

André Samuel
Tiago Barreto Annarumma

Análise de um dispositivo de invisibilidade acústica

**São Paulo
2012**

André Samuel
Tiago Barreto Annarumma

Análise de um dispositivo de invisibilidade acústica

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia.

São Paulo
2012

André Samuel
Tiago Barreto Annarumma

Análise de um dispositivo de invisibilidade acústica

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia
Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli
Silva

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Samuel, André

**Análise de um dispositivo de invisibilidade acústica /
A. Samuel, T.B. Annarumma. -- São Paulo, 2012.
86 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1. Acústica 2. Método dos elementos finitos 3. Simulação
computacional I. Annarumma, Tiago Barreto II. Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.**

DEDICATÓRIA

André Samuel dedica este trabalho aos seus pais Helio e Conceição, a sua irmã Paola e a sua namorada Thaís, pelos momentos de apoio e compreensão.

Tiago Barreto Annarumma dedica este trabalho ao seu pai Marcelo, sua mãe Angela, seu irmão Rafael e também à sua namorada Carolina. Obrigado pelo apoio durante estes últimos 5 anos.

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Emílio Carlos Nelli Silva**, pelo interesse, paciência, compreensão e dedicação durante as orientações e elaboração deste trabalho, pelo apoio em momentos difíceis e pelos ensinamentos ao longo da graduação, nossa sincera admiração e gratidão.

Ao **Prof. Lucas Antonio Moscato, Prof. Thiago de Castro Martins, Prof^a Larissa Driemeier e Prof. Arturo Forner Cordero**, pelas valiosas correções e sugestões durante a fase de qualificação do trabalho.

Ao **Prof. Julio Cezar Adamowski, Prof. Flavio Buiochi e Prof. Rodrigo Lima Stoeterau**, pelas sugestões, ideias e contribuições para as etapas experimentais realizadas no trabalho.

Ao **Marco Aurelio Brizzoti**, pelo auxílio e paciência na utilização do laboratório de ultrassom da Escola.

Ao **Kalenin de Moraes Branco**, pela dedicação e esforço durante a fabricação do dispositivo.

Ao **Sandro Vatanabe**, pela paciência e auxílio nas etapas iniciais de simulação.

Aos **nossos Mestres** do curso de graduação em Engenharia Mecatrônica, por todo o conhecimento, experiência e dedicação ao longo do curso.

À **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, por todo o conhecimento adquirido ao longo de nossa formação.

RESUMO

Materiais com propriedades físicas bastante distintas podem ser obtidos através de alterações estruturais, que incluem a utilização de células unitárias especiais ou camadas alternadas de diversos materiais, para a obtenção de um comportamento efetivo não observado naturalmente; esse grupo de materiais recebe o nome de metamateriais. Recentemente, uma série de estudos vem propondo métodos para realização de metamateriais, bem como suas possíveis aplicações. Uma das aplicações mais notáveis é o dispositivo de *cloaking*, capaz de tornar um domínio espacial invisível aos efeitos de ondas que se propagam no meio. Embora os estudos de *cloaking* tenham se iniciado para ondas eletromagnéticas, outro grupo de engenheiros e cientistas dedica-se às aplicações acústicas. O presente trabalho objetiva, primeiramente, entender o funcionamento de um *cloak* acústico sem grande formalismo acerca da teoria matemática envolvida; posteriormente, faz-se uma análise dos projetos mais relevantes sobre o tema. A análise inclui a reprodução de simulações computacionais através do método de elementos finitos (MEF) e a fabricação de um dispositivo a fim de verificar a validade experimental dos resultados teóricos.

Palavras-chave: *Cloak* acústico, Invisibilidade acústica, Metamateriais, Método dos Elementos Finitos, Simulação computacional.

ABSTRACT

Materials with very distinct physical properties can be obtained by altering the structure by utilizing special unit cells or alternating layers of various materials in order to obtain behaviors not observed in nature; this class of materials is called metamaterials. Recently, a series of studies have proposed methods for the conception of such materials as well as possible applications. One of the more notable examples is a cloaking device, capable of rendering a spatial domain “invisible” to waves traveling in a medium. Although cloaking research was initially focused on electromagnetic waves, another group of researchers dedicate themselves to acoustic applications. The following paper aims firstly at understanding the operation of an acoustic cloak without delving deep into the mathematical theory. Subsequently the most relevant projects regarding the theme are analyzed. This analysis includes the reproduction of computational simulations by using the finite element method (FEM) and the fabrication of a cloaking device in order to validate the theoretical results experimentally.

Keywords: Acoustic cloak, Acoustic invisibility, Metamaterials, Finite Element Method, Computational simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 2.1 - Trajetória do fluxo de energia (vetor de Poynting) após transformação de coordenadas (PENDRY; SCHURIG; SMITH, 2006).	20
Fig. 2.2 - Proposta para cloak eletromagnético (SCHURIG <i>et al</i> , 2006).	21
Fig. 2.3 - Célula unitária de cloak eletromagnético com os parâmetros geométricos do circuito ressonante (SCHURIG <i>et al</i> , 2006).	22
Fig. 2.4 - Configuração do campo elétrico em regime permanente. As linhas representam a direção do fluxo de energia (vetor de Poynting) (SCHURIG <i>et al</i> , 2006).	23
Fig. 2.5 - Resultados para o campo de pressão nas simulações computacionais. (CUMMER; SCHURIG, 2007).	26
Fig. 2.6 - Esquemático da configuração de um dispositivo de cloaking acústico. As cores diferentes indicam materiais distintos (TORRENT; SÁNCHEZ-DEHESA, 2008).	27
Fig. 2.7 - Distribuição de pressão para onda incidente plana (TORRENT; SÁNCHEZ-DEHESA, 2008).	28
Fig. 2.8 - Resultados dos campos de pressão das simulações para cloak acústico composto por 16 camadas. A fonte pontual emite ondas na frequência de 60 kHz (ZHANG, 2010).	29
Fig. 2.9 - Analogia entre elementos de circuito acústico e elétrico (ZHANG, 2010). ...	29

Fig. 2.10 - (a) Célula unitária proposta para realização de cloak acústico. (b) Circuito elétrico equivalente (ZHANG, 2010).	30
Fig. 2.11 - Dispositivo de <i>cloaking</i> acústico projetado pelo método da analogia de circuitos elétricos (ZHANG, 2010).	32
Fig. 2.12 - Medições do campo de pressões para duas situações: sem o <i>cloak</i> (imagens superiores) e com o <i>cloak</i> (imagens inferiores) (ZHANG,2010)..	33
Fig. 3.1 - Célula unitária da primeira camada.	35
Fig. 3.2 - Primeira camada do <i>cloak</i>	36
Fig. 3.3 - <i>Cloak</i> completo.	36
Fig. 3.4 - Detalhe da superfície do <i>cloak</i>	36
Fig. 3.5 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz.....	38
Fig. 3.6 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador.....	39
Fig. 3.7 - Etapa do procedimento para determinação da máxima pressão absoluta em um dado comprimento de onda.....	40
Fig. 3.8 - Gráficos do máximo valor absoluto da pressão em função da coordenada y. (a) Onda 1 (b) Onda 2 (c) Onda 3 (d) Onda 4.....	41

Fig. 3.9 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por cloak de 22 camadas de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008). 43

Fig. 3.10 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por cloak de 42 camadas de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008). 44

Fig. 3.11- Gráficos do máximo valor absoluto da pressão em função da coordenada y , incluindo os modelos de 22 camadas e 42 camadas de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008). (a) Onda 1 (b) Onda 2 (c) Onda 3 (d) Onda 4..... 45

Fig. 3.12 - Detalhe da peça no *Comsol Multiphysics*. 46

Fig. 3.13 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por *cloak* de Zhang (2010). 47

Fig. 3.14 - Gráficos do máximo valor absoluto da pressão em função da coordenada y , incluindo o modelo de Zhang (2010). (a) Onda 1 (b) Onda 2 (c) Onda 3 (d) Onda 4.... 48

Fig. 3.15 - Detalhe da malha de elementos finitos dentro da região do *cloak*..... 49

Fig. 3.16 - Campo acústico no módulo matemático devido à onda plana de 60 kHz na presença de um objeto perturbador..... 51

Fig. 3.17 - Campo acústico no módulo matemático devido à onda plana de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por cloak..... 52

Fig. 4.1 - Processo de impressão 3D por estereolitografia (LEE, 2001). 54

Fig. 4.2 - Protótipo de resina fabricado por estereolitografia.	55
Fig. 4.3 - Detalhe das cavidades e canais do protótipo de resina.	55
Fig. 4.4 - Fresadora CNC usinando o <i>cloak</i> de alumínio.	56
Fig. 4.5 - Protótipo de alumínio fabricado por microfresamento.	57
Fig. 4.6 - Detalhe das cavidades e canais do protótipo de alumínio.....	57
Fig. 4.7 - Modos de vibrar da cerâmica piezoelétrica. (a) Cerâmica vibrando em modo de espessura. (b) Cerâmica vibrando em modo radial.....	58
Fig. 4.8 - Cerâmica piezoelétrica utilizada nos ensaios.....	59
Fig. 4.9 - Vista superior do aparato experimental para o tanque livre.	60
Fig. 4.10 - Vista superior do aparato experimental com a presença de objeto perturbador.....	61
Fig. 4.11 - Vista superior do aparato experimental com a presença de objeto perturbador envolvido pelo cloak.....	61
Fig. 4.12 - Experimento realizado diretamente no fundo do tanque.	62
Fig. 4.13 - Gerador de funções.	63

Fig. 4.14 - Hidrofone.	63
Fig. 4.15 - Amplificador de sinal.....	64
Fig. 4.16 - Sinais observados no osciloscópio.....	64
Fig. 4.17 - Mecanismo cartesiano.....	65
Fig. 4.18 - Experimento realizado sobre a mesa emborrachada.....	66
Fig. 4.19 - Vista lateral do aparato sobre a mesa.....	66
Fig. 4.20 - Mesa fabricada para realização dos experimentos no tanque.	67
Fig. 4.21 - Ensaio realizado sobre a mesa.	67
Fig. 4.22 - Experimento suspenso.	68
Fig. 4.23 - Metodologia para as medições de pressão.	69
Fig. 4.24 - Pressão avaliada para tanque livre.	70
Fig. 4.25 - Ensaio com a objeto perturbador.	70
Fig. 4.26 - Pressão avaliada na presença do objeto perturbador.....	71
Fig. 1.1- Ensaio com <i>cloak</i> envolvendo objeto perturbador.....	72

Fig. 1.2 - Detalhe do ensaio com <i>cloak</i>	72
Fig. 1.3 - Campo acústico para objeto envolvido pelo <i>cloak</i>	73
Fig. A 1 - Visão geral da interface do software <i>Comsol Multiphysics</i>	77
Fig. A 2 - Detalhe do menu principal do <i>Comsol Multiphysics</i>	78
Fig. A 3 - Detalhe da janela de equação do módulo matemático do <i>Comsol Multiphysics</i>	80
Fig. B 1 - Exemplo de curva de impedância elétrica em função da frequência.	81
Fig. B 2 - Geometria e malha do disco cerâmico modelado no Ansys.....	83
Fig. B 3 - Aplicação da condição de contorno a uma das faces do disco.....	84
Fig. B 4 - Curva de impedância elétrica em função da frequência para cerâmica de PZT-5A com diâmetro de 40 mm.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Especificação dos parâmetros geométricos de algumas camadas do cloak (ZHANG, 2010).....	35
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF	Método dos elementos finitos
CAD	Computer-aided design

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ	Permissividade elétrica
μ	Permeabilidade magnética
r	Coordenada radial
R_1	Raio interno
R_2	Raio externo
r'	Coordenada radial no sistema transformado
θ	Coordenada angular
θ'	Coordenada angular no sistema transformado
z	Coordenada axial
z'	Coordenada axial no sistema transformado
ϵ_r	Permissividade elétrica na direção radial
ϵ_θ	Permissividade elétrica na direção tangencial
ϵ_z	Permissividade elétrica na direção axial
μ_r	Permeabilidade magnética na direção radial
μ_θ	Permeabilidade magnética na direção tangencial
μ_z	Permeabilidade magnética na direção axial
j	Número imaginário
ω	Frequência angular
H_r	Intensidade magnética na direção radial
H_θ	Intensidade magnética na direção tangencial
E_z	Campo elétrico na direção axial
ρ_r	Densidade na direção radial
ρ_θ	Densidade na direção tangencial
v_r	Velocidade na direção radial
v_θ	Velocidade na direção tangencial

p	Pressão sonora
β	Compressibilidade
ρ_1	Densidade material 1
ρ_2	Densidade material 2
ρ_b	Densidade do meio
c_1	Velocidade de propagação no material 1
c_2	Velocidade de propagação no material 2
c_b	Velocidade de propagação no meio
L_A	Indutância equivalente de um canal
C_A	Capacitância equivalente de uma cavidade
l	Comprimento do canal
V	Volume da cavidade
$\rho_{\text{eff},r}$	Densidade efetiva na direção radial
$\rho_{\text{eff},\theta}$	Densidade efetiva na direção tangencial
β_{eff}	Compressibilidade efetiva
L_r	Indutância na direção radial
L_θ	Indutância na direção tangencial
S_r	Seção transversal dos canais radiais
S_θ	Seção transversal dos canais tangenciais
ρ_w	Densidade da água
c_w	Velocidade de propagação na água
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 <i>Cloaking</i> eletromagnético	19
2.2 <i>Cloaking</i> acústico.....	23
3. ANÁLISE	34
3.1 Modelagem	34
3.2 Simulações	37
3.2.1 <i>Cloak</i> de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008).....	42
3.2.2 <i>Cloak</i> de Zhang (2010).....	45
4. EXPERIMENTAL	53
4.1 Fabricação do <i>cloak</i>	53
4.2 Definição do transdutor	58
4.3 Ensaios	60
4.4 Resultados	69
5. CONCLUSÕES.....	74
6. REFERÊNCIAS.....	75
APÊNDICE A – SIMULAÇÕES COM O <i>COMSOL MULTIPHYSICS</i>.....	77
APÊNDICE B – DEFINIÇÃO DO TRANSDUTOR	81

1. INTRODUÇÃO

Metamateriais são produzidos pelo arranjo artificial da estrutura de um material ou pela combinação de materiais diferentes de modo a apresentar propriedades físicas incomuns para os materiais conhecidos. Daí o prefixo grego *meta*, que significa “além de” para se referir a essa classe de materiais.

Veselago (1968), em seu trabalho sobre o comportamento de substâncias com permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ) negativas, observa que tais substâncias não são encontradas nos materiais conhecidos até aquela data; no entanto, devido às possíveis aplicações, sugere pesquisas na área.

Apenas nos últimos anos estudos mais aprofundados sobre metamateriais, bem como a realização física de tais materiais, têm sido efetivamente alcançados. Dentre as diversas aplicações, algumas suscitam forte interesse na comunidade acadêmica, como, por exemplo, a realização de super lentes, ou lentes perfeitas, utilizando metamateriais para superar o limite de difração, que impossibilita sistemas de melhor resolução com o uso de materiais convencionais. (LI *et al*, 2009; JACOB; ALEKSEYEV; NARIMANOV, 2006).

Outra área de bastante interesse são os dispositivos de *cloaking*. São componentes ou sistemas com propriedades físicas que permitem o controle do fluxo de energia através de uma região do espaço, tornando possível que ondas eletromagnéticas ou sonoras desviem de um objeto, que se torna imperceptível. As aplicações mais óbvias de um *cloak* são militares, como estruturas invisíveis a ondas eletromagnéticas ou sonoras. Alguns resultados de pesquisas nessa área já estão sendo apresentados; é o caso de um protótipo de tanque invisível à radiação infravermelha. Outra potencial aplicação, por exemplo, envolve o aperfeiçoamento de ambientes acústicos, como salas de teatros e cinemas. Na área médica, um *cloak* poderia ser utilizado para evitar que perturbações indesejadas em ondas ultrassônicas dificultem o tratamento de dados.

Recentemente, Guenneau; Amra e Veynante (2012) aplicaram os princípios de *cloaking* em estudos sobre transferência de calor, verificando que é possível proteger termicamente uma região utilizando um material com propriedades térmicas específicas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Faz-se necessária uma breve análise dos trabalhos mais relevantes da área, incluindo a fundamentação teórica básica para o entendimento do fenômeno de *cloaking*. A teoria abordada neste trabalho não objetiva demonstrações ou interpretações das complexas equações envolvidas; para tanto, recomenda-se a leitura das referências indicadas.

Esta seção está dividida conforme a cronologia dos estudos de *cloaking*. Primeiramente as descobertas no eletromagnetismo, que, posteriormente, são aplicadas na acústica. Há um enfoque maior nos trabalhos de *cloak* acústico pois alguns serão reproduzidos experimental e computacionalmente, conforme o objetivo deste projeto.

2.1 *Cloaking* eletromagnético

A teoria para o desenvolvimento de dispositivos de *cloaking* começou a ser desenvolvida para ondas eletromagnéticas. Os fundamentos utilizados são a transformação de coordenadas e a invariância das equações de Maxwell em relação ao sistema de coordenadas. Essa teoria pode ser melhor compreendida em Pendry; Schurig e Smith (2006) e Zhang (2010).

De forma sucinta, a idéia é deslocar as ondas eletromagnéticas para evitar o objeto a ser escondido; essa distorção das ondas é equivalente a uma transformação de coordenadas. Assim, deve-se encontrar uma transformação que leve as coordenadas originais a coordenadas equivalentes no novo sistema. Nesse novo sistema, as equações de Maxwell são as mesmas (invariância), mas a permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) têm seus valores alterados. Em suma, o objetivo final é a identificação das propriedades eletromagnéticas do meio de forma a alcançar a trajetória desejada para as ondas.

Um exemplo notável é apresentado por Schurig *et al* (2006), onde é desejado que um cilindro se torne invisível às ondas eletromagnéticas. Isso é equivalente a transformar a região $0 < r < R_1$ na região anular $R_1 < r' < R_2$; onde r e r' são as coordenadas nos sistemas original e transformado, respectivamente. Uma transformação que satisfaz esse requisito é dada pela eq. (2.1) e a situação está ilustrada na fig. 2.1.

$$r' = \frac{R_2 - R_1}{R_2} r + R_1 \quad \theta' = \theta \quad z' = z \quad (2.1)$$

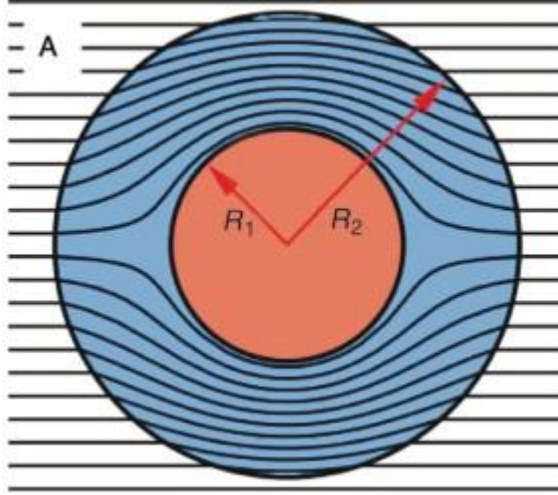


Fig. 2.1 - Trajetória do fluxo de energia (vetor de Poynting) após transformação de coordenadas (PENDRY; SCHURIG; SMITH, 2006).

Aplicando o procedimento indicado em Pendry; Schurig e Smith (2006), obtêm-se as propriedades indicadas pelas eqs. (2.2), (2.3) e (2.4) para a região anular.

$$\varepsilon_r = \mu_r = \frac{r - R_1}{r} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_\theta = \mu_\theta = \frac{r}{r - R_1} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_z = \mu_z = \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1} \right)^2 \frac{r - R_1}{r} \quad (2.4)$$

onde ε_r , ε_θ e ε_z são as permissividades em coordenadas cilíndricas; μ_r , μ_θ e μ_z são as permeabilidades em coordenadas cilíndricas.

Note que esse procedimento leva a materiais com propriedades anisotrópicas e incomuns, nos quais a permeabilidade e permissividade não são mais constantes, mas sim tensores diagonais. Daí a importância dos metamateriais, neles é possível atingir essas especificações através de alterações na configuração da estrutura ou pela combinação de diversos materiais.

Schurig *et al* (2006) apresenta como projeto um *cloak* de 10 cilindros concêntricos, cada um composto pela repetição de células unitárias. Cada célula, por sua vez, apresenta um substrato quadrado e um circuito ressonante, conforme mostrado na fig. 2.3. Esse dispositivo, na verdade, sintetiza propriedades simplificadas, ligeiramente diferentes das teóricas citadas anteriormente, devido à maior facilidade de fabricação.

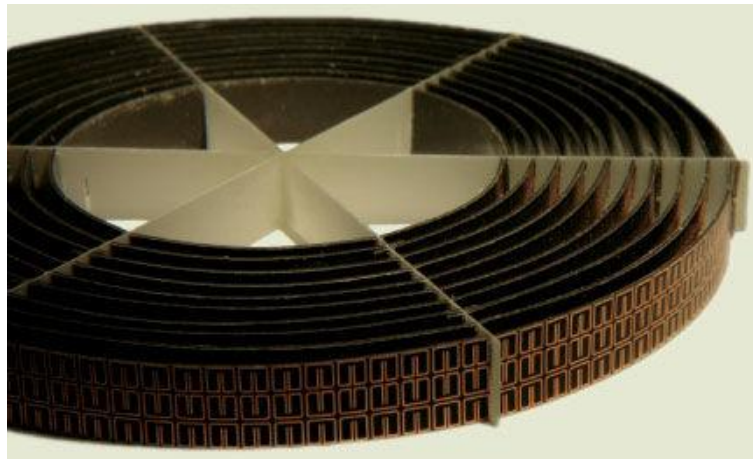


Fig. 2.2 - Proposta para *cloak* eletromagnético (SCHURIG *et al*, 2006).

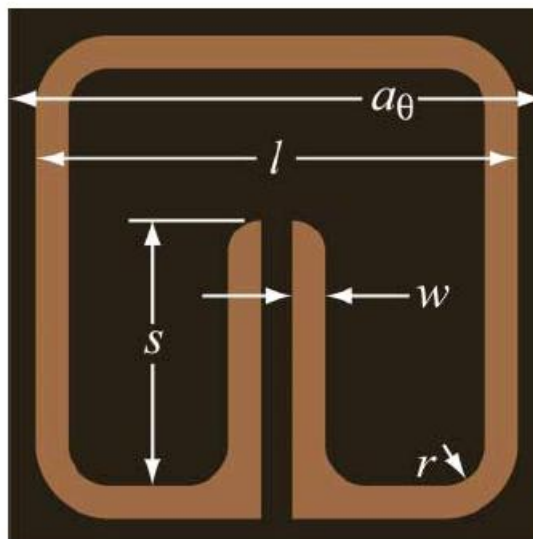


Fig. 2.3 - Célula unitária de cloak eletromagnético com os parâmetros geométricos do circuito ressonante (SCHURIG *et al*, 2006).

As simulações foram feitas no módulo eletromagnético do *software* comercial *Comsol Multiphysics*, baseado no método de elementos finitos (MEF), para uma frequência da ordem de 10 GHz. As simulações foram feitas para as especificações teóricas do material (fig. 2.4A) e para os parâmetros simplificados, que simulam os valores das propriedades do protótipo a ser fabricado (fig. 2.4B).

Para a simulação dos parâmetros exatos do material (fig. 2.4A), observa-se como as frentes de onda se deslocam ao redor do objeto central, reduzindo a perturbação do campo elétrico a níveis semelhantes ao de um domínio perfeitamente livre. Para os parâmetros simplificados (fig. 2.4B), os resultados ainda são satisfatórios, no sentido que a distribuição do campo elétrico sofre poucas alterações, mas as perturbações são maiores que aquelas observadas para as especificações exatas do material.

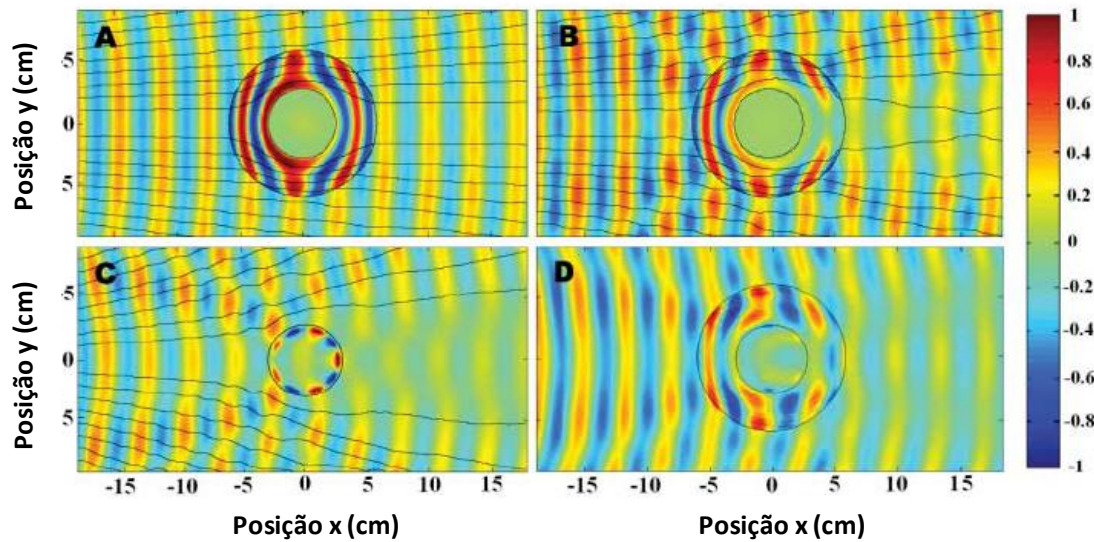


Fig. 2.4 - Configuração do campo elétrico em regime permanente. As linhas representam a direção do fluxo de energia (vetor de Poynting) (SCHURIG *et al*, 2006).

O grande avanço do trabalho de Schurig *et al* (2006), no entanto, foi mostrar a viabilidade de realização física de um dispositivo de *cloaking* eletromagnético. Assim, utilizando o protótipo da fig. 2.2, foi investigado o comportamento do campo elétrico na presença de um cilindro de cobre.

A fig. 2.4C indica os resultados para o cilindro de cobre não envolvido pelo *cloak*, sendo possível notar uma grande região perturbada à direita do cilindro. Para o cilindro envolvido pelo *cloak* (fig 2.4D), os resultados estão bastante coerentes com os indicados pela simulação simplificada (fig. 2.4B).

Através desses resultados, Schurig *et al* (2006) conclui que é realmente possível fabricar um *cloak* através da especificação das propriedades de um metamaterial. As imperfeições são atribuídas às aproximações utilizadas e a efeitos de absorção dos materiais.

2.2 Cloaking acústico

Os resultados obtidos nos estudos de *cloak* eletromagnético levam à tentativa de expandir a aplicação de *cloaking* para outros domínios. Vale ressaltar que o procedimento utilizado por Schurig *et al* (2006) para determinação das propriedades necessárias para o *cloak* tem como um dos fundamentos a invariância das equações de

Maxwell. No entanto, conforme mostrado por Milton; Briane e Willis (2006), as equações que regem os sistemas não são, geralmente, invariantes quanto à forma sob uma transformação de coordenadas, o que impede a aplicação irrestrita da teoria vista em Pendry; Schurig e Smith (2006).

Partindo do conhecimento de que em domínios bidimensionais as equações que regem fenômenos acústicos e eletromagnéticos são semelhantes, Cummer e Schurig (2007) mostram que essa analogia também é válida em meios anisotrópicos. As equações de Maxwell em frequência em um domínio 2D em coordenadas cilíndricas, com os tensores de permeabilidade e permissividade diagonais, são dadas pelas eqs. (2.5), (2.6) e (2.7).

$$j\omega\mu_r(-H_r) = -\frac{1}{r}\frac{\partial(-E_z)}{\partial\theta} \quad (2.5)$$

$$j\omega\mu_\theta(H_\theta) = -\frac{\partial(-E_z)}{\partial r} \quad (2.6)$$

$$j\omega\varepsilon_z(-E_z) = -\frac{1}{r}\frac{\partial(rH_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r}\frac{\partial(-H_r)}{\partial\theta} \quad (2.7)$$

onde ω é a frequência angular; H_r e H_θ são as componentes do campo magnético em coordenadas cilíndricas; E_z é a componente z do campo elétrico.

As equações de acústica no domínio da frequência, com o tensor de densidade diagonal para um sistema de coordenadas cilíndricas são dadas pelas eqs. (2.8), (2.9) e (2.10).

$$j\omega\rho_\theta v_\theta = -\frac{1}{r}\frac{\partial(p)}{\partial\theta} \quad (2.8)$$

$$j\omega\rho_r v_r = -\frac{\partial p}{\partial r} \quad (2.9)$$

$$j\omega\frac{1}{\beta}p = -\frac{1}{r}\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} - \frac{1}{r}\frac{\partial(v_\theta)}{\partial\theta} \quad (2.10)$$

onde ρ_θ e ρ_r são as componentes diagonais tensor de densidades; v_r e v_θ são as velocidades das partículas em coordenadas cilíndricas; β é a compressibilidade do fluido.

Comparando as eqs. (2.5), (2.6) e (2.7) com as eqs. (2.8), (2.9) e (2.10), chega-se à analogia expressa pela eq. (2.11).

$$[p, v_r, v_\theta, \rho_r, \rho_\theta, \beta^{-1}] \leftrightarrow [-E_z, H_\theta, -H_r, \mu_\theta, \mu_r, \varepsilon_z] \quad (2.11)$$

Assim, a teoria aplicada no desenvolvimento do *cloak* eletromagnético pode ser estendida para a acústica, bastando substituir os parâmetros das eqs. (2.2), (2.3) e (2.4) pelos análogos acústicos; o que leva às eqs. (2.12), (2.13) e (2.14).

$$\rho_r = \frac{r}{r-R_1} \quad (2.12)$$

$$\rho_\theta = \frac{r-R_1}{r} \quad (2.13)$$

$$\beta = \left(\frac{R_2-R_1}{R_2}\right)^2 \frac{r}{r-R_1} \quad (2.14)$$

A fim de verificar essa conclusão, Cummer e Schurig (2007) realizaram simulações no domínio da acústica. O procedimento para as simulações é, basicamente, incidir uma frente de onda plana em direção a um objeto incompressível e analisar a distribuição de pressão ao longo do domínio. O objeto está ora descoberto, ora envolvido pelo *cloak* dado pelas eqs. (2.12), (2.13) e (2.14). As fronteiras são especificadas de forma a evitar reflexões e distúrbios. Os resultados das simulações estão na fig. 2.5.

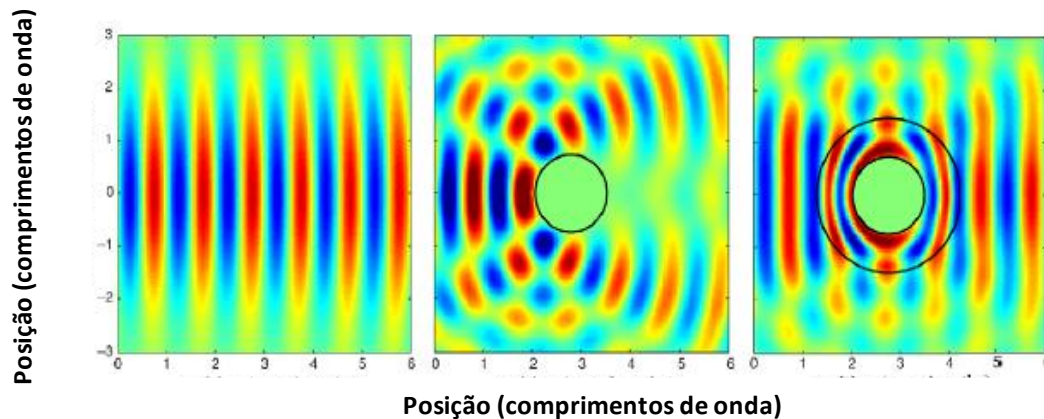


Fig. 2.5 - Resultados para o campo de pressão nas simulações computacionais. (CUMMER; SCHURIG, 2007).

A partir dos resultados da fig. 2.5 é possível afirmar que a presença do *cloak* (quadro à direita) reduz substancialmente as alterações no meio provocadas pelo objeto (quadro central), aproximando-se da situação ideal (quadro da esquerda).

Embora haja uma melhoria evidente quando o *cloak* está presente, ainda há leves variações no campo de pressões. Conforme Cummer e Schurig (2007), essas variações podem ser atribuídas a aproximações numéricas do *software* e à insuficiente discretização utilizada.

Assim, Cummer e Schurig (2007) concluíram que um *cloak* acústico baseado nos mesmos procedimentos de determinação do *cloak* eletromagnético (PENDRY; SCHURIG; SMITH, 2006) é, teoricamente, viável. Contudo, no trabalho de Cummer e Schurig (2007) a construção de um dispositivo com as propriedades necessárias para observação do efeito de *cloaking* ainda é colocada como um desafio a ser superado.

Após o trabalho de Cummer e Schurig (2007), estudos sugerindo formas de realização de um *cloak* acústico começam a aparecer, dos quais dois são abordados a seguir.

A abordagem proposta por Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) consiste em construir o *cloak* por camadas alternadas de dois materiais isotrópicos (fig. 2.6). É mostrado como escolher os materiais com propriedades equivalentes para proporcionar o efeito de *cloaking* desejado.

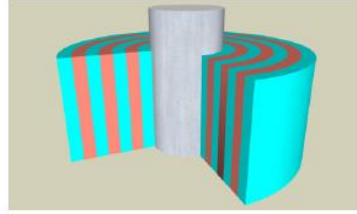


Fig. 2.6 - Esquemático da configuração de um dispositivo de cloaking acústico. As cores diferentes indicam materiais distintos (TORRENT; SÁNCHEZ-DEHESA, 2008).

Assim, a construção é facilitada já que não são necessários materiais anisotrópicos. No entanto, as propriedades devem variar espacialmente segundo as eqs. (2.15), (2.16), (2.17) e (2.18).

$$\rho_1(r) = \frac{r}{r-R_1} + \sqrt{\frac{2R_1}{r-R_1}} \quad (2.15)$$

$$c_1(r) = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \frac{r}{r - R_1} c_b \quad (2.16)$$

$$\rho_2(r) = \frac{\rho_b^2}{\rho_1} = \frac{r - R_1}{r + \sqrt{2R_1(r - R_1)}} \quad (2.17)$$

$$c_2(r) = c_1(r) = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \frac{r}{r - R_1} c_b \quad (2.18)$$

Outras importantes características da abordagem proposta em Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) são: a larga faixa de frequências para as quais se verifica a efetividade do *cloak* e a possibilidade de se escolher o número de camadas alternadas. Quanto maior o número de camadas, melhor a eficiência do dispositivo.

Os resultados das simulações para essa proposta de *cloak* estão mostrados na fig. 2.7. O painel superior representa a situação em que há um cilindro rígido não envolvido pelo *cloak*. Os painéis inferiores esquerdo e direito apresentam os resultados quando o cilindro está envolvido por *cloak* de 50 e 200 camadas, respectivamente. Observa-se que, para um número elevado de camadas, o objeto dissipador central torna-se praticamente invisível.

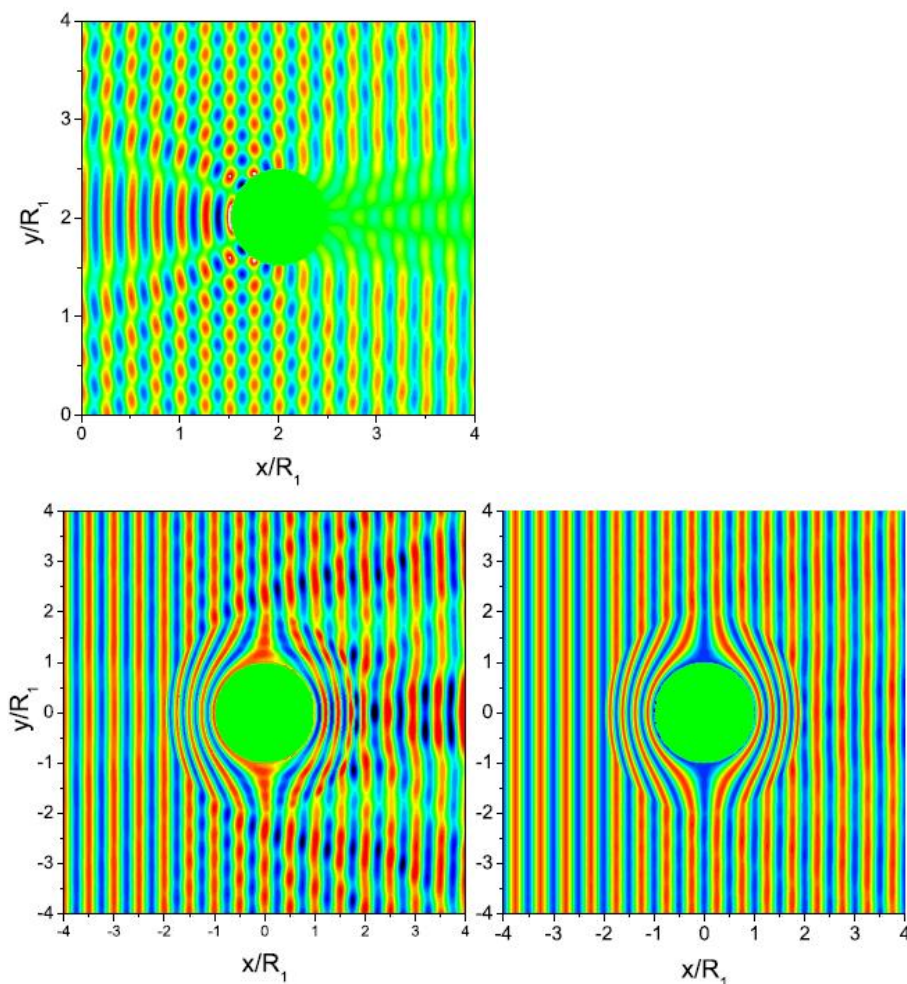


Fig. 2.7 - Distribuição de pressão para onda incidente plana (TORRENT; SÁNCHEZ-DEHESA, 2008).

Embora nenhum protótipo tenha sido fabricado, Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) sugerem a utilização de cristais sônicos, assim denominados por Torrent e Sánchez-Dehesa, para compor as camadas. Essa classe de materiais tem comportamento dinâmico semelhante ao de fluidos e as propriedades podem ser alteradas pela maior ou menor compactação do material.

Zhang (2010) apresenta outro trabalho relevante na área de *cloaking* acústico. A peculiaridade desse trabalho está na proposta de fabricação de um *cloak* para ondas ultrassônicas se propagando na água, conforme explicado adiante. Quanto às simulações, utiliza-se o *software Comsol Multiphysics*.

O *cloak* é modelado por 16 camadas cilíndricas com propriedades uniformes para cada uma delas, de modo a constituir uma aproximação para as eqs. (12), (13) e (14). Simulações baseadas no método de elementos finitos foram realizadas utilizando o

software *Comsol Multiphysics*. Os resultados podem ser vistos na fig. 2.8; o painel esquerdo representa a situação em que o objeto está envolvido pelo *cloak* e o painel direito a situação sem o *cloak*.

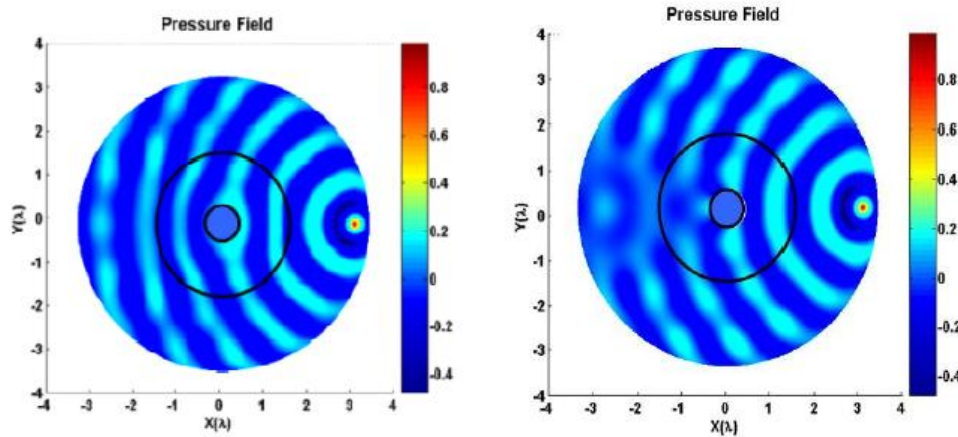


Fig. 2.8 - Resultados dos campos de pressão das simulações para cloak acústico composto por 16 camadas. A fonte pontual emite ondas na frequência de 60 kHz. (ZHANG, 2010).

Para a realização física do *cloak*, Zhang (2010) segue uma metodologia bastante diferente com o intuito de obter um material com as propriedades descritas pelas eqs. (2.12), (2.13) e (2.14). Inicialmente é mostrada uma analogia entre elementos de circuito elétrico (indutor e capacitor) e canais e cavidades.

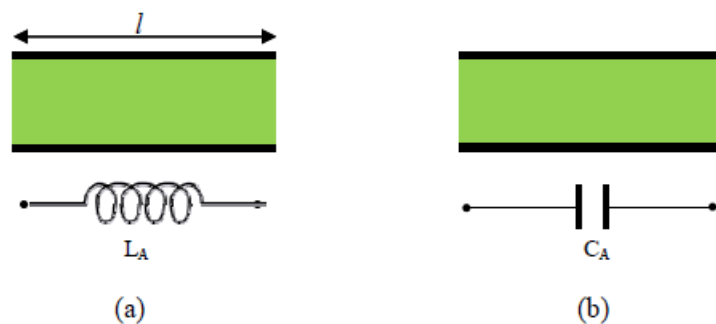


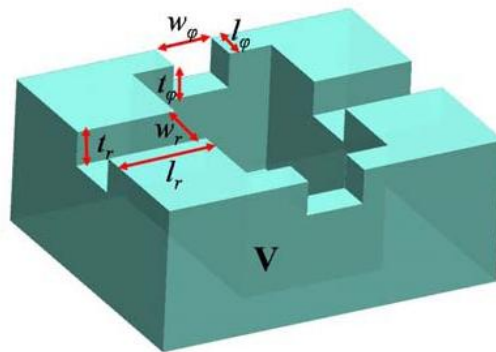
Fig. 2.9 - Analogia entre elementos de circuito acústico e elétrico (ZHANG, 2010).

Um tubo com extremidades abertas é equivalente a um indutor acústico (fig. 2.9a), enquanto que um tubo com uma extremidade rígida corresponde a um capacitor acústico (fig. 2.9b). As expressões da indutância e capacitância equivalentes são, conforme deduzida em Zhang (2010), dadas pelas eqs. (2.19) e (2.20). No trabalho de Zhang (2010), o meio onde os fenômenos são estudados é a água.

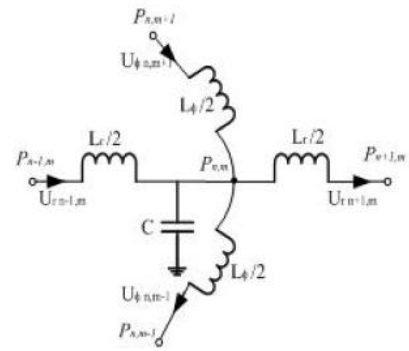
$$L_A = j\omega \frac{\rho_b l}{s} \quad (2.19)$$

$$C_A = \frac{V}{\rho_b c_b^2} \quad (2.20)$$

Dada essas condições, a ideia é construir uma rede constituída de células unitárias, onde cada célula é composta por uma cavidade central e canais interligando as células vizinhas, conforme visto na fig. 2.10a.



(a)



(b)

Fig. 2.10 - (a) Célula unitária proposta para realização de cloak acústico. **(b)** Circuito elétrico equivalente (ZHANG, 2010).

O circuito equivalente, mostrado na fig. 2.10b, pode ser modelado por um circuito concentrado, conforme as eqs. (2.21), (2.22) e (2.23).

$$\frac{\partial P}{\partial r} \approx \frac{P_{n+1,m} - P_{n-1,m}}{\Delta r} = - \frac{j\omega L_r U_r}{\Delta r} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial P}{r \partial \theta} \approx \frac{P_{n,m+1} - P_{n,m-1}}{r \Delta \theta} = - \frac{j\omega L_\theta U_\theta}{r \Delta \theta} \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} \approx \frac{r_{n+1} U_{r,n+1,m} - r_n U_{r,n-1,m}}{r_n \Delta r_n} + \frac{U_{\theta,n,m+1} - U_{\theta,n,m-1}}{r_n \Delta \theta_m} = \frac{j\omega C_P}{\Delta r} \quad (2.23)$$

Comparando as Eqs. (2.21), (2.22) e (2.23) com as Eqs. (2.8), (2.9) e (2.10); obtém-se os parâmetros dados pelas Eqs. (2.24), (2.25) e (2.26).

$$\rho_{eff,r} = \frac{L_r S_r}{\Delta r} \quad (2.24)$$

$$\rho_{eff,\theta} = \frac{L_\theta S_\theta}{r \Delta \theta} \quad (2.25)$$

$$\beta_{eff} = \frac{C}{S_r \Delta r} \quad (2.26)$$

Por fim, substituindo as eqs. (2.19) e (2.20) neste último conjunto de equações:

$$\rho_{eff,r} = \rho_w \frac{l_r}{\Delta r} \quad (2.27)$$

$$\rho_{eff,\theta} = \rho_w \frac{l_\theta}{r \Delta \theta} \quad (2.28)$$

$$\beta_{eff} = \frac{V}{\rho_w c_w^2 S_r \Delta r} \quad (2.29)$$

Assim, tem-se um conjunto de relações entre as propriedades do meio anisotrópico, propriedades da água e as dimensões da célula unitária, permitindo sintetizar um circuito em uma peça cilíndrica de alumínio (fig. 2.11). O protótipo

fabricado por Zhang (2010) é baseado em propriedades reduzidas, que facilitam a fabricação do *cloak* e, ao mesmo tempo, satisfazem aproximadamente as Eqs. (2.27), (2.28) e (2.29).

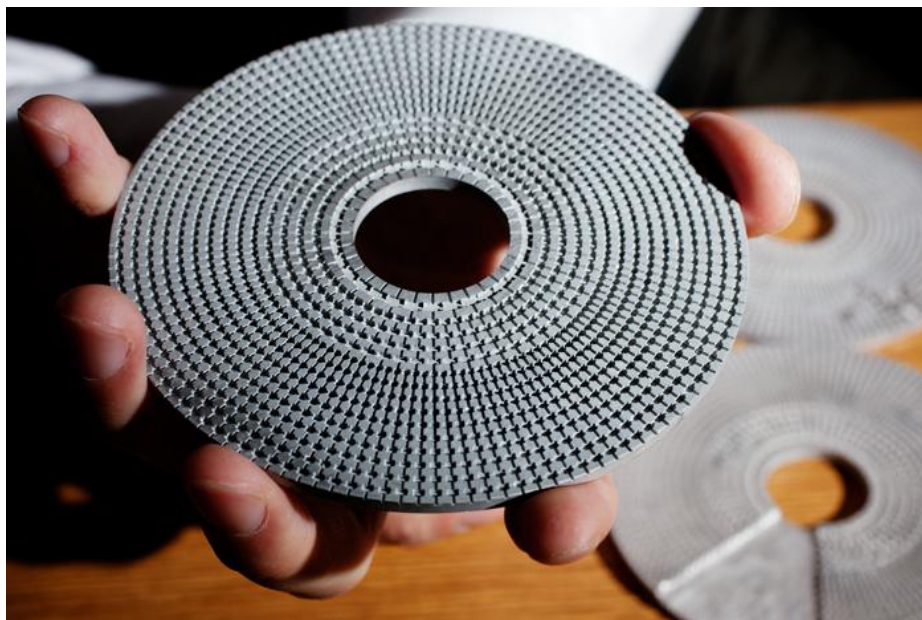


Fig. 2.11 - Dispositivo de *cloaking* acústico projetado pelo método da analogia de circuitos elétricos (ZHANG, 2010).

A parte experimental foi realizada em um tanque com uma fina camada de água, no qual o *cloak* foi colocado a uma dada distância de uma fonte pontual. O campo acústico foi avaliado com um medidor de pressão que varreu a região do tanque.

O mapeamento do campo acústico foi realizado para uma série de valores de frequência, a fim de verificar a funcionalidade do *cloak* para diferentes frequências. Os resultados estão resumidos na fig. 2.12.

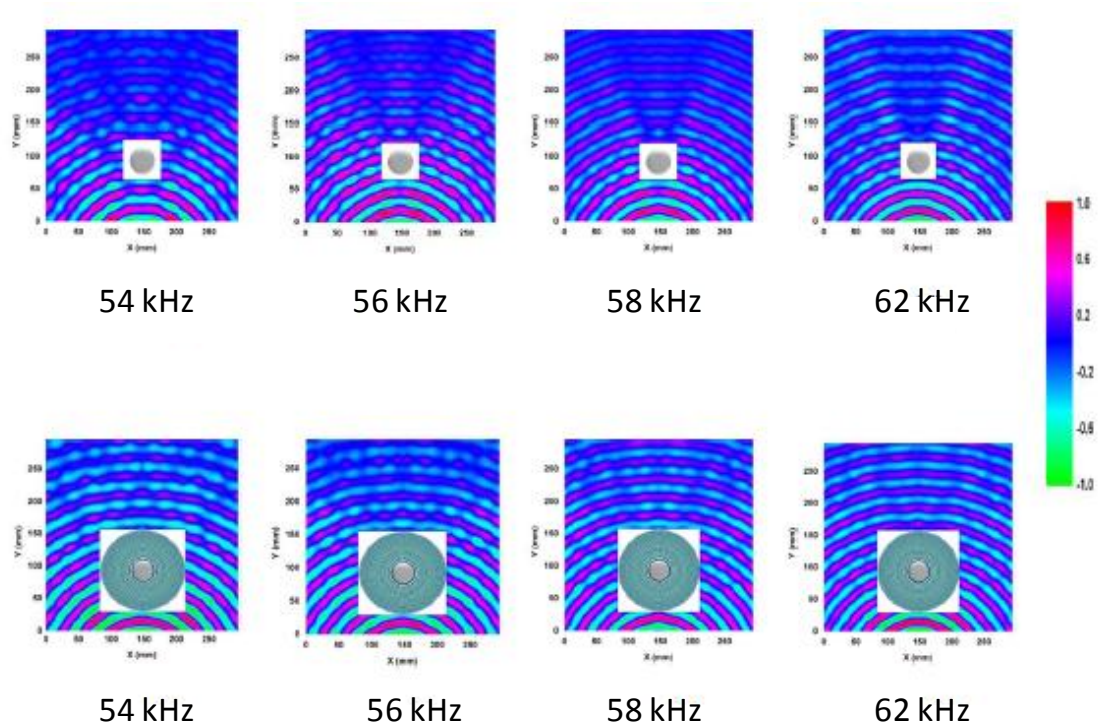


Fig. 2.12 - Medições do campo de pressões para duas situações: sem o *cloak* (imagens superiores) e com o *cloak* (imagens inferiores) (ZHANG,2010).

Assim, o efeito esperado de *cloaking* foi verificado para uma faixa de frequências e o dispositivo fabricado por Zhang (2010) é capaz de tornar um objeto muito menos visível a ondas ultrassônicas se propagando na água.

3. ANÁLISE

Feita essa breve revisão do histórico de estudos de *cloaking*, parte-se para uma seção de análise dos dispositivos de *cloaking* acústico apresentados por Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) e Zhang (2010). A análise inclui a modelagem e posterior simulação dos dispositivos em um *software* adequado, objetivando observar o efeito do *cloak* acústico.

3.1 Modelagem

Uma grande vantagem da proposta de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) é a simplicidade geométrica do *cloak*. Conforme visto na fig. 2.6, a peça é composta por cilindros concêntricos de mesma espessura, com dois tipos de materiais alternados. Assim, o modelo pode ser desenhado diretamente no software de simulação numérica, tornando desnecessário um esforço de modelagem em um *software* de CAD.

O mesmo não ocorre para o *cloak* de Zhang (2010), no qual são utilizados materiais comuns, como alumínio, mas formas geométricas complicadas, com o intuito de reproduzir propriedades efetivas anisotrópicas.

A modelagem do *cloak* proposto por Zhang (2010) é realizada com o *software Autodesk Inventor*, que é um programa capaz de reproduzir geometrias complexas através de comandos localizados em interfaces gráficas simples e intuitivas.

Zhang (2010) parte das eqs. (2.27), (2.28) e (2.29), juntamente com as especificações simplificadas dadas pelas eqs. (3.1), (3.2) e (3.3), para a determinação dos parâmetros geométricos do *cloak* (fig. 2.10.a). Os valores para algumas camadas são exemplificados na Tabela 3.1.

$$\frac{\rho_r}{\rho_w} = 0.5 \quad (3.1)$$

$$\frac{\rho_\theta}{\rho_w} = 0.5 \left(\frac{r-R_1}{r} \right)^2 \quad (3.2)$$

$$\frac{\beta}{\beta_w} = 2 \left(\frac{R_2-R_1}{R_2} \right)^2 \quad (3.3)$$

Tabela 3.1 - Especificação dos parâmetros geométricos de algumas camadas do cloak
(ZHANG, 2010).

Layer	$l_r(\text{mm})$	$l_\varphi(\text{mm})$	$V(\text{mm}^3)$
1	2.05	0.10	3.00
3	1.37	0.22	2.29
5	1.24	0.41	2.06
7	1.24	0.30	2.06
9	1.24	0.41	2.06
11	1.24	0.52	2.06
13	1.24	0.63	2.06
15	1.24	0.74	2.06

Quanto à metodologia para desenhar a peça tridimensional, a ideia consiste em aproveitar a repetição periódica das células unitárias; ou seja, para cada camada apenas uma célula unitária é desenhada. Posteriormente é aplicada uma repetição circular, dando origem a uma camada. Por fim, as camadas devem ser justapostas para produzir a peça completa.

A fig. 3.1 ilustra uma célula unitária da primeira camada. Após a aplicação do comando de replicação em torno do eixo vertical, obtém-se a primeira camada completa, conforme a fig. 3.2.

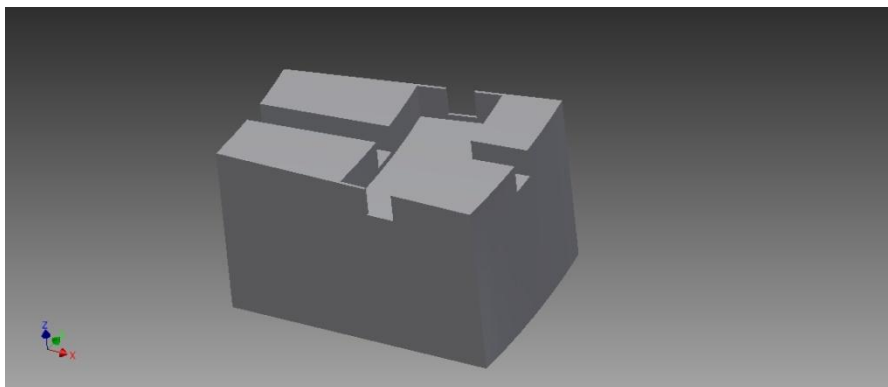


Fig. 3.1 - Célula unitária da primeira camada.

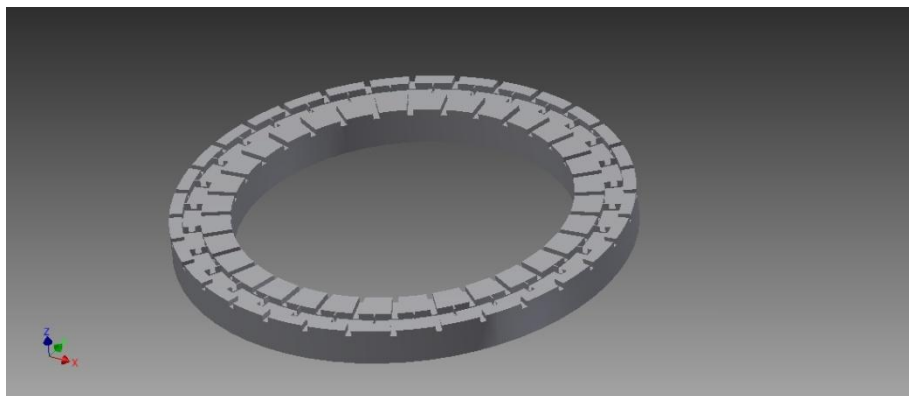


Fig. 3.2 - Primeira camada do *cloak*.

Esse procedimento deve ser repetido para as demais camadas do *cloak*, dando origem à peça completa, mostrada nas fig. 3.3 e fig. 3.4.

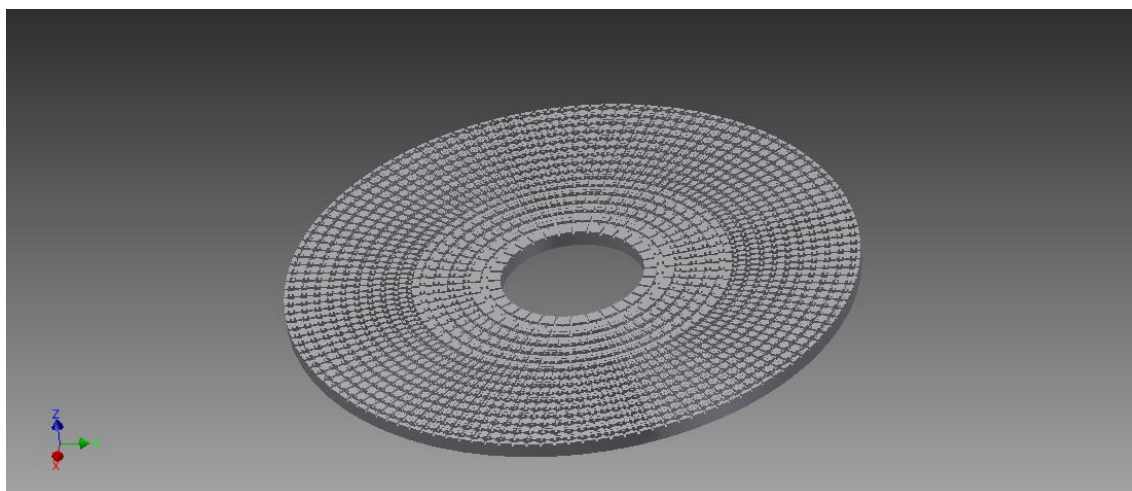


Fig. 3.3 - *Cloak* completo.

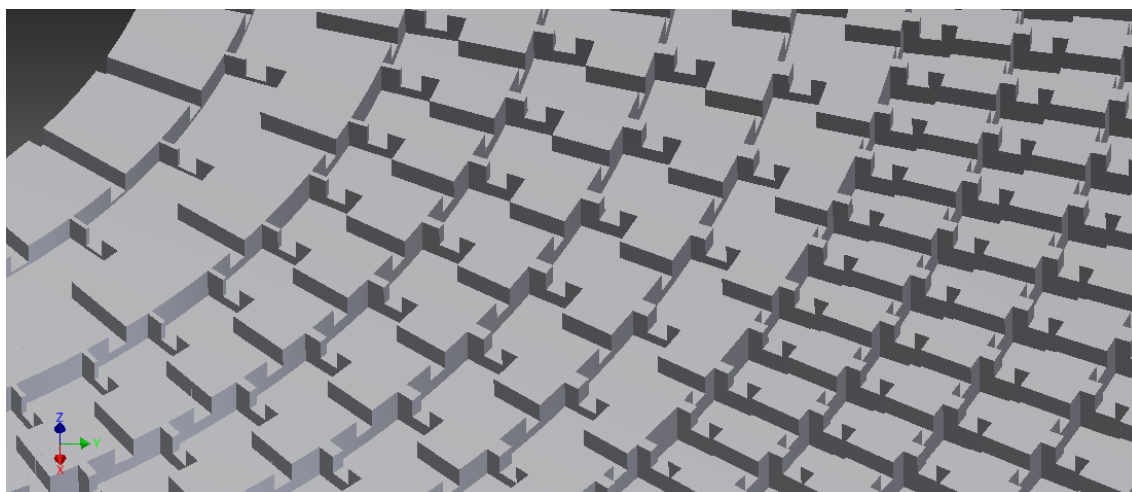


Fig. 3.4 - Detalhe da superfície do *cloak*.

Zhang (2010) não explicita todas as dimensões necessárias para a fabricação do protótipo, o que leva a algumas estimativas e aproximações.

3.2 Simulações

O *software* utilizado para as simulações foi o *Comsol Multiphysics*, que é um *software* comercial baseado no método dos elementos finitos (MEF), e a escolha do mesmo se deve a alguns fatores. A grande maioria dos estudos sobre *cloaking* citados na seção de revisão de literatura utiliza o *Comsol Multiphysics* para as simulações. Além disso, o *software* apresenta um módulo acústico com uma grande quantidade de equações e condições de contorno já implementadas, facilitando a simulação de problemas de natureza acústica. Por fim, outro fator bastante relevante é a simples interface do programa, que torna as etapas de simulação mais intuitivas e simples. A utilização do *software Comsol Multiphysics* para a simulação de estudos de *cloaking* está detalhada no Apêndice A.

A ideia geral das simulações é comparar o campo acústico nas seguintes situações: no domínio livre, na presença de um objeto perturbador e na presença do mesmo objeto envolvido pelo *cloak*. É importante ressaltar que o objeto perturbador deve ter dimensões maiores que metade do comprimento de onda ($\lambda/2$), de modo a ser perceptível às frentes de ondas e alterar o campo acústico.

A fim de uniformizar os parâmetros e facilitar comparações, optou-se por realizar as simulações em um domínio retangular de 600 mm de comprimento e 400 mm de largura, preenchido com água, com uma fonte pontual de pressão emitindo ondas harmônicas na frequência de 60 kHz. A fonte pontual está colocada a 165 mm do centro do objeto perturbador.

Com relação às condições de contorno nas fronteiras do domínio, foi escolhida uma condição pré-configurada no *Comsol Multiphysics* que simula um meio infinito, de modo que não haja reflexões e perturbações nas fronteiras.

Para o domínio livre, o campo de pressões está mostrado na fig. 3.5. Quando colocado um objeto perturbador perfeitamente rígido de raio 13.5 mm a configuração de pressões se altera para a ilustrada na fig. 3.6. Note que a dimensão do objeto é maior que metade do comprimento de onda do ultrassom a 60 kHz em água, conforme discutido anteriormente.

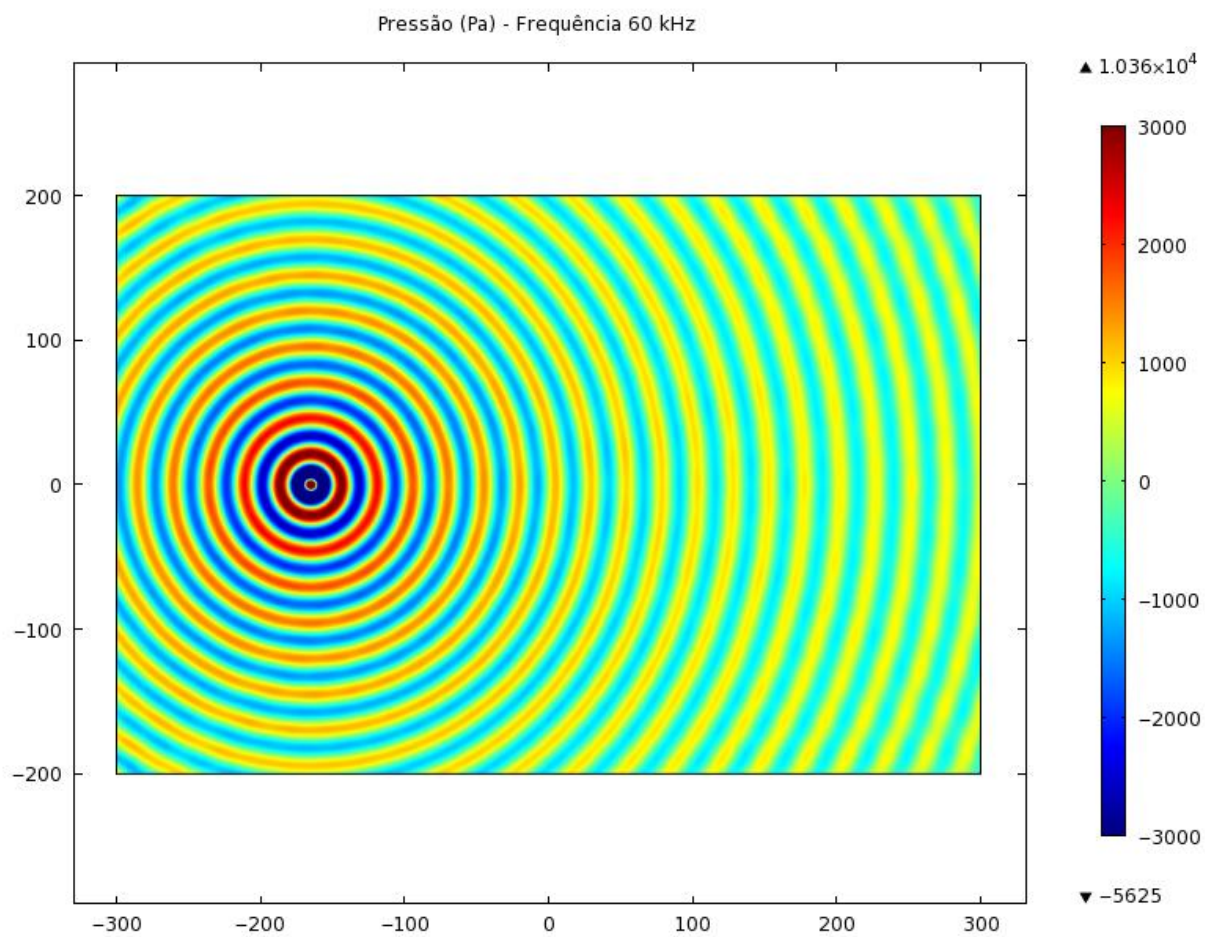


Fig. 3.5 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz.

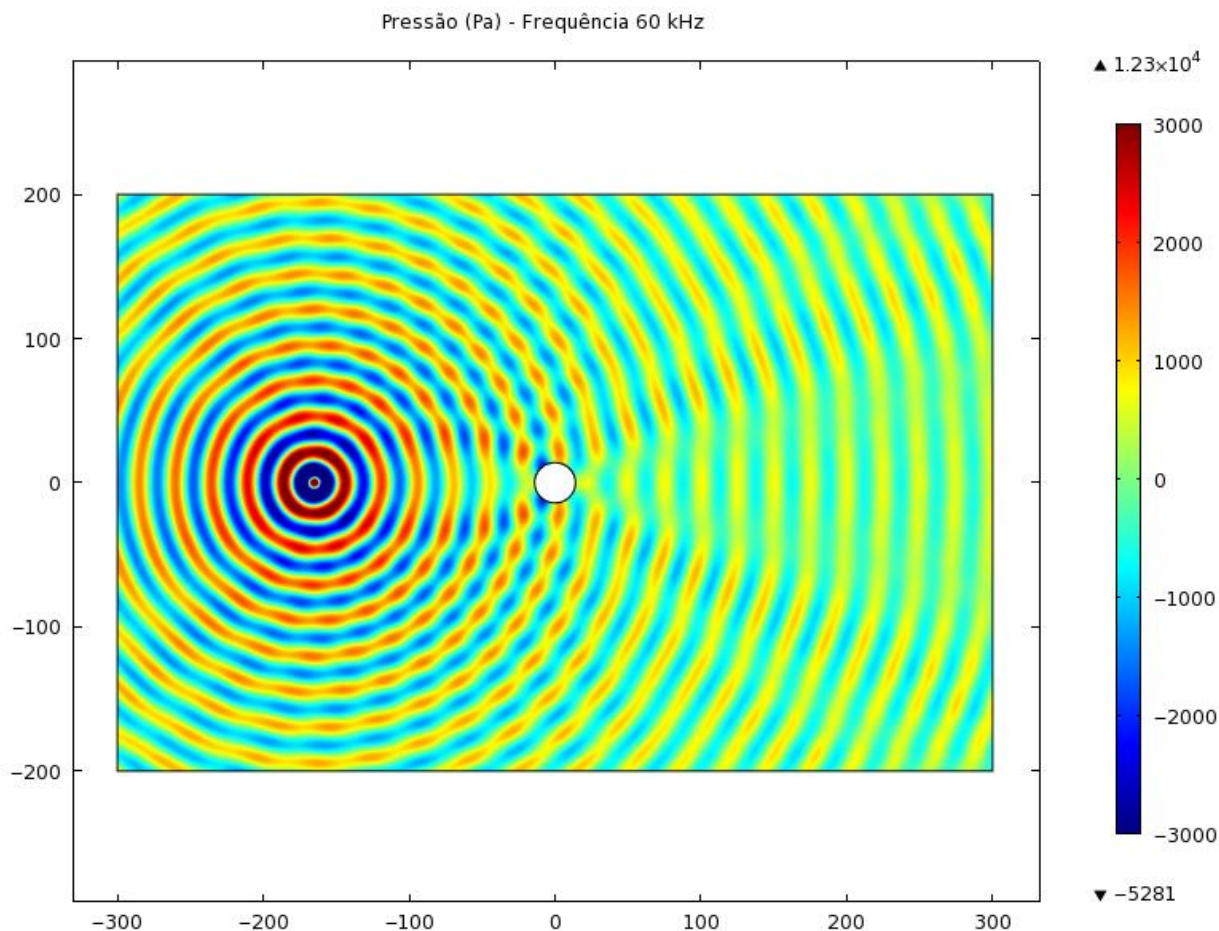


Fig. 3.6 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador.

Através da comparação desses resultados, é possível observar que a presença do objeto introduziu perturbações no campo acústico. Entre a fonte e o objeto, observam-se efeitos de reflexão, distorcendo a distribuição original de pressões. Atrás do objeto, surgem algumas faixas de baixa pressão e outras de alta pressão, que se abrem em diferentes ângulos a partir do objeto.

Embora os efeitos da presença de uma barreira rígida sejam visíveis, é interessante quantificar de alguma forma as perturbações introduzidas. A análise quantitativa segue, em linhas gerais, um dos métodos utilizados por Zhang (2010), que consiste em comparar o máximo valor absoluto de pressão para alguns comprimentos de onda. Em outras palavras, primeiramente deve-se escolher um período de onda completo, incluindo vale e crista, localizado além da posição do objeto. Após isso, escolhe-se uma cota ao longo do eixo vertical e avalia-se uma grande quantidade de

pontos nessa cota e dentro do comprimento de onda mencionado anteriormente. Por fim, determina-se o máximo valor absoluto de pressão dos dados obtidos.

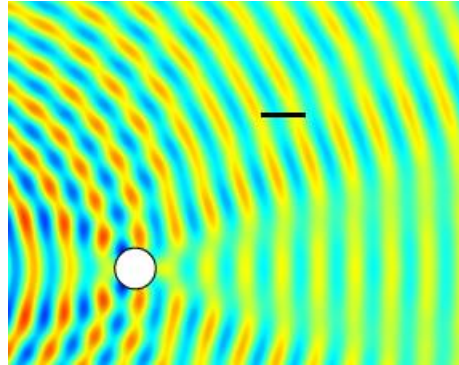


Fig. 3.7 - Etapa do procedimento para determinação da máxima pressão absoluta em um dado comprimento de onda.

Esse procedimento está indicado na fig. 3.7, onde foi escolhida a cota $y = 100$ mm para ilustrar o método. Note que a pressão é determinada para um grande número de pontos contidos no segmento de linha preto e deve ser selecionado o máximo valor absoluto dos dados. O procedimento deve ser repetido para várias cotas, dando origem a um gráfico de máxima pressão absoluta em função da posição y . A fig. 3.8 apresenta esses gráficos para quatro comprimentos de onda, para os casos de domínio livre e na presença do objeto perturbador.

Os períodos de onda foram escolhidos de modo a estarem localizados após a posição do objeto perturbador e espaçados de maneira uniforme. Assim, a onda 1 corresponde àquela localizada em 25 e 110 mm; a onda 2 está entre 80 e 160 mm; a onda 3 está entre 160 e 235 mm, por fim, a onda 4 corresponde ao comprimento de onda localizado entre 215 e 285 mm .

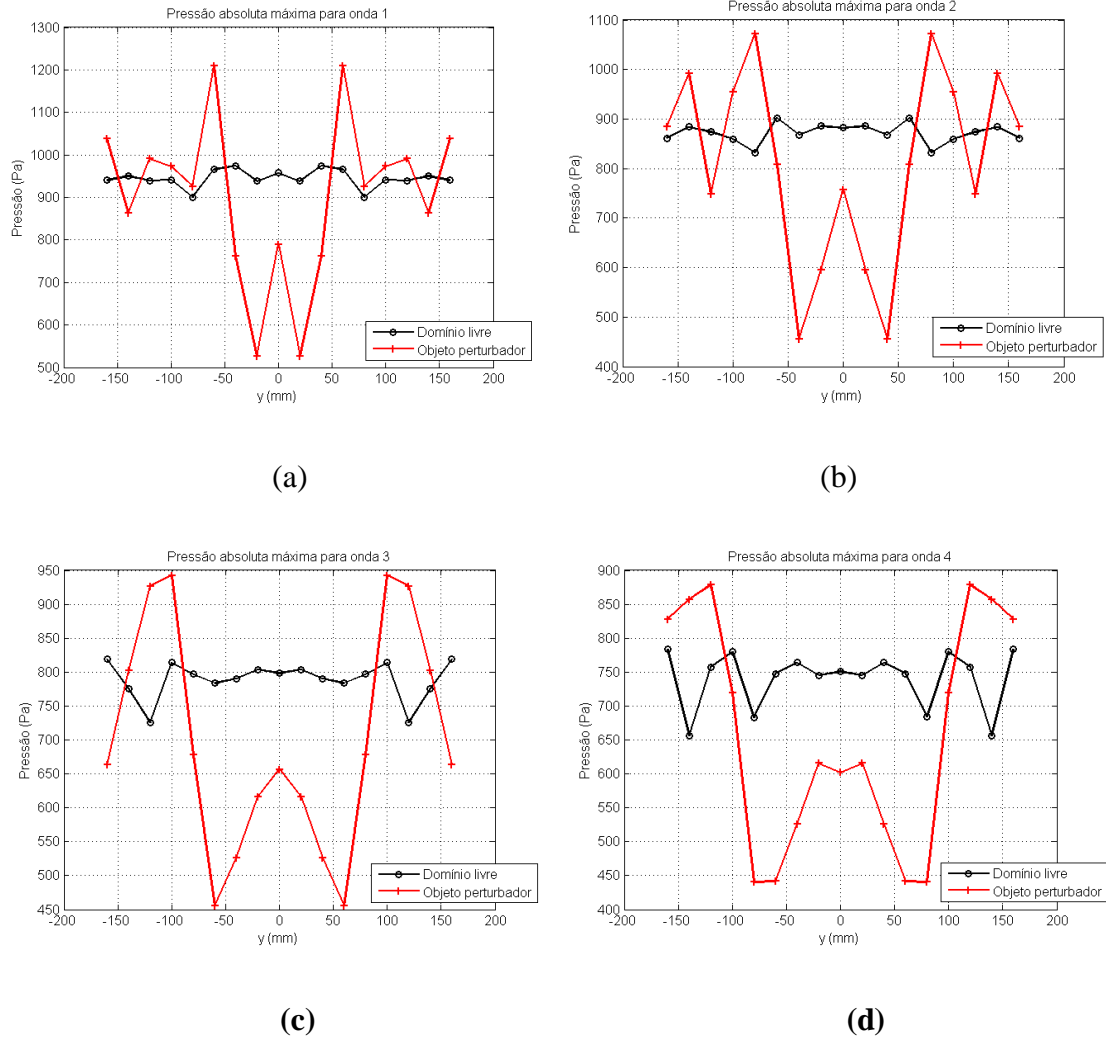


Fig. 3.8 - Gráficos do máximo valor absoluto da pressão em função da coordenada y .
(a) Onda 1 **(b)** Onda 2 **(c)** Onda 3 **(d)** Onda 4.

Os gráficos da fig. 3.8 embasam a discussão qualitativa feita anteriormente, ou seja, a presença da barreira rígida distorce o campo acústico original, introduzindo uma região de baixa pressão na região central atrás do objeto ($|y| < 70$ mm), seguida de algumas faixas de pressão elevada nas medições mais distantes da região central ($|y| > 70$ mm).

Zhang (2010) ainda define um parâmetro $\bar{\gamma}$ denominado de visibilidade média, que permite quantificar ainda mais as variações na distribuição de pressões no domínio. A expressão para cálculo de $\bar{\gamma}$ é dada pela eq. 3.4.

$$\bar{\gamma} = \sum_{j=1}^n \gamma_j \quad (3.4)$$

O parâmetro n é o número de comprimentos de onda utilizados na análise e γ_j é dado pela eq. 3.5.

$$\gamma_j = \frac{P_{max,j} - P_{min,j}}{P_{max,j} + P_{min,j}} \quad (3.5)$$

onde $P_{max,j}$ e $P_{min,j}$ representam o maior e o menor valor, respectivamente, dos máximos absolutos de pressão para cada comprimento de onda j ; ou seja, são o maior e o menor valor dos gráficos da fig. 3.8.

Fisicamente, a visibilidade média definida por Zhang (2010) quantifica as variações de pressão ao longo do domínio. Quanto menos perturbado for o campo acústico, menor o valor da visibilidade média e, no limite, para o caso ideal de um campo acústico perfeito, $\bar{\gamma}$ é zero, pois não há diferença entre os valores de pressão dentro de um mesmo comprimento de onda.

O cálculo desse parâmetro para o caso de domínio livre fornece o valor $\bar{\gamma} = 0.23$, enquanto para o caso em que há o objeto perturbador, $\bar{\gamma} = 1.48$.

Terminada essa discussão acerca das alterações devidas à introdução de um objeto rígido no domínio em estudo, parte-se para a análise do comportamento dos dispositivos de *cloaking* propostos por Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) e Zhang (2010).

3.2.1 Cloak de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008)

Conforme já explicado na seção de modelagem, esse *cloak* é composto de diversos cilindros concêntricos e o espaçamento entre eles dá origem a camadas. O preenchimento dessas camadas é feito pela alternância de dois materiais isotrópicos. Embora constantes para qualquer direção, a densidade e a velocidade de propagação variam em função do raio, levando ao uso de materiais não convencionais. No caso do *software Comsol Multiphysics*, as propriedades de um material podem ser dadas por expressões algébricas, facilitando bastante a simulação desse tipo de *cloak*.

Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) verificam que a efetividade desse tipo de *cloak* depende bastante do número de camadas empregado. Assim, decidiu-se por realizar

simulações para dispositivos com 22 e 42 camadas. Em ambos os casos, o raio interno do *cloak* coincide com o raio do objeto, ou seja, 13.5 mm e o raio externo vale 54.1 mm. Os resultados estão mostrados nas figs. 3.9 e 3.10.

É importante observar que o *cloak* em si não está mostrado nos resultados das simulações a fim de facilitar a visualização dos resultados. Para o modelo com 22 camadas (fig. 3.9), já é possível observar como as frentes de onda se alteram para desviar o objeto. No entanto, fica difícil avaliar se houve substancial melhoria em relação ao resultado sem o *cloak*. Para tanto, será necessária uma análise quantitativa, feita a seguir.

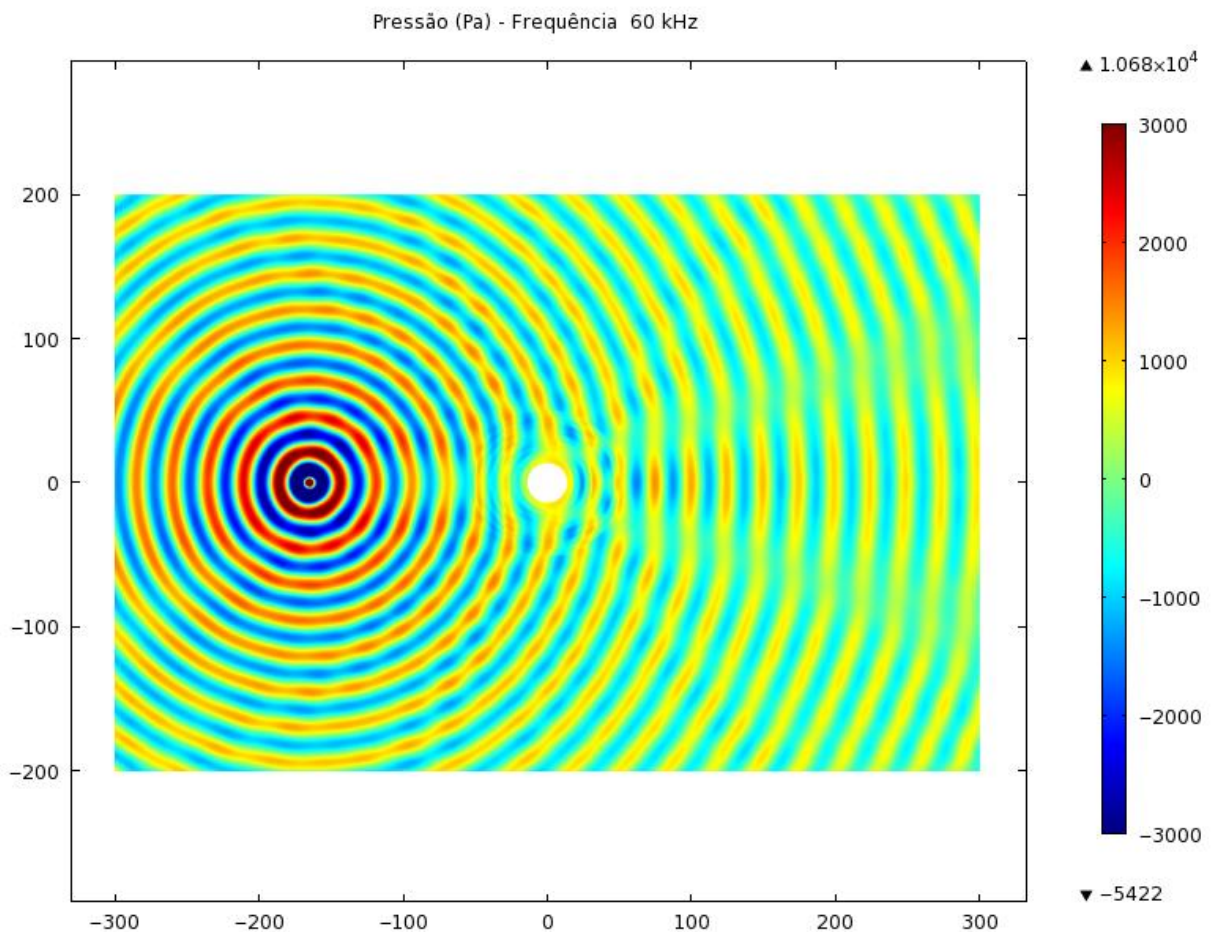


Fig. 3.9 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por cloak de 22 camadas de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008).

Para o modelo com 42 camadas (fig. 3.10), observa-se um campo acústico muito próximo ao obtido quando o domínio está livre (fig. 3.5), demonstrando a efetividade do

cloak proposto por Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) para um número razoável de camadas.

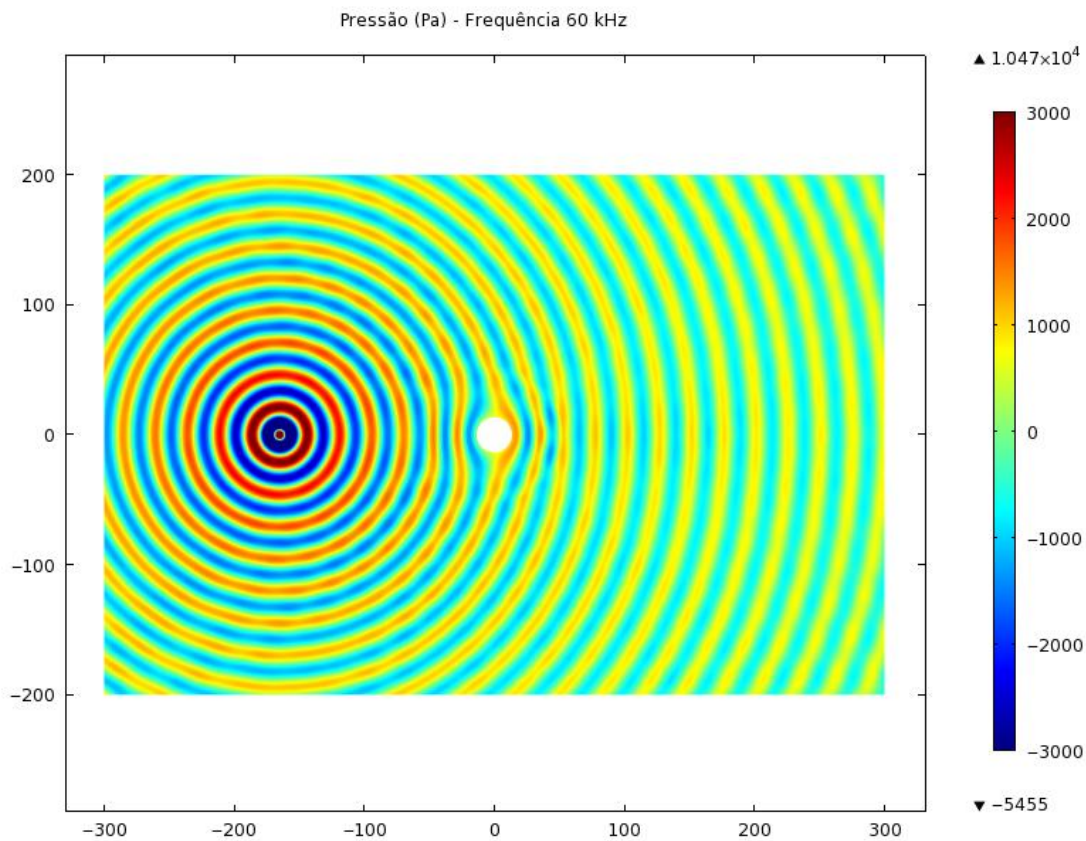


Fig. 3.10 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por cloak de 42 camadas de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008).

A fim de quantificar a efetividade dessa proposta de *cloak*, foram gerados os gráficos da fig. 3.11, seguindo a metodologia utilizada por Zhang (2010) e já explicada anteriormente. Analisando esses gráficos, conclui-se que, para o *cloak* de 22 camadas, os picos de baixa pressão ainda estão presentes e, na região $|y| < 50$ mm, a pressão atinge valores bem elevados. Calculando-se a visibilidade média, obtém-se $\bar{\gamma} = 1.45$, que é praticamente igual à visibilidade média obtida para o caso em que há objeto perturbador sem *cloak*. Assim, pode-se afirmar que o *cloak* composto por 22 camadas não é eficiente para as condições simuladas.

Para o *cloak* de 42 camadas, confirma-se a expectativa dos resultados qualitativos, ou seja, os valores de pressão estão bastante próximos daqueles obtidos no domínio livre, demonstrando a eficiência do modelo de 42 camadas. Ademais,

calculando-se a visibilidade média, obtém-se $\bar{\gamma} = 0.41$, confirmando a eficiência do modelo.

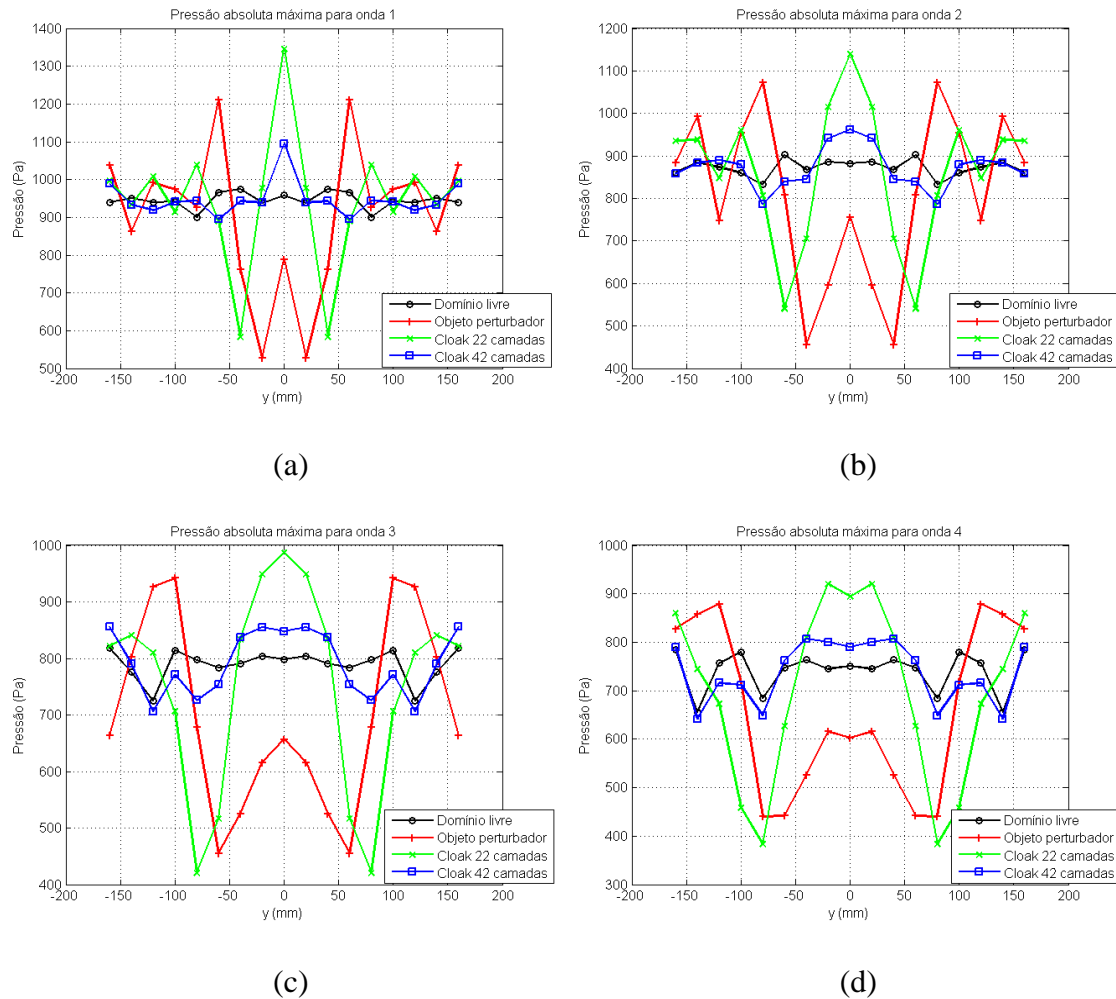


Fig. 3.11- Gráficos do máximo valor absoluto da pressão em função da coordenada y , incluindo os modelos de 22 camadas e 42 camadas de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008). (a) Onda 1 (b) Onda 2 (c) Onda 3 (d) Onda 4.

3.2.2 Cloak de Zhang (2010)

Primeiramente, é importante destacar que durante as simulações computacionais, foi utilizada, na verdade, uma adaptação do *cloak* de Zhang (2010). Isso devido ao fato que foram realizadas simulações com um modelo bidimensional, ao invés de uma representação tridimensional do protótipo. No entanto, doravante, a adaptação desse *cloak* será referenciada como a proposta de Zhang (2010).

O *cloak* sugerido por Zhang (2010) requer um trabalho especial de modelagem, conforme descrito anteriormente. Após desenhar a peça, deve-se importá-la no ambiente de simulações do *Comsol Multiphysics*. No entanto, o modelo gerado da peça é tridimensional, enquanto o foco das simulações é bidimensional; assim, foi necessário criar um desenho projetado do *cloak* para poder utilizá-lo no *Comsol Multiphysics*. A peça importada está ilustrada na fig. 3.12.

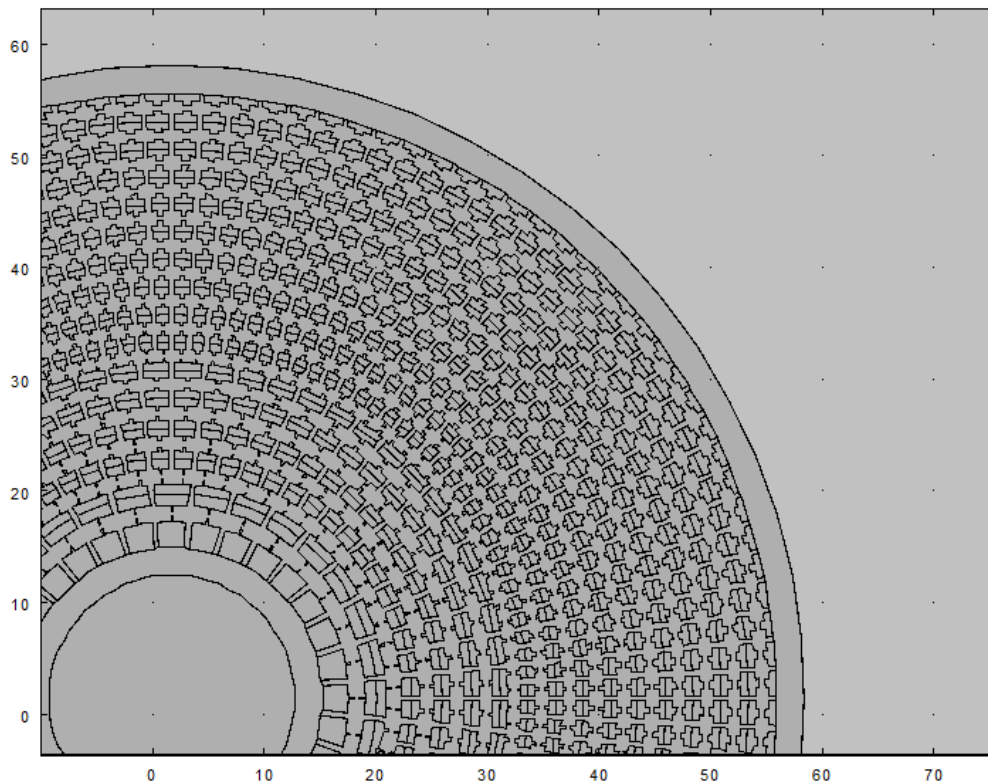


Fig. 3.12 - Detalhe da peça no *Comsol Multiphysics*.

Utilizando-se os mesmos parâmetros de simulação adotados até o momento, foi obtido o resultado da fig. 3.13; novamente o *cloak* não foi mostrado para facilitar a visualização. É notável que o campo acústico com a presença do *cloak* é bastante semelhante ao campo na ausência dele (Fig 3.6). As ondas não seguem o caminho que deveriam pelas cavidades do *cloak* a fim de desviar do objeto, o que torna o dispositivo ineficiente.

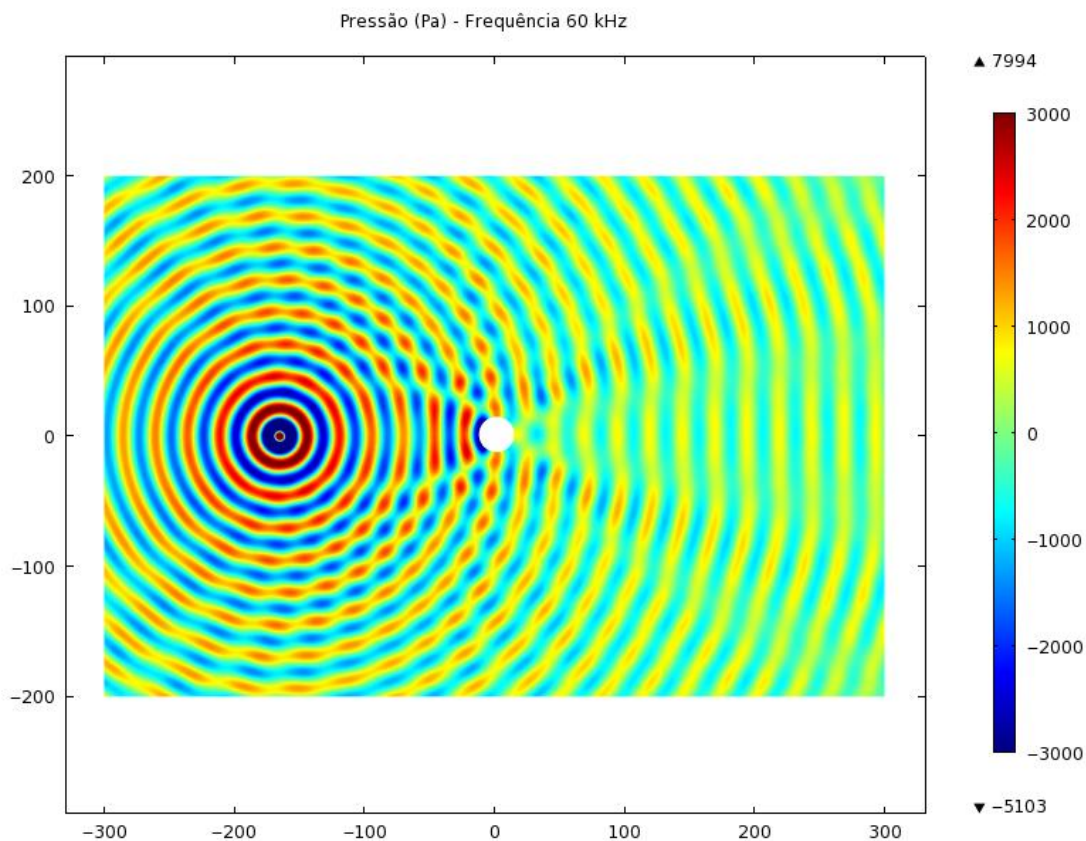
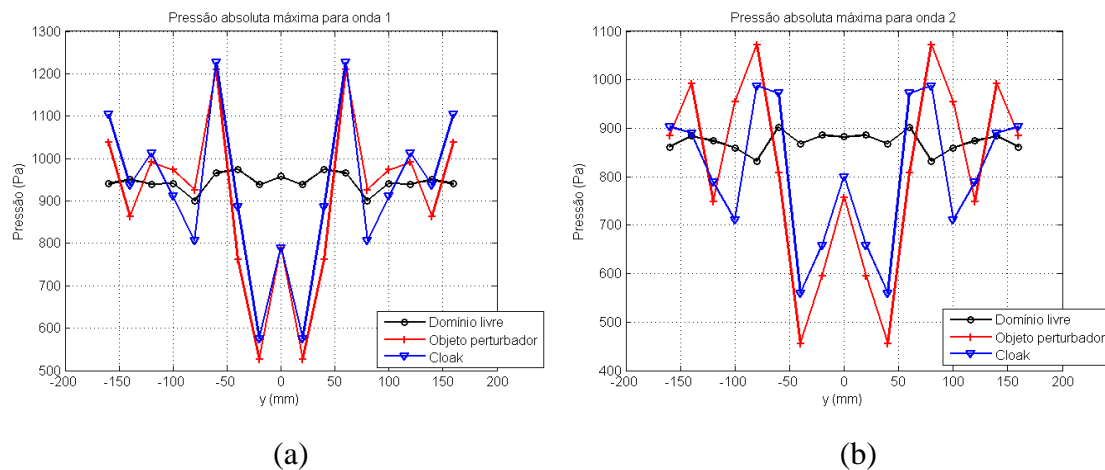


Fig. 3.13 - Campo acústico devido à fonte pontual de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por *cloak* de Zhang (2010).

Continuando com o mesmo procedimento de quantificação dos resultados, foram obtidos os gráficos da fig. 3.14, onde é possível confirmar que os resultados do *cloak* de Zhang (2010) estão muito próximo daqueles em que o objeto não está envolvido pelo dispositivo.



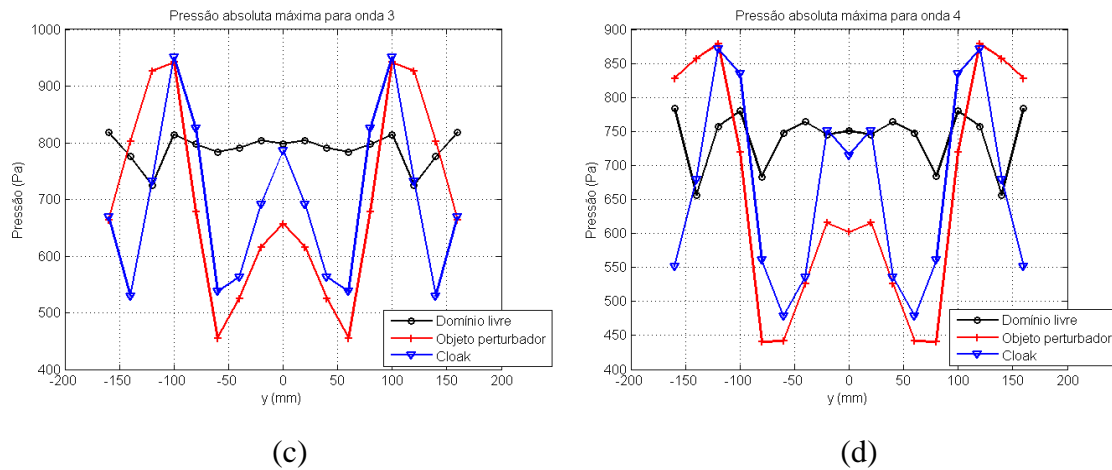


Fig. 3.14 - Gráficos do máximo valor absoluto da pressão em função da coordenada y, incluindo o modelo de Zhang (2010). (a) Onda 1 (b) Onda 2 (c) Onda 3 (d) Onda 4.

A primeira hipótese aventada para explicar o porquê dos resultados inesperados refere-se à discretização utilizada. Até o momento, os elementos de MEF preenchem áreas com contornos bem delimitados e sem variações abruptas; assim, a utilização de elementos triangulares com dimensões da ordem de 1/10 do comprimento de onda produzia resultados satisfatórios.

No entanto, devido à complexa geometria do *cloak* proposto por Zhang (2010), discretizou-se bastante a malha de elementos na região interna do *cloak*, a fim de captar os efeitos dos contornos. As simulações foram conduzidas com elementos triangulares com dimensões da ordem de 1/60 do comprimento de onda, conforme mostrado na Fig.3.15. Ainda assim, os resultados permaneciam inalterados.

A segunda tentativa de melhorar os resultados do *cloak* foi realizar simulações em um intervalo de frequências entre 40 kHz e 80 kHz, buscando uma frequência em que o *cloak* mostrasse um comportamento mais adequado. Novamente, os resultados permaneceram insatisfatórios.

O último recurso utilizado foi simular o campo acústico para uma fonte de ondas planas, o que também não foi suficiente para analisar a efetividade do dispositivo.

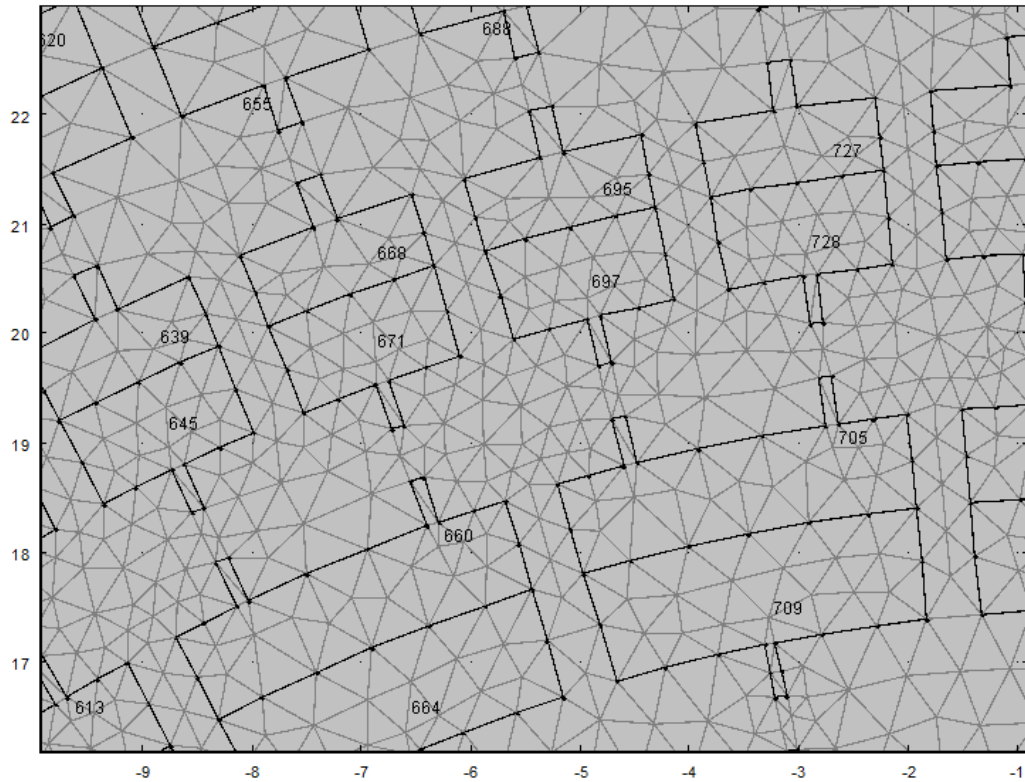


Fig. 3.15 - Detalhe da malha de elementos finitos dentro da região do *cloak*.

Assim, acredita-se que não é possível simular esse tipo de *cloak* em um domínio bidimensional devido aos efeitos das cavidades, que são análogas a capacitores em um circuito elétrico equivalente. Para verificar os efeitos do *cloak*, seria necessária uma análise tridimensional. No entanto, a importação e criação da malha de elementos finitos de um modelo tridimensional no *Comsol Multiphysics*, mostraram-se inviáveis devido a limitações computacionais.

A ideia para contornar esse problema é simular um modelo teórico, cujas propriedades são dadas pelas eqs. (2.12), (2.13) e (2.14). Esta é, de fato, a metodologia seguida por Zhang (2010). Uma leitura mais atenta do trabalho revela que não foram realizadas simulações a partir de uma geometria desenhada e posteriormente importada em um *software* numérico. Zhang (2010) simula, na verdade, um modelo homogeneizado de 16 camadas, que constitui uma aproximação teórica para o verdadeiro *cloak*.

Conforme detalhado no Apêndice A, o *Comsol Multiphysics* pode ser utilizado em um módulo matemático, onde há um conjunto pré-estabelecido de equações comuns

que regem problemas físicos. No caso do *cloak* de Zhang (2010), foi resolvida a equação de Helmholtz para o caso em que a densidade é um tensor diagonal na base cilíndrica (eq. 3.6).

$$\nabla \cdot (-\rho \nabla p) - \frac{\omega^2}{\beta} p = 0 \quad (3.6)$$

onde p corresponde à pressão, ρ é o tensor de densidades, ω é a frequência angular e β é a compressibilidade do fluido.

Na região externa ao *cloak*, o tensor de densidades se resume a um escalar. Na região do *cloak*, as componentes do tensor de densidades e o valor da compressibilidade são funções do raio e estão definidas nas eqs. (2.12), (2.13) e (2.14). A utilização deste módulo matemático foi necessária porque o módulo acústico previamente utilizado não apresenta a possibilidade de definir materiais anisotrópicos.

Diferente das simulações realizadas até então, escolheu-se uma onda plana para análise dos resultados. Tal escolha se deve à facilidade de definição das condições de contorno do domínio. No módulo matemático, é necessário definir explicitamente as equações das condições de contorno; sendo assim, é mais simples definir uma condição em que apenas frentes de ondas planas não sofrem reflexões e alterações nas fronteiras.

A fig 3.16 apresenta os resultados obtidos quando o objeto não está envolvido pelo *cloak*, enquanto na fig. 3.17 o campo acústico é mostrado para a situação em que a barreira rígida está envolvida pelo *cloak*.

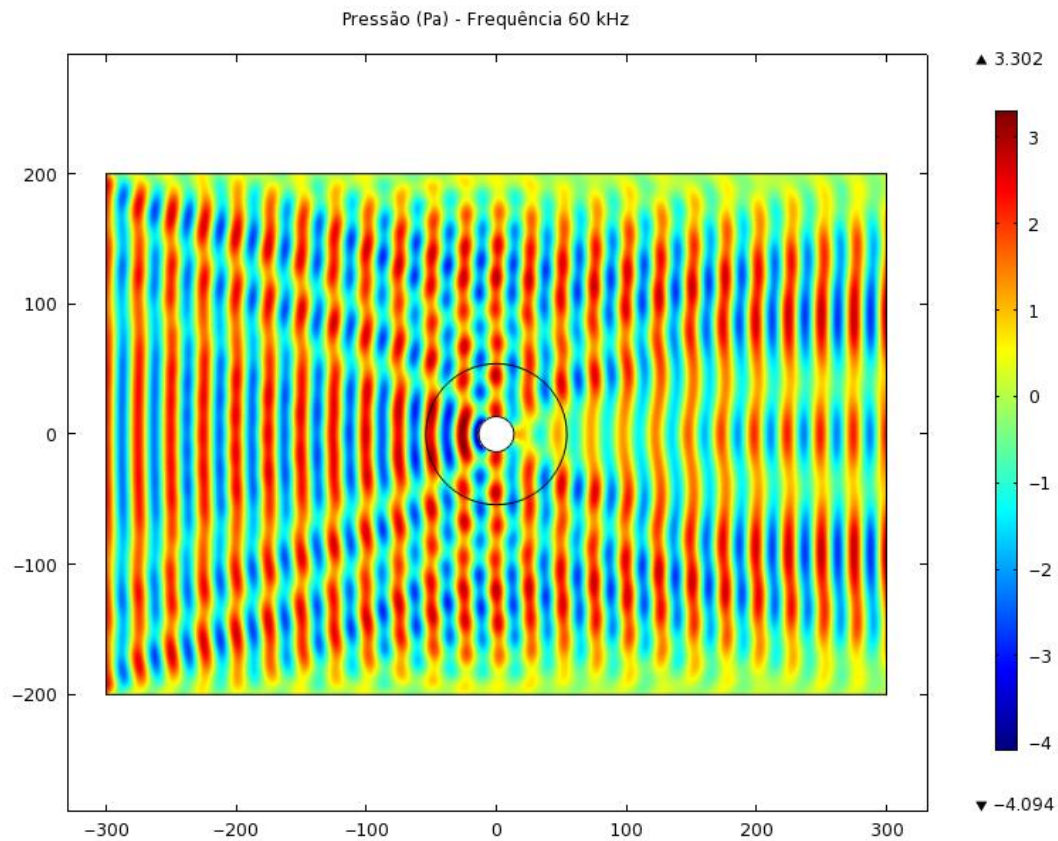


Fig. 3.16 - Campo acústico no módulo matemático devido à onda plana de 60 kHz na presença de um objeto perturbador.

Comparando os resultados mostrados nas figs 3.16 e 3.17, observa-se que o modelo teórico de *cloak* reduziu bastante as alterações do campo acústico decorrentes de um objeto perturbador. Ademais, nota-se claramente como as frentes de onda se alteram para desviar o objeto, evidenciando a capacidade do *cloak* de alterar a propagação das ondas.

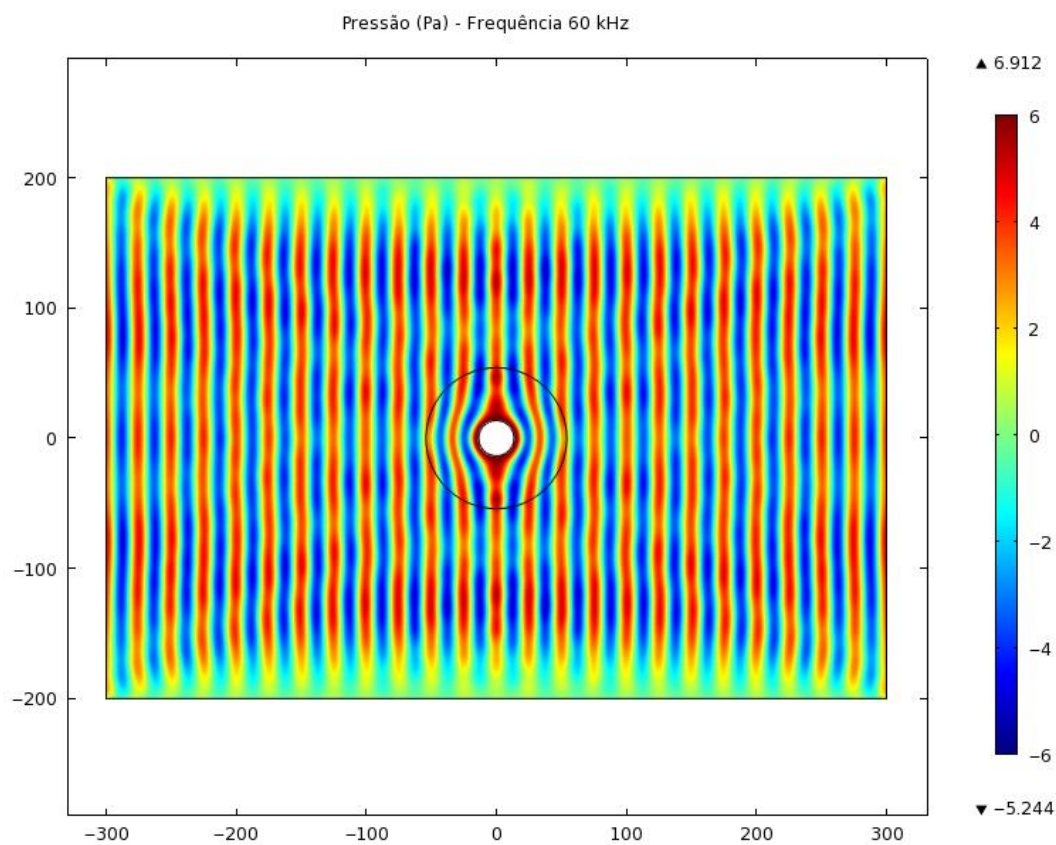


Fig. 3.17 - Campo acústico no módulo matemático devido à onda plana de 60 kHz na presença de um objeto perturbador envolvido por cloak.

4. EXPERIMENTAL

As simulações computacionais da seção anterior permitiram verificar a viabilidade, ao menos teórica, do dispositivo de *cloaking* acústico. A próxima etapa do projeto consiste em conduzir uma série de experimentos e analisar a efetividade de um *cloak* na prática. Dentre os dois tipos de *cloak* acústico abordados durante este trabalho, escolheu-se o *cloak* de Zhang (2010) para os experimentos. O motivo para tal escolha é, basicamente, o material utilizado, no caso um alumínio convencional, ao invés da proposta de cristais sônicos de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008).

4.1 Fabricação do *cloak*

A primeira etapa para a realização dos experimentos é a fabricação do *cloak*. Conforme já explicado anteriormente, a proposta de Zhang (2010) apresenta a vantagem de utilizar um sólido convencional (alumínio) para o dispositivo. No entanto, para a obtenção das propriedades necessárias para o efeito de invisibilidade acústica, são necessários canais e cavidades de dimensões sub-milimétricas. Assim, deve-se escolher cuidadosamente um processo de fabricação capaz de satisfazer os requisitos dimensionais.

Optou-se por fabricar um primeiro protótipo através da técnica de impressão 3D. Basicamente este método consiste na fabricação de sólidos tridimensionais a partir de um modelo digital, ou seja, é possível fabricar a peça desejada a partir de um desenho realizado em um *software* de CAD. Diferente da maioria dos processos de fabricação, a impressão 3D é aditiva, ou seja, o objeto é formado através da adição de sucessivas camadas de material.

Há diferentes métodos de se realizar a impressão 3D, entre eles a estereolitografia. Nesse método, uma resina líquida é colocada em um recipiente dotado de uma plataforma móvel. Para cada etapa do processo, um feixe controlado de raios ultravioleta cura uma camada do material. A plataforma então desce e uma nova camada do sólido pode ser curada. O processo está ilustrado na fig. 4.1.

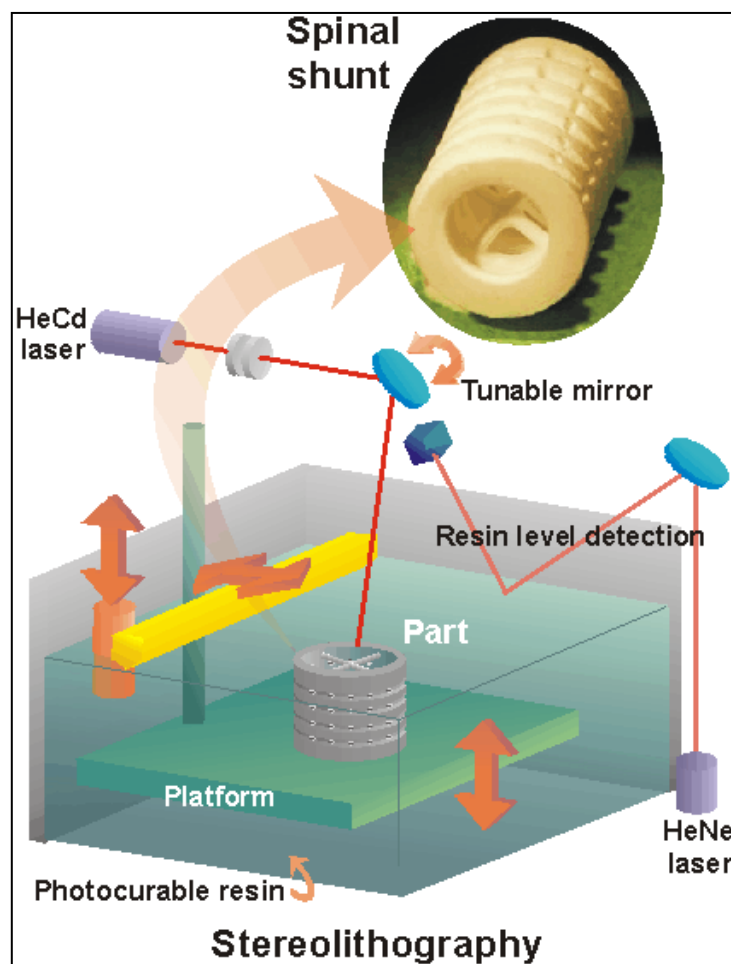


Fig. 4.1 - Processo de impressão 3D por estereolitografia (LEE, 2001).

Para o *cloak* de Zhang (2010) o modelo da peça em CAD foi realizado através do *software Autodesk Inventor*, conforme descrito anteriormente. Através do desenho, a máquina de estereolitografia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) produziu o protótipo mostrado nas fig.4.2 e fig.4.3. O processo de impressão 3D apresenta a vantagem de ser rápido e produzir geometrias complicadas; no entanto, limita-se a fabricar peças de materiais poliméricos. Sendo assim, o protótipo fabricado por impressão 3D não pode ser utilizado para os testes devido às características indesejadas da resina, que absorve água com facilidade, tendo suas dimensões originais alteradas.

Outra característica indesejada do processo de fabricação por impressão 3D é a rugosidade das superfícies. Dada a ordem de grandeza da dimensão dos canais e cavidades, essa rugosidade pode influenciar bastante o comportamento do *cloak*.

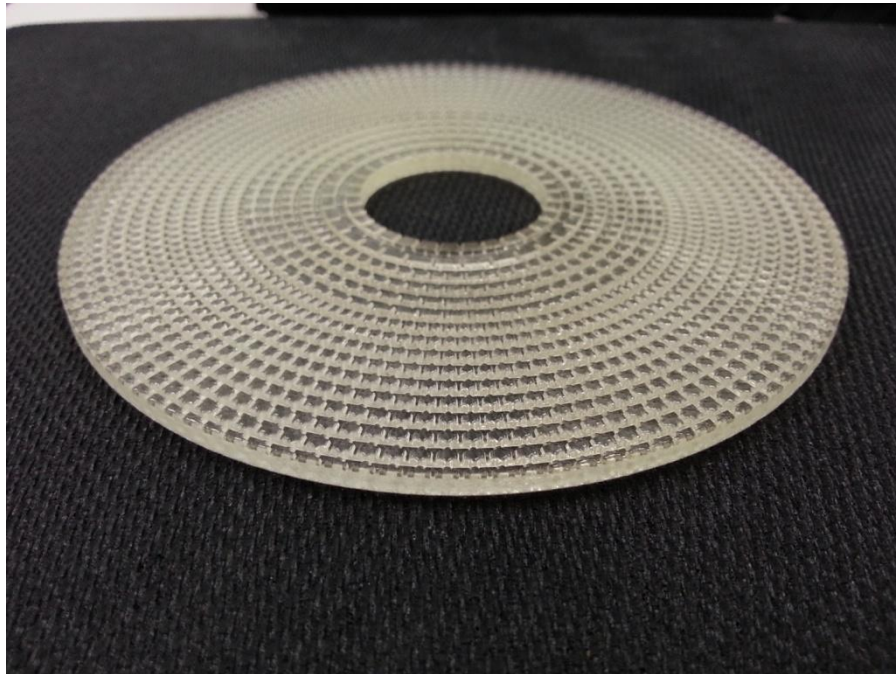


Fig. 4.2 - Protótipo de resina fabricado por estereolitografia.

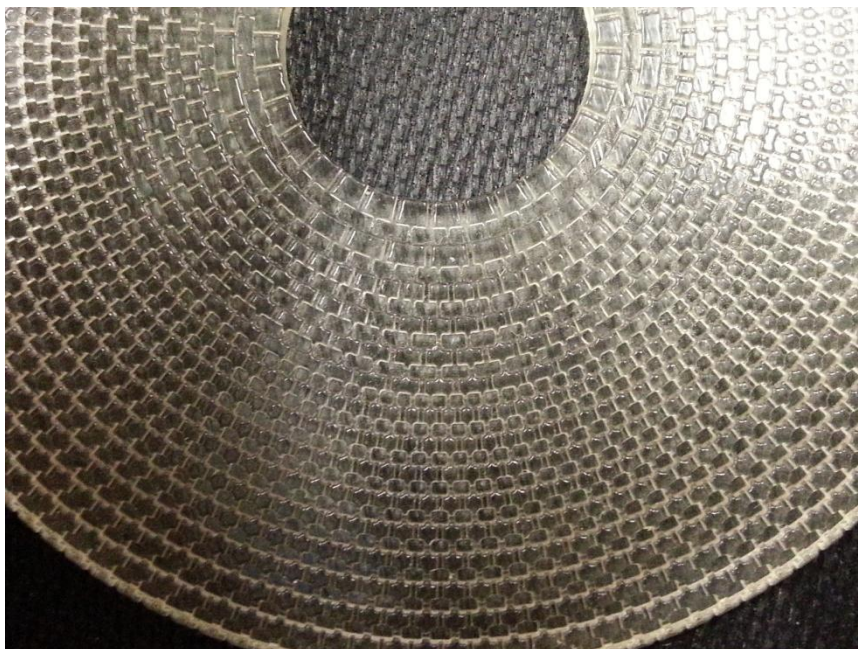


Fig. 4.3 - Detalhe das cavidades e canais do protótipo de resina.

Além dos problemas já mencionados, há outro de caráter teórico relacionado aos fenômenos envolvidos. Conforme explicado em Zhang (2010), um dos requisitos para o material do *cloak* é que haja uma grande diferença de impedância acústica entre o

material do meio e do *cloak*, cerca de onze vezes. A resina do protótipo fabricado por estereolitografia apresenta uma impedância acústica não muito diferente da água.

Sendo assim, buscou-se um processo para a fabricação do protótipo em alumínio e que pudesse ser capaz de reproduzir as dimensões originais. Escolheu-se o microfresamento de topo, que é um processo de usinagem convencional com a utilização de ferramentas de dimensões adequadas. Com base no desenho de CAD, o centro de usinagem DECKEL MAHO DMC 63V da Escola Politécnica (fig. 4.4) usinou os canais e cavidades em uma chapa de alumínio, originando o *cloak* mostrado nas fig. 4.5 e fig. 4.6.



Fig. 4.4 - Fresadora CNC usinando o *cloak* de alumínio.

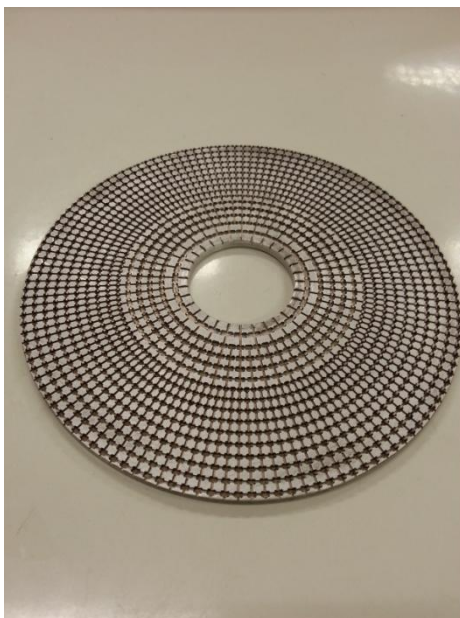


Fig. 4.5 - Protótipo de alumínio fabricado por microfresamento.

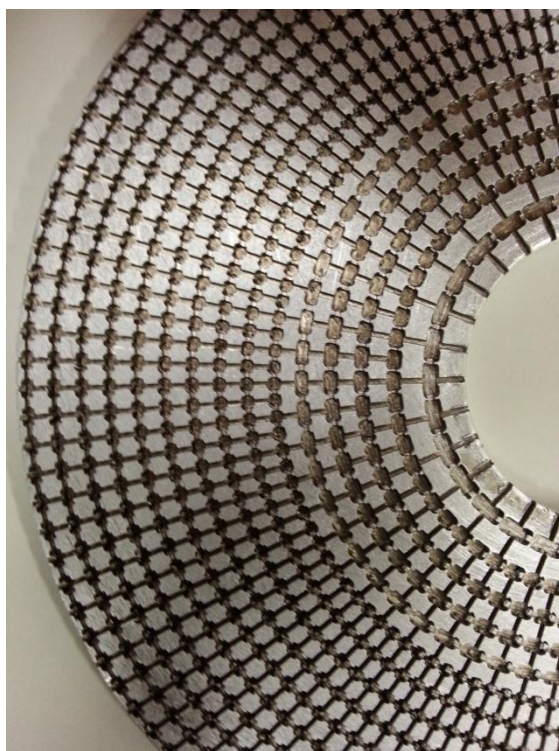


Fig. 4.6 - Detalhe das cavidades e canais do protótipo de alumínio.

4.2 Definição do transdutor

Outra etapa conduzida antes da realização dos experimentos é a definição dos parâmetros do transdutor a ser utilizado. Os testes preliminares realizados no tanque foram feitos com transdutores operando no modo de espessura, ou seja, com a aplicação de tensão elétrica, o transdutor vibra preferencialmente na direção de sua espessura (fig. 4.7a). Assim, a maior parte da energia mecânica é direcionada para o fundo do tanque ao invés da posição do *cloak*. Esse fato, aliado às propriedades do acrílico, faz com que a maior parte da onda de ultrassom se propague pelo fundo do tanque, dificultando a medição do campo acústico na camada de água.

Dessa maneira, uma sugestão para atenuar o problema é utilizar um transdutor que opere em modo radial (fig.4.7b), ou seja, vibre na direção do diâmetro, confinando a maior parte dos efeitos da onda na camada de água.

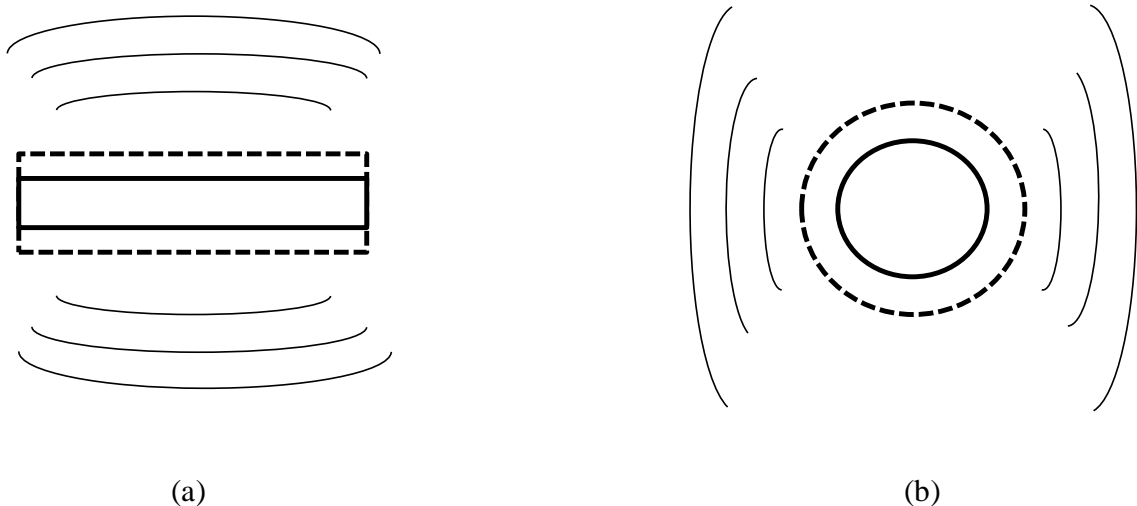


Fig. 4.7 - Modos de vibrar da cerâmica piezoelétrica. **(a)** Cerâmica vibrando em modo de espessura. **(b)** Cerâmica vibrando em modo radial.

Os parâmetros do transdutor que devem ser definidos são a espessura, diâmetro e material da cerâmica piezoelétrica. A determinação desses parâmetros foi realizada com o auxílio dos *softwares* *Ansys* e *MatLab*, conforme detalhamento no Âpendice B. De forma resumida, o procedimento é modelar um disco piezoelétrico de material e

espessura constantes e variar o diâmetro até que a frequência do primeiro modo radial coincida com o desejado, no caso 60 kHz. O *software Ansys* é responsável pela determinação de uma tabela com os dados de impedância elétrica da cerâmica para diferentes valores de frequência, esses dados são posteriormente tratados no *MatLab*, que plota as curvas de impedância em função da frequência para uma dada espessura. O procedimento é repetido iterativamente até que a frequência do primeiro modo radial coincida com 60 kHz.

Para um disco de PZT-5A com 2 mm de espessura, o diâmetro obtido pelo procedimento descrito acima é de aproximadamente 30 mm, conforme detalhado no Apêndice B.

Não houve necessidade de uma etapa de fabricação do transdutor porque o laboratório de ultrassom já contava com um transdutor com parâmetros bastante semelhantes (fig. 4.8), permitindo sua utilização nos experimentos.



Fig. 4.8 - Cerâmica piezoelétrica utilizada nos ensaios.

Após a fabricação do *cloak* e definição do transdutor, pode-se finalmente prosseguir para a etapa de ensaios e medições.

4.3 Ensaios

A metodologia proposta para os ensaios também é semelhante àquela utilizada no trabalho de Zhang (2010). A ideia básica dos experimentos é comparar a distribuição de pressão em três situações de interesse: tanque livre, tanque com objeto perturbador e tanque com objeto perturbador envolvido pelo *cloak*.

Na primeira delas, coloca-se o transdutor no fundo do tanque de acrílico, o qual é preenchido com uma fina camada de água de cerca de 1,5 mm de altura. A fig. 4.9 ilustra esquematicamente uma vista superior do tanque. O transdutor é excitado por um gerador de sinais, produzindo ondas ultrassônicas que se propagam na água. Um hidrofone é afixado a um mecanismo sobre o tanque, capaz de varrer uma região cartesiana. O objetivo é mapear o campo acústico produzido pelo transdutor de ultrassom no tanque com água, teoricamente livre de perturbações.



Fig. 4.9 - Vista superior do aparato experimental para o tanque livre.

Na segunda situação, é realizado o mesmo procedimento para medição do campo, com a diferença que é colocado um objeto perturbador entre o transdutor e o hidrofone (fig. 4.10). Nessa etapa é esperado observar uma distribuição de pressões diferente daquela observada no primeiro caso, devido à presença do objeto perturbador.

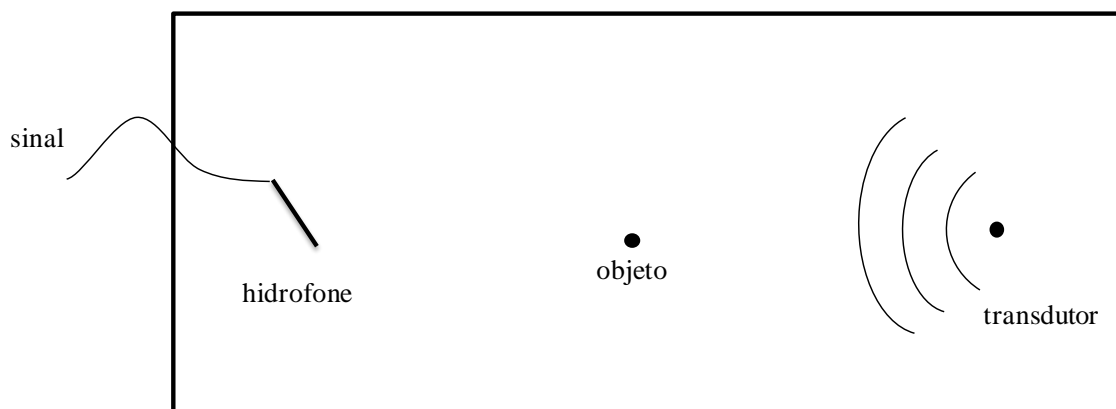


Fig. 4.10 - Vista superior do aparato experimental com a presença de objeto perturbador.

Por fim, o *cloak* é colocado no tanque, de forma a envolver o objeto perturbador, e novas medições do campo acústico são realizadas (fig. 4.11). Espera-se que o campo acústico avaliado nessa situação assemelhe-se àquele avaliado com o tanque livre, ou seja, espera-se que o *cloak* realize sua função efetivamente.

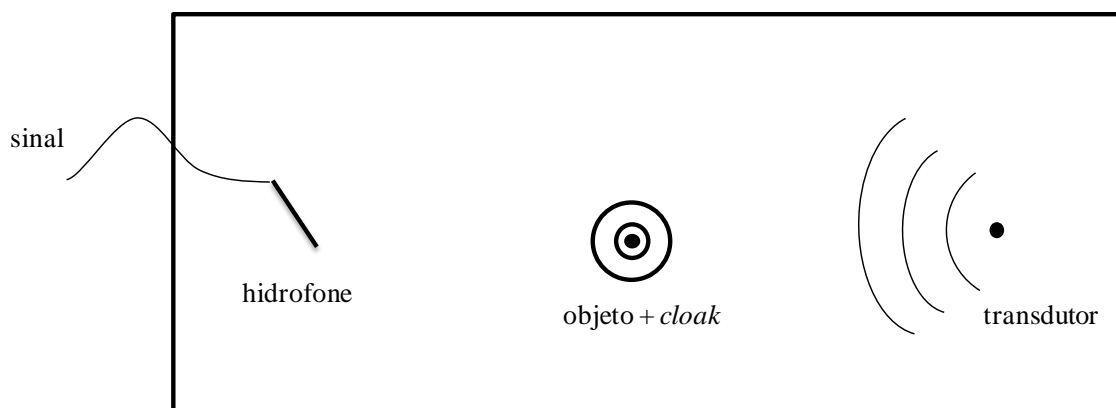


Fig. 4.11 - Vista superior do aparato experimental com a presença de objeto perturbador envolvido pelo cloak.

Para facilitar a compreensão, uma vista em perspectiva da última situação descrita, tanque com a presença do objeto perturbador envolvido pelo *cloak*, está ilustrada na fig. 4.12.

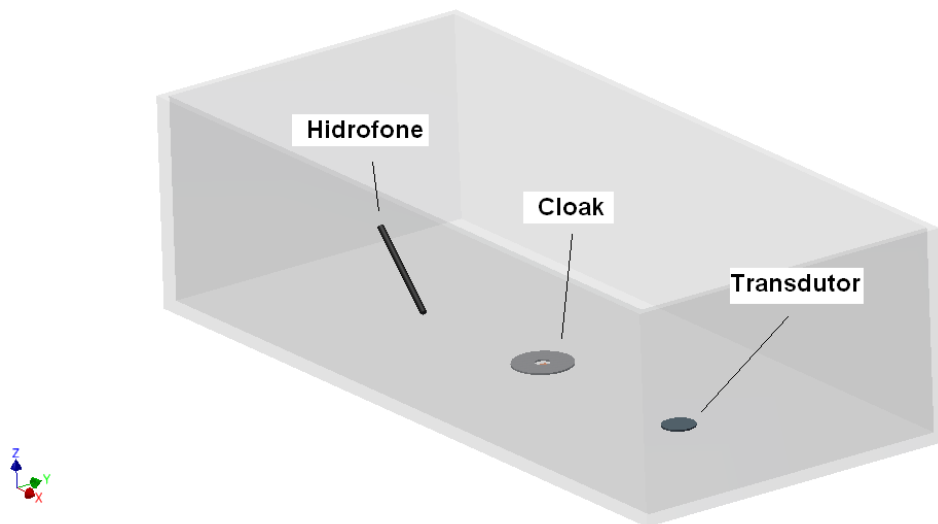


Fig. 4.12 - Experimento realizado diretamente no fundo do tanque.

Cabe agora um detalhamento dos equipamentos utilizados durante os ensaios. Um gerador de funções Agilent 33250A (fig. 4.13) é utilizado para gerar os sinais a serem amplificados e excitar a cerâmica piezoelétrica. É possível gerar diversas configurações para a excitação, das quais três foram propostas. A primeira delas seria utilizar uma excitação contínua em uma frequência bem definida. O problema dessa abordagem são as reflexões geradas nas fronteiras do tanque, que interferem no sinal a ser avaliado. Assim, uma segunda forma seria utilizar um pulso estreito (sinal de banda larga) e realizar a transformada de Fourier do sinal medido, analisando-o apenas nas frequências desejadas; no entanto, a cerâmica utilizada nos experimentos é pouco amortecida, e quando submetida a um pulso elétrico estreito, a resposta observada é um conjunto de pulsos ressonantes dificultando o tratamento dos dados. Assim, a excitação adotada para os experimentos é de 1 a 5 ciclos de senóide na frequência de 60 kHz.



Fig. 4.13 - Gerador de funções.

A cerâmica vibra, propagando as ondas ultrassônicas na água. O equipamento utilizado para captar a pressão sonora e converter em um sinal elétrico é o hidrofone Bruel & Kjaer modelo 8103 (fig. 4.14), que está ligado a um amplificador de sinais Physical Acoustics Corporation 2/4/6C (fig. 4.15).



Fig. 4.14 - Hidrofone.

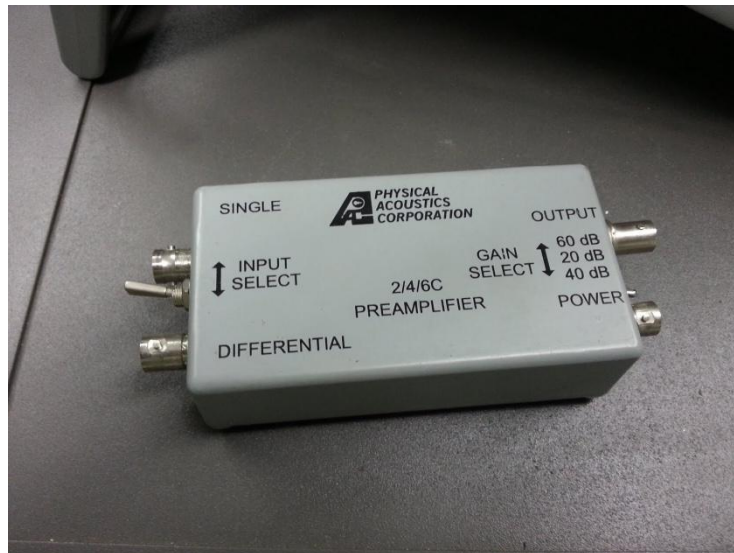


Fig. 4.15 - Amplificador de sinal.

Após a amplificação, o sinal elétrico é enviado a um osciloscópio Agilent DSO5012A, no qual as medidas pertinentes podem ser realizadas (fig. 4.16).

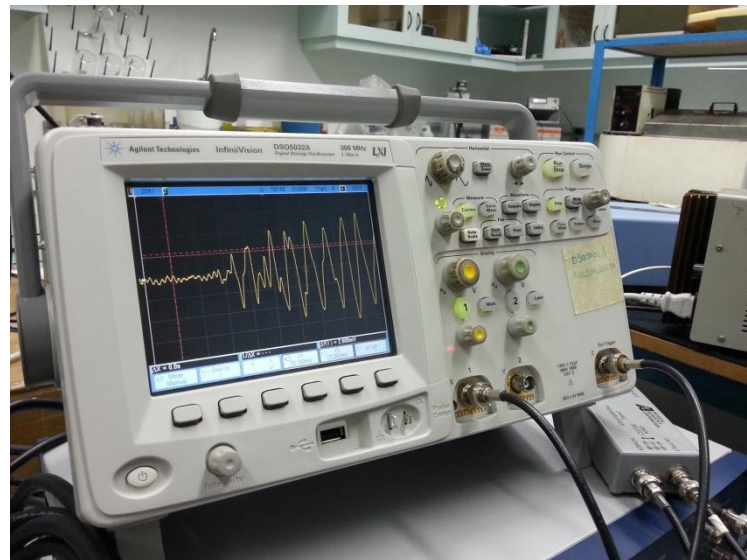


Fig. 4.16 - Sinais observados no osciloscópio.

O hidrofone está afixado a um mecanismo de guias motorizadas (fig. 4.17), capaz de percorrer uma região cartesiana do tanque, o que permite avaliar o campo acústico em diversas posições do tanque.

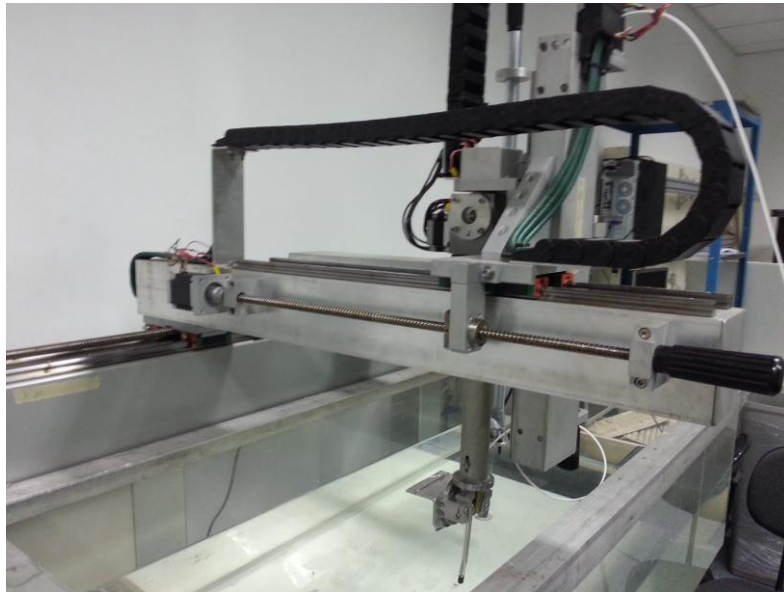


Fig. 4.17 - Mecanismo cartesiano.

As primeiras medições realizadas foram insatisfatórias, grande parte da energia mecânica convertida pela cerâmica parecia não se propagar pela água, sugerindo que as ondas se propagavam pelo acrílico do fundo do tanque. Essa hipótese era embasada pelo fato que, colocando-se uma barreira à frente da cerâmica, o sinal medido pelo hidrofone permanecia inalterado, ou seja, as ondas ultrassônicas se propagavam por outro meio, no caso o acrílico do tanque.

Assim, buscou-se uma solução que confinasse a onda na camada de água. A ideia adotada foi incluir uma pequena mesa metálica ao tanque com a superfície de um material atenuador, por exemplo, uma borracha. Assim, o tanque seria preenchido com água até que a mesa ficasse totalmente imersa e o experimento ficaria reduzido à superfície emborrachada da mesa. Essa nova situação está ilustrada nas fig. 4.18 e fig. 4.19.

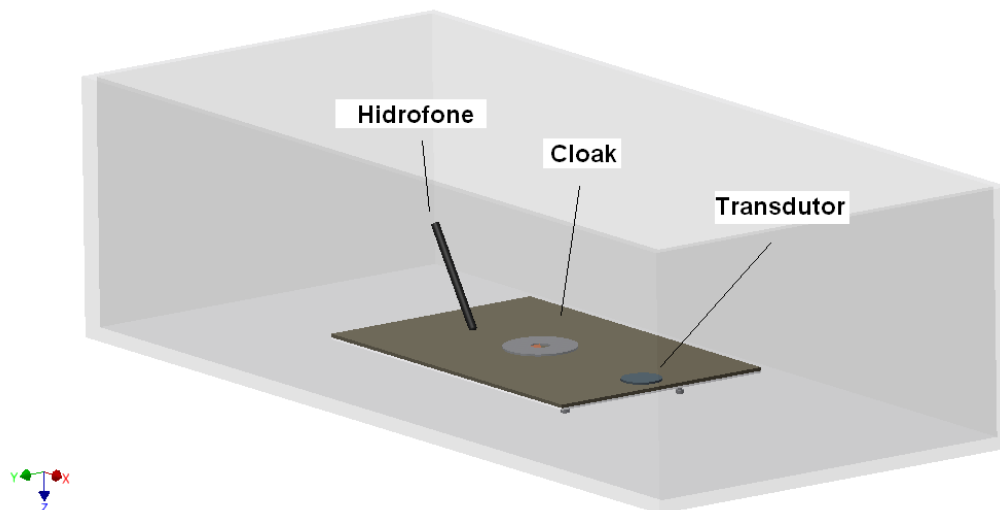


Fig. 4.18 - Experimento realizado sobre a mesa emborrachada.

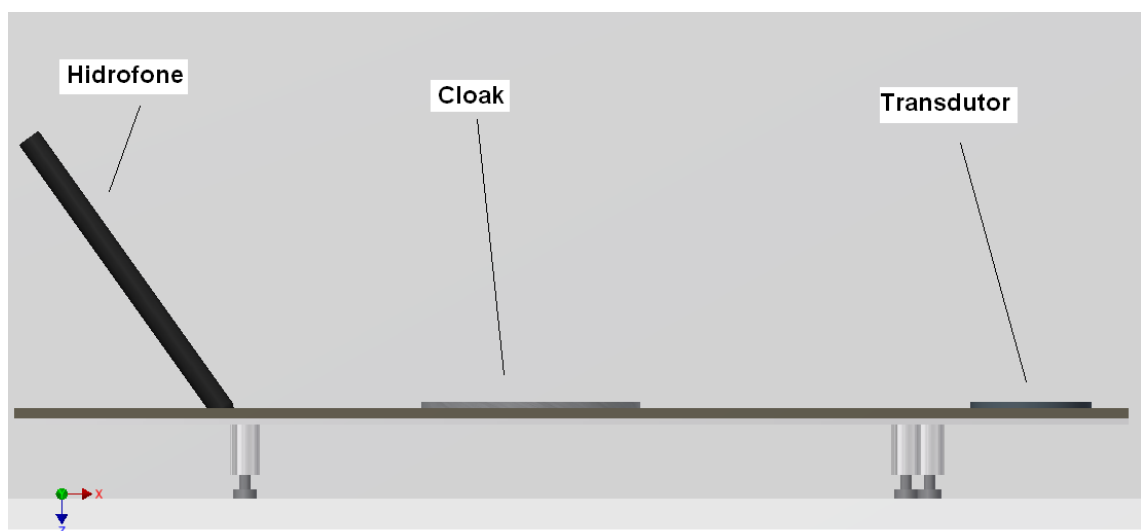


Fig. 4.19 - Vista lateral do aparato sobre a mesa.

Observe que agora, transdutor, *cloak* e hidrofone estão na superfície da mesa ao invés do fundo acrílico do tanque.

A mesa foi fabricada a partir uma chapa de alumínio de 3 mm de espessura, 550 mm de comprimento e 350 mm de largura, dimensões escolhidas de forma a permitir uma região suficiente para colocação do transdutor, objeto, *cloak* e medição da pressão com o hidrofone. A mesa ainda conta com um sistema de ajuste de altura das pernas por meio de parafusos, a fim de compensar eventuais irregularidades do tanque.



Fig. 4.20 - Mesa fabricada para realização dos experimentos no tanque.

Os novos ensaios foram realizados e as primeiras medidas foram, novamente, insatisfatórias. A borracha utilizada não se mostrou eficaz para atenuar frequências da ordem de kHz e ainda era possível observar influência de reflexões nas paredes do tanque.

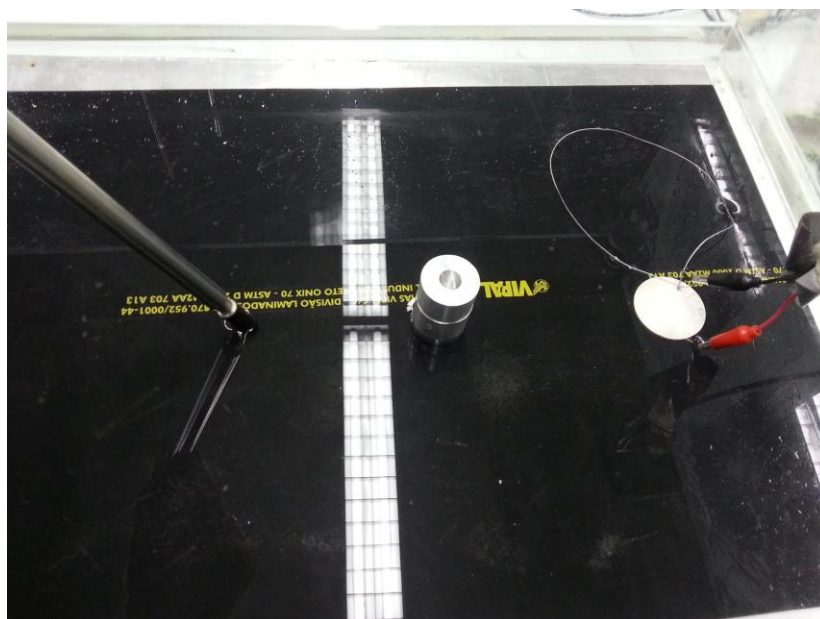


Fig. 4.21 - Ensaio realizado sobre a mesa.

Uma leitura mais atenta do trabalho de Zhang (2010) permite concluir que a fina camada de água para a propagação das ondas estava confinada entre ar e vidro. Foi realizada uma tentativa de reproduzir a configuração do experimento de Zhang (2010); no entanto, não foi possível observar a propagação das ondas na água. Outra tentativa foi realizada substituindo o vidro por alumínio, que possui uma maior diferença de impedância acústica em relação à água, a fim de restringir as ondas à camada de água. No entanto, esse experimento também não se mostrou bem sucedido.

Sendo assim, buscou-se outra alternativa para a realização dos ensaios. A ideia foi manter a cerâmica suspensa, a fim de evitar propagação indesejada devido ao acoplamento com o fundo do tanque ou a borracha da mesa. Em paralelo, o tanque foi substituído por um maior, com o intuito de reduzir os efeitos de reflexão das paredes e fundo do tanque.

A cerâmica foi suspensa com o auxílio de fios de nylon e o hidrofone se manteve afixado ao mecanismo cartesiano. A fig. 4.22 ilustra a situação.

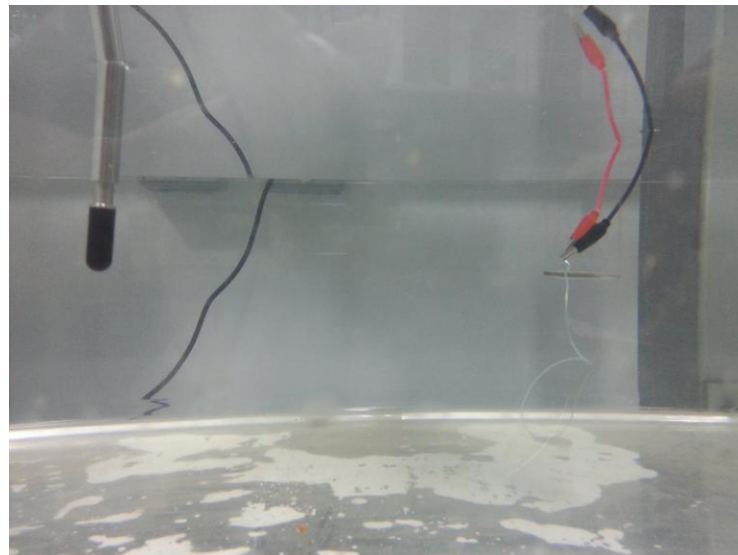


Fig. 4.22 - Experimento suspenso.

Alguns testes preliminares mostraram resultados coerentes com o esperado e menor influência de distúrbios. Assim, procedeu-se à aquisição dos dados para analisar a efetividade do *cloak*.

4.4 Resultados

Considerando um sistema de coordenadas com origem no centro da cerâmica e orientado conforme fig. 4.23, percorreu-se o hidrofone pela região [200; 300] mm em Y e [0,80] mm em X, com passo de 10 mm. Embora na prática seja impossível obter um campo acústico perfeitamente simétrico, a fim de facilitar as medições e análises, os dados foram considerados simétricos em relação ao eixo Y.

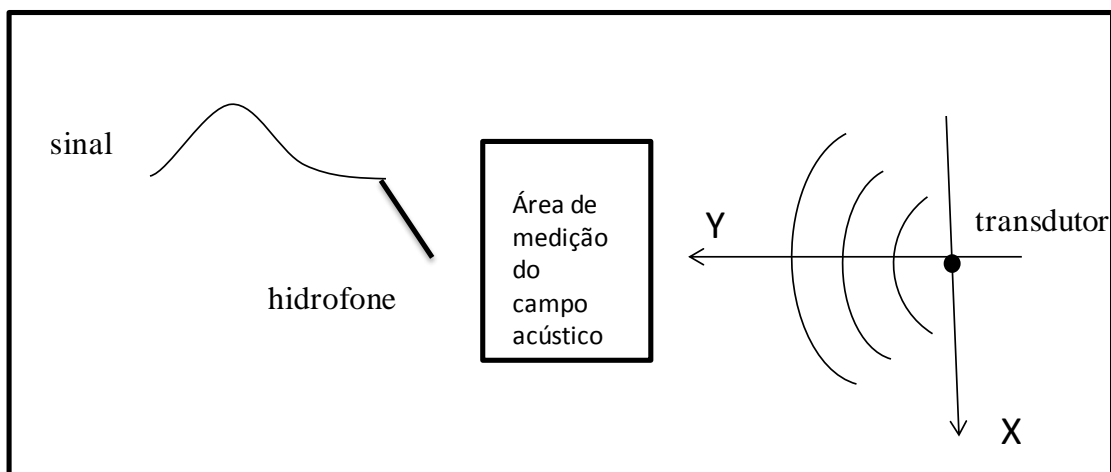


Fig. 4.23 - Metodologia para as medições de pressão.

A cerâmica foi excitada através de um ciclo de senóide de 60 kHz e os dados obtidos do osciloscópio foram anotados e colocados em uma matriz no *software MatLab*, que produziu o resultado mostrado na fig. 4.24. Note que as regiões mais claras apresentam valores de pressão mais elevados. Assim, o resultado obtido é coerente com o esperado pois observa-se que os valores de pressão decaem à medida que a distância à fonte aumenta.

É importante destacar que os valores apresentados no gráfico não tem sentido absoluto pois o hidrofone utilizado não estava devidamente calibrado devido a dificuldades experimentais. Ainda assim, a comparação entre os valores permite avaliar o campo acústico.

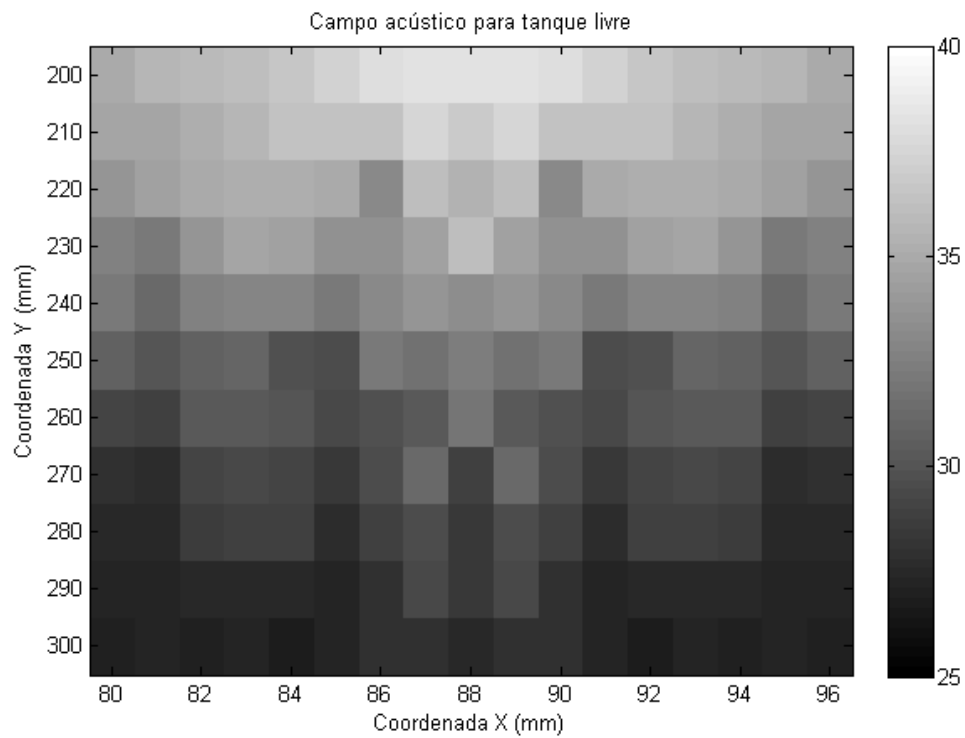


Fig. 4.24 - Pressão avaliada para tanque livre.

Colocando-se o objeto perturbador entre a fonte e o hidrofone (fig 4.25) e mantendo a mesma metodologia de medição, obtém-se o resultado da fig. 4. 26.

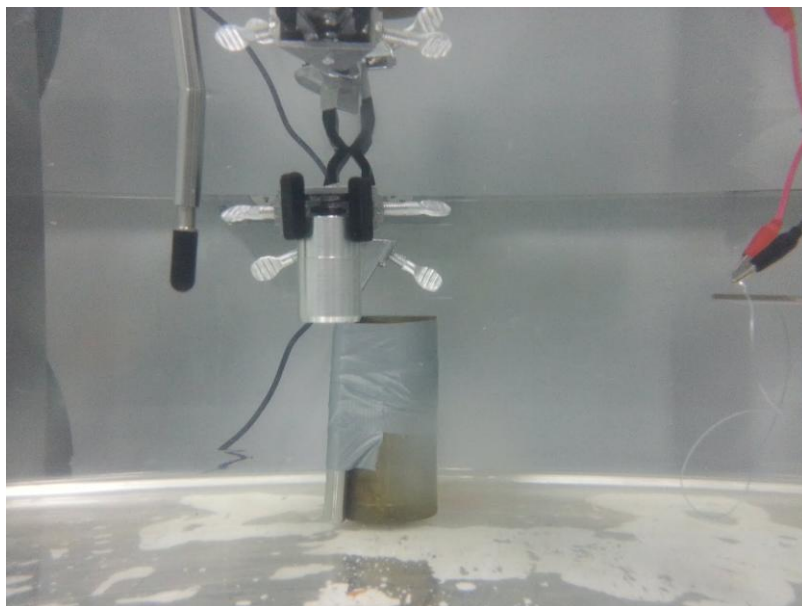


Fig. 4.25 - Ensaio com a objeto perturbador.

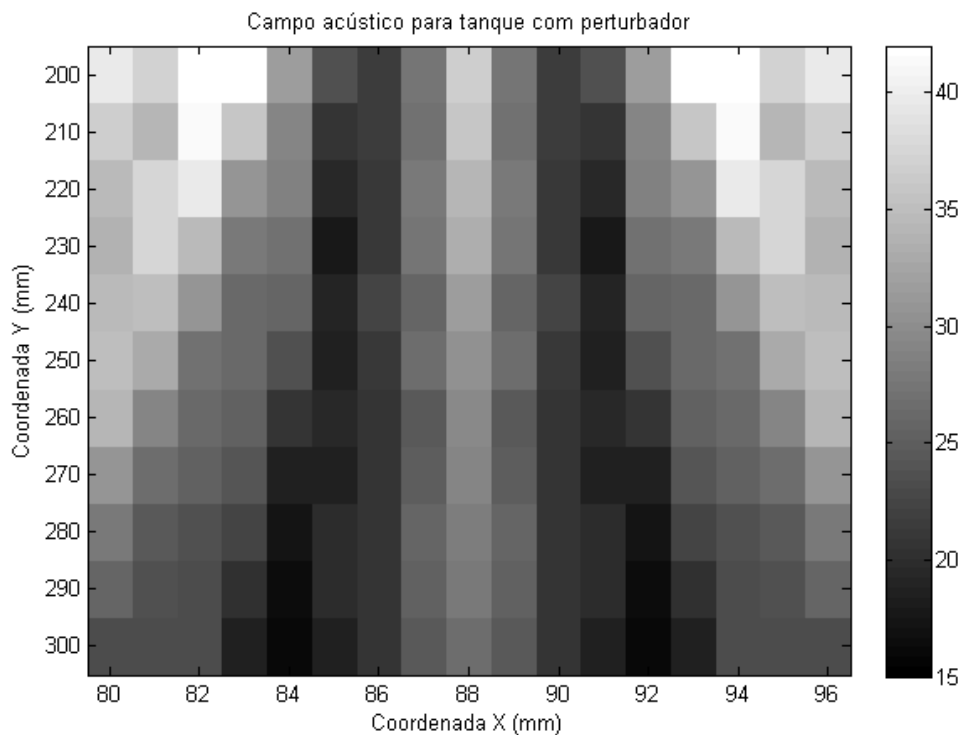


Fig. 4.26 - Pressão avaliada na presença do objeto perturbador.

Observe que o resultado da fig. 4.26 mostra uma região de baixa pressão atrás do objeto e algumas faixas de alta pressão, conforme era esperado das simulações computacionais. Assim, o objetivo do próximo ensaio é avaliar se, ao envolver o objeto perturbador com o *cloak* acústico, o campo de pressões se aproxima do original. Essa última configuração está ilustrada nas fig. 4.27 e 4.28.

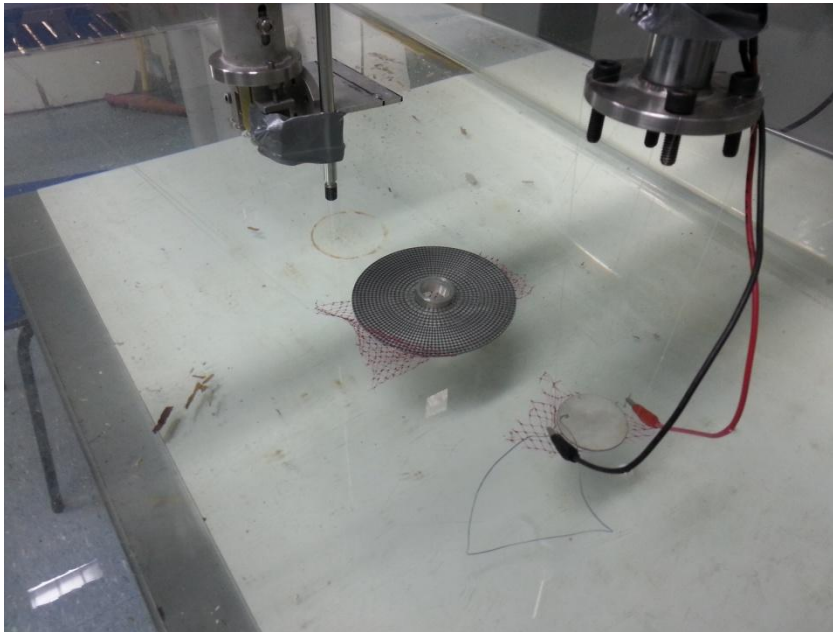


Fig. 4.27- Ensaio com *cloak* envolvendo objeto perturbador.

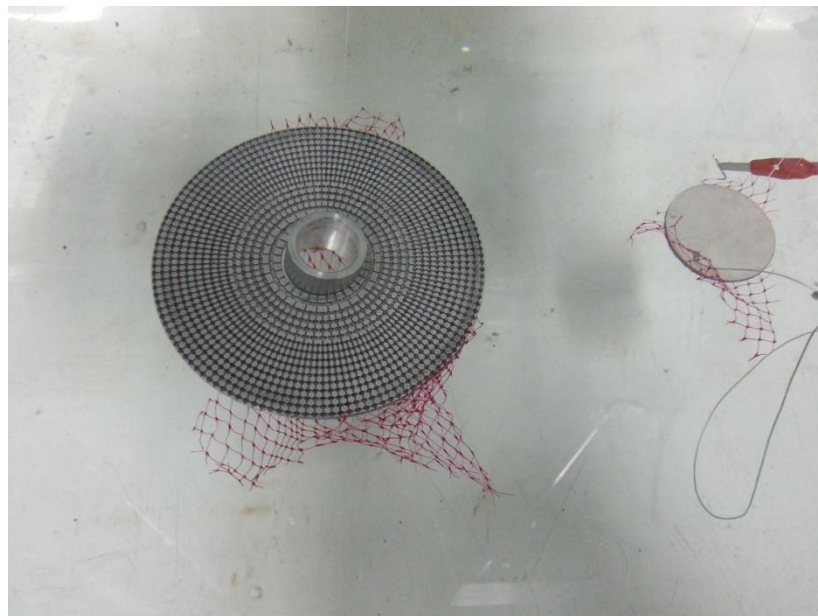


Fig. 4.28 - Detalhe do ensaio com *cloak*.

O campo de pressões avaliado na presença do objeto envolvido pelo *cloak* está ilustrado na fig. 4.29. Observa-se uma grande queda de pressão ao longo de todo o domínio de medição. Além disso, observa-se a formação de algumas faixas alternadas de maiores e menores pressões, típicas da presença de objetos perturbadores no meio; ou seja, o campo não se assemelha àquele observado para tanque livre.

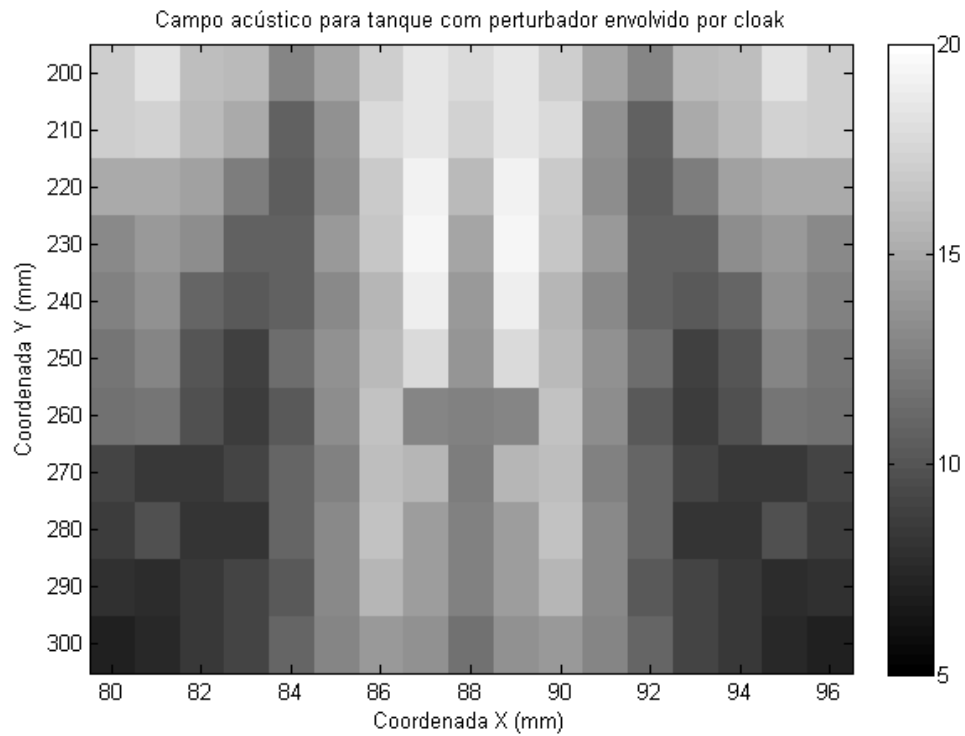


Fig. 4.29 - Campo acústico para objeto envolvido pelo *cloak*.

Assim, não foi possível observar a efetividade do *cloak* nos ensaios realizados. Isso pode ser atribuído à dificuldade de realizar um experimento capaz de eliminar os distúrbios oriundos de reflexões e manter as ondas ultrassônicas confinadas em uma estreita camada de água, situação para a qual o *cloak* foi projetado.

5. CONCLUSÕES

Diversos trabalhos recentes têm sido dedicados a analisar o fenômeno de *cloaking* e sua viabilidade prática, dentre eles estão os focados a estudar o *cloak* acústico, que consiste em um dispositivo capaz de tornar um objeto ou região do espaço invisível ao som.

No presente trabalho foram analisadas duas propostas de *cloak*: a de Torrent e Sánchez-Dehesa (2008) e a de Zhang (2010). Através de simulações bidimensionais no *software Comsol Multiphysics* foi possível verificar a viabilidade teórica da proposta de Torrent-Sánchez-Dehesa. Para o modelo de Zhang (2010) não foi possível verificar o efeito de *cloaking* para o modelo com a geometria prescrita devido aos efeitos tridimensionais do dispositivo, mas através das equações das propriedades efetivas do *cloak*, o mesmo se mostrou eficaz na frequência esperada.

Para as etapas experimentais foi escolhida a proposta de *cloak* de Zhang (2010) devido, basicamente, ao material utilizado e à possibilidade de fabricação com métodos convencionais. Após uma série de tentativas e adaptações no laboratório de ultrassom montou-se um aparato para verificar o funcionamento do *cloak* acústico na prática. Devido à grande quantidade de dificuldades experimentais para se realizar ensaios que se aproximem da teoria para a qual o *cloak* foi projetado, não foi possível observar o efeito de *cloaking* acústico, muito embora isso não signifique que o *cloak* proposto por Zhang (2010) não seja funcional. Assim, não foi possível obter conclusões acerca do funcionamento prático do *cloak* acústico.

6. REFERÊNCIAS

CUMMER, S. A.; SCHURIG, D. **One path to acoustic cloaking.** *New Journal of Physics*, Vol. 9, pp 45. (2007)

GUENNEAU S.; AMRA C.; VEYNANTE D. **Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux.** *Optics Express*, Vol. 20, Issue 7, pp. 8207 – 8218. (2012).

JACOB, Z.; ALEKSEYEV L. V.; NARIMANOV E. **Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit.** *Optics Express*, Vol. 14, Issue 18, pp. 8247-8256. (2006).

LEE, J. H. **Ceramic/polymer composite materials through stereolithography** (2001). Disponível em < <http://www.princeton.edu/~cml/html/research/stereolithography.html>>. Data de acesso: 08 de Novembro de 2012.

LI J.; FOK L.; YIN X.; BARTAL G.; ZHANG X. **Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens.** *Nature Materials*, Vol. 8, pp 931 – 934. (2009).

MILTON, G. W.; BRIANE M.; WILLIS J.R. **On cloaking for elasticity and physical equations with a transformation invariant form.** *New Journal of Physics*, Vol. 8, pp. 248. (2006).

PENDRY J. B.; SCHURIG D.; SMITH D. R. **Controlling Electromagnetic Fields.** *Science*, Vol. 312 , pp.1780 – 1782. (2006).

SCHURIG , D.; MOCK, J. J.; JUSTICE B. J.; CUMMER, S. A.; PENDRY, J.B.; STARR, A.F.; SMITH, D. R. **Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies.** *Science* 314, pp. 977 – 980. (2006).

TORRENT. D.; SÁNCHEZ-DEHESA J.; **Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach.** *New Journal of Physics*, Vol. 10. (2008).

VESELAGO, V. G. **The eletrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ .** *Sov Phys Uspekhi*, Vol 10 (4), 509-514. (1968).

ZHANG, S. **Acoustic metamaterial design and applications.** Tese de doutorado. University of Illinois at Urbana-Champaign. (2010).

ZHANG, S.; XIA, C.; FANG, N. **Broadband acoustic *cloak* for ultrasound waves.** *Physical Review Letters* 106, 024301 (2011).

APÊNDICE A – SIMULAÇÕES COM O *COMSOL MULTIPHYSICS*

Pelas razões já explicadas em seções anteriores, o *software* escolhido para realizar as simulações foi o *Comsol Multiphysics*. Este software comercial permite a simulação de um grande número de problemas de diversas naturezas. Esta seção se dedica a uma visão geral do programa.

A primeira opção a ser escolhida no programa é a dimensão do problema a ser simulado; ou seja, 1D, 2D ou 3D, incluindo condições de simetria se necessário. A segunda opção se refere à física do problema envolvido. O programa oferece uma lista contendo, por exemplo, módulos de eletricidade, acústica, escoamento de fluidos, transferência de calor. Há subdivisões que, no caso do módulo acústico, permitem resolver problemas transientes, interação acústica com estruturas, escoamento potencial compressível, entre outros. Por fim, deve-se escolher o tipo de estudo a ser realizado, como um estudo no domínio da frequência.

Conforme explicado ao longo deste trabalho, foram utilizadas basicamente duas configurações do *Comsol Multiphysics* para as simulações. A primeira se trata de problemas acústicos bidimensionais no domínio da frequência, enquanto a segunda é constituída de um módulo matemático no domínio bidimensional.

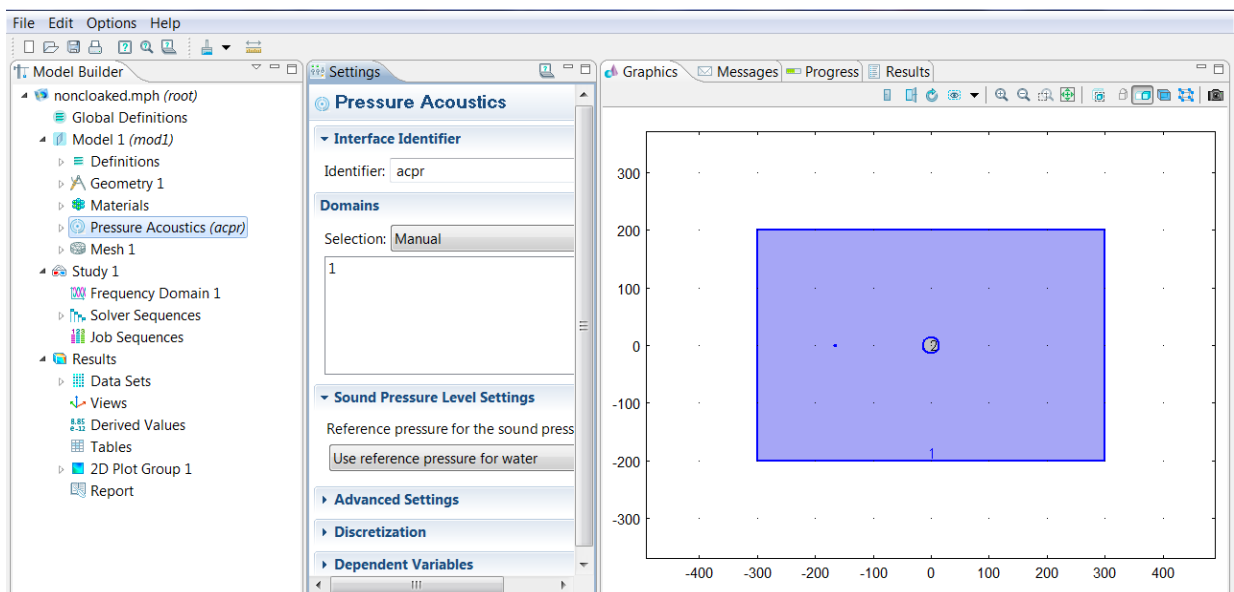


Fig. A 1 - Visão geral da interface do software *Comsol Multiphysics*.

- Módulo acústico

Para a resolução de problemas acústicos, o *Comsol Multiphysics* conta com uma grande quantidade de ambientes pré-configurados, dos quais o utilizado para as simulações deste trabalho foi o *Pressure Acoustics*. Quanto ao tipo de estudo realizado, foram resolvidos problemas no domínio da frequência (*Frequency Domain*).

Após essas pré-definições básicas, é necessário criar ou importar uma geometria para o modelo. Em alguns casos, os modelos foram desenhados diretamente pelos comandos contidos em *Geometry*. No entanto, para geometrias mais complicadas, o uso do *Comsol Multiphysics* não é mais vantajoso, o que leva à necessidade de utilização de um *software* de CAD, conforme descrito no Apêndice A. Um formato compatível e aceito pelos *softwares* de CAD e simulação é o *DXF*.

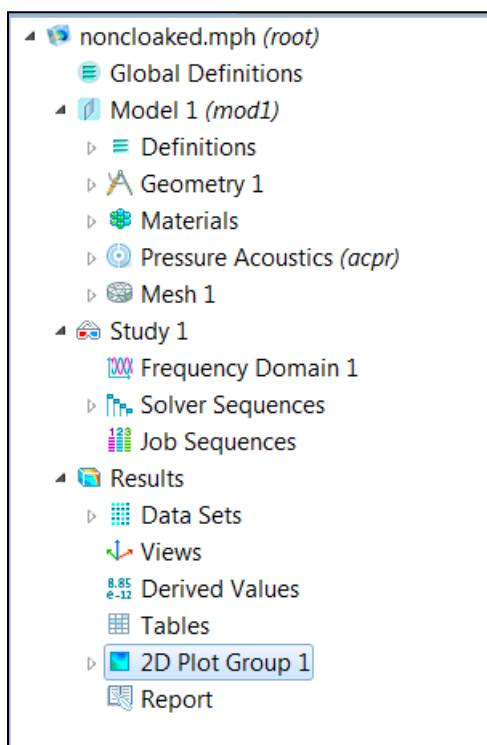


Fig. A 2 - Detalhe do menu principal do *Comsol Multiphysics*.

Definida a geometria do modelo, é necessário fornecer ao programa quais os materiais que constituem o modelo. Há uma vasta lista de materiais previamente definidos na seção *Materials*. Ainda assim, o usuário pode definir manualmente as

propriedades dos materiais através de constantes ou mesmo expressões algébricas. A única incapacidade do módulo acústico quanto aos materiais reside na impossibilidade de definir materiais anisotrópicos.

O nó principal da interface do programa, *Pressure Acoustics*, permite definir as condições de contorno e iniciais para o problema. Para as fronteiras do domínio, foi utilizada a condição de *Plane Wave Radiation*, que simula um meio infinito. Para a fronteira do objeto perturbador, foi utilizada a condição de *Sound Hard Boundary*, que simula um objeto perfeitamente rígido. Por fim, quanto à fonte emissora, foram utilizados os casos de emissor pontual (*Power Point Source*) e onda plana (*Incident Pressure Field*).

O nó *Mesh* permite a definição do tipo, tamanho e ordenação dos elementos utilizados no MEF. Foram utilizados elementos triangulares com discretização variável, dependendo do domínio considerado.

Após isso, pode-se alterar parâmetros dos algoritmos numéricos utilizados em *Study*; os resultados podem ser visto em diversos tipos de gráficos, sendo que no presente trabalho foram utilizados gráficos bidimensionais do tipo *Surface*. Além disso, o pós-processamento dos dados também inclui a exportação dos dados, a criação de tabelas, entre outras utilidades.

- Módulo matemático

Apesar do grande número de utilidades do módulo acústico, a incapacidade de definir materiais anisotrópicos levou a necessidade de um modelo mais teórico, onde não há um fenômeno físico pré-definido, mas sim equações parciais diferenciais.

O procedimento para simulação é muito semelhante ao descrito para o módulo acústico, com a diferença que, ao invés do nó *Pressure Acoustics*, há um nó chamado *PDE*, do inglês, equações diferenciais parciais.

A fig. A3 mostra o aspecto da janela de definição dos parâmetros da equação utilizada, no caso Helmholtz.

▼ Equation

$$\nabla \cdot (-c \nabla u) + au = f$$

▼ Diffusion Coefficient

c	c11/c11	c12/c11
	c21/c11	c22/c11

Anisotropic ▼

▼ Source Term

f 0

▼ Absorption Coefficient

a $-(w^2)/(\beta \cdot c11)$

Fig. A 3 - Detalhe da janela de equação do módulo matemático do *Comsol Multiphysics*.

APÊNDICE B – DEFINIÇÃO DO TRANSDUTOR

Conforme notado durante testes preliminares, a utilização de um transdutor de ultrassom operando em modo radial seria mais interessante para a realização dos experimentos. Para determinar as dimensões necessárias, assim como o material da cerâmica piezoelétrica, foram utilizados os *softwares* Ansys e MatLab.

A ideia básica utilizada foi fixar a espessura da cerâmica em 2 mm e escolher o material como PZT-5A, variando-se o diâmetro até que o primeiro modo radial de vibrar ocorra em 60 kHz. Para se determinar os modos de vibrar de um disco piezoelétrico, pode-se observar os pontos de mínimo em uma curva de impedância elétrica em função da frequência. Uma curva típica, conforme a mostrada na fig. B1, contém diversos modos de vibrar da cerâmica, sendo os dois mais importantes os modos de espessura e radial.

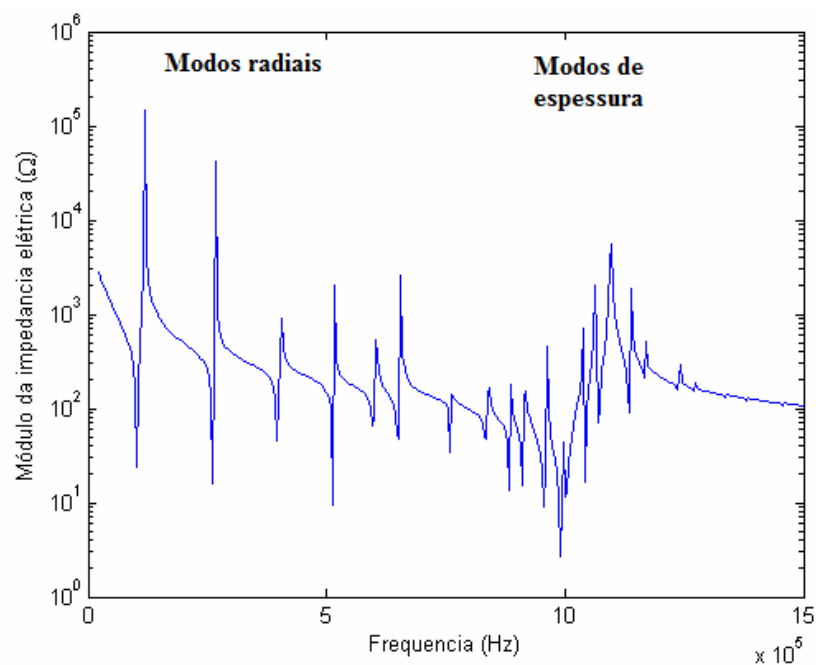


Fig. B 1 - Exemplo de curva de impedância elétrica em função da frequência.

Os primeiros modos que aparecem são os radiais; assim, para determinar o primeiro modo radial, basta observar a frequência em que o primeiro mínimo da curva ocorre. No entanto, a posição dos mínimos da curva de impedância varia em função da geometria do disco. Dessa forma, deve-se realizar um procedimento iterativo para determinar o diâmetro do disco que faz com que o primeiro modo radial ocorra em 60 kHz.

O *Ansys* é um *software* bastante consagrado para análise e simulação de problemas de engenharia, com ele é possível determinar os dados que relacionam impedância elétrica com frequência a partir das propriedades do material e da geometria. De posse desses dados, o *MatLab* fornece uma interface simples para plotar as curvas de impedância elétrica em função da frequência de excitação.

O primeiro passo a ser realizado no *Ansys* é definir o tipo de elemento a ser utilizado no MEF. Para um disco circular, o problema é axi-simétrico e, portanto, pode-se definir elementos bidimensionais com simetria axial. Após isso, é necessário definir as propriedades do material piezoelétrico, ou seja, o programa deve receber a matriz de constantes elásticas, de coeficientes piezoelétricos e constantes dielétricas, além da densidade e amortecimento da cerâmica.

Para o caso do PZT-5A as propriedades mecânicas e elétricas foram as seguintes.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 12,5 & 7,52 & 7,54 & 0 & 0 & 0 \\ 7,52 & 11,1 & 7,52 & 0 & 0 & 0 \\ 7,54 & 7,52 & 12,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,48 \end{bmatrix} 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12,3 & 0 & 0 \\ -5,4 & -5,4 & 15,8 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ C/m}^2$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} 8,1066 & 0 & 0 \\ 0 & 7,3455 & 0 \\ 0 & 0 & 8,1066 \end{bmatrix} 10^{-9} \text{ F/m}$$

onde \mathbf{C} é a matriz de constantes elásticas, \mathbf{e} é a matriz de coeficientes piezoelétricos e $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a matriz de constantes dielétricas.

Além disso, para a densidade (ρ) da cerâmica e amortecimento (β) foram utilizados valores de 7650 kg/m^3 e $3,54\text{e-}8$, respectivamente.

Determinados o elemento e material, o próximo passo consiste em especificar a geometria do problema, no caso, o disco de cerâmica pode ser modelado como um retângulo de elementos axi-simétricos, com espessura de 2 mm e diâmetro a ser definido. A fig. B2 ilustra o disco modelado em *Ansys* com a malha de elementos finitos já estabelecida.

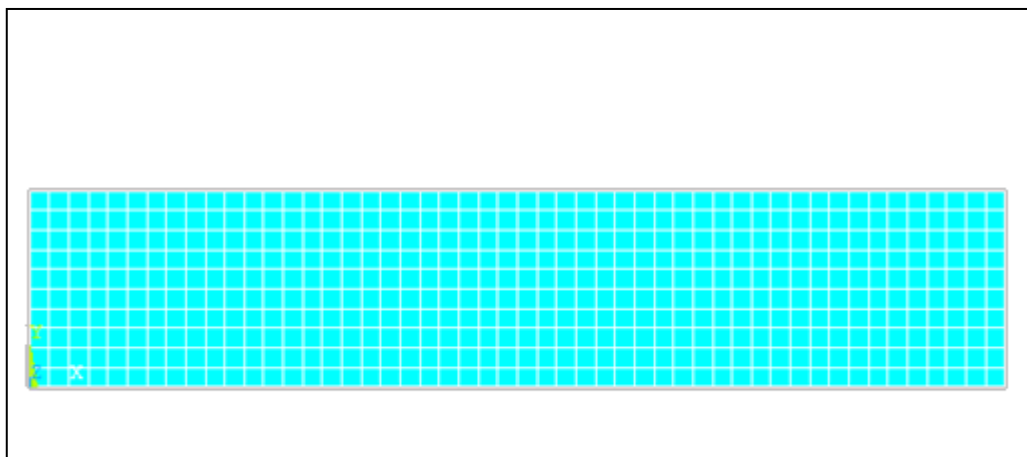


Fig. B 2 - Geometria e malha do disco cerâmico modelado no Ansys.

\

Deve-se então determinar as condições de contorno do problema, no caso são os potenciais elétricos nas faces do disco. Acoplando-se todos os nós da face superior, conforme fig.B3, define-se um potencial para a face, por exemplo 1 V. Para a outra face da cerâmica, o procedimento deve ser repetido e define-se o potencial de 0 V.

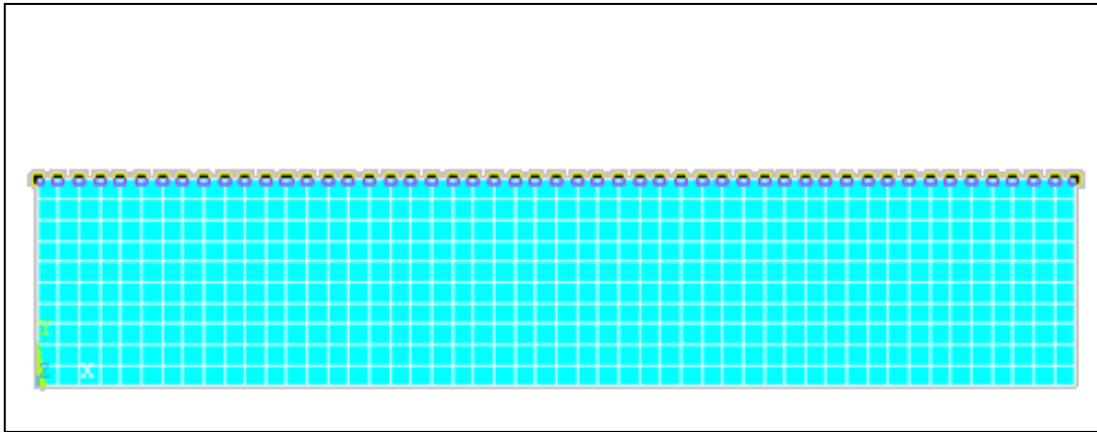


Fig. B 3 - Aplicação da condição de contorno a uma das faces do disco.

A próxima etapa consiste em especificar o tipo de análise para o problema. Para a determinação da curva de impedância, o interesse é em análise harmônica. Foi escolhida como frequência inicial o valor de 1 kHz, que é suficientemente baixo e cerca de 400 passos até a frequência de 400 kHz.

O pós-processamento do *software Ansys* é capaz de fornecer um grande número de informações do modelo físico em estudo. No entanto, para o caso de uma cerâmica piezoelétrica vibrando, o *Ansys* fornece a carga elétrica e não diretamente a impedância. Daí a importância do *MatLab*, no qual é realizado um tratamento dos dados a fim de se obter a impedância elétrica da cerâmica em função da frequência.

Os dados de carga elétrica fornecidos pelo *Ansys* podem ser salvos em um arquivo de texto e importados para o *MatLab*. O breve código utilizado está mostrado a seguir.

```
load dados.txt
freq = dados(:,1);
carga = dados(:,2) + 1i*dados(:,3);
corrente = -1i*(2*pi*freq).*carga;
Z = 1./corrente;
semilogy(freq,abs(Z));
xlabel('Frequencia (Hz)')
ylabel('Modulo da impedancia eletrica (\Omega)')
title('Impedância elétrica X frequência para D = 20 mm');
grid;
```

Esse código importa um arquivo de texto de nome “dados” gerado pelo *Ansys* e determina a impedância elétrica a partir da carga elétrica. Por fim, os novos dados são colocados na forma de gráfico. Um exemplo da curva de impedância em função da frequência gerada em *MatLab* está ilustrado na fig. B4.

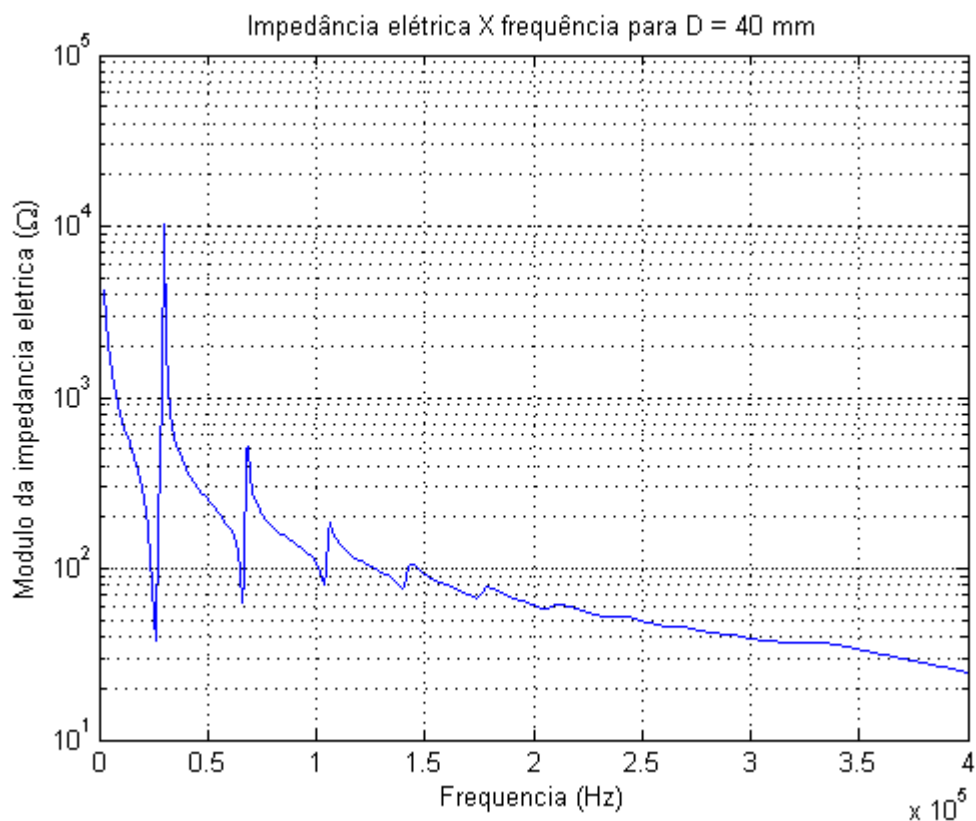


Fig. B 4 - Curva de impedância elétrica em função da frequência para cerâmica de PZT-5A com diâmetro de 40 mm.

É possível observar que o primeiro modo radial não coincide com 60 kHz. Sendo assim, deve-se repetir todo o procedimento descrito nesse apêndice até que se obtenha o comportamento desejado.

Outra observação importante é que, devido ao maior valor de amortecimento do PZT-5A, não é possível visualizar os modos de espessura na fig.B4.

Após algumas iterações, concluiu-se que um disco de PZT-5A de 2mm de espessura e diâmetro de, aproximadamente, 30 mm vibra radialmente no primeiro modo em uma frequência próxima a 60 kHz.