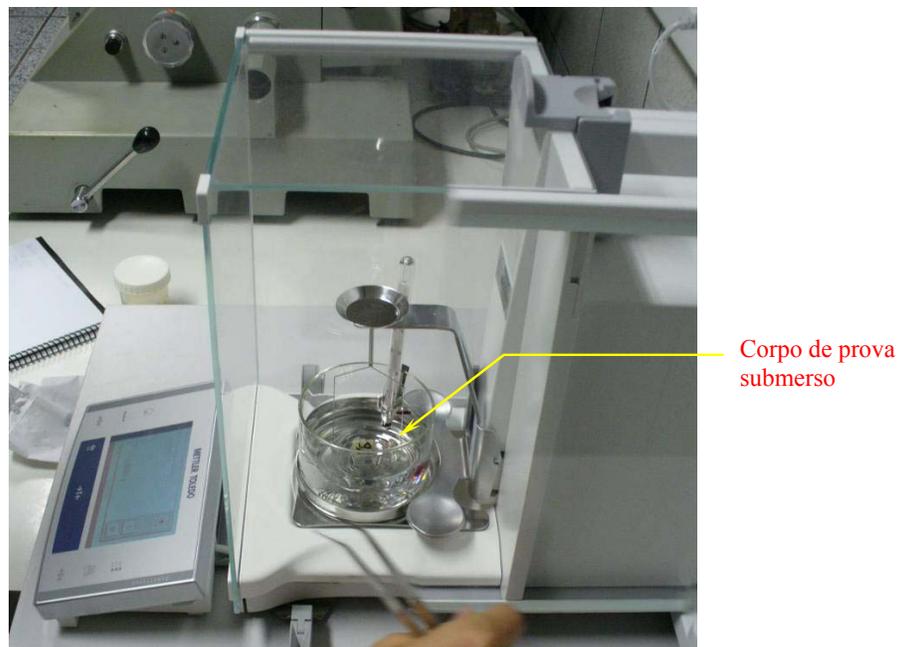


Figura 56 - Determinação da massa aparente do corpo de prova.

Seis corpos de prova foram submetidos aos ensaios, sendo que todos foram retirados da amostra enviada pela Areva. Os corpos de prova foram cortados em formato retangular com dimensões aproximadas de 20 mm x 13 mm x 15 mm. Na Tabela 15 observa-se o valor da densidade obtido para cada um dos corpos de prova.

Tabela 15 – Resultados da densidade para os diferentes corpos de prova.

Corpo de prova	Densidade (g/cm ³)
1	2,116
2	2,091
3	2,114
4	2,113
5	2,135
6	2,096
Média	2,1108

Ao observar os resultados constata-se que não há uma variação significativa deste parâmetro. Portanto, o valor médio pode ser calculado pela média aritmética simples dos seis corpos de prova analisados, resultando em um valor médio de 2110,8 kg/m³.

5.4) Coeficiente de Poisson

Buscando verificar quais as propriedades mecânicas que mais influenciam nos resultados fornecidos pelos modelos numéricos correspondentes ao comportamento mecânico de um reator formado por um cilindro, foi feita uma série de testes, na qual as propriedades mecânicas do material que constitui o reator eram variadas a fim de que pudesse ser verificada sua influência sobre os resultados. A malha correspondente à geometria do reator pode ser verificada na Figura 57. Note que a direção circunferencial foi dividida em 18 elementos, enquanto que a direção axial foi dividida em 8 elementos, totalizando 144 elementos e 192 nós. O elemento utilizado foi do tipo casca, denominado *Shell 63*, com quatro nós por elemento. O software utilizado para construção da malha e análise numérica foi o *Ansys 10.0*.

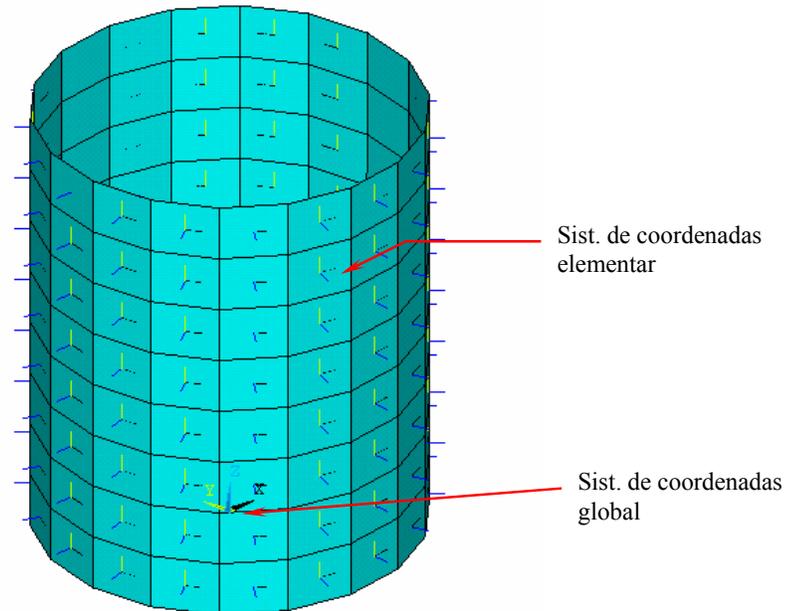


Figura 57 – Malha de elementos finitos do reator formado por um cilindro.

Para que as comparações pudessem ser efetuadas, fez-se necessário adotar os resultados fornecidos por um determinado modelo numérico, como referência. As propriedades mecânicas utilizadas neste modelo de referência foram: densidade $\rho = 2110,8 \text{ kg/m}^3$, módulo de elasticidade na direção circunferencial do reator $E_x = 2,982E10 \text{ N/m}^2$, módulo de elasticidade nas direções axial e radial, respectivamente, $E_y = 2,429E9 \text{ N/m}^2$, $E_z = 2,429E9 \text{ N/m}^2$; módulos de cisalhamento $G_{xy} = 2,283E9 \text{ N/m}^2$, $G_{xz} = 1,561E9 \text{ N/m}^2$ e $G_{yz} = 1,561E9 \text{ N/m}^2$ e coeficientes de Poisson $\mu_{xy} =$

0,25, $\mu_{xz} = 0,034$ e $\mu_{yz} = 0,034$. Observe que as direções relacionadas as propriedades baseiam-se no sistema de coordenadas elementar do modelo numérico (Figura 57), e não no sistema global de coordenadas. Além disso, utilizando estas propriedades, admite-se que o material do reator comporta-se como um material ortotrópico.

A seguir, são apresentadas as comparações entre os resultados obtidos pelo modelo numérico de referência e aqueles obtidos quando uma determinada propriedade mecânica do reator é variada. Com exceção do coeficiente de Poisson, as alterações foram feitas de forma que uma determinada propriedade mecânica do modelo de referência tivesse um aumento de 40%.

a) Alterando coeficiente de Poisson na direção circunferencial do reator (μ_{xy}).

Tabela 16 – Variações do coeficiente de Poisson.

	$M_{xy} = 0,15$	Referência	$\mu_{xy} = 0,35$	$M_{xy} = 0,45$
1º modo (Hz)	25,692	25,732	25,792	25,873
3º modo (Hz)	25,986	26,022	26,075	26,146
5º modo (Hz)	72,310	72,420	72,587	72,810
7º modo (Hz)	73,053	73,158	73,313	73,519
9º modo (Hz)	90,519	90,681	90,883	91,126
11º modo (Hz)	98,741	98,869	99,001	99,137
13º modo (Hz)	137,84	138,04	138,35	138,77
15º modo (Hz)	138,78	138,98	139,28	139,67
17º modo (Hz)	144,29	144,68	145,10	145,54
19º modo (Hz)	144,94	145,22	145,58	146,04

Observa-se na Tabela 16 que o aumento do coeficiente de Poisson desloca um respectivo modo de vibração para uma frequência mais alta, porém, este parâmetro tem uma pequena influência nos resultados, uma vez que as diferenças encontradas são muito pequenas, como pode se observar pela comparação dos diversos resultados obtidos.

b) Alterando a densidade do material que compõe o reator (ρ).

Tabela 17 – Variações na densidade do material.

	$\rho = 2110,8 \text{ Kg/m}^3$	$\rho = 2898 \text{ Kg/m}^3$	$\Delta f \text{ (Hz)}$	$\Delta \%$
1º modo (Hz)	25,732	21,747	3,985	15,48
3º modo (Hz)	26,022	21,993	4,029	15,48
5º modo (Hz)	72,420	61,206	11,214	15,48
7º modo (Hz)	73,158	61,830	11,328	15,48
9º modo (Hz)	90,681	76,640	14,041	15,48
11º modo (Hz)	98,869	83,559	15,31	15,48
13º modo (Hz)	138,04	116,67	21,37	15,48
15º modo (Hz)	138,98	117,46	21,52	15,48
17º modo (Hz)	144,68	122,28	22,4	15,48
19º modo (Hz)	145,22	122,73	22,49	15,48

Na Tabela 17 é mostrado que a alteração da densidade afetou significativamente os resultados, principalmente, daqueles em altas frequências onde se constata uma diferença maior. É possível observar também que o aumento da densidade desloca os modos de vibração para frequências mais baixas.

c) Alterando o módulo de elasticidade na direção circunferencial (E_x).Tabela 18 – Alterações do módulo de elasticidade na direção E_x .

	$E_x = 2,982 \text{ E10 Pa}$	$E_x = 4,1748 \text{ E10 Pa}$	$\Delta f \text{ (Hz)}$	$\Delta \%$
1º modo (Hz)	25,732	30,369	4,637	18,02
3º modo (Hz)	26,022	30,418	4,396	16,89
5º modo (Hz)	72,420	85,276	12,856	17,75
7º modo (Hz)	73,158	85,770	12,612	17,23
9º modo (Hz)	90,681	100,03	9,349	10,31
11º modo (Hz)	98,869	100,86	1,991	2,01
13º modo (Hz)	138,04	151,15	13,11	9,49
15º modo (Hz)	138,98	162,05	23,07	16,59
17º modo (Hz)	144,68	162,75	18,07	12,49
19º modo (Hz)	145,22	167,86	22,64	15,59

Através da Tabela 18 é possível observar que a variação do módulo de elasticidade na direção circunferencial, assim como a densidade afeta significativamente os resultados, porém, ao contrário da densidade não se pode afirmar que com o aumento da frequência tem-se um aumento da diferença.

d) Alterando o módulo de elasticidade na direção axial (E_y).

Tabela 19 – Alterações do módulo de elasticidade na direção E_y .

	$E_y=2,429E9$ Pa	$E_y=3,4006E9$ Pa	Δf (Hz)	$\Delta\%$
1° modo (Hz)	25,732	25,756	0,024	0,09
3° modo (Hz)	26,022	26,043	0,021	0,08
5° modo (Hz)	72,420	72,488	0,068	0,09
7° modo (Hz)	73,158	73,221	0,063	0,09
9° modo (Hz)	90,681	95,530	0,151	0,17
11° modo (Hz)	98,869	112,35	13,481	13,63
13° modo (Hz)	138,04	138,17	0,13	0,09
15° modo (Hz)	138,98	139,10	0,12	0,09
17° modo (Hz)	144,68	146,59	1,91	1,32
19° modo (Hz)	145,22	157,50	12,28	8,45

Apenas em frequências isoladas da Tabela 19 a variação deste parâmetro é significativa (11° e 19° modo); nas demais frequências a contribuição é muito pequena.

e) Alterando o módulo de elasticidade na direção radial (E_z).

Aqui o módulo de elasticidade foi alterado para 3,4 E9 Pa, porém, os resultados obtidos foram idênticos àqueles do modelo de referência.

f) Alterando o módulo de cisalhamento no plano xy (G_{xy}).

Tabela 20 – Alteração do módulo de cisalhamento G_{xy} .

	$G_{xy}=2,283E9$ Pa	$G_{xy}=3,1962E9$ Pa	Δf (Hz)
1° modo (Hz)	25,732	25,732	0
3° modo (Hz)	26,022	26,366	0,344
5° modo (Hz)	72,420	72,421	0,001
7° modo (Hz)	73,158	73,599	0,441
9° modo (Hz)	90,681	92,399	1,72
11° modo (Hz)	98,869	101,31	2,44
13° modo (Hz)	138,04	138,05	0,01
15° modo (Hz)	138,98	139,43	0,45
17° modo (Hz)	144,68	147,00	2,32
19° modo (Hz)	145,22	150,52	5,3

A alteração deste parâmetro provoca uma pequena variação das frequências de ressonância, como observado na Tabela 20.

A análise de todos os resultados mostrou que o coeficiente de Poisson é o parâmetro que menos influencia os resultados. Dessa forma, admitiu-se que o coeficiente de Poisson na direção 1 é igual ao do alumínio e na direção 2 e 3 igual ao da fibra de vidro.

Em relação aos resultados numéricos, observou-se que a grande maioria dos modos de vibração aparece aos pares, ou seja, as formas de vibração são idênticas, só que em direções diferentes. Isto se deve ao fato de que a geometria analisada ser axisimétrica.

CAPÍTULO 6

MODELO ANALÍTICO DE VIBRAÇÃO E DE RADIAÇÃO SONORA DO REATOR

Nesse capítulo serão determinados os deslocamentos e as velocidades axial e radial do reator quando energizado com corrente alternada em uma frequência específica. Na seqüência, a partir desses dados, será determinado o nível de potência sonora.

6.1) Modo de vibração radial

A força radial (F_{radial}), aplicada em toda a bobina, causa uma dilatação uniforme no cilindro, a qual recebe o nome de deformação pulsante ou *breathing mode*. Portanto, é necessário determinar a deformação e a velocidade radial da parede da bobina durante o *breathing mode*. Dessa maneira, torna-se possível prever o nível de ruído gerado devido à força radial que atua no reator.

6.1.1) Deslocamento radial

Uma força eletromagnética radial (F_{radial}), atuando uniformemente sobre o cilindro, produz uma deformação pulsante (Figura 58). Aplicando equilíbrio de forças na direção Y para uma espira (Figura 58), obtém-se a seguinte relação:

$$2T = 2 \int_0^{\pi/2} F_{radial} R \sin(\alpha) d\alpha = 2F_{radial} R \quad (6.1)$$

onde T é a força de tração [N] na espessura, F_{radial} é a força radial por unidade de comprimento [N/m] e α o ângulo de revolução [rad].

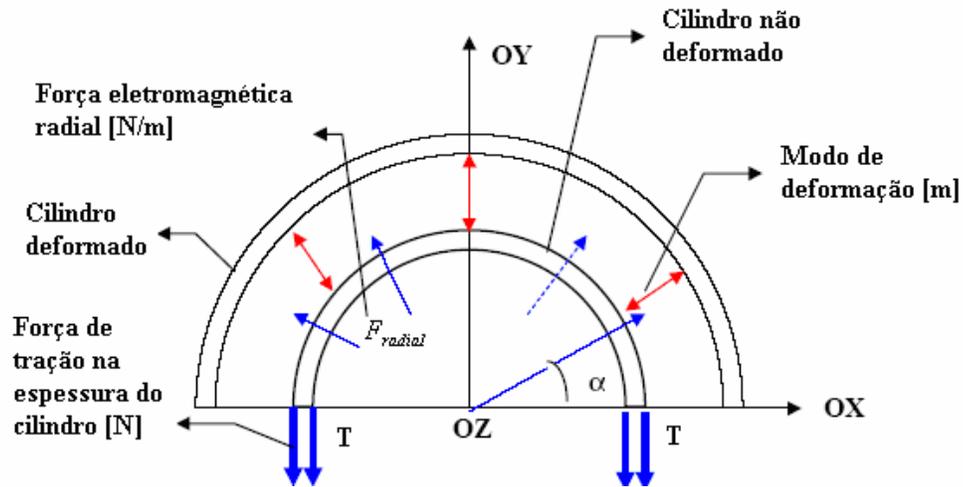


Figura 58 – Forma de deformação radial do reator.

Logo, a força que atua em todo o cilindro é:

$$T = F_{radial} R n b r \quad (6.2)$$

A deformação do cilindro (considerando uma parede fina) pode ser obtida da seguinte relação:

$$\sigma = E \epsilon = \frac{T}{A} \quad (6.3)$$

e reordenando os termos:

$$\epsilon = \frac{T}{EA} = \frac{F_{radial} R n b r}{E_{eq} e \phi n b r} = \frac{F_{radial} R}{E_{eq} e \phi} \quad (6.4)$$

onde E_{eq} é o módulo de elasticidade equivalente da seção de equilíbrio de forças da Figura 58.

Através da relação de proporção entre as áreas no modo radial da bobina em tração é possível determinar o módulo de elasticidade equivalente:

$$E_{eq} = \frac{E_{al} S_{al} + E_{fv} S_{fv}}{S_{total}} \quad (6.5)$$

onde E_{al}, E_{fv} correspondem, respectivamente, aos módulos de elasticidade do alumínio e da fibra de vidro, S_{al}, S_{fv} às superfícies longitudinais do alumínio e da fibra de vidro, respectivamente, e S_{total} à superfície total da seção longitudinal.

O aumento do raio do cilindro (deslocamento) é dado por:

$$\Delta R = \frac{F_{radial} R^2}{E_{eq} e \phi} \quad (6.6)$$

Definem-se as seguintes relações para a altura (H) e quantidade de fios por unidade de comprimento (N):

$$H = \phi n b r \text{ e } N = 1 / \phi$$

Aplicando as relações acima na equação para força radial F_{radial} , Equação (4.14), a seguinte expressão é obtida:

$$F_{radial}(t) = \frac{2\mu_0 I_{eff}^2}{n b r \phi^2} \left((R^2 + (n b r \phi)^2)^{1/2} - R \right) \text{sen}^2(\omega t) \quad (6.7)$$

Substituindo a Equação (6.7) na (6.6), obtém-se a expressão final para o deslocamento em função da corrente elétrica efetiva (I_{eff}):

$$e_{radial}(t) = \frac{2\mu_0 I_{eff}^2 R^2}{n b r E_{eq} e \phi^3} \left((R^2 + (n b r \phi)^2)^{1/2} - R \right) \text{sen}^2(\omega t) \quad (6.8)$$

6.1.2) Velocidade radial

A expressão para velocidade média de vibração da camada equivalente é obtida através da derivada temporal do deslocamento, Equação (6.8):

$$v_{radial}(t) = \frac{4\mu_0 I_{eff}^2 R^2 \pi f}{n b r E_{eq} e \phi^3} \left((R^2 + (n b r \phi)^2)^{1/2} - R \right) \text{sen}(2\omega t) \quad (6.9)$$

Propriedades:

- a) a velocidade é proporcional ao quadrado da corrente;
- b) a velocidade é inversamente proporcional ao quadrado do número de espiras e ao cubo do diâmetro do condutor;

c) a frequência da velocidade é o dobro da referente à corrente.

6.1.3) Potência acústica na direção radial

A expressão de potência sonora radiada por uma superfície vibrante é dada por:

$$W_{rad} = C_c \rho_{ar} c v^2 S_{sv} \quad (6.10)$$

onde ρ_{ar} é a densidade do ar, c é a velocidade do som no ar, v é a velocidade média espacial de vibração da superfície e S_{sv} é a área da superfície vibrante, isso considerando o meio como ar.

Logo, aplicando a Equação (6.9) na (6.10) e reagrupando os termos, é possível determinar a potência acústica radiada na direção radial (Figura 59) através da expressão:

$$W_{radial} = C_{cw1} \frac{I_{eff}^4 R^5 f^2}{E_{eq}^2 e^2 \phi^5 n b r} \left((R^2 + (n b r \phi)^2)^{0.5} - R \right)^2, \text{ onde} \quad (6.11)$$

$$C_{cw1} = 16 C_c \rho_{ar} c \pi^3 \mu_0^2$$

onde C_c é a eficiência de radiação. Segundo Gerges [9], para as dimensões e faixa de frequências analisada, $C_c = 0,47$.

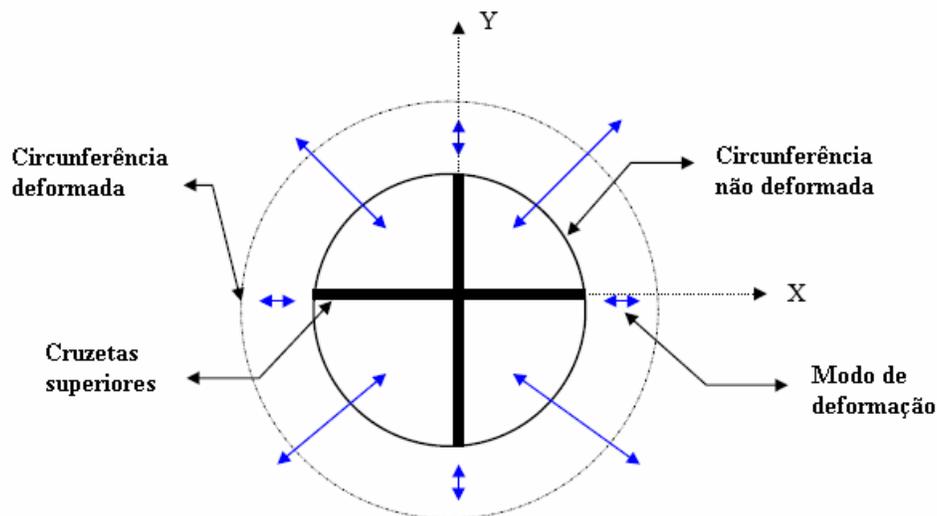


Figura 59 – Forma de radiação sonora quando submetido a uma força radial.

6.2) Modo de vibração axial

Será determinado o deslocamento e a velocidade na direção axial do reator quando energizado com corrente alternada em uma frequência específica.

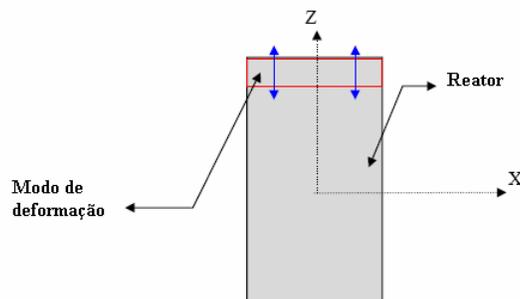


Figura 60 – Forma de deformação axial do reator.

6.2.1) Deslocamento axial

A distribuição de força axial na camada equivalente comprime a bobina (Figura 60). Esse modo de vibração reduz a altura do cilindro.

Nesse modo, o cilindro pode ser visto como um composto de massas e molas, onde a primeira massa consiste do condutor de alumínio e da fibra de vidro, enquanto que a segunda massa consiste do isolante e da fibra de vidro.

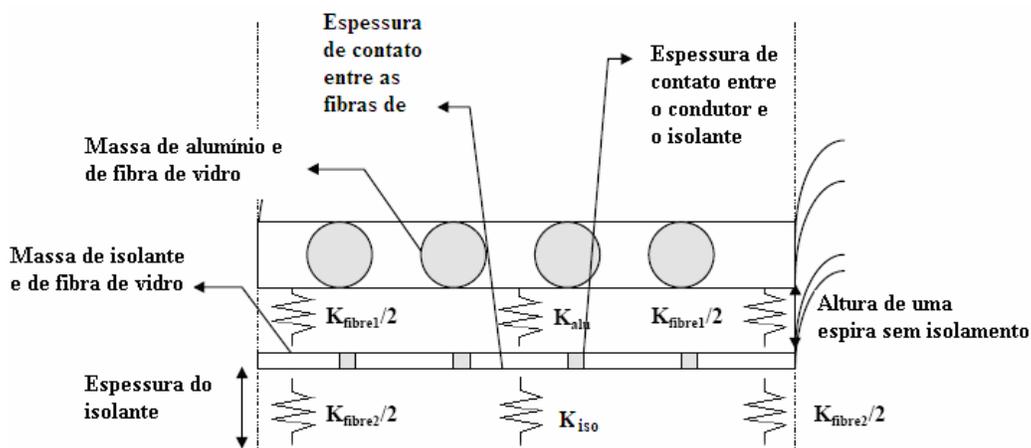


Figura 61 – Modelo de um sistema massa-mola-massa-mola.

Na Figura 61, K_{alu} , K_{fibra} e K_{iso} são, respectivamente, a rigidez do alumínio, da fibra de vidro e do material que reveste os fios de alumínio em [N/m]. A expressão para cada rigidez é obtida da expressão geral:

$$K = \frac{ES_c}{l_c} \quad (6.12)$$

onde E é o módulo de elasticidade dos materiais, S_c a área de contato entre os materiais (Figura 62) e l_c é a altura do material.

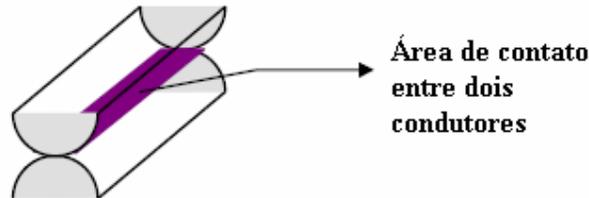


Figura 62 – Área de contato entre dois condutores.

Como cada camada equivalente pode ser representada dessa maneira, para cada rigidez foram obtidas as seguintes expressões:

$$K_{alu} = \frac{E_{alu} S_{alu-iso}}{\phi} \quad (6.13)$$

$$K_{iso} = \frac{E_{iso} S_{alu-iso}}{2e_{iso}} \quad (6.14)$$

$$K_{fibra1} = \frac{E_{fv} S_{fibra-fibra}}{\phi} \quad (6.15)$$

$$K_{fibra2} = \frac{E_{fv} S_{fibra-fibra}}{2e_{iso}} \quad (6.16)$$

Como a superfície de contato entre condutor-isolante $S_{alu-iso}$ é muito menor que a superfície de contato entre fibra-fibra, as rigidezes do alumínio K_{alu} e do isolante K_{iso} podem ser desprezadas quando comparadas com a da fibra1 K_{fibra1} e da fibra2 K_{fibra2} .

Dessa forma, a rigidez equivalente do sistema pode ser simplificada como:

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{K_{fibra1}} + \frac{1}{K_{fibra2}}} = \frac{K_{fibra1} K_{fibra2}}{K_{fibra1} + K_{fibra2}} = \frac{2e_{fibra} E_{fv} \pi R}{\phi} \quad (6.17)$$

O deslocamento de um condutor pode ser obtida através da expressão:

$$F_{axial} 2\pi R = K_{eq} \Delta H \quad (6.18)$$

Reagrupando a expressão (6.18) e considerando o deslocamento do cilindro como o somatório do deslocamento de cada espira obtém:

$$\Delta H = \frac{2\pi R n b r F_{axial}}{K_{eq}} \quad (6.19)$$

Substituindo a força axial (F_{axial}), Equação (4.26) na Equação (6.19) é obtida a expressão para o deslocamento axial médio em função da corrente efetiva (I_{eff}):

$$e_{axial}(t) = \frac{\mu_0 I_{eff}^2 n b r}{2\pi E_{fv} e_{fibra}} \ln(n b r) \text{sen}^2(\omega t) \quad (6.20)$$

6.2.2) Velocidade axial

A expressão para velocidade de vibração é obtida derivando a expressão do deslocamento, logo:

$$v_{axial}(t) = \frac{\mu_0 I_{eff}^2 n b r f}{\sqrt{2} E_{fv} e_{fibra}} \ln(n b r) \text{sen}(2\omega t) \quad (6.21)$$

6.2.3) Potência acústica na direção axial

A potência sonora na direção axial é resultado da variação da altura do cilindro. Partindo da Equação (6.10), para potência gerada por superfícies vibrantes, é possível determinar a potência radiada na direção axial (Figura 60) através da seguinte expressão:

$$W_{axial} = C_{cw2} \frac{I_{eff}^4 n b r^2 f^2 R}{E_{fv}^2 e_{fibra}^2} (\ln(n b r))^2 (e_{fibra} + 4\phi), \text{ onde } C_{cw2} = C_c \rho_{ar} c \pi \mu_0^2 \quad (6.22)$$

6.3) Nível de potência global

O nível de potência global é obtido fazendo a soma logarítmica da potência radial com a potência axial:

$$NWS = 10 \log_{10} \left(\frac{W_{radial} + W_{axial}}{10^{-12}} \right) \quad (6.23)$$

6.4) Nível de pressão sonora

A pressão acústica em um ponto distante da fonte depende da razão entre a distância do receptor até a fonte (r_f) e a altura da fonte (H). Quando a distância fonte-receptor é muito grande ($r_f/H > 10$), o cilindro é comparado a uma fonte esférica pontual; caso contrário é considerada uma fonte cilíndrica.

Segundo Lenzi [19], a relação entre a potência sonora da fonte, W e a intensidade sonora, I_n , calculada a uma distância r_f da fonte, é:

$$I_n = \frac{W}{4\pi r_f^2} = \frac{P_{eff}^2}{\rho_{ar} c} \quad (6.24)$$

Caso $r_f/H > 10$, as ondas irradiadas possuem geometria esférica e a pressão sonora pode ser calculada como segue:

$$P_{eff}^2 = \frac{C_{pesf} (W_{rad} + W_{axial})}{r_f^2} \quad (6.25)$$

onde,

$$C_{pesf} = \frac{\rho_{ar} c}{4\pi} \quad (6.26)$$

Caso contrário, se $r_f/H < 10$, as ondas irradiadas possuem geometria cilíndrica e a pressão sonora pode ser obtida através de:

$$P_{eff}^2 = \frac{C_{pcil} (W_{rad})}{(r_f + R)H} \quad (6.27)$$

onde,

$$C_{pcil} = \frac{\rho_{ar} c}{2\pi} \quad (6.28)$$

O nível de pressão sonora é obtido através da seguinte expressão:

$$NPS = 20 \log \left(\frac{P_{eff}}{2,10^{-5}} \right) \quad (6.29)$$

Substituindo nas equações acima os parâmetros do protótipo analisado nessa dissertação é obtido um nível de potência sonora de 73,5 dB. Pelo fato de possuir dois condutores na axial foi necessário transformá-lo em um único com área equivalente.

No entanto, analisando as componentes da potência sonora radiada é encontrado um nível de 73,5 dB na direção radial e 35,0 dB na direção axial. Esses resultados fazem sentido, pois a área de radiação sonora na direção radial é muito maior que na axial. Dessa forma, a parcela de radiação axial pode até ser desprezada.

No capítulo seguinte esse valor do nível de potência sonora será comparado com valores numéricos e experimentais, para verificar a validade do modelo.

CAPÍTULO 7

MODELO NUMÉRICO DE VIBRAÇÃO E DE RADIAÇÃO SONORA DO REATOR

Neste capítulo são descritos os modelos numéricos utilizados para determinar o nível de potência sonora gerada pelos reatores e comparar os resultados ao obtido pelo modelo analítico. O primeiro modelo, numérico estrutural, tem o objetivo de determinar os deslocamentos da parede do reator em função do carregamento aplicado. O segundo modelo, de radiação sonora, permite determinar o nível de pressão sonora gerada pelo reator a uma determinada distância, a partir dos deslocamentos obtidos na análise estrutural. Para desenvolver os modelos de radiação sonora foram utilizados o método de elementos finitos (FEM) e o de elementos de contorno (BEM). Finalmente, uma comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos analítico, numéricos e medições experimentais é apresentada.

7.1) Modelo numérico estrutural

Para calcular a potência sonora gerada pelo reator em funcionamento é preciso determinar o deslocamento da parede do reator causado pela ação das forças de excitação. Portanto, faz-se necessário construir um modelo em elementos finitos da parte estrutural do reator, utilizando o software comercial *Ansys 10.0*. A seguir são apresentadas cada uma das etapas desta modelagem numérica, definição das propriedades mecânicas e inserção das condições de contorno.

7.1.1) Forças de excitação

As forças eletromagnéticas resultantes da passagem da corrente elétrica pelas espiras do reator provocam o deslocamento das paredes do cilindro e, conseqüentemente, excitam o campo acústico ao redor do equipamento. Logo, é necessário conhecer as expressões que determinam as forças radiais e axiais para poder aplicá-las no modelo estrutural e calcular os deslocamentos.

a) Força radial

O campo magnético axial, resultante da passagem de corrente pelo condutor, provoca o surgimento de uma força na direção radial, como mostra a Figura 63. Essa

componente de força é a principal responsável pela vibração das paredes do reator e, conseqüentemente, também pela radiação sonora.

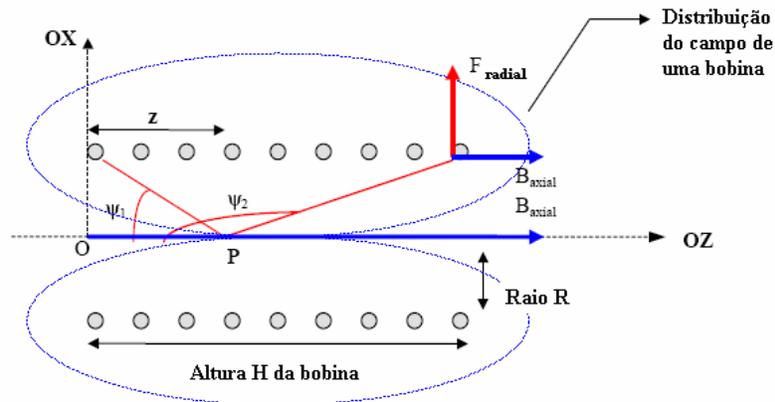


Figura 63 – Distribuição do campo axial e da força radial ao longo da altura do reator.

A expressão para o cálculo do campo axial que atua no reator foi desenvolvida no Capítulo 4 e é definida como:

$$B_{axial} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff} N}{H} \left((R^2 + (H)^2)^{1/2} - R \right) \quad (7.1)$$

A partir da expressão para o cálculo do campo axial (Equação 7.1) é possível obter a expressão para determinar a força radial:

$$F_{radial} = \frac{2\mu_0 I_{eff}^2 N}{H} \left((R^2 + (H)^2)^{1/2} - R \right) \quad (7.2)$$

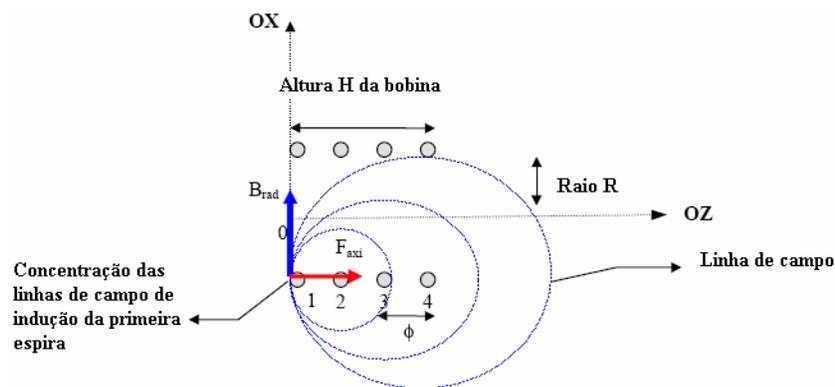


Figura 64 – Distribuição do campo radial e da força axial ao longo da altura do reator.

b) Força Axial

A passagem de corrente elétrica pelos condutores também gera um campo radial e conseqüentemente uma força axial no reator, observe-se a Figura 64.

As equações para calcular o campo radial foram desenvolvidas no Capítulo 4. As mesmas variam com a altura, como pode ser observado nas expressões abaixo:

$$B_{radial} = \frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{4\pi\phi} \ln(N) \quad z < H/2 \quad (7.3)$$

$$B_{radial} = -\frac{\sqrt{2}\mu_0 I_{eff}}{4\pi\phi} \ln(N) \quad z > H/2 \quad (7.4)$$

$$B_x(t) = 0 \quad z = H/2 \quad (7.5)$$

A partir destas expressões são deduzidas as equações para a força axial que atuam sobre o reator:

$$F_{axial} = F_{Z,média} = \left\{ \frac{\mu_0 I_{eff}^2 \ln(N)}{2\pi\phi} \right\} \quad z < H/2 \quad (7.6)$$

$$F_{axial} = F_{Z,média} = \left\{ \frac{\mu_0 I_{eff}^2 \ln(N)}{2\pi\phi} \right\} \quad z > H/2 \quad (7.7)$$

$$F_{axial} = F_{Z,média} = 0 \quad z = H/2 \quad (7.8)$$

7.1.2) Definição das propriedades mecânicas

Em função da parede do reator ser confeccionada em material ortotrópico, é necessário que as coordenadas de todos os elementos da malha estejam orientadas na mesma direção, conforme pode ser verificado na Figura 65. Seguindo as recomendações do manual do software [20], foram utilizados elementos do tipo *SHELL 63*, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó.

As propriedades mecânicas inseridas no modelo, para cada um dos eixos de ortotropia, foram: módulo de elasticidade E , módulo de cisalhamento G e coeficiente de Poisson μ . Além destes parâmetros, a densidade do material foi definida.

Para o reator em análise, as propriedades mecânicas utilizadas foram aquelas determinadas experimentalmente através de vibração por excitação impulsiva (Item 5.1) e do princípio de Arquimedes (Item 5.3).

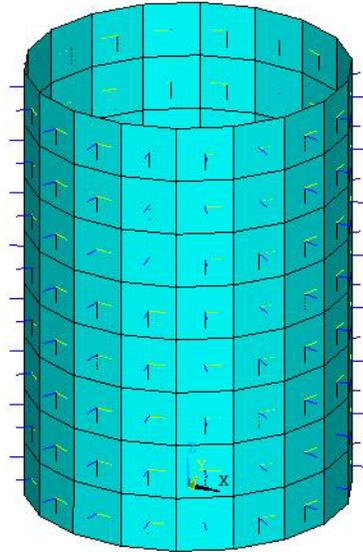


Figura 65 – Sistema de coordenadas dos elementos da malha.

O coeficiente de Poisson não pode ser determinado experimentalmente. No entanto, foi constatado através de uma avaliação de parâmetros, que tem pouca influência sobre os resultados. Desta forma, assume-se o valor do coeficiente de Poisson do alumínio para a direção circunferencial (1) e o da fibra de vidro para as outras direções (2 e 3). A Tabela 21 na sequência apresenta as propriedades utilizadas no modelo numérico.

Tabela 21 – Propriedades mecânicas utilizadas no modelo.

Orientação	E (GPa)	G (GPa)	μ	ρ (kg/m ³)
1 (0°)	29,820	2,283	0,25	2110,8
2 (90°)	2,429	1,561	0,034	
3	2,429	1,561	0,034	

7.1.3) Definição das condições de contorno

Pelo fato do reator não apresentar nenhuma restrição de deslocamento ou rotação, as únicas condições de contorno aplicadas são as forças originadas pelos campos eletromagnéticos nas direções axiais e radiais. Na Tabela 22 é apresentada a condição de trabalho para qual as forças foram calculadas.

Tabela 22 – Condições de operação do reator.

Frequência (Hz)	Corrente (A)	Força radial (N/m)	Força axial (N/m)	Força radial (N)	Força axial (N)
60	200	12,669	8,392	6,916	5,365

Nas Figura 66 e Figura 67 podem ser observadas, respectivamente, a distribuição das forças na direção radial decomposta em duas componentes, e na direção axial.

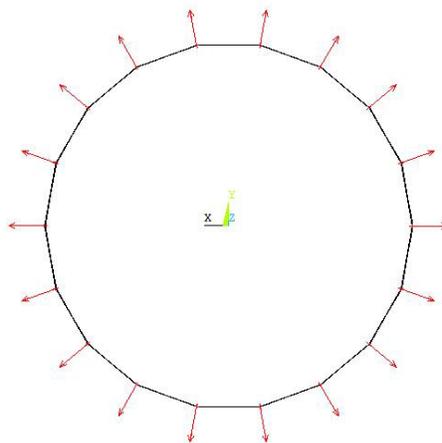


Figura 66 – Distribuição das componentes das forças radiais.

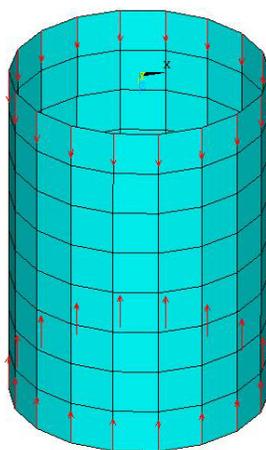


Figura 67 – Distribuição das forças axiais.

7.1.4) Resultados

Para obter os resultados de deslocamento, após a aplicação das propriedades e das condições de contorno, foi realizada uma análise harmônica numa frequência correspondente ao dobro da frequência nominal do reator, uma vez que nestes reatores

as frequências das forças responsáveis pelas vibrações das paredes do reator correspondem ao dobro da frequência da corrente elétrica.

Na Figura 68 pode ser verificada a distribuição do campo de deslocamento das paredes do reator em função das forças aplicadas. As cores mais quentes correspondem aos maiores deslocamentos.

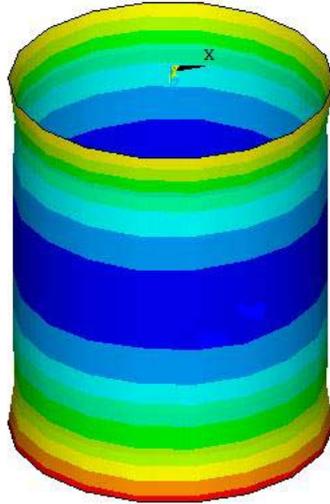


Figura 68 – Deslocamento equivalente da parede do reator.

7.2) Modelo numérico de radiação sonora (FEM)

Foi desenvolvido utilizando o software comercial *LMS Sysnoise 5.5*. A malha de elementos construída neste modelo representa o volume de ar contido entre a parede externa do reator e os pontos onde foram realizadas as medições experimentais do NPS, ou seja, a 300 mm da parede do reator. Na Figura 69 é possível observar a discretização e o volume de ar modelado. Seguindo as recomendações do manual do software [21], foi utilizado elemento sólido com 8 nós e 1 grau de liberdade por nó.

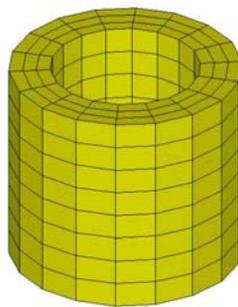


Figura 69 – Malha em elementos finitos utilizada para o modelo de radiação sonora.

7.2.1) Definição das condições de contorno

Inicialmente, faz-se necessário definir no software em qual fluido será realizada a análise. Isto é feito através da inserção das propriedades do ar, densidade $1,21 \text{ kg/m}^3$ e velocidade de propagação do som 343 m/s .

Em relação às condições de contorno, inicialmente se estabelece a condição de impedância do ar nas extremidades superior, inferior e na parede externa da malha. Dessa maneira assume-se que não haverá reflexão das ondas sonoras, ou seja, simula-se a condição de campo livre. Na Figura 70, as regiões onde se aplicam estas condições de contorno apresentam cor vermelha.

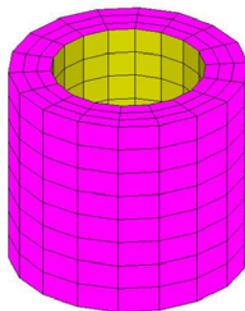


Figura 70 – Condição de contorno de impedância.

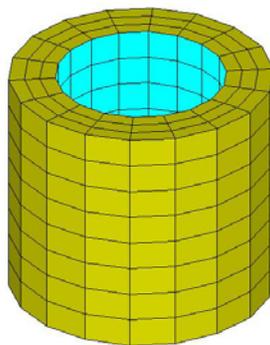


Figura 71 – Condição de contorno de painel vibrante aplicada no interior da malha.

A condição de excitação do campo acústico foi aplicada na face dos elementos internos da malha, através da inserção de um painel vibrante. Este define um campo de velocidade baseado nos deslocamentos nodais calculados na análise estrutural. Esta condição de contorno corresponde à região azul observada na Figura 71.

Finalmente uma análise harmônica para frequência de interesse é efetuada a fim de se obter os níveis de pressão sonora gerados.

7.2.2) Resultados

A seguir é apresentado na Figura 72 o resultado da distribuição do campo sonoro ao redor do reator.

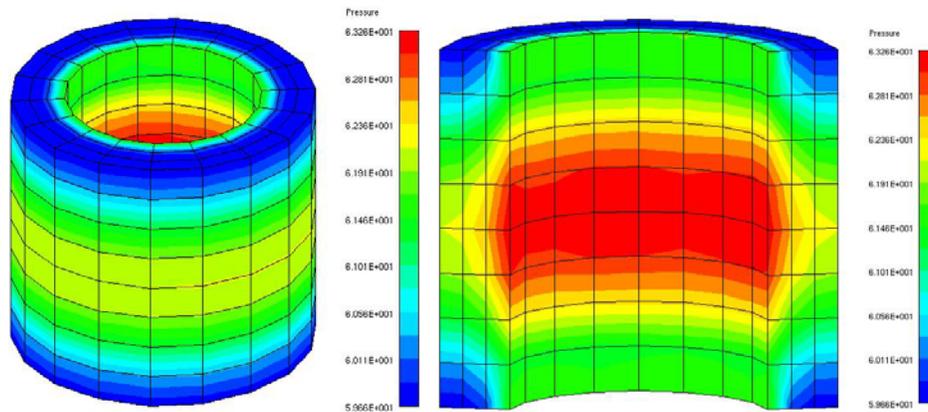


Figura 72 – Distribuição dos níveis de pressão sonora.

O nível de pressão sonora médio a 300 mm da superfície externa do reator é 61,9 dB. Em consequência, o nível de potência sonora calculado através das Equações (3.3) e (3.4), é de 71,5 dB.

7.3) Modelo numérico de radiação sonora (BEM)

A outra forma utilizada para determinar o nível de pressão sonora gerado pelo reator em um ponto localizado a uma determinada distância consiste no desenvolvimento de um modelo numérico usando o método de elementos de contorno (BEM) presente no software *Sysnoise 5.5*.

A malha utilizada é formado por elementos regulares e possui 4 nós por elemento de acordo com as referências [21] e [22]. Através da Figura 73 é possível observar a regularidade e a semelhança desta malha com a utilizada na análise estrutural.

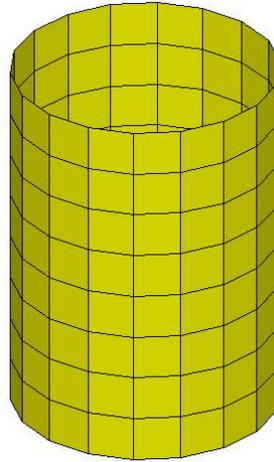


Figura 73 – Malha em elementos de contorno utilizada no modelo de radiação sonora.

7.3.1) Definição das condições de contorno

Inicialmente se definem as propriedades do fluido que envolve o reator; especificamente nesta análise são utilizadas as propriedades do ar em condições normais de temperatura e pressão.

Assim como no modelo de elementos finitos, define-se um painel vibrante na região correspondente às paredes do reator. Na Figura 74, a região em azul corresponde à região onde foi aplicada esta condição de contorno.

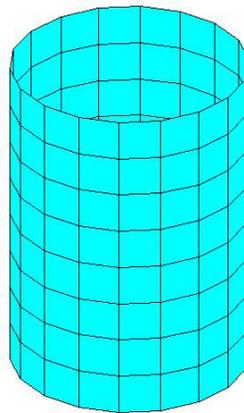


Figura 74 – Condição de contorno de painel vibrante.

Finalmente, realiza-se uma análise harmônica na frequência de interesse. Este método permite obter os níveis de pressão em uma distância qualquer a partir da criação de uma malha de *field points*. Para o reator em análise, eles foram criados à distância de 0,3 m da parede externa do reator. Na Figura 75 podem ser verificados a malha correspondente ao reator e os *field points* criados.

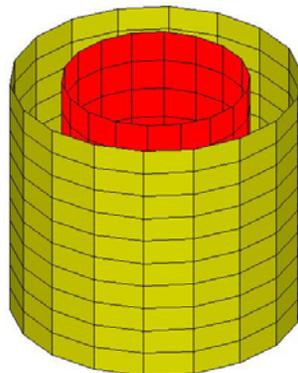


Figura 75 – Malha de *field points* criada em volta da malha de elementos de contorno.

7.3.2) Resultados

Após processar os *field points* é possível obter os níveis de pressão sonora nas distâncias desejadas.

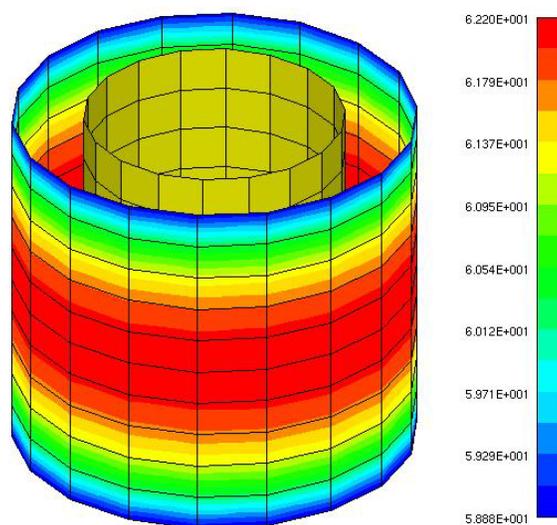


Figura 76 – Distribuição dos níveis de pressão sonora ao redor do reator.

Na Figura 76 são mostrados os resultados obtidos nesta análise. O nível de pressão sonora médio a 300 mm da superfície externa do reator é 62,2 dB. Em consequência, o nível de potência sonora calculado através das Equações (3.3) e (3.4), é de 71,8 dB.

7.4) Comparação entre os Níveis de Potência Sonora

A Tabela 23 mostra uma comparação entre os níveis de potência sonora obtidos através de modelos analítico, numéricos e avaliações experimentais. Observa-se uma

boa concordância entre todos os resultados, principalmente entre os modelos numéricos e o resultado experimental através da sonda de intensidade.

Tabela 23 – Níveis de potência sonora.

Analítico	Numérico (FEM)	Numérico (BEM)	Experimental através da sonda de intensidade	Experimental através de nível de pressão sonora
73,5 dB	71,5 dB	71,8 dB	72, 7 dB	74, 9 dB

CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES

Este trabalho investigou o nível de ruído gerado por reatores elétricos com núcleo de ar tipo seco. Uma revisão bibliográfica sobre as forças originadas pelo campo eletromagnético, formas de determinar as propriedades mecânicas de materiais ortotrópicos, bem como, procedimentos experimentais para caracterizar a forma de vibração e de radiação sonora também foram abordados.

As propriedades mecânicas foram determinadas através do método da viga livre-livre e verificadas pelo método da viga engastada. Comparações entre os valores do módulo de elasticidade obtidos através dois métodos apresentaram boa concordância.

A determinação experimental do nível de potência sonora foi realizada através de dois métodos, sonda de intensidade e nível de pressão sonora. Os resultados apresentaram uma pequena diferença que é atribuída às reflexões do ambiente onde foram realizadas as medições do nível de pressão sonora. Vale ressaltar que as medições através da sonda de intensidade não são afetadas pelo ambiente, logo esse resultado é considerado o mais correto. Os ensaios não puderam ser realizados em ambiente anecóico por dificuldades em energizar o reator.

Para o cálculo das forças de excitação os campos magnéticos sofreram linearizações para facilitar a manipulação das expressões. Porém, através da comparação dos resultados numéricos e experimentais, é possível verificar que essas aproximações não prejudicaram o modelo.

O modelo analítico de vibrações mostrou-se confiável para esse reator produzindo resultados muito próximos aos experimentais. Os modelos numéricos de radiação sonora BEM/FEM apresentaram pequenas diferenças entre si. É provável que isso seja resultado de diferenças nos procedimentos de cálculo de cada método.

No entanto, ao comparar os níveis de potência sonora obtidos experimentalmente com os modelos analíticos e numéricos, é possível observar uma boa convergência entre os resultados.

Durante a dedução das expressões para o cálculo das forças de excitação é possível observar os parâmetros elétricos que mais influenciam no ruído radiado pelo reator. Também são levantados os parâmetros mecânicos que podem ser otimizados

para reduzir o nível de potência sonora desses equipamentos. No entanto, essas são sugestões para trabalhos futuros.

Além disso, a avaliação experimental foi realizada no reator com um cilindro. Sugere-se que trabalhos futuros avaliem experimentalmente protótipos com mais de um cilindro e que os modelos sejam verificados para esses protótipos.

Também, foi utilizado nesse trabalho, para resolver os modelos em elementos finitos e elementos de contorno o software comercial *Sysnoise 5.5*. No entanto seria interessante desenvolver uma rotina própria para esses dois métodos, pois assim poderiam ser considerados alguns efeitos que são desprezados nesse software.

Por último, pelo fato de trabalhar em baixa frequência e apresentar uma boa área de radiação sonora, durante a especificação dos equipamentos de uma subestação elétrica, o posicionamento do reator em relação a comunidades vizinhas deve ser analisado com cuidado, pois, ele pode ser uma fonte que produza a sensação de desconforto nessas populações.

Como sugestão para trabalhos futuros, destacam-se:

- a) desenvolvimento de uma nova metodologia para determinação das propriedades mecânicas;
- b) adequação do modelo desenvolvido neste trabalho para reatores com mais de um cilindro;
- c) determinação das forças eletromagnéticas através do método de elementos finitos;
- d) verificação da validade do modelo para reatores energizados com frequência diferente de 60 Hz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JACKSON, J. D.. Classical Electrodynamics. Third Edition. United States, 1999.
- [2] FERREIRA, C.. Reatores em sistemas elétricos de potência – Conceitos básicos de sistemas elétricos de potência – Estrutura do sistema elétrico brasileiro. 2001. AREVA/EFEI.
- [3] ALVES, M. F.. Reatores com núcleo de ar. 1982. Boletim técnico AREVA.
- [4] JORDAN, R.. Análise modal experimental. Notas de aula. 2002. Laboratório de Vibrações e Acústica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [5] LMS Test.Lab7a User's Manual.
- [6] RICHARDSON, M. H.. Is it a Mode Shape, or an Operating Deflection Shape?. Sound & Vibration Magazine, 30th Anniversary Issue, March, 1997.
- [7] KROMULSKI, J.; HOJAN, E.. Application of two experimental modal analysis methods for the determination of operational deflection shapes. Journal of Sound and Vibration, vol. 196(4), p. 429-438, 1996.
- [8] SMEDE, J.; JOHANSSON, C. G.; WINROTH, O.; SCHÜTT, H. P.. Design of HVDC stations with respect to audible noise requirements. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10(2), p. 747-758, 1995.
- [9] GERGES, Samir N. Y.. Ruído: Fundamentos e Controle. Florianópolis: S. N. Y. Gerges, 1992. p.7.
- [10] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076-10: Power transformers – Part 10: Determination of sound levels. 2001, p. 12-20.
- [11] THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std C57.16-1996: IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors. 1996, p. 47-50.
- [12] Yang, S. Sound Power Determination Using Sound Intensity Measurements: Applications and Extensions. 1995. Thesis. Auburn University.
- [13] THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9614: Acoustic – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. 1993.

- [14] LORRAIN, P.; CORSON, D.. Electromagnetic Fields and Waves. San Francisco: W.H.Freeman, 1970.
- [15] PEREIRA, J. C.. Curso de projeto estrutural com materiais compostos. 2005. Grante – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [16] AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM E 1876-01: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. 2001.
- [17] AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM E 756-98: Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials. 1998.
- [18] MAZALI, I. O.. Determinação da densidade de sólidos pelo método de Arquimedes. Laboratório de Química do Estado Sólido (LQES) - Instituto de Química da Unicamp.
- [19] LENZI, A.. Acústica básica. 2000. Laboratório de Vibrações e Acústica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [20] ANSYS User's Manual for Revision 10.0.
- [21] SYSNOISE Rev 5.5 Release notes and getting started manual.
- [22] WU T. W.. Boundary Element Acoustics. Southampton: WIT Press, 2005.