



Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física "Gleb Wataghin"- IFGW
F 809A- Instrumentação

ONDAS DE CHOQUE E VELOCIDADE SUPERSÔNICA



Aluna: Heid Holland



Orientador: Prof. Dr. Munemasa Machida

Técnico Responsável : Douglas Cioban

Coordenador: Prof Dr. José J. Lunazzi

ÍNDICE:

1. RESUMO
2. INTRODUÇÃO
3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO
4. TEORIA
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS
6. ORIGINALIDADE
7. CONCLUSÃO
8. BIBLIOGRAFIA

1. RESUMO

As ondas de choque são ondas mecânicas com frequência e densidade de energia altas, comuns na natureza, mas que acabam por parecer algo confuso e complicado principalmente devido à física que as engloba.

Buscamos com este experimento tornar conceitos como estes mais familiares principalmente para o aluno do ensino médio e mostrar que com materiais simples é possível visualizar estes acontecimentos na prática.

2. INTRODUÇÃO

Um avião supersônico gera uma onda de choque em três dimensões. Já num bote, o motor ao “rasgar” as águas gera uma onda na proa em duas dimensões. Assim, quando ondas esféricas se superpõem formando um cone, gera-se uma onda de choque.

Quando o cone de ar comprimido que se forma após a passagem de um avião supersônico chega a um observador em terra, este escuta um violento barulho conhecido como estampido sônico. Este barulho ocorre, pois as ondas de ar são mais rápidas que a velocidade do som.



O som se propaga através do ar com uma velocidade pequena comparada a velocidade da luz pelo fato de as moléculas que se movimentam terem que se chocar umas com as outras a fim de propagar a onda longitudinal de pressão. A luz se propaga na velocidade de 300.000 km por segundo enquanto que as ondas

sonoras circulam no ar à razão de 340,9 metros por segundo.

Em dias quentes o som se propaga com mais velocidade que em dias frios pelo fato de o ar quente ser mais denso que o frio.

As ondas geradas pelo movimento de objetos nunca se propagam diante deles e sim, para trás já que o objeto se move igual ou mais rápido do que elas.

Na passagem da frente da onda de choque o meio sofre uma variação abrupta na pressão, densidade e temperatura.

Uma onda de choque pode produzir em determinadas circunstâncias condensação do vapor de água do ar (a rápida compressão e descompressão do meio acaba por esfriá-lo, condensando assim o vapor d'água) formando com isto uma borbulha depois do objeto. Assim, a enorme nuvem que se forma quando um avião ultrapassa a barreira do som é provocada pela onda de som que, ao avançar, comprime a umidade do ar, como visto anteriormente. Esta nuvem recebe o nome de "cone de Mach".

Durante a última Guerra Mundial, foi observado que marinheiros nadadores, os quais foram expostos a explosões de bombas, apresentavam-se intactos externamente, porém, em seus tecidos internos apareciam sinais de regeneração celular ou leve trauma, o que foi atribuído às ondas de choque propagadas dentro da água, desencadeadas por estas explosões. Assim, surgiu, rapidamente, o interesse pelos efeitos biológicos e uso médico destas ondas. Hoje em dia as ondas de choque são utilizadas, por exemplo, na urologia para destruir cálculos renais e no tratamento de tendinites. Isto mostra que este não é um assunto apenas restrito à física e sim, que já foi englobado na vida cotidiana sem que nos déssemos conta disto.

3. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Vamos imaginar uma onda viajando em um meio compressivo com uma velocidade c (velocidade do som no meio) dada por:

$$\sqrt{\frac{P}{\rho}} = \sqrt{\gamma RT} \quad (1)$$

onde γ é a razão dos calores específicos, P é a pressão, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura.

No lugar onde a onda estiver passando a pressão será um pouco maior que na região não perturbada de acordo com a teoria de propagação acústica em meio compressivo. Se colocarmos uma outra onda para viajar logo atrás da frente da primeira, esta estará viajando em uma região de maior pressão, portando com velocidade $c_1 > c$.

Se formos acrescentando ondas, teremos $c < c_1 < c_2 < c_3$ e, se tivermos algum fluxo de partículas, com o passar do tempo uma frente de onda vai alcançando a outra até formar uma onda com velocidade de grupo maior que a do som no meio. Esta onda é chamada onda de choque.

Em condições ideais, a frente da onda de choque não muda sua forma com o passar do tempo. Mas, como nem sempre é possível manter o sistema em condições ideais, a onda de choque acaba decaindo rapidamente com a distância, mudando gradualmente a uma onda sonora.

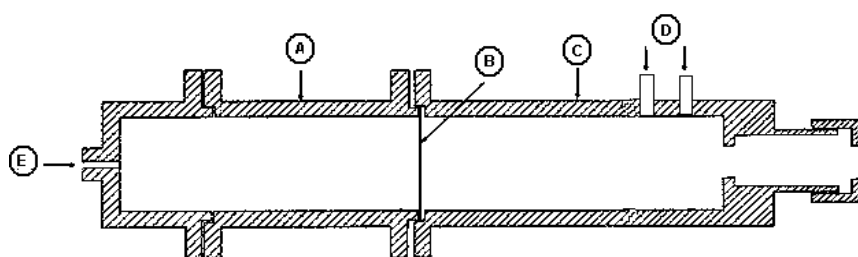
Um dos métodos de produzir uma onda de choque experimentalmente é através de um tubo de onda de choque. Este consiste basicamente de um cilindro rígido dividido em duas partes por meio de um diafragma colocado perpendicularmente ao eixo, no qual iremos colocar um círculo cortado de uma folha de papel alumínio.

Os círculos de alumínio que serão utilizados no diafragma foram obtidos de tampas de marmitex.

Estas folhas de alumínio proporcionarão uma diferença de pressão entre as duas partes do tubo, onde a região de alta pressão é conhecida como câmara de compressão e a de baixa pressão como câmara de expansão.

Para este experimento, o tubo de onda de choque foi feito em 2 segmentos, um de alumínio e o outro de latão, como mostra a figura seguinte:

Tubo de onda de choque



- A - câmara de compressão de alumínio
- B - diafragma
- C - câmara de expansão de latão
- D - PZTs
- E - entrada do gás

Fig.1: esquema do tubo de onda de choque.

A injeção do gás será feita através de um orifício de 1mm de diâmetro existente na parte final da câmara de compressão.

A câmara de compressão terá sua pressão aumentada com a introdução do gás enquanto a câmara de expansão será deixada à pressão atmosférica.

A pressão na câmara de compressão tende a aumentar até que romper o diafragma. Neste ponto a pressão tende a se igualar nas duas câmaras por meio de uma onda de choque viajando para dentro da câmara de expansão, e uma onda de rarefação viajando para dentro da câmara de compressão.

Foram introduzidos no final da câmara de expansão e ligados a um osciloscópio tipo *Tektronix TDS220* dois dos chamados PZTs (que está explicado mais detalhadamente abaixo). Estes detectam a passagem da onda de choque em tempos diferentes. Logo, a onda passará pelo primeiro PZT e em seguida pelo segundo. O tempo gasto pelo sinal para ir do primeiro até o segundo PZT define o tempo útil para medição da velocidade da onda de choque e, conseqüentemente da velocidade do som já que é conhecida a distância entre estes dois PZTs.

Neste experimento foi utilizado um PZT de tipo cerâmico.

As dimensões do tubo de onda de choque são: 60,0 cm de comprimento e 5,6 cm de diâmetro. A distância entre os dois PZTs é de 3,0 cm.

Abaixo está a fotografia tirada do experimento montado e com todos os seus componentes funcionando:



Fig 3: Foto da montagem experimental com osciloscópio e cilindro de gás ao fundo

4. TEORIA

As equações que descrevem a onda de choque segundo [7] são:

$$\frac{P_1}{P_0} = \omega_1 = M^2(1 + \mu) - \mu \quad (2)$$

$$\frac{u}{c_0} = \frac{(1 - \mu)(\omega_1 - 1)}{\sqrt{(1 - \mu)(\omega_1 + \mu)}} \quad (3)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{\omega_1(1 + \mu\omega_1)}{\mu + \omega_1} \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (5)$$

onde:

P_1 – pressão atrás da onda de choque
 P_0 – pressão do meio não perturbado
 μ – velocidade do fluxo atrás da onda de choque
 c_0 – velocidade do som no meio não perturbado
 T_1 – temperatura atrás da onda de choque
 T_0 – temperatura no meio não perturbado
 u – velocidade da onda de choque
 M – número de Mach, $M=U/c_0$

Cerâmicas piezoelétricas

Certos cristais dielétricos como quartzo, podem ser polarizados não somente quando um campo elétrico externo é aplicado, mas também quando sujeitos a uma compressão mecânica. Neste caso a polarização é conhecida como efeito piezoelétrico, ou seja, podemos gerar eletricidade se uma pressão for aplicada neste material.



Fig 4: disposição dos PZTs no tubo de onda de choque
(com fios verdes o primeiro PZT e com fios vermelhos o segundo)

Atualmente estes materiais são conhecidos como PZT e correspondem a soluções sólidas de titanato de chumbo (PbTiO_3) ou zirconato de chumbo (PbZrO_3).

Para tornar o PZT um material com propriedades piezoelétricas é preciso submetê-lo a um campo elétrico com polarização da ordem de 4 MV/m a uma temperatura de 200°C por cerca de 1 hora.

Este tipo de material pode ser facilmente encontrado em acendedores manuais para fogões geralmente chamados de “magiclick”.

A constante dielétrica do PZT é:

$$\varepsilon = 1,5 \times 10^{-8} \text{ farad/m,}$$

sendo a capacitância dada por:

$$C = \varepsilon A/L, \quad (6)$$

onde A é a área do PZT e L é o seu comprimento.

Vamos supor, neste caso, $A = 1,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ e $L = 0,9 \times 10^{-3} \text{ m}$. Logo, a capacitância será:

$$C = 2,17 \times 10^{-10} \text{ farad.}$$

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante a realização de testes com o experimento foi possível vê-lo funcionando perfeitamente. A montagem experimental é exatamente o que foi mostrado em figuras anteriores.

Utilizamos durante a fase de testes dois tipos de gases: ar medicinal e argônio. A única diferença entre eles é que o ar medicinal precisa de uma pressão um pouco superior (em torno de 15 libras) que a pressão exigida pelo argônio (em torno de 8 libras). Durante a apresentação estaremos utilizando argônio pela facilidade no transporte do mesmo.

Um dos grandes problemas que tivemos foi com as células piezoelétricas. Reaproveitamos uma das células que não estava sendo utilizada no laboratório e que havia sido colada com cola condutora que torna o sinal elétrico muito mais “limpo” (diminui a captação de ruído) e esta funcionou muito bem. O problema maior foi com a célula que confeccionamos depois, pois não havia mais a cola condutora e, ao colá-la com outro tipo de adesivo, diminuimos a sensibilidade do PZT e aumentamos sua suscetibilidade à captação de ruídos. Para piorar, na última semana de testes descobrimos que este PZT estava com seu vidro trincado e, devido ao pouco tempo restante para a confecção de outro, os sinais captados estão saindo relativamente distorcidos.

As ondas sonoras são como ondas senoidais e podem ser notadas antes da onda de choque.

Já a onda de choque é caracterizada por um pico para baixo bem demarcado na onda senoidal.

Não foi possível visualizar a condensação de vapor do ar, pois a pressão utilizada, juntamente com o comprimento do tubo são relativamente pequenos para comprimir e expandir o ar a ponto de esfriá-lo e tornar visível a sua condensação.

Utilizamos como diafragma dois tipos de folha de alumínio: folha de papel alumínio comum usado em cozinha, que chamaremos de folha fina, e folha de marmitex cuja espessura é um pouco maior que a “folha fina”, que chamaremos “folha grossa”.

Quando aplicamos uma pressão na câmara de compressão, após algum tempo o diafragma se rompe com o intuito de tentar igualar as pressões nas duas partes do tubo e, com isto, uma onda de choque se forma e esta se expande pela câmara de expansão. Os PZTs captam esta onda e a transformam num sinal elétrico que pôde ser captado com a ajuda de um osciloscópio.

Temos testado o experimento de duas formas: com a frente do tubo de onda de choque aberto e fechado. Com o tubo fechado o ruído resultante do rompimento do diafragma é quase imperceptível. Logo, conseguimos registrar o sinal elétrico e com ele determinar as velocidades, mas o estampido sônico não é possível de ser ouvido. Quando realizamos o experimento com o tubo aberto, além de conseguirmos captar os sinais elétricos e com eles determinar as velocidades ainda é possível ouvir o estampido sônico que corresponde a um barulho muito alto causado pelo ar comprimido que vem atrás da onda e por as ondas de ar serem mais rápidas que a velocidade do som.

Peças importantes sem as quais não seria possível realizar com precisão o experimento são os o-rings que servem para vedar as entradas de ar e isolar os PZTs do contato direto com o tubo de onda de choque.

Os dados registrados pelo osciloscópio *Tektronix TDS220* são apresentados abaixo em forma de gráfico confeccionados através do aplicativo *Microcal Origin 6.0*. Através destes gráficos foi possível calcular a velocidade da onda de choque e da onda sonora que estão descritas na tabela abaixo.

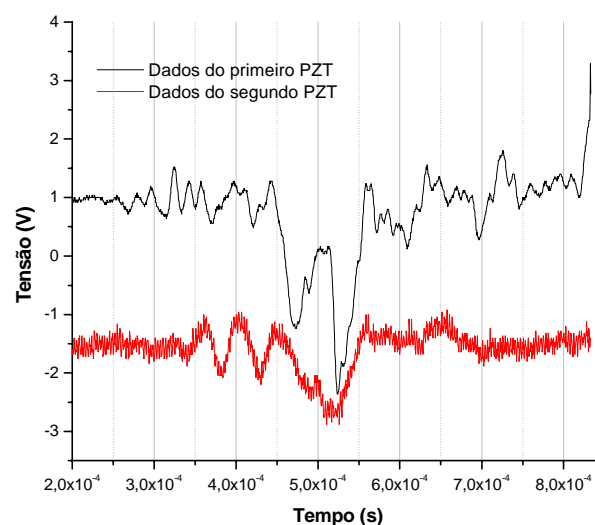


Gráfico1: Tensão (V) x Tempo (s) para folha fina.

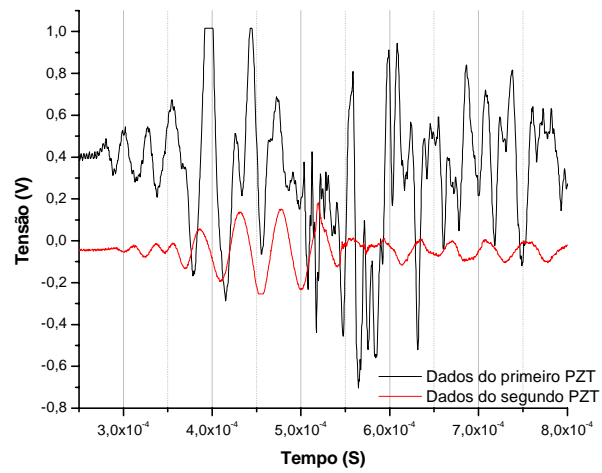


Gráfico 2: Tensão (V) x Tempo (s) para folha grossa.

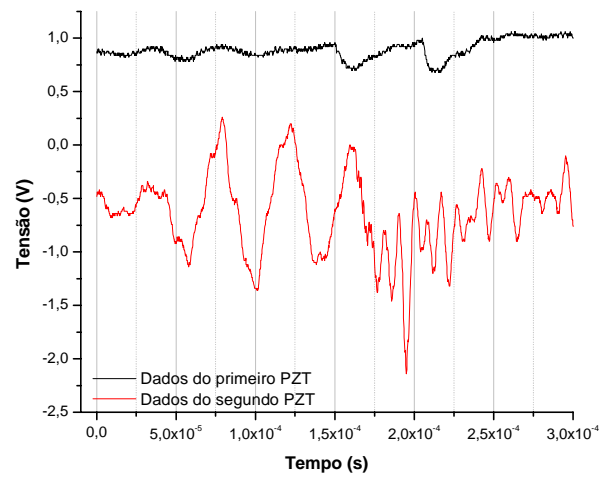


Gráfico 3: Tensão (V) x Tempo (s) para folha fina .

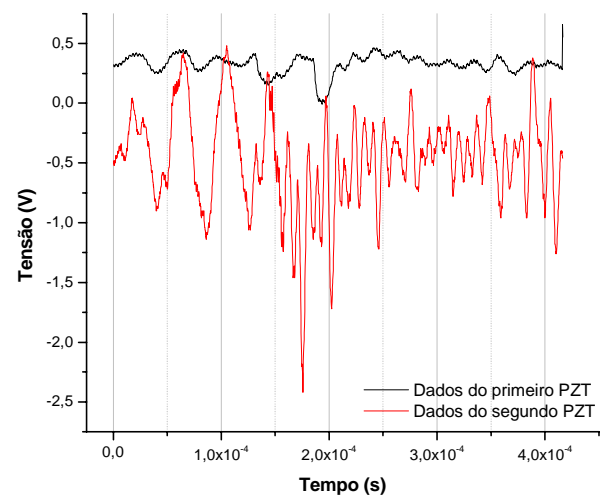


Gráfico 4: Tensão (V) x Tempo (s) para folha grossa.

Tabela 1: Valores das velocidades da onda de choque e da onda sonora

	Onda de choque (m/s)	Onda sonora (m/s)
Gráfico 1	600,0	272,7
Gráfico 2	832,7	442,4
Gráfico 3	750,0	428,6
Gráfico 4	898,0	362,0

Analisando os gráficos e os valores obtidos para as velocidades vemos que:

- O gráfico 1 apresenta muito ruído no sinal captado pelo segundo PZT devido à trinca que foi detectada em seu vidro. Este ruído contribuiu para que o valor da velocidade do som fosse um pouco inferior ao valor conhecido;
- O gráfico 2 apresenta bastante uniformidade entre as duas curvas, apenas evidenciando que a curva captada pelo segundo PZT apresenta uma sensibilidade menor que a captada pelo primeiro;
- O gráfico 3 mostra que ao tentarmos diminuir a escala para que o segundo PZT possa captar melhor os dados, a curva captada pelo primeiro sai prejudicada pois perde seus detalhes mas mesmo assim contém dados condizentes com os esperados;
- O gráfico 4 também obtido com a escala diminuída mostra que utilizando a folha grossa conseguimos captar sinais mais sensíveis por ambos PZTs que com a folha fina como foi visto no gráfico 3.

Assim, fica claro que utilizando folhas de alumínio com espessuras maiores, o que faz com que a pressão na câmara de compressão fique confinada por um tempo maior, conseguimos obter sinais mais fortes em ambos PZTs.

Utilizando folhas finas vemos que a sensibilidade é muito menor.

Nos gráficos foi possível notar que as ondas sonoras são bem demarcadas no começo de cada um e, quando vemos um pico para baixo em cada um deles temos então a onda de choque.

Os ruídos captados no osciloscópio contribuíram para que os dados obtidos destoassem um pouco dos valores conhecidos das velocidades.

6. ORIGINALIDADE

Após muitas pesquisas não foi encontrado nenhum relato de que este experimento já tenha sido realizado. Apenas foi encontrado um equipamento semelhante a este que já foi utilizado para calibrar uma sonda de pressão num experimento sobre sistemas lineares de confinamento magnético de plasma.

7. CONCLUSÃO

Contudo, conseguimos obter valores bem próximos aos valores conhecidos das velocidades das ondas de choque e sonora.

Vimos que a diferença na espessura das folhas de alumínio contribui para que o diafragma demore mais ou menos para se romper e com isto os valores das velocidades variem para mais ou menos de acordo com a pressão exercida.

As diferenças nos valores obtidos também podem ter variado devido ao fato já citado anteriormente que as ondas sonoras variam com a temperatura e, como os experimentos foram realizados em diversos dias com certeza este fato influenciou.

Com este experimento foi possível mostrar as ondas de choque e a velocidade supersônica com era esperado.

Portanto, concluímos que um experimento relativamente simples como este é capaz de tornar familiar não só ao aluno do ensino médio, conceitos físicos que estão presentes no nosso dia a dia e que nem nos damos conta.

Concluímos também que o experimento foi realizado com sucesso e que os resultados esperados foram obtidos.

Por último, gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Munemasa Machida pelo grande apoio e dedicação em tudo que esteve ao seu alcance e ao técnico Douglas Cioban pela colaboração na montagem experimental e dedicação para que tudo saísse da melhor forma possível, que foram pessoas importantes na realização deste experimento.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.angelfire.com/empire/seigfrid/Ondasdechoque.html>;
- [2] <http://www.junior.te.pt/servlets/Bairro>;
- [3] http://www-sbf.if.usp.br/rbef/Vol25/v25_74.pdf;
- [4] www.devicelink.com/company98/category/Electronic_Components;
- [5] www.darpa.mil/dso/thrust/matdev/chap/briefings/Hackenberger2.pdf;
- [6] W.P.Mason – “Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics”;
- [7] Tese: “Construção e utilização de uma sonda de pressão em plasma”.
- [8] J.K.Wright – “Shock Tubes”, John Wiley & Sons;
- [9] R.H.Sabersky, A.J. Acosta and E.G.Hauptman – “Fluid Flow;