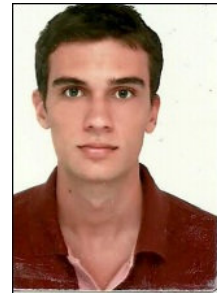


RELATÓRIO FINAL
F-530 – INSTRUMENTAÇÃO EM FÍSICA

**ESTUDO DE SUPERFÍCIE OSCILANTE ATRAVÉS DE SENSOR ÓPTICO A
FIBRA**



Nome: Marcelo Alonso Gouveia Ra: 092177

e-mail: alonsog@ifi.unicamp.br

ORIENTADOR: CRISTIANO MONTEIRO DE BARROS CORDEIRO (DEQ)

e-mail: cmbc@ifi.unicamp.br

Índice

- 1) Resumo**
- 2) Teoria**
- 3) Sistema de vibração**
- 4) Sensor à fibra**
- 5) Determinação da amplitude, velocidade máxima e frequência de vibração**
 - a) Amplitude**
 - b) Velocidade máxima**
 - c) Frequência**
- 6) O sensoriamento da placa**
- 7) Conclusão**
- 8) Referências**

1) Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar os modos normais de oscilação de uma superfície vibrante através de um sensor de vibração. Para realizar este estudo, foi necessário melhorar e compactar o sistema já produzido pelo aluno Juliano Grigoletto Hayashi, matriculado na disciplina de instrumentação ministrada no 1o semestre de 2010.

O projeto foi dividido em duas frentes: montagem de um sistema de vibração capaz de reproduzir as figuras de Chladni; construção do sensor de vibração a fibra.

Buscamos soluções alternativas para o sistema vibratório, seguindo planos de construção¹ encontrados na internet junto com especificações² de aparelhos comerciais.

Na montagem do sensor, utilizamos um laser He-Ne por ser estável e de fácil acoplamento na fibra. Tentamos compactar ao máximo o sensor usando lasers provenientes de canetas e laser de diodo, porém o primeiro apresentou atenuação acentuada da potência e o segundo apresenta padrão elíptico, que torna o acoplamento instável.

Após a montagem, fizemos medidas da vibração de um alto falante e comparamos com os resultados do sensor do Juliano⁵. Obtivemos boa relação entre os dados apresentados pelos sensores.

Para fazer a medida do sistema de vibração, precisamos aplicar uma superfície refletora sobre a placa, para garantir um bom reacoplamento do feixe de prova. Além disso, foi necessária a construção de um braço de manobra para o feixe de prova sobre a placa refletora.

Na medida de vibração da placa, escolhemos o modo de vibração referente à autofrequência de 478Hz para um estudo mais detalhado. Calculamos a amplitude, velocidade e frequência sobre pontos na placa. Mostramos o comportamento da placa sobre as curvas de Chladni e obtivemos uma margem de 3,6% de erro relativo entre a frequência aplicada na placa e a calculada a partir dos dados coletados.

2) Teoria

O fenômeno de interferência de ondas possui uma gama de aplicações. Neste projeto iremos utilizar um interferômetro à fibra para observar interferências causadas por caminhos ópticos diferentes. Essa diferença no caminho será definida pelo movimento de uma superfície espelhada fixada sobre outra superfície oscilante. Idealmente, podemos usar um interferômetro de Michelson para explicar o surgimento do fenômeno e como será feita a análise dos dados obtidos.

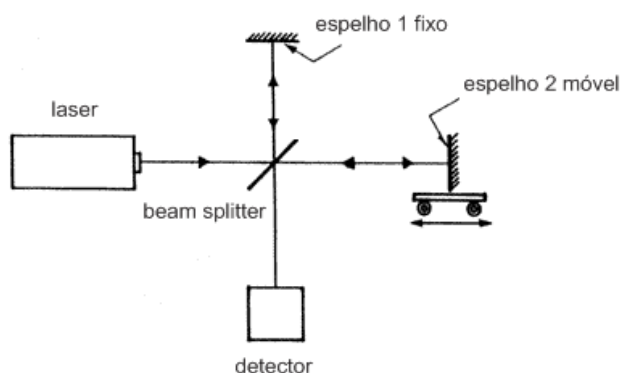


Figura 1: Interferômetro de Michelson

Observando a figura 1, para uma dada posição inicial do espelho 2, oscilando em torno dela, teremos um padrão de interferência por conta da variação do caminho óptico dos feixes (adição de uma fase relativa entre os feixes de mesma origem) para todo o curso da oscilação. Impondo que a fonte de onda é coerente, o feixe viajará duas vezes a distância percorrida pelo espelho móvel, a razão $2d/\lambda$ impõe interferência construtiva sobre o sensor quando esta for um inteiro. Ou seja,

$$2d = n\lambda \quad (1)$$

Para o caso de oscilações em torno de um ponto fixo, o padrão de interferência possui algumas peculiaridades a serem observadas: A curva que descreve a intensidade pela distancia percorrida é simétrica a partir da amplitude máxima. A partir disso, podemos inferir resultados como amplitude e velocidade máxima.

3) Sistema de vibração

O sistema foi construído com um gerador de função, osciloscópio, amplificador de áudio (15W RMS), um alto falante (8Ω, 10-15W) e uma placa plana de alumínio de aproximadamente 1 mm de espessura. Abaixo, temos o esquema de montagem.

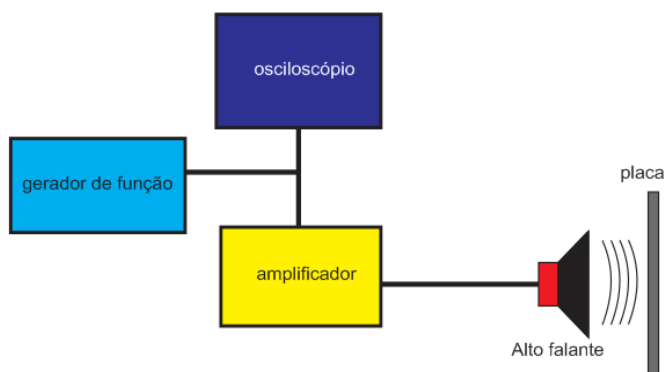


Figura 2: diagrama do sistema de vibração

A montagem do sistema, bem como a especificação do alto falante e dimensões da placa vibrante foram baseadas em um projeto¹, em especificações de equipamentos comerciais², e em um relatório final desta mesma disciplina⁶.

A seguir, temos uma tabela com alguns modos normais de vibração (figuras de Chladni) encontrados e suas respectivas autofreqüências

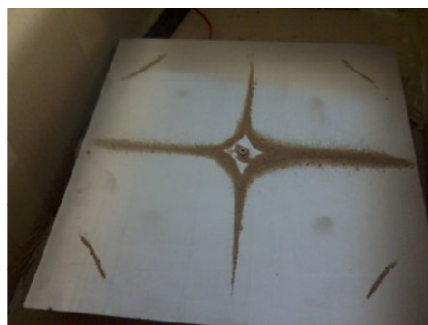
Tabela 1: Imagens dos modos normais de vibração e suas autofreqüências



150 Hz



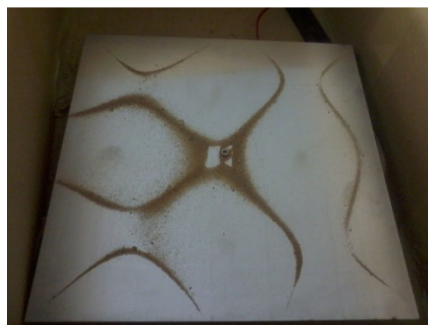
204 Hz



230 Hz



287 Hz



352 Hz

Para tornar a placa reflexiva, aplicamos uma folha refletora em parte da placa, onde fizemos as medidas de vibração do sistema.

4) O Sensor à fibra

O sensor se resume a um interferômetro construído a partir de um acoplador mono modo em 633nm de quatro braços, onde no primeiro é acoplado o feixe do laser, no segundo reacoplamos o sinal com um espelho, no terceiro usamos como feixe de prova e, no quarto, coletamos o sinal óptico.

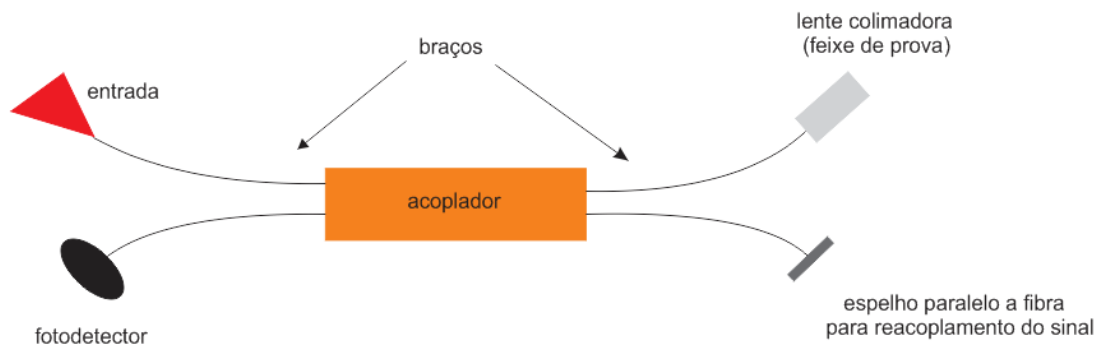


Figura 3: Esquema do acoplador usado como sensor interferométrico

Para tornar o sistema compacto, realizamos testes com lasers provenientes de canetas, potência média de 4mW, e concluímos que eram extremamente instáveis sob uso contínuo. Para contornar esta situação, adquirimos um laser de diodo com comprimento de onda de 635nm, com potência de saída 3mW. Conseguimos acoplar em fibra mono modo com uma objetiva fixada em um posicionador com perda de 9dB. Porém o acoplamento se mostrou instável a choques mecânicos. Como alternativa rápida e eficaz, recorremos a um laser He-Ne, 633nm, com potência média de 2,3mW. Abaixo, temos uma imagem da tentativa de acoplamento em fibra do laser de diodo:

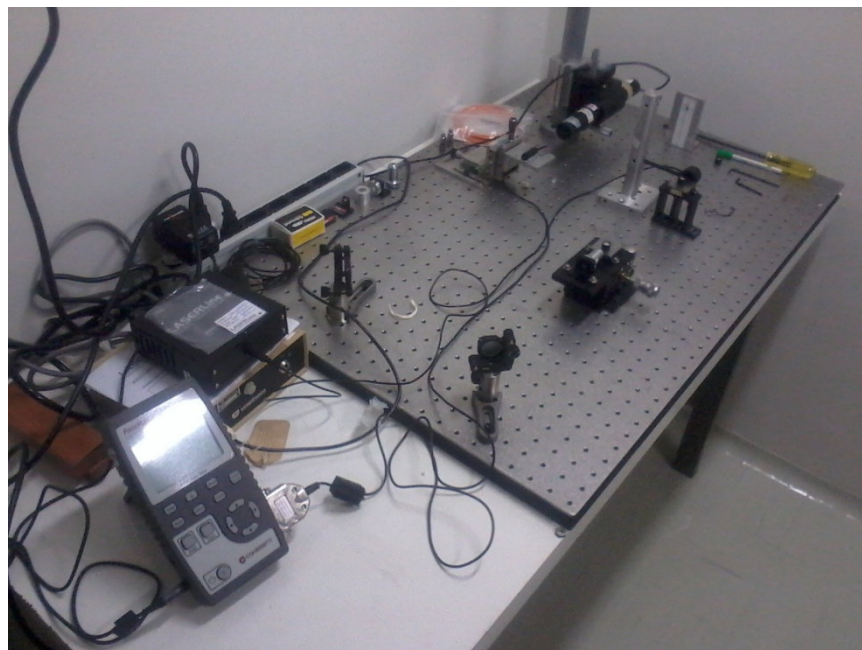


Figura 4: Sistema óptico para testes de acoplamento de laser em fibra.

A seguir temos uma imagem do sensor montado sobre uma prancha.

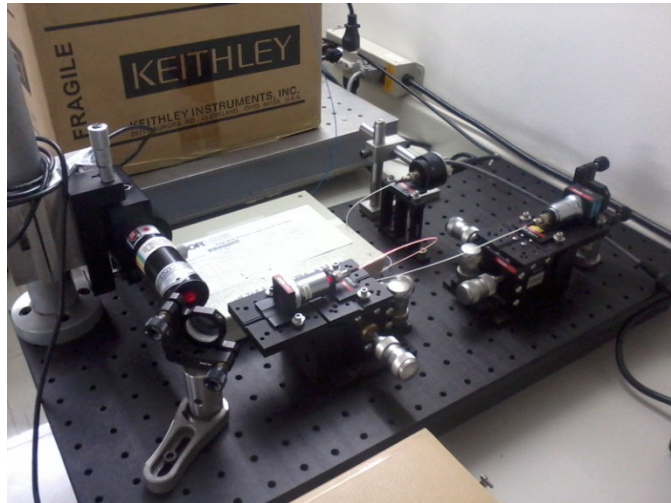


Figura 5: Sensor à fibra

Para comparar o sensor construído com os resultados apresentados no relatório final do aluno Juliano⁵, medimos a vibração de um alto falante com o sensor. Os resultados obtidos encontram-se abaixo.

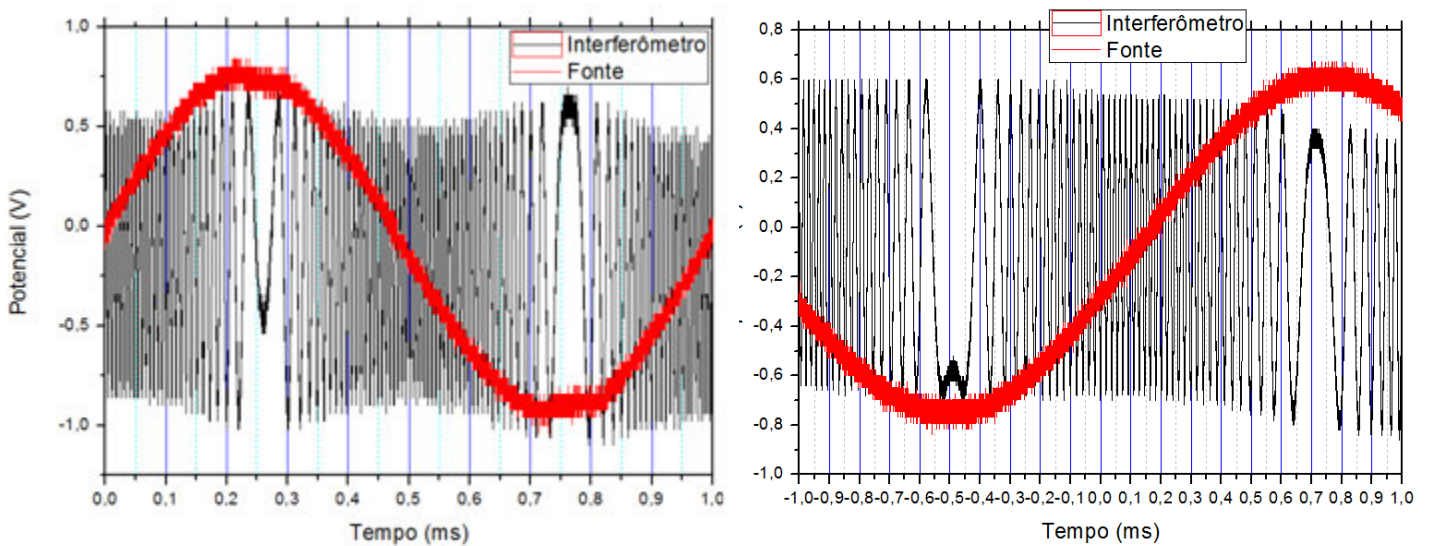


Figura 6: Resposta do sensor para 1000Hz (esquerda) e 388Hz (direita). As curvas vermelhas representam a onda aplicada no alto falante enquanto as curvas pretas representam o sinal óptico medido por um fotodetector.

A partir dessas curvas, podemos estimar a amplitude do alto falante, sua velocidade e frequência de vibração. A seguir, comentaremos como obter esses dados.

5) Determinação da amplitude, velocidade máxima e frequência de vibração

a) Amplitude

A partir da equação

$$A = \frac{m \cdot \lambda}{2} \quad (2)$$

Com A sendo a amplitude, m o número de picos (franjas claras) e λ o comprimento do laser utilizado. Essa equação é a condição de interferência construtiva. Uma implicação importante é a linearidade entre a amplitude e o número de franjas claras.

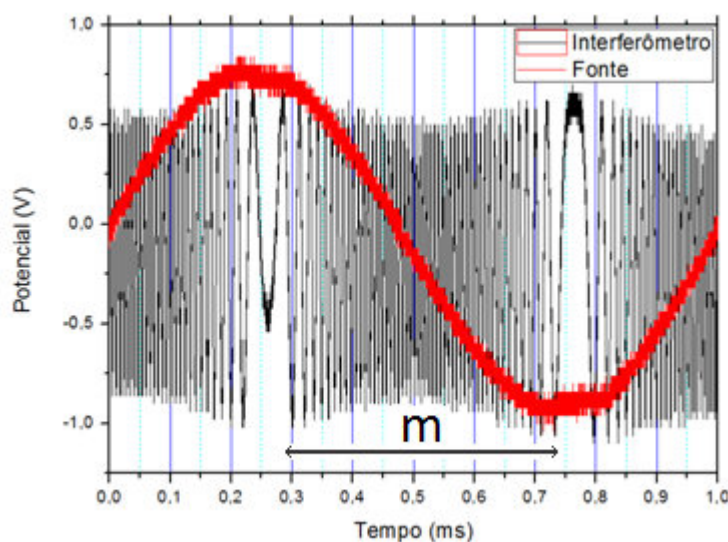


Figura 7: O valor m é obtido fazendo a contagem direta dos picos de intensidade.

b) Velocidade máxima

Observando a figura 8, definiremos a velocidade máxima a partir da seguinte expressão:

$$v_{max} = \frac{\lambda}{2\Delta t_{min}} \quad (3)$$

Sendo v_{max} a velocidade máxima de vibração e Δt_{min} o menor tempo de uma franja clara. Este tempo pode ser também estimado, com algum erro, como sendo a menor distancia entre um pico de maior intensidade e o próximo pico de menor intensidade. Ou, também, como sendo a metade do tempo entre duas franjas claras consecutivas. Neste relatório, usamos esta última como fonte dos dados (figura 9).

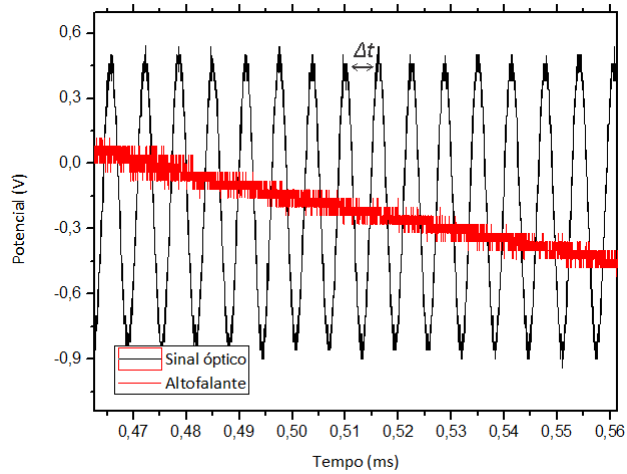


Figura 8: Obtenção do tempo de duração de duas franjas (uma clara e uma escura).

c) Frequência

Primeiramente, vamos analisar o termo de velocidade máxima de uma onda qualquer $\psi(\vec{r}, t)$.

Seja,

$$\psi(\vec{r}, t) = A \cdot \text{Cos}(kr - \omega t) \quad (4)$$

Derivando com relação a t , teremos a velocidade,

$$v = \frac{\partial \psi}{\partial t} = A \cdot \omega \cdot \text{Sen}(kr - \omega t) \quad (5)$$

Esta velocidade será máxima quando a função seno for máxima, portanto

$$v_{max} = A \cdot \omega \quad (6)$$

Com $\omega = 2\pi f$,

$$f = \frac{v_{max}}{2\pi A} \quad (7)$$

6) O sensoriamento da placa

Para realizar as medidas das vibrações da placa, foi construído um braço de manobra para o feixe de prova, uma vez que esse necessita varrer certa região da placa na vertical. Abaixo temos imagens do sensor ligado ao sistema de vibração. Abaixo temos o esquema do sensor junto com o sistema vibratório.

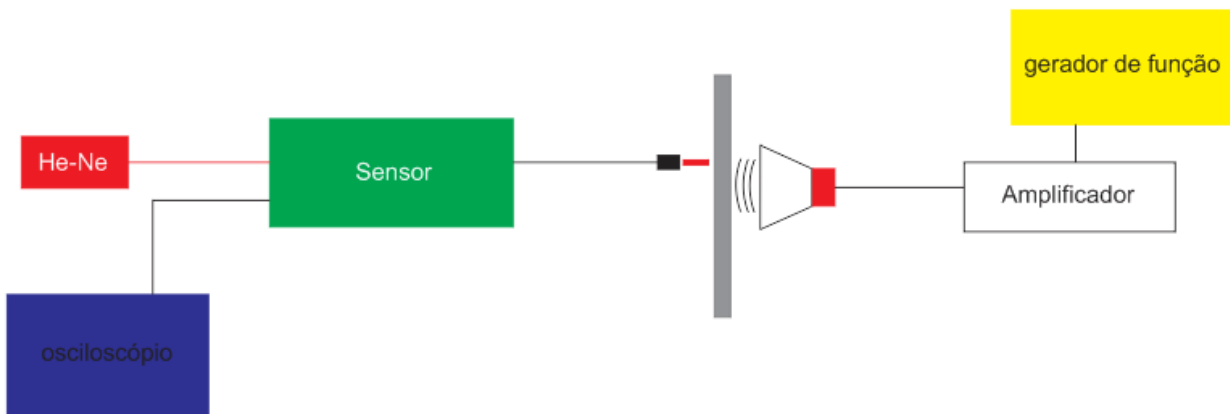


Figura 9: Diagrama do sistema vibratório e sistema óptico.

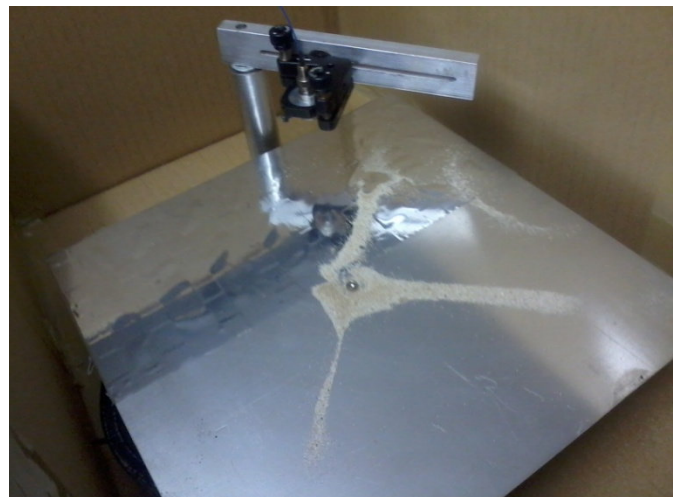


Figura 10: Sensor de vibração e sistema vibratório (esquerda). Placa e feixe de prova (direita)

Escolhemos um modo de vibração de autofrequência igual a 478Hz. Para esse estudo, fizemos medidas em seis pontos da placa, três sobre as curvas de Chladni e outros três em locais aleatórios fora das curvas. A curva apresentada por essa frequência e a posição dos pontos estudados encontra-se na figura abaixo.

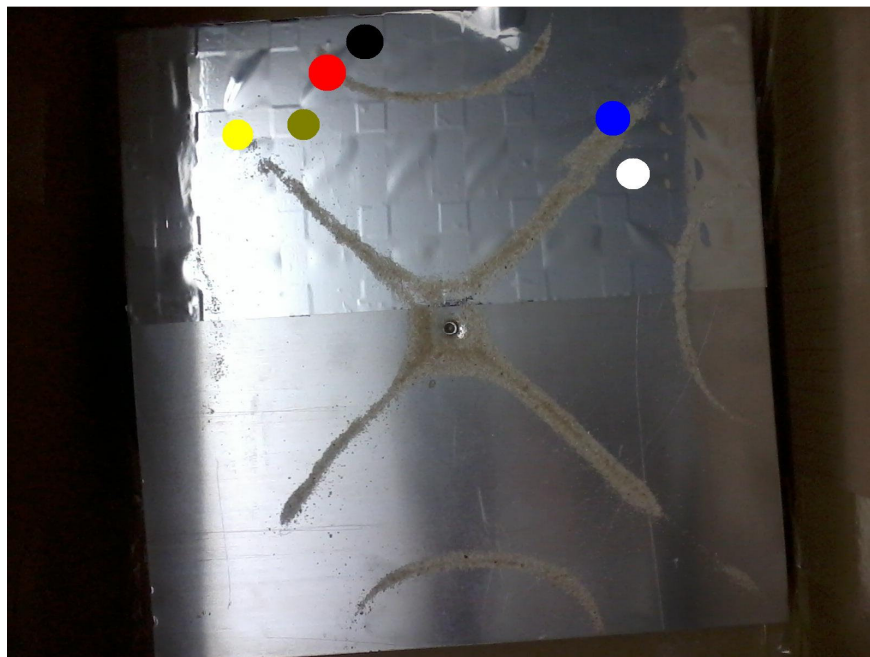


Figura 11: Modo referente à autofrequência 478Hz. Na figura estão inclusas as regiões sensoriadas. As regiões N_1 , N_2 e N_3 estão marcadas pelas cores amarela, vermelho e azul, respectivamente. Já as regiões V_1 , V_2 e V_3 estão marcadas pelas cores verde, preto e branco.

Na figura 11, as regiões de baixa amplitude (curvas de Chladni) que foram sensoriadas estão marcadas de amarelo (N_1), vermelho (N_2) e azul (N_3). Já as regiões fora das curvas, verde (V_1), preto (V_2) e branco (V_3). Abaixo, estão os dados coletados pelo sensor para cada região sobre as curvas de Chladni.

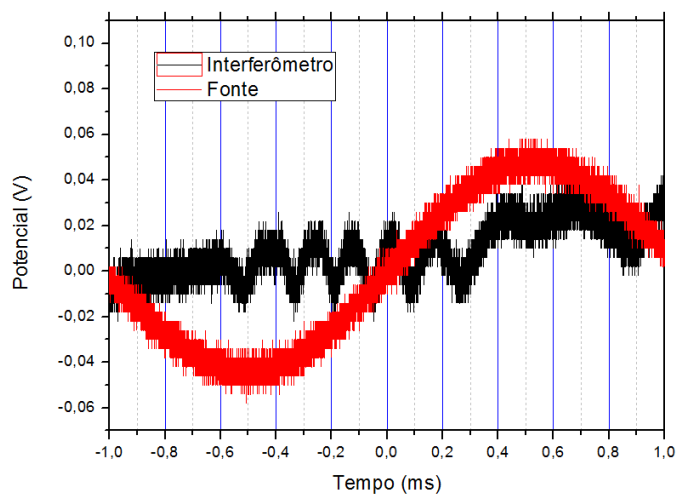


Figura 12: Resposta do sensor sobre a região N_1

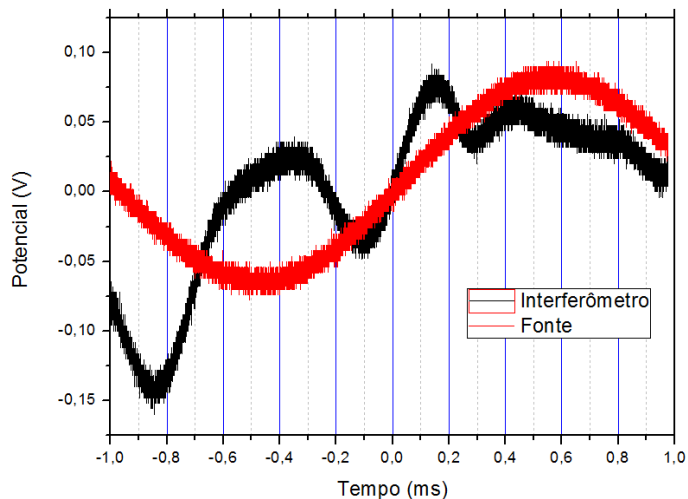


Figura 13: Resposta do sensor sobre a região N_2

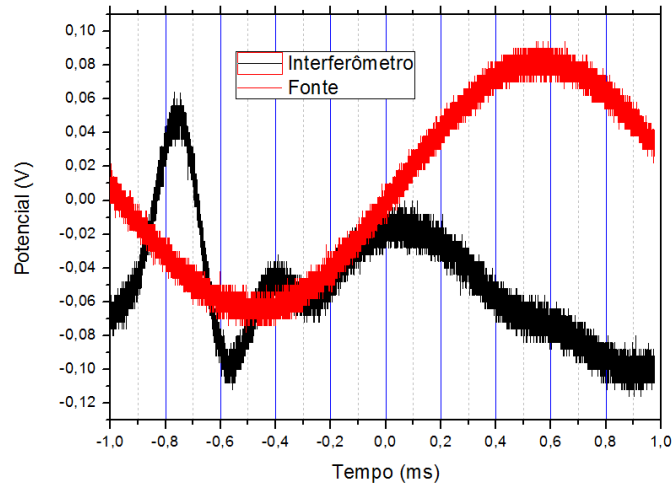


Figura 14: Resposta do sensor sobre a região N_3

É fácil de observar a ausência de padrões de interferência sobre as regiões das curvas de Chladni. Este fato era esperado por conta das condições de formação das figuras.

A seguir temos os padrões de interferência sobre as regiões fora das curvas.

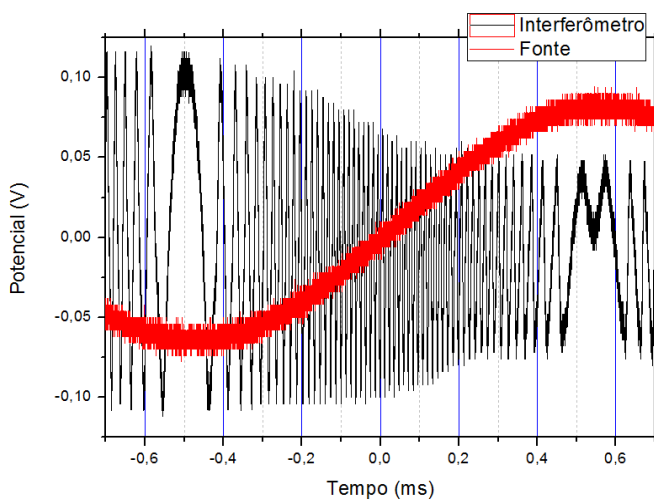


Figura 15: Padrão de interferência sobre a região V_1 .

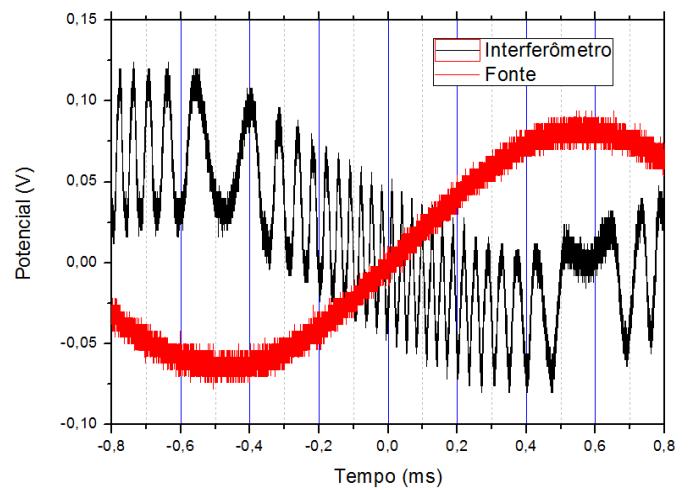


Figura 16: Padrão de interferência sobre a região V_2 .

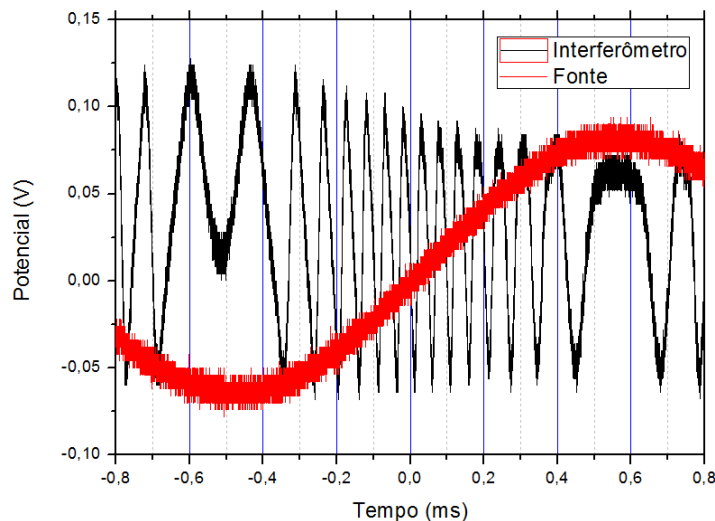


Figura 17: Padrão de interferência sobre a região V_3 .

Conforme as equações (2), (3) e (7), calculamos a amplitude, velocidade máxima e frequência de vibração.

Tabela 2: Dados coletados da placa e valores determinados a partir deles.

V	m	A(μm)	Δt_{min} (μs)	V_{max} (mm/s)	f (Hz)	δf (%)
1	55	17,41	6,14	51,55	471,29	1,40
2	22	6,96	14,61	21,66	495,16	3,59
3	14,5	4,59	23,16	13,67	473,93	0,85

O valor δf é o erro relativo entre a frequência calculada e a frequência aplicada na placa. Com os dados da frequência da tabela 2, podemos estimar a frequência média medida e seu erro associado,

$$\bar{f} = (480 \pm 10)\text{Hz}$$

7) Conclusão

Este projeto teve como objetivo melhorar um sensor de vibração à fibra para medidas de uma placa vibratória. Conseguimos medir pontos específicos da placa como também mostramos as condições de estabilidade em torno das curvas de Chladni. Determinamos a frequência de oscilação de uma placa a partir de dados coletados da placa (velocidade máxima e amplitude), tendo uma margem de erro máxima de 4% entre o valor medido e o valor aplicado.

Como continuação deste trabalho, pretendemos compactar o sensor com um laser de pequeno porte e o uso de um conversor analógico-digital (DAC) de maior resolução, substituindo o osciloscópio e automatizando o sensor. Sobre o sistema vibratório, planejamos montar um suporte de acrílico, substituindo a caixa improvisada durante o trabalho. O orientador deste trabalho tem planos para manter o modelo montado no seu laboratório - Laboratório de fibras especiais e materiais fotônicos, LaFE - como forma ilustrativa do uso de fibras como sensores.

Meu orientador concorda com o expressado neste relatório final e deu a seguinte opinião:

“Neste projeto uma placa vibrante excitada por alto falante foi estudada pelo aluno Marcelo Gouveia por dois diferentes métodos, um óptico baseado em um interferômetro a fibra óptica e outro visual pelas figuras de Chladni. No método óptico tentou-se obter um sistema compacto e totalmente a fibra óptica. Esta etapa teve sucesso parcial devido a problemas de acoplamento entre o laser compacto e a fibra óptica monomodo no comprimento de onda de interesse, ~ 630nm. A segunda etapa consistiu em obter diversas ressonâncias da placa na faixa de 150 a 500 Hz usando, para isto, material granulado (areia, importante salientar, de Copacabana/RJ) que, desta maneira, poderia se acumular nos pontos de baixa vibração (nós) da placa.

Grande novidade do trabalho foi conseguir caracterizar opticamente diversos pontos de vibração da placa, medindo-se, entre outras grandezas, a amplitude de vibração da placa e comparando com a figura de Chladni para aquela frequência específica (480 Hz). A montagem poderia ser melhor finalizada mas, infelizmente, o momento para apresentação final dos resultados foi no começo de novembro. De qualquer maneira estou satisfeito com os resultados obtidos e com as melhorias e novidades em relação ao modelo anterior desenvolvido por outro aluno do curso de F530.

Projeto apresenta caráter de instrumentação e tem grande valor didático. Novas modificações no sistema, voltando a tentar compactar mais a parte óptica, automatizar a parte de aquisição de dados e caracterizar outros pontos da placa vibrante, ficam em aberto para um próximo projeto – ou o próprio Marcelo dará continuidade. Estou satisfeito com os resultados obtidos, tanto pela parte de instrumentação quanto pela parte didática.

Campinas, 09 de novembro de 2011,

Prof. Cristiano Cordeiro”

8) Referencias

1. Chladni Plate; Make Magazine. <http://makeprojects.com/Project/Chladni-Plate/790/1>
2. Placa de Chladni; 3B Scientific. http://www.3bscientific.com.br/Placa-de-Chladni-quadrada-U56006,p_83_833_834_1982.html?initOptionReferer=1.
3. FREJLICH, Jaime; **Óptica**. Notas de aula. p.35 <http://www.ifi.unicamp.br/~frejlich/optica.ps>
4. THYAGARAJAN, K.; GHATAK, Ajoy. **Fiber Optic Essentials**. IEEE PRESS; WILEY-INTERSCIENCE; ISBN 9870470097427
5. GRIGOLETO HAYASHI, Juliano; **Interferômetro a fibra para medições de vibrações** http://www.ifi.unicamp.br/%7Elunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F530_F590_F690_F895/F530_F590_F690_F895_2010_sem1/JulianoG_Cristiano_RF_F530.pdf
6. CESAR DA SILVA, Júlio; **Estudo de vibrações em placas: Figuras de Chladni**. http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2004/009027JulioC_IrisTorriani_F809_RF.pdf; vídeo: <http://www.youtube.com/watch?v=3vrAOXQ8BBE>