

## 5 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais descritos neste capítulo não são frutos isolados dos testes realizados em laboratório. São também resultados da realimentação de dados e informações extraídos destes procedimentos com os obtidos em simulações numéricas.

Todos os resultados aqui apresentados foram gerados empregando o esquema de medição de bancada, a fim de facilitar e permitir que quaisquer alterações fossem mais rapidamente aplicadas.

Os resultados dos testes apresentados referem-se ao protótipo 1, e aos protótipos 2 a 5, que empregam o conceito de módulos. Para cada um dos protótipos foi analisada a função de resposta em frequência, o amortecimento do sistema, a sensibilidade e linearidade de resposta.

### 5.1 Protótipo 1

O protótipo 1 possui apenas um par de redes de Bragg de comprimentos de onda de 1512,9 e 1526,8 nm, Figura 5.1, instrumentando apenas um dos eixos de vibração (eixo da direção  $z$ ) do modelo mostrado na Figura 2.1. As redes estavam espaçadas de 12 mm entre si. A massa sísmica empregada era de 1,0 grama confeccionada em latão.

Conforme comentado anteriormente, esse protótipo foi o primeiro que apresentou sucesso em seus resultados experimentais não somente na capacidade de traduzir os movimentos do sistema em variações de comprimento de onda capazes de serem interpretados de maneira adequada, como também apresentar um comportamento constante em uma determinada faixa de frequência.

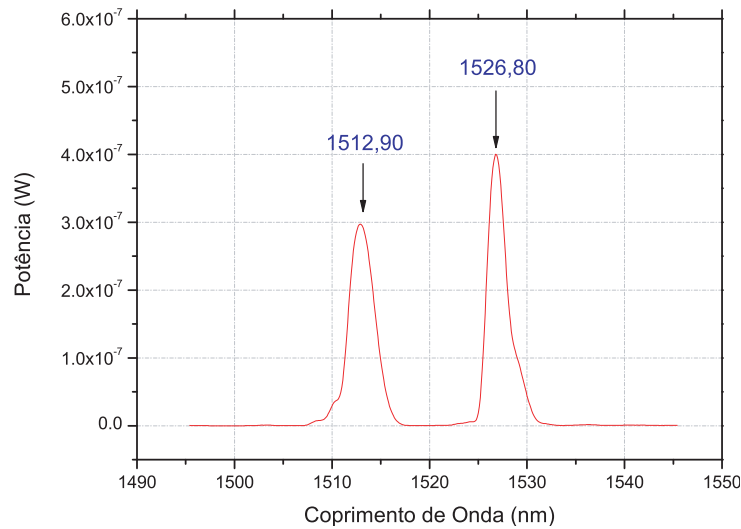


Figura 5.1: Espectro das redes do protótipo 1.

### 5.1.1 Função de Resposta em Freqüência e Amortecimento

A Figura 5.2 mostra a resposta em freqüência em amplitude e fase de uma das duas redes do protótipo. Nota-se uma ressonância em 254 Hz. Com o valor de pico da amplitude, estima-se uma redução de 3dB a partir deste valor e então pode-se obter o valor da razão de amortecimento ( $\zeta$ ), que é a razão entre os valores do amortecimento ( $c$ ) e do amortecimento crítico ( $c_{cr}$ ) para o sistema [11, 26].

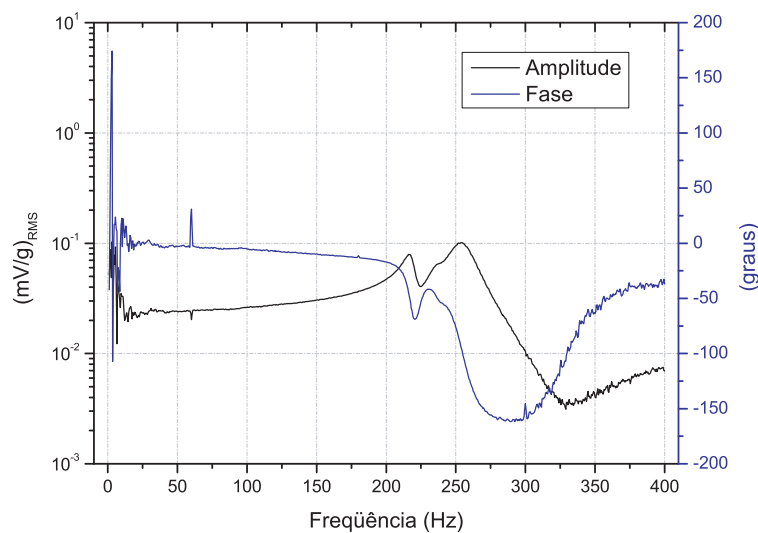


Figura 5.2: Função de resposta em freqüência do protótipo 1.

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} \quad (5-1)$$

$$|H(\omega_A)| = |H(\omega_B)| = \frac{|H(\omega_D)|}{\sqrt{2}} \quad (5-2)$$

$$\zeta = \frac{\omega_B - \omega_A}{2\omega_D} \quad (5-3)$$

A Figura 5.3 mostra um trecho dos valores obtidos nas medições. A razão do amortecimento estimada foi em  $\zeta = 0,04$ .

Nota-se que há uma faixa razoavelmente plana até a frequência de 150 Hz, descontando-se os efeitos abaixo de 40 Hz causados pela resposta de um dos excitadores eletromagnéticos utilizados. Uma maneira de se evitar estes efeitos, durante as medições, é empregando o sinal de um acelerômetro convencional, piezoelétrico por exemplo, acoplado ao acelerômetro óptico para compensar estes efeitos.

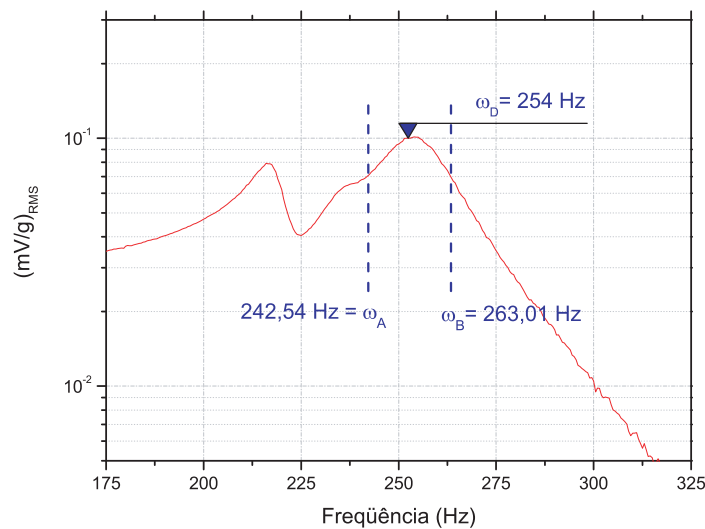


Figura 5.3: Amortecimento do protótipo 1.

### 5.1.2 Sensibilidade e Linearidade

A sensibilidade é importante para estimar qual a resolução do transdutor. Os acelerômetros convencionais empregados (piezoelétricos) tem uma resolução de 1mg. Entretanto, para os sistemas ópticos nesta fase de desenvolvimento, um único valor para resolução perde seu sentido em virtude da grande quantidade de variáveis envolvidas. É mais útil então, avaliar a relação sinal/ruído como um indicador de performance. A Figura 5.4 mostra

os espectros de potência do protótipo óptico com o de um acelerômetro convencional. O transdutor convencional apresenta uma relação sinal ruído de aproximadamente  $10^4$  para uma excitação senoidal aplicada de  $1g$ , enquanto que para o óptico este valor é de  $2 \times 10^3$ , para mesma excitação aplicada.

Este valor poderia ser melhorado, pois os comprimentos de onda dos sensores deste protótipo não eram tão favoráveis ao filtro óptico sintonizável empregado e da fonte luminosa (ASE), fazendo com que a quantidade de luz nos sensores fosse reduzida.

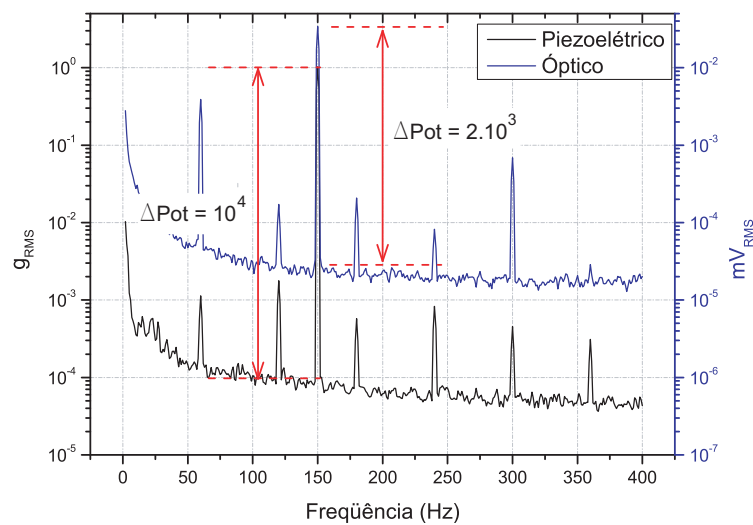


Figura 5.4: Relação sinal/ruído do protótipo 1 a 150Hz.

A linearidade da resposta das duas redes foi avaliada aplicando-se acelerações de 1 a  $5g$  nas frequências de 100 e 150 Hz, Figura 5.5. Constata-se uma boa linearidade nos resultados obtidos para cada frequência, e a diferença observada entre estes resultados pode ser compensada através da função de resposta em frequência determinada.

Entretanto, apesar dos bons resultados este tipo de protótipo teve que ser abandonado por motivos construtivos, mas é evidente que estes resultados foram fundamentais para o prosseguimento da pesquisa.

## 5.2 Protótipo 2

O protótipo 2 foi construído usando quatro redes de Bragg com comprimentos de onda espaçados de aproximadamente 10 nm (1523,45, 1533,95, 1543,85, e 1554,10 nm) como mostra a Figura 5.6. As redes estavam agrupadas duas a duas com uma distância de 10mm entre cada rede, e

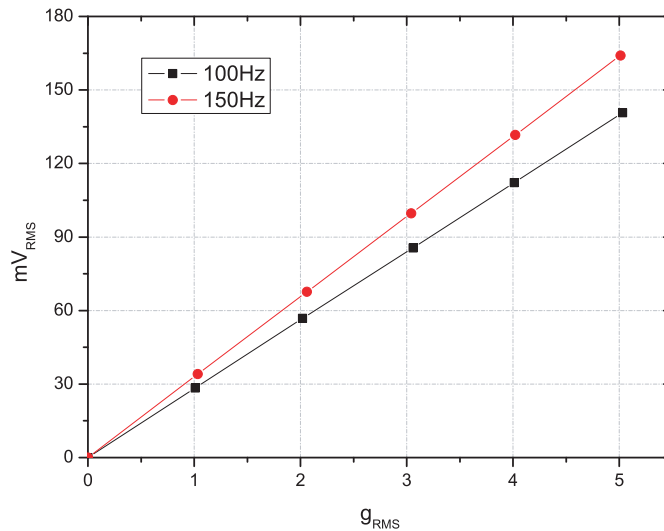


Figura 5.5: Linearidade da resposta do protótipo 1 a 100 Hz e 150 Hz.

espaças de aproximadamente 150 mm do outro par de redes. Este protótipo, Figura 2.4, trata-se de um protótipo de um acelerômetro biaxial, com apenas dois módulos construídos. As duas redes de menor comprimento de onda corresponderam ao eixo vertical de excitação (eixo  $z$ ). O valor total da massa sísmica de cada módulo foi de aproximadamente 2,1 gramas.

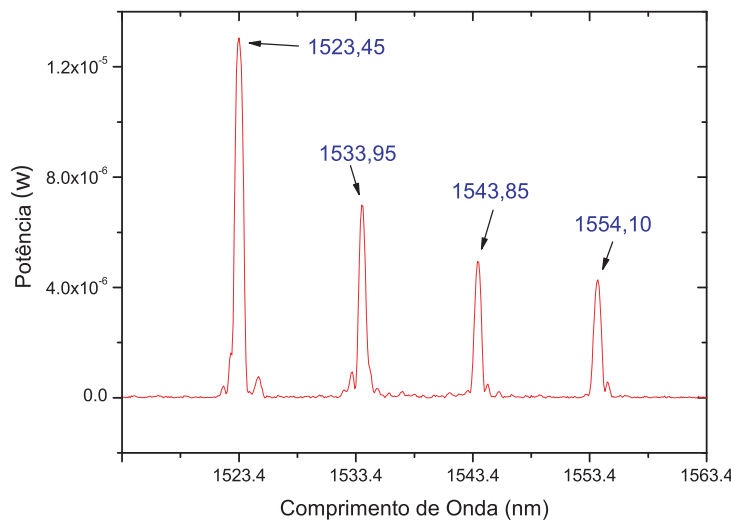


Figura 5.6: Espectro das redes do protótipo 2.

O protótipo foi montado no excitador eletromagnético, e conforme comentado anteriormente, problemas notados durante a montagem do protótipo levaram a considerar para efeito de registro apenas os resultados extraídos da excitação na direção  $z$ .

### 5.2.1

#### Função de Resposta em Frequência e Amortecimento

A Figura 5.7 mostra a função de resposta em frequência até 3,2 kHz em amplitude e fase. Deste primeiro resultado constata-se que a frequência de ressonância medida para este módulo foi de 1545 Hz, contra 1680 Hz calculando-se pelo ANSYS, representando uma diferença de apenas 8% do valor estimado numericamente. O amortecimento calculado, usando a equação 5-3, para o módulo deste protótipo foi de  $\zeta = 0,034$ .

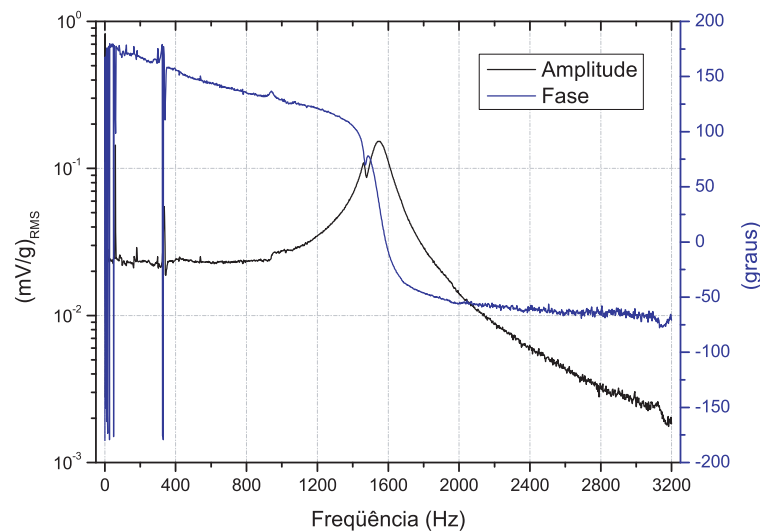


Figura 5.7: Função de resposta em frequência do protótipo 2 até 3200Hz.

Para verificar de maneira mais próxima do real, ao se calcular a função de resposta em frequência para o acelerômetro óptico ao invés de se dividir o sinal de resposta do acelerômetro óptico pelo sinal de excitação da fonte geradora, optou-se por dividi-lo pelo sinal do acelerômetro piezoelétrico, Figura 5.8. Na resposta obtida até 1600 Hz percebe-se uma região bastante plana do espectro exceto por três anomalias assinaladas em 60 Hz, 157 Hz e 328 Hz.

Estas anomalias podem estar associadas a dois fatores. O primeiro, a interferência causada pela rede elétrica que atua provocando perturbações na frequência de 60 Hz e seus harmônicos. E o segundo, problemas de desalinhamento das massas sísmicas ocorridos durante a montagem do módulo, que acentuam os efeitos de vibração transversal. Este último fator deve ser ressaltado, pois como havia um receio de perda de sensibilidade devido ao uso da placa metálica, a massa sísmica foi aumentada durante a montagem, e como consequência disso, as comparações destes resultados com os resultados das análises numéricas para os modos de vibrações transversais são inválidas.

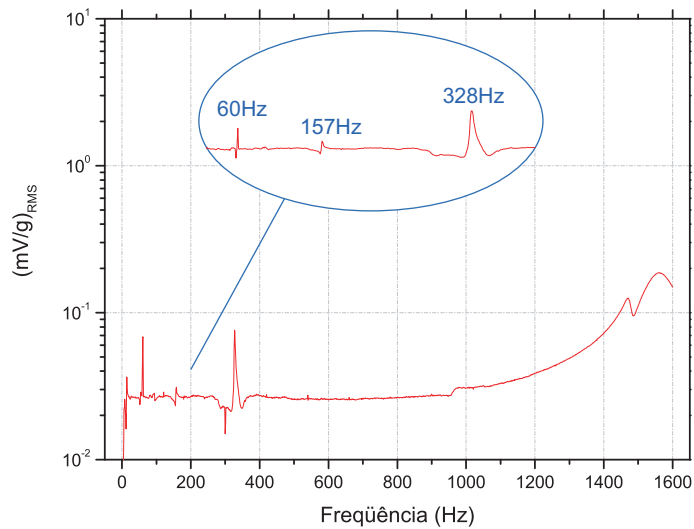


Figura 5.8: Anomalias na função de resposta em frequência no módulo do protótipo 2.

Os resultados para o módulo transversal não são apresentados devido aos motivos já detalhados no Capítulo 3.

### 5.2.2 Sensibilidade e Linearidade

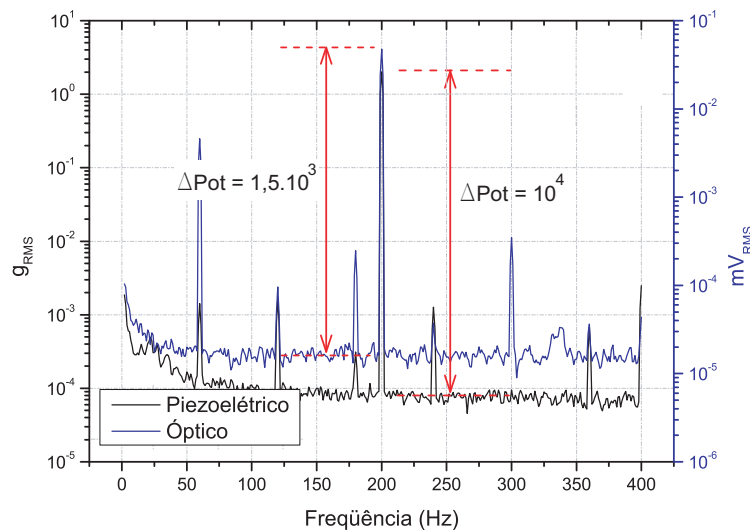


Figura 5.9: Relação sinal/ruído do protótipo 2 a 200 Hz.

A sensibilidade obtida no módulo foi considerada muito boa para o primeiro protótipo empregando esse conceito. Um pouco abaixo daquela anotada no primeiro protótipo, mas ainda com possibilidades de melhorar a relação sinal/ruído. Para este protótipo foi verificado um valor médio de  $1,5 \times 10^3$  para uma excitação senoidal aplicada de  $1g$ , Figura 5.9.

Quanto à linearidade de resposta, os resultados obtidos foram novamente bastante satisfatórios. Da mesma forma que para o protótipo anterior, foram aplicadas acelerações de 1 a 5g nas frequências de 100, 200 e 300 Hz, Figura 5.10. A pequena discrepância da resposta a 300 Hz já era esperada a partir da análise dos resultados da Figura 5.8. Nota-se na nesta figura que na região do espectro em torno de 300 Hz há um decréscimo na resposta em frequência do instrumento em decorrência da anomalia mencionada.

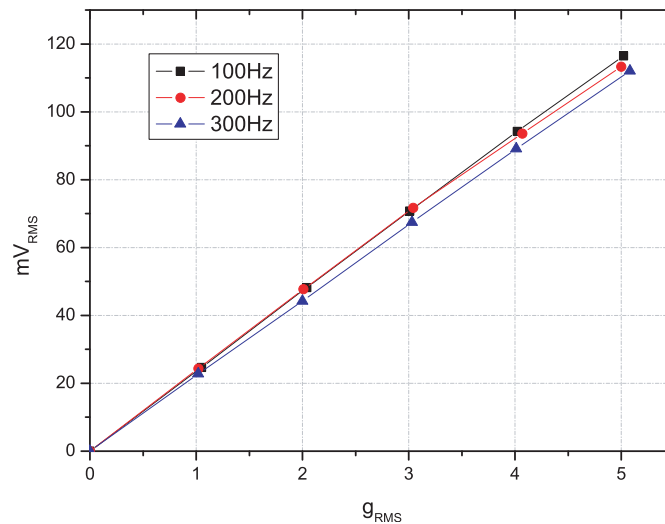


Figura 5.10: Linearidade da resposta do protótipo 2 a 100, 200 e 300 Hz.

### 5.3 Protótipo 3

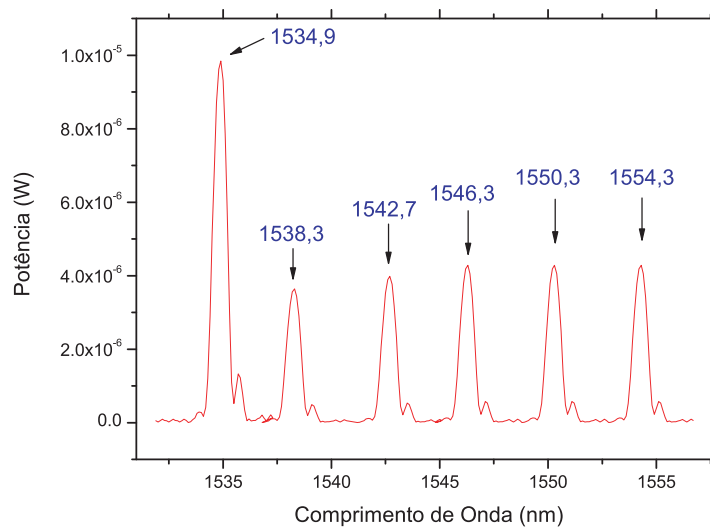


Figura 5.11: Espectro das redes do protótipo 3.



O protótipo 3 foi montado com seis redes de Bragg espaçadas entre si de 4 nm (1534, 1538, 1542, 1546, 1550, e 1554 nm), Figura 5.11. Neste protótipo os três módulos foram instrumentados. As redes estavam agrupadas duas a duas com uma distância de 10 mm entre cada rede, e espaçadas de aproximadamente 200 mm do próximo conjunto de duas redes. Cada massa sísmica media 2,65 gramas, e desta vez, os módulos transversais não sofreram grandes problemas durante a sua montagem, exceto o problema de alinhamento dos eixos de montagem do conjunto comentado anteriormente.

### 5.3.1

#### Função de Resposta em Freqüência e Amortecimento

Os resultados obtidos na excitação do eixo vertical foram, novamente, bastante satisfatórios e foram feitas algumas medições através dos módulos transversais. A Figura 5.12 mostra função de resposta em freqüência até 1,6 kHz em amplitude e fase. Nota-se que até 400 Hz, a resposta em freqüência é bastante plana e a partir daí, tem-se duas zonas distintas, uma com dois pequenos picos e outra com a ressonância do transdutor propriamente dita.

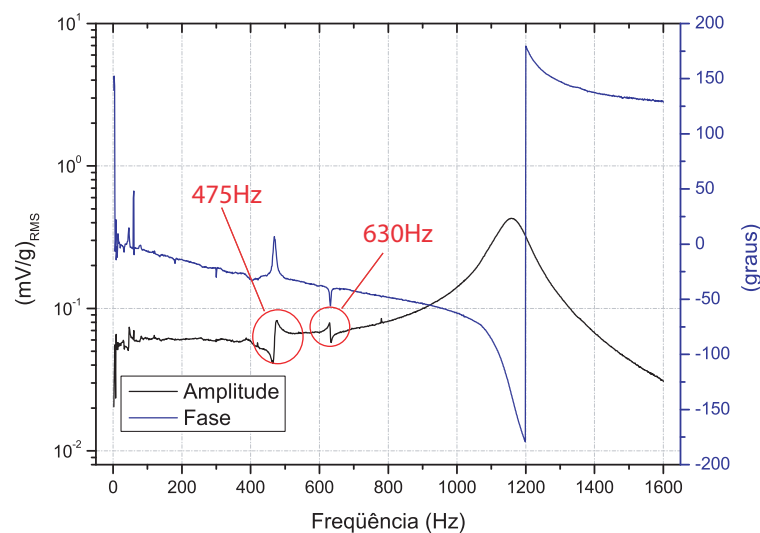


Figura 5.12: Comparação da função de resposta em freqüência do protótipo 3 até 800Hz.

As anomalias, semelhantes às do protótipo anterior, foram verificadas nas freqüências de 475 e 630 Hz. Estas anomalias foram inicialmente atribuídas a algum problema durante a montagem final do modelo e, como para serem medidos os módulos transversais foi utilizado uma espécie de mordente ajustável, não houve condições de avaliar com exatidão se estas

mesmas anomalias ocorreram nestes módulos. Posteriormente foi comprovado que essas anomalias eram causadas pelo movimento transversal da massa sísmica.

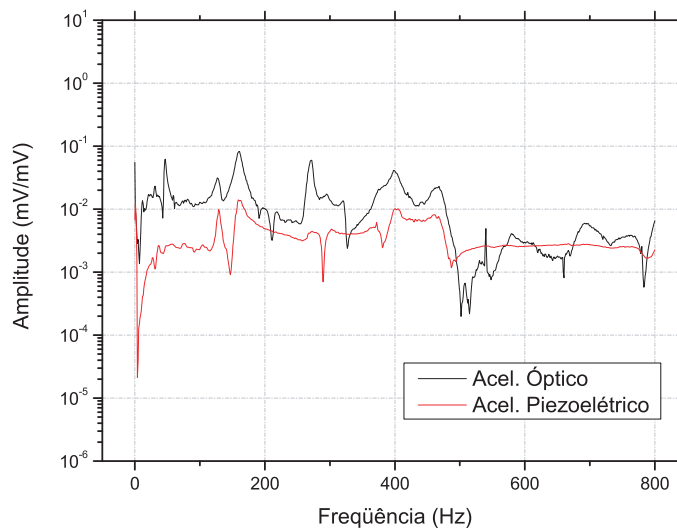


Figura 5.13: Vibração transversal do excitador eletromagnético medida durante ensaios com o protótipo 3.

Durante a excitação vertical do acelerômetro, foram realizados alguns testes de vibração transversal. Um micro acelerômetro piezoelétrico foi colocado lateralmente na mesma direção de um dos eixos transversais. Notou-se com isso que, devido a um desalinhamento do próprio excitador eletromagnético, havia um sinal de vibração transversal (espectro em vermelho da Figura 5.13) o que seria um bom teste para o sistema óptico. Foi utilizado um dos módulos ópticos para medir tal perturbação, e comparando-se os espectros medidos com os dois sistemas, percebe-se que existe uma grande semelhança entre eles.

Como os resultados da excitação do eixo vertical foram satisfatórios, foram realizadas algumas tentativas de medições nos eixos transversais. Na impossibilidade de testá-lo em um excitador lateral, fez-se o uso do adaptador em forma de mordente para acoplar o acelerômetro no excitador disponível. Essa prática é comum, uma vez que excitadores especiais são extremamente difíceis de serem encontrados, entretanto o adaptador empregado certamente não era o mais adequado para estes ensaios. As Figuras 5.14 e 5.15 mostram os resultados obtidos nestas medições comparados com acelerômetros piezoelétricos acoplados na carcaça do acelerômetro óptico.

Pode se perceber em ambos os gráficos, pelos acelerômetros piezoelétricos, que o comportamento do conjunto acelerômetro óptico e adaptador não possui uma resposta linear na faixa de frequência de

1,6 kHz. Mas um bom indício da qualidade destas medições, é que um comportamento bastante semelhante foi observado com as redes de Bragg nas duas direções transversais, e mesmo com um espectro não tão plano foi possível realizar algumas medições de linearidade de resposta como no caso do eixo vertical, numa faixa de frequência entre 600 e 800 Hz.

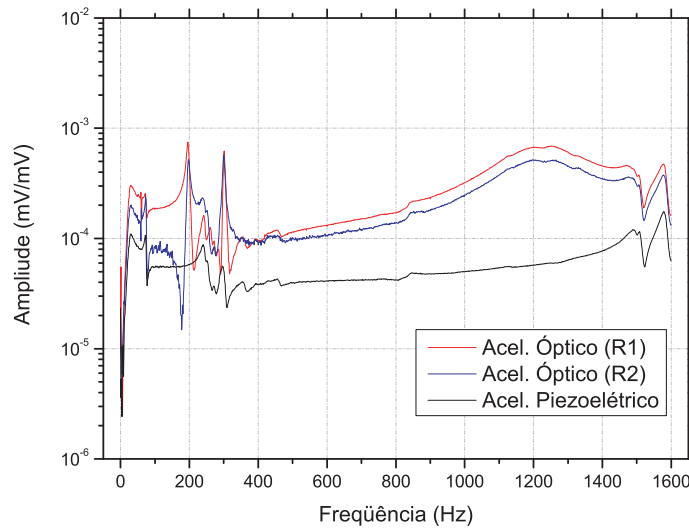


Figura 5.14: Comparação da função de resposta em frequência do protótipo 3 - Eixo transversal  $x$ .

O amortecimento medido para estes módulos foi razoavelmente próximo do medido no protótipo anterior,  $\zeta = 0,04$ .

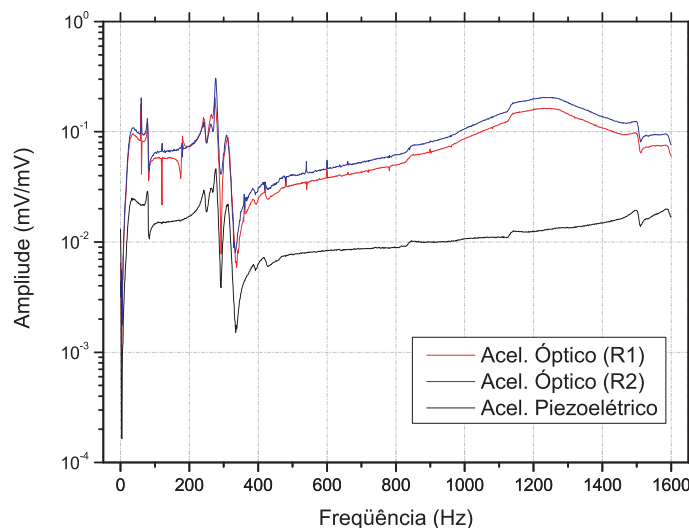


Figura 5.15: Comparação da função de resposta em frequência do protótipo 3 - Eixo transversal  $y$ .

### 5.3.2 Sensibilidade e Linearidade

A relação sinal/ruído do protótipo 3 apresentou melhorias em relação ao seu antecessor, provavelmente em virtude da maior massa sísmica. A Figura 5.16 mostra os resultados destas medições para uma frequência de 200 Hz e 2g de aceleração. Para esta mesma excitação foi constatado um valor de  $4 \times 10^3$ .

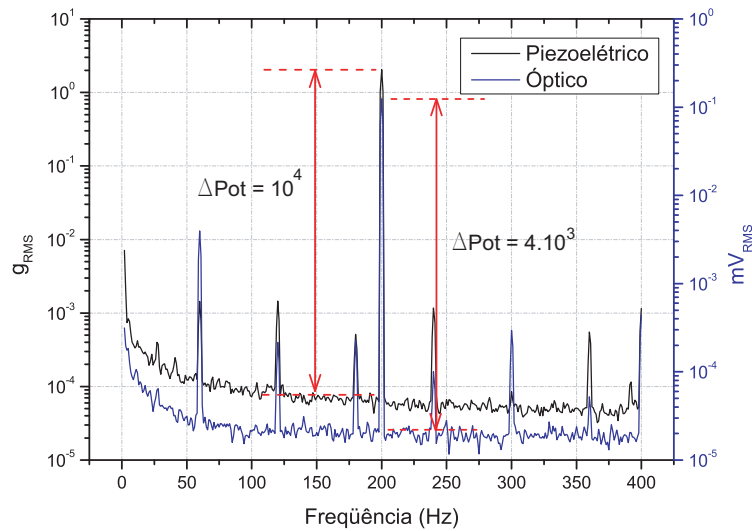


Figura 5.16: Relação sinal/ruído do protótipo 3 a 200Hz.

Para comprovar os resultados fornecidos pelas funções de resposta em frequência, foram feitos testes de linearidade para diversas frequências até 300 Hz com e valores de aceleração até 5g, Figura 5.17.

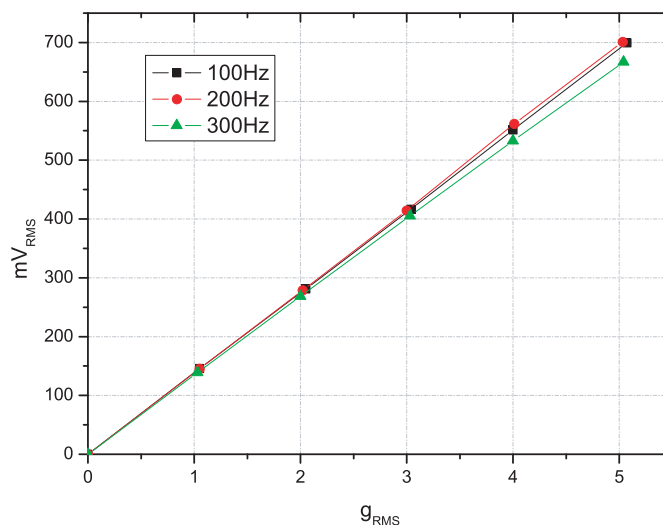


Figura 5.17: Linearidade da resposta do protótipo 3.

Os resultados apresentados de linearidade de resposta para excitação transversal, Figura 5.18, são bastante similares aos do eixo vertical. A diferença anotada para a frequência de 600 Hz é justificada pela resposta e frequência do sistema que apresenta um comportamento crescente a partir de 450 Hz até a ressonância, Figura 5.12.

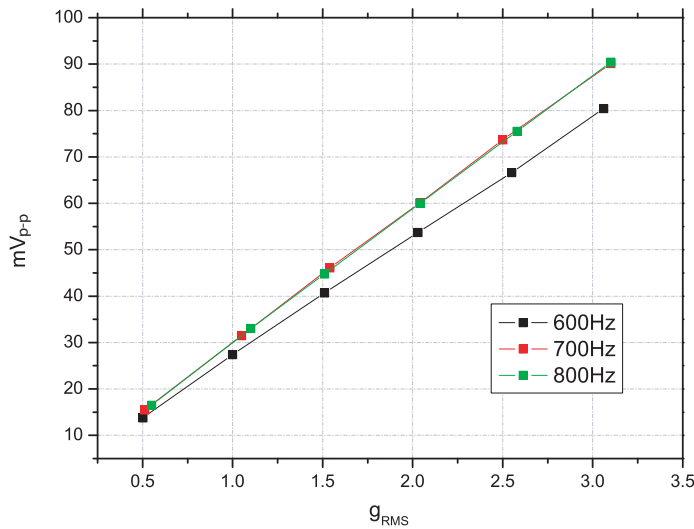


Figura 5.18: Linearidade da resposta do protótipo 3 - Eixo transversal  $x$ .

#### 5.4 Protótipo 4

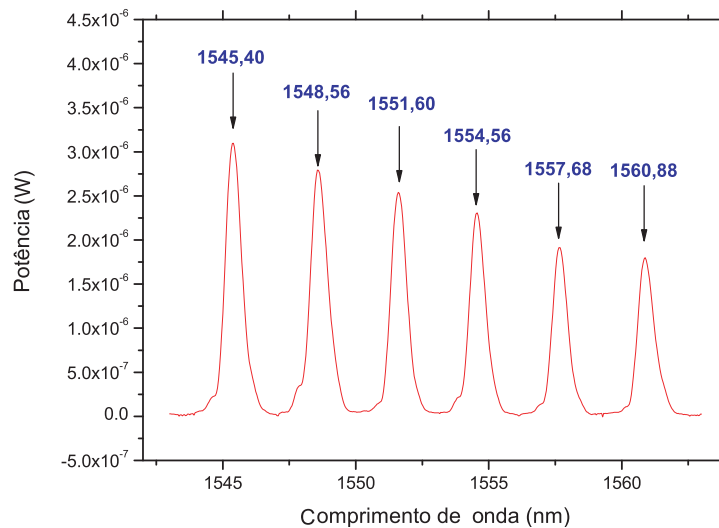


Figura 5.19: Espectro das redes do protótipo 4.

O protótipo 4 foi construído com seis redes de Bragg espaçadas entre si de aproximadamente 3 nm (1545, 1548, 1551, 1554, 1557, e 1560 nm) con-

forme mostra a Figura 5.19, com três módulos instrumentados. Novamente as redes estavam agrupadas duas a duas com uma distância de 10mm entre cada rede, e espaçadas de uns 200 mm do próximo conjunto de duas redes.

Conforme descrito no capítulo 2, as características geométricas do corpo cilíndrico do protótipo 4 facilitaram a sua fixação nas três direções de excitação. Para excitar os eixos transversais foi colocada uma braçadeira metálica para adaptar o corpo do acelerômetro à base do excitador eletromagnético sem maiores problemas.

### 5.4.1

#### Função de Resposta em Frequência e Amortecimento

As medições preliminares da resposta em frequência de todos os eixos de medição do protótipo 4, demonstram que os efeitos das vibrações transversais da massa sísmica são mais evidentes no módulo deste protótipo. Nas medições na direção do eixo da fibra, apresentam-se anomalias que estão em frequências menores (150 Hz e 185 Hz) que às do protótipo anterior devido à maior massa empregada, Figura 5.20.

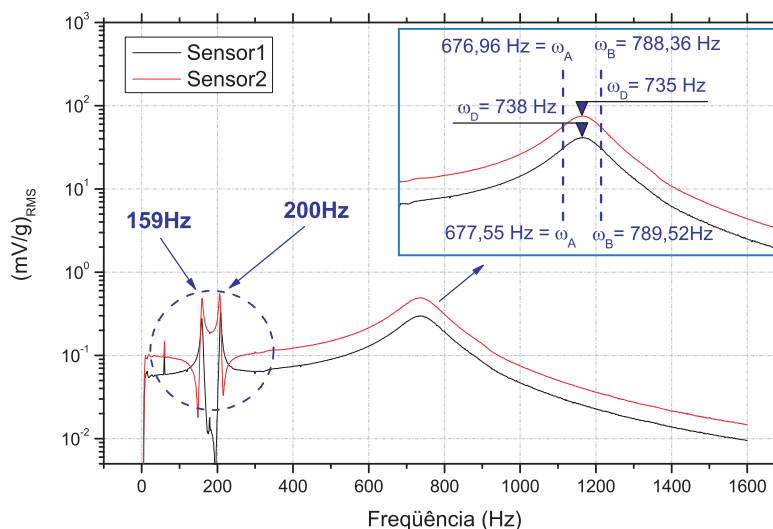


Figura 5.20: Anomalias na medição do protótipo 4.

Estes resultados foram fundamentais para comprovar que as frequências naturais dos modos de vibração transversal, afetavam de forma consistente as medições. Ficou claro que estas ressonâncias deveriam ser deslocadas para frequências maiores e suas amplitudes reduzidas.

A Figura 5.21 mostra os resultados das funções de resposta em frequência obtidas para os três eixos. Em ambas estão mostradas as re-

spostas das duas redes de Bragg do eixo correspondente (linhas em vermelho e azul) juntamente com a resposta do acelerômetro piezoelétrico usado (linha em preto) numa faixa de medição até 150 Hz.

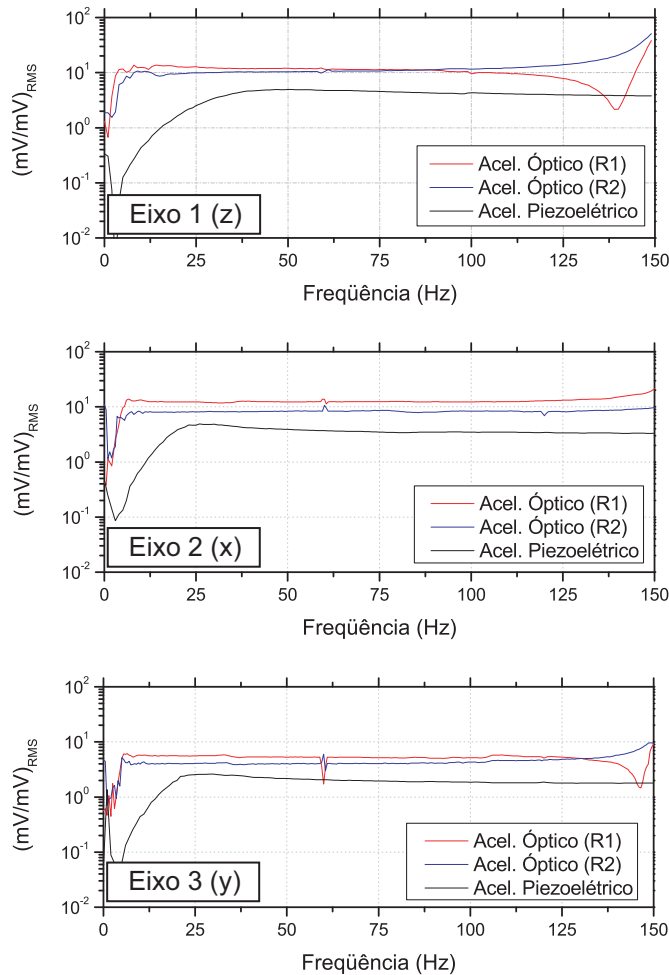


Figura 5.21: Resposta em frequência do protótipo 4.

Confirmando as expectativas mencionadas no capítulo 2, os problemas de montagem dos módulos transversais durante a montagem final do protótipo relatados para o protótipo 3 não se repetiram, o que demonstra que a nova montagem final dos módulos, sem eixos e furos passantes, é mais eficiente além de mais prática.

Em todas as três respostas em frequência, pôde-se observar uma resposta bastante plana na faixa até 150 Hz, com algumas pequenas perturbações no sinal próximas ao 0 Hz e em 60 Hz.

Os problemas notados nas respostas no início da faixa de leitura são em decorrência do próprio sistema de excitação empregado (excitador eletromagnético) que não responde de maneira adequada em baixas frequências. Entretanto, mesmo com essa limitação fica evidente a redução do problema

de resposta em baixas frequências nos acelerômetros ópticos que, por exemplo, os acelerômetros convencionais piezoelétricos apresentam.

Em todos os testes, a interferência causada pelo ruído eletrônico induzido pela rede elétrica no sistema de leitura se fez presente (mais perceptível na para o eixo  $y$ ). As demais anomalias notadas ao final da faixa de frequência analisada foram atribuídas a vibração transversal da massa sísmica. A densidade do material empregado, a geometria da massa sísmica, e a forma do seu engaste no módulo, deveriam ser alterados para minimizar ou eliminar estes efeitos.

Os valores do amortecimento medido apresentaram uma variação de 0,075 a 0,095. Esta foi a maior variação entre os valores medidos, provavelmente em decorrência de pequenas diferenças durante a colagem das fibras ópticas nos módulos.

#### 5.4.2 Sensibilidade e Linearidade

As primeiras estimativas de resolução para o protótipo 4 estão em torno de alguns milésimos de  $g$  (entre 1 ou 2mg).

As figuras 5.22 e 5.23 mostram o espectro de potência para uma excitação de 50 e 100 Hz quando aplicada acelerações  $2g$  respectivamente. Em ambas as figuras, é feita a comparação com o acelerômetro piezoelétrico.

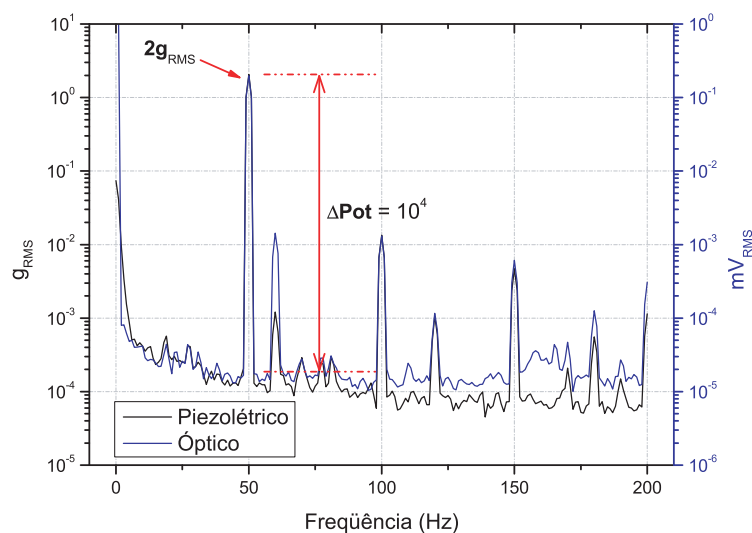


Figura 5.22: Espectro de potência para 50 Hz e  $2g$ .

Os resultados de sensibilidade obtidos no protótipo 4 foram, entre todos, os melhores. É possível verificar que a razão sinal/ruído é da mesma



ordem de grandeza do que o do acelerômetro piezoeétrico de comparação,  $10^4$  para uma excitação de  $1g$ .

Em termos de sensibilidade, os resultados apresentados confirmam o desenho do protótipo 4, mas algumas pequenas alterações nos módulos foram necessárias visando eliminar as anomalias relacionadas presentes na resposta em frequência próximas a 150 Hz.

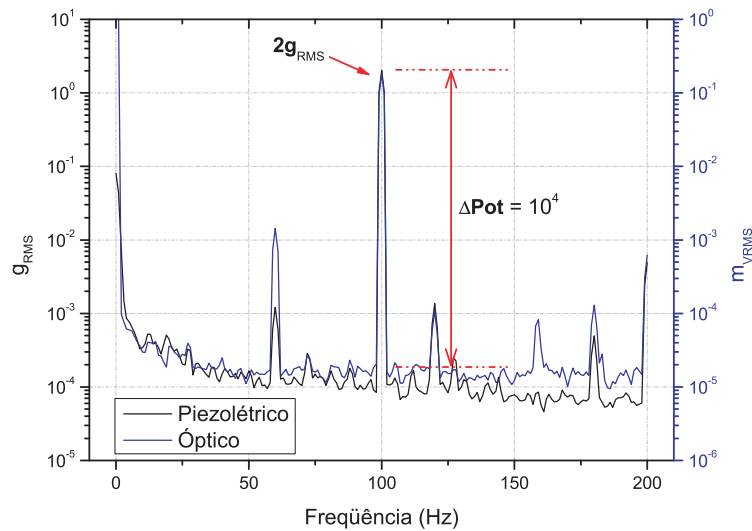


Figura 5.23: Espectro de potência para 100Hz e  $2g$ .

A Figura 5.24 mostra a avaliação da linearidade de resposta do protótipo 4. Foram aplicadas excitações de 50, 75 e 100 Hz, até  $5g$  de aceleração. Similarmente ao obtido no protótipo 3, a resposta foi extremamente linear na faixa observada para todos os módulos de medição.

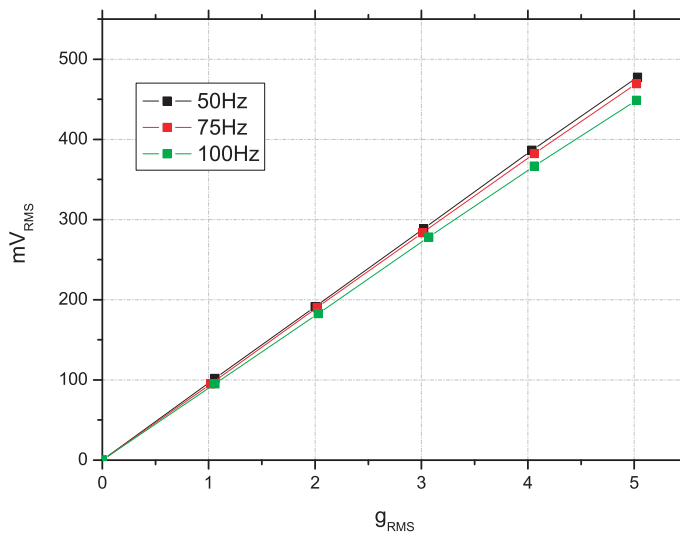


Figura 5.24: Linearidade da resposta do protótipo 4.

A Figura 5.25 mostra os resultados da medição de vibrações transversais do protótipo 4 em uma montagem experimental conforme mostra a foto da Figura 4.2. O protótipo 4 foi montado com o auxílio da braçadeira. No lado oposto à saída da fibra óptica foi acoplado um acelerômetro piezoelétrico (750-100) para medir a vibração transversal presente e compará-la com o resultado óptico. Para medir a aceleração aplicada foi usado o mini acelerômetro (25B) na parte superior da carcaça.

Os resultados para uma excitação senoidal de 100 Hz demonstram uma boa linearidade dos resultados obtidos. Os ajustes lineares mostram que correções podem ser facilmente implementadas.

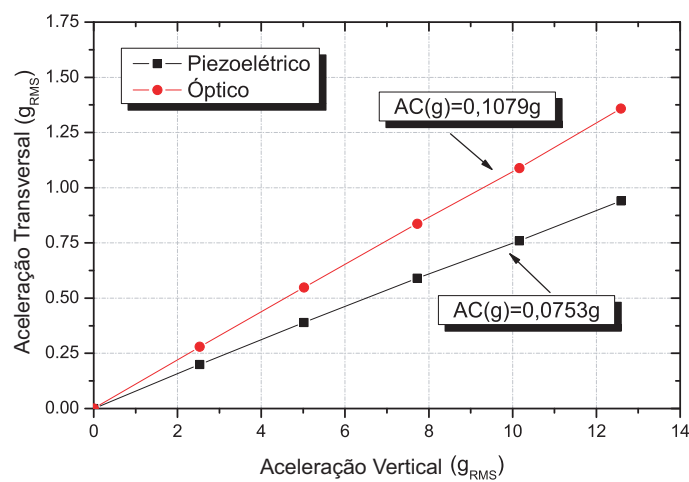


Figura 5.25: Resposta transversal do protótipo 4.

## 5.5 Protótipo 5

Tentando solucionar os problemas encontrados no protótipo 4 atribuídos a vibração transversal da massa sísmica, e ao mesmo tempo aproveitar os avanços já alcançados até então, um novo desenho de módulo foi testado. Novos módulos para o protótipo 5 foram construídos e ensaiados separadamente.

Os resultados como são apresentados a seguir, mostram uma boa reprodutibilidade dos resultados. A Figura 5.26 mostra as características das redes de Bragg empregadas, um conjunto com comprimentos de onda de 1542,31 e 1151,09 nm, e outro com redes de 1553,25 e 1558,05 nm.

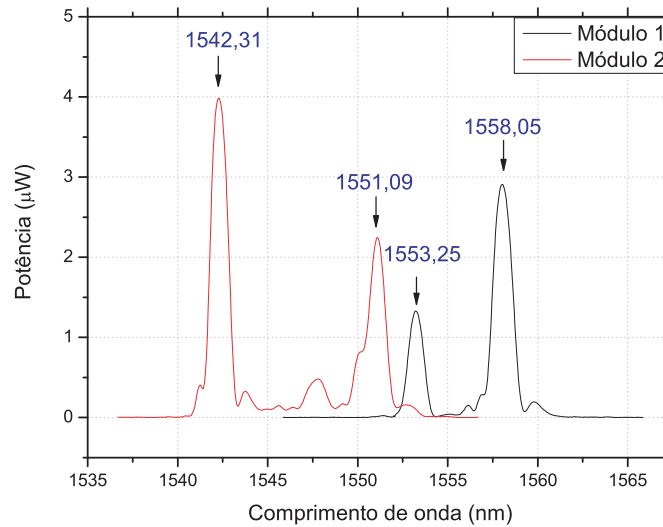


Figura 5.26: Espectro das redes do protótipo 5.

### 5.5.1

#### Função de Resposta em Freqüência e Amortecimento

Os resultados destes novos módulos foram superiores aos demonstrados pelos outros módulos anteriores. As Figuras 5.27 e 5.28 mostram as funções de resposta em freqüência até 400 e 1600 Hz respectivamente. Na primeira é possível verificar uma resposta extremamente plana nesta região, e na segunda pode-se observar a ressonância do transdutor. Ambos os resultados, nos dois módulos, foram obtidos fazendo-se a resposta em freqüência em relação ao sinal de um acelerômetro piezoelétrico.

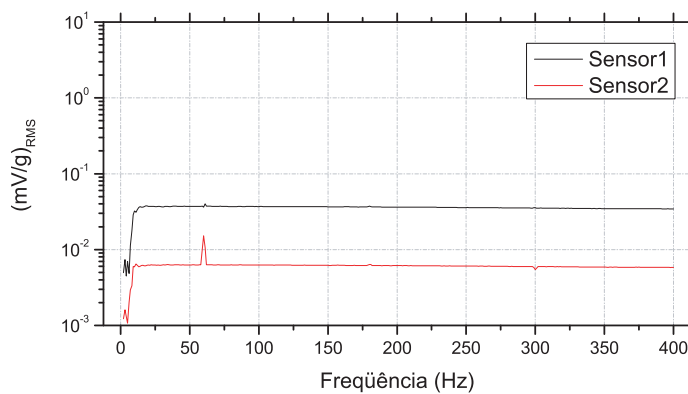


Figura 5.27: Função de resposta em freqüência do protótipo 5 até 400 Hz.

Os problemas anteriores notados devido à vibração transversal da massa sísmica, neste novo desenho de módulo foram solucionados graças às alterações construtivas já citadas. A primeira freqüência natural na direção do eixo da fibra foi estimada numericamente em 1200 Hz, e os testes experimentais revelaram um ressonância entre 1300 e 1500 Hz.

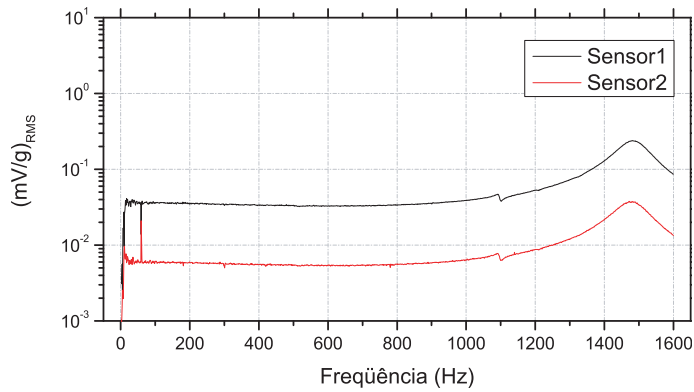


Figura 5.28: Função de resposta em frequência do protótipo 5 até 1600 Hz.

A Figura 5.29 mostra a resposta em frequência para um módulo onde houve um pequeno desalinhamento durante a colagem do módulo com o adesivo epóxi. Mesmo apresentando este problema de montagem que certamente causou essa diferença no valor da ressonância, Figura 5.30 (b), os resultados fora desta faixa foram bastante planos.

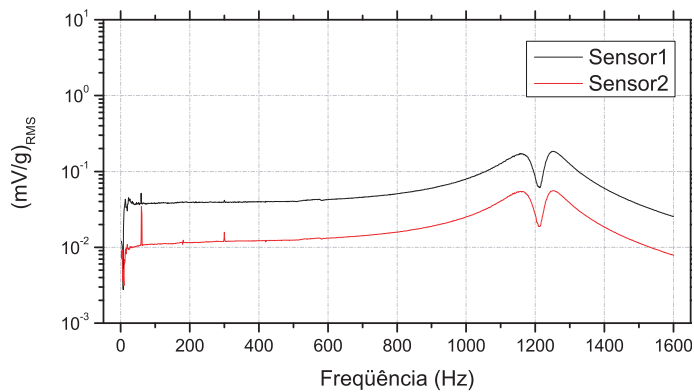


Figura 5.29: Alterações causadas por defeitos de montagem do módulo.

O amortecimento médio verificado foi de  $\zeta = 0,03$ . É próximo do valor obtido dos protótipos 2 e 3. Mas representa menos da metade do amortecimento calculado nos módulos do protótipo 4. Uma explicação para estes resultados é que o amortecimento do protótipo 4 é influenciado pela sua maior massa sísmica em relação aos dois modelos anteriores. Já no protótipo 5 a massa sísmica é praticamente do mesmo valor do protótipo 4, contudo, os pontos de fixação adicionais acrescentaram uma maior rigidez ao sistema massa-placa metálica-fibra óptica.

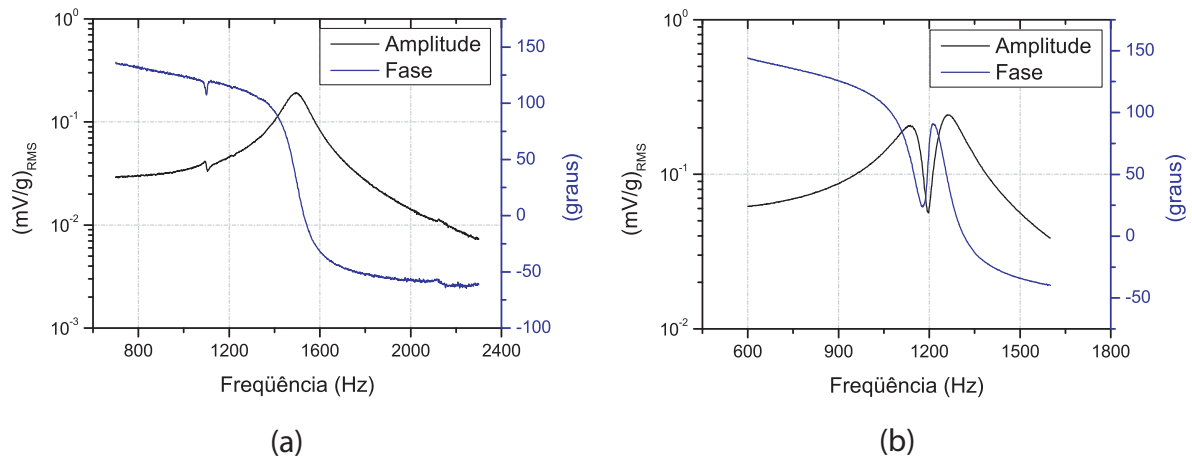


Figura 5.30: Comparação entre as ressonâncias do módulo 1(a) e 2(b).

### 5.5.2 Sensibilidade e Linearidade

Os resultados para a relação sinal/ruído para o novo módulo foram bastante satisfatórios. Nota-se que, da mesma forma, que o acelerômetro convencional tem-se um valor um pouco abaixo de  $10^4$  para uma excitação de  $1g$ . A massa sísmica ligeiramente menor e a maior rigidez do conjunto sensor justificam essa menor sensibilidade.

Conforme a previsão numérica de que as diferenças nas deformações absolutas neste novo protótipo em relação ao anterior seriam de aproximadamente 27%. Os valores da relação sinal ruído módulo ficaram razoavelmente abaixo dos obtidos no protótipo 4, considerados como ideais.

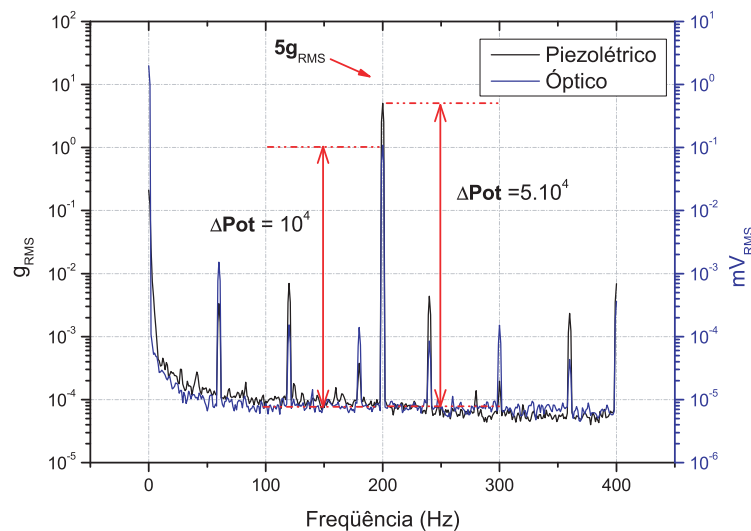


Figura 5.31: Relação sinal/ruído do protótipo 5 a 200 Hz.

Algumas formas de compensar esta redução podem ser facilmente aplicáveis, como um pequeno aumento na massa sísmica sem que se compro-

meta o espectro da resposta do acelerômetro, ou soluções nos componentes optoeletrônicos já mencionadas anteriormente.

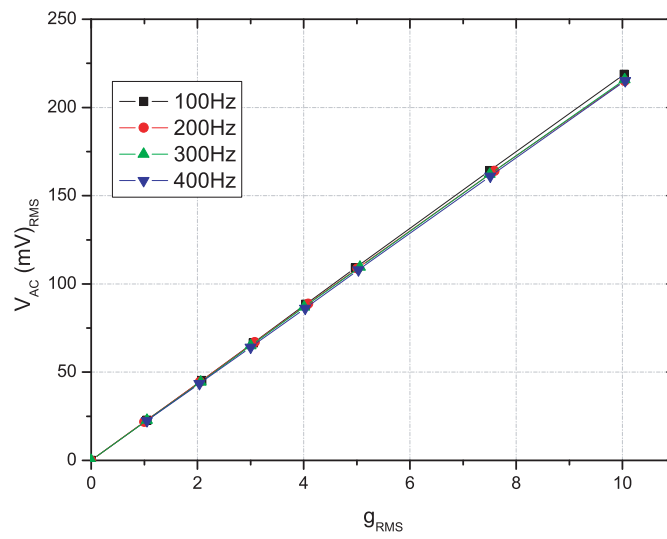


Figura 5.32: Linearidade da resposta do protótipo 5.

Confirmando os resultados anteriores, também foi constatada a boa linearidade da resposta do módulo para determinados níveis de aceleração. A Figura 5.32 mostra estes resultados em diversas frequências até  $10g$  de amplitude.