2 Protótipos de acelerômetros

Neste trabalho, o ponto de partida para se desenvolver um acelerômetro óptico foi tentar aliar as características intrínsecas do uso da fibra óptica, que o fazem possuir o comportamento semelhante ao de um acelerômetro resistivo, mas que possuísse características de desempenho similares às de um piezoelétrico. Os resultados animadores obtidos com os primeiros dois protótipos construídos indicaram que ainda havia grande espaço para o desenvolvimento de um acelerômetro a redes de Bragg que atendesse as exigências de resposta e robustês [28].

A idéia inicial de simplesmente usar a fibra óptica como um elemento de mola, suspendendo uma massa sísmica, logo esbarrou no entrave de que a resistência transversal, por parte da fibra é muito pequena, quase nula. Uma das primeiras correções tentadas foi a utilização de outras fibras ópticas nas demais direções, que poderiam também conter redes de Bragg. Como será visto adiante, essa solução apresentava algumas limitações de ordem construtiva.

A opção construtiva dos modelos apresentados a seguir, em detrimento de outras, deveu-se à decisão de trabalhar com duas redes de Bragg por em cada direção de medição para permitir a compensação de temperatura e reduzir a sensibilidade transversal do instrumento. Outras opções construtivas, como as que comumente são empregadas em acelerômetros resistivos (uma viga em balanço) são perfeitamente factíveis, e da mesma forma, apresentam vantagens e desvantagens [14, 34].

A seguir serão mostrados detalhadamente os protótipos de acelerômetros ópticos desenvolvidos, suas principais características e detalhes de sua construção e montagem. Concomitantemente, em todas as etapas de desenvolvimento dos protótipos aqui apresentados foram realizadas análises numéricas com o método dos elementos finitos, através do código comercial ANSYS.

2.1 Protótipo 1

Dentre as diversas possibilidades construtivas para acelerômetros ópticos triaxiais, a primeira desenvolvida com sucesso foi a que utilizou a idéia inicial de uma massa sísmica central sustentada por três fibras ópticas que deveriam conter as redes de Bragg, Figura 2.1.



Figura 2.1: Vista do protótipo 1.

O primeiro detalhe importante desta construção está no fato do corpo ser dividido em três partes, uma central com a forma de uma moldura e duas outras, superior e inferior, que se juntam à central formando uma só peça, Figura 2.2. Além disto, foi adotada a geometria retangular no formato do corpo do transdutor ao invés de cilíndrica. Os motivos desta opção visam a simplicidade e facilidade na montagem final. Uma vez montadas as fibras na massa central, esta pode ser assentada e fixada na moldura, e então as fibras podem ser passadas pelo bloco superior e inferior para unir o conjunto por meio de parafusos. Como mostra a Figura 2.1, tanto o bloco superior quanto o inferior foram feitos de forma a existirem "janelas" para possibilitarem a redução da massa final do conjunto, e ainda, proporcionar uma visualização do interior do dispositivo.

Testes realizados comprovaram que apesar da necessidade de oito parafusos, o conjunto comportou-se de forma bastante rígida. Entretanto, alguns fatores levaram ao abandono deste conceito construtivo. Entre eles podemos citar a impossibilidade de se passarem três fibras ópticas ortogonais entre si através da massa central sem que se criasse nesta um desalinhamento considerável apesar do reduzido diâmetro das fibras. Outro fator é a redução das dimensões e custos do protótipo final, uma vez que seria necessário um corpo relativamente grande que pudesse comportar todas as curvas necessárias para que os três eixos fossem ligados por uma só fibra ou a necessidade do uso de mais acopladores ópticos.

Apesar dos problemas reportados e das mudanças sugeridas por esse protótipo, seus resultados foram fundamentais no aperfeiçoamento e na continuidade da pesquisa. Entre todos os protótipos construídos, sem dúvidas, é o que transmite de maneira didaticamente mais clara o conceito da relação entre o movimento e a deformação, e por conseqüência a aceleração.



Figura 2.2: Montagem do protótipo 1.

2.2 Protótipo 2

O segundo protótipo de acelerômetro triaxial foi o que primeiro empregou o conceito de módulos. A partir de então, não haveria mais uma massa sísmica central que responderia a estímulos nas três direções, mas sim um sistema de módulos individuais com massas e redes de Bragg que seriam aplicados em qualquer uma das três possíveis direções de medição. Com isso cria-se a possibilidade de se construir acelerômetros 1D, 2D e 3D de acordo com a necessidade do emprego.

A Figura 2.3, mostra a configuração do primeiro módulo idealizado. Basicamente consiste de duas peças em formato de um "U" retangular que se unem ao meio por uma fina lâmina de aço (0,04 ou 0,06mm de espessura) que sustenta a massa sísmica, e tem como função principal evitar esforços e movimentos transversais à direção de medição. Para melhorar a sensibilidade de resposta o valor da massa foi consideravelmente aumentado, visto que nesta configuração a lâmina ao sustentar a massa também confere uma maior rigidez ao movimento da massa que no protótipo anterior. Neste protótipo, excetuando-se a lâmina, o corpo do módulo e massa sísmica foram confeccionados em latão.



Figura 2.3: Vista do primeiro módulo.

Para unir os módulos em uma única peça, foram usados estojos passantes que transpassam placas de suporte com ranhuras que se encaixam aos módulos, Figura 2.4. A fim de se comprovar o funcionamento do novo conceito foi construído um protótipo para medição em duas direções apenas.

Durante a montagem constatou-se que os módulos facilitam o processo de colagem, com epóxi, da fibra com as redes de Bragg à massa, uma vez que agora trabalha-se apenas com uma fibra óptica ao invés de três. Por outro lado, foi constado que a posição dos módulos transversais (módulo 2 da Figura 2.4) era inadequada durante a montagem final, pois com o esforço empregado para fixar os estojos, a estrutura em "U" não suportava a carga lateral e se deformava transmitindo esta deformação para a lâmina, e por conseguinte, para o resto do conjunto. Essa limitação, bem como as dimensões excessivas necessárias para um modelo com três módulos foram decisivas para se desistir deste projeto construtivo e partir para uma tentativa de aperfeiçoá-lo.

Os conceito dos módulos havia sido aprovado. Os módulos, separadamente, funcionavam muito bem e somente o problema da montagem final foi constatado. Apenas os resultados de um dos módulos, o não deformado, foram considerados durante as análises dos resultados deste protótipo.



Figura 2.4: Montagem do protótipo 2.





Figura 2.5: Módulo com furos passantes.

O terceiro protótipo de acelerômetro triaxial deu continuidade ao conceito de módulos individuais, mas com algumas pequenas modificações. A Figura 2.5 mostra a principal alteração que é o novo desenho para as peças em formato de "U". Foram feitos furos passantes na base destas peças para que, na montagem final dos módulos transversais, estes pudessem ser empilhados e fixados com os estojos sem a necessidade de placas intermediárias o que reduziria as dimensões e a massa final do conjunto, Figura 2.6.

Já comprovada a eficiência do conceito dos módulos construiu-se um protótipo para medição nos três eixos. A maior dificuldade constatada foi que a união dos módulos 2 e 3 era prejudicada pelo desalinhamento dos furos passantes destes módulos no momento da colocação dos estojos de fixação. Devido às pequenas dimensões, qualquer diferença nas peças, gerada durante o processo de usinagem e na união das peças em "U" com o adesivo epóxi, era suficiente para provocar este desalinhamento. Com isso, os estojos de fixação não se assentavam com facilidade nos furos o que fez com que as peças em "U", depois de montados os módulos, precisassem ser re-trabalhadas, o que mostrou ser pouco prático além do perigo de se danificarem as partes já montadas.



Figura 2.6: Montagem do protótipo 3.

O protótipo foi construído em liga de titânio, e apesar das dificuldades da montagem final, sua estrutura foi considerada satisfatória em termos de rigidez e dimensões. A idéia de se colocar os módulos transversais empilhados, como de se esperar, funcionou sem problemas.

Da observação destes resultados, surgiu a necessidade de se substituir a forma de fixação dos módulos através de estojos, por outra que resultasse em igual rigidez e com maiores tolerâncias nas suas dimensões evitando os problemas de desalinhamento ocorridos. Além de também se eliminar o uso de roscas e porcas para a fixação, visto que o manuseio das ferramentas para esta tarefa era extremamente delicado.

2.4 Protótipo 4

O terceiro protótipo de acelerômetro triaxial, eliminou os furos passantes nas peças em "U" e substituiu-os por entalhes laterais, Figura 2.7. Da mesma forma anterior, ao invés de quatro estojos de fixação tem-se agora quatro cantoneiras laterais que, através de adesivo epóxi, unem o conjunto final, Figura 2.8.



Figura 2.7: Módulo com canaletas.

As peças deste protótipo foram todas usinadas em liga de duralumínio, com exceção da lâmina em aço e as massas sísmicas em latão.

Este protótipo foi o primeiro a possuir um corpo externo de proteção. Para adaptação em uma carcaça de formato cilíndrico, foram projetados dois anéis acoplados às placas de fixação inferior e superior. Depois de inserido o acelerômetro com os anéis na carcaça cilíndrica, duas tampas vedam o conjunto final conferindo rigidez e vedação ao dispositivo. As dimensões finais do protótipo ficaram dentro do esperado, com 77mm de comprimento e 38,1mm (1 $\frac{1}{2}$ in) de diâmetro e massa total de aproximadamente 139 gramas.

O formato cilíndrico foi adotado para melhor manuseio e adaptação do acelerômetro aos cabos das linhas de transmissão e/ou qualquer outra estrutura através de braçadeiras. Através da tampa superior o cabo de fibra óptica é passado, e na tampa inferior há uma rosca de fixação para os testes de bancada no excitador.

Este protótipo foi bastante útil tanto no que diz respeito aos seus resultados, quanto no desenvolvimento dos procedimentos de montagem. Por ser este o primeiro protótipo encapsulado, com acabamento próximo do que se idealiza para o produto final, todas as dificuldades previstas e confirmadas durante sua montagem deverão servir para os demais dispositivos ou protótipos.



Figura 2.8: Montagem do protótipo 4.

Tais dificuldades estão ligadas principalmente ao fato de se trabalhar com apenas uma fibra óptica em todos os três módulos. Devido à constante busca por menores dimensões, as curvas que esta fibra necessita realizar no interior do corpo externo estão cada vez mais próximas do limite da resistência mecânica e das perdas de potência óptica induzidas.



Figura 2.9: Protótipo 4 encapsulado.

2.5 Protótipo 5

Apesar dos bons resultados extraídos do protótipo 4, que emprega os módulos medição com entalhes, algumas alterações se fizeram necessárias para melhorar os resultados anteriores. Como será apresentado no capítulo que trata de todos os resultados experimentais obtidos, algumas freqüências naturais de vibração inesperadas surgiram em uma região espectral abaixo do esperado.



Figura 2.10: Princípio da transmissão da vibração transversal da massa sísmica.

A primeira questão a ser respondida era o que estaria causando freqüências de ressonância tão abaixo do esperado. As investigações destes fenômenos apontaram a influência dos efeitos transversais, não notados anteriormente nos outros protótipos. Essas ressonâncias portanto, precisariam ser eliminadas ou simplesmente "deslocadas" para uma região de maior freqüência.

Mesmo a massa sísmica estando suportada por uma placa presa em duas de suas arestas, Figura 2.7, e mesmo o modelo tendo sido tratado desde as primeiras análises numéricas como sendo tridimensional, os movimentos de vibrações torsionais em relação ao eixo da fibra foram maiores do que o esperado, o que acabava induzido sinais na rede de Bragg.

Estas vibrações torsionais provocavam na rede Bragg uma vibração com o dobro da freqüência do movimento, o que em termos práticos representou uma pequena vantagem. A Figura 2.10 mostra que para uma vibração de freqüência f_v na direção z, a freqüência do sinal medido na direção transversal $x \in y$, f_t , é sempre o dobro do valor da direção z. Ou seja, para qualquer aumento obtido na freqüência natural dos modos transversais, isso representaria o dobro da freqüência no sinal medido.

As alterações no módulo foram realizadas afim de eliminar essas perturbações transversais. A Figura 2.11 mostra o novo módulo projetado. As principais modificações foram a inclusão de uma haste para funcionar como mais um ponto de fixação da placa, e pequenas alterações dimensionais para reduzir o tamanho final do módulo.



Figura 2.11: Protótipo 5 - Novo módulo.

Embora cada parte do módulo possua um desenho assimétrico, a fixação da placa na montagem final do módulo é simétrica nas suas quatro arestas. Estas modificações alteraram da maneira desejada as ressonâncias transversais, reduzindo o seu valor em amplitude de excitação e aumentando o seu valor em freqüência. Em todas, os valores foram previamente avaliados antes através do método dos elementos finitos, como será mostrado no capítulo que trata das simulações numéricas.

A montagem final deste novo módulo é praticamente idêntica à do protótipo 4, e como foram aplicadas algumas pequenas reduções nas dimensões do módulo isto facilitará a montagem no encapsulamento final.

A Figura 2.12 mostra o protótipo de um novo encapsulamento para um acelerômetro com os novos módulos. Neste, apenas dois módulos foram adotados para medições transversais ao eixo de cilindro. A maior modificação em relação ao encapsulamento simples do protótipo 4 é que os módulos empilhados são montados diretamente nas tampas. Isso evitou o uso dos anéis usados anteriormente o que reduz o número de peças e reduz os problemas de desalinhamento.

As cantoneiras de fixação laterais continuaram sendo empregadas para unir os módulos. O conjunto se encaixa na tampa inferior formando uma única peça. Na tampa superior foi adaptado um conector óptico, um "I" óptico, para facilitar a instalação do transdutor durante os testes de medição. Para economia de espaço interno no transdutor, o conector foi posicionado excentricamente na tampa.



Figura 2.12: Encapsulamento do protótipo 5.

Em ambas as tampas foi adotado um perfil mais arredondado com o-rings de vedação laterais. O corpo do cilindro possui uma secção mais espessa para acomodar as roscas de fixação dos excitadores. Também foi feita uma rosca na tampa inferior para testes de sensibilidade transversal.

Protótipos com os três eixos ativos são facilmente adaptáveis a partir deste encapsulamento, sem a necessidade grandes alterações construtivas.