

SEISMIC INTERFEROMETRY TECHNIQUE FOR BUILDING MONITORING: A COMPUTATIONAL METHOD TO DETERMINE DYNAMIC PARAMETERS

Maria Luíza Cardoso Felipe

malucardoso92@gmail.com

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Aderson Farias do Nascimento

nascimentoafd.dgef.ufrn@gmail.com

Departamento de Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Petrus Gorgônio Bulhões da Nóbrega

petrus.nobrega@gmail.com

Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Selma Hissae Shimura da Nóbrega

shsnobrega@gmail.com

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Campus Universitário, Lagoa Nova, 59078-970, Natal-RN, Brasil

Abstract. Seismic interferometry applied to environmental vibration data is an advantageous strategy used to verify structures responses, especially regarding to continuous data logging and in situations where it is not practical or even unsafe, to allocate dynamic sources. Its application yields important information about mechanical properties and discontinuities of the medium, since the produced waves establishes an elastic response regarding the medium in which it propagates. The analysis, after the monitoring procedure, consisted in an application of a computational technique known as “deconvolution” of environmental-vibration records to obtain traveling waves and extract the natural frequency due to the linear response of the building, from peaks of the average power spectrum of these deconvolved waves. As application, the environmental noise propagated in a five-story building located at Federal University of Rio Grande do Norte was studied to obtain responses of frequencies. Accelerometers localized on the floors of the building registered the environmental noise along some days and, consequently, made it possible to observe the relation between human and environmental activities and the oscillation amplitude of the signal. To confirm these values, a computational mathematical model of the building was built, using a commercial software, in order to obtain the numerical natural frequencies. At last, a critical analysis of the results is performed.

Keywords: Environmental vibration; Seismic interferometry; Deconvolution

1 Introdução

O ruído é um conceito que, independentemente da área de estudo, tende a se apresentar como um termo usado para designar um emaranhado indesejado de informações prejudiciais à análise do sinal recebido, significando uma espécie de lixeira que abriga diversos fenômenos aleatórios registrados.

Então é possível concluir que dali inexistirá qualquer informação relevante a ser extraída? A resposta é negativa.

Para Snieder e Wapenaar [1], o que determina se esse ruído é apenas um conjunto aleatório de dados, ou se ele contém informações úteis, é o modo como o seu processamento é realizado. De fato, apesar de o ruído ser constituído de uma sobreposição de ondas difusas, que se propagam em todas as direções, ele carrega consigo informações importantes, as quais podem significar e revelar muito acerca do caminho percorrido. Isso porque, ao se propagarem, as ondas produzem uma resposta elástica referente ao meio pelo qual passaram, sendo possível, a partir delas, determinar propriedades e descontinuidades desse meio, como a velocidade sísmica, por exemplo.

Uma forma de realizar a reconstrução dessas ondas que se propagam entre dois pontos arbitrários com o intuito de obter-se a resposta do meio é utilizando a técnica de interferometria sísmica. Segundo Wapenaar et al. [2], este é um método desenvolvido na segunda metade do século 20, e que consiste no princípio de criação de uma nova resposta sísmica através da correlação de informações obtidas em receptores localizados em diferentes pontos, a fim de se calcular a Função de Green entre esses pontos.

Isso significa que, considerando uma onda difusa propagando-se da fonte até dois receptores localizados arbitrariamente no espaço, a correlação das ondas registradas nesses dois receptores resultará na mesma resposta do meio que seria obtida em um dos receptores, caso a fonte estivesse localizada no outro. Define-se, assim, o conceito de fonte virtual, as quais são criadas em posições onde só há receptores, sem a necessidade do conhecimento prévio de parâmetros do meio ou da posição da verdadeira fonte de vibração.

A interferometria sísmica permite, assim, trabalhar com qualquer tipo de vibração que gere ondas que provoquem uma resposta elástica do meio pelo qual passaram, havendo apenas a presença de receptores para captá-las. A vantagem de se utilizar como fontes sísmicas o ruído ambiente está baseada em dois aspectos: continuidade e passividade.

Diferentemente de certas fontes de vibração como explosivos e excitadores, que precisam ser locados e operados com cuidado, ou terremotos, cuja periodicidade de ocorrência é bastante incerta, o ruído ambiente é gerado quase que continuamente, seja proveniente da atividade humana, do vento, do tráfego de veículos, etc. Independentemente da origem, tais fontes estão por todos os lados e atuando quase permanentemente. Isso fornece, portanto, um leque de informações obtidas com um baixo custo e, principalmente, sem interrupções, característica essencial para estudos que trabalham com continuidade e evolução temporal.

Diante dos benefícios citados, a utilização da interferometria sísmica de ruído ambiente para se recuperar a função de Green do meio vem ganhando cada vez mais espaço em trabalhos e aplicações, que abrangem desde áreas relacionadas ao estudo de estruturas geológicas da Terra (Draganov et al. [3]) até aquelas que trabalham com estruturas civis, como edifícios (Nakata e Snieder [4]). Relacionada ao último caso, exatamente o foco desse trabalho, a utilização do ruído ambiente como fonte para o monitoramento de construções civis é uma abordagem recente e vem se tornando uma alternativa viável, superando muitas limitações encontradas para se determinar o estado de integridade de uma estrutura. A continuidade das informações obtidas, a conveniência e a rapidez no processo de locação dos sensores e na aquisição de dados, além do relativo baixo custo operacional, são fatores vantajosos que se destacam nessa abordagem.

Neste contexto, este trabalho se propõe a apresentar a técnica de interferometria sísmica de ruído ambiente, e a realizar uma aplicação experimental com o intuito de validar a eficácia do método. Para isso, um edifício de 5 (cinco) pavimentos localizado no Campus da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) foi escolhido como objeto de estudo. Analisou-se o ruído ambiente propagado na edificação durante um período de alguns dias a fim de extrair alguma característica

modal da estrutura. Por fim, um modelo computacional para o edifício foi elaborado com um programa profissional de projetos de estruturas de concreto, a fim de aferir as informações experimentais fornecidas pela técnica.

2 Fundamentação teórica do método

2.1 Interferometria sísmica

De uma forma geral, a interferometria é um método utilizado no estudo de fenômenos de interferência entre sinais que cria como resultado um novo sinal, o qual pode ser usado para explorar as diferenças, ou semelhanças, entre os sinais de entrada (Curtis et al. [5]). Sendo os sinais gerados por ondas, a prática da interferometria pode ser aplicada a um largo espectro de campos, incluindo astronomia, fibras ópticas, metrologia óptica, mecânica quântica, oceanografia e sismologia.

Dessa forma, quando se fala de interferometria sísmica, simplesmente está se referindo ao estudo de padrões de interferências envolvendo pares de ondas sísmicas, as quais geram reverberações no solo através de terremotos, microtremores, ou fontes artificiais, como explosivos e máquinas, ou o ruído. Quando essas ondas propagam por um determinado meio, elas provocam uma resposta elástica do meio, a partir da qual suas propriedades possam ser estabelecidas (Snieder e Wapenaar [1]).

A técnica da interferometria sísmica envolve duas etapas simples de processamento: a correlação, e o empilhamento dos sinais registados. Através delas, a resposta gerada pode ser interpretada como a onda detectada em um dos receptores, caso a fonte sísmica se encontrasse no outro receptor. A resposta é equivalente à Função de Green empírica convolvida com a função de onda da fonte, e por isso a interferometria sísmica é também chamada de recuperação da Função de Green (Wapenaar et al. [2]).

De uma forma simplificada, mas de fácil compreensão, Wapenaar et al [2] abordou a técnica da interferometria sísmica para o caso da propagação de uma onda direta unidimensional, 1D (Fig. 1).

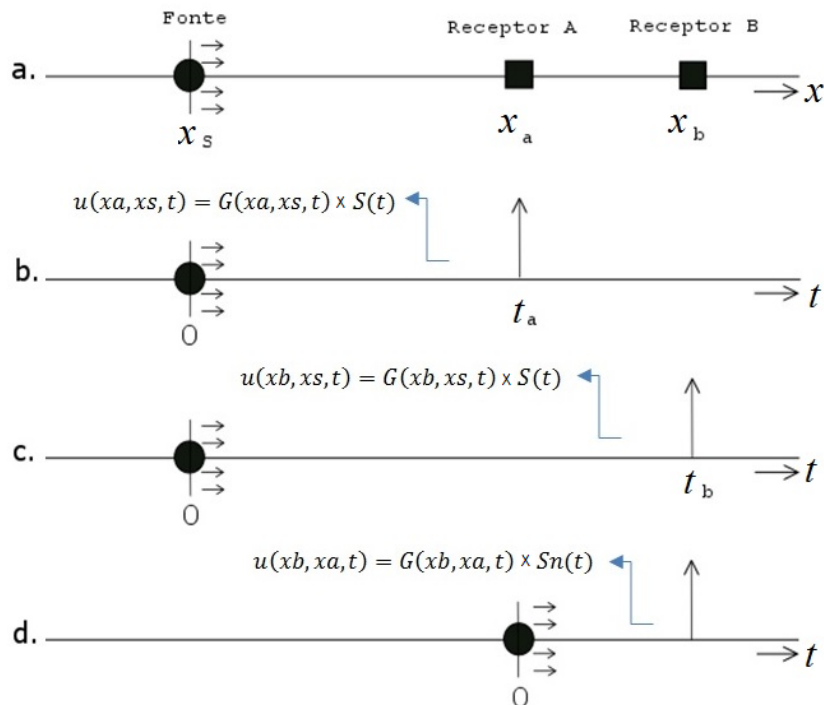


Figura 1. Exemplo 1D de interferometria sísmica para uma onda direta e plana

Ao longo do eixo x , considera-se uma fonte impulsiva S , localizada na posição x_s , e dois receptores (A e B) localizados à sua direita, nas posições x_a e x_b , respectivamente. No instante $t = 0$, a fonte emite uma onda plana que se propaga para a direita ao longo do eixo e para a qual se assume uma velocidade c constante e um meio de baixa perda (Fig. 1a). Cada receptor registra uma resposta ao impulso gerado, a qual é mostrada na Fig. 1b para o receptor A e na Fig. 1c para o receptor B. Essa resposta pode ser descrita como a convolução da função de Green $G(x_r, x_s, t)$ – com o primeiro e o segundo argumento denotando as coordenadas do receptor e da fonte, respectivamente, enquanto o último argumento refere-se ao tempo t – com a função da fonte $S(t)$, tal que:

$$u(x_a, x_s, t) = G(x_a, x_s, t) \times S(t) \quad (1)$$

$$u(x_b, x_s, t) = G(x_b, x_s, t) \times S(t) \quad (2)$$

No exemplo, nota-se que a onda propagada da fonte S até os dois receptores apresenta um caminho em comum, de x_s a x_a . Aplicando a convolução do sinal registrado em x_b com o sinal registrado em x_a , a função resultante seria referente ao caminho em comum que ambas as ondas percorrem, entre x_a a x_b . Ou seja, nesse processo obtém-se um sinal que pode ser interpretado como uma resposta originada no ponto x_a (agora considerada uma *fonte virtual*) que foi observada em um receptor localizado em x_b , com uma função de Green desse meio dada por $G(x_b, x_a, t)$, como mostrado na Fig. 1d. Percebe-se, diante disso, que tanto valores da velocidade c , quanto da posição da fonte real x_s e do tempo absoluto t no qual o impulso foi gerado, não precisam ser conhecidos.

Executando a operação de convolução do sinal do receptor B com o sinal do receptor A, obtém-se:

$$u(x_b, x_s, t) \times u(x_a, x_s, -t) = G(x_b, x_s, t) \times S(t) \times G(x_a, x_s, t) \times S(t) \quad (3)$$

A convolução das duas funções de Green $G(x_b, x_s, t) \times G(x_a, x_s, -t)$ fornece a função de Green do meio entre A e B, dada por $G(x_b, x_a, t)$. A convolução da função da fonte $S(t)$ por ela mesma é denominada autocorrelação, representada por $S_n(t)$.

A convolução das respostas obtidas pelos dois receptores (Fig 1d) pode ser dada por:

$$u(x_b, x_a, t) = G(x_b, x_a, t) \times S_n(t) \quad (4)$$

Para este estudo, a situação aqui abordada levará em consideração a propagação vertical da onda através do prédio, analisando apenas uma única dimensão. Os valores de amplitude e número de onda permanecerão constantes e as ocorrências de reflexões internas não serão computadas.

2.2 Processo de deconvolução

Há, basicamente, três operações nas quais a interferometria sísmica pode se basear a fim de extrair a função de Green: (i) correlação cruzada; (ii) deconvolução; e (iii) coerência cruzada (Snieder et al. [6]; Wapenaar et al. [2]).

Apesar da maior parte da bibliografia sobre o tema envolver algoritmos fundamentados na correlação cruzada (e.g., Claerbout [7]; Wapenaar [8]), estudos mostraram que o uso da técnica de interferometria sísmica baseada na deconvolução apresenta-se como a melhor ferramenta para o monitoramento de estruturas, especialmente aquelas analisadas em uma direção (Nakata e Snieder, [9]).

Ademais, quando aplicado a construções civis, como edifícios, o método de deconvolução permite extrair uma resposta “pura” da estrutura, independentemente de suas vinculações ao solo. Isto porque a deconvolução muda as condições de contorno na base da estrutura (Snieder e Şafak [10]; Nakata e Snieder [4]).

Quando tratada na área de análise funcional e processamento de sinais, a convolução é um operador linear que, a partir de duas funções dadas, resulta numa terceira, que mede a área subentendida pela superposição delas em função do deslocamento existente entre elas. Por outro lado, a deconvolução, funcionando como a operação inversa da convolução, tem como objetivo remover os efeitos da fonte do sinal registrado para que o resultado obtido conserve apenas o sinal de reflexão desejado, ou pelo menos uma estimativa do mesmo. Dessa forma, a deconvolução de uma onda

costuma ser um artifício matemático utilizado nos estágios iniciais de tratamento de dados a fim de subtrair a fonte de impulso sísmico presente em cada registro, para torná-lo algo mais adequado à análise.

Wapenaar et al. [11] explicou acerca do processo de deconvolução quando aplicado à interferometria sísmica. Considerando a Eq. (4), obtém-se da relação dos termos da esquerda que:

$$u(xb, xa, t) = u(xb, xs, t) \times u(xa, xs, -t) \quad (5)$$

Essa correlação, descrita por uma convolução de sinais no domínio do tempo, quando analisada no domínio da frequência, assume como resultado a Eq. (6). A operação de convolução nesse domínio se mostra como uma multiplicação entre os fatores, enquanto que a inversão de tempo (-t) corresponde ao seu complexo conjugado (aqui denominado por \hat{u}^*). Dessa forma, com \hat{u} sendo a representação da função no domínio da frequência e ω a frequência angular, obtém-se:

$$\hat{u}(xb, xa, \omega) = \hat{u}(xb, \omega) \hat{u}^*(xa, \omega) \quad (6)$$

A equação acima resulta no produto da função de Green entre os receptores A e B com a autocorrelação da fonte. Esse último fator pode atrapalhar a extração da função de Green do meio e a interpretação dos resultados obtidos, caso a fonte não seja conhecida. Por isso, para eliminá-lo, o processo de deconvolução pode ser aplicado aos dados.

Quando operada no domínio da frequência, a deconvolução corresponde à simples divisão espectral dos termos. Dessa forma, o termo da fonte comum a ambos os registros será cancelado, deixando-se apenas os termos referentes à função de Green.

$$\hat{D}(xb, xa, \omega) = \frac{\hat{u}(xb, \omega)}{\hat{u}(xa, \omega)} \quad (7)$$

Para não deixar essa divisão espectral instável, isto é, quando o termo da base se tornar um valor muito pequeno, utiliza-se um parâmetro estabilizador γ :

$$\hat{D}(xb, xa, \omega) = \frac{\hat{u}(xb, \omega) \hat{u}^*(xa, \omega)}{|\hat{u}(xa, \omega)|^2 + \gamma} \quad (8)$$

Quando $\gamma = 0$, a Eq. (8) reduz-se a Eq. (7). Por outro lado, se $\gamma \gg |\hat{u}(xa, \omega)|^2$, a Eq. (8) irá corresponder a uma versão escalada da correlação definida na Eq. (6).

Na deconvolução, o estado de onda que é recuperado é vantajoso quando se lida com meios que provocam atenuação, unindo de forma correta valores de fase e amplitude sem precisar de informações a respeito da fonte. Portanto, devido a essa propriedade da deconvolução para modelos baseados em uma dimensão, essa técnica associada à interferometria sísmica tem sido bastante utilizada em trabalhos que envolvem o estudo da resposta estrutural de edifícios.

3 Análise experimental

3.1 Características da edificação

O edifício estudado (Fig. 2) localiza-se no campus central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e pertence ao Departamento de Geofísica. Composto de cinco pavimentos (térreo, três pavimentos elevados, e a laje de cobertura), nele funciona o Laboratório de Sismologia (LabSis). No momento do experimento a edificação já estava inteiramente concluída, mas ainda não em operação plena, com poucos equipamentos instalados e apenas algumas salas ocupadas.

A estrutura da edificação é de concreto armado convencional (concreto classe C25), sendo as lajes do tipo treliçada unidirecional, com nervuras de travamento e blocos de EPS. As paredes são em alvenaria de bloco cerâmico tradicional.

A escolha por este edifício baseou-se no fato de que ele poderia ser monitorado com relativamente poucos equipamentos (um por pavimento, conforme descrito no item seguinte), e por não estar a plena operação os equipamentos poderiam ser deixados por alguns dias seguidos, sem maior preocupação com a sua integridade.



Figura 2. Edifício do LabSis - UFRN

3.2 Metodologia

Em cada um dos pavimentos do LabSis foi instalada uma estação sismológica (chamada de DG01, no térreo, a DG05, na cobertura), ilustrada na Fig. 3, consistindo basicamente de um acelerômetro triaxial, um receptor/gravador, e uma bateria de alimentação, montados no final do corredor principal do pavimento-tipo da edificação, apresentado na planta baixa da Fig. 4. A exceção é feita para a estação DG05, a qual resultou localizada na área próxima ao duto do elevador.



Figura 3. Detalhe da estação sismológica e do acelerômetro triaxial fixado no piso

O posicionamento das estações é mais bem indicado nos cortes A-A' (leste-oeste) e B-B' (norte-sul) na Fig. 5 e na Fig. 6. Os receptores gravaram os sinais obtidos dos acelerômetros triaxiais segundo as componentes vertical, horizontal leste-oeste e horizontal norte-sul. Os dados obtidos foram coletados em modo contínuo, gerando arquivos a cada 1 hora de registro de dados, e o experimento durou um período de 9 (nove) dias (sendo o primeiro e o último dias parciais de coleta).

No pré-processamento dos dados, houve conversão dos dados brutos, registrados em formato REF TEK, para o formato SAC (Seismic Analysis Code). Desafortunadamente, após realizada a conversão, constatou-se que, das cinco estações instaladas, a localizada no terceiro pavimento (DG03), embora estivesse funcionando normalmente, não gravou os registros coletados. Três estações não apresentaram qualquer tipo de mau funcionamento durante a aquisição (DG02, DG04 e DG05), e a estação do térreo (DG01) apresentou uma falha na aquisição de dados (“gap”) no último dia de monitoramento, a qual não comprometeu os resultados.

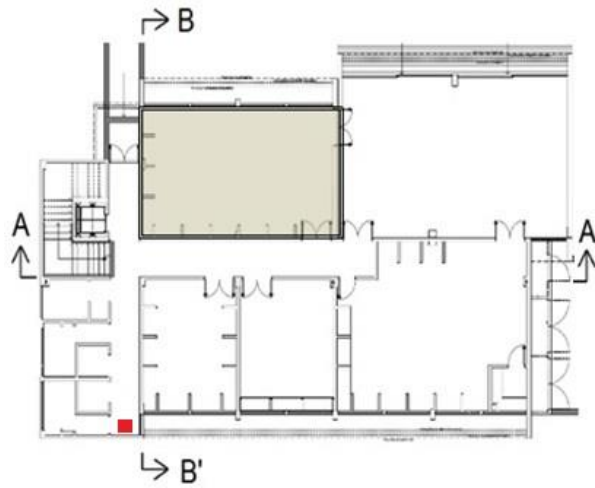


Figura 4. Planta baixa do LabSis

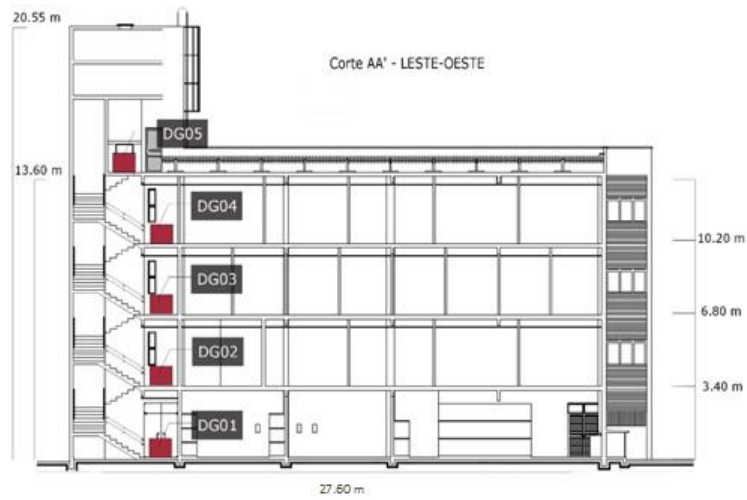


Figura 5. Corte AA' da edificação com a indicação das estações

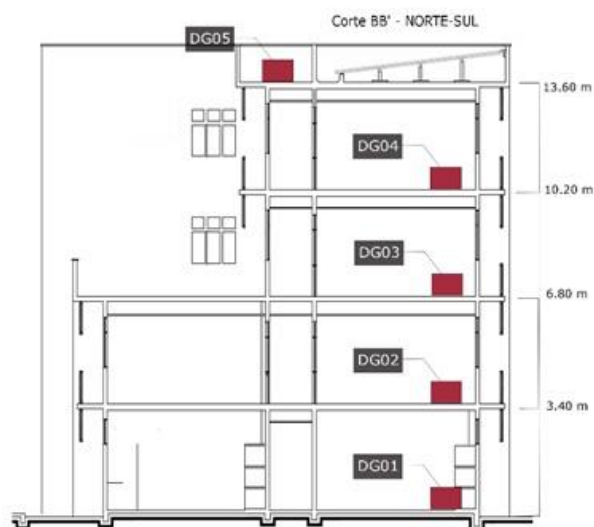


Figura 6. Corte BB' da edificação com a indicação das estações

Em seguida, pequenas correções foram aplicadas aos dados registrados nas três direções (norte-sul, leste-oeste e vertical). A tendência linear e a média dos dados foram removidas a fim de manter o traço centrado na posição zero. Posteriormente, os dados foram unidos ao longo do tempo de registro, construindo um sinal contínuo. Destaca-se que, pelo fato do prédio ainda não se encontrar em funcionamento durante o experimento, não houve o registro de grandes amplitudes provocadas pela excitação ambiental. Também não houve detecção de qualquer terremoto no período de aquisição.

A etapa do processamento de dados consistiu no processo de deconvolução. Amostras do sinal foram deconvolidas a cada 30 segundos, relacionando o registro de cada pavimento com o registro do primeiro pavimento. A partir da Eq. 8, a qual demonstra o cálculo genérico da deconvolução no domínio da frequência para dois receptores localizados em xa e xb , é possível reescrever essa equação para o domínio do tempo e em função dos receptores localizados em cada pavimento, tal que:

$$\hat{D}(z, t) = \sum_{n=1}^N \left[\mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{un(z, \omega) un^*(0, \omega)}{|un(0, \omega)|^2 + \alpha \langle |un(0, \omega)|^2 \rangle} \right\} \right] \quad (9)$$

Onde n é o número de intervalos de 30 segundos utilizados (100 nesse estudo); ω é a frequência angular; t denota o tempo; $un(z, \omega)$ é o registro de onda no domínio da frequência obtido em z (com $z = 0$ representando o primeiro pavimento, térreo; $z = 1$ representando o segundo pavimento, e subsequentemente até $z = 4$); $un^*(0, \omega)$ é o conjugado do registro de onda no domínio da frequência obtido no primeiro pavimento ($z = 0$); $|un(0, \omega)|^2$ é o espectro de potência da onda registrada no primeiro pavimento e $\langle |un(0, \omega)|^2 \rangle$ é o seu valor médio; \mathcal{F}^{-1} é a Transformada Inversa de Fourier; e α (igual a 0.5%) é o parâmetro de regularização que estabiliza o processo de deconvolução.

Após esse processo, todos os dados processados foram empilhados (“*stack*”) e normalizados. Por fim, um filtro passa-banda Butterworth foi aplicado a fim de se fazer uma divisão de todo o sinal em trechos, e analisá-los melhor separadamente.

3.3 Resultados

Inicialmente, antes mesmo do processo de deconvolução, os dados pré-processados foram unidos (lembrando que cada arquivo independente correspondia a 1h de gravação) com a finalidade de avaliar o comportamento do ruído ambiente, tanto ao longo da semana, como por pavimento, e por direção de vibração (vertical, leste-oeste EW e norte-sul NS).

Na Fig. 7 é possível observar essa variação temporal da amplitude do ruído registrado. Nota-se, claramente, a distinção das vibrações geradas ao longo do dia (com maior amplitude) daquelas geradas à noite (com menor amplitude). Esse comportamento está inteiramente ligado aos horários de maior atividade e tráfego de pessoas e veículos no entorno. A amplitude também decresce nos finais de semana, como destacado na cor cinza, embora não em significativa intensidade, considerando que o prédio ainda não estava em funcionamento no período do experimento. Como esperado, as amplitudes apresentam valores menores no pavimento térreo, aumentando com os níveis seguintes.

É importante ressaltar que todos os comportamentos relatados acima foram observados nas três direções do movimento, relacionando aumento de amplitude com atividades no campus. Contudo, nota-se que as amplitudes do ruído registradas pela componente Z (vertical) apresentam-se maiores que as amplitudes registradas nas demais direções.

Conforme já indicado, realizou-se a deconvolução do ruído registrado em todos os pavimentos com o registro da primeira estação (DG01), utilizando um intervalo de 30 segundos para cada deconvolução. Os resultados obtidos foram empilhados e o filtro passa-banda Butterworth foi aplicado. Os resultados são indicados na Fig. 8.

Igualmente, como já citado, a componente norte-sul não pôde ser avaliada nesta seção por problemas no processamento de seus dados e, sendo assim, a análise foi realizada exclusivamente nas componentes vertical Z e horizontal EW.

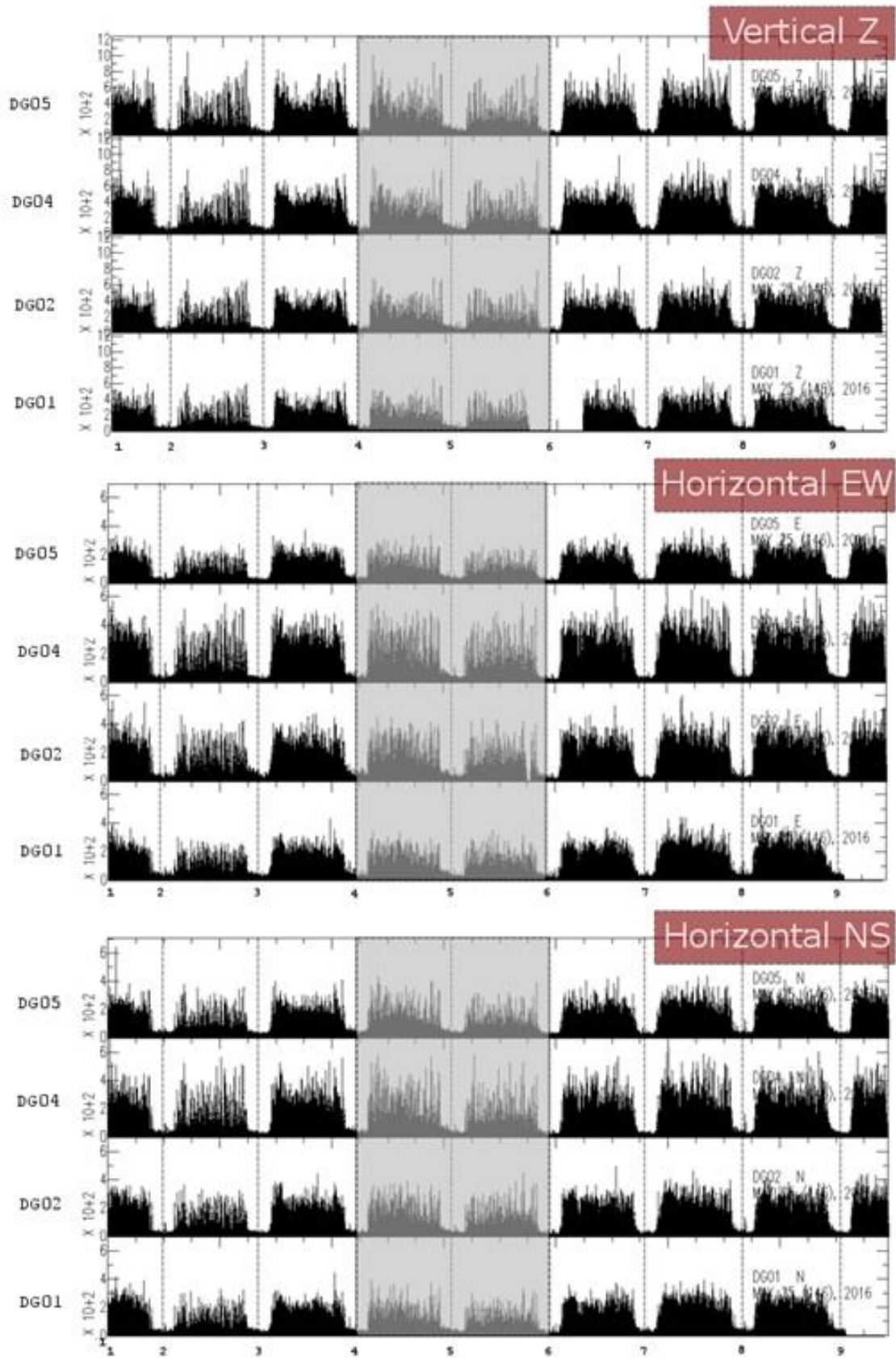


Figura 7. Sinal das quatro estações operacionais nas três direções de vibração

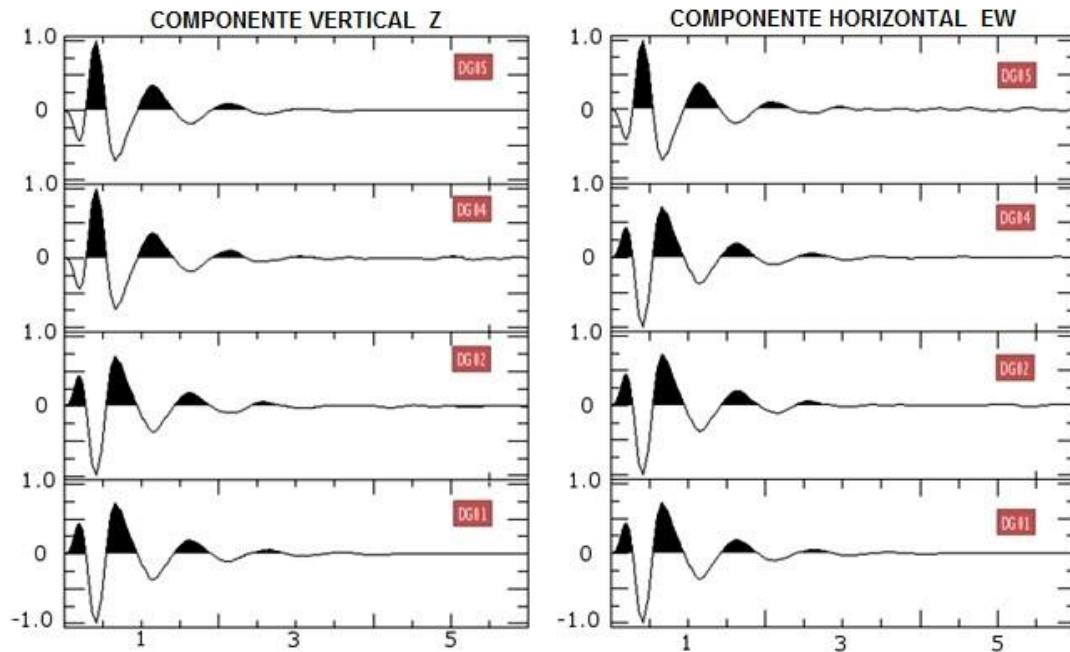


Figura 8. Deconvolução das ondas registradas em cada pavimento com o registro do térreo

De forma geral, os sismogramas da Fig. 8 mostram o comportamento temporal da onda propagando-se pelo prédio. O eixo “x” dos gráficos da Fig. 8 representa o tempo, em segundos, o que significa curvas no domínio do tempo, e não no da frequência.

A onda registrada pelos receptores é refletida no topo da edificação e se propaga para baixo, sendo novamente refletida pelo primeiro pavimento, agora com a polarização invertida. Essa reverberação da onda entre a base e o topo do prédio provoca atenuação da amplitude, como é possível notar pela sua suavização nos gráficos. Tem-se, portanto, que o processo de deconvolução resulta em ondas que são independentes do acoplamento da estrutura ao solo e que o decaimento da sua amplitude está relacionado apenas ao amortecimento do prédio (Snieder e Şafak [10]).

Considerando o sismograma gerado na direção vertical Z (Fig. 8, esquerda), pode-se perceber que o processo de inversão do pulso ocorre no quarto pavimento, de acordo com o sinal da estação DG04 (isto se não ocorrer no terceiro pavimento, estação DG03, sinal este que resultou perdido). Diferentemente, na direção horizontal EW (Fig. 8, direita), a inversão do pulso ocorre no quinto pavimento (estação DG05).

Como possível explicação para esse caso, tem-se que o sensor no quinto pavimento encontra-se na região em balanço, mais flexível, conforme pode ser visto no corte BB’ do prédio (Fig. 6). Essa mudança na estrutura do prédio pode provocar uma variação do coeficiente de reflexão daquele pavimento, invertendo a polarização da onda.

A frequência natural da estrutura pode ser encontrada através da análise espectral do sinal. Como afirmado anteriormente, as ondas foram deconvolidas com o sinal do primeiro pavimento e, após a aplicação da Transformada de Fourier, empilhadas. Essa soma dos dados resultou em um pico espectral que pode ser observado em aproximadamente 2,19 Hz, correspondente a uma frequência natural de vibração da estrutura (Fig. 9). Esta mesma indicação ocorre para as duas direções de movimento, tanto a vertical Z quanto a horizontal EW

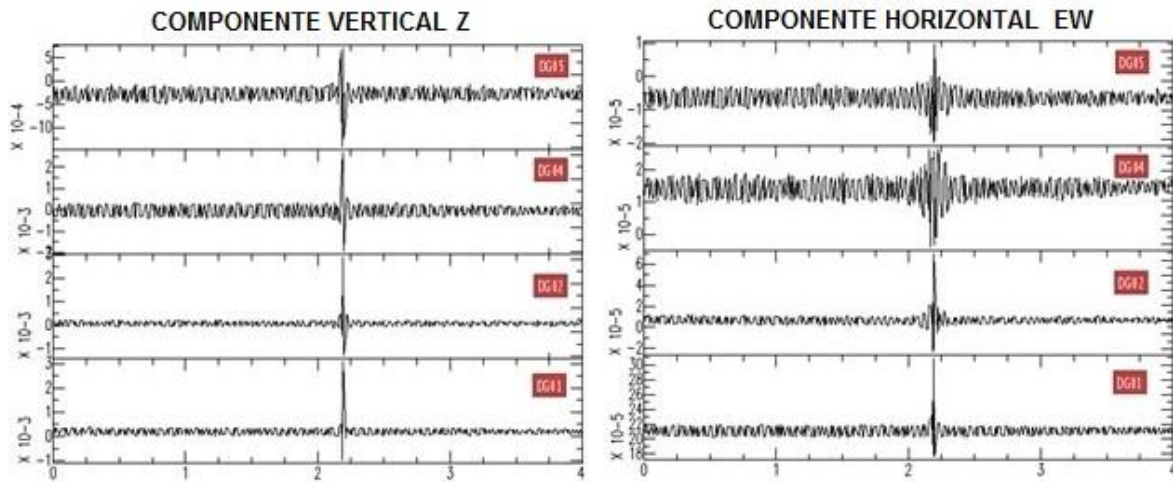


Figura 9. Espectros de potência para as componentes vertical “Z” e horizontal “EW”

O empilhamento dos sinais deconvolvidos foi feito, inicialmente, considerando uma janela temporal de menos de 1 hora, empilhando sinais a cada 30 segundos. À medida que essa janela foi sendo incrementada, ampliando o tempo de empilhamento, um novo pico no espectro foi observado, indicando um novo valor de frequência natural (0,55 Hz), além do primeiro valor já detectado de 2,19 Hz. Esses dois picos são ilustrados na Figura 10. É perceptível, ainda, a melhoria da resolução do sinal com o incremento do tempo de empilhamento dos dados.

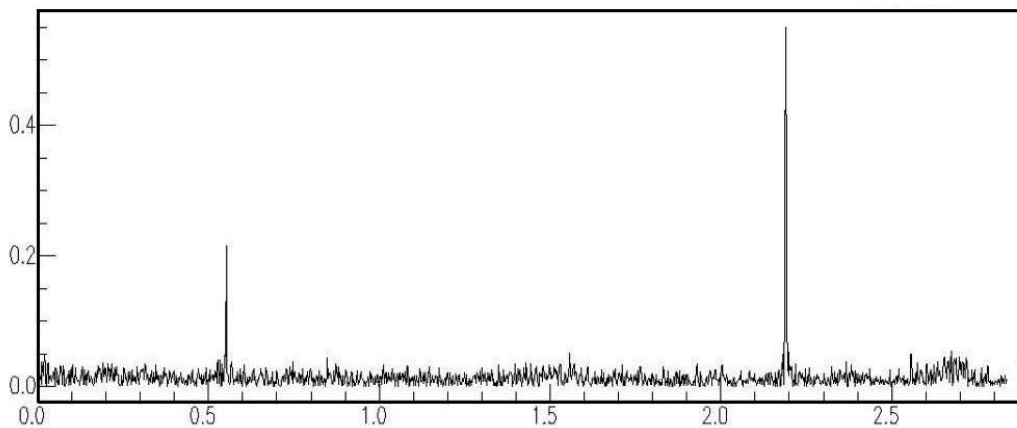


Figura 10. Espectro de amplitude para a componente horizontal EW

Uma grande dificuldade operacional nesse processo de empilhamento dos sinais deconvolvidos foi gerar uma rotina computacional que realizasse o processo automaticamente. De fato, o volume de informações é muito grande, o que exigiria um programa gerenciador. Em função do objetivo do trabalho ser, inicialmente, a avaliação da técnica, não houve tempo hábil para que se pudesse desenvolver um programa que fizesse o corte e o empilhamento, de 30 em 30 segundos, de todos os dias de experimento. Desta forma, optou-se por executar esta etapa de forma manual, o que se mostrou muito fatigante e contraproducente, prejudicando parcialmente, agora acredita-se, a própria apresentação dos resultados finais (isto só descoberto após a análise numérico-computacional, apresentada no item a seguir).

4 Análise numérico-computacional

4.1 Modelo numérico

A edificação do LabSis, por ser uma construção nova, foi projetada muito recentemente, sendo elaborados seus projetos pela Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Infra-UFRN).

O projeto de estruturas, mais especificamente, foi feito utilizando-se o programa profissional CAD/TQS. Exatamente esse software foi reutilizado (inicialmente em sua versão 18, e posteriormente conferido na mais atual, versão 21) a fim de se efetuar a análise modal do modelo, extraindo-se as características de frequências naturais do edifício.

A Fig. 11 e a Fig. 12 ilustram o modelo renderizado da estrutura, onde cada elemento (lajes, vigas, pilares e escadas) está indicado em suas proporções reais.

Com o programa TQS construíram-se dois modelos de pórticos espaciais (TQS [12]):

a) Modelo de barras formando um pórtico espacial de vigas e pilares, sendo o painel de lajes resolvido separadamente (ao pórtico são transferidas, então, as cargas e os nós associados das lajes). Internamente ao TQS, este modelo recebe a denominação de “Modelo IV”, sendo este termo aqui repetido;

(b) Modelo de barras formando um pórtico espacial integrado às lajes (cada uma destas é representada por uma grelha adicional). Este modelo é denominado no TQS de “Modelo VI”, e o novamente o termo é aqui utilizado.

A Fig. 13 ilustra os Modelos IV e VI.

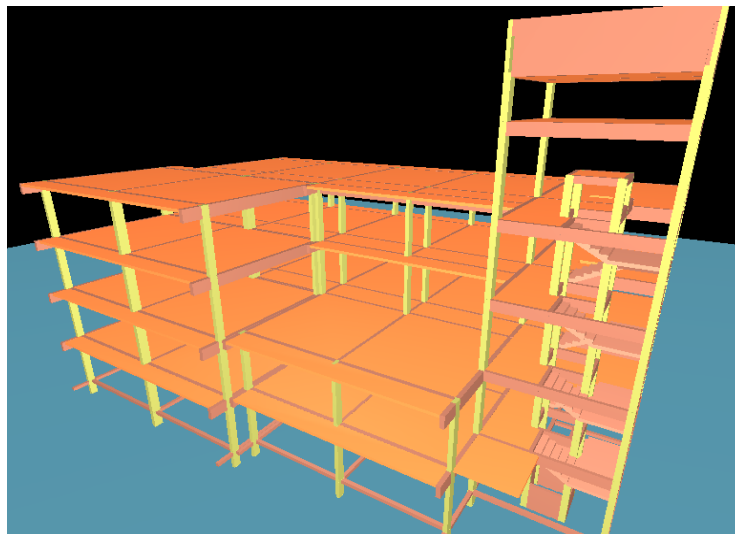


Figura 11. Modelo do LabSis com elementos em dimensão 3D

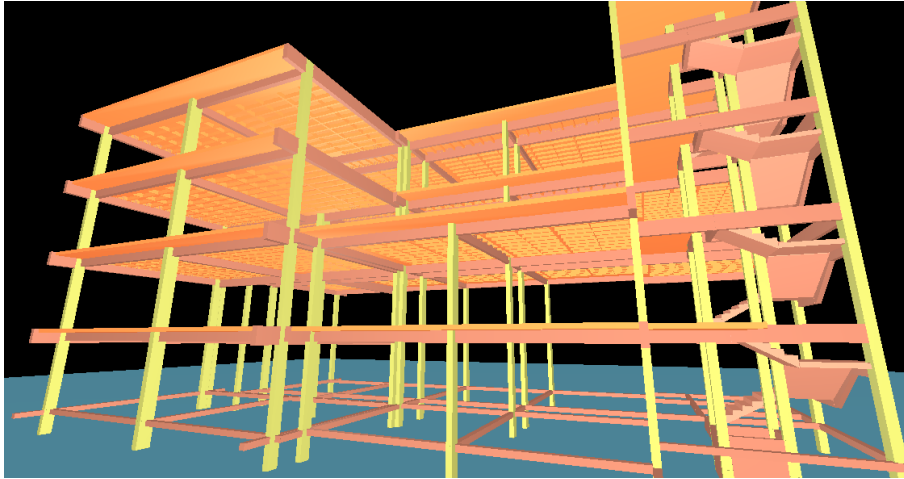


Figura 12. Modelo do LabSis com elementos em dimensão 3D e detalhe para as lajes

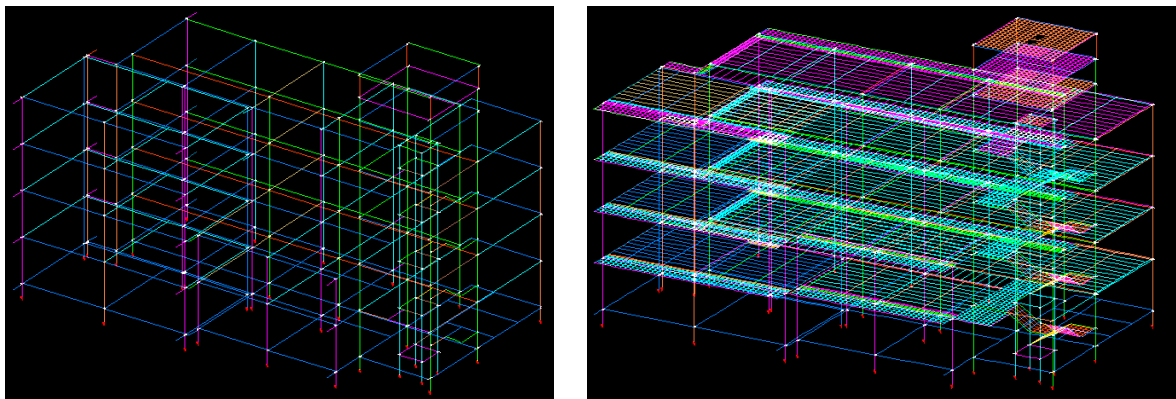


Figura 13. Modelos de pórticos espaciais do LabSis (Modelo IV e Modelo VI)

4.2 Resultados

A análise modal realizada com o programa TQS 21 revela para as frequências naturais os valores indicados na Tabela 1. Nesta, estão listados os resultados para os Modelos IV e VI, para melhor comparação dos resultados. Percebe-se, claramente, uma aderência dos valores e, como de se esperar, dados ligeiramente maiores para o Modelo VI, relativamente mais rígido que o IV, em função da incorporação das lajes no modelo computacional.

Tabela 1. Frequências naturais dos modelos IV e VI

Frequência natural	Modelo IV	Modelo VI
f1 (Hz)	0,48	0,58
f2 (Hz)	0,81	0,84
f3 (Hz)	0,88	0,89
f4 (Hz)	1,15	1,19
f5 (Hz)	1,71	1,91
f6 (Hz)	1,77	2,00
f7 (Hz)	1,85	2,14

5 Análise dos resultados

Os modelos computacionais, como previstos, apresentam coerência, com valores ligeiramente maiores para o Modelo VI, o que é lógico pela sua maior rigidez. Este aponta que a primeira frequência natural possui valor 0,58 Hz, o que é absolutamente próximo da primeira frequência experimental (0,55 Hz).

Subsequentemente, as frequências naturais computacionais se sucedem, sendo a sétima frequência determinada como 2,14 Hz, muito próxima da segunda frequência experimental (2,19 Hz). Não se arrisca aqui, de maneira suficientemente clara, apontar a razão exata para este salto das frequências, desconsiderando diversos valores intermediários; mas parece ser claro que o processo de empilhamento dos dados, feito de maneira manual, e daí não abranger a totalidade do período de ensaios, possui forte influência.

Além disso, algumas observações necessitam ser feitas, de natureza computacional ou de caráter experimental.

As respostas computacionais exatas, calculados exclusivamente a partir dos dados de projeto, revelam-se impossíveis, pois não se sabe com absoluta precisão a resistência do concreto utilizada (posto que não foi feito qualquer ensaio de testemunho de concreto), o que muda as propriedades do material, porque foram utilizadas cargas teóricas, e porque não foi feita uma análise “as-built” da estrutura, para que se pudesse considerar as massas da maneira mais correta possível.

No contexto experimental, percebeu-se, após os ensaios, que talvez a excitação ambiental tivesse sido relativamente pequena (dada a não operação plena do LabSis, sem a ocupação de suas salas ou instalação de equipamentos), o que pode ter provocado uma baixa excitação da estrutura com a pequena introdução de energia no sistema. Isto, perfeitamente, causaria uma não mobilização de alguns modos de vibração. Ademais, é importante lembrar que o edifício é relativamente baixo e robusto, e daí o efeito do vento finda de menor importância.

Interpreta-se que o ideal seria a reavaliação experimental do mesmo edifício, agora em operação considerada normal. Ademais, elaborar uma rotina computacional a fim de considerar, de forma automática, os dados do ensaio em sua totalidade.

6 Conclusões

O objetivo do presente trabalho foi o de mostrar a aplicabilidade e a viabilidade da utilização do método de interferometria sísmica, baseado na deconvolução de dados do ruído ambiente, para a determinação de parâmetros modais de edificações civis, que serão úteis, por exemplo, na avaliação da integridade destas construções.

Evidentemente, esta avaliação da integridade estrutural, a partir dos parâmetros modais, requer a realização de experimentos periódicos, seguindo uma metodologia, com a finalidade de estabelecer comparação entre os valores encontrados e, assim, monitorar a evolução temporal da resposta da estrutura.

O emprego da interferometria sísmica com dados provenientes de ruído ambiente revela-se uma técnica útil especialmente nos casos onde não é possível locar e operar, por segurança ou por inviabilidade prática, uma fonte de excitação na estrutura objeto do estudo. Embora a atividade dos transdutores e receptores por vários dias seguidos seja relativamente inconveniente, isto pode ser mais vantajoso que a aplicação de uma ação externa, muitas vezes unidirecional ou de única frequência, de curtíssima duração, ao passo que a excitação ambiental é diversa, de múltiplas direções e sentidos, solicitando a estrutura de modo absolutamente diverso. Outra desvantagem, resolvível pela programação de uma rotina computacional, é a consideração de um volume grande de dados oriundos dos sensores pelos vários dias de ensaios.

Em relação ao edifício em estudo, houve uma excelente convergência para a primeira frequência natural (e para a sétima, considerada a listagem computacional), mas um descompasso em relação às outras, requerendo, idealmente, a repetição do ensaio experimental, o que está sendo planejado para um futuro breve. Ademais, caso fossem considerados todos os dados de monitoramento, e não apenas

uma parte, dada a operação manual que foi empregada, certamente a aderência entre os resultados experimentais e computacionais seria significativamente maior.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Superintendência de Infraestrutura da UFRN, na pessoa do seu Superintendente Prof. Luiz Pedro de Araújo e de seu Diretor de Projetos Sileno Cirne, pela disposição e confiança na cessão dos arquivos digitais dos projetos de arquitetura e de estruturas da obra do LabSIS.

Referências

- [1] R. Snieder and K. Wapenaar. Imaging with ambient noise. *Physics Today*, vol. 63, n. 9, p. 44, Sept. 2010; <https://doi.org/10.1063/1.3490500>.
- [2] K. Wapenaar; D. Draganov; R. Snider; X. Campman; and A. Verdel. Tutorial on seismic interferometry: Part 1 – Basic principles and applications. *Geophysics*, vol. 75, n. 5, pp. 75A211-75A227, Sept. – Oct. 2010; <https://doi.org/10.1190/1.3457445>.
- [3] D. Draganov; X. Campman; J. Thorbecke; A. Verdel, and K. Wapenaar. Reflection images from ambient seismic noise. *Geophysics*, vol. 74, n. 5, pp. A63-A67, Sept.–Oct. 2009; <https://doi.org/10.1190/1.3193529>.
- [4] N. Nakata and R. Snieder. Monitoring a building using deconvolution interferometry. II: ambient-vibration analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 104, n. 1, pp. 204–213, Feb. 2014, <https://doi.org/10.1785/0120130050>.
- [5] A. Curtis; P. Gerstoft; H. Sato; R. Snieder and K. Wapenaar. Seismic interferometry – turning noise into signal. *The Leading Edge*, vol. 25, n. 9, pp. 1082-1092, Sept. 2006, <https://doi.org/10.1190/1.2349814>.
- [6] R. Snieder; M. Miyazawa; E. Slob; I. Vasconcelos and K. Wapenaar. A comparison of strategies for seismic interferometry. *Surveys in Geophysics*, vol. 30, pp. 503-523, Oct. 2009; <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9069-z>.
- [7] J. F. Claerbout. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, vol. 33, n. 2, pp. 264–269, Apr. 1968; <https://doi.org/10.1190/1.1439927>.
- [8] K. Wapenaar. Retrieving the elastodynamic green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation. *Physical Review Letters*, vol. 93, pp. 254–301, Dec. 2004; <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.254301>.
- [9] N. Nakata and R. Snieder. Estimating near-surface shear-wave velocities in Japan by applying seismic interferometry to KiK-net data. *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, p. B01308, Jan. 2012; <https://doi.org/10.1029/2011JB008595>.
- [10] R. Snieder and E. Safak. Extractin the building response using seismic interferometry: theory and application to the Milikan Library in Pasadena, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol 96, n. 2, pp. 586-598, Apr. 2006; <https://doi.org/10.1785/0120050109>.
- [11] K. Wapenaar; E. Slob; R. Snieder; A. Curtis. Tutorial on seismic interferometry: Part 2 — Underlying theory and new advances. *Geophysics*, vol. 75, n. 5, pp. 75A195-75A209, Sept. – Oct. 2010; <https://doi.org/10.1190/1.3463440>.
- [12] TQS Informática Ltda. Pórtico Espacial. Disponível em: <<http://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3150&language=pt-br>>.