

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia Elétrica e de
Computação**

**ESTUDO DO CAMPO ACÚSTICO GERADO
DENTRO DE UM TANQUE OCTOGONAL**

Victor Henrique Zani

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Dias Maciel

São Carlos

2016

VICTOR HENRIQUE ZANI

**ESTUDO DO CAMPO ACÚSTICO GERADO
DENTRO DE UM TANQUE OCTOGONAL**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Eletrônica
ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Dias Maciel

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Z31e Zani, Victor Henrique
ESTUDO DO CAMPO ACÚSTICO GERADO DENTRO DE UM TANQUE
OCTOGONAL / Victor Henrique Zani; orientador Dr.
Carlos Dias Maciel. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Mapeamento do campo acústico. 2. Cerâmica. 3.
Tanque octogonal. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Victor Henrique Zani

Título: "Estudo do campo acústico gerado dentro de um tanque de sonoluminescência"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 16/10/2016,

com NOTA 6,0 (seis, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Carlos Dias Maciel - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Mestre Michel Bessani - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Mestre Tadeu Junior Gross - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais que me deram condições de estudar e assim conseguir concluir meu curso na USP, agradeço aos meus amigos que me ajudaram neste caminho de grandes desafios, agradeço ao professor Dr. Carlos Dias Maciel pela orientação e pelos conselhos. Agradeço também a todos os funcionários e corpo docente da USP pelos ensinamentos ao longo deste caminho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVO.....	15
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1 O tanque octogonal	24
4.2 Hidrofone Pontual.....	25
4.3 Aquisição do Sinal	26
5 RESULTADOS	31
5.1 Caracterização das Cerâmicas	31
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	40
7 CONCLUSÃO	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Expansão e compressão da bolha de ar no fenômeno da sonoluminescência.	12
Figura 2 Diferença de potencial ocasionada pela deformação do cristal.....	13
Figura 3 Modelo molecular simples para explicar o efeito piezoelétrico: a) molécula sem deformação; b) molécula sujeita a uma força; e c) efeito de polarização na superfície do material.	14
Figura 4 Geometria utilizada para estudar as características de radiação de um pistão plano.....	16
Figura 5 Representação da magnitude da amplitude da pressão acústica em função de r. Adaptado de [11].....	19
Figura 6 Representação gráfica do fator diferencial.....	22
Figura 7 Gráfico da função de Bessel de primeira espécie para $\alpha = 0, 1, 2$	23
Figura 8 Tanque octogonal.....	24
Figura 9 Dimensões tanque octogonal.....	25
Figura 10 Hidrofone Pontual.....	25
Figura 11 Esquema usado para aquisição do sinal de ultrassom.	26
Figura 12 Suporte para fixação do Hidrofone.....	27
Figura 13 Método para medir campo resultante de duas cerâmicas.....	29
Figura 14 Sinal de excitação dos transdutores.....	31

Figura 15 Valores máximo de tensão para a cerâmica 1	33
Figura 16 Tensão entregue pelo hidrofone em função da posição do transdutor cerâmica 1.....	33
Figura 17 Valores máximo de tensão para a cerâmica 2	35
Figura 18 Tensão entregue pelo hidrofone em função da posição do transdutor cerâmica 2.....	35
Figura 19 Valores máximo de tensão para a cerâmica 3.	37
Figura 20 Tensão entregue pelo hidrofone em função da posição do transdutor cerâmica 3.....	37
Figura 21 Sinal recebido pelo hidrofone oriundo da cerâmica 1.....	38
Figura 22 Sinal recebido pelo hidrofone oriundo da cerâmica 1 e 2 juntas.....	39
Figura 23 Sinal recebido pelo hidrofone oriundo da cerâmica 2.....	39
Figura 24 Valores de máximo entregue pelo hidrofone para as cerâmicas 1, 2 e 3..	40
Figura 25 Frente de onda do ultrassom. Adaptada de [13]	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 1	32
Tabela 2 Valores mínimos de tensões encontrado para a cerâmica 1.....	32
Tabela 3 Valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 2	34
Tabela 4 Valores mínimos de tensões encontrado para a cerâmica 2.....	34
Tabela 5 Valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 3	36
Tabela 6 Valores mínimos de tensões encontrado para a cerâmica 3.....	36
Tabela 7 Valor da tensão media máxima entregue pelo hidrofone para a cerâmica 1, 2 e 3	40

RESUMO

O presente trabalho apresenta o mapeamento do campo acústico gerado dentro de um tanque octogonal. Foram realizados dois tipos de medições. A primeira delas foi a caracterização dos campos acústicos gerados por três cerâmicas ligadas separadamente, sendo a primeira caracterização feita posicionando o hidrofone na direção axial de cada cerâmica. A segunda medição foi realizada usando-se duas cerâmicas ligadas ao mesmo tempo dentro do tanque, com o objetivo de estudar o comportamento do campo acústico resultante gerado por esses dois transdutores. Para esta última medição o hidrofone foi posicionado na linha que forma 45º entre as duas cerâmicas.

Palavras Chaves: Mapeamento do campo acústico, Tanque Octogonal, Cerâmica.

ABSTRACT

This monograph shows the mapping of the acoustic field generated within a octagonal tank. Two types of measurement were performed. The first was the characterization of acoustic fields generated by three materials separately connected. The first characterization was done by positioning the hydrophone in the axial direction of each transducer. The second measurement was made using two ceramics simultaneously connected inside the tank. The objective was to study the resulting acoustic field behavior generated by these two transducers. For this last measurement the hydrophone was placed on the line that forms 45º between the two ceramics.

Key Words: Mapping the acoustic field, Octagonal Tank, Ceramic.

1 INTRODUÇÃO

A sonoluminescência é um fenômeno com amplas aplicações na física, como acústica, termodinâmica e radiação. Esse fenômeno acontece em virtude das vibrações acústicas oriundas do ultrassom, onde a bolha sofre um grande aumento de volume seguido de uma grande diminuição do mesmo, sofrendo assim uma implosão. Todo esse ciclo de implosões, gera uma elevação de temperatura no interior dessa microbolha, alcançando a ordem de milhares de graus Celsius[1]. A Figura 1 mostra esse processo de expansão e redução de volume da bolha de ar. Embora seja um fenômeno cuja interpretação gere discussão entre os cientistas, pois até os dias atuais estes apresentam diferentes teorias para se tentar explicar tal fenômeno, este é um fenômeno que pode ser observado e reproduzido. A sonoluminescência é um dos fenômenos com maior concentração de energia que se conhece [1]. Por isso um número crescente de investigadores tem-se dedicado a estudar esse campo de pesquisa. Seu baixo custo de reprodução e sua vasta gama aplicações, principalmente na química, tem tornado esse fenômeno ainda mais interessante [2].

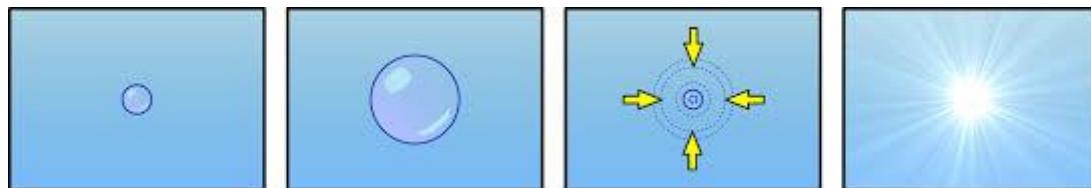


Figura 1 Expansão e compressão da bolha de ar no fenômeno da sonoluminescência.

Ultrassom é uma onda mecânica emitida a uma frequência superior àquela que o ouvido do ser humano pode perceber, ou seja, aproximadamente 20.000 Hz [3]. Suas aplicações se estendem desde a área médica, como a inspeção do corpo humano até a indústria, onde este pode ser usado na aeronáutica, por exemplo, para se localizar pequenas rachaduras na carcaça de aviões [4]. Essas ondas são produzidas por cerâmicas piezelétricas que quando excitadas, fazem a conversão da energia elétrica em energia acústica através das deformações mecânicas. A piezeletricidade (descoberta em 1880 por Jacques e Pierre Curie) descreve o fenômeno da geração de cargas elétricas em um material quando este é deformado mecanicamente, chamado de efeito direto; o modo oposto descreve uma deformação

mecânica em um material devido à aplicação de um campo elétrico, chamado de efeito inverso. Ambos os efeitos são manifestações da mesma propriedade fundamental do cristal [5]. Na Figura 2 é possível observar que a deformação do cristal gera uma diferença de potencial, a qual é detectada pelo voltímetro.

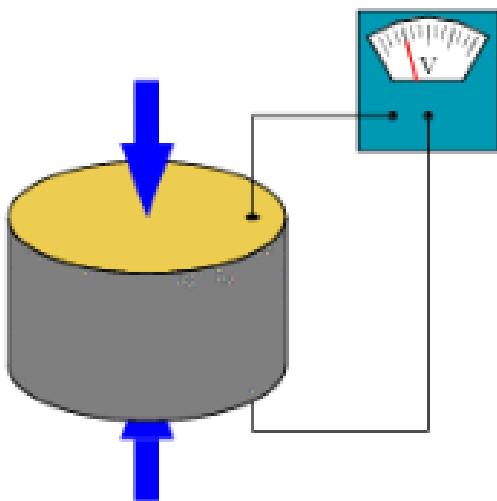


Figura 2 Diferença de potencial ocasionada pela deformação do cristal.

Para que um cristal seja piezoelétrico ele deve apresentar algumas características, sendo uma delas a inexistência de um centro de simetria no mesmo. Essa característica é necessária, pois a piezoelectricidade está relacionada com a anisotropia do cristal, isto é, no fato da resposta do material quando submetido a um estímulo externo não ser a mesma em todas as direções [6].

Para um entendimento mais aprofundado do efeito da piezoelectricidade a Figura 3 mostra a análise desse efeito em uma molécula neutra. Os centros gravitacionais das cargas positivas e negativas se coincidem antes de se submeter o cristal piezoelétrico a um estímulo externo, resultando assim uma molécula neutra [6]. A Figura 3a mostra a disposição das cargas positivas e negativas em uma molécula neutra.

Na medida em que se exerce uma pressão em um determinado material piezoelétrico, estes passam a apresentar uma polarização elétrica. Outra característica que acontece nesse tipo de material quando ele é pressionado é uma

deformação na sua estrutura, levando a uma separação dos centros gravitacionais das cargas positivas e negativas, criando assim dipolos. A Figura 3b mostra a disposição das cargas positivas e negativas na condição de dipolo. As cargas internas do polo são mutuamente canceladas e as distribuições de cargas ligadas aparecem na superfície do material, ou seja, o material se torna polarizado [7]. Esta polarização gera um campo elétrico (Figura 3c).

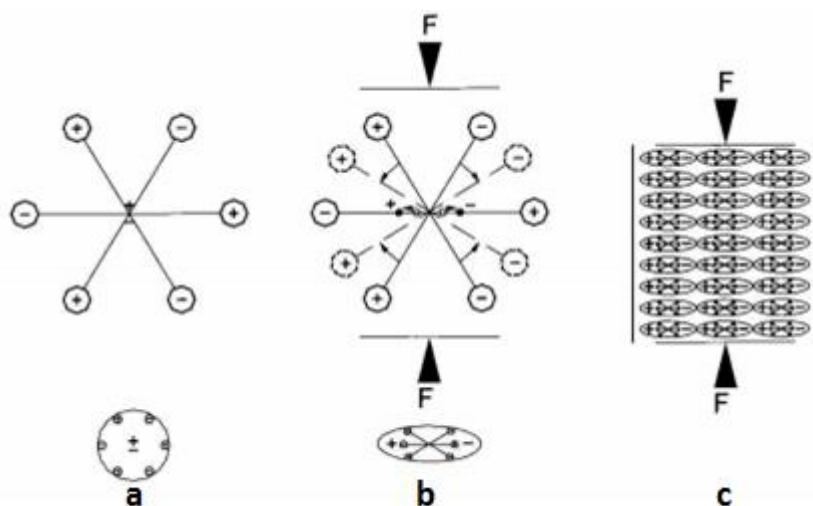


Figura 3 Modelo molecular simples para explicar o efeito piezoelétrico: a) molécula sem deformação; b) molécula sujeita a uma força; e c) efeito de polarização na superfície do material.

Os materiais piezoelétrico mais utilizados são o quartzo, sulfato de lítio, titanato de bário, metaniobato de chumbo e o zirconato-titanato de chumbo (PTZ) [1].

Para um cristal ser utilizado como transdutor, ele deve ser cortado de forma que um campo elétrico alternado, quando nele aplicado, produza variações em sua espessura. Essas variações, resultam em movimentos nas faces do cristal, originando as ondas de som [8]. Cada transdutor possui uma frequência de ressonância natural, tal que quanto maior a espessura do cristal, menor será a frequência de vibração.

Estudar o comportamento do campo acústico dentro de um tanque octogonal é importante pois a medida que se tem conhecimento das características do campo acústico dentro do tanque, como intensidade acústica, pode-se usá-lo em uma vasta gama de aplicações, como na reprodução do fenômeno da sonoluminescência, além de aplicações na química e na física, como síntese de partículas nanoestruturadas e catalise de reações químicas [1].

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é verificar o comportamento do campo acústico resultante dentro de um tanque octogonal. Para tanto foram padronizadas duas formas de medições para o mapeamento do campo acústico.

Para verificação dos resultados, foram analisados os gráficos de intensidades oriundos de uma única cerâmica e após, comparado com os gráficos de intensidade oriundo de duas cerâmicas ligadas simultaneamente.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Quando se trata de fontes geradoras de ondas, temos vários tipos de fontes que não apresentam dimensões desprezíveis, como é o caso das fontes simples.

Neste trabalho o transdutor usado é deste tipo, logo será estudado mais a fundo o comportamento do campo acústico gerado por ele.

A modelagem do campo acústico gerado por um transdutor é geralmente feita através do modelo do pistão plano, que considera que a face do transdutor vibra uniformemente ao longo de sua face [9]. A Figura 4 apresenta a geometria de um pistão plano circular de raio a .

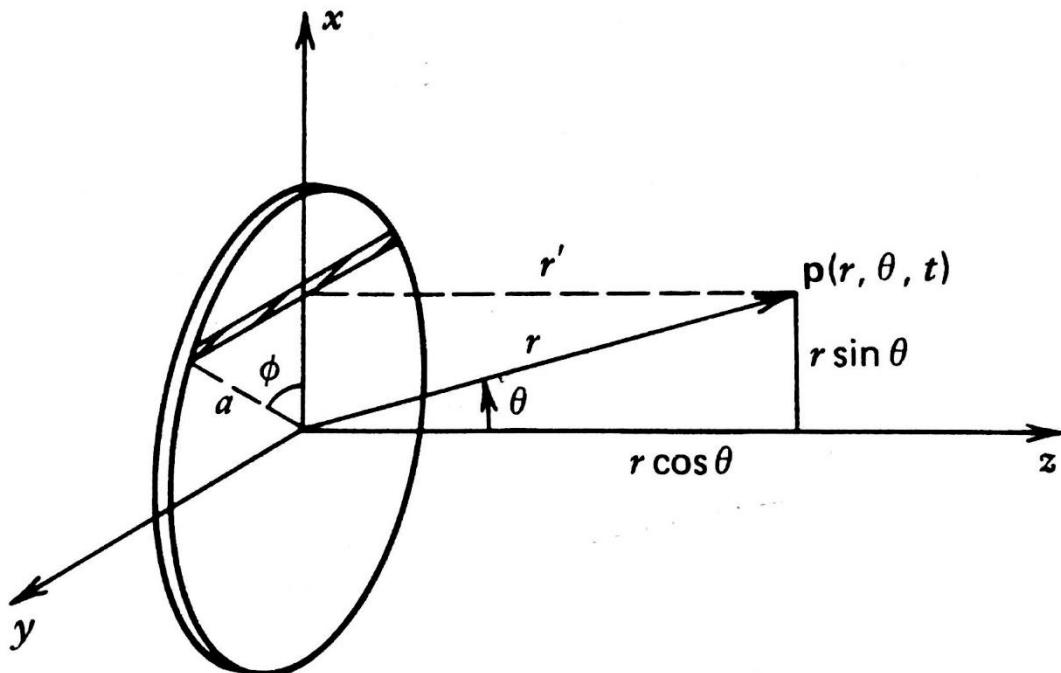


Figura 4 Geometria utilizada para estudar as características de radiação de um pistão plano.

A superfície do pistão se move com velocidade uniforme dada por $U_0 e^{j\omega t}$ normal a superfície do mesmo. Para se obter a pressão acústica gerada por esse pistão em um ponto específico do espaço, considere um ponto localizado a uma distância r a partir do centro deste pistão. Logo para se obter essa pressão divide-se a superfície do pistão em elementos infinitesimais cada qual agindo sobre o ponto de análise como se fosse uma fonte simples infinitesimal [9]. Assim, a pressão total dada por esses elementos infinitesimais é:

$$p(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c U_0 K}{2\pi} \int_S e^{\frac{j(\omega t - kr')}{r'}} dS \quad (1)$$

Onde ρ_0 é a densidade do líquido dada em (kg/m^3) , c é a velocidade do som em que o transdutor está inserido dada por (m/s) , U_0 é a intensidade com que a superfície do pistão se move dada por (m/s) e K é definido como o número de ondas que é dada por (m^{-1}) . O número de ondas é uma grandeza física inversamente proporcional ao comprimento de onda e é definido como $k = 1/\lambda$ [10]. A integral de superfície da Equação 1 é calculada sobre a região $\sigma \leq a$.

Existem dois fatores importantes a serem estudados quando se trata de campo acústico. O primeiro deles é a resposta axial e o segundo o campo distante. Esses dois fatores serão estudados com mais detalhes a seguir [9].

a. Resposta Axial ou Campo próximo

O comportamento do feixe de ultrassom não é uniforme, existem dois tipos de campos que podem ser diferenciados pelas suas características. O primeiro é o campo próximo ou resposta axial e o segundo campo distante.

O campo próximo pode ser definido como uma zona onde há ausência de divergência, pois a intensidade acústica nessa zona varia entre valores máximos e mínimos, tendo assim uma característica oscilante [11]. O campo ao longo do eixo acústico (o eixo acústico corresponde ao eixo de simetria do transdutor, de acordo com a Figura 4, esse eixo é o eixo z) é obtido através de:

$$p(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c U_0 K}{2\pi} e^{j\omega t} \int_0^a \frac{e^{-jk\sqrt{r^2 + \sigma^2}}}{\sqrt{r^2 + \sigma^2}} 2\pi\sigma d\sigma \quad (2)$$

Como

$$\frac{\sigma}{\sqrt{r^2 + \sigma^2}} e^{-jk\sqrt{r^2 + \sigma^2}} = -\frac{d}{d\sigma} \left(\frac{e^{-jk\sqrt{r^2 + \sigma^2}}}{jk} \right) \quad (3)$$

Tem-se que o integrando é um diferencial perfeito, resultando em uma pressão acústica complexa dada pela Equação (4).

$$p(r, \theta, t) = \rho_0 c U_0 K e^{j\omega t} \left[e^{-jkr} - e^{-jk\sqrt{r^2+a^2}} \right] \quad (4)$$

A amplitude de pressão ao longo do eixo do pistão é a magnitude da expressão acima, e essa magnitude é descrita na Equação (5).

$$p(r, \theta) = 2\rho_0 c U_0 \left| \sin \left\{ \frac{1}{2} kr \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2} - 1 \right] \right\} \right| \quad (5)$$

A expressão (5) mostra que a pressão ao longo do eixo acústico sofre interferência ao modo que r tende ao ∞ , variando entre 0 e $2\rho_0 c U_0$. Esses extremos de pressão ocorrem para valores de r satisfazendo,

$$\frac{1}{2} kr \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{r} \right)^2} - 1 \right] = m \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

Onde os máximos ocorrem para valores de m ímpares e os mínimos ocorrem para valores de m pares. A equação (6) apresenta a seguinte solução,

$$\frac{r_m}{a} = \frac{1}{m} \frac{a}{\lambda} - \frac{m}{4} \frac{\lambda}{a} \quad (7)$$

Percorrendo o eixo acústico na direção positiva do mesmo, ou seja, de 0 a ∞ o primeiro máximo ocorre para $m = 1$, logo para este caso tem-se:

$$\frac{r_1}{a} = \frac{a}{\lambda} - \frac{1}{4} \frac{\lambda}{a} \quad (8)$$

Em contrapartida o primeiro mínimo ocorre para $m = 2$. Logo,

$$\frac{r_2}{a} = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\lambda} - \frac{\lambda}{a} \right) \quad (9)$$

Conforme os valores de r vão se alterando, ou seja, conforme se altera os valores de r para se percorrer o eixo na direção de simetria do transdutor, a intensidade acústica vai variando entre o máximo e o mínimo, portanto, variando entre 0 e $2\rho_0 c U_0$ [9]. A Figura 5 mostra o comportamento da intensidade da pressão acústica em função da distância r no eixo acústico.

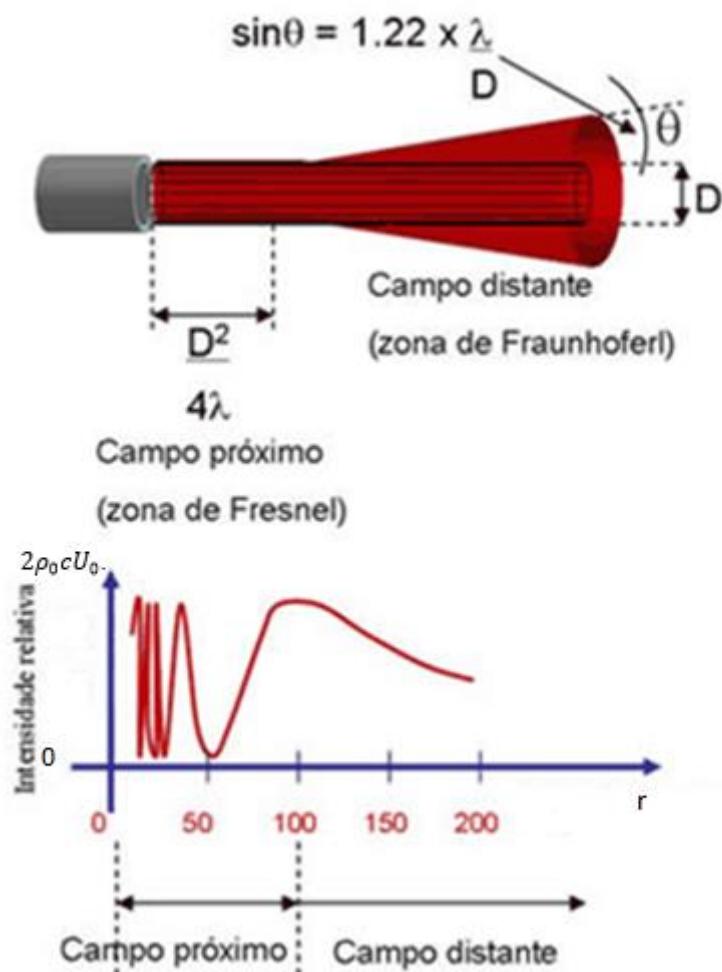


Figura 5 Representação da magnitude da amplitude da pressão acústica em função de r .
Adaptado de [11].

O campo próximo ou resposta axial pode também ser chamado de zona de Fresnel e o campo distante pode ser chamado de zona de Fraunhoferl [11].

Para valores de r maiores do que r_1 , a pressão axial apresenta um comportamento decrescente atenuada por um fator de $1/r$. Para valores de r menores

que r_1 , a pressão axial possui um comportamento oscilante, logo tem-se que a distância r_1 é a transição entre o campo próximo e o campo distante, essa distância vale $r_1 = \frac{D^2}{4\lambda}$. No campo próximo a pressão apresenta um comportamento oscilante, enquanto que no campo distante ela é decrescente.

b. Campo distante

O campo distante é uma zona em que há ausência quase total de fenômenos de interferência, de forma que o feixe sônico é uniforme e a intensidade diminui gradualmente ao aumentar a distância até o transdutor [11].

Toma-se a Figura 4 como referência para a análise do campo distante. Utilizando a posição (r, θ) para estudo da pressão acústica, e adotando um ponto qualquer pertencente ao plano xy , a superfície do pistão pode ser dividida em linhas contínuas com comprimentos diferentes, cada uma paralela ao eixo y . Para este caso devemos assumir que $r \gg a$, pois o que interessa é o padrão do comportamento do campo acústico no campo distante. Como cada linha contínua possui comprimento $2a \operatorname{sen} \theta$ e a largura dx , a intensidade do campo acústico de cada linha pode ser descrita como:

$$dQ = 2U_0 a \operatorname{sen} \theta dx \quad (10)$$

O incremento de pressão dp proveniente de cada linha é:

$$dp = j\rho_0 c \frac{U_0}{\pi r} k a \operatorname{sen} \theta e^{j(\omega t - kr)} dx \quad (11)$$

Para $r \gg a$, r' pode ser aproximado por:

$$r' = r \left(1 - \frac{a}{r} \operatorname{sen} \theta \cos \phi \right) = r + \Delta r \quad (12)$$

E a pressão acústica se torna:

$$p(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c U_0 K}{\pi r} a e^{j(\omega t - kr)} \int_{-a}^a e^{jk a \sin \theta \cos \phi} \sin \phi dx \quad (13)$$

onde r' tende para r no denominador, com $r' = r + \Delta r$ na fase, de acordo com a aproximação feita para o campo distante. Usando a relação $x = a \cos \phi$, a variável de integração pode ser mudada de dx para $d\phi$, logo:

$$p(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c U_0 K}{\pi r} a e^{j(\omega t - kr)} \int_0^\pi e^{jk a \sin \theta \cos \phi} (\sin \phi)^2 d\phi \quad (14)$$

Por simetria, a parte imaginária da integral desaparece e a parte real é escrita em termos das funções de Bessel. (A função de Bessel será definida no final da seção do campo distante).

$$\int_0^\pi e^{jk a \sin \theta \cos \phi} (\sin \phi)^2 d\phi = \pi \frac{J_1(z)}{z} \quad (15)$$

Portanto,

$$p(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c U_0 a}{2r} k a e^{j(\omega t - kr)} \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (16)$$

Toda a dependência angular de p é representada pelo termo em colchetes e à medida que θ vai para 0 este termo tende para 1. Sendo assim, define-se o fator direcional $H(\theta)$ para o pistão,

$$H(\theta) = \left[\frac{2J_1(v)}{v} \right], \text{ sendo } v = ka \sin \theta \quad (17)$$

A Figura 6 mostra a representação gráfica do fator direcional expresso na equação (17).

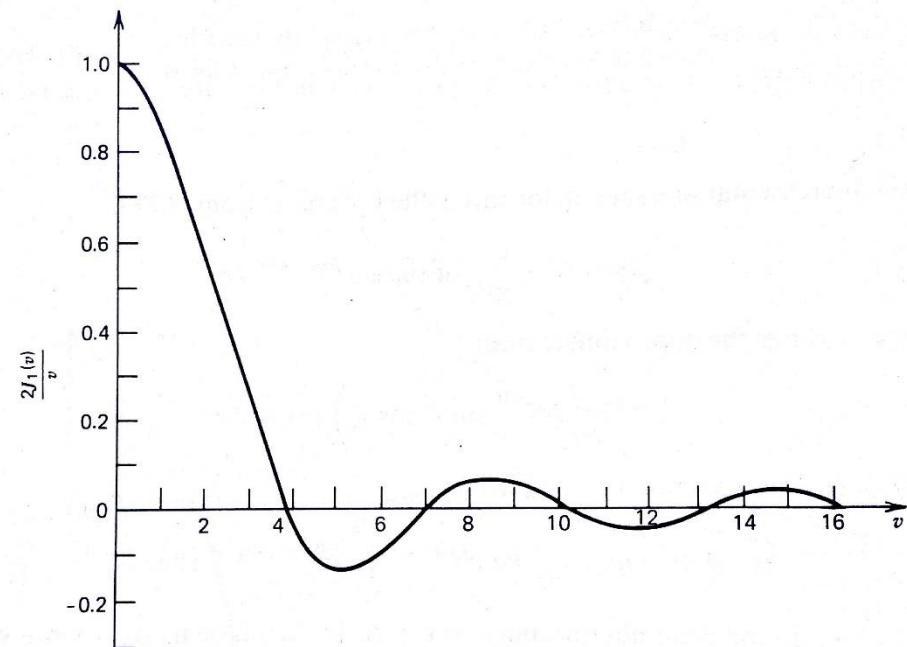


Figura 6 Representação gráfica do fator diferencial.

Observando $H(\theta)$, percebe-se que há valores para o argumento de J_1 que levam este para zero. Para estes valores, a pressão acústica também é zero. O padrão de radiação para este caso mostra que existe um lóbulo principal que representa o máximo que ocorre em $\theta = 0$, existem também lóbulos secundários, que surgem entre dois valores de θ que zeram o argumento de J_1 .

Função de Bessel

A função de Bessel é definida como a solução da seguinte equação diferencial [12].

$$x^2 \frac{d^2y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha^2)y = 0 \quad (18)$$

Onde α é um número qualquer, ou seja, real ou complexo, porém quando se utiliza um número inteiro esse pode ser definido como a ordem da função de Bessel.

A equação de Bessel é obtida pela solução de uma equação diferencial de segunda ordem, logo ela possui duas soluções, porém para o projeto presente somente a solução de primeira ordem será utilizada. Para se resolver a Equação

diferencial (18) é utilizado o método de resolução de equações diferenciais por séries de potências [12], logo:

$$J_\alpha(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! (m + \alpha + 1)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+\alpha} \quad (19)$$

A Figura 7 mostra o gráfico da função de Bessel de primeira espécie para $\alpha = 0, 1, 2$.

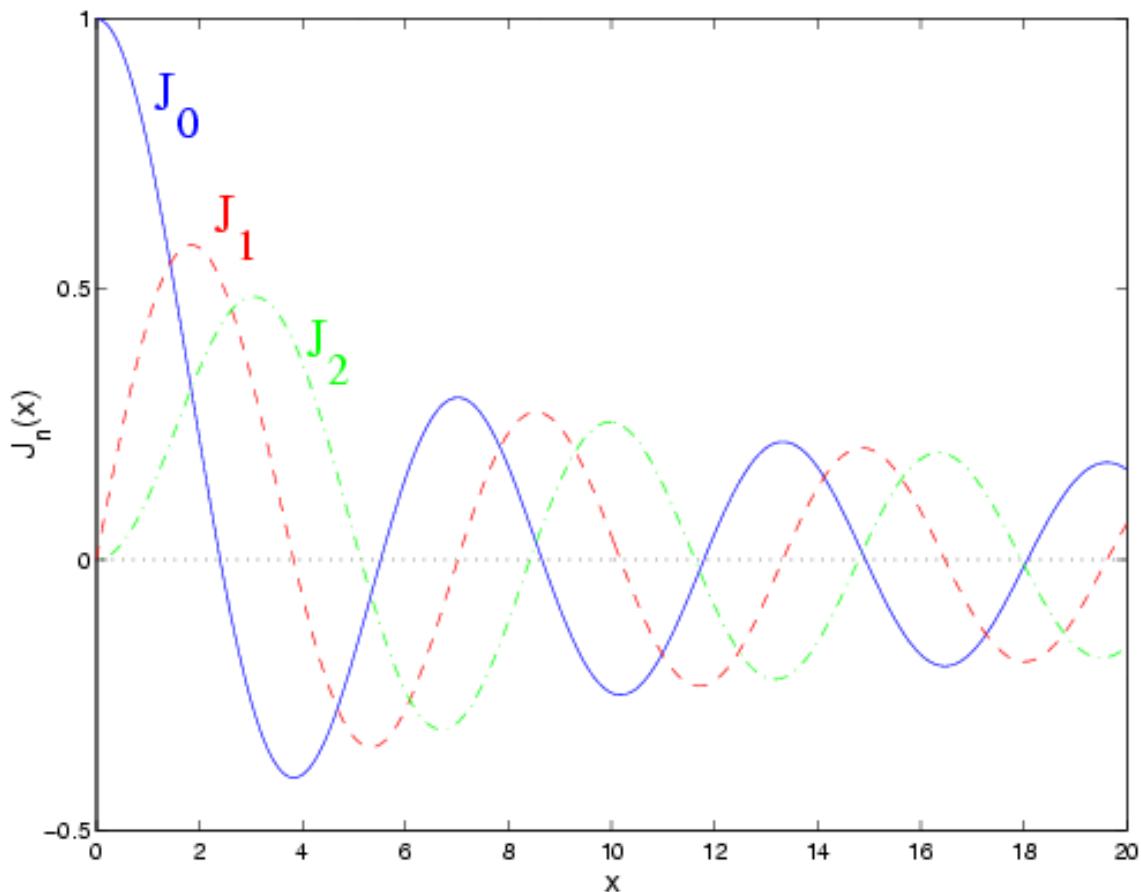


Figura 7 Gráfico da função de Bessel de primeira espécie para $\alpha = 0, 1, 2$.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 O tanque Octogonal

Foi desenvolvido em parceria com o Instituto de Química de São Carlos (IQSC) o tanque octogonal mostrado na Figura 8, onde foram realizadas as medições dos campos acústicos dos transdutores.

Esse tanque é feito de vidro e possui 8 cerâmicas de 2MHz com diâmetro de 3cm. Estas estão dispostas duas a duas na face do tanque octogonal como mostrado na Figura 8. Para a fixação das cerâmicas no vidro foi utilizada cola Araudite com tempo de secagem longo. O tanque possui 9,5cm de diâmetro e 15 cm de altura, como mostrado na Figura 9, logo o mesmo possui um volume de 1063 cm^3 .

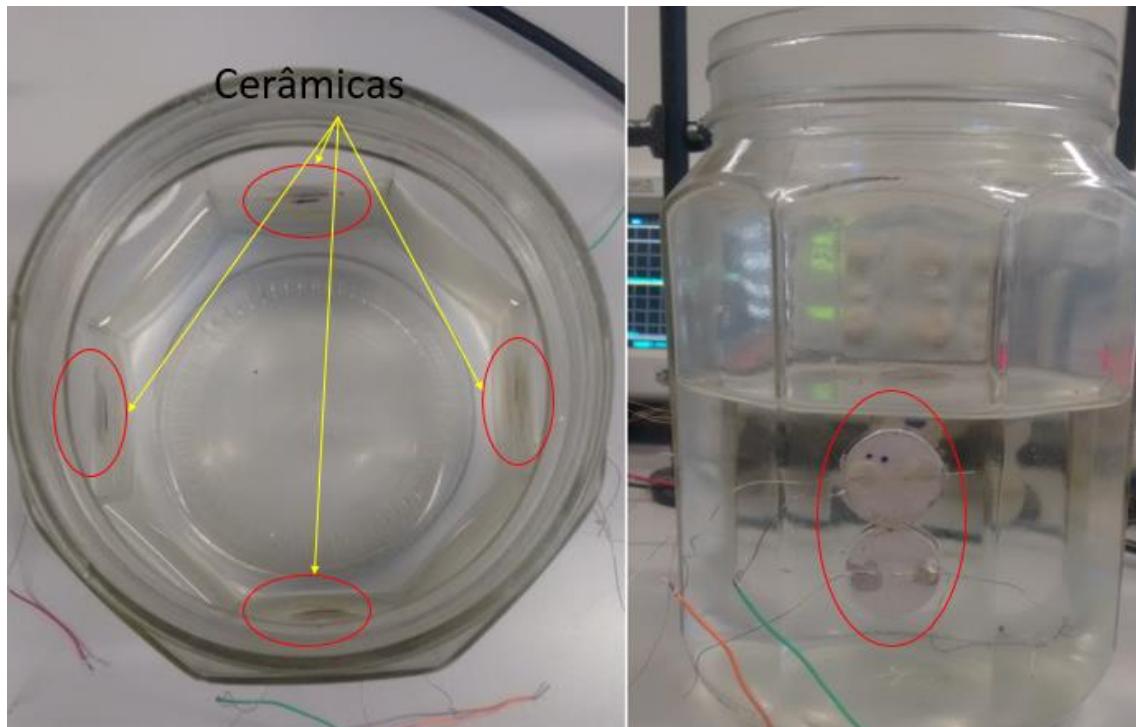


Figura 8 Tanque octogonal.

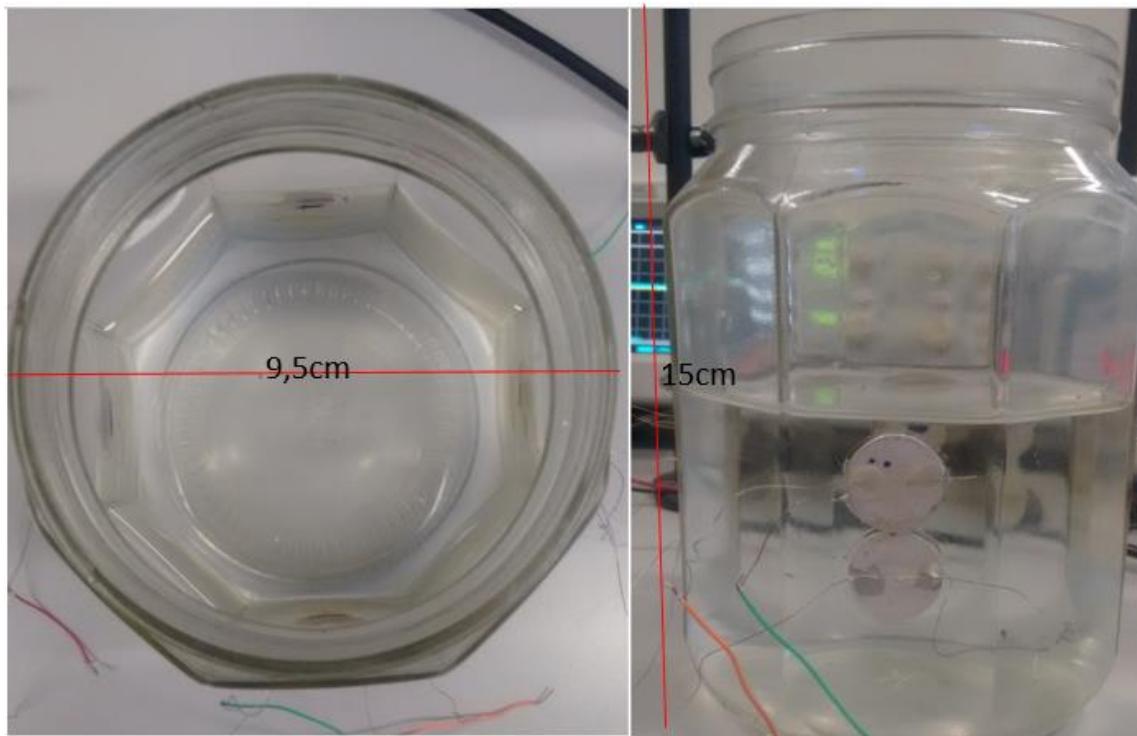


Figura 9 Dimensões tanque octogonal.

4.2 Hidrofone Pontual

A caracterização dos transdutores desse experimento se deu por meio do levantamento do campo acústico por um hidrofone pontual (diâmetro de 0,2mm a 2mm), como mostrado na Figura 10.

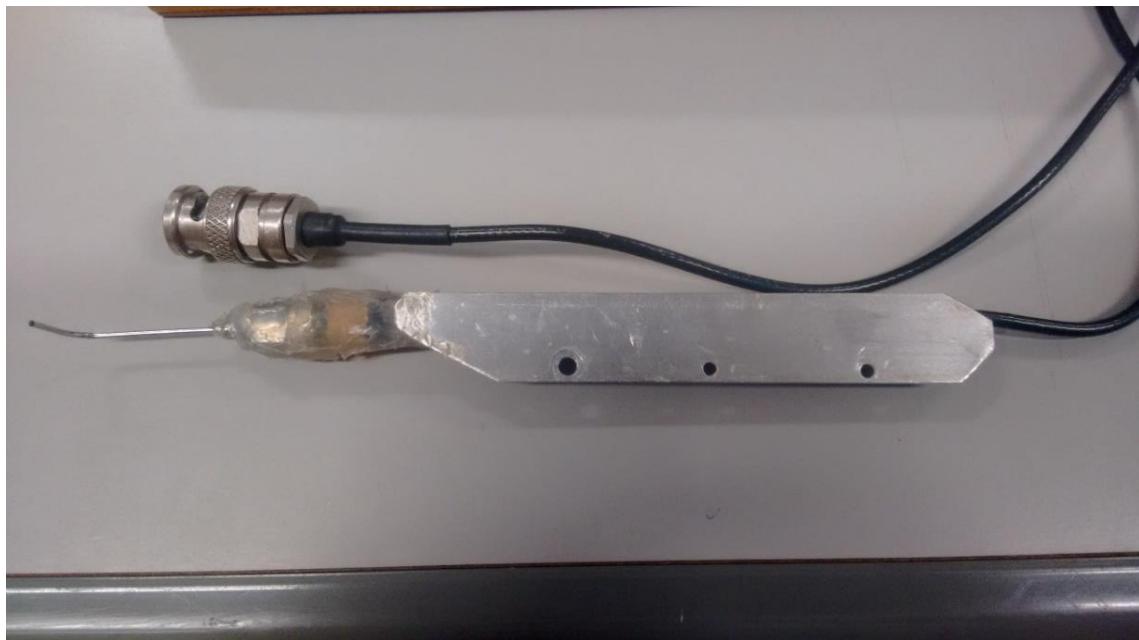


Figura 10 Hidrofone Pontual

Estes são difíceis de se construir em razão da sua área ativa ser reduzida. Outra característica dos hidrofones é que estes produzem sinais de baixíssima amplitude, complicando assim a aquisição e o processamento destes.

4.3 Aquisição do Sinal

Para fazer a aquisição do sinal de ultrassom foi usado o esquema como mostrado na Figura 11.

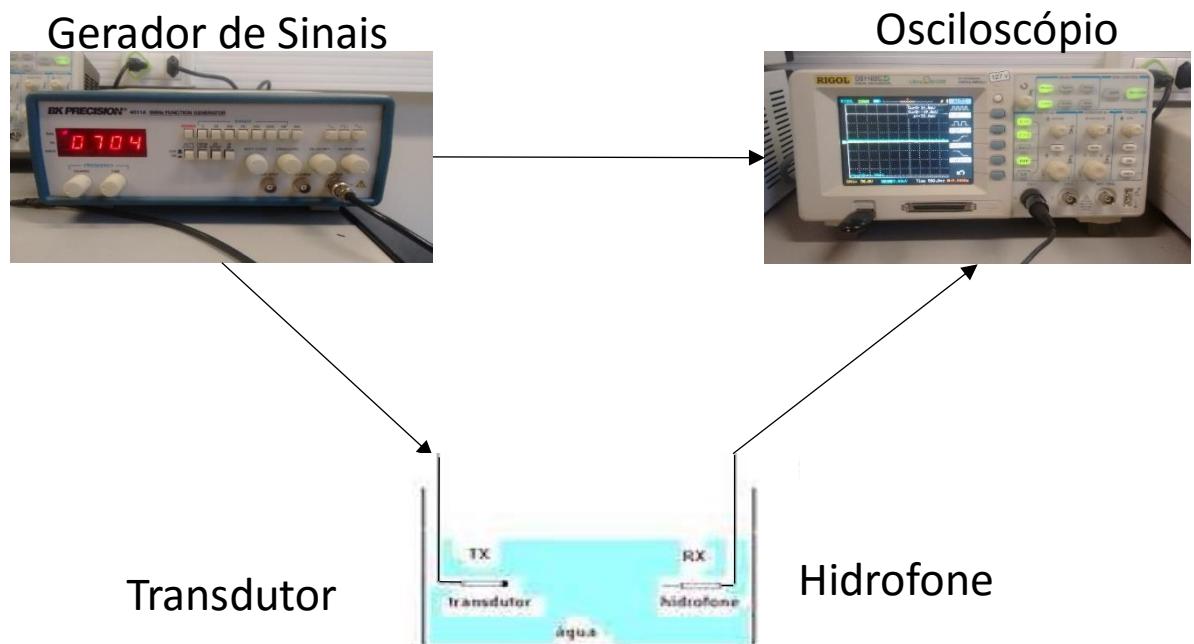


Figura 11 Esquema usado para aquisição do sinal de ultrassom.

No esquema da Figura 11, um gerador de funções da marca Minipa modelo MFG-4202, determina a forma de onda a ser utilizada para excitar o transdutor, que no caso foi uma onda quadrada de frequência de 550KHz e tensão de 5 Vpp. A onda acústica gerada pelo transdutor é captada pelo hidrofone e mostrada no segundo canal do osciloscópio da marca RIGOL modelo DS1102D de 2 canais. A frequência da onda quadrada de excitação aplicada ao transdutor depende de sua frequência de ressonância, ou seja, um transdutor montado com uma cerâmica de 2MHz deverá ser excitado nesta frequência, porém como o tamanho do tanque acústico é reduzido, para tentar se observar a transição entre o campo próximo e o campo distante dentro do tanque, foi usada uma frequência de 550kHz. O motivo de se reduzir a frequência é que a transição entre o campo próximo e o campo distante ocorre a uma distância

da cerâmica dada pela fórmula, $d = \frac{D^2}{4\lambda}$, logo tem-se o diâmetro do tanque medindo 9,5cm e um sinal de excitação com uma frequência de 550kHz. Aplicando na equação acima teríamos uma distância de transição de aproximadamente 8,15cm. Como consequência de excitar a cerâmica abaixo de sua frequência de ressonância, temos que a amplitude do sinal captado pelo hidrofone será menor do que quando excitada na frequência de ressonância.

A posição do hidrofone é controlada manualmente por meio de uma régua de 15cm fixada à mesa, onde a mesma é usada como referência para se movimentar o hidrofone na direção axial da cerâmica de 1 em 1 milímetro, de modo a se observar o sinal captado pelo hidrofone em cada posição.

O hidrofone é fixado por uma presilha pertencente a um suporte maior, que é o responsável por manter a sua posição fixa na vertical, e o deslocamento deste suporte sobre a régua, é o responsável pela movimentação do hidrofone na direção do eixo x em relação cerâmica (axial). O suporte é mostrado na Figura 12.



Figura 12 Suporte para fixação do Hidrofone.

Ao serem excitados, os transdutores produzem ondas de pressão que se propagam e são captadas pelos hidrofones pontuais. A propagação destas ondas aproxima da condição ideal considerada na literatura quando ocorre em meio aquoso, portanto, os elementos transmissor e receptor devem estar imersos em água. Nestes ensaios deve ser utilizado um tanque com dimensões suficientemente grandes para evitar que reflexões destas ondas nas paredes do tanque interfiram nos sinais captados no processo de mapeamento. No tanque acústico é colocado o transdutor a ser caracterizado e o hidrofone pontual posicionado à sua frente e o sistema de posicionamento do hidrofone auxiliará na varredura ponto a ponto do campo acústico.

Para a aquisição do sinal originado somente por uma cerâmica, o seguinte método foi aplicado.

- 1) Cola-se a régua na mesa para servir de referência para o deslocamento do suporte e consequentemente do hidrofone.
- 2) Após a colagem da régua na mesa deve-se calibrar o sinal de excitação do transdutor para 550kHz e V_{pp}=5V e excitar a cerâmica a ser caracterizada.
- 3) Posiciona-se em seguida o transdutor pontual apontando para a direção axial da cerâmica.
- 4) Em seguida começa-se a varredura do campo acústico do transdutor. Inicia-se no ponto zero, ou seja, mais próximo possível da cerâmica e desloca-se o hidrofone até encontrar o valor máximo da amplitude que está sendo mostrada no osciloscópio, e com o auxílio da régua anota-se a posição que se encontra o hidrofone. Após isso continua-se deslocando o hidrofone na direção axial da cerâmica, até se encontrar desta vez o valor de mínima amplitude, e anota-se a posição do hidrofone. Após encontrar o valor mínimo continua-se deslocando o hidrofone na direção axial da cerâmica, até se encontrar novamente o valor máximo, e novamente anota-se a posição do hidrofone. Faz-se esse procedimento até o hidrofone atingir a distância máxima da cerâmica que é limitada pelo tamanho do tanque.
- 5) Com isso tem-se a variação das amplitudes máximas e mínimas dentro do tanque ao longo do eixo da cerâmica. Pela teoria a amplitude deve variar entre máximo e mínimo no campo próximo. No campo distante a mesma deve somente atenuar.
- 6) Após observar os pontos de máximos e mínimos pode-se então traçar o gráfico que caracteriza cada cerâmica.

Para a aquisição do sinal de mais de uma cerâmica ao mesmo tempo, o seguinte procedimento foi adotado:

- 1) Excita-se a primeira cerâmica com uma onda quadrada de 550kHz e tensão de 5Vpp e escolhe-se um ponto dentro do tanque e anota-se a amplitude do sinal que o hidrofone esta recebendo neste ponto.
- 2) Em seguida, retira-se o sinal de excitação da primeira cerâmica e excita-se agora somente a segunda cerâmica. E sem mover o hidrofone de lugar anota-se desta vez a amplitude que o hidrofone esta recebendo para a segunda cerâmica.
- 3) Por fim sem movimentar o hidrofone liga-se as duas cerâmicas e faz se a leitura do sinal capturado pelo hidrofone para as duas cerâmicas ligadas.
- 4) O ponto escolhido para o hidrofone, deve ser um ponto que está na linha que forma um ângulo de 45º com a linha axial de cada uma das cerâmicas. Assim como mostrado na Figura 13.
- 5) Quando se excita as duas cerâmicas ao mesmo tempo, deve-se ajustar o sinal de entrada para que ele tenha os mesmos parâmetros do que quando se excita somente uma cerâmica, pois ao se excitar duas cerâmicas simultaneamente devido ao aumento da carga no gerador de sinais o sinal de entrada pode sofrer alterações.

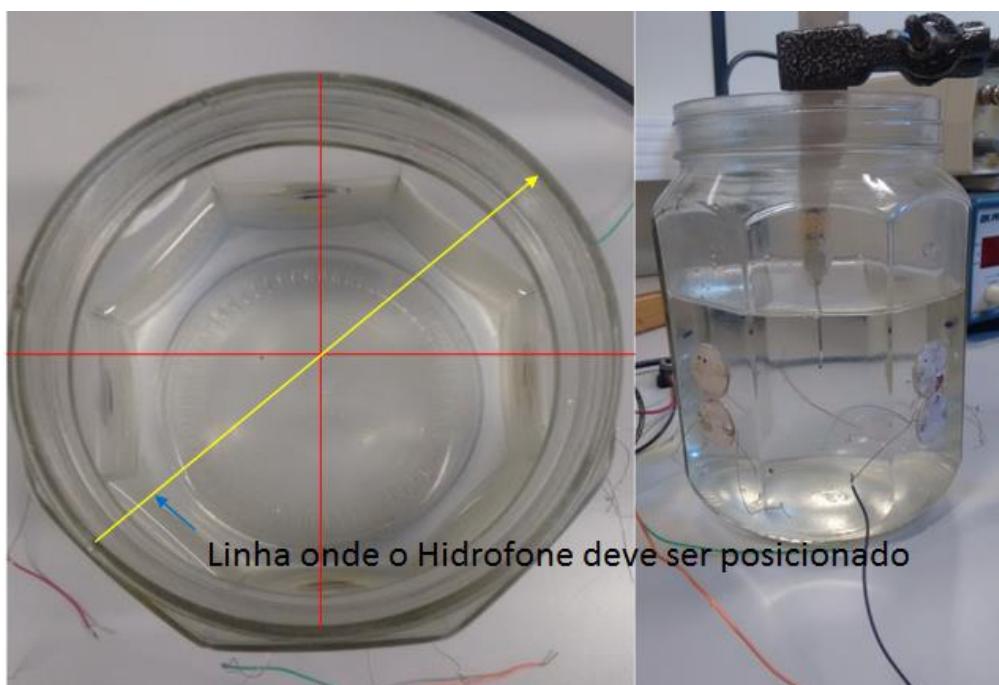


Figura 13 Método para medir campo resultante de duas cerâmicas.

Os resultados são apresentados na seção de resultados. Esse procedimento é adotado quando se quer captar o campo resultante gerado por duas cerâmicas simultaneamente, devido ao fato da caracterização das cerâmicas ser feita manualmente. Ao se mudar o hidrofone de lugar dificilmente o mesmo será movimentado exatamente sobre a direção axial da cerâmica, logo essa movimentação gera ruído na aquisição do sinal, deixando-o assim com uma incerteza de leitura muito grande. Por isso é necessário fixar somente um ponto, assim esse ruído é eliminado ao variar o hidrofone. Por meio das amplitudes do sinal capturado pelas cerâmicas 1 e 2 separadamente e do sinal capturado pelas cerâmicas 1 e 2 ligadas juntas, pôde-se saber se os campos resultantes da cerâmica 1 e 2 estão se somando.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização das Cerâmicas

Como descrito na Seção 4.3, foi realizada a caracterização de três cerâmicas presentes no tanque. O sinal de excitação foi uma onda quadrada de Amplitude 5Vpp e frequência 550kHz. A Figura 14 mostra o sinal de excitação.

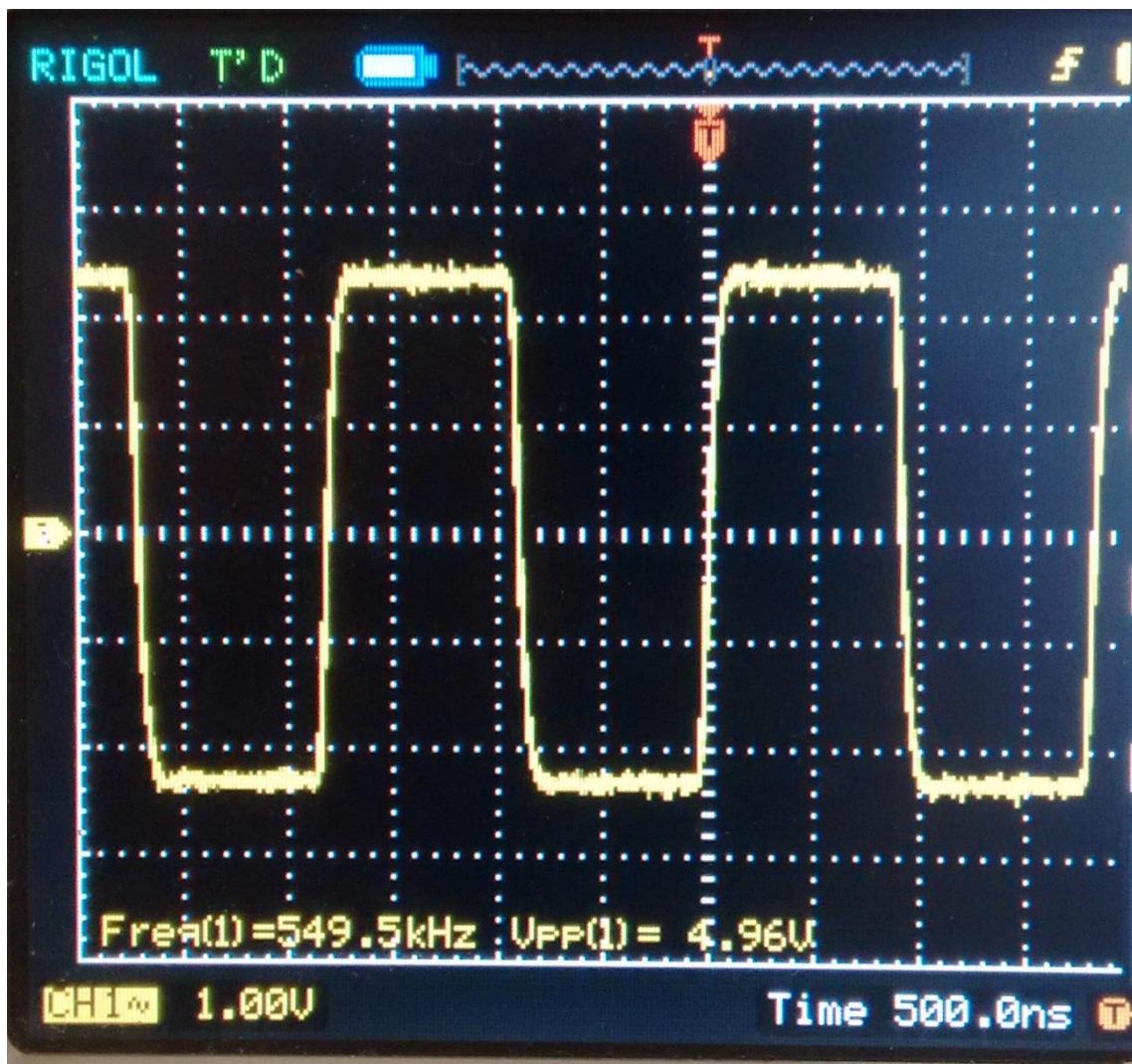


Figura 14 Sinal de excitação dos transdutores.

A Tabela 1 mostra os valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 1 e a Tabela 2 mostra os valores mínimos de tensões encontrado para a mesma cerâmica.

Tabela 1 Valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 1.

Posição do Hidrofone (cm)	Tensão entregue pelo Hidrofone (mV) – Cerâmica 1
0	880
0,20	890
0,50	860
0,80	800
1,0	880
1,40	900
1,80	825
2,30	820
2,90	860
3,30	790
3,90	720
4,50	792
5,40	720
6,10	885
7,10	896

Tabela 2 Valores mínimos de tensões encontrado para a cerâmica 1.

Posição do Hidrofone (cm)	Tensão entregue pelo Hidrofone (mV) – Cerâmica 1
0,10	85
0,30	64
0,60	35
0,90	25
1,20	45
1,60	72
2,00	80
2,60	45
3,10	56
3,60	48
4,10	34
4,90	45
5,70	42
6,50	66
7,50	50

A Figura 15 mostra o gráfico que representa a caracterização da cerâmica 1, (máximos e mínimos pela posição do hidrofone), a Figura 16 mostra o gráfico somente com os valores de máximos em função da posição do hidrofone para a mesma cerâmica.

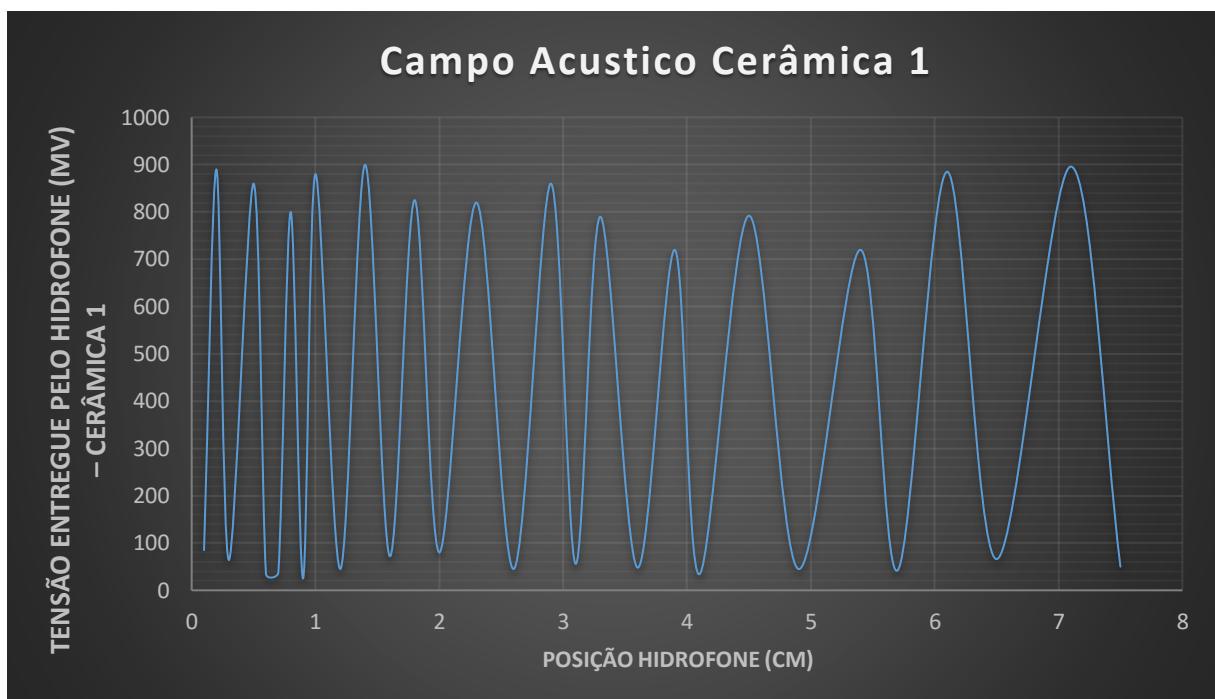


Figura 15 Tensão entregue pelo hidrofone em função da posição do transdutor cerâmica 1.

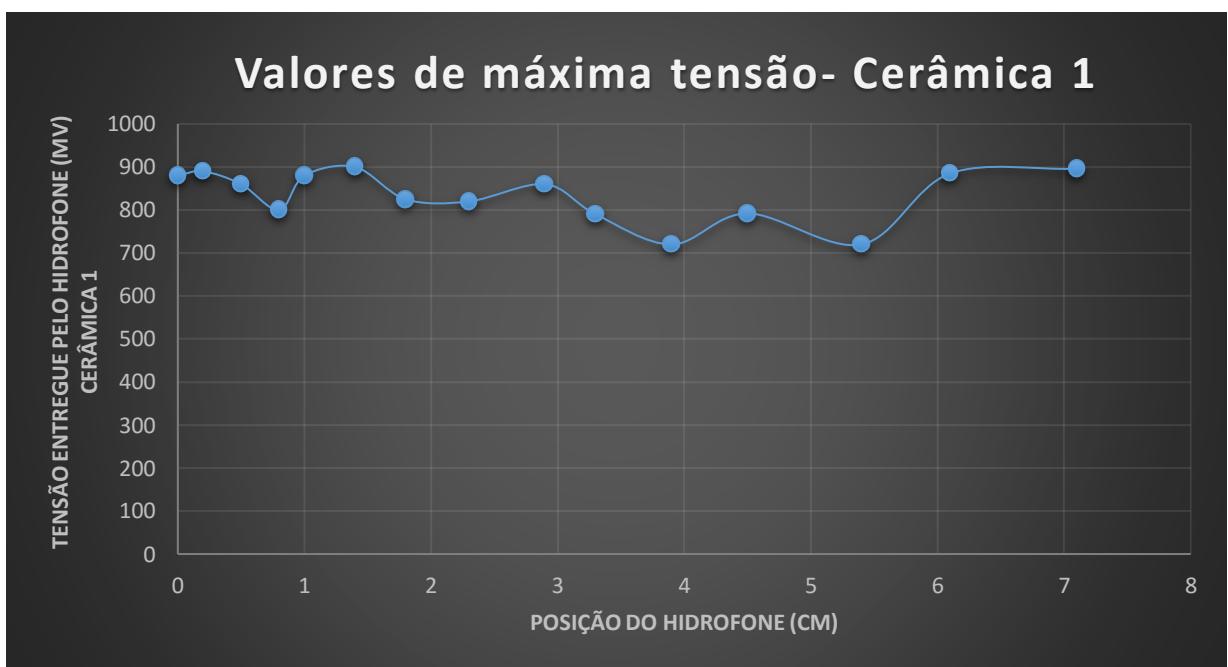


Figura 16 Valores máximo de tensão para a cerâmica 1.

O mesmo procedimento foi usado para caracterizar a cerâmica 2. A Tabela 3 mostra os valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 2 e a Tabela 4 mostra os valores mínimos de tensões encontrado para a mesma cerâmica.

Tabela 3 Valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 2.

Posição do Hidrofone (cm)	Tensão entregue pelo Hidrofone (mV) – Cerâmica 2
0	320
0,20	290
0,50	260
0,80	300
1,0	280
1,40	300
1,80	310
2,30	302
2,90	260
3,30	290
3,90	320
4,50	292
5,40	286
6,10	285
7,10	296

Tabela 4 Valores mínimos de tensões encontrado para a cerâmica 2.

Posição do Hidrofone (cm)	Tensão entregue pelo Hidrofone (mV) – Cerâmica 2
0,10	70
0,30	36
0,60	40
0,90	45
1,20	60
1,60	62
2,00	22
2,60	46
3,10	55
3,60	46
4,10	27
4,90	62
5,70	66
6,50	46
7,50	41

A Figura 17 mostra o gráfico que representa a caracterização da cerâmica 2, (máximos e mínimos pela posição do hidrofone), a Figura 18 mostra o gráfico somente com os valores de máximos em função da posição do hidrofone para a mesma cerâmica.

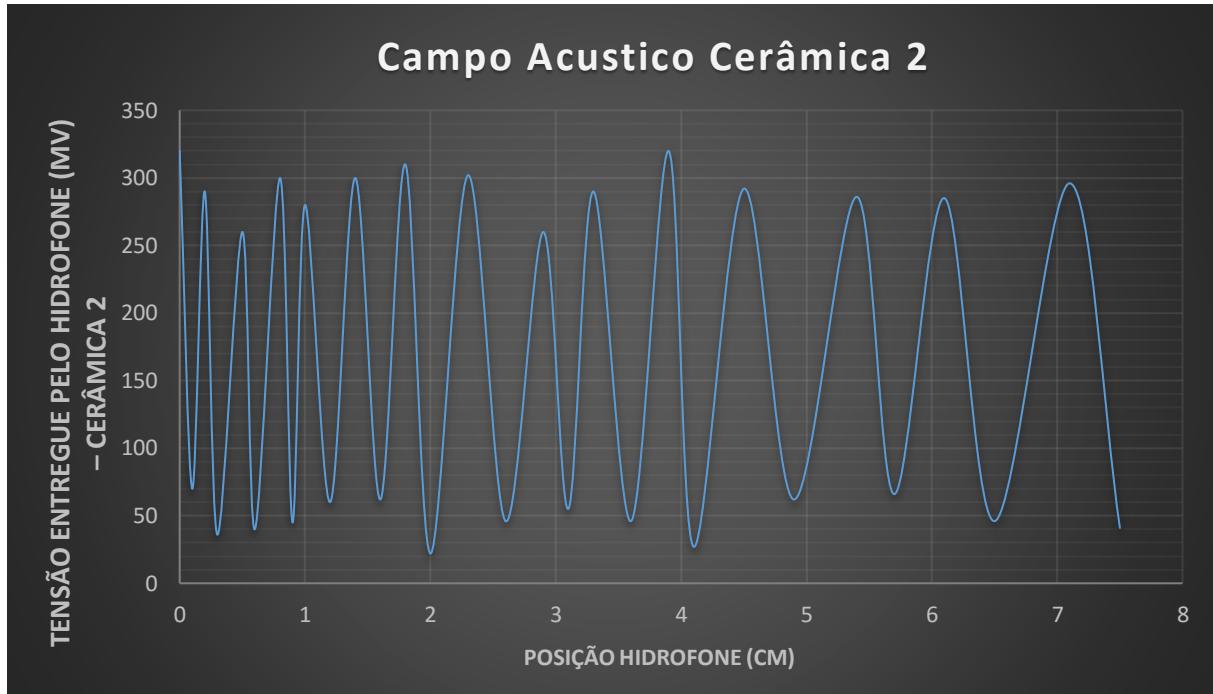


Figura 17 Tensão entregue pelo hidrofone em função da posição do transdutor cerâmica 2.

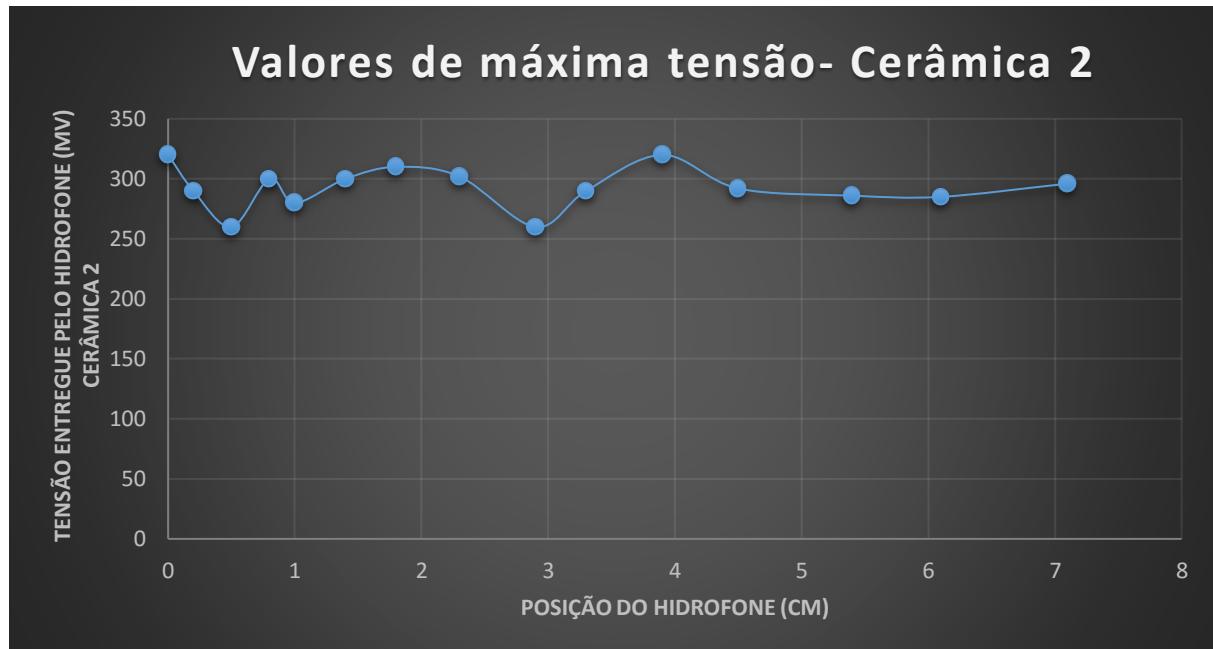


Figura 18 Valores máximo de tensão para a cerâmica 2.

O mesmo procedimento foi usado para caracterizar a cerâmica 3. A Tabela 5 mostra os valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 3 e a Tabela 6 mostra os valores mínimos de tensões encontrado para a mesma cerâmica.

Tabela 5 Valores máximos de tensões encontrado para a cerâmica 3.

Posição do Hidrofone (cm)	Tensão entregue pelo Hidrofone (mV) – Cerâmica 3
0	480
0,20	490
0,50	460
0,80	400
1,0	480
1,40	490
1,80	425
2,30	390
2,90	360
3,30	390
3,90	400
4,50	392
5,40	420
6,10	385
7,10	388

Tabela 6 Valores mínimos de tensões encontrado para a cerâmica 3.

Posição do Hidrofone (cm)	Tensão entregue pelo Hidrofone (mV) – Cerâmica 3
0,10	44
0,30	46
0,60	53
0,90	52
1,20	38
1,60	27
2,00	28
2,60	54
3,10	65
3,60	65
4,10	41
4,90	70
5,70	42
6,50	26
7,50	35

A Figura 19 mostra o gráfico que representa a caracterização da cerâmica 3, (máximos e mínimos pela posição do hidrofone), a Figura 20 mostra o gráfico somente

com os valores de máximos em função da posição do hidrofone para a mesma cerâmica.

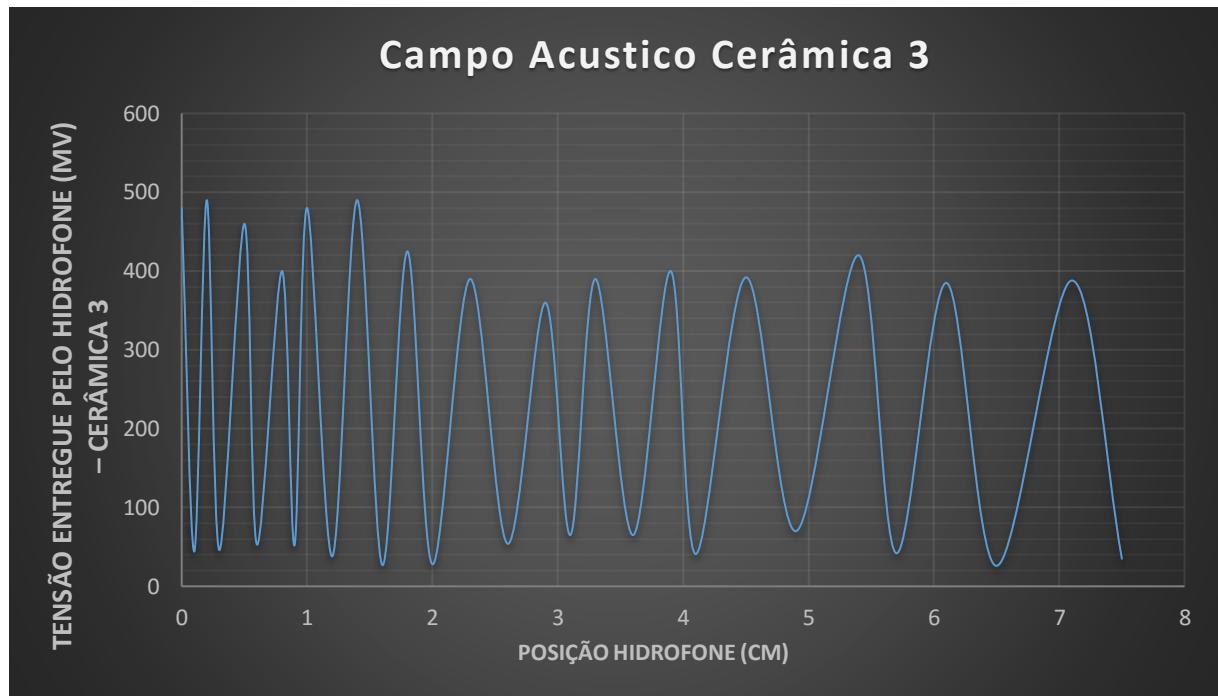


Figura 19 Tensão entregue pelo hidrofone em função da posição do transdutor cerâmica 3.

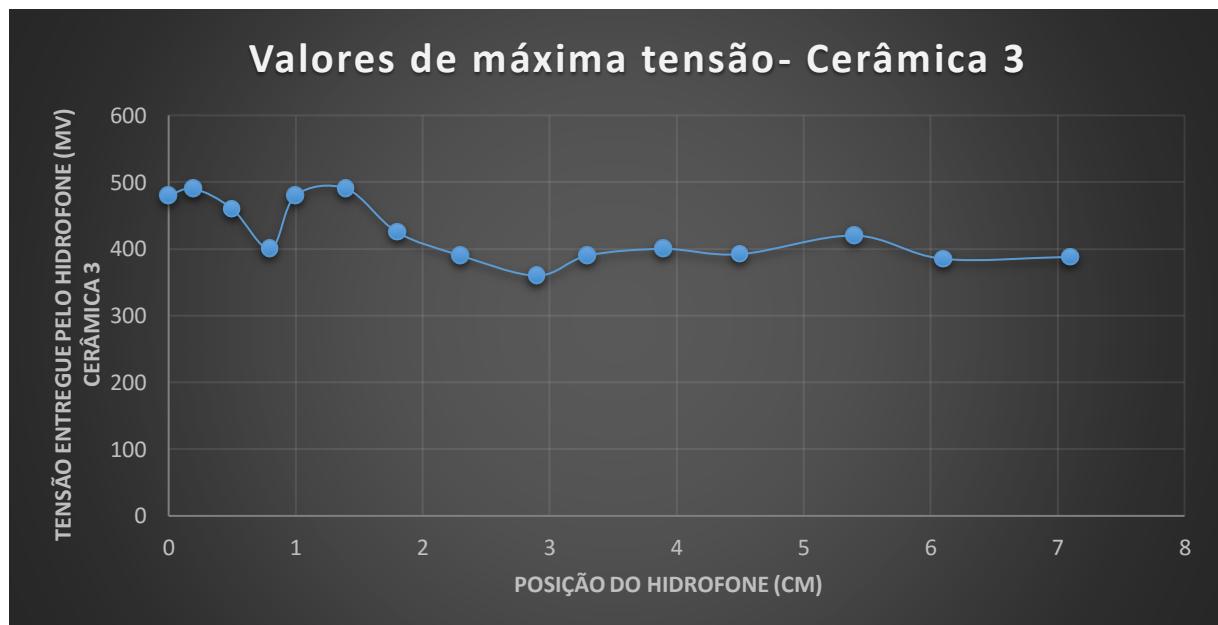


Figura 20 Valores máximo de tensão para a cerâmica 3.

Feita a caracterização individual de cada cerâmica com o objetivo de estudar o campo acústico resultante dentro do tanque quando se tem mais de uma cerâmica

ligada ao mesmo tempo o procedimento descrito na Seção 4.3 foi utilizado.

Fixou-se o hidrofone no ponto 7,10 cm na direção da linha que forma 45º com as cerâmicas.

A Figura 21 mostra o sinal captura pelo hidrofone oriundo da cerâmica 1 e a Figura 22 mostra o sinal capturado pelo hidrofone oriundo da cerâmica 2. Por fim a Figura 23 mostra o sinal recebido pelo hidrofone ao se ligar a cerâmica 1 e 2 ao mesmo tempo. Observa-se que a intensidade do sinal capturado pelo hidrofone no caso que se tem somente uma cerâmica ligada, e com o hidrofone posicionado na linha que forma 45º com as duas cerâmicas é menor que a intensidade quando se está caracterizando a cerâmica com o hidrofone posicionado na direção axial da mesma. Isso se deve ao fato que o hidrofone pontual captura o sinal recebido somente na ponta, logo se esta está disposta frontalmente para a cerâmica, um mesmo sinal apresentará maior intensidade do que quando a mesma está disposta em um ângulo de 45º em relação a cerâmica, ou seja, o transdutor não receberá inteiramente o sinal.

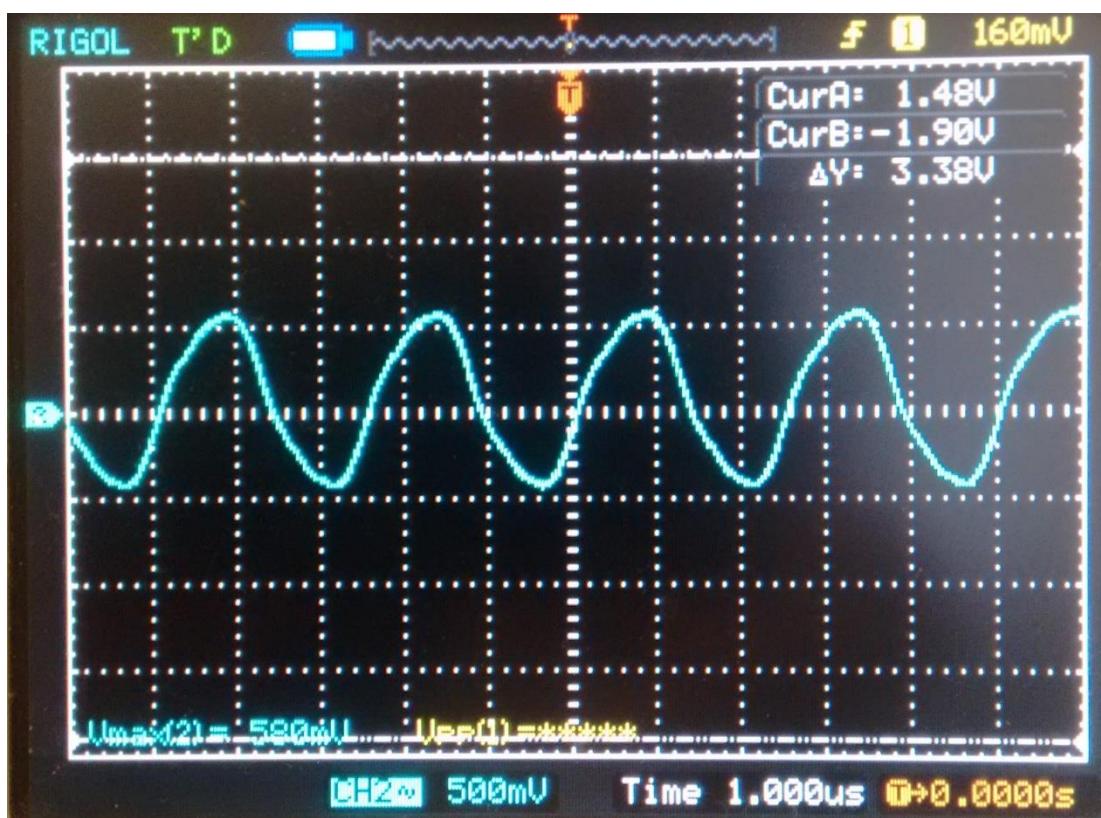


Figura 21 Sinal recebido pelo hidrofone oriundo da cerâmica 1.

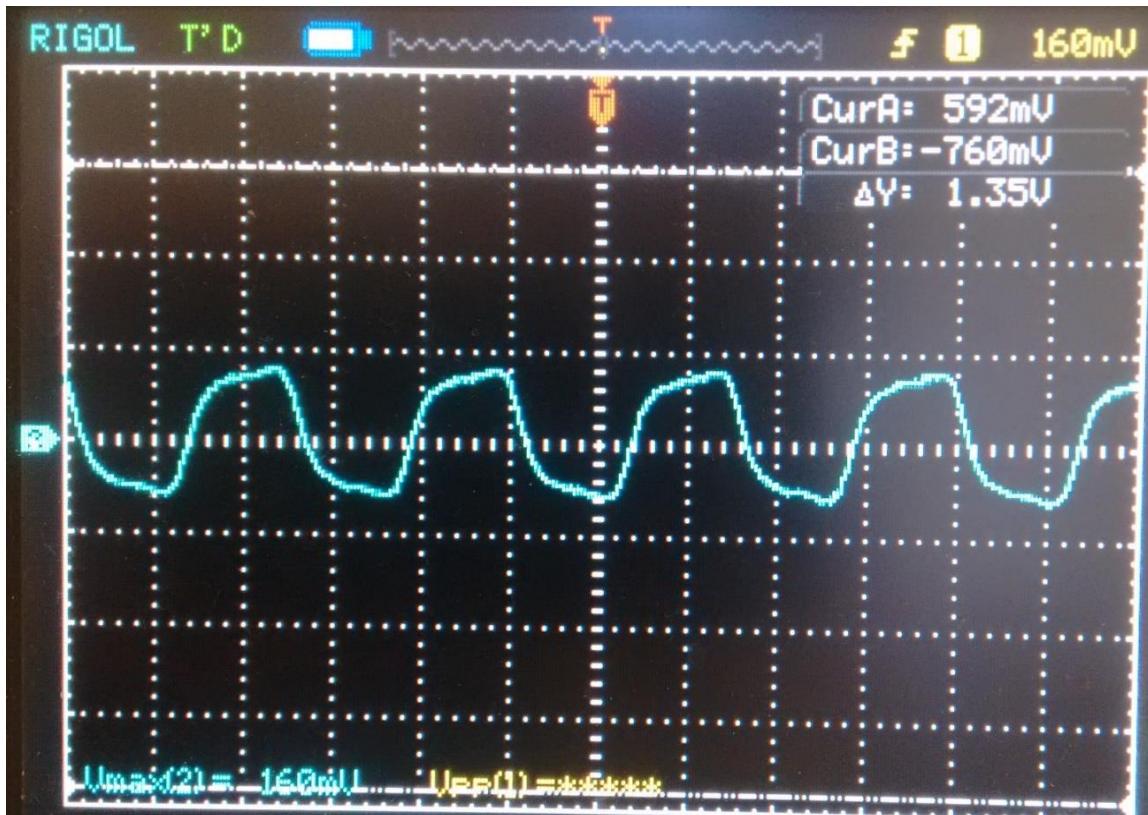


Figura 22 Sinal recebido pelo hidrofone oriundo da cerâmica 2.

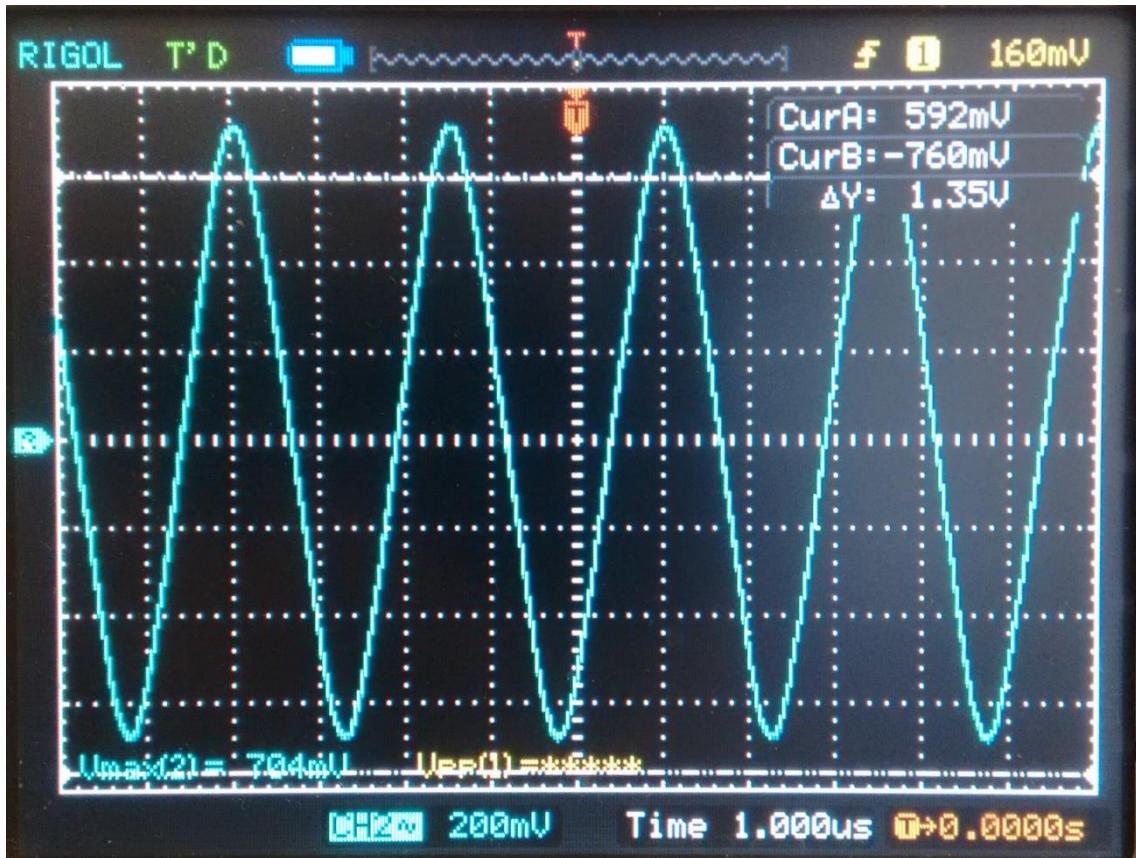


Figura 23 Sinal recebido pelo hidrofone oriundo da cerâmica 1 e 2 juntas.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao se encontrar a resposta axial das três primeiras cerâmicas, pode-se notar que a tensão média máxima entregue pelo hidrofone foi diferente para as três. A Tabela 7 mostra os valores de tensão média máxima entregue pelo hidrofone para cada cerâmica e a Figura 24 mostra o gráfico com valores de máximos da cerâmica 1, 2 e 3.

Tabela 7 Valor da tensão media máxima entregue pelo hidrofone para a cerâmica 1, 2 e 3.

	Cerâmica 1	Cerâmica 2	Cerâmica 3
Tensão Média entregue pelo Hidrofone (mV)	834	293	424

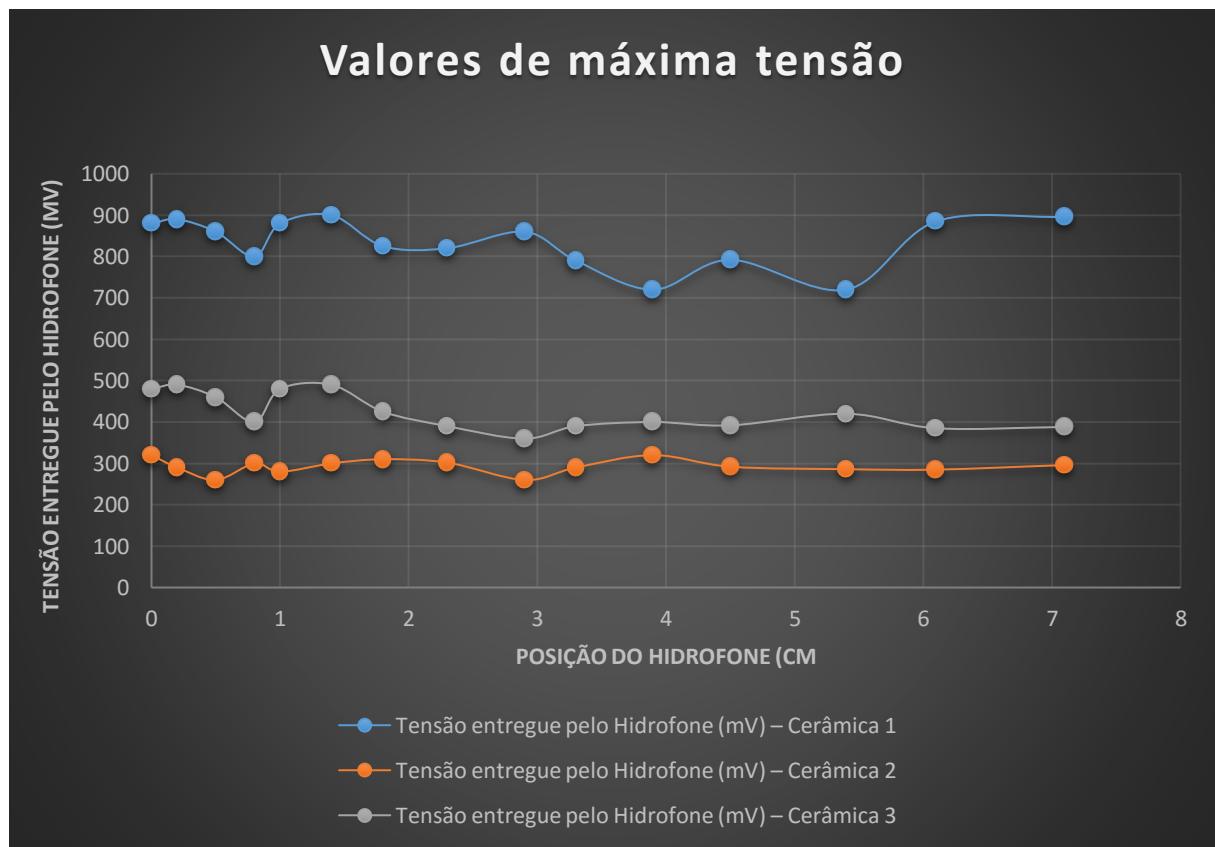


Figura 24 Valores de máximo entregue pelo hidrofone para as cerâmicas 1, 2 e 3.

Essa diferença de valor esta relacionada com o fato do posicionamento do hidrofone na direção axial de cada cerâmica ter sido feita manualmente, logo existe um erro ao se localizar o eixo de simetria da mesma. Essa imprecisão ao se localizar

o eixo de simetria da cerâmica faz com que o hidrofone possa estar posicionado fora do eixo de simetria. Nesta condição, o que se esta medindo são lóbulos secundários que possuem menor intensidade acústica, logo a tensão medida pelo hidrofone será menor. A Figura 25 mostra o formato da frente de onda do ultrassom.

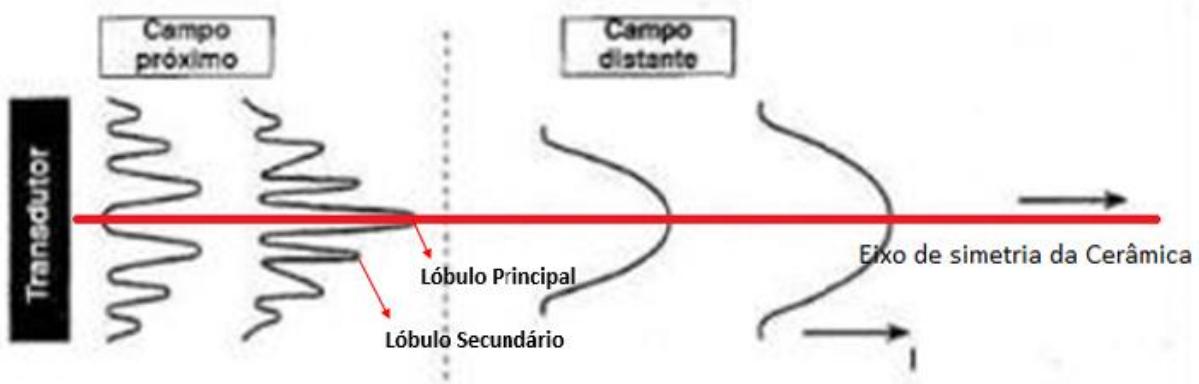


Figura 25 Frente de onda do ultrassom. Adaptada de [13]

No caso destas medições observa-se que para as cerâmicas 2 e 3, o hidrofone foi posicionado fora do eixo de simetria das mesmas, resultando em uma menor tensão média máxima entregue pelo hidrofone.

Utilizando o segundo método de medição descrito na Seção 4.3, verifica-se que a tensão entregue pelo hidrofone para a cerâmica 1 quando o mesmo é posicionado em uma linha que forma 45° com as duas cerâmicas é menor do que quando este é posicionado no eixo de simetria da cerâmica. Isto se deve ao fato da ponta do hidrofone, que é a responsável por fazer a leitura da intensidade acústica da onda oriunda da cerâmica 1 e converte-la em tensão, estar recebendo parcialmente o sinal vindo da cerâmica 1, ou seja, essa angulação de 45° faz com que parte do sinal não atinja a ponta do hidrofone, resultando em uma menor tensão entregue pelo hidrofone. O mesmo ocorre quando se faz a medida para a cerâmica 2. Mesmo sendo menor a intensidade acústica, verifica-se que os campos acústicos se somam vetorialmente quando se liga duas cerâmicas juntas. As intensidades de campos acústicos observadas são em torno de 580mV para a cerâmica 1 e 160mV para a cerâmica 2. E o campo acústico resultante observado para as cerâmicas 1 e 2 foi em torno de 700mV.

Um ponto importante a se notar é que o tamanho do tanque (diâmetro de 9,5cm) não permitiu que a transição entre o campo próximo e o campo distante fosse

observada, pois tem-se que a transição entre o campo próximo e campo distante ocorre a uma distância de $d = \frac{D^2}{4\lambda}$, da cerâmica, com D sendo o diâmetro da cerâmica e λ sendo o comprimento da onda do ultrassom. Logo como a cerâmica possui diâmetro de 3cm e o comprimento de onda do ultrassom é dado por $\lambda = c/f$, sendo $f=550\text{kHz}$ e $c=1540\text{ m/s}$, o valor teórico de d onde ocorre a transição entre os campos é de aproximadamente 8,15cm, sendo assim, como esse valor é muito próximo do diâmetro do tanque não foi possível observar a transição entre os campos. Esse valor de distância d esta relacionado com a frequência que se excita a cerâmica. Como pode ser observado a frequência da onda quadrada usada para excitar a cerâmica foi de 550MHz, frequência esta que esta abaixo da frequência de ressonância da mesma. Esse valor foi usado na tentativa de se diminuir a distância d onde ocorre a transição entre os campos, para que se pudesse observar essa transição, pois para uma frequência de 2MHz essa distância d seria de aproximadamente 30cm. Foi observado experimentalmente que 550kHz é o menor valor de frequência onde a cerâmica ainda apresenta uma resposta que o hidrofone consegue converter a intensidade acústica da onda em tensão de maneira confiável. Abaixo desse valor de frequência a intensidade acústica que a cerâmica entrega é tão baixa que a tensão entregue pelo hidrofone se torna pequena a ponto de ser confundida com ruído, logo as medições se tornariam imprecisas. Entretanto, mesmo usando uma frequência de 550KHz, não foi possível observar experimentalmente a transição entre os campos.

7 CONCLUSÃO

O intuito deste trabalho é verificar o comportamento do campo acústico dentro do tanque projetado com 8 cerâmicas. O resultado que se esperava era a soma dos campos acústicos das cerâmicas quando estas fossem ligadas simultaneamente em fase. Mesmo realizando este procedimento somente para duas cerâmicas verificou-se que os campos acústicos oriundos das duas cerâmicas se somaram, portanto, mesmo não se estudando o campo acústico gerado pelas 8 cerâmicas, há indícios para se afirmar que estes se somam, possibilitando assim a utilização deste tanque para aplicações na química, como catalise de reações ou mesmo para se estudar o fenômeno da sonoluminescência.

Não foi possível de se observar a transição entre o campo próximo e o campo distante neste tanque, como solução a este problema, sugere-se a utilização de uma cerâmica com a frequência de ressonância menor ou um tanque com diâmetro maior, pois assim os efeitos em relação ao campo próximo e campo distante poderão ser estudados com maior precisão.

Outro fator importante para um estudo mais aprofundado é melhorar o sistema de medição das intensidades acústicas, pois como a mesma foi feita manualmente isso gera muito ruído e ocasiona muitos erros de medição, devido ao fato de não se conseguir movimentar o hidrofone exatamente na direção axial das cerâmicas. Logo um software de aquisição de dados e um sistema de alta precisão para se movimentar o hidrofone se tornam necessários para alcançar resultados mais precisos.

Por fim a utilização de um amplificador se faz necessário pois somente o gerador de sinais não é suficiente para alimentar mais de duas cerâmicas ao mesmo tempo, de modo que se mantenha um sinal de entrada fixo a 5Vpp. Logo se o sinal de entrada for menor que 5Vpp a resposta ao estímulo que a cerâmica irá fornecer será muito baixa, e isto resultada em uma tensão muito baixa entregue pelo hidrofone, acarretando assim em uma medida imprecisa devido ao fato desta poder ser confundida com ruído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barros, A.L. A física da Sonoluminescência. Disponível em: <<http://labfisica.yolasite.com/resources/Propaganda%20IC.pdf>>. Acesso em 16 de junho de 2016.
- [2] Braga, F.G. A Sono química. Disponível em: <<http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/589/article/3000794/pdf>>. Acesso em 16 de junho de 2016.
- [3] Tecnologia Radiológica, *Ultrassom - Conceito*. Disponível em: <http://www.tecnologiaradiologica.com/materia_usconceito.htm>. Acesso em 16 de junho de 2016.
- [4] Apostila do Módulo Básico do Curso de Mecânico de Manutenção de Aeronaves, *Princípio da inspeção*. Curso de Engenharia Aeronáutica, UNITAU, São Paulo, Tatuapé.
- [5] CADY, W.G. Piezoelectricity: an introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals. New York: McGraw-Hill, 1946. 806 p.
- [6] Trabalho apresentado a Disciplina de Ortodontia II do Curso de Mestrado em Ortodontia da Faculdade de Odontologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/GeovannaL_Cotta_RF1.pdf>. Acesso em 17 de junho de 2016
- [7] Jesus, F., Alexandrino, J., Evangelista, J., Carrara, J., 2014. *Tapete Piezoelétrico Gerador de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/GlauciaFernandes1/pdf-tcc-pronto>>. Acesso em 18 de Junho de 2016.
- [8] Guerisoli, D.M.Z., 2004. *Ultra-Som*. Disponível em: <<http://www.forp.usp.br/restauradora/us01.htm>>. Acesso em 18 de junho de 2016

[9] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens and J.V. Sanders. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons: New York, 1982.

[10] Fisica UFPB, *Ondas-Unidade III*. Disponível em: <<http://www.fisica.ufpb.br/~edmundo/Fisica2/Unidade-III-Ondas.pdf>>. Acesso em 19 de junho de 2016.

[11] Takahashi, R. *Fisioterapia esportiva*. Disponível em: <<http://www.ricardotakahashi.com.br/ultracomportamento.html>>. Acesso em 19 de junho de 2016

[12] Filho, A.M. A equação de Bessel. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos917/equacao-bessel/equacao-bessel2.shtml>>. Acesso em 17 de junho de 2016

[13] Kitchen, Sheila. *Eletroterapia baseada em evidências*. 11^a edição. 2003