

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de una
metodología para la
evaluación del daño
estructural en edificaciones
mediante el uso del tensor
de deformaciones
infinitesimales estimado con
ruido ambiental**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Mariana Garibay Morones

DIRECTOR DE TESIS

Mtro. Moisés Gerardo Contreras Ruíz
Esparza



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Contenido

1. Resumen.....	3
2. Introducción.....	4
3. Marco Teórico	6
3.1 Medios Difusos.....	7
3.2 Transformada de Fourier.....	8
3.3 Función de Transferencia.....	10
3.4 Deformación.....	12
3.4.1 Desplazamiento	13
3.4.2 Tensor Gradiente de Deformación	14
3.4.3 Tensor de Deformaciones Infinitesimales	16
3.5 Cocientes Espectrales.....	17
3.6 Ruido Sísmico	20
3.7 Lineamientos en el Empleo de Cocientes Espectrales	21
4. Instrumentación de Edificios.....	24
4.1 Instrumentación y Adquisición de Datos del Experimento	25
5. Procesamiento de Datos de Ruido Ambiental y Metodologías	30
5.1 Preprocesamiento y Procesamiento de Datos.....	30
5.2 Metodologías.....	34
5.2.1 Metodología 1	34
5.2.2 Metodología 2.....	36
6. Discusión de Resultados	41
6.1 Metodología 1	43
6.2 Metodología 2	61
7. Conclusiones.....	65
8. Referencias	67
9. Anexo.....	69

Agradecimientos

A mi mamá, mi más grande ejemplo y pilar todos estos años. Gracias por tu paciencia, apoyo y tu amor incondicional.

A mi abuelita, que siempre ha sido más que eso en mi vida.

A mi papá, gracias por tu amor y por ser un ejemplo de perseverancia y superación.

Toño, gracias por todo lo que hemos podido compartir este tiempo y por tu apoyo y amor constantes.

Familia Morones, por mostrarme siempre que el amor es el motor de la vida.

Dany y Pao, son las mejores hermanas que podría tener, llenan mis días de luz.

A los Chicos Rigor, Mariana, Paris, Marcelo, Joanna y Jaz: gracias por su amistad incondicional.

A mi tutor Moisés, por todo el tiempo de dedicación y momentos compartidos, has sido un gran maestro y no solo en mi vida académica.

Familia Garibay, por recordarme que la distancia no cambia el cariño.

En memoria de mi abuelito, un ejemplo de bondad y amor infinito.

1. Resumen

En este trabajo se evalúa la correlación entre el periodo natural de vibrar de diferentes puntos de un edificio de madera con el estado de daño de este, así como analizar las deformaciones que se presentaron antes y después de ensayar la estructura. La aplicación de este tipo de métodos nos permite hacer una evaluación, mediante mediciones no destructivas, de la salud estructural de edificaciones, el costo del estudio es bajo, fácil de emplear y se puede realizar en poco tiempo.

Se realizó un experimento en el que se instrumentó un edificio construido a escala 1:1 con 15 velocímetros de tres componentes de banda ancha, a 100 muestras por segundo. Se colocaron cinco equipos por planta, cuatro equipos en cada esquina y uno al centro geométrico de la planta, haciendo ciclos de medición de 24 horas para registrar ruido ambiental. Dichas mediciones se realizaron tres veces: una con el edificio vacío, una con el edificio cargado y otra con el edificio dañado después de haber sido sometido a tres ciclos de carga. En este trabajo se consideraron el primer y el último estado del edificio, empleando dos metodologías para el análisis de los datos de ambos estados. En primer lugar, se realizaron cocientes espectrales entre las componentes horizontales y las verticales. Después, se propuso una nueva metodología basada en el tensor de deformaciones infinitesimales para el análisis de daño en la estructura.

Con la primera metodología se pudo determinar el periodo de vibrar de los puntos de interés y se observó que había un patrón en el movimiento del edificio. Sin embargo, hubo problemas con el segundo piso por la forma constructiva de la casa, por lo que se propuso una nueva metodología en la que se empleó un análisis que se basa en el tensor de deformaciones infinitesimales. Con este segundo método, se pudieron observar las deformaciones en cada dirección de los puntos analizados y permitió observar claramente deformaciones angulares, con lo que se espera poder recuperar características mecánicas del medio medido en un futuro.

2. Introducción

Actualmente no existe una metodología simple y bien establecida para evaluar la salud estructural de edificaciones sin recurrir a mediciones invasivas, equipos de medición complejos o una gran cantidad de cálculos. La metodología de cocientes espectrales de ruido ambiental es no invasiva y se emplea en el cálculo del periodo de vibrar del terreno, haciendo uso del método de Nakamura de cocientes espectrales en las estructuras. Dicho método se puede aplicar en edificios ya que, al considerar que el suelo está distribuido en capas planas y que el periodo dominante es una consecuencia del contraste de impedancias entre las capas; dichas características se asemejan a la distribución de los elementos estructurales en edificaciones, por ejemplo, los distintos pisos de los edificios, que serían equivalentes a capas planas de suelo.

Tomando en cuenta lo anterior, esta tesis tiene como objetivo establecer si es posible detectar variaciones en la salud estructural de una casa de madera y bambú mediante métodos de prospección sísmica, como la sísmica pasiva. Un ejemplo es el de California (EUA), donde las pruebas de vibración forzada se han empleado por más de 65 años (Ivanovic et al., 2000) para estudiar la respuesta sísmica de los edificios. La instrumentación de edificios ha servido para comparar el estado estructural de un edificio antes y después de un sismo, para analizar la interacción suelo-estructura, y para discutir sobre la influencia de ésta última en edificios dañados.

En este trabajo se analizan dos estados estructurales del edificio: el primer estado de la estructura es en su estado original y el segundo estado es después de haberla llevado al 80% de su capacidad de carga. Para estudiar esta casa se emplearon dos metodologías: la primera metodología es la de cocientes espectrales (Nakamura, 2008), la cual se emplea para analizar el cambio en los valores del periodo de vibrar de la estructura, este periodo varía cuando hay alguna alteración en el medio (Chopra, 1995); la segunda metodología es una propuesta de esta tesis, basándose en el tensor de deformaciones infinitesimales estimado con ruido ambiental al cual se le llamará distorsiones entrepiso tridimensionales.

Para realizar lo descrito, se divide el trabajo en seis capítulos principales. Se tiene la introducción para que el lector tenga una idea general del trabajo, mientras que, en el tercer capítulo, el cual es el marco teórico, se incluyen los conceptos de Transformada de Fourier, deformación, ruido sísmico y teoría de cocientes espectrales, así como lineamientos para su aplicación. En el cuarto capítulo se hace una breve explicación sobre instrumentación en edificios y se describe la instrumentación que se utilizó en la casa analizada. En el capítulo cinco se detalla el procesamiento de los datos utilizados y se explican ambas metodologías empleadas que dieron lugar a los resultados que se presentan y discuten en el sexto capítulo.

Con la primera metodología se pudo determinar el periodo de vibrar de los puntos estudiados y se observó una tendencia en el movimiento del edificio. La segunda metodología se empleó para estudiar las deformaciones en el edificio, permitiendo observar las deformaciones en cada dirección de los puntos analizados y presentando una clara presencia de deformaciones angulares.

Esta tesis se enfoca en un análisis cualitativo de las deformaciones observadas. Se espera que sirva para posteriormente hacer análisis cuantitativos y comparar con modelos computacionales, con el fin de cotejar resultados y tener un estudio de las deformaciones de las estructuras. Se espera que se pueda hacer este análisis con distintas estructuras instrumentadas y que el uso de ruido ambiental se amplíe y no se limite al cálculo del periodo de vibrar.

3. Marco Teórico

El presente capítulo tiene la finalidad de explicar la teoría en la que se basa este trabajo para aplicar dos metodologías en el análisis de daño en una estructura de bambú. Como se explicó previamente, la primera metodología consiste en aplicar el método de Nakamura de cocientes espectrales para la estimación del periodo de vibrar de la casa de madera, mientras que la segunda metodología consiste en el análisis de deformaciones mediante el tensor de deformaciones infinitesimales estimado con ruido ambiental y analizado en el dominio de las frecuencias.

Con el objetivo de entender más acerca del ruido sísmico y su aplicación en edificios se realiza una explicación de medios difusos, la Transformada de Fourier y la función de transferencia. Estos primeros temas son la base teórica del trabajo, ya que permean en ambas metodologías usadas. Posteriormente, se tratan temas de la mecánica de medios continuos, como lo son la deformación, desplazamiento, el tensor gradiente de deformación y el tensor de deformaciones infinitesimales, estos serán empleados como base para plantear la segunda metodología, la cual se explica con detalle en el capítulo cinco. Finalmente, se tratan temas de sismica pasiva aplicada como lo son la técnica de cocientes espectrales, el ruido sísmico y los lineamientos para emplear ruido sísmico en cocientes espectrales. Este último bloque de temas está más relacionado a la primera metodología, la cual comprende la aplicación de cocientes espectrales de ruido ambiental para realizar un análisis de ruido sísmico en edificios, con el fin de comparar diferentes cocientes y sus amplitudes máximas respecto a distintos estados de salud estructural.

3.1 Medios Difusos

Para explicar medios difusos se usará el ejemplo de un vaso de agua; en este caso el agua es el medio de interés. Si se echara una gota de pintura verde en el vaso, después de un tiempo determinado toda el agua quedaría de color verde; esto se debe a que el agua permite la difusión del color (es un medio difuso). Si ahora se tuviera un vaso de agua con un hielo, el cual no se puede ver por ser del mismo material que lo contiene, al echar la gota de pintura verde y dejar reposar el vaso por un lapso largo (asumiendo que se controla la temperatura y el hielo no pasa a estado líquido), el agua quedaría de color verde como en el primer escenario, pero el hielo no se volvería de este color y sería visible a simple vista aunque el hielo sea de agua igual a la que está en el vaso. La gota de pintura es una forma de excitación para el medio y permite observar cosas que antes no era perceptibles a simple vista.

Cuando tenemos un medio que permite la difusión de las ondas, la excitación equivalente a la gota de pintura son las ondas sísmicas, estas se dividen en dos grupos generales: ondas de cuerpo, que se propagan directamente desde la fuente; y ondas superficiales, que se propagan paralelas a la superficie, estas componen en su mayoría lo que se conoce como ruido sísmico. Como se explicaba previamente, la pintura ayuda a detectar anomalías en el agua, con las ondas sísmicas ocurre algo muy similar, se puede detectar cuando ocurre algún cambio en el suelo. Idealmente, se espera que el medio sea homogéneo y con características similares en todas direcciones, sin embargo, presenta variaciones de densidad, constitución, y cuerpos de distinta composición; mediante el análisis de la propagación de las ondas sísmicas estos se pueden caracterizar.

Como la gota de pintura, las ondas sísmicas tardan cierto periodo de tiempo en difundirse en todo el medio. El ruido sísmico contiene la información que las ondas sísmicas, generadas en alguna fuente en cierto tiempo determinado, tienen del suelo y por esto es una herramienta útil para caracterizar el medio. Esto ocurre debido a que la fase de la onda no cambia, pero sí sus tiempos de arribo, con lo cual se pueden correlacionar las señales (Weaver, 2005).

El análisis del ruido sísmico se puede hacer por medio de espectros de Fourier y así los espectros nos permiten estudiar el contenido de frecuencias de las ondas. De ser un medio homogéneo, los espectros serían constantes ya que tendría todas las frecuencias en amplitudes iguales, sin embargo, esto casi nunca ocurre, y los picos en el espectro de frecuencias permite relacionarlas con distintas propiedades, discontinuidades o cuerpos.

Algunos medios difusos que se estudian en sismología incluyen un amplio espectro, desde la Tierra, hasta edificios y estructuras. En el caso de esta tesis, se estudiará una estructura de bambú, la cual funciona como medio difusor de ondas sísmicas.

3.2 Transformada de Fourier

Para realizar los cocientes espectrales (los cuales se explican en la sección 3.5), como su nombre lo indica, se emplean espectros de frecuencia; en este caso, provienen de los registros sísmicos o acelerográficos. Para obtener los espectros de frecuencia de una señal que depende del tiempo, puede emplearse una operación matemática conocida como la Transformada de Fourier. Con la Transformada de Fourier se puede estudiar el contenido de frecuencias de una señal deseada que sea dependiente del tiempo y con esto caracterizar la señal.

Una función $f(t)$ periódica en un intervalo T , puede representarse mediante una sumatoria de funciones sinusoidales multiplicadas por factores de peso. Esto se debe a que Fourier demostró que cualquier función (periódica o no periódica) puede ser representada como una suma infinita de funciones complejas exponenciales (Polikar, 1996). Una de las razones por las que se emplean estas funciones es porque $f(t)$ es periódica, como los senos y cosenos, y que estos son ortogonales, con lo que se simplifica la determinación de los factores (Blakely, 1996).

Una función $f(t)$ periódica se puede representar como:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{in\omega_0 t} \quad (3.2.1)$$

Donde i es el valor complejo de la exponencial, n es cada valor del tiempo del sumatorio, ω_0 es la frecuencia angular y t es el tiempo. El factor de peso está expresado por F_n y se puede determinar mediante la integral:

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) e^{-in\omega_0 t} dt \quad (3.2.2)$$

Suponiendo que la función $f(t)$ no se repita en un segmento finito del eje t , se requiere que $f(t)$ tenga una variación confinada a un segmento determinado de este eje para asegurar que haya convergencia en esta, es decir:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty \quad (3.2.3)$$

Este tipo de funciones se pueden analizar con la Transformada de Fourier $F(w)$, la cual es una función compleja con componentes reales e imaginarias. Esto quiere decir que:

$$F(w) = ReF(w) + iImF(w) \quad (3.2.4)$$

Donde $ReF(w)$ representa la parte real de la Transformada de Fourier y $ImF(w)$ representa la parte imaginaria.

La Transformada de Fourier (FT, por sus siglas en inglés) es una transformación matemática que permite analizar una función en dominios diferentes, la transformación contraria se llama Transformada Inversa de Fourier. Una de las transformadas más empleadas es aquella que permite pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa. Dependiendo del objetivo, se escoge el dominio de interés ya que cada uno aporta información distinta sobre la señal. La FT descompone la señal en funciones exponenciales complejas de diferentes frecuencias.

La Transformada de Fourier también se puede representar mediante:

$$F(w) = |F(w)|e^{i\theta(w)} \quad (3.2.5)$$

Donde:

$$|F(w)| = \sqrt{(ReF(w))^2 + (ImF(w))^2} \quad (3.2.6)$$

$$\theta(w) = \arctan \frac{ImF(w)}{ReF(w)} \quad (3.2.7)$$

$|F(w)|$ representa el espectro de amplitud y $\theta(w)$ el espectro de fase.

La energía total de la función $f(t)$ está dada por:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |F(w)|^2 dt \quad (3.2.8)$$

La relevancia de la ecuación 3.2.8 es que cuando se realiza la FT, la energía total de la transformada debe de ser igual a la energía de la señal original, a esto se le conoce como Teorema de Parseval.

Además de usarse en señales continuas, existe la Transformada Discreta de Fourier, que se emplea en funciones discontinuas y se puede determinar mediante:

$$F[w] = \sum_{n=0}^{N-1} f[t]e^{-\frac{i2\pi}{N}kn} \quad (3.2.9)$$

Donde:

N es el número de muestras en la función $f[t]$. Cuando se tiene una función periódica y discreta, se obtiene un espectro de frecuencias periódico y discreto.

3.3 Función de Transferencia

Un edificio de una planta, ejemplificado en la figura 3.3.1, se puede representar con un modelo equivalente al de la figura 3.3.2a. En este modelo, la rigidez lateral de las columnas se representa con el resorte (k); el amortiguamiento, con un amortiguador (c); y la masa del piso con la masa (m).

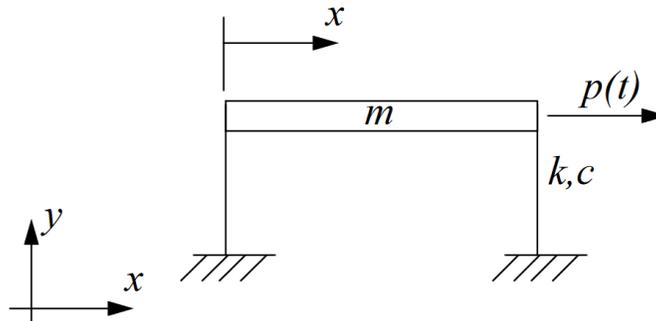


Figura 3.3.1. Imagen tomada de Caicedo et al., (2007). Una estructura con un grado de libertad.

En la figura 3.3.2b, se muestra el diagrama de cuerpo libre de la misma estructura. Donde:

$$f_s = k \cdot x \quad (3.3.1), \quad f_s \text{ es la fuerza del resorte, } x \text{ es el desplazamiento}$$

$$f_d = c \cdot \dot{x} \quad (3.3.2), \quad f_d \text{ es la fuerza de amortiguamiento, } \dot{x} \text{ es la velocidad.}$$

$$f_i = m \cdot \ddot{x} \quad (3.3.3), \quad f_i \text{ es la fuerza inercial, } \ddot{x} \text{ es la aceleración.}$$

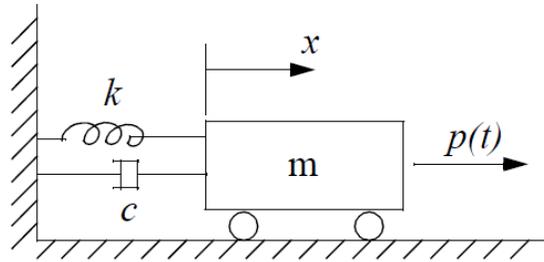
$p(t)$ es la carga dinámica externa en la estructura

Sumando estas fuerzas se obtiene:

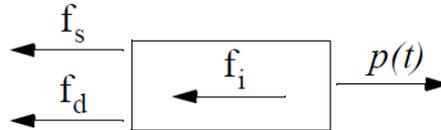
$$\sum F = m\ddot{x} = p(t) - c\dot{x} - kx \quad (3.3.4)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p(t) \quad (3.3.5)$$

Donde m y k son mayores a cero para un sistema físico.



a. Masa con resorte y amortiguador



b. Diagrama de cuerpo libre

Figura 3.3.2 Imagen modificada de Caicedo et al., (2007). Modelo equivalente dinámico para un edificio de una planta

Las características de un sistema estructural se pueden describir en el dominio de la frecuencia. La transformada de Fourier de la señal $x(t)$ está definida como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.3.6)$$

Y se relaciona con la transformada de Fourier de las derivadas de esta función como:

$$[\dot{x}(t)] = i2\pi fX(f) \quad (3.3.7)$$

$$[\ddot{x}(t)] = -(2\pi f)^2 X(f) \quad (3.3.8)$$

Sustituyendo en la ecuación de movimiento 3.3.5., se obtiene:

$$[-(2\pi f)^2 m + i2\pi fc + k]X(f) = P(f) \quad (3.3.9)$$

El cociente de la representación en el dominio de la frecuencia de la señal de salida y la representación en el dominio de la frecuencia de la señal de entrada está determinado por:

$$H(f) = \frac{X(f)}{P(f)} = [k - (2\pi f)^2 m + i2\pi fc]^{-1} \quad (3.3.10)$$

Esta ecuación se conoce como función de respuesta de frecuencia compleja o función de transferencia. Es función de la frecuencia (f) y da la relación de la respuesta estructural con la carga aplicada en cada frecuencia. La función de transferencia se

puede entender, en general, como un modelo matemático que relaciona la respuesta del medio y la señal de entrada (Rodríguez, 2005).

3.4 Deformación

Oliver y Agelet de Saracíbar (2000) definen la deformación en medios continuos como el movimiento relativo entre las partículas de un cuerpo. La deformación puede darse por cambio de forma, volumen o ambos.

Si se considera un medio referido a un sistema de coordenadas, se dice que un cuerpo es deformado cuando sus partículas cambian de posición respecto a ese sistema. En un sistema coordenado rectangular, inicialmente sea una partícula P con coordenadas (X_1, X_2, X_3) ; después de que el cuerpo se deforma, esa partícula toma una nueva posición $Q(x_1, x_2, x_3)$, como se muestra en la figura 3.4.1.

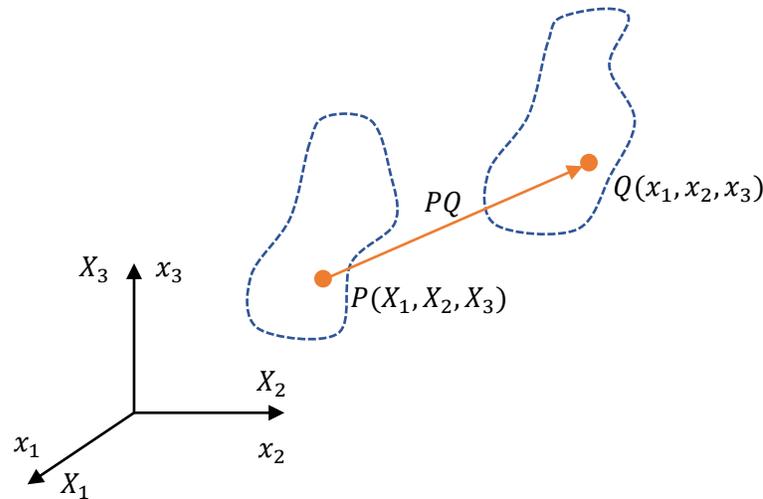


Figura 3.4.1 Diagrama modificado de Oliver y Agelet de Saracíbar (2000).

El vector PQ es llamado vector de desplazamiento de la partícula que se está analizando. El vector desplazamiento tiene componentes

$$PQ = (x_1 - X_1, x_2 - X_2, x_3 - X_3) \quad (3.4.1)$$

Antes de la deformación cada partícula del cuerpo ocupa una posición y está asociada a las coordenadas (X_1, X_2, X_3) , coordenadas materiales; después de la deformación cada partícula estará asociada a las coordenadas (x_1, x_2, x_3) , coordenadas espaciales.

Se puede definir una función que relacione la posición de una partícula antes y después de la deformación:

$$x_i = x_i(X_1, X_2, X_3) \quad (3.4.2)$$

Esto representa que, conociendo la posición inicial de la partícula, es posible conocer la posición de esta después de la deformación. La posición de las partículas del cuerpo, a lo largo del tiempo, está totalmente determinada por sus posiciones iniciales.

La función así definida, es una regla que asocia una triada con otra triada, es una función del tipo $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$. A este tipo de funciones se le conoce como campo, a cada tensor del primer espacio, corresponde un tensor único del otro espacio; en este caso recibe el nombre de campo de desplazamiento. Además, es monovaluado, porque una partícula puede ocupar una sola posición en un instante de tiempo, y es continuo, porque se está considerando un cuerpo como un medio que no tiene discontinuidades, por lo que las funciones que describen su comportamiento también son continuas.

Esas características de la función permiten que exista su inversa:

$$X_i = X_i(x_1, x_2, x_3) \quad (3.4.3)$$

Dada la posición actual de las partículas (después de la deformación) del medio continuo, podemos conocer sus posiciones en un tiempo pasado (antes de la deformación).

3.4.1 Desplazamiento

Se define desplazamiento como la diferencia entre los vectores de posición de una misma partícula en las configuraciones actual y de referencia (Oliver y Agelet de Saracíbar, 2000).

El desplazamiento de una partícula P está dado por el vector u que une los puntos del espacio P y P'. El desplazamiento de todas las partículas del medio continuo define el campo vectorial de desplazamientos, ya sea en forma material $U(X, t)$ o espacial, $u(x, t)$:

$$\begin{aligned} U(X, t) &= x(X, t) - X \\ U_i(X, t) &= x_i(X, t) - X_i \end{aligned} \quad (3.4.1.1)$$

3.4.2 Tensor Gradiente de Deformación

Considerando un medio continuo en movimiento; en el instante t_0 una partícula ocupa la posición P, y otra partícula localizada en el entorno diferencial de la primera, la posición Q. En el instante t esas partículas ocupan las posiciones P' y Q' respectivamente. Las posiciones relativas de Q y Q' con respecto a P y P' son dX y dx , respectivamente (figura 3.4.2.1).

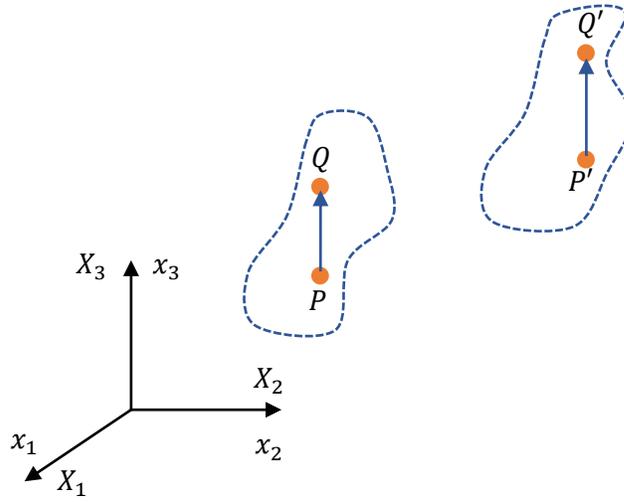


Figura 3.4.2.1. Diagrama modificado de Oliver y Agelet de Saracíbar (2000).

Las ecuaciones de movimiento para un medio continuo son:

$$x_i = x_i(X_1, X_2, X_3, t) \quad (3.4.2.1)$$

$$X_i = X_i(x_1, x_2, x_3, t) \quad (3.4.2.2)$$

Diferenciando la descripción material del movimiento con respecto a las coordenadas materiales, resulta:

$$dx_i = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} dX_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.4.2.3)$$

A partir de la expresión anterior, se define el tensor gradiente material de la deformación.

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.4.2.4)$$

$$F = \bar{\nabla} \times x \quad (3.4.2.5)$$

Donde $\bar{\nabla}$ es el operador Nabla material

$$\bar{\nabla} = \frac{\partial}{\partial X_i} \hat{e}_i \quad (3.4.2.6)$$

Las componentes explícitas de F son:

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_1} & \frac{\partial x_1}{\partial X_2} & \frac{\partial x_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial X_1} & \frac{\partial x_2}{\partial X_2} & \frac{\partial x_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial X_1} & \frac{\partial x_3}{\partial X_2} & \frac{\partial x_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} \quad (3.4.2.7)$$

Por otro lado, si se diferencia la descripción espacial del movimiento con respecto a las coordenadas espaciales:

$$dX_i = \frac{\partial X_i}{\partial x_j} dx_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.4.2.8)$$

Se define el tensor gradiente espacial de la deformación:

$$F_{ij}^{-1} = \frac{\partial X_i}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (3.4.2.9)$$

$$F^{-1} = \nabla \times X \quad (3.4.2.10)$$

Donde ∇ es el operador Nabla espacial

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_i} \hat{e}_i \quad (3.4.2.11)$$

Las componentes explícitas de F^{-1} son:

$$F^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial x_1} & \frac{\partial X_1}{\partial x_2} & \frac{\partial X_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial X_2}{\partial x_1} & \frac{\partial X_2}{\partial x_2} & \frac{\partial X_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial X_3}{\partial x_1} & \frac{\partial X_3}{\partial x_2} & \frac{\partial X_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \quad (3.4.2.12)$$

Los tensores gradiente de la deformación contienen la información del movimiento relativo, a lo largo del tiempo t , de todas las partículas en un entorno diferencial alrededor de alguna otra partícula. El tensor gradiente material de la deformación representa la evolución del vector a a lo largo del tiempo, para un par de partículas vecinas.

3.4.3 Tensor de Deformaciones Infinitesimales

La teoría de deformación infinitesimal se basa en dos hipótesis generales (Oliver y Agelet de Saracíbar, 2000):

- 1) Los desplazamientos son muy pequeños frente a las dimensiones típicas del medio continuo.
- 2) Los gradientes de los desplazamientos son muy pequeños.

De la primera hipótesis se tiene que dos configuraciones analizadas, están muy próximas entre sí y se consideran indistinguibles una de otra. Se dice que las coordenadas materiales y espaciales coinciden y no tiene sentido hablar de descripciones materiales y espaciales:

$$\begin{cases} x = X + u \cong X \\ x_i = X_i + u_i \cong X_i \end{cases} \rightarrow \begin{cases} U(X, t) = u(X, t) = u(x, t) \\ U_i(X, t) = u_i(X, t) = u_i(x, t) \end{cases} \quad (3.4.3.1)$$

La segunda hipótesis se puede escribir matemáticamente como:

$$\left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| \ll 1, \quad \forall i, j \in \{1, 2, 3\} \quad (3.4.3.2)$$

Los tensores gradiente material y gradiente espacial de los desplazamientos coinciden:

$$\begin{cases} x_j = X_j \\ u_i(x, t) = U_i(X, t) \end{cases} \rightarrow j_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = J_{ij} \rightarrow j = J \quad (3.4.3.3)$$

Y el tensor de deformación resulta ser:

$$\begin{cases} E = \frac{1}{2}(J + J^T + J^T J) \cong \frac{1}{2}(J + J^T) \\ E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \underbrace{\frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j}}_{\ll 1} \right) \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (3.4.3.4)$$

Haciendo la operación similar con el tensor espacial de deformación:

$$\left\{ \begin{array}{l} e = \frac{1}{2}(j + j^T - j^T j) \cong \frac{1}{2}(j + j^T) = \frac{1}{2}(J + J^T) \\ e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \underbrace{\frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j}}_{\ll 1} \right) \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{array} \right. \quad (3.4.3.5)$$

Las ecuaciones 3.4.3.3 y 3.4.3.5 permiten definir el tensor de deformación infinitesimal ε :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{1}{2}(J + J^T) = \nabla^s u \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \end{array} \right. \quad (3.4.3.6)$$

Para este trabajo, la deformación se analizará con la Transformada de Fourier de las tres direcciones analizadas. Por definición, la Transformada de Fourier analiza señales con periodo infinito, pero las señales con las que se trabaja son señales finitas. Cuando se emplea la Transformada Rápida de Fourier (FFT), se asume que la señal finita que se está analizando se repite indefinidamente formando parte de una señal con periodo infinito. Esto lleva a que se considere que la transformada de la señal finita es representativa para todas las veces que ésta se repite en el infinito y se puede tomar como un promedio de la señal con periodo infinito. Por lo tanto, en este trabajo al aplicar la FFT se considerará que representa el promedio de la señal medida y al integrarla se tendrá el promedio de los desplazamientos.

3.5 Cocientes Espectrales

Una forma de estudiar los medios difusos es a través de los cocientes espectrales ya que estos pueden ayudar a recuperar la respuesta del medio, discutido en el tema 3.3. El hecho de realizar un análisis en el dominio de las frecuencias puede llegar a facilitar la detección de ciertas anomalías en el medio y caracterizarlo. El análisis en frecuencias puede revelar información que en el dominio del tiempo podría ser muy difícil de detectar, como lo es la frecuencia característica del medio. Esta información que se obtiene con los cocientes espectrales podría verse como un símil de la gota de pintura en el vaso de agua con hielo explicado en el primer tema. En el caso de esta tesis, los cocientes emplean el ruido sísmico como señal de entrada y al obtener la respuesta medida por los

equipos, se busca una función de transferencia. Este tipo de análisis se puede emplear en estructuras y tienen la ventaja de ser un método no invasivo y requiere menores tiempos de medición que otro tipo de pruebas.

Hay varios autores que suponen que el ruido sísmico se asocia principalmente a las ondas superficiales. Tomando en cuenta esta suposición, coinciden en que el cociente H/V se relaciona principalmente con la elipticidad de las ondas Rayleigh, por su aportación en la componente vertical (Bard, 1999).

Nakamura (1989) plantea algunos conceptos básicos para poder emplear cocientes espectrales, y recomienda medir los microtremores en intervalos de tiempo donde no haya ruido transitorio. Las capas superficiales de suelo pueden generar un efecto amplificador en los tremores; además, cuando hay ruido inducido, la componente que más se ve afectada es la vertical y se inducen ondas de Rayleigh (asociado principalmente con la elipticidad de estas), por lo que propuso un método para eliminar el efecto de estas ondas superficiales. El cual define como el cociente entre los factores de amplificación horizontales (A_H) y verticales (A_V), se relaciona con las condiciones del suelo en el punto de observación y si este es cercano a 1, se asocia con el suelo firme. En este último caso, no existe una dirección preferencial y los tremores son iguales en todas las direcciones.

Los tremores se pueden analizar en sus componentes verticales y horizontales, se considera que estas componentes son similares entre sí ya que fueron difundidas en todo el medio por un lapso largo. En el caso de que el cociente $A_H/A_V \cong 1$, el efecto de las ondas Rayleigh es cercano a cero; en caso de que el valor de este cociente aumente, el efecto de las ondas superficiales incrementará.

La función de transferencia S_T de capas superficiales se puede definir en el dominio de las frecuencias como:

$$S_T = S_{HS}/S_{HB} \quad (3.5.1)$$

Donde S_{HS} y S_{HB} son los espectros de Fourier horizontales en la superficie y los incidentes del estrato duro a las capas superficiales. El espectro S_{HS} puede haber sido afectado por las ondas Rayleigh por lo que este efecto debe incluirse en el espectro vertical del tremor de la superficie S_{VS} , pero no en el espectro vertical del basamento S_{VB} . Asumiendo que el tremor vertical no se amplifica por las capas superficiales, la cantidad E_S debería representar los efectos de las ondas Rayleigh en el tremor vertical:

$$E_S = S_{VS}/S_{VB} \quad (3.5.2)$$

En caso de no haber ondas Rayleigh, $E_S = 1$, por lo tanto, E_S es el factor para eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. En el caso de que el efecto de las ondas Rayleigh sea igual en las componentes vertical y horizontal, S_T/E_S se puede considerar como una función de transferencia S_{TT} . Lo cual lleva a,

$$S_{TT} = S_T/E_S = R_S/R_B \quad (3.5.3)$$

Donde

$$R_S = S_{HS}/S_{VS} \quad (3.5.4)$$

$$R_B = S_{HB}/S_{VB} \quad (3.5.5)$$

R_S se obtiene al dividir el espectro horizontal entre el espectro vertical de tremores superficiales, mientras que R_B se obtiene al realizar ese cociente de tremores de capas duras debajo del suelo.

El método de cocientes espectrales se basa en asumir que el cociente de los espectros horizontales y verticales de un tremor superficial es una aproximación de la función de transferencia. Nakamura (1989) demuestra la validez del método usando resultados observados de microtremores en distintos puntos. La función de transferencia de las capas superficiales puede estimarse simplemente con los tremores en superficie.

Los microtremores o ruido sísmico se emplean para estimar los efectos de la geología superficial en movimientos sísmicos sin la necesidad de realizar estudios invasivos. La técnica H/V o QTS (Quasi-Transfer Function, por sus siglas en inglés) se ha popularizado ya que es una herramienta no destructiva y permite obtener información de las características dinámicas del suelo y de estructuras; otra ventaja de la técnica es que se puede aplicar incluso en lugares con poca o nula sismicidad (Nakamura, 2000).

Se ha observado que después de un sismo el efecto en distintas estructuras es variable, aunque se considere una misma intensidad sísmica. Esto se debe a la diferencia en la respuesta propia de cada estructura, y a las distintas respuestas sísmicas de las capas superficiales (Nakamura, 1989). En general, para estudiar las edificaciones mediante cocientes espectrales, se emplean equipos afuera y dentro del edificio para poder comparar las respuestas en ambos medios. Al observar alguna diferencia entre los resultados obtenidos en los equipos instalados al exterior y los del interior, se puede suponer que la estructura se comporta de manera distinta del suelo.

3.6 Ruido Sísmico

La prospección sísmica es un método que se emplea para estudiar el subsuelo mediante la propagación de ondas y comúnmente, se usan fuentes artificiales. Un área de la prospección sísmica que ha ido adquiriendo popularidad es la sísmica pasiva. Algunas de las ventajas de la sísmica pasiva es que no es necesario aplicar una fuente activa como cuando se usan explosivos o caídas de pesas, entre otros y se puede usar incluso cuando hay inversiones de velocidades en el medio. Bard (1999) menciona que varios autores han realizado estudios sobre la composición del ruido sísmico, entre ellos Kanai (1983), Aki (1957), y Nagashi e Igarashi (1970). En general, se encontró que el ruido sísmico está compuesto principalmente por ondas superficiales. Así mismo, propusieron métodos para el estudio del ruido basándose en la suposición de que está conformado en su mayoría por ondas superficiales. Recientemente se han realizado menos estudios sobre la composición del ruido, sin embargo, se realizaron estudios en áreas costeras de Japón por Kamura (1997) y Seo (1997) entre otros (Bard, 1999). Estos estudios se enfocaron en analizar la estabilidad de la fuente y las características de los microtemores. Llegaron a conclusiones consistentes entre las cuales se encuentra una clasificación general del ruido sísmico por origen:

- a) Olas del mar a grandes distancias: en periodos largos, debajo de 0.3-0.5 Hz. El espectro de amplitud es estable por varias horas y se correlaciona con las condiciones meteorológicas a gran escala del océano.
- b) Olas del mar cercanas y viento: en periodos entre 0.3-0.5 y 1 Hz. La estabilidad en este espectro es menor.
- c) Actividad humana: arriba de 1 Hz. Reflejan los ciclos humanos.

A grandes rasgos, arriba de 1 Hz el ruido es de origen artificial y se conoce como microtemor; debajo de 1 Hz su origen es natural y se conoce como microsismo. Sin embargo, este límite puede cambiar en áreas urbanas que tengan bajas frecuencias características y presenten altas impedancias como la Ciudad de México en donde la frecuencia natural de vibrar está en un rango entre 6 segundos y 2 Hz. Ya que este límite no está completamente definido, Seo (1996, 1997) propone una forma sencilla para distinguir el origen del ruido: realizar mediciones continuas. Cuando se encuentren variaciones significativas entre el día y la noche (factor de 3 a 4), será una clara indicación de microtemores (Bard, 1999).

3.7 Lineamientos en el Empleo de Cocientes Espectrales

La técnica de los cocientes espectrales no es nueva, lleva más de 30 años en uso, aunque ha ido avanzando en el transcurso de ese tiempo. El uso de cocientes espectrales de componentes verticales y horizontales del mismo punto de estudio fue propuesto por Nogoshi e Igarashi en 1971. Bard (1999) realiza un compendio sobre varios trabajos del tema y muestra conclusiones generales sobre las ideas que más se comparten en los artículos citados.

En cuanto a la adquisición de datos, algunos de los consejos que proporciona son:

- Emplear velocímetros por la resolución que se puede tener en bajas frecuencias.
- Evitar el uso de cables largos externos ya que pueden causar interferencias mecánicas y electrónicas.
- Evitar realizar mediciones en días lluviosos o con mucho viento.
- Evitar hacer el levantamiento cerca de calles por el que transiten vehículos pesados.
- No hay alguna preferencia clara en cuanto a realizar las mediciones en el día o en la noche.

Para el procesamiento de los datos, algunos de los lineamientos son:

- Se recomiendan ventanas de tiempo que contengan alrededor de 20 ciclos de la frecuencia más baja esperada.
- Se debe revisar la estabilidad de los resultados, pero con 10 ventanas de ruido se puede trabajar bien.
- Se menciona que el tráfico ligero (carros) no afecta los cocientes, mientras que el tráfico pesado sí. Se sugiere no caminar cerca del sensor y que no haya máquinas estacionarias cerca del lugar de interés.
- Se deben suavizar los espectros. Se recomienda evitar distorsiones entre altas y bajas frecuencias. Una alternativa es adaptar el largo de la ventana de suavizamiento a la frecuencia de interés.
- Promediar los espectros verticales y horizontales de distintas ventanas antes de realizar los cocientes H/V.

Por otro lado, el grupo de investigadores que trabajó en el proyecto Sesame (Site Effects assessment using Ambient Excitations) en diciembre de 2004, publicó una guía básica para medición de ruido ambiental y su procesamiento mediante cocientes espectrales. A continuación, se enlistan algunas de las recomendaciones para las condiciones iniciales que complementan las propuestas por Bard en 1999:

- El tiempo de grabación del equipo va en función de la frecuencia mínima de interés. (Ejemplo: frecuencia fundamental (f_0) esperada en 0.2 Hz, tiempo mínimo de grabación: 30 minutos)
- Nunca usar un solo punto de medición para definir la frecuencia fundamental de vibrar de una estructura, se recomienda al menos usar tres puntos.
- Evitar poner los sensores directamente sobre suelos blandos.
- Evitar realizar mediciones al lado de edificios, árboles, etc.
- Evitar estar cerca de maquinaria de construcción, máquinas industriales, bombas, generadores, etc.
- En caso de estar cerca de carros o de gente caminando, aumentar el tiempo de medición.

Adicional a estas recomendaciones, se encuentra una tabla con criterios para determinar la confiabilidad de las curvas H/V y para identificar un pico H/V claro. Algunos de los criterios para establecer si la curva H/V es confiable consisten en:

- 1) $f_0 > 10/l_w$, donde l_w es la longitud de la ventana
- 2) $n_c(f_0) > 200$, donde n_c es el número de ciclos significativos ($l_w \cdot n_w \cdot f_0$), n_w es el número de ventanas seleccionadas para procesar, l_w es el largo de las ventanas.
- 3) $\sigma_A(f) < 2$ para $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 > 0.5$ Hz
o $\sigma_A(f) < 3$ para $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 < 0.5$ Hz
 σ_A se relaciona con la desviación estándar de $A_{H/V}$ y representa el factor de diferencia entre la amplitud y la desviación estándar de $A_{H/V}$.

En el caso de la identificación del pico de H/V, se enlistan algunos de los lineamientos:

- 1) $\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$, $A_{H/V}$ es la amplitud del cociente H/V, f^- es la frecuencia entre $f_0/4$ y f_0
- 2) $\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$, f^+ es la frecuencia entre f_0 y $4f_0$
- 3) $A_0 > 2$, A_0 es la amplitud del cociente H/V en f_0
- 4) $f_{pico}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
- 5) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$, σ_f es la desviación estándar de la frecuencia pico de H/V, $\varepsilon(f_0)$ es el valor de referencia para la condición de estabilidad $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$, este valor se puede calcular con la tabla 3.7.1.
- 6) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$, $\theta(f_0)$ es el valor de referencia para la condición de estabilidad para σ_A . Este valor se obtiene de la tabla 3.7.1 y se compara con $\sigma_A(f_0)$ para ver si se cumple la condición.

Valores referencia para σ_f y $\sigma_A(f_0)$					
Rango de frecuencias [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25f_0$	$0.20f_0$	$0.15f_0$	$0.10f_0$	$0.05f_0$
$\theta(f_0)$ para $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58

Tabla 3.7.1 Tabla modificada del proyecto Sesame (2004)

4. Instrumentación de Edificios

Un tema importante en esta tesis es la forma en que se trata de caracterizar el movimiento de la casa de bambú, por lo tanto, se tiene que discutir el estatus de la instrumentación de edificios. En el monitoreo de edificios se emplean pruebas de vibración forzada y pruebas de vibración ambiental. Por ejemplo, en California (EUA) se han empleado las pruebas de vibración forzada por más de 65 años (Ivanovic et al., 2000) para estudiar la respuesta sísmica de los edificios, así mismo, para realizar diversos análisis dinámicos que representan vientos fuertes y explosiones. La instrumentación de edificios ha servido para comparar el estado estructural de un edificio antes y después de un sismo; para analizar la interacción suelo-estructura; y para discutir sobre la influencia de ésta última en edificios dañados. Inicialmente, solo se medían los periodos fundamentales de las estructuras, sin embargo, estas pruebas se han seguido desarrollando y cada día se logra obtener más información.

En la instrumentación de edificios, lo ideal es tener un monitoreo constante de la estructura de interés para contar con información de distintos momentos de la vida útil de esta. En muchos casos no se tiene información de la edificación cuando es nueva, y esta información sirve para conocer el estado inicial y así tener ese punto de comparación. Se espera que el inmueble funcione tal cual fue diseñado, pero hay ocasiones en las que no ocurre así e instrumentarlo podría ayudar a conocer estos detalles desde un inicio. Así mismo, sería útil tener instrumentada la estructura cuando ocurrieran eventos sísmicos que los equipos pudieran detectar ya que, a partir de esta información, se podría obtener más detalle de la salud estructural del edificio y de su comportamiento.

Otro tipo de pruebas mediante las cuales se puede monitorear la salud estructural de los edificios son las pruebas de vibración ambiental, proveen información menos detallada que un evento sísmico, pero se puede realizar de forma constante sin tener que estar a la espera de uno. Las pruebas de vibración ambiental en estructuras son útiles para describir el comportamiento lineal de las mismas. Tienen muchas aplicaciones y se ha diversificado su uso, algunos ejemplos son: identificación de frecuencias naturales; modos de vibración; parámetros de amortiguamiento; análisis del comportamiento lineal de estructuras dañadas y sus componentes; desarrollo de modelos estructurales dependientes de tiempo-amplitud; y monitoreo de la salud estructural (Ivanovic et al., 2000).

Las pruebas de vibración ambiental se han empleado extensamente para comparar estructuras no dañadas, dañadas y reparadas; cambios en los parámetros del sistema durante pruebas de falla; variabilidad en el sistema durante la construcción; variabilidad de la respuesta respecto a otros edificios similares, pero en diferentes condiciones de suelo y tipo de excitación estructural (Ivanovic et al., 2000).

Algunas de las ventajas de usar vibración ambiental sobre las pruebas de vibración inducida son que se puede usar equipo más ligero y en general, se requiere de un menor número de operadores. Las fuentes de excitación para estos estudios son el viento, los microtremores, los microsismos entre otras fuentes locales. (Ivanovic et al., 2000).

No hay una metodología única para realizar instrumentación de edificios, no obstante, diversos artículos (Ivanovic et al., 2000; Murià-Vila et al., 2009) en los que se hacen pruebas de vibración y coinciden en varios aspectos: se coloca un acelerógrafo o velocímetro en el terreno aledaño al edificio, otro en el sótano o planta baja, y la disposición de los demás instrumentos varía en función de la geometría del edificio o del objetivo del estudio.

Una forma de identificar daño en una estructura a través de este método es analizar cambios en la frecuencia fundamental de vibrar del edificio. Si la estructura sufrió daño, su rigidez disminuye (HoThu, 2014) y dado que la frecuencia natural de una estructura es directamente proporcional a la frecuencia fundamental (Chopra, 1995), esta última va a disminuir, o viéndolo en función del periodo, este va a aumentar.

4.1 Instrumentación y Adquisición de Datos del Experimento

Las empresas Bambuterra S.A.P.I. de C.V. y Kaltia S.A. de C.V. construyeron un sistema estructural para poner a prueba e investigar experimentalmente las características dinámicas, estáticas y de comportamiento en una estructura compuesta por muros prefabricados con bambú (corte de madera y bambú). Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Grandes del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

La estructura está compuesta de dos plantas, la altura total es de 5.35 metros. El material principal en este prototipo es el bambú, ya sea en vigas preforzadas o en paneles modulares. Cada planta tiene un área de aproximadamente 24.55 metros cuadrados, 4.66 metros de largo por 5.27 metros de ancho. En la figura 4.1.1 se muestra esquema general de la casa.

En cada una de las plantas se colocaron cinco equipos Güralp 6TD, prestados por el Instituto de Ingeniería. Se colocaron velocímetros de banda ancha (30 segundos a 50 Hz), uno por esquina y uno al centro en cada planta, dicha configuración se puede observar en las figuras 4.1.1 y 4.1.2. Se realizaron dos campañas de medición, una antes de hacerle ensayos a la casa y una después de estos. En cada campaña se registró ruido ambiental por más de 24 horas. El norte de los equipos se orientó con dirección a la pared de reacción, esta se encontraba a la izquierda de la estructura como se observa en el diagrama de la figura 4.1.1. La pared de reacción se empleó para someter a la estructura a esfuerzos. Se nombró PB a la base de la estructura, es decir, la parte que fue cimentada

en el suelo del laboratorio; P1 al primer nivel; y P2 al área que corresponde al techo de la casa. En la figura 4.1.2 se muestran los equipos correspondientes a cada nivel y su distribución en el área.

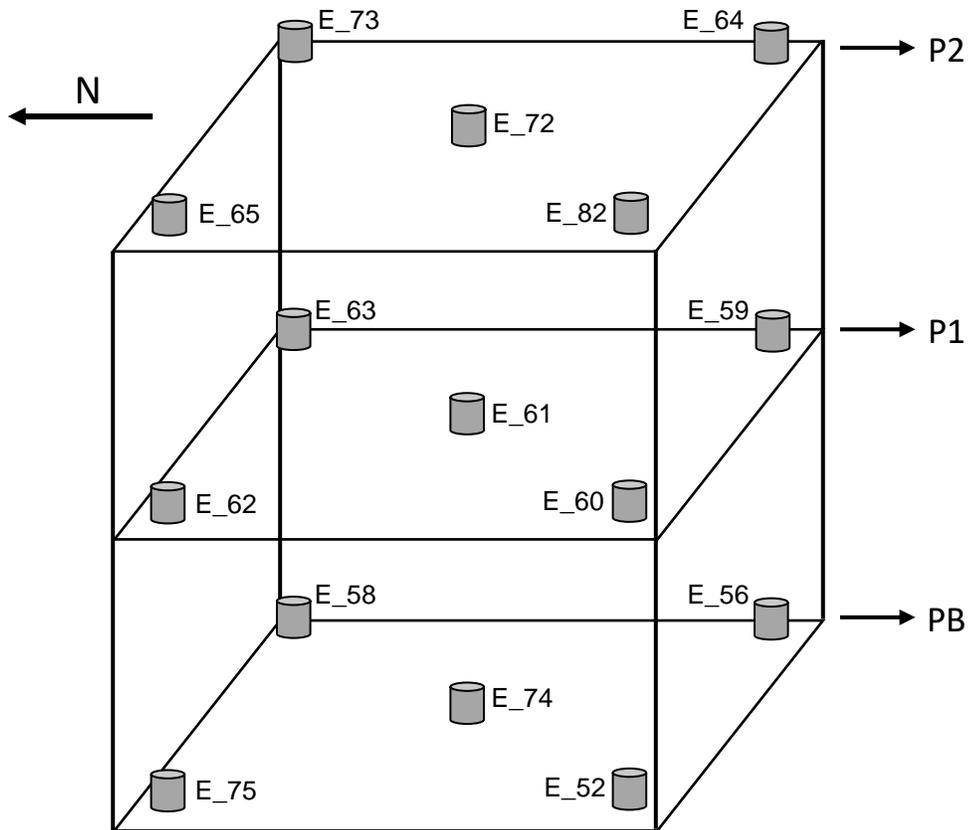


Figura 4.1.1 Diagrama de la distribución de equipos en la estructura de bambú. Cada equipo viene con un número previamente establecido.

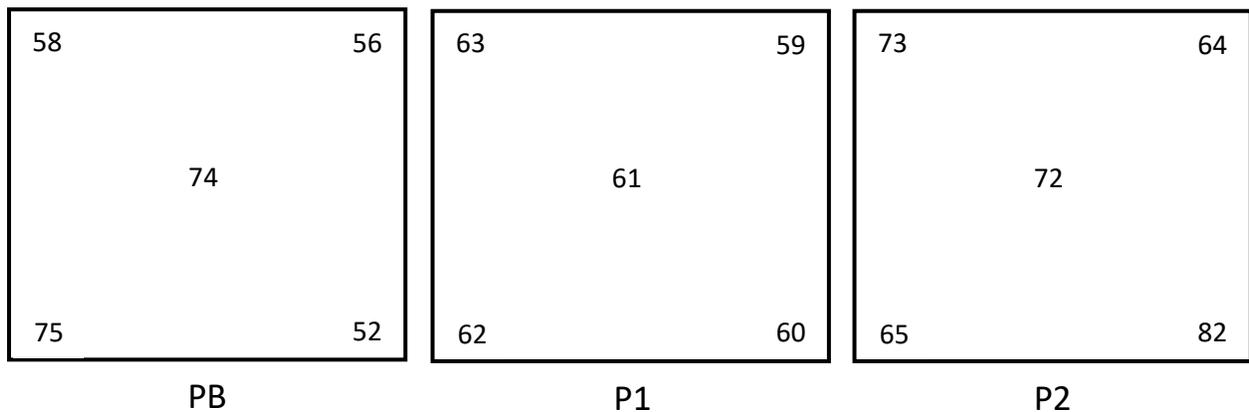


Figura 4.1.2 Vista en planta de cada nivel de la casa con el número de equipo en su posición correspondiente.

Para un análisis más sencillo de los datos se renombraron los equipos conforme a la relación entre los números originales y la distribución ilustrada en la figura 4.1.3. Así mismo, para distinguir entre las plantas se empleó el nivel en el que se encontraban los equipos. Por ejemplo, el equipo 62 que se encuentra en el primer nivel será referido como punto 1 del P1.

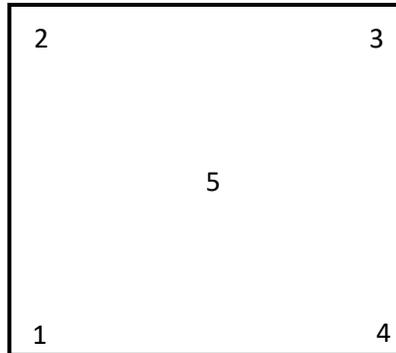


Figura 4.1.3 Vista en planta de la casa con la nueva numeración de los equipos.

La estructura se sometió a diversos ensayos, al final se llevó hasta el 80% de su capacidad resistente. Para este trabajo, se consideraron dos estados de interés, la estructura antes de iniciar las pruebas, y la estructura después del ensayo final.

Las figuras 4.1.4 a 4.1.6 son fotografías de la estructura empleada en este experimento. En la figura 4.1.4 se puede observar la etapa inicial del proceso constructivo y se pueden apreciar las columnas de bambú del primer piso. En la figura 4.1.5 se observa la estructura completa al inicio del experimento, sin daño. Mientras que en la figura 4.1.6 se puede observar una pieza de metal que es una de las uniones que tiene la planta baja con el primer nivel y se puede distinguir que para el segundo nivel no existe esta pieza de metal.



Figura 4.1.4 Fotografía donde se muestra el proceso de construcción de la casa.



Figura 4.1.5 Fotografía donde se muestra la estructura completa.



Figura 4.1.6 Fotografía que muestra una columna exterior de la casa

En las figuras 4.1.7 y 4.1.8 se muestran dos ejemplos de equipos colocados en la casa de bambú; el de la figura 4.1.7 está en el primer nivel; y en la 4.1.8, se observa un equipo del segundo nivel.



Figura 4.1.7 Fotografía de uno de los cinco equipos colocados en el primer nivel.

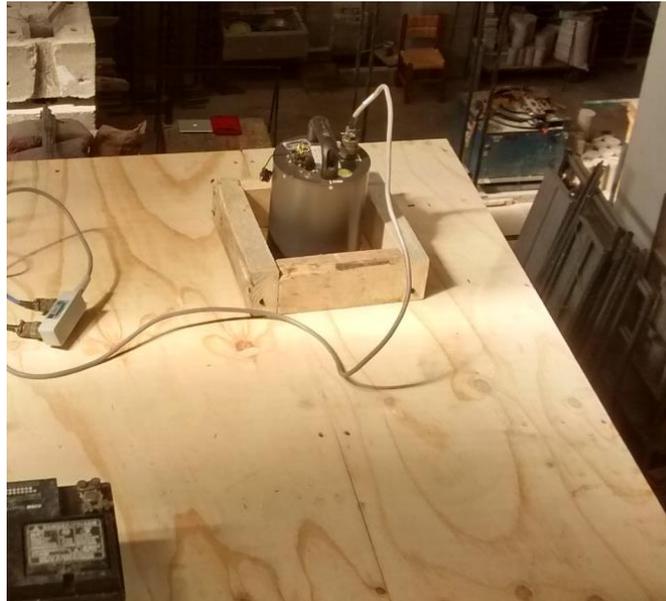


Figura 4.1.8 Fotografía de uno de los cinco equipos colocados en el segundo nivel.

5. Procesamiento de Datos de Ruido Ambiental y Metodologías

5.1 Preprocesamiento y Procesamiento de Datos

El análisis de los datos empleados en esta tesis se realizó de la siguiente manera: selección de registros de ruido útiles y continuos de todos los equipos; discriminación de las ventanas de ruido a emplear para realizar los cocientes espectrales; Transformada de Fourier de las ventanas de ruido seleccionadas; promedios de los espectros de ruido por lapsos de 15 minutos; obtención del valor absoluto de los pares complejos de los espectros; suavizado de las ventanas; y finalmente, obtención de los cocientes espectrales deseados. Esta secuencia se determinó tomando en cuenta las consideraciones de Bard (1999) y del equipo del proyecto Sesame (2004).

La selección de los registros acelerográficos se realizó empleando un código elaborado en Matlab. El primer filtro fue elegir los registros solo considerando el nombre del archivo: si el nombre presentaba algún signo de número, se omitía ya que eso denotaba un registro truncado; y si aparecía repetida esa hora de medición también era un registro incompleto. La segunda selección de datos consistió en revisar los archivos para verificar que estuvieran completos ya que en algunos de los equipos se llegó a perder la conexión con el GPS y la medición se vio interrumpida. Al tener alguna hora seleccionada en el primer equipo, se revisó que esta existiera completa en los catorce sensores restantes. Posteriormente, se determinó el intervalo más largo de registro continuo existente en todos los equipos de forma simultánea.

Para la selección de ventanas de ruido, la señal se analizó por medio de ventanas de 16 segundos. Se empleó este tamaño de ventana, ya que se definió que los periodos de interés rondaban los 0.5 segundos, por lo que una ventana de 15 segundos permitiría realizar el análisis de un rango amplio que incluyera este periodo de interés. Se emplearon ventanas de 16 segundos para que, al momento de filtrar la señal, se pudiera realizar el tapering en el 5% inicial y final de la señal, es decir, en el primer medio segundo y en el último medio segundo, de esta forma se tienen 15 segundos que no se ven afectados por las ventanas de tapering. Se hizo el ventaneo de cada hora completa, sin traslape entre ventanas, y se obtuvo el promedio de amplitud de cada una; posteriormente, se seleccionó el menor promedio de amplitud de las ventanas en cada hora como valor de referencia para encontrar las ventanas de ruido. En este proceso se buscaron las ventanas que tuvieran un promedio que fuera máximo tres veces mayor que la ventana con la menor amplitud de la hora; se fijó un número mínimo de 28 ventanas en cada hora. En las figuras 5.1.1 y 5.1.2 se muestran las gráficas de la señal original con las ventanas de tiempo, en color rojo, que se seleccionaron de esas horas de registro. La figura 5.1.1 corresponde a la primera etapa de medición del equipo, es decir, al inicio

del experimento. La figura 5.1.2 corresponde a la segunda etapa de medición del experimento, cuando ya había daño en la estructura.

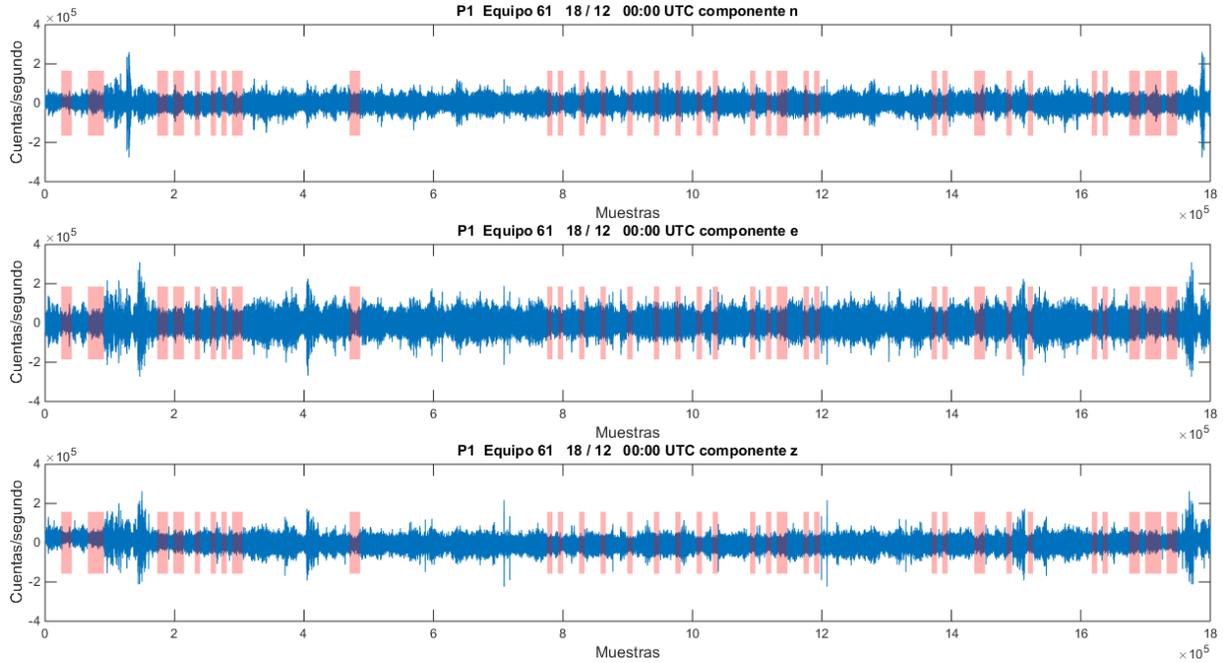


Figura 5.1.1 Ejemplo de las ventanas de ruido de la primera etapa de medición. En rojo se muestran las ventanas seleccionadas de la hora de registro, en azul la señal original.

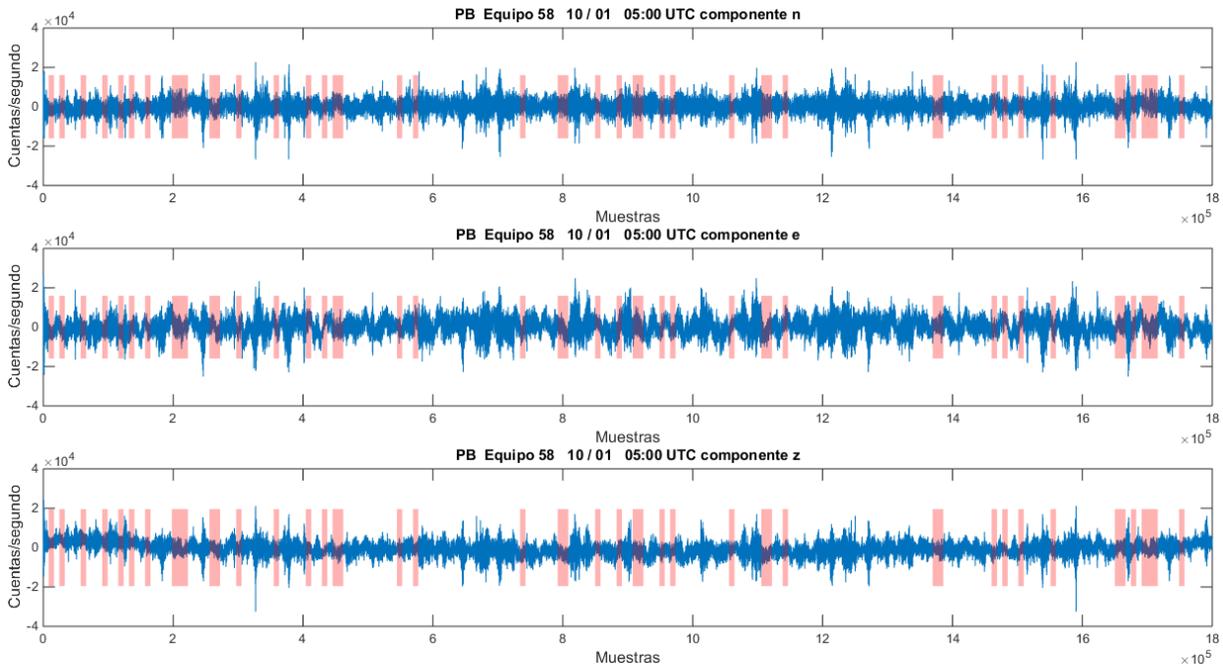


Figura 5.1.2 Ejemplo de las ventanas de ruido de la segunda etapa de medición. En rojo se muestran las ventanas seleccionadas de la hora de registro, en azul la señal original.

Una vez obtenidas las ventanas de todas las horas, a cada una se le aplicó un taper del 5% en cada extremo, luego se empleó la transformada rápida de Fourier (FFT) de Matlab y se aplicó un filtro pasa altas desde 0.05 Hz para eliminar ruido no deseado de la señal.

Posteriormente, se cargaron todas las ventanas en otro programa de Matlab separando los datos por el nivel al que correspondían y equipo. Para cada estación, se realizaron promedios que abarcaran 60 ventanas de los valores complejos de cada espectro (equivalente a casi 15 minutos de registro); las ventanas sobrantes se desecharon. Después, se obtuvo la amplitud de los espectros y se suavizó la señal. La fórmula empleada para suavizar las amplitudes es:

$$[A_s(f)]^2 = \frac{1}{N} \sum [A(f)]^2 \quad (5.1.1)$$

Donde la suma se efectúa entre las frecuencias f_1 y f_2 , dadas por:

$$f_1 = f * 2^{\left(-\frac{1}{2F_s}\right)} \quad (5.1.2)$$

$$f_2 = f * 2^{\left(\frac{1}{2F_s}\right)} \quad (5.1.3)$$

N es el número de puntos comprendidos entre las frecuencias f_1 y f_2 y F_s es el factor de suavizado.

Para terminar, se realizaron los cocientes espectrales entre las componentes este y vertical (E/V), y norte y vertical (N/V). Para realizar estos cocientes se emplearon las componentes horizontales del piso de interés (primer o segundo) y las componentes verticales de los equipos de la planta baja. Al realizar un análisis rápido de los datos de los equipos colocados en el suelo del laboratorio se detectó que estos no son iguales, contrario a lo que se esperaba, por lo que se hizo el análisis empleando puntos que se encontraran en la misma ubicación de cada planta y así estudiar los efectos en cada punto de la estructura sin tener que adentrarse más en la forma de vibrar del sitio. Estos cocientes se realizaron entre equipos con misma posición relativa en los distintos pisos; por ejemplo, en la figura 5.1.3 se representan los tres puntos correspondientes al punto uno de cada nivel. El primer cociente se realiza entre el punto 1 de PB (vertical) y el punto 1 de P1 (este o norte), el siguiente cociente se realiza entre el punto 1 de PB (vertical) y el punto 1 de P2 (este o norte). Los cocientes se realizaron para cada ventana del primer o segundo piso con cada ventana de la planta baja y después se obtuvo el promedio de estos cocientes.

El análisis de datos se dividió en dos etapas: la primera, la fase inicial del experimento, es decir, sin daño alguno; la segunda, la fase final de interés del experimento, ya que la estructura estaba dañada. El procedimiento fue el mismo para ambas etapas del registro de datos.

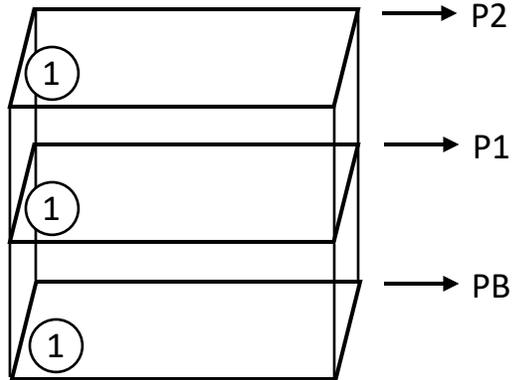


Figura 5.1.3 Esquema para ejemplificar el punto uno en cada planta de la casa.

5.2 Metodologías

Como se explicó previamente, los datos de la casa se analizaron empleando dos metodologías donde se comparan dos estados estructurales de la casa de madera, el primero comprende al edificio en su estado original, mientras que el segundo comprende al edificio después de haberlo llevado al 80% de su capacidad de carga.

5.2.1 Metodología 1

La primera metodología consiste en aplicar el método de Nakamura de cocientes espectrales para estimar el periodo de vibrar de la estructura, dicho método ha sido empleado por años y ha demostrado su efectividad al ser aplicado en edificaciones. Se obtuvieron los cocientes Este/Vertical y Norte/Vertical para poder comparar los espectros en cada dirección y así analizar el movimiento en ambas direcciones, aplicando el análisis antes y después de daño. A continuación, se muestra un diagrama de flujo del proceso seguido para aplicar la primera metodología.

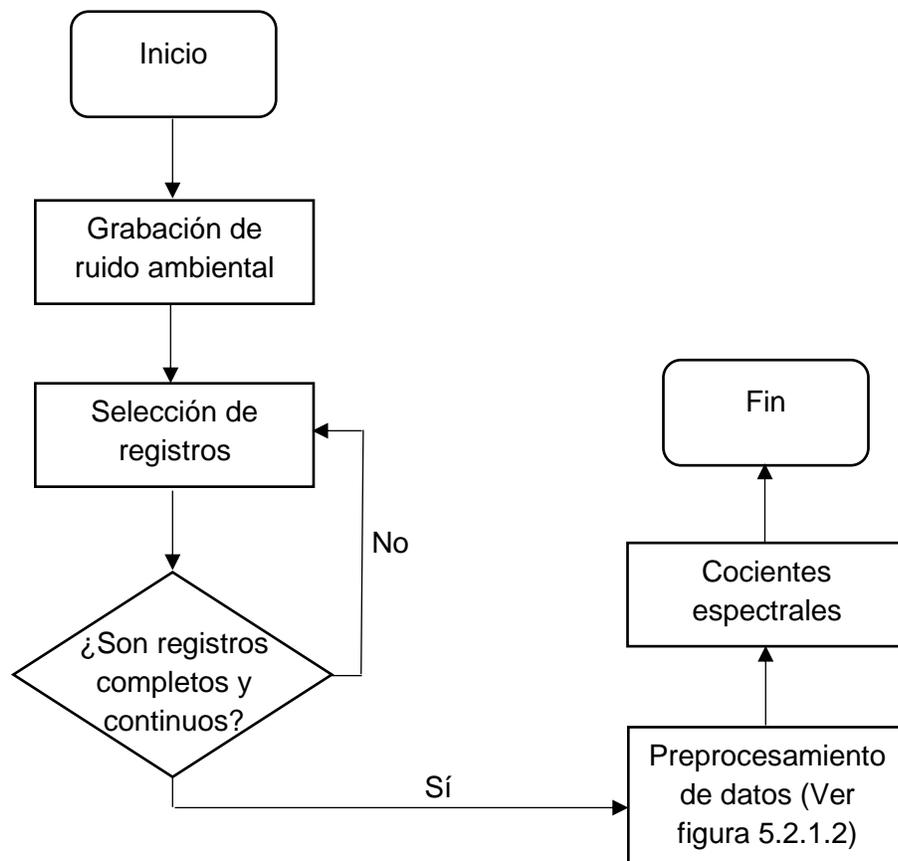


Figura 5.2.1.1 Diagrama del proceso general de la primera metodología.

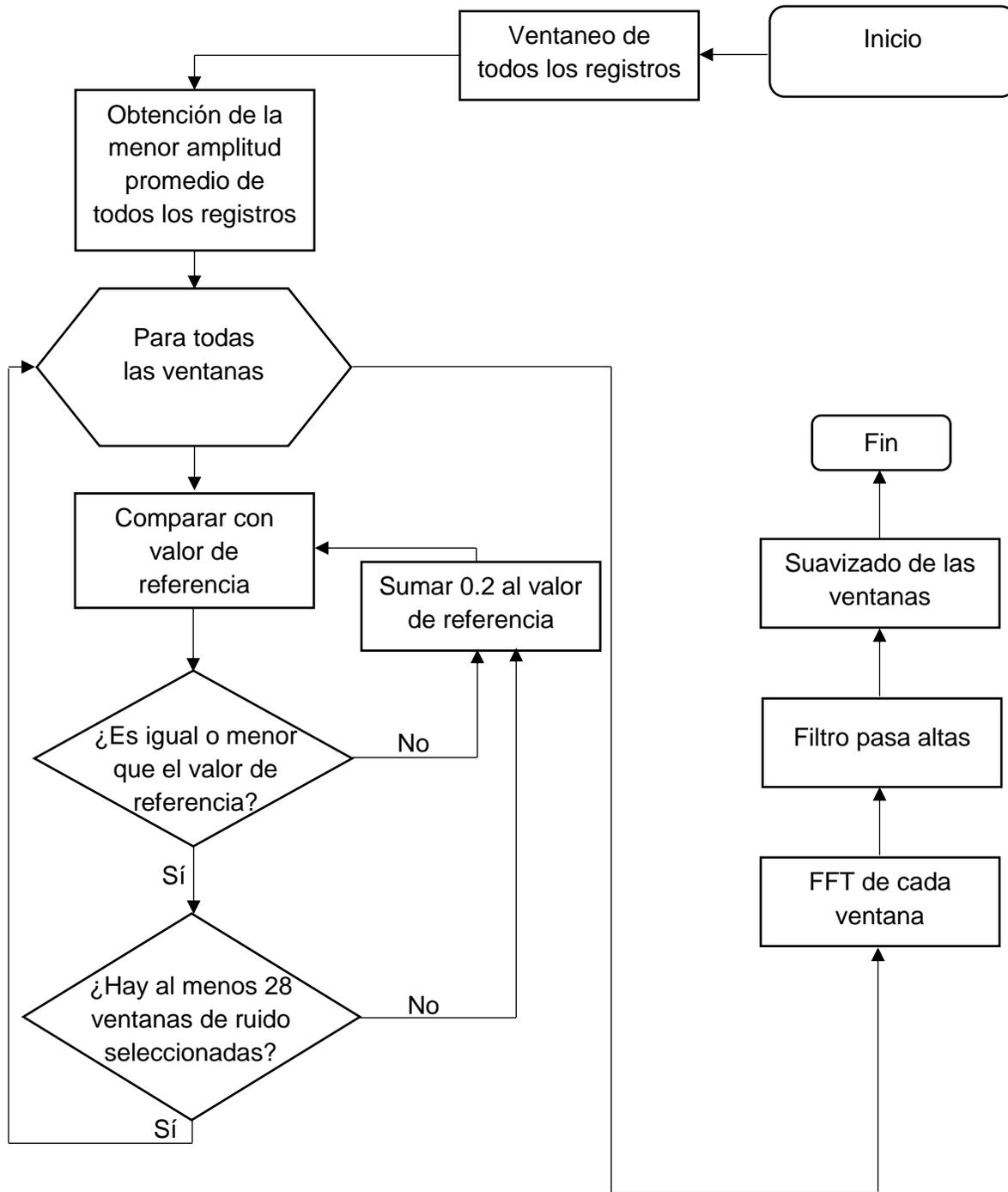


Figura 5.2.1.2 Diagrama del preprocesamiento de datos.

5.2.2 Metodología 2

Se sabe que con la primera metodología se pueden obtener los periodos fundamentales de vibrar y observar de forma sencilla los cambios existentes entre los periodos antes y después de tener daño en la estructura. La duda que surge es si es posible estudiar la deformación en la estructura, por lo que se propone una nueva metodología. Es importante recordar que hay dos tipos de fuerzas mecánicas, las de cuerpo y las de superficie. De las de superficie se desprenden tres tipos de esfuerzos, los cortantes, los flexionantes y los torsionantes. Existen normas de diseño para los esfuerzos cortantes y flexionantes, por lo cual el diseño de la estructura los contempla, sin embargo, no se contemplan los torsionantes. Además, como se discutió en el capítulo tres, el ruido sísmico contiene información de ondas superficiales, por lo que se consideró necesario analizarlo con alguna metodología que permita distinguir los esfuerzos derivados de esfuerzos de superficie. El tensor de deformaciones infinitesimales permite distinguir deformaciones volumétricas (tensión, compresión) de las angulares. Como se puede recuperar el tensor de deformaciones infinitesimales para las cuatro esquinas del edificio, se podría diferenciar si las deformaciones angulares son cortantes, flexionantes o torsionantes.

Recordando la mecánica de medios continuos, se puede emplear este edificio para analizar deformaciones basándose en el tensor de deformaciones infinitesimales. En este análisis se llevó a cabo una descomposición de los cocientes en sus tres direcciones principales (Norte, Este y Vertical).

Se decidió hacer el análisis empleando frecuencias porque al hacer este estudio en el dominio del tiempo hubiera implicado tener registros simultáneos en los 15 equipos y que en todos se pudiera localizar la misma onda de ruido. El dominio de las frecuencias permite analizar toda la información de la señal y, en este trabajo, la información de interés son las frecuencias de vibración del edificio. El tensor de deformaciones infinitesimales se construye mediante la relación entre los puntos de estaciones contiguas que estén en las esquinas de la estructura. Como ejemplo (figura 5.2.2.1), se define el punto cero como estación de referencia ubicada en cualquiera de las cuatro esquinas del piso de interés, mientras que los otros tres puntos se definen con las estaciones que se encuentren a la izquierda, derecha y debajo de la estación de referencia. Se utiliza la Transformada de Fourier de cada componente de los tres puntos contiguos y se normaliza con la distancia que los separa.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{x_i - X(x_j)}{\partial x} = \frac{F_{iPN} - F_{jPM}}{d_{iPNjPM}} \quad (5.2.2.1)$$

De la ecuación 5.2.2.1, $\frac{\partial u}{\partial x}$ representa la deformación, en el numerador se restan las coordenadas materiales a las coordenadas espaciales, mientras que ∂x representa la diferencia entre la posición de ambas coordenadas. Donde PN es el piso de la estación de referencia y PM es el piso inferior a dicha estación. Los subíndices de la Transformada de Fourier (F), indican el número del equipo como se representa en el ejemplo de la figura 5.2.2.2. En este caso, el numerador equivale a la resta entre las transformadas de Fourier de las diferentes componentes de los puntos y el denominador es la distancia de la estación de referencia a las estaciones contiguas.

Como se vio en el capítulo tres, el tensor deformación infinitesimal está dado por:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.2.2.2)$$

La expresión 5.2.2.1 equivale a los sumandos que se encuentran en la ecuación 5.2.2.2, con lo que se puede construir el tensor de deformaciones infinitesimales.

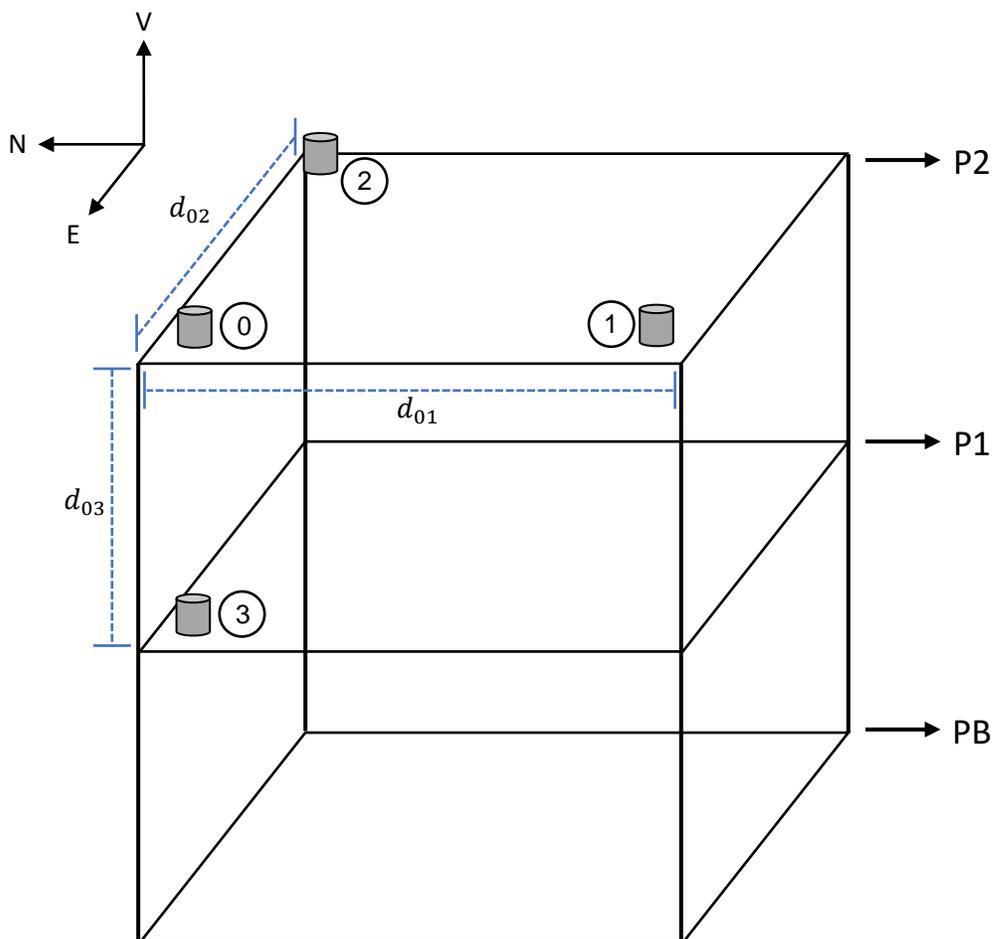


Figura 5.2.2.1. Ejemplo de los puntos empleados para realizar el análisis de deformación.

Basándose en la figura 5.2.2.1, la expansión $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ para el punto de referencia estaría dada por la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} \frac{f_3(V)-f_0(V)}{d_{03}} & \frac{f_1(V)-f_0(V)}{d_{01}} & \frac{f_2(V)-f_0(V)}{d_{02}} \\ \frac{f_3(N)-f_0(N)}{d_{03}} & \frac{f_1(N)-f_0(N)}{d_{01}} & \frac{f_2(N)-f_0(N)}{d_{02}} \\ \frac{f_3(E)-f_0(E)}{d_{03}} & \frac{f_1(E)-f_0(E)}{d_{01}} & \frac{f_2(E)-f_0(E)}{d_{02}} \end{pmatrix} \quad (5.2.2.3)$$

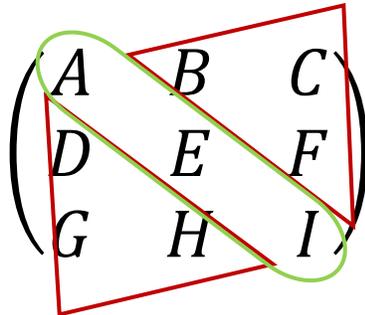
Donde las distancias entre estación de referencia y contiguas se representan con d_{01} , d_{02} y d_{03} como se observa en la figura 5.2.2.1.

Por otro lado, la expansión $\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ para el punto de referencia estaría dada por la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} \frac{f_3(V)-f_0(V)}{d_{03}} & \frac{f_3(N)-f_0(N)}{d_{03}} & \frac{f_3(E)-f_0(E)}{d_{03}} \\ \frac{f_1(V)-f_0(V)}{d_{01}} & \frac{f_1(N)-f_0(N)}{d_{01}} & \frac{f_1(E)-f_0(E)}{d_{01}} \\ \frac{f_2(V)-f_0(V)}{d_{02}} & \frac{f_2(N)-f_0(N)}{d_{02}} & \frac{f_2(E)-f_0(E)}{d_{02}} \end{pmatrix} \quad (5.2.2.4)$$

Además, es importante recordar que en el tensor de deformaciones las distintas diagonales que lo conforman se relacionan a deformaciones diferentes.

Del tensor 5.2.2.5, la diagonal principal, en verde (AEI), representa las deformaciones volumétricas y el resto de los elementos que componen al tensor, en rojo (BCF y DGH), se asocian a las deformaciones angulares.



(5.2.2.5)

La figura 5.2.2.2 es un ejemplo de las componentes que se utilizan en la expansión 5.2.2.3. Se emplea los colores correspondientes a los empleados en esa expansión, para simplificar su elaboración.

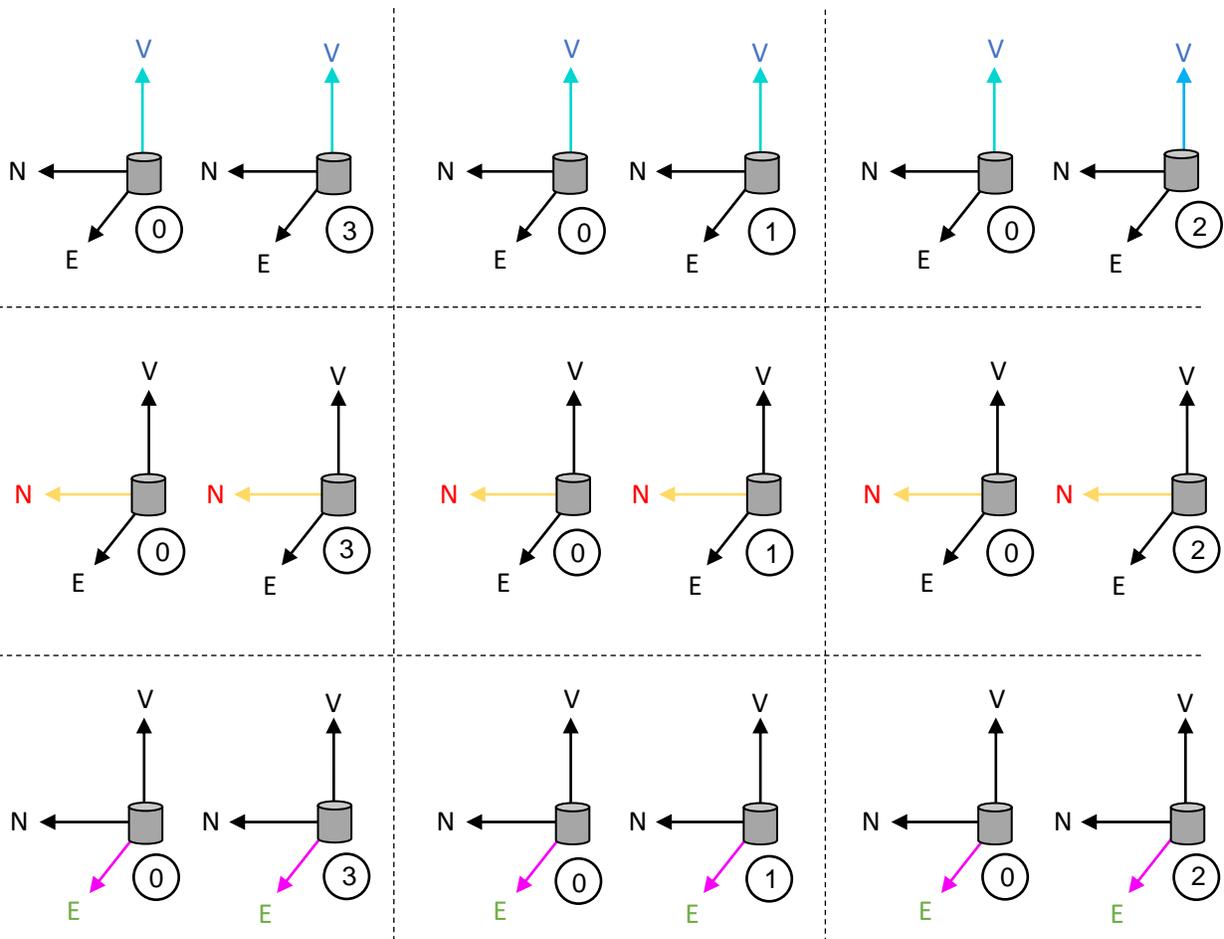


Figura 5.2.2.2. Representación con diagramas de la expansión 5.2.2.3.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo del proceso seguido para aplicar la segunda metodología.

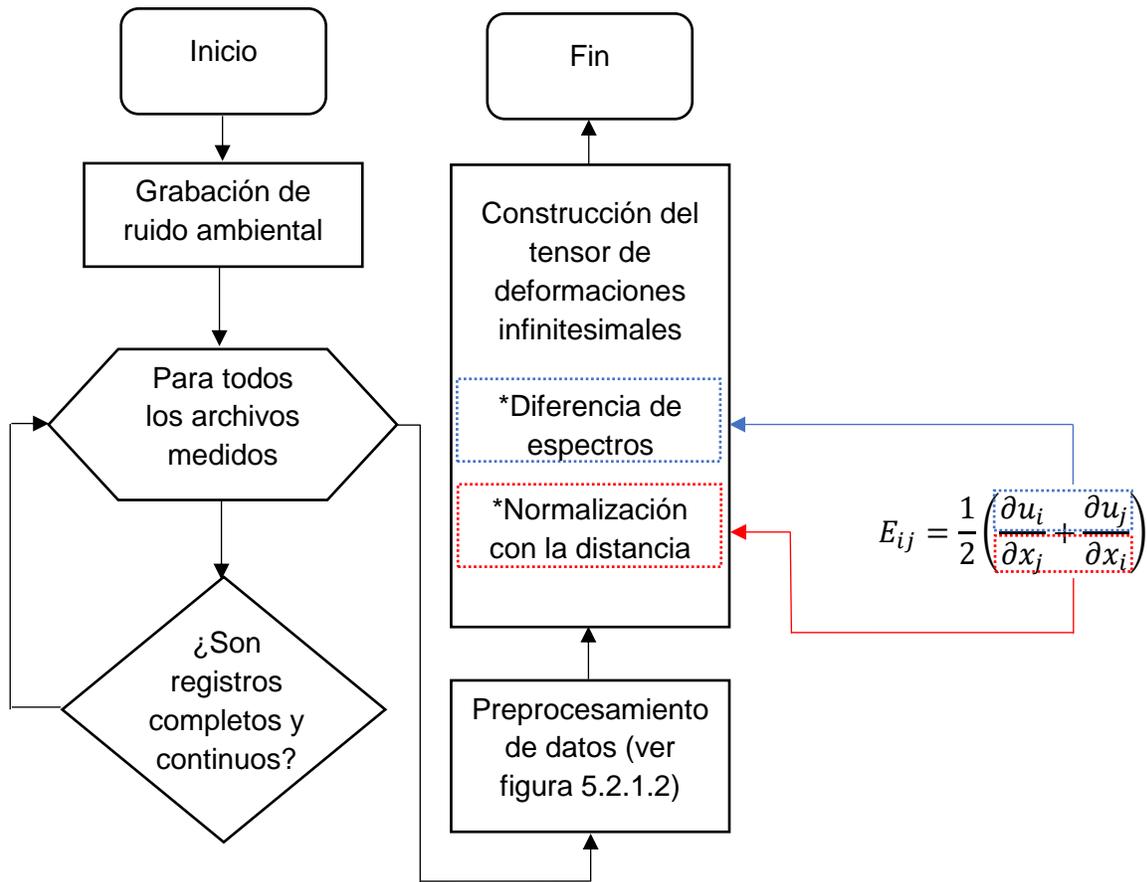


Figura 5.2.2.3 Diagrama del preprocesamiento de datos.

A pesar de que la metodología se basó en el tensor de deformaciones infinitesimales, las distancias entre las estaciones no son necesariamente infinitesimales. Gracias a que se está haciendo un análisis con ondas de ruido, para algunas longitudes de onda la distancia entre estaciones puede considerarse infinitesimal. La definición de la longitud de onda y, por ende, su frecuencia no se discute en este trabajo, para tal fin sería mejor utilizar mediciones en un material que sea más homogéneo y con propiedades mecánicas conocidas. Para este trabajo, se realiza un análisis cualitativo de las deformaciones entre estaciones de distintos pisos, aunque para su estudio cuantitativo se deberían de realizar más experimentos y analizar las limitaciones y consideraciones de esta metodología propuesta. Considerando lo anterior, no debería llamársele tensor de deformaciones infinitesimales a los resultados obtenidos con esta metodología. En el análisis estructural se estiman distorsiones de entrepiso, para el cálculo de estos se utilizan ideas similares a las empleadas en la metodología propuesta, por lo que los resultados obtenidos en este trabajo se llamarán distorsiones de entrepiso tridimensionales.

6. Discusión de Resultados

En esta tesis se emplearon dos metodologías para realizar el análisis de la estructura. La primera metodología consiste en emplear cocientes espectrales. Este método fue útil para detectar el patrón de movimiento de la casa y obtener el periodo de vibrar en algunos puntos medidos en la estructura. Por el método constructivo que se aplicó en la casa de bambú, no se pudo obtener información específica de cada punto del segundo piso, el primer nivel se pudo analizar de forma más detallada. Al observar las limitaciones que se tuvieron con la primera metodología, se optó por proponer una nueva metodología. Esta metodología propuesta se hizo basándose en el tensor de deformaciones infinitesimales estimado a partir de ruido ambiental. Gracias a esto, se pudieron observar las deformaciones angulares de cada punto analizado.

Las gráficas que representan los resultados de la primera metodología siguen el orden en el que físicamente se encontraban los equipos en la casa de bambú. Como se describe en el capítulo cuatro, había cinco equipos en cada nivel, uno en cada esquina y uno al centro geométrico. Las gráficas siguen esta distribución para poder hacer un análisis visual sencillo y detectar de una forma simple los cambios que se pudieran observar.

El alcance de este trabajo fue poder llegar a recomendaciones y observaciones cualitativas de los resultados obtenidos a partir del experimento de laboratorio que se realizó en el modelo de la casa de bambú. Para que este trabajo hubiera podido llegar a conclusiones cuantitativas hizo falta un modelo numérico, pero no se realizó el mismo ya que queda fuera de los alcances de la presente tesis. Una de las recomendaciones que se pudo obtener de estos resultados es la siguiente:

- Es recomendable tener en cuenta el rango de frecuencias de interés o útiles para no incluir frecuencias que no reflejen información sobre el medio de interés.
 - En ocasiones, los equipos empleados para la toma de datos tienen una mayor resolución de la que se necesita, por lo que es imprescindible tener claro cuáles son las frecuencias delimitantes para el experimento.
 - Para este trabajo, el rango de interés se considera de 0.05 a 0.5 s. En las siguientes gráficas, se representa el rango completo que puede detectar el equipo. El área que no está sombreada es la de interés, se conserva el resto para que el lector pueda observar toda la información.

La casa de bambú tiene elementos estructurales equidistribuidos, por lo cual se esperaba que el movimiento en ambas direcciones horizontales fuera similar. Se decidió hacer un análisis con los cocientes espectrales E/V y N/V para corroborar esta suposición. El análisis para la primera metodología se realiza en el siguiente orden:

- Sección 6.1.1. Se analizaron los cocientes E_{P1}/V_{PB} y N_{P1}/V_{PB} del primer nivel antes de ensayar la estructura.
- Sección 6.1.2. Se analizaron los cocientes E_{P2}/V_{PB} y N_{P2}/V_{PB} del segundo nivel antes de ensayar la estructura.
- Sección 6.1.3. Se analizaron los cocientes E_{P1}/V_{PB} y N_{P1}/V_{PB} del primer nivel después de ensayar la estructura.
- Sección 6.1.4. Se analizaron los cocientes E_{P2}/V_{PB} y N_{P2}/V_{PB} del segundo nivel después de ensayar la estructura.
- Sección 6.1.5. Se analizaron los cocientes E_{P1}/V_{PB} y N_{P1}/V_{PB} del primer nivel antes y después de daño.
- Sección 6.1.6. Se analizaron los cocientes E_{P2}/V_{PB} y N_{P2}/V_{PB} del segundo nivel antes y después de daño.
- Sección 6.1.7. Se analizaron los lineamientos del uso de cocientes espectrales referidos en el capítulo tres.

La segunda metodología no se analizó en secciones, solo se realizó una discusión general de resultados.

6.1 Metodología 1

Sección 6.1.1. Análisis de cocientes N_{P1}/V_{PB} y E_{P1}/V_{PB} , Primer Piso, antes de daño

Al observar las figuras 6.1.1 y 6.1.2, que son los cocientes N_{P1}/V_{PB} y E_{P1}/V_{PB} respectivamente, se concluye que no hay movimiento preferencial en alguna de las dos componentes ya que no hay mucha diferencia entre los cocientes. Se puede observar similitud entre las figuras 6.1.1 y 6.1.2, lo cual muestra que el movimiento en estas dos direcciones es uniforme. Se realizaron los cocientes de ambas direcciones horizontales para analizar la similitud entre ambas, finalmente, se decidió realizar el análisis cualitativo de las gráficas.

Observando cada figura, se puede apreciar que los cocientes de los cinco equipos no son iguales. En ambas figuras los cocientes de los puntos 2 (esquina superior izquierda), 4 (esquina inferior derecha) y 5 (centro) hay mayor similitud que con los puntos 1 (esquina inferior izquierda) y 3 (esquina superior derecha). Los puntos 2, 4 y 5 forman una diagonal que va de la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha. Así mismo, en la figura 6.1.2 se puede ver que hay similitud entre los puntos 1 y 3. Esto podría estar reflejando torsión en la estructura, lo cual se discutirá más adelante. En los puntos 1 y 3 de las figuras 6.1.1 y 6.1.2, se observa que no hay picos con amplitudes máximas tan claros como en los puntos 2, 4 y 5.

Se obtuvieron los periodos fundamentales de los cocientes, buscando el valor máximo de la amplitud en el rango de 0.05 a 0.5 segundos. Se determinó que éste era el rango de interés empleando una operación para calcular un valor aproximado del periodo de vibrar de una estructura, dicha operación consiste en dividir el número de pisos entre diez. Para la casa de bambú se tiene que el periodo de vibrar estará alrededor de: $2/10 = 0.5s$, el cual se utiliza como valor de referencia ya que no está en los alcances de este trabajo determinar numéricamente el periodo de vibrar del edificio. En estos primeros cocientes, el periodo del equipo 3 (0.4651 s), tanto en el cociente E_{P1}/V_{PB} como en el N_{P1}/V_{PB} , es más grande de lo que se esperaría teniendo en cuenta que es una casa de dos niveles de madera. El periodo promedio del primer nivel, sin considerar al equipo 3, es de 0.1338 s (tabla 6.1.1).

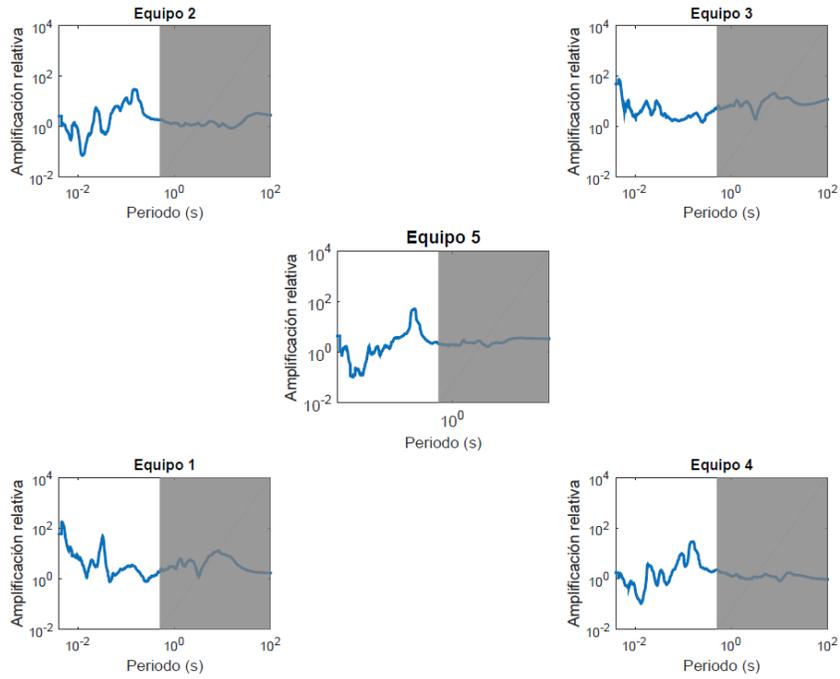


Figura 6.1.1 Cociente E_{P1}/V_{PB} , estado inicial.

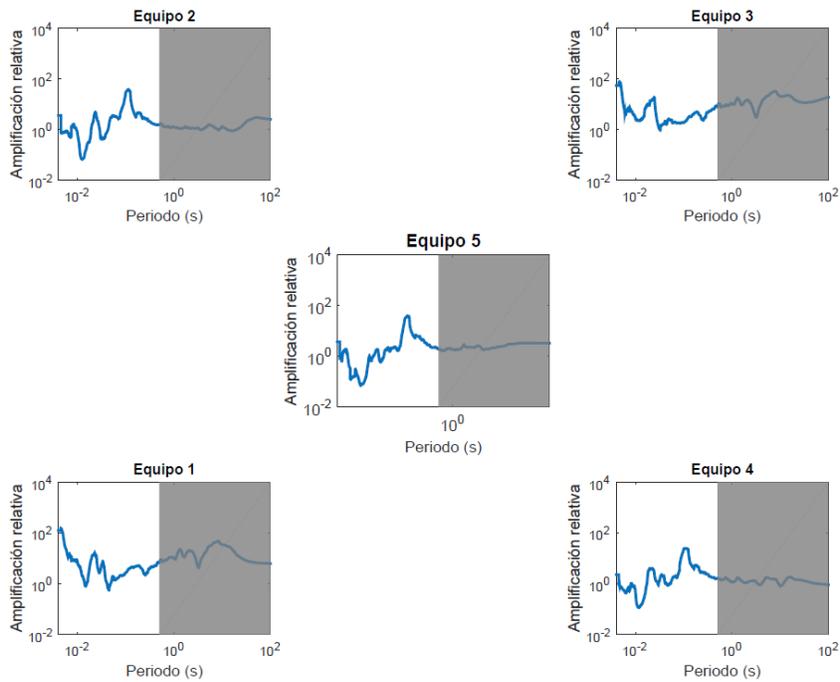


Figura 6.1.2 Cociente N_{P1}/V_{PB} , estado inicial.

Periodos de los cocientes del primer piso (P1)		
Punto	Periodo fundamental antes de ensayar E_{P1}/V_{PB}	Periodo fundamental antes de ensayar N_{P1}/V_{PB}
1	0.1312	0.5025
2	0.1485	0.1131
3	0.4651	0.4651
4	0.1572	0.1108
5	0.1623	0.1140

Tabla 6.1.1 Periodos fundamentales de los cocientes E_{P1}/V_{PB} y N_{P1}/V_{PB} del primer nivel en la primera etapa de medición.

Sección 6.1.2. Análisis de cocientes N_{P2}/V_{PB} y E_{P2}/V_{PB} , Segundo Piso, antes de daño

Las figuras 6.1.3 y 6.1.4 son muy parecidas entre sí, no hay alguna dirección preferencial en el movimiento horizontal de la estructura. En este caso, no hay algún cambio significativo entre los cocientes de los cinco puntos, sino que todos son muy parecidos. En la tabla 6.1.2, se puede ver que los periodos del segundo nivel son muy parecidos entre sí, tal como se observa en las figuras 6.1.3 y 6.1.4. El valor promedio del periodo del segundo nivel es de 0.1878 s, el cual es mayor que el valor promedio del primer nivel. En ambos niveles, P1 y P2, se puede observar que el movimiento horizontal del edificio no muestra una dirección preferencial, esto puede asociarse a la geometría de la casa, como se explica en el capítulo cuatro.

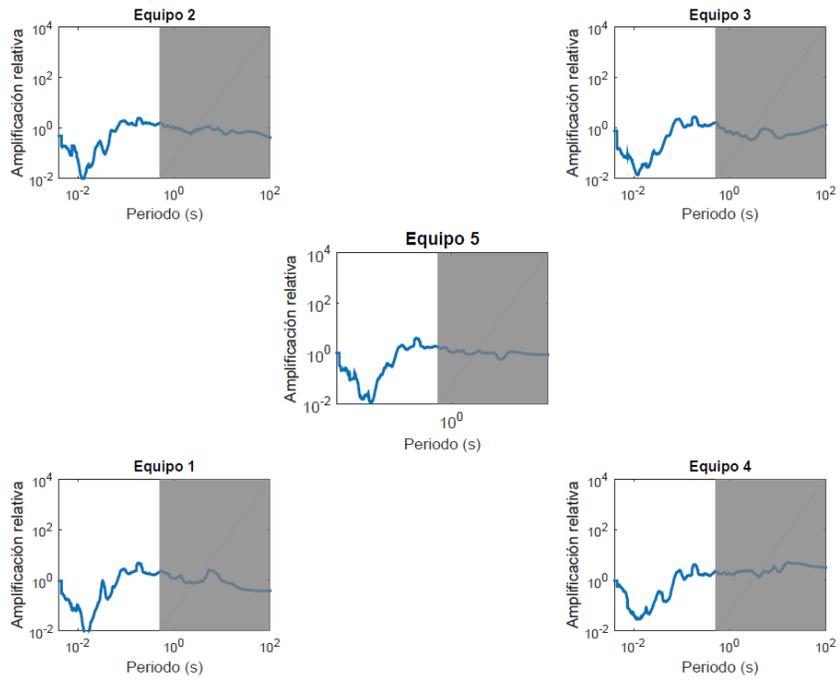


Figura 6.1.3 Cociente E_{P2}/V_{PB} , estado inicial.

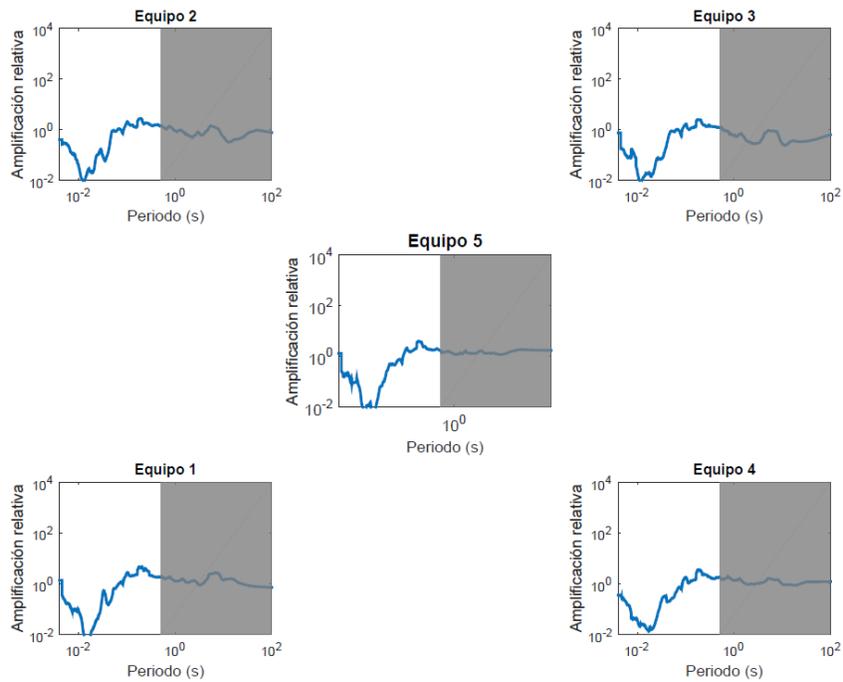


Figura 6.1.4 Cociente N_{P2}/V_{PB} , estado inicial.

Periodos de los cocientes del segundo piso (P2)		
Punto	Periodo fundamental antes de ensayar E_{P2}/V_{PB}	Periodo fundamental antes de ensayar N_{P2}/V_{PB}
1	0.1814	0.2061
2	0.1901	0.1901
3	0.1904	0.1876
4	0.1886	0.1814
5	0.1814	0.1814

Tabla 6.1.2 Periodos fundamentales de los cocientes E_{P2}/V_{PB} y N_{P2}/V_{PB} del segundo nivel en la primera etapa de medición.

En las cuatro figuras (6.1 a 6.4) se muestran algunos de los daños detectados en la casa de bambú después de ensayarla. Esto se podría reflejar en el análisis de frecuencias de los registros de las estaciones ya que la rigidez de la casa debería de verse afectada por las discontinuidades que aparecieron en diversas piezas. Se sabe que cuando una estructura sufre daños, generalmente su periodo se vuelve mayor, o su frecuencia menor, debido que cambia su forma de vibrar porque pierde rigidez. La ecuación que relaciona al periodo natural de vibrar y las constantes mecánicas de una estructura que funcione como un oscilador de un grado de libertad es: $T_s = \frac{2\pi}{\sqrt{k/m}}$. Donde k es la rigidez y m es

la masa (Chopra, 1995). Ante un daño estructural como el aplicado a la casa de bambú, no se espera que se pierda masa, por lo que cualquier variación de T_s está relacionada con la rigidez (k). Este cambio se analizará en las siguientes figuras.



Figura 6.1 Fotografía que muestra el desplazamiento de paneles en la planta baja tras las pruebas de esfuerzo.



Figura 6.2 Fotografía que muestra fisuras verticales en una columna de bambú en el primer nivel.



Figura 6.3 Fotografía que muestra la parte interna de la planta baja de la casa. En el óvalo rojo se observa la deformación de los contravientos en el interior de la estructura.



Figura 6.4 Fotografía que muestra fisuras verticales en una columna de bambú en planta baja.

Sección 6.1.3. Análisis de cocientes N_{P1}/V_{PB} y E_{P1}/V_{PB} , Primer Piso, después de daño

En las figuras 6.1.5 y 6.1.6 se puede observar una forma similar a las figuras 6.1.1 y 6.1.2, donde los puntos 2, 4 y 5 tienen mayor similitud entre sí que el 1 y el 3. A pesar de que la casa de bambú sufrió daño, los cocientes E_{P1}/V_{PB} y N_{P1}/V_{PB} de los puntos de medición no reflejan movimiento preferencial en alguna de estas direcciones, por lo cual se podría pensar que el daño en la casa fue homogéneo, aunque la madera presenta una complicación para su análisis ya que es más plástica que el concreto, y por lo tanto, podría no estar reflejando el daño. Como se explica en la sección 6.1.1, en las gráficas del P1, no hay una dirección horizontal preferencial de movimiento y esto se vuelve a observar en los datos del P1 después de ensayar la estructura. Al analizar la tabla 6.1.3 de los periodos obtenidos, los periodos fundamentales de los puntos 1 y 3 son muy chicos en dirección E_{P1}/V_{PB} (0.0540 s) y demasiado grandes en dirección N_{P1}/V_{PB} (0.5025 s). Por otro lado, los periodos de los puntos 2, 4 y 5 en cada cociente, son muy parecidos entre sí, siendo el periodo en la dirección este un poco mayor al de la dirección norte, con valores promedio de 0.2254 s en E_{P1}/V_{PB} y 0.18 s en N_{P1}/V_{PB} . Por ejemplo, en el punto 2, el periodo en la dirección E_{P1}/V_{PB} es 15.3% mayor que la dirección N_{P1}/V_{PB} .

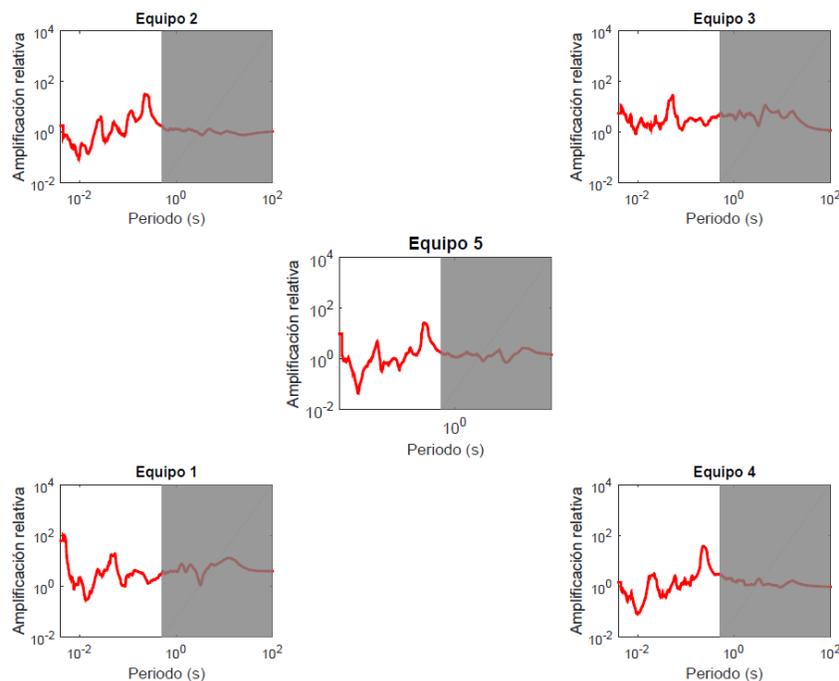


Figura 6.1.5 Cociente E_{P1}/V_{PB} , estado final.

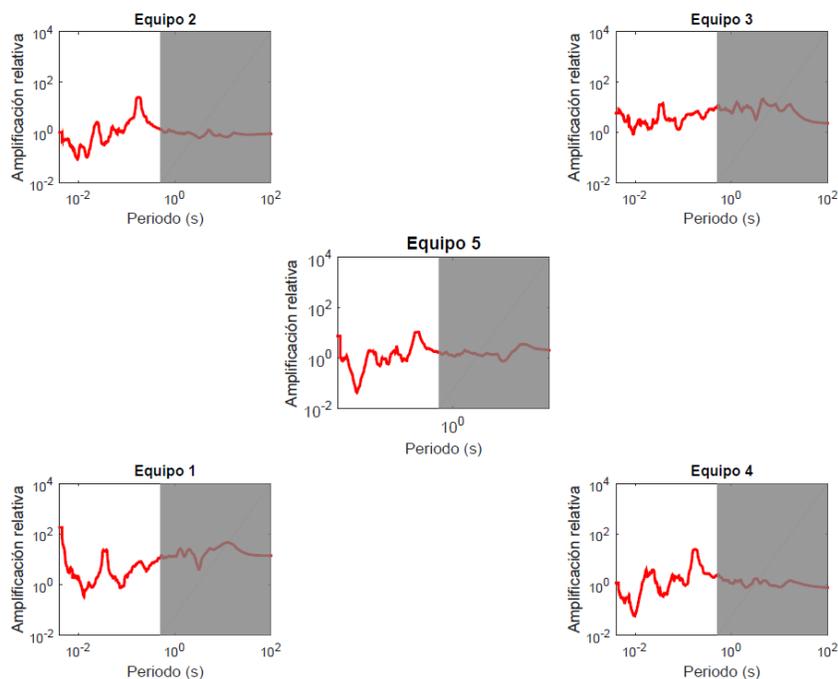


Figura 6.1.6 Cociente N_{P1}/V_{PB} , estado final.

Periodos de los cocientes del primer piso (P1)		
Punto	Periodo fundamental después de ensayar E_{P1}/V_{PB}	Periodo fundamental después de ensayar N_{P1}/V_{PB}
1	0.0549	0.5025
2	0.2212	0.1763
3	0.0549	0.5025
4	0.2298	0.1730
5	0.2252	0.1908

Tabla 6.1.3 Periodos fundamentales de los cocientes E_{P1}/V_{PB} y N_{P1}/V_{PB} del primer nivel en la etapa final de medición.

Sección 6.1.4 Análisis de cocientes N_{P2}/V_{PB} y E_{P2}/V_{PB} , Segundo Piso, después de daño

Las figuras 6.1.7 y 6.1.8, que corresponden a los cocientes E_{P2}/V_{PB} y N_{P2}/V_{PB} del segundo nivel, son muy parecidas entre sí. Como se observa en las secciones anteriores, no hay una dirección preferencial en el movimiento horizontal. En este caso se puede ver en la tabla 6.1.4 que los periodos de los cocientes E_{P2}/V_{PB} y N_{P2}/V_{PB} son casi idénticos, siendo el valor promedio del cociente E_{P2}/V_{PB} es de 0.2961 s, y el de la dirección N_{P2}/V_{PB} es de 0.2923 s. Los puntos 1, 2 y 3 tienen periodos muy parecidos, sin embargo, los periodos de los puntos 4 y 5 son mayores, sobre todo los del punto 4, con un periodo de 0.49 s. Como se explicó en la sección anterior, a pesar de que la casa de bambú sufrió daño, no hay un cambio significativo en los cocientes analizados, aunque este piso no está reflejando el movimiento específico de cada punto, como se explica en el capítulo cuatro, se está analizando para observar el movimiento general de la casa.

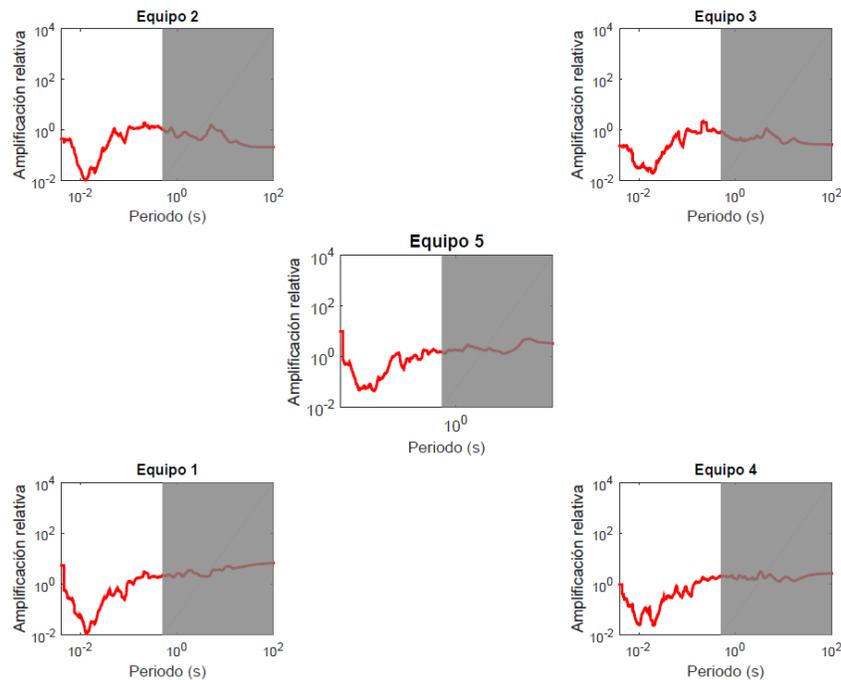


Figura 6.1.8 Cociente N_{P2}/V_{PB} , estado final.

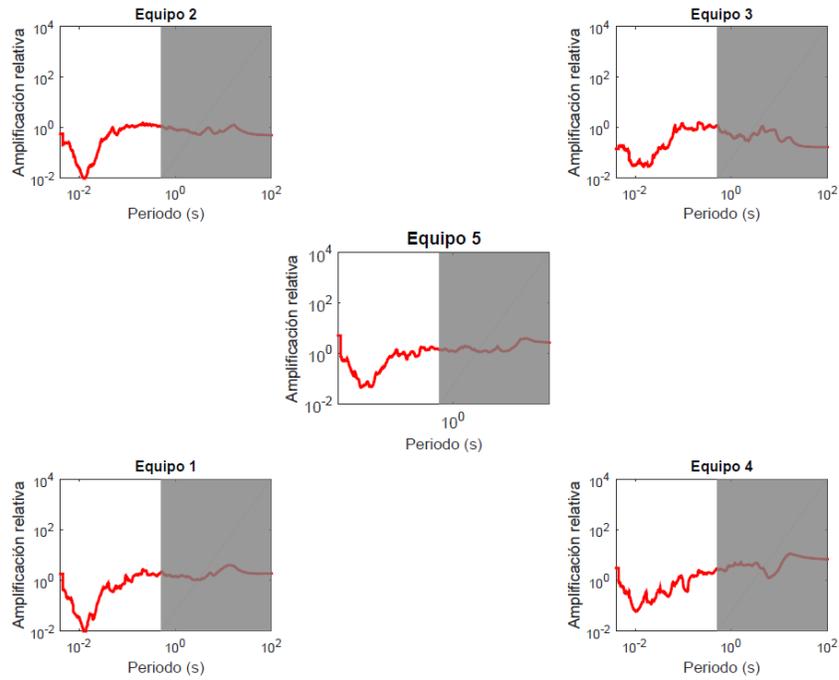


Figura 6.1.7 Cociente E_{P2}/V_{PB} , estado final.

Periodos de los cocientes del segundo piso (P2)		
Punto	Periodo fundamental después de ensayar E_{P2}/V_{PB}	Periodo fundamental después de ensayar N_{P2}/V_{PB}
1	0.2132	0.2136
2	0.2096	0.2070
3	0.2083	0.2083
4	0.4975	0.4950
5	0.3521	0.3378

Tabla 6.1.4 Periodos fundamentales de los cocientes E_{P2}/V_{PB} y N_{P2}/V_{PB} del segundo nivel en la etapa final de medición.

Sección 6.1.5 Análisis de cocientes N_{P1}/V_{PB} y E_{P1}/V_{PB} , Primer Piso, antes y después de daño

En las figuras 6.1.9 a 6.1.10 se graficaron los cocientes espectrales del estado inicial de la estructura (en azul) y del estado final (en rojo) del cociente E_{P1}/V_{PB} y N_{P1}/V_{PB} respectivamente. Se graficaron ambos cocientes juntos para poder realizar un análisis visual de los cambios en los cocientes determinados en cada equipo. Después de ensayar la estructura, hubo corrimiento en el periodo de vibrar de cada punto hacia mayores valores. En las tablas 6.1.5 y 6.1.6 está el registro de los periodos máximos de cada estación para ambos momentos del experimento correspondientes al primer piso, en las cuales se ve claramente el corrimiento del periodo natural de vibrar. Este corrimiento hacia mayores periodos está alrededor del 30% para los periodos en dirección E_{P1}/V_{PB} y del 37% para los periodos en dirección N_{P1}/V_{PB} .

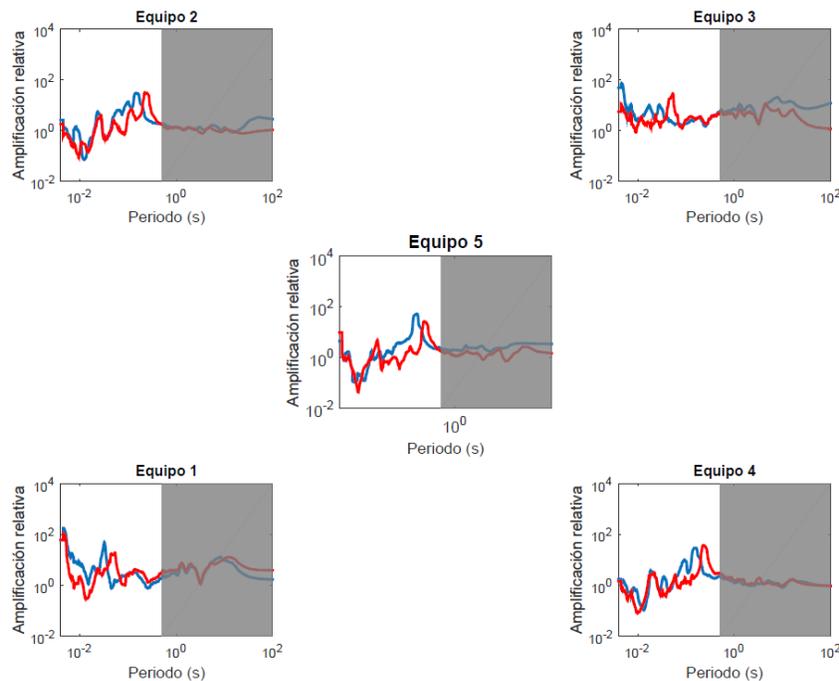


Figura 6.1.9 Cociente E_{P1}/V_{PB} . Estado inicial en azul, estado final en rojo.

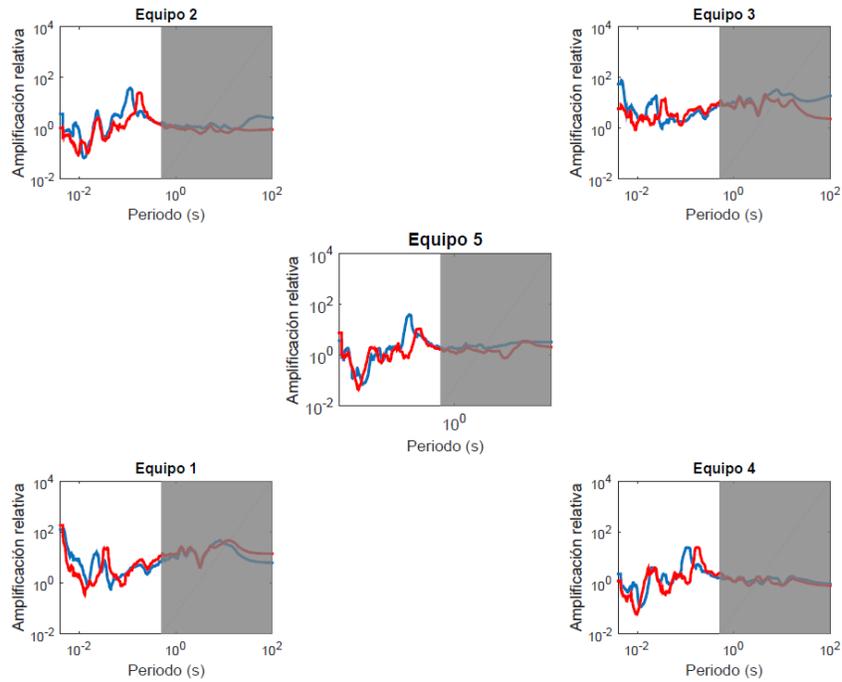


Figura 6.1.10 Cociente N_{P1}/V_{PB} . Estado inicial en azul, estado final en rojo.

Periodos de los cocientes del primer piso (P1) E_{P1}/V_{PB}		
Punto	Periodo fundamental antes de ensayar	Periodo fundamental después de ensayar
1	0.1312	0.0549
2	0.1485	0.2212
3	0.4651	0.0549
4	0.1572	0.2298
5	0.1623	0.2252

Tabla 6.1.5 Periodos iniciales y finales de cada punto del primer nivel, cociente E_{P1}/V_{PB}

Periodos de los cocientes del primer piso (P1) N_{P1}/V_{PB}		
Punto	Periodo fundamental antes de ensayar	Periodo fundamental después de ensayar
1	0.5025	0.5025
2	0.1131	0.1763
3	0.4651	0.5025
4	0.1108	0.1730
5	0.1140	0.1908

Tabla 6.1.6 Periodos iniciales y finales de cada punto del primer nivel, cociente N_{P1}/V_{PB}

Sección 6.1.6 Análisis de cocientes N_{P2}/V_{PB} y E_{P2}/V_{PB} , Segundo Piso, antes y después de daño

En las figuras que se analizan en esta sección (6.1.11 y 6.1.12), se puede observar un cambio en los cocientes obtenidos. De la tabla 6.1.7, que contiene los periodos determinados para la dirección E_{P2}/V_{PB} del segundo nivel, se tiene un corrimiento promedio de 28%, mientras que de la tabla 6.1.8, dirección N_{P2}/V_{PB} , se tiene un corrimiento del 26%.

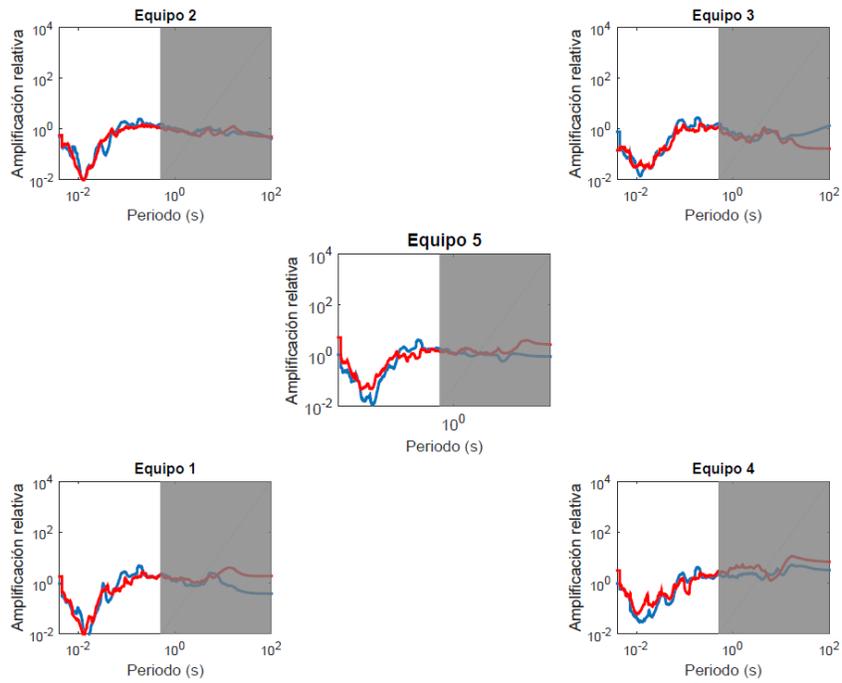


Figura 6.1.11 Cociente E_{P2}/V_{PB} . Estado inicial en azul, estado final en rojo.

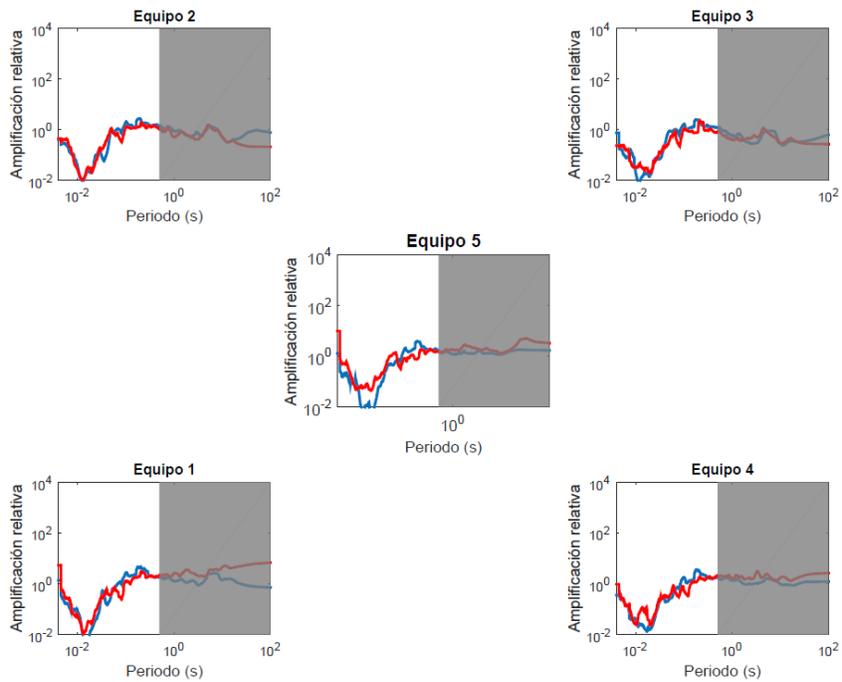


Figura 6.1.12 Cociente N_{P2}/V_{PB} . Estado inicial en azul, estado final en rojo.

Periodos de los cocientes del segundo piso (P2) E_{P2}/V_{PB}		
Punto	Periodo fundamental antes de ensayar	Periodo fundamental después de ensayar
1	0.1814	0.2132
2	0.1901	0.2096
3	0.1904	0.2083
4	0.1886	0.4975
5	0.1814	0.3521

Tabla 6.1.7 Periodos iniciales y finales de cada punto del segundo nivel, cociente E_{P2}/V_{PB}

Periodos de los cocientes del segundo piso (P2) N_{P2}/V_{PB}		
Punto	Periodo fundamental antes de ensayar	Periodo fundamental después de ensayar
1	0.2061	0.2136
2	0.1901	0.2070
3	0.1876	0.2083
4	0.1814	0.4950
5	0.1814	0.3378

Tabla 6.1.8 Periodos iniciales y finales de cada punto del segundo nivel, cociente N_{P2}/V_{PB}

Sección 6.1.7 Análisis de los lineamientos para el cálculo de cocientes espectrales

En las figuras 6.1.11 y 6.1.12 se observa un ligero cambio en la forma del espectro comparando los cocientes antes y después de ensayar la estructura. Al calcular el máximo de los periodos de los cocientes antes y después de ensayos, se observa que hay un aumento en estos. A pesar de que los periodos obtenidos para el segundo nivel son consistentes en cuanto a resultados, no se consideran confiables para determinar el periodo fundamental. Esto se debe a la forma constructiva de la casa, se puede concluir que no están reflejando el comportamiento específico de cada punto analizado sino el movimiento general. Esto se puede apreciar en la figura 4.1.6, en la esquina superior se ve que termina la columna de bambú y arriba de esta hay un pedazo de madera sobre el cual está el triplay del techo. Además, no se tiene un pico claro en los cocientes y no cumple con los criterios sugeridos por el equipo de Sesame (2004). Sin embargo, estos espectros podrían estar reflejando el comportamiento general de la estructura.

En el capítulo tres se enlistan los criterios propuestos por el equipo de Sesame (2004), a continuación, se analizan estos criterios con los datos de los puntos 2, 4 y 5:

- 1) $f_0 > 10/l_w$, cumple ya que en el caso del experimento se tiene $10/16.5 = 0.6060$, y las frecuencias obtenidas son mucho mayores.
- 2) $n_c(f_0) > 200$, donde n_c es el número de ciclos significativos ($l_w * n_w * f_0$), n_w es el número de ventanas seleccionadas para procesar, l_w es el largo de las ventanas.
- 3) $\sigma_A(f) < 2$ para $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 > 0.5$ Hz
o $\sigma_A(f) < 3$ para $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 < 0.5$ Hz
 σ_A se relaciona con la desviación estándar de $A_{H/V}$ y representa el factor de diferencia entre la amplitud y la desviación estándar de $A_{H/V}$.

En el caso de la identificación del pico de H/V, se enlistan algunos de los lineamientos:

- 4) $\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$, $A_{H/V}$ es la amplitud del cociente H/V, f^- es la frecuencia entre $f_0/4$ y f_0
- 5) $\exists f^+ \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$, f^+ es la frecuencia entre f_0 y $4f_0$
- 6) $A_0 > 2$, A_0 es la amplitud del cociente H/V en f_0
- 7) $f_{pico}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
- 8) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$, σ_f es la desviación estándar de la frecuencia pico de H/V, $\varepsilon(f_0)$ es el valor de referencia para la condición de estabilidad $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$, este valor se puede calcular con la tabla 2.1.
- 9) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$, $\theta(f_0)$ es el valor de referencia para la condición de estabilidad para σ_A , este valor se obtiene de la tabla 2.1

Se cumple con los criterios para determinar el mejor pico del cociente H/V y para determinar la confiabilidad de la curva. En cuanto a la confiabilidad de la curva obtenida

(recordando que la frecuencia es el inverso del periodo), en todos los casos la frecuencia fundamental obtenida es mucho mayor que el cociente $10/I_w = 10/16.5 = 0.6060$; el número de ciclos significativos ($n_c(f_0) = I_w * n_w * f_0$) de la frecuencia fundamental siempre fue mucho mayor que 200 ya que el número de ventanas en cada equipo fue mayor a 600.

De los criterios para determinar el mejor pico de H/V, existe por lo menos algún valor que sea menor a la mitad de la amplitud ($A_0/2$) del periodo fundamental en el rango $[f_0, f_0/4]$ y otro $A_0/2$ en el rango $[f_0 * 4, f_0]$. El valor de la amplitud en el periodo fundamental es mayor a 2. La desviación del periodo de las curvas H/V es menor a $0.05f_0$, que es el valor máximo aceptable. Finalmente, la amplitud de la desviación estándar del cociente en el periodo de interés es menor que 1.58. Por lo tanto, se puede concluir que estos resultados son confiables considerando los parámetros mencionados en el capítulo dos.

En la figura 6.1.13 se muestra en rosa el cociente N_{P1}/V_{PB} del piso 1. El asterisco en el pico con mayor amplitud representa el periodo fundamental. Las líneas azules muestran este periodo más menos la desviación estándar de los periodos de las curvas usadas para obtener el cociente. Finalmente, la línea negra superior muestra el cociente más la desviación estándar de la amplitud y la línea negra inferior muestra el cociente al restarle dicha desviación. Recordando las consideraciones publicadas por Sesame (2004), la desviación estándar más el cociente en el periodo fundamental no debe de exceder el triple del valor de la amplitud en este punto, por lo que se observa que no se rebasa el límite sugerido. Con todo este análisis se garantiza que los resultados cumplan con los estándares del grupo de Sesame (2004).

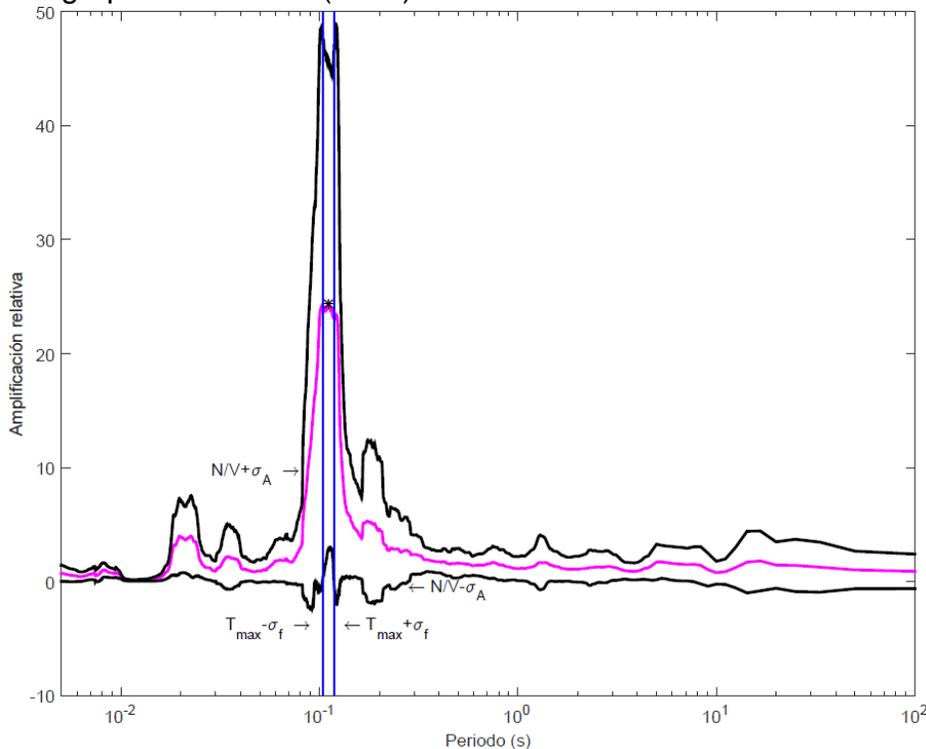


Figura 6.1.13 Ejemplo de cociente con sus respectivas desviaciones de periodo y amplitud.

Por otro lado, además de cumplir con los lineamientos del equipo de Sesame (2004), un resultado contundente en este estudio es que la variación de los periodos antes y después del ensayo quedan fuera del rango de la desviación estándar de cada uno de ellos. Esto se ve claramente en la figura 6.1.14, en azul se tiene un cociente del primer nivel antes de daño y en rosa su desviación estándar, en rojo se tiene ese cociente después de daño y en negro su desviación estándar.

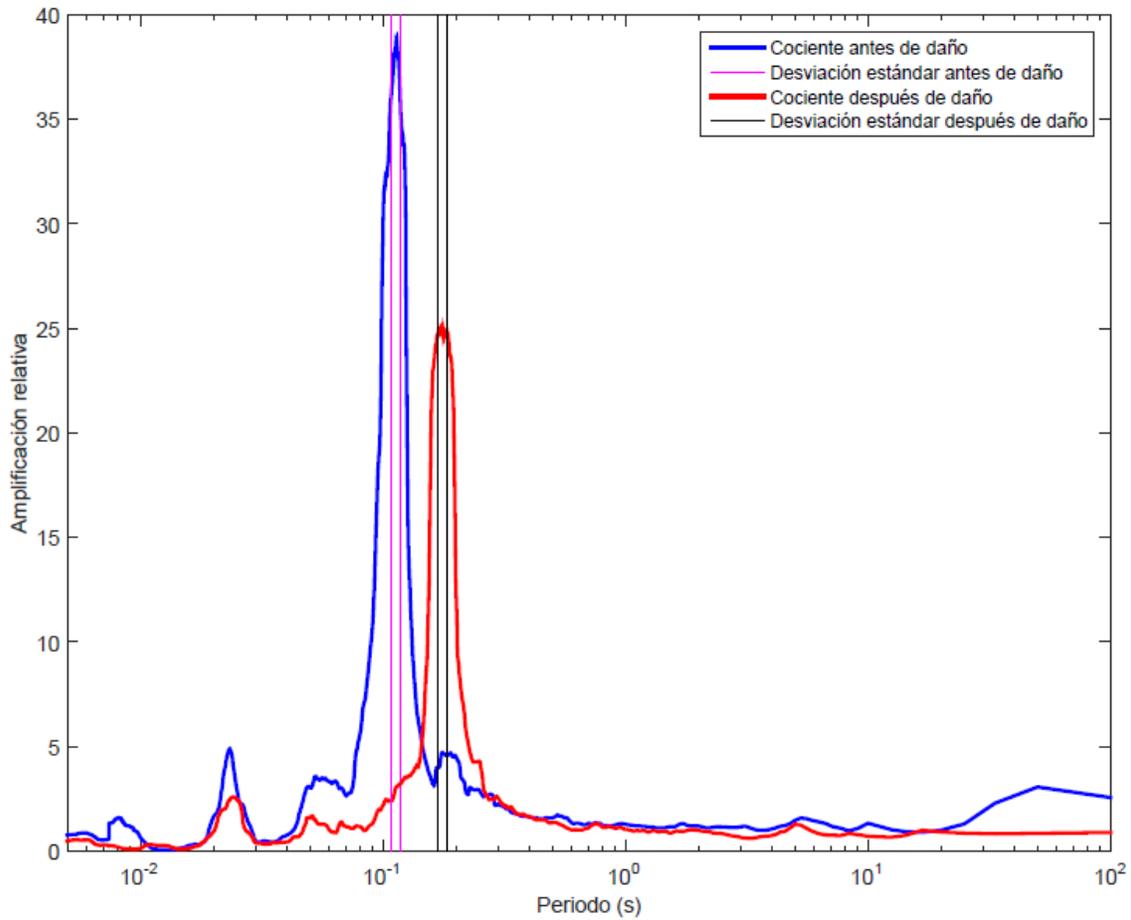


Figura 6.1.14 Ejemplo de cocientes antes y después de daño con sus respectivas desviaciones estándar.

6.2 Metodología 2

Hasta este punto se analizan los periodos fundamentales de vibrar con los datos obtenidos y se observa de forma sencilla que existe un cambio en estos periodos antes y después de tener daño en la estructura. A continuación, se analizan los resultados obtenidos con la metodología propuesta.

Las figuras 6.2.1 y 6.2.2 muestran el tensor de deformaciones obtenido, tanto en escala logarítmica como semilogarítmica, en este caso se utilizó como estación de referencia la estación uno del primer nivel (P1). En color azul se puede observar la deformación antes de dañar la estructura, y la deformación después de daño en color rojo.

- En la figura 6.2.1 se observa que las gráficas de deformación muestran una tendencia biexponencial, se ve la diferencia entre ambas tendencias alrededor del periodo de 1s. Este comportamiento se analizará en un futuro. También se observa que conforme el periodo aumenta, las deformaciones aumentan de forma exponencial. Es importante recordar que esta metodología se está analizando de forma cualitativa.
- En la figura 6.2.2 se puede observar claramente que las menores deformaciones se encuentran en la diagonal principal, y que las componentes que involucran los puntos este-norte y norte-este tienen las mayores amplitudes de deformación.
- El periodo con la máxima amplitud de deformación después de daño se encuentra recorrido a mayores periodos respecto a la amplitud máxima antes de daño. En general, la amplitud máxima antes de daño se encuentra entre 0.1 s y 0.15 s., después de daño se encuentra entre 0.17 s y 0.26 s. Esto representa un corrimiento de más del 40% en los periodos con amplitudes de máxima deformación.
- Ardila-Pinilla (2013) obtuvo un valor aproximado del módulo de Poisson del bambú igual a 0.428. Este valor es mucho mayor a las amplitudes obtenidas en las gráficas de deformación. Se esperaba que estas amplitudes no coincidieran con el módulo de Poisson ya que la estructura tiene elementos de metal, madera, bambú y tiene uniones con clavos y refuerzos en muros. Al no rebasar el módulo de Poisson, se puede ver que los valores de amplitudes de deformación obtenidas no distan de escenarios reales.
- Recordando el tensor 5.2.2.5, se sabe que los elementos en la diagonal principal se asocian a deformaciones volumétricas. En el caso de los resultados obtenidos se podrían considerar prácticamente nulas. Por otro lado, las deformaciones fuera de

esa diagonal principal se asocian a las deformaciones angulares, por lo que se observa claramente que hay deformaciones en ese punto de la casa de madera.

- Las cuatro esquinas de la casa tienen un comportamiento similar, varían un poco las amplitudes, pero en general la forma se mantiene, en un futuro se podrán utilizar los tensores de deformaciones infinitesimales de estos puntos para determinar si las deformaciones son por cortante, torsión o flexión.

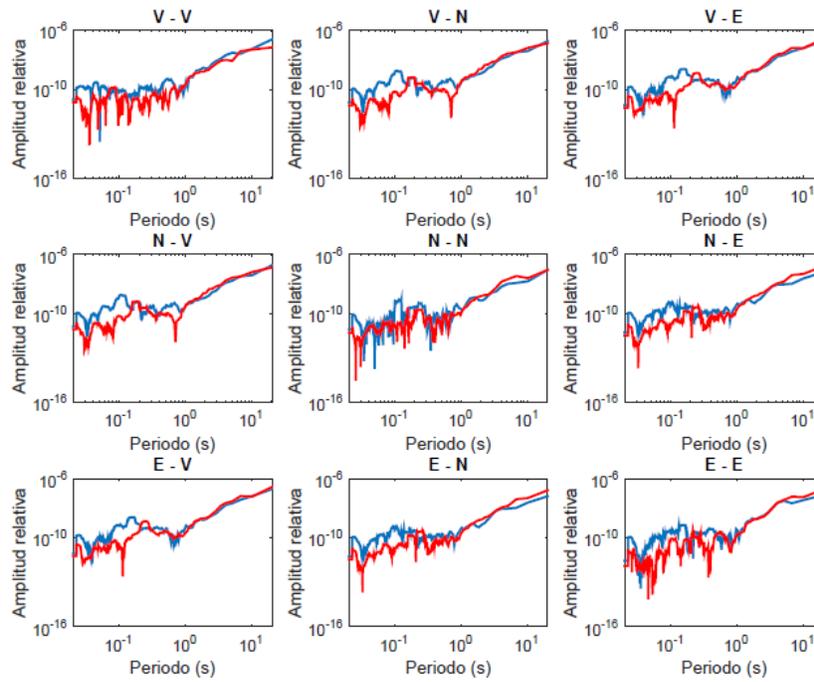


Figura 6.2.1 Deformación del punto 1, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

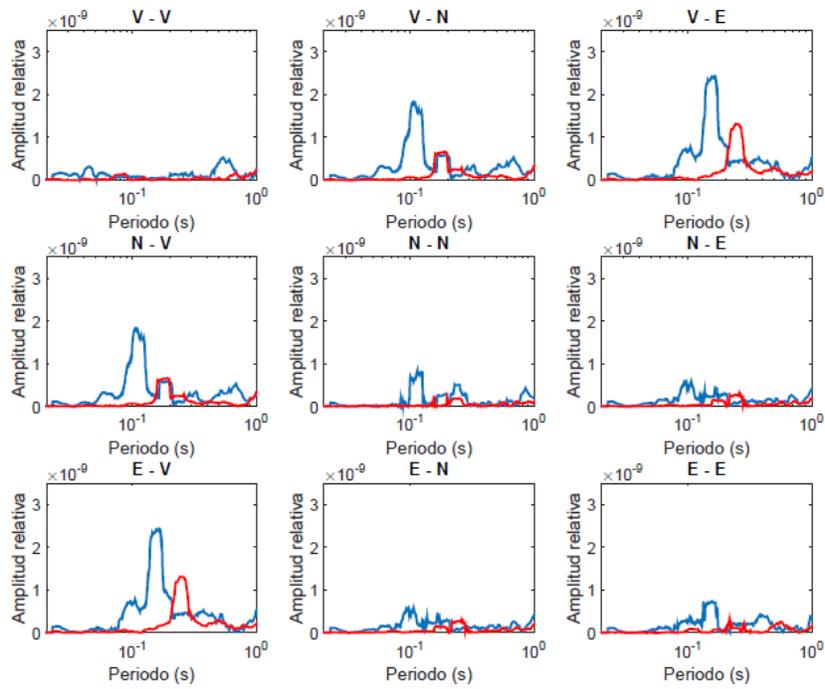


Figura 6.2.2 Deformación del punto 1, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo. Las amplitudes están en escala lineal y los periodos en logarítmica.

El resto de las gráficas se incluyeron en el Anexo, a continuación, se describe la lista de las figuras.

En escala logarítmica:

Deformación antes de daño, piso uno. Figuras 9.01-9.04

Deformación después de daño, piso uno. Figuras 9.05-9.08

Deformación antes y después de daño, piso uno. Figuras 9.09-9.12

Deformación antes de daño, piso dos. Figuras 9.13-9.16

Deformación después de daño, piso uno. Figuras 9.17-9.20

Deformación antes y después de daño, piso uno. Figuras 9.21-9.24

En escala semilogarítmica:

Deformación antes de daño, piso uno. Figuras 9.25-9.28

Deformación después de daño, piso uno. Figuras 9.29-9.32

Deformación antes y después de daño, piso uno. Figuras 9.33-9.36

Deformación antes de daño, piso dos. Figuras 9.37-9.40

Deformación después de daño, piso uno. Figuras 9.41-9.44

Deformación antes y después de daño, piso uno. Figuras 9.45-9.48

7. Conclusiones

En este trabajo se amplió el uso de ruido ambiental para emplearlo en el análisis de deformaciones en estructuras. Como es sabido, el uso de ruido ambiental en cocientes espectrales resulta útil para el cálculo del periodo natural de vibrar de las estructuras.

En un principio, se pudo determinar el periodo natural de vibrar de la casa, y los cambios en éste al analizar los datos después de los ensayos. Se observó un patrón en cuanto a las similitudes de los puntos estudiados, los puntos que van de la esquina superior izquierda a la esquina inferior derecha se parecían entre sí, y los otros dos puntos, esquina inferior izquierda y esquina superior derecha, tenían semejanza. El periodo fundamental determinado para la casa antes de ensayos, empleando el cociente E/V fue de 0.156 s; mientras que el calculado para el cociente N/V fue de 0.1126 s. El periodo determinado para la estructura después de ensayos, considerando el cociente E/V fue de 0.2254 s; y para el cociente N/V fue de 0.18 s. Se observa que, a pesar de ser una casa relativamente cuadrada en planta, no tiene el mismo periodo fundamental de vibrar en ambas direcciones, lo cual indica que se mueve diferente en estas direcciones analizadas. Recordando el capítulo cuatro, el análisis del cambio en el periodo de vibrar de un edificio se basa en el hecho de que la masa del edificio es constante y la rigidez de la estructura es la que varía, por lo que un cambio en la rigidez se refleja en un cambio en el periodo de vibrar. Cuando una estructura se daña y se conoce el periodo fundamental de antes de daño, se puede observar que este aumenta; al analizarlo en el dominio de las frecuencias, estas disminuyen. En los cambios de los periodos de antes y después de daño en ambas direcciones, se observa un aumento de más del 40% en el periodo de vibrar calculado. La proporción en el cambio del periodo fundamental de ambas direcciones podría indicar que se dañó de forma homogénea. El método de cocientes espectrales podría reflejar de forma clara la torsión en un edificio, pero aún falta más investigación, ya que, por ejemplo, no se tiene una medida clara de la amplitud de dicha deformación.

La metodología propuesta permitió observar de forma evidente las deformaciones angulares de los nodos de la estructura y usando dichas deformaciones para las cuatro esquinas de la estructura se puede identificar, si el estado de deformaciones es torsionante, cortante o flexionante. Se han podido identificar claramente las diferencias de los espectros obtenidos antes y después del daño, lo cual muestra el gran potencial de esta metodología en la evaluación de la salud estructural de los edificios. Las amplitudes obtenidas son consistentes con la realidad física del experimento, ya que no son demasiado grandes y son menores que el módulo de Poisson. Se tiene que considerar que se midió ruido ambiental, por lo que el movimiento es muy pequeño. Lo más relevante de la metodología propuesta es que permitió observar de forma evidente que existen deformaciones angulares en los cuatro puntos analizados, lo cual era una hipótesis que se planteó a partir de los cocientes espectrales. Al igual que en la

metodología anterior, existe un corrimiento hacia mayores periodos de las amplitudes máximas después de daño en la casa de bambú. Como periodo promedio de los periodos con amplitud máxima antes de daño, se tiene 0.12, y para el periodo promedio después de daño se tiene 0.21 s, este corrimiento es de aproximadamente 40%, el cual coincide con el corrimiento observado en los cocientes espectrales.

Cada análisis permitió observar algún aspecto distinto de la estructura. Con los cocientes espectrales H/V, se pudo determinar el periodo fundamental y sus cambios después del daño, mientras que, con el análisis basado en el tensor de deformaciones infinitesimales, se pudo observar la deformación angular existente en los puntos medidos y analizados. El poder estimar las distorsiones entre piso tridimensionales basándose en el tensor de deformaciones infinitesimales permitirá recuperar características mecánicas del medio medido en el futuro.

Este trabajo puede servir para incluir en un futuro diferentes análisis de los cocientes espectrales, así se podría obtener más información de una estructura sin la necesidad de estudios invasivos o más caros, y no limitarse al cálculo del periodo natural de vibrar. Lo ideal sería tener un modelo computacional de la estructura a estudiar para poder comparar resultado. Se recomienda tener estudios de las estructuras antes de que éstas sufran daño, es decir, en cuanto se terminen de construir para tener los valores medidos en el edificio, con esto se tiene un estado de referencia inicial para comparar los periodos estimados después de la ocurrencia de sismos y así evaluar la salud de la estructura.

8. Referencias

Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Bard, P., Basili, R., Bertrand, E., Bettig, B., Blarel F., Bon, S., Bonnefoy-Claudet, S., Bordonni, P., Borges, A., Böttger Sørensen, M., Bourjot, L., Cadet, H., Cara, F., Caserta, A., Chatelain, J., Cornou, C., Cotton, F., Cultrera, G., Daminelli, R., Dimitri, P., Dunand, F., Duval, A., Fäh, D., Fojtikov, L., Franco, R., Giulio, G., Grandison, M., Guéguen, P., Guillier, B., Haghshenas, E., Havenith, H., Havskov, J., Jongmans, D., Kind, F., Kirsch, J., Koehler, A., Koller M., Kristek, J., Kristekova, M., Lacave, C., Marcellini, A., Maresca, R., Margaritis, B., Marra, F., Moczo, P., Moreno, B., Morrone, A., Noir, J., Ohrnberger, M., Ojeda, J., Oprsal, I., Pagani, M., Panou, A., Paz, C., Querendez, E., Rao, S., Rey, J., Richter, G., Rippberger, J., Rocca, M., Roquette, P., Roten, D., Rovelli, A., Saccoroti, G., Savvaidis, A., Scherbaum, F., Schissele, E., Spühler-Lanz, E., Tento, A., Teves-Costa, P., Theodulidis, N., Tvedt, E., Utheim, T., Vassiliades, J., Vidal, S., Viegas, G., Vollmer, D., Wathélet, M., Woessner, J., Wolff, K., Zacharopoulos, S., (2004) Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. Measurements, processing and Interpretation. Site Effects assessment using Ambient Excitations European research project.

Aki, K. (1957) Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Earthquake Research Institute*, 25, 415-457.

Ardila-Pinilla, C. (2013) Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú *Guadua angustifolia* Kunth del departamento de Tolima, Colombia. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Bard, P. (1999) Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? *The effects of surface geology on seismic motion*, 3, 1251-1279.

Blakely, R. (1996) Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications. Estados Unidos de América: Cambridge University Press.

Caicedo, J., Betancourt, S., Dyke, S., (2007) Introduction to Dynamics of Structures. Estados Unidos de América: Washington University in Saint Louis.

Chopra, A. (1995) Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. Estados Unidos de América: Prentice Hall.

Del Valle, E. (1986) Apuntes de Introducción a los Métodos Geofísicos de Exploración. México: Facultad de Ingeniería.

HoThu, H., Mita, A. Damage Location Index of Shear Structures Based on Changes in First Two Natural Frequencies. *Journal of Structures* (2014) Volume (2014).

Ivanovic, S., Trifunac M., Todorovska M. (2000) Ambient Vibration Tests of Structures- A Review. *Journal of Earthquake Technology*, 37(4) 165-197.

Murià-Vila D., Aldama B., Loera S., (2010). Alerta estructural para edificios instrumentados. *Revista Digital Universitaria* 11 (01) pp. 3-16.

Nakamura, Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 10(1), 25-33.

Nakamura, Y. (2000) Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications. *Procc. 12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand

Nakamura, Y. (2008) On the H/V Spectrum. *Procc. 14th World Conference on Earthquake Engineering*, China.

Oliver, X., Agelet C., (2000) Mecánica de medios continuos para ingenieros. Ediciones UPC: España

Polikar, R. (1996). The wavelet tutorial. Second Edition Part I.

Rodríguez, M. (2005) Análisis Modal Operacional: Teoría y Práctica. España: Escuela Superior de Ingenieros

Weaver, R. (2005). Information from Seismic Noise. *Science*, 307(5715), 1568-1569.

Varadan, V.K., Ma, Y. & Varadan, V.V. Scattering and Attenuation of Elastic Waves in Random Media PAGEOPH (1989) Volume 131(4), pp 577–603

9. Anexo

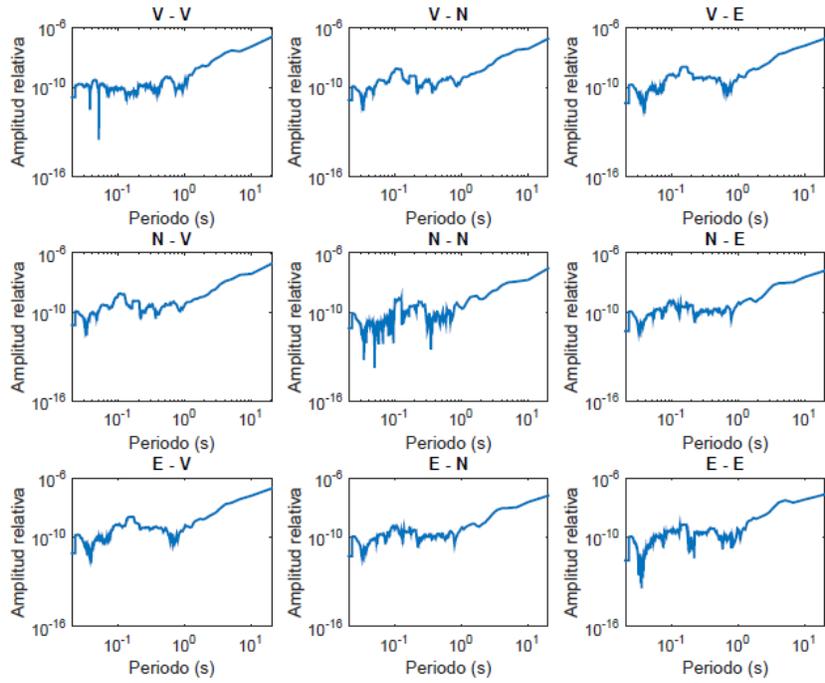


Figura 9.01. Deformación antes de daño. Punto 1, P1.

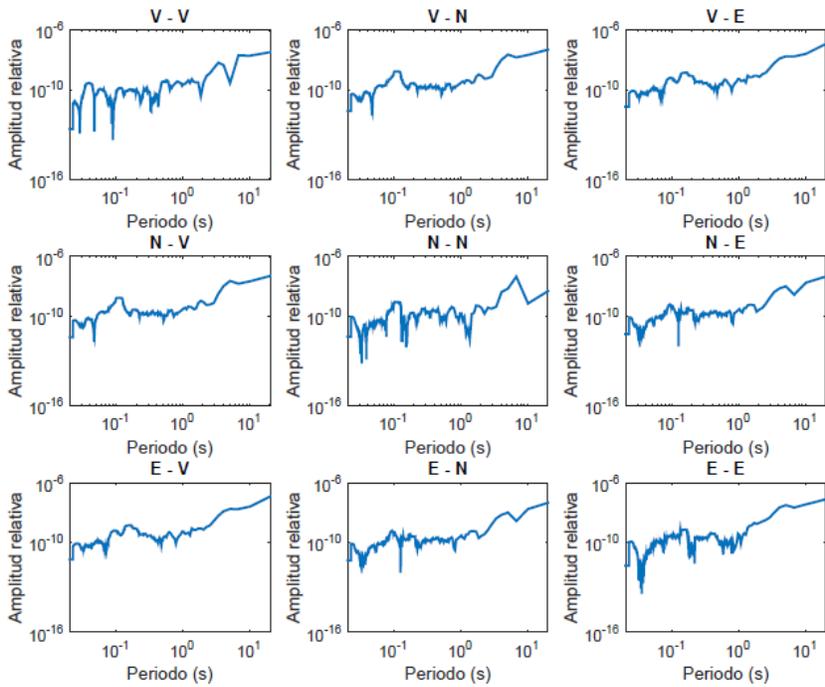


Figura 9.02. Deformación antes de daño. Punto 2, P1.

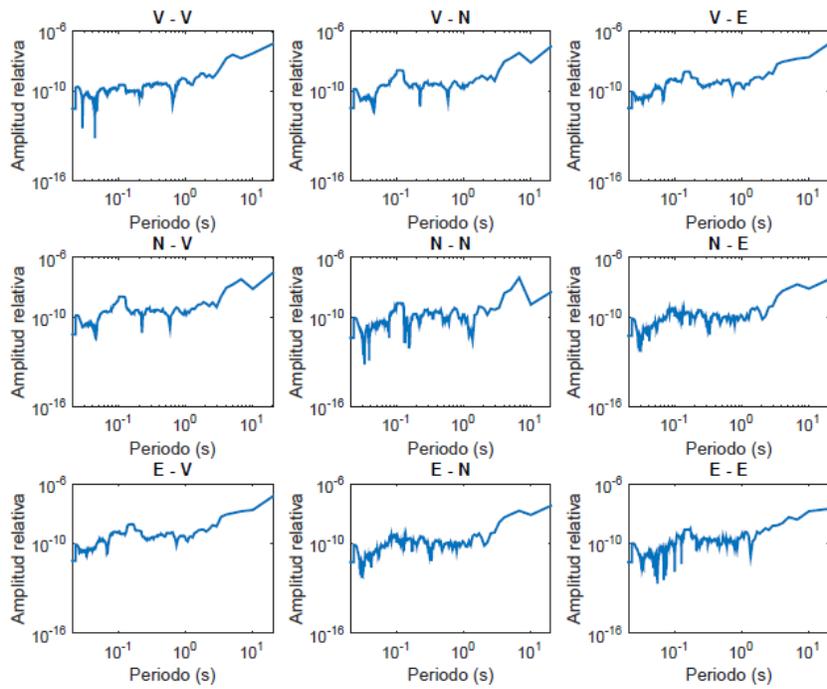


Figura 9.03. Deformación antes de daño. Punto 3, P1.

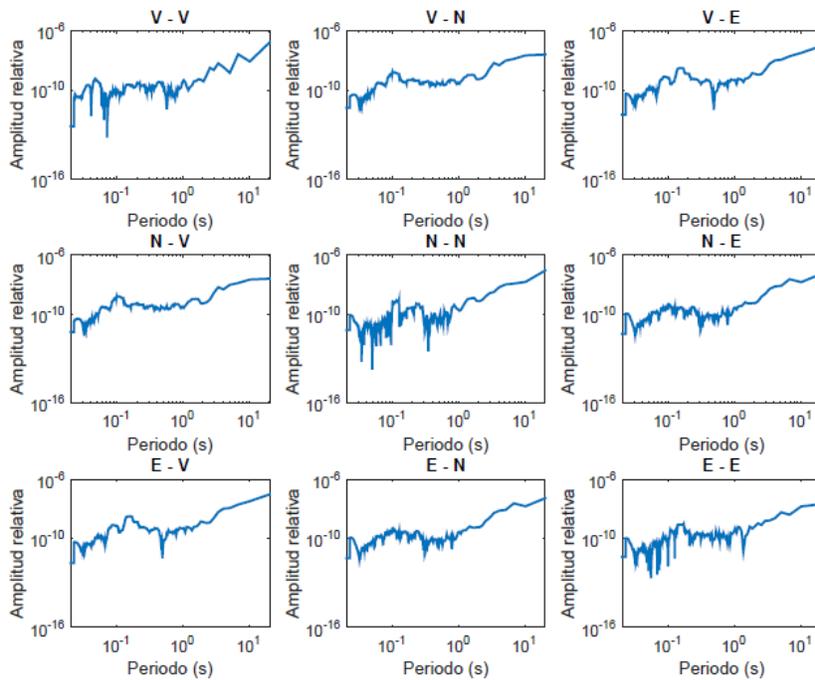


Figura 9.04. Deformación antes de daño. Punto 4, P1.

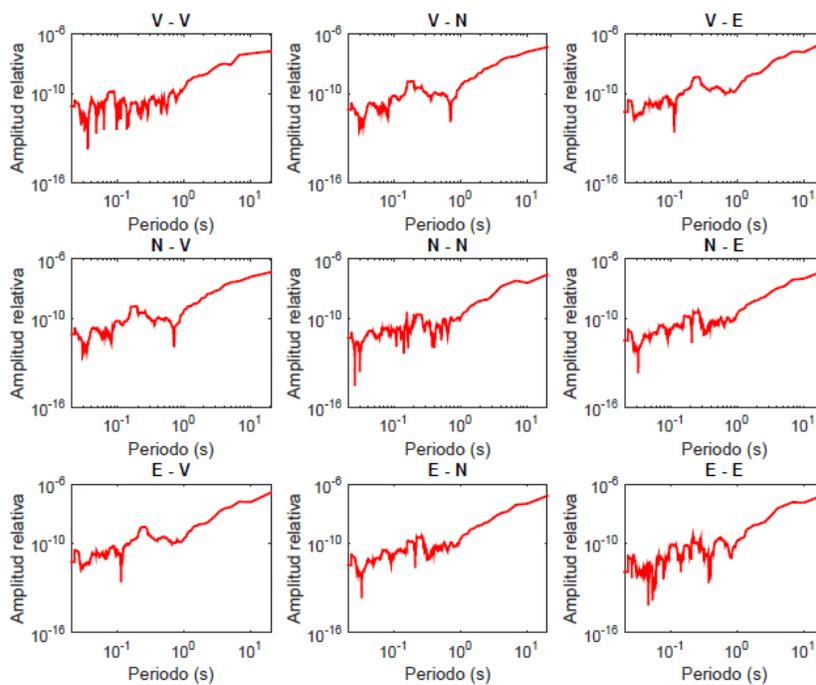


Figura 9.05. Deformación después de daño. Punto 1, P1.

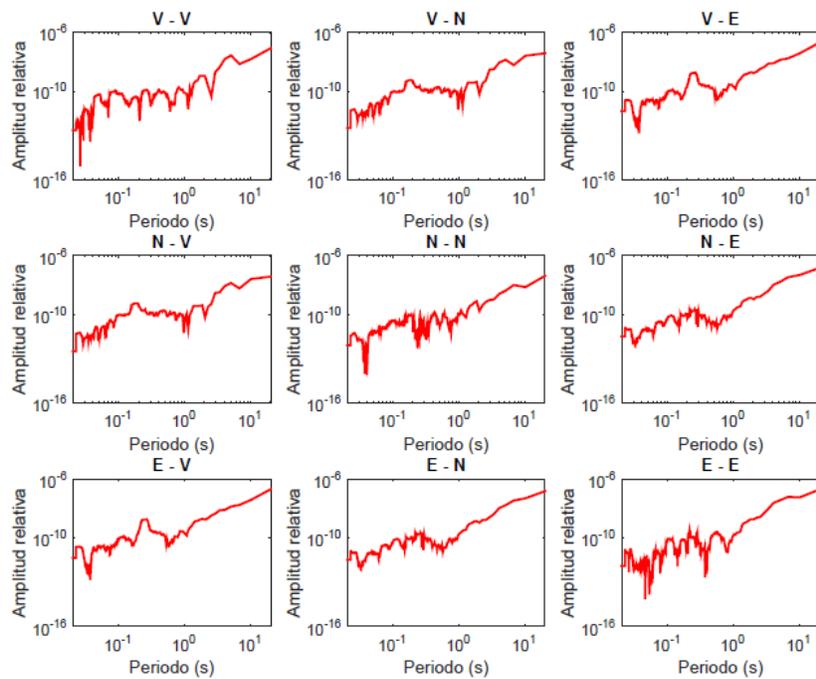


Figura 9.06. Deformación después de daño. Punto 2, P1.

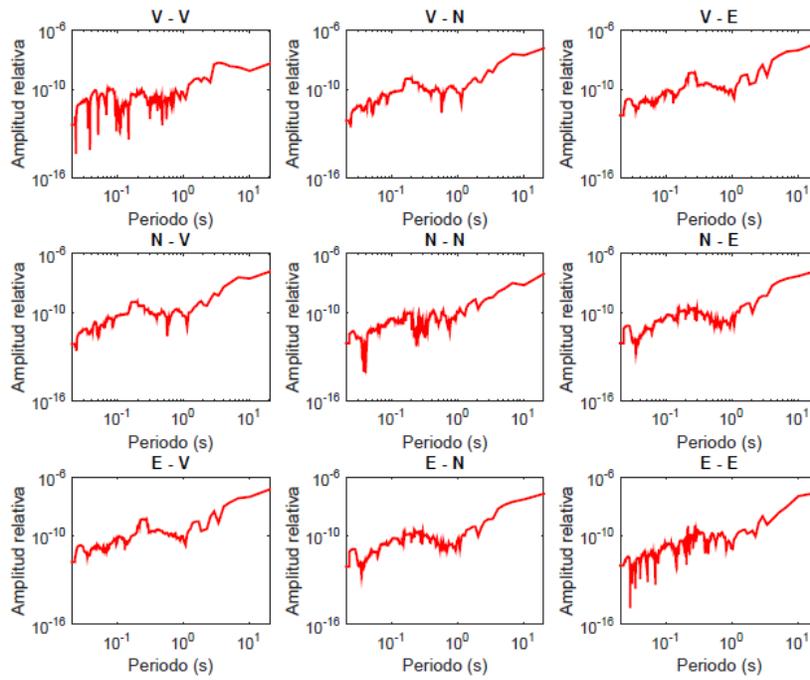


Figura 9.07. Deformación después de daño. Punto 3, P1.

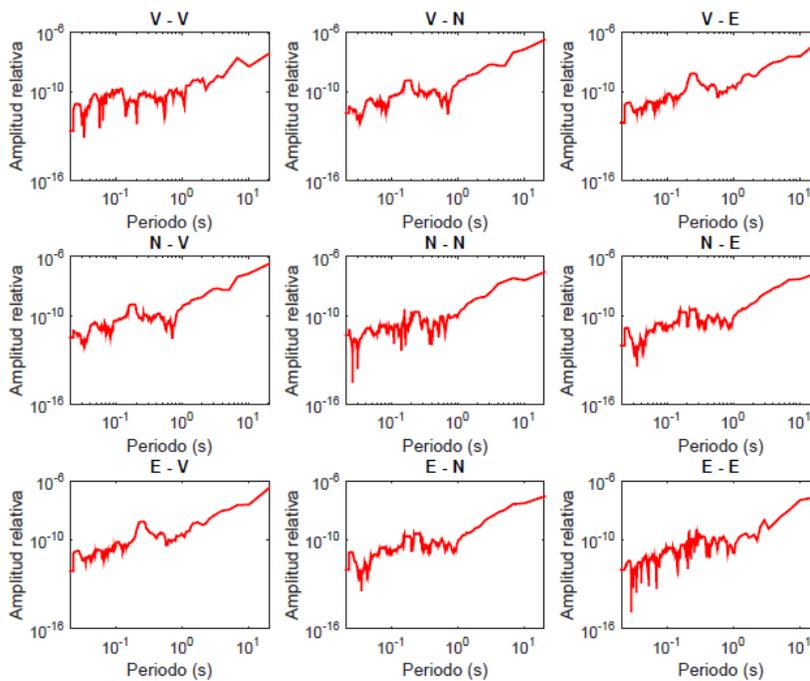


Figura 9.08. Deformación después de daño. Punto 4, P1.

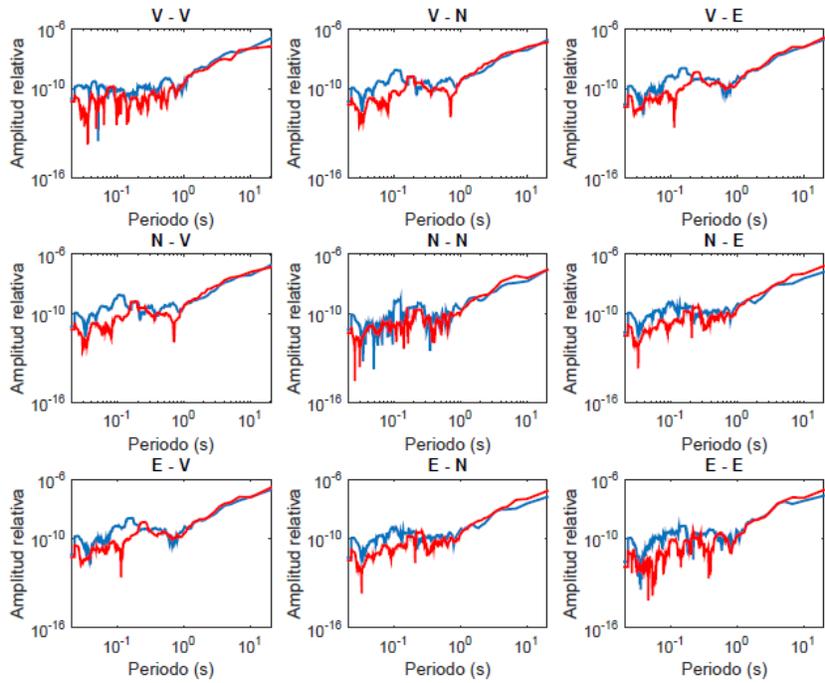


Figura 9.09. Deformación punto 1, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

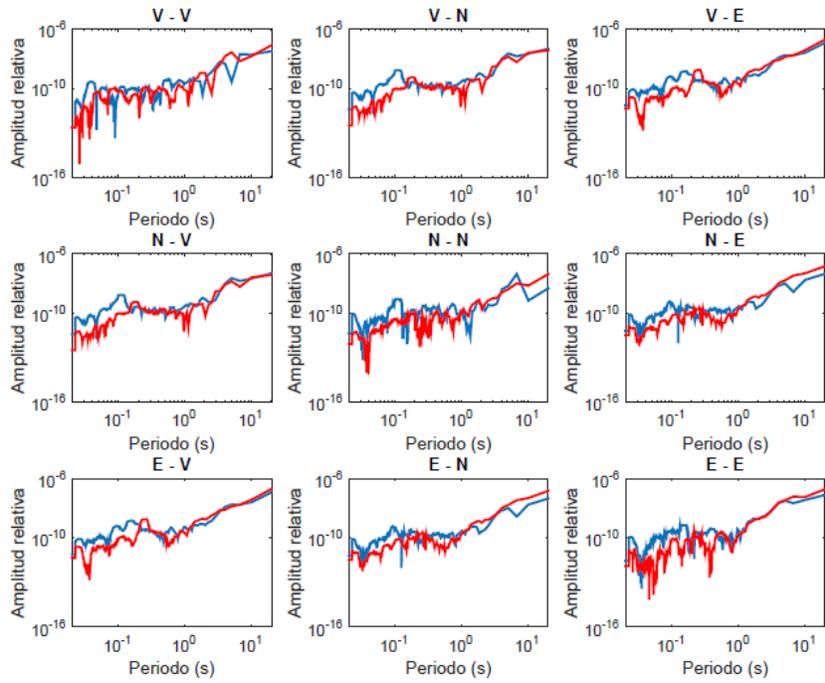


Figura 9.10. Deformación punto 2, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

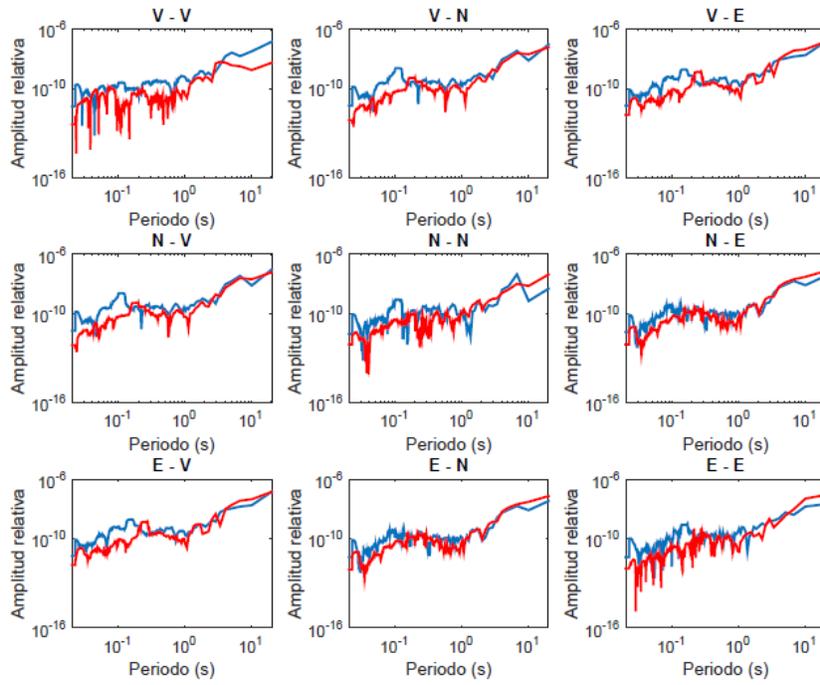


Figura 9.11. Deformación punto 3, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

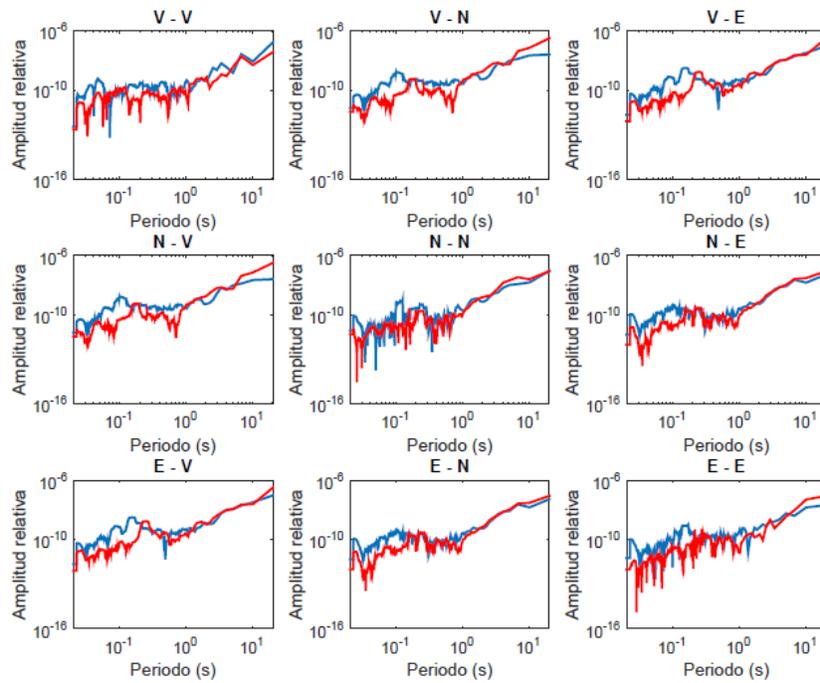


Figura 9.12. Deformación punto 4, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

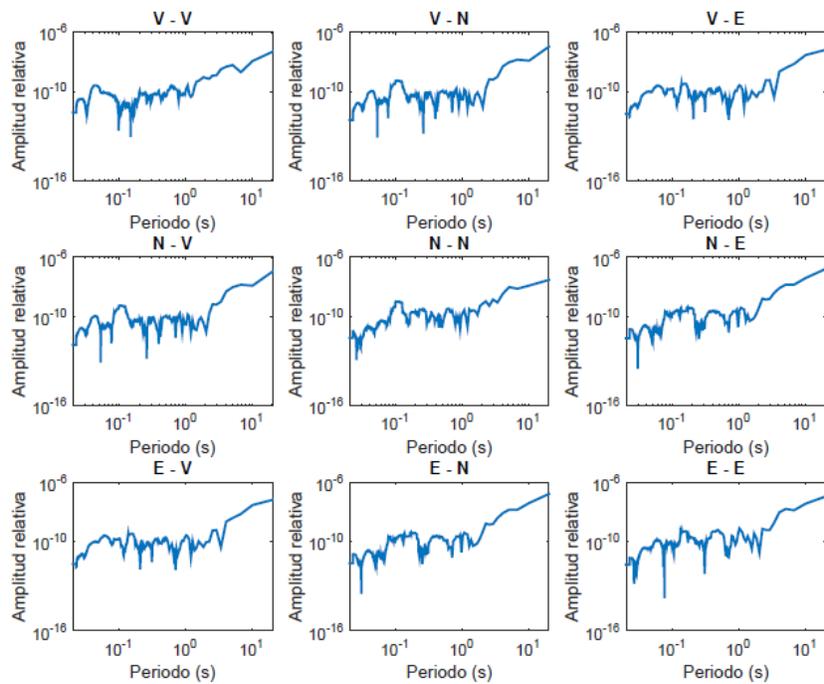


Figura 9.13. Deformación antes de daño. Punto 1, P2.

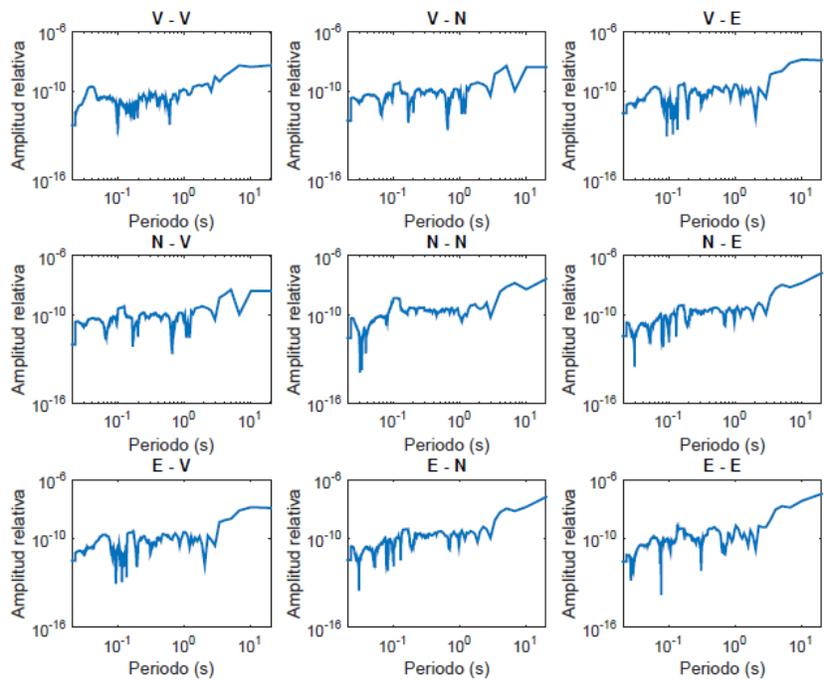


Figura 9.14. Deformación antes de daño. Punto 2, P2.

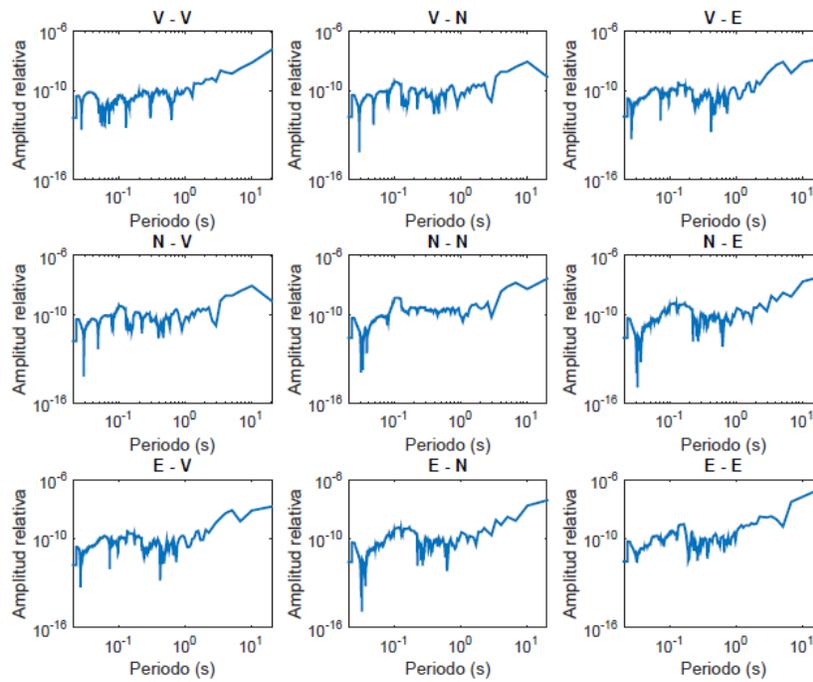


Figura 9.15. Deformación antes de daño. Punto 3, P2.

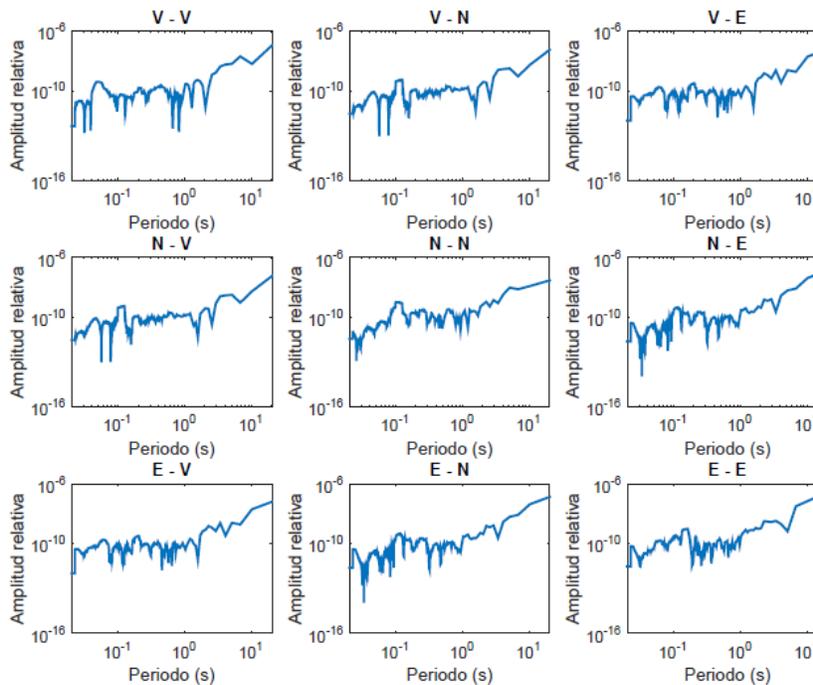


Figura 9.16. Deformación antes de daño. Punto 4, P2.

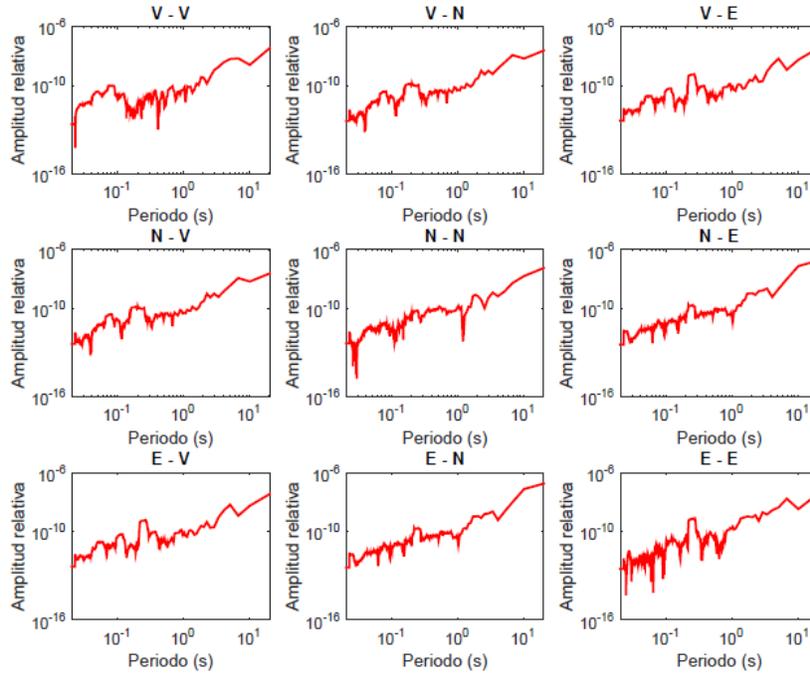


Figura 9.17. Deformación después de daño. Punto 1, P2.

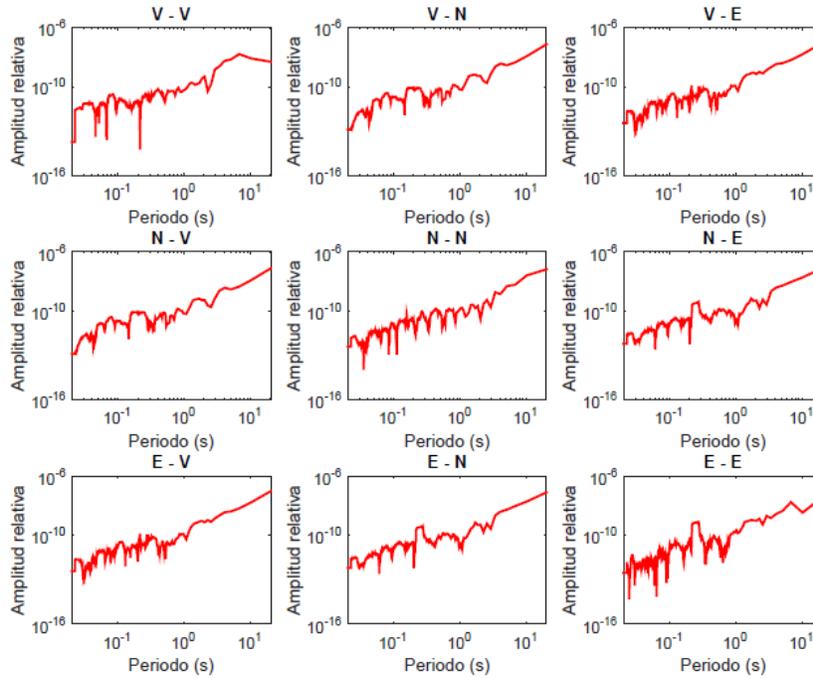


Figura 9.18. Deformación después de daño. Punto 2, P2.

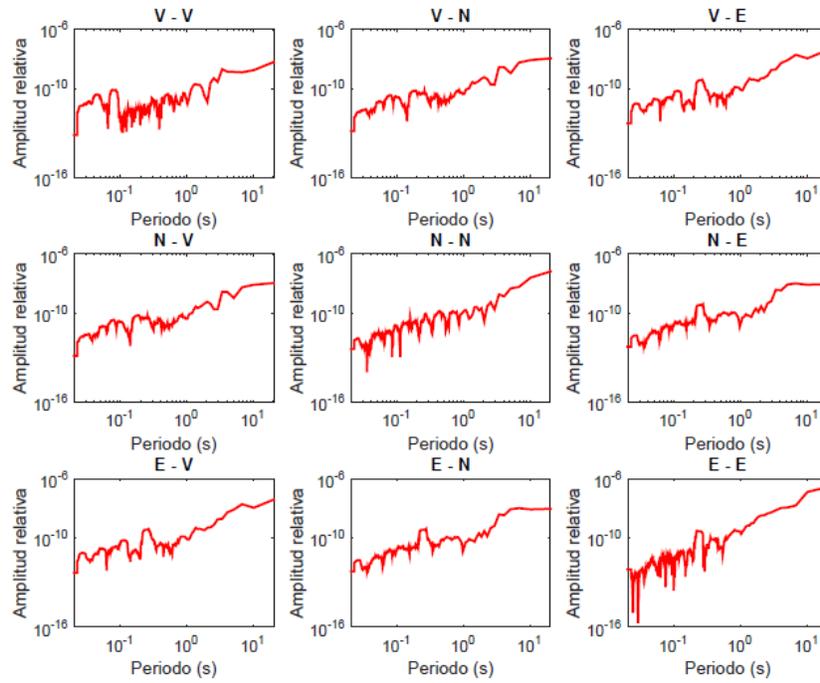


Figura 9.19. Deformación después de daño. Punto 3, P2.

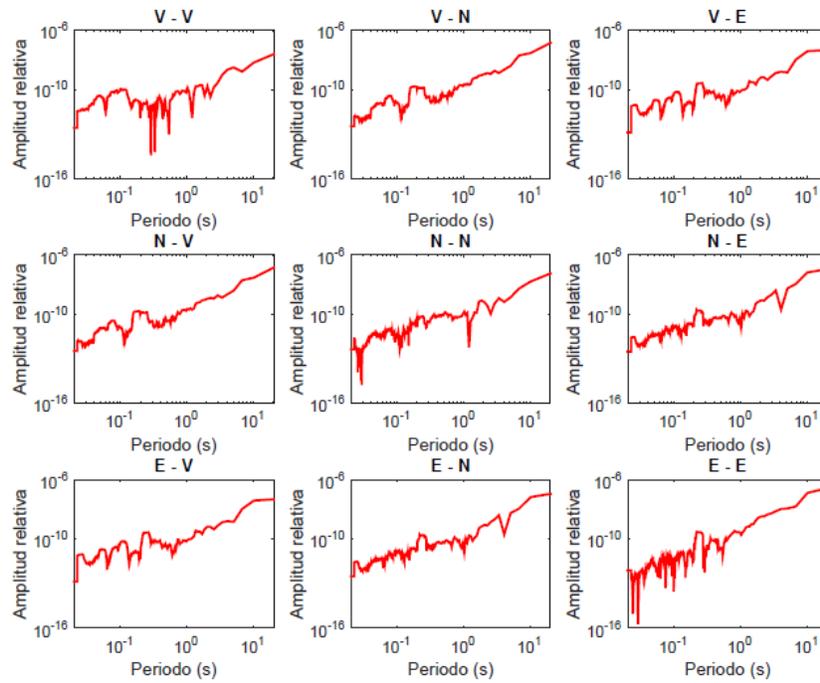


Figura 9.20. Deformación después de daño. Punto 4, P2.

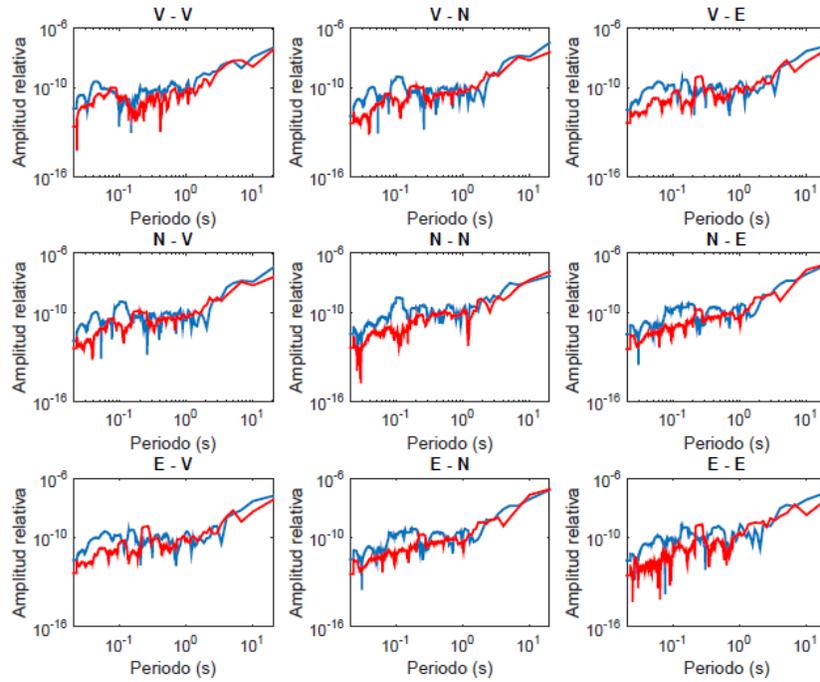


Figura 9.21. Deformación punto 1, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

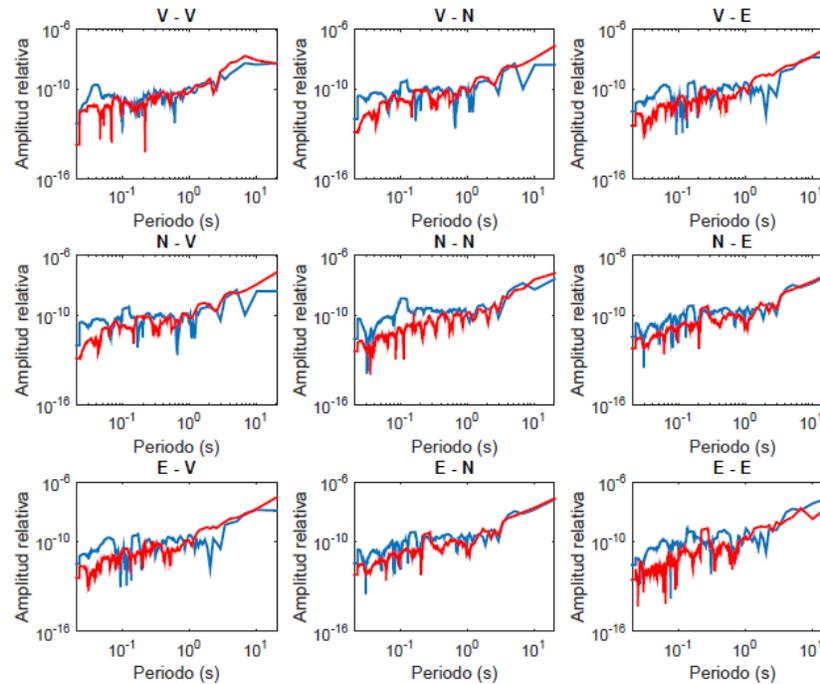


Figura 9.22. Deformación punto 2, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

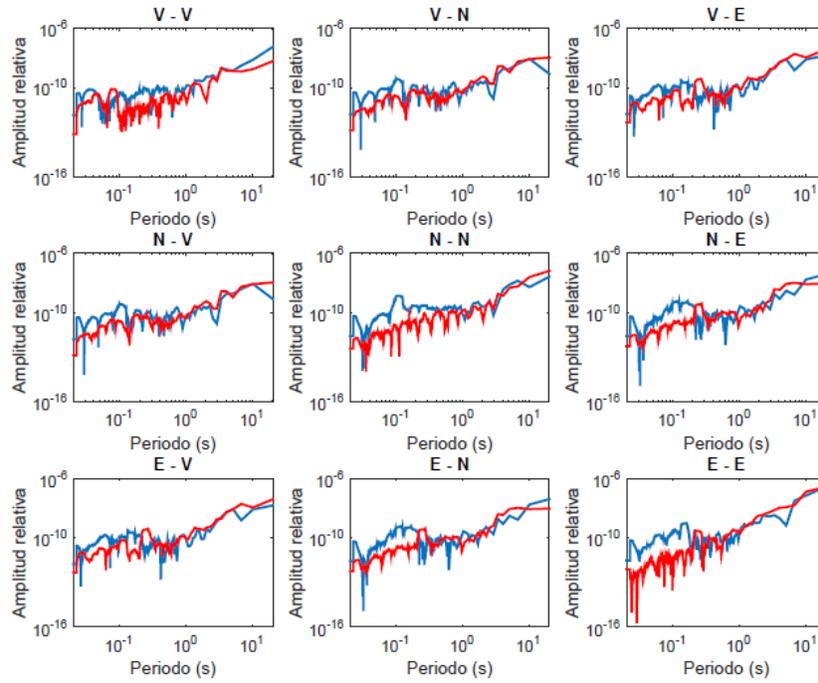


Figura 9.23. Deformación punto 3, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

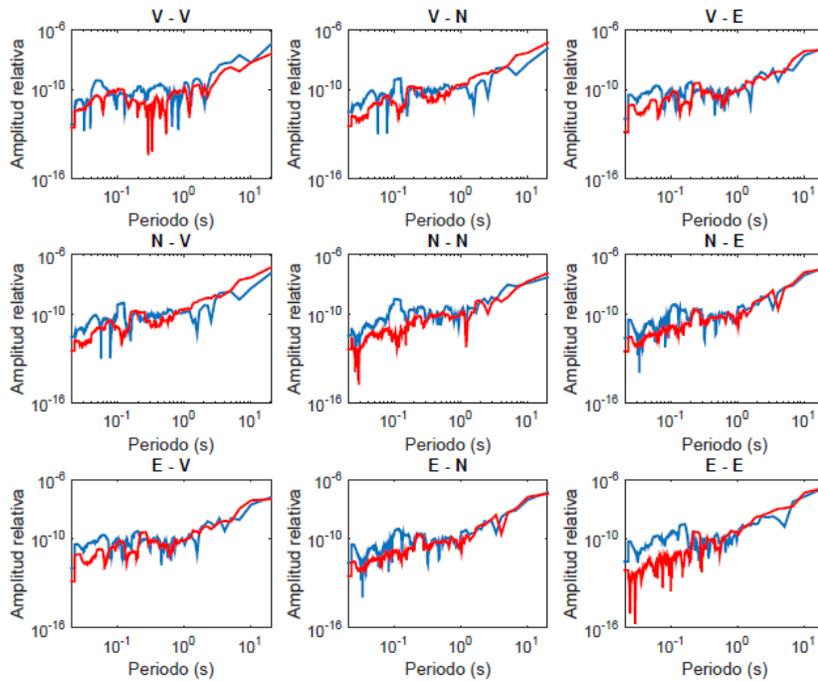


Figura 9.24. Deformación punto 4, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

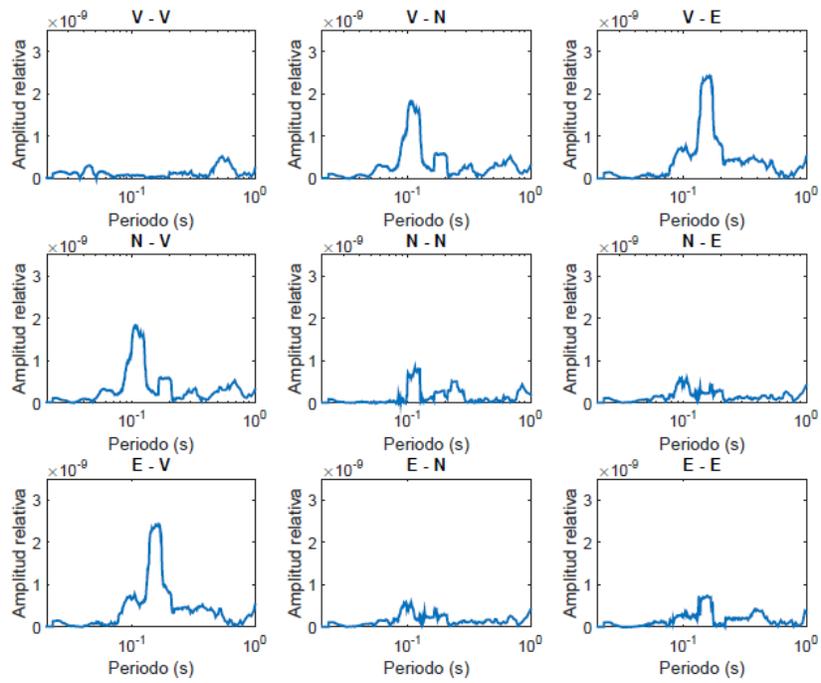


Figura 9.25. Deformación antes de daño en el punto 1, P1.

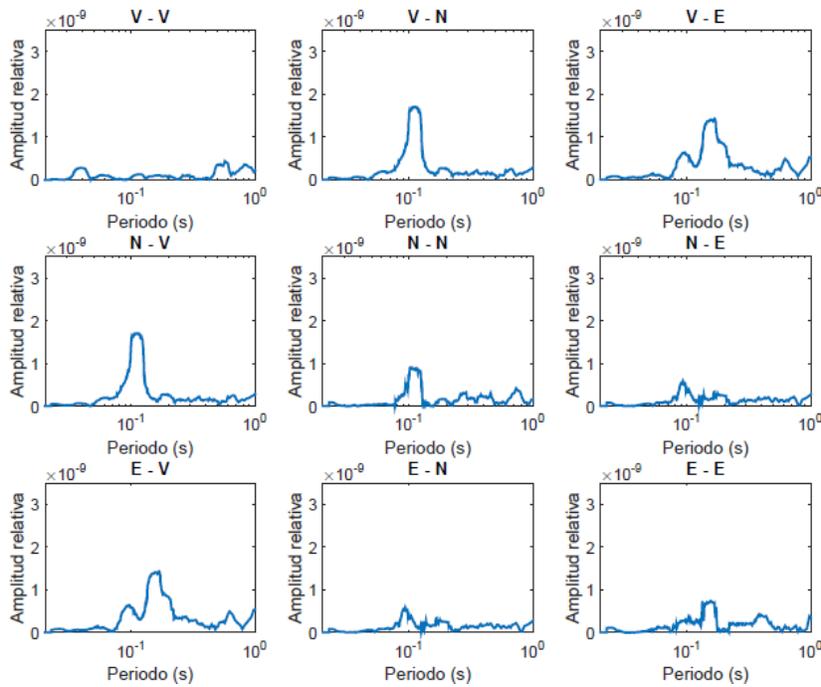


Figura 9.26. Deformación antes de daño en el punto 2, P1.

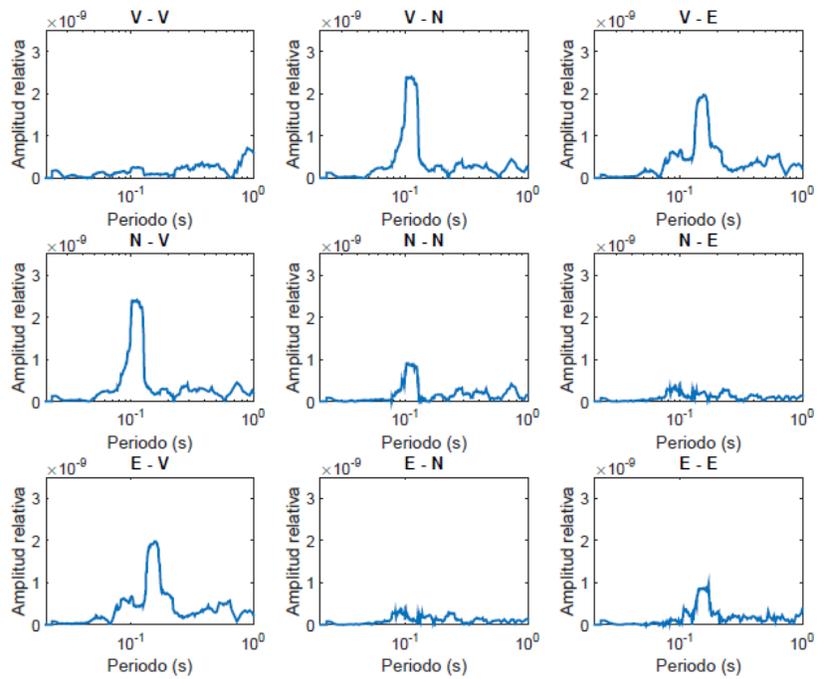


Figura 9.27. Deformación antes de daño en el punto 3, P1.

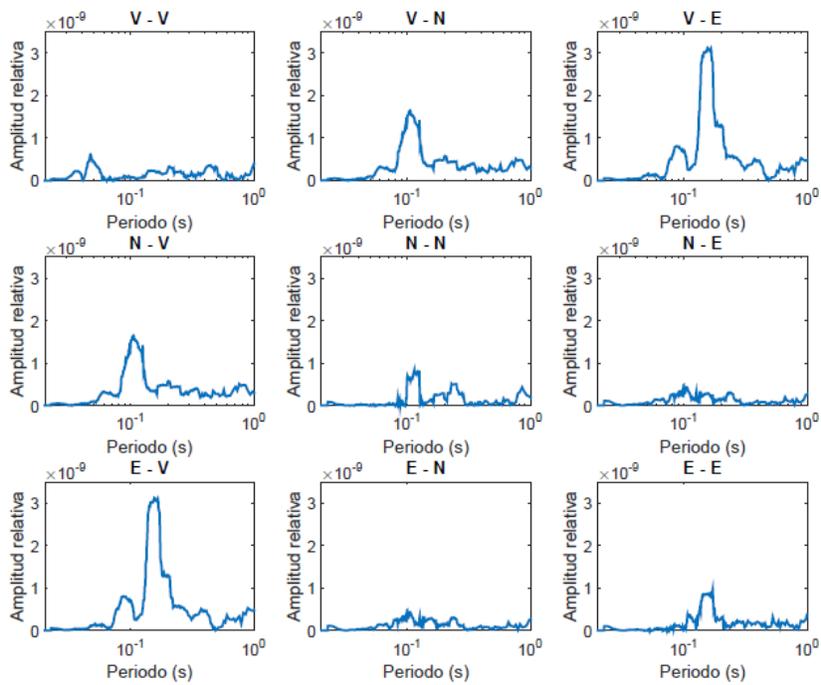


Figura 9.28. Deformación antes de daño en el punto 4, P1.

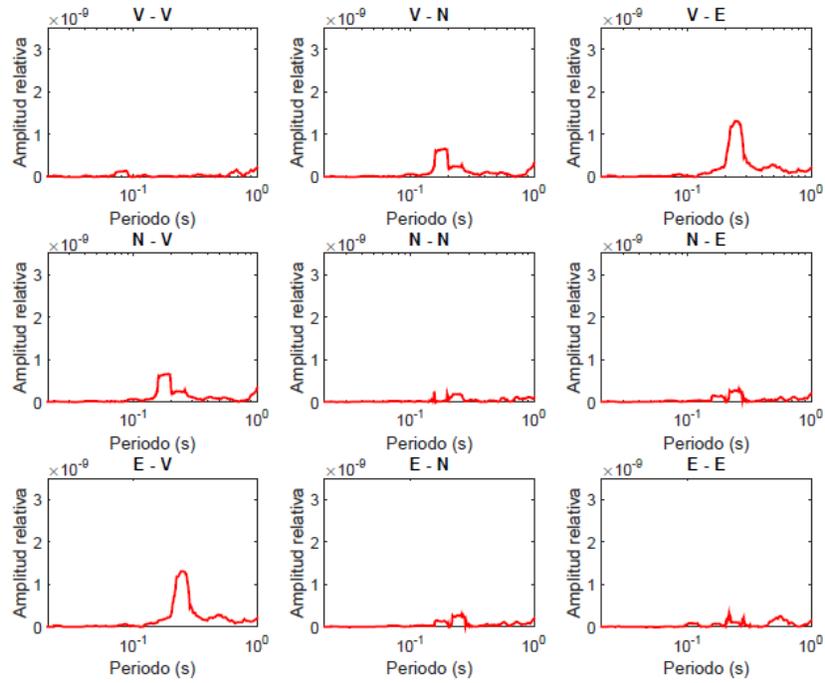


Figura 9.29. Deformación después de daño en el punto 1, P1.

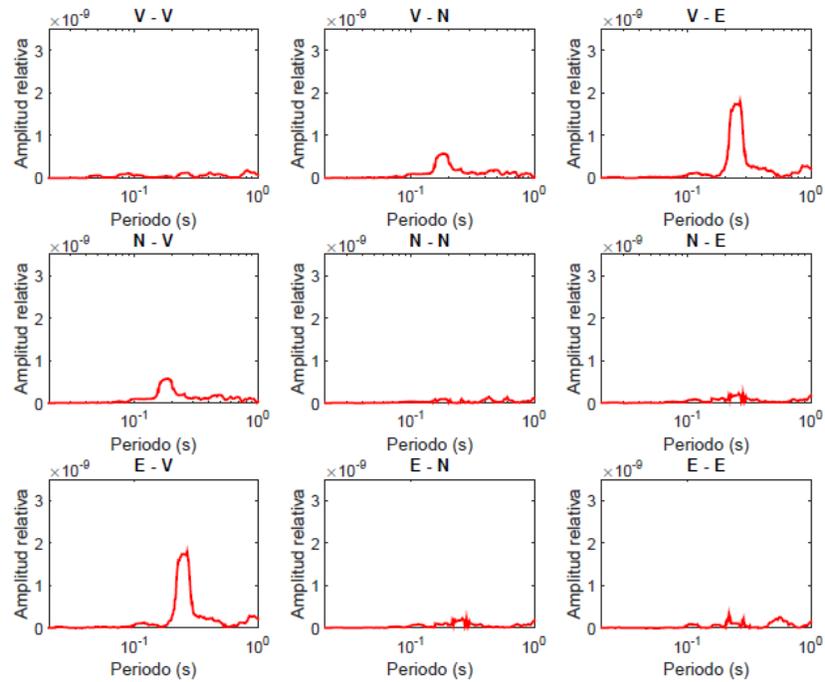


Figura 9.30. Deformación después de daño en el punto 2, P1.

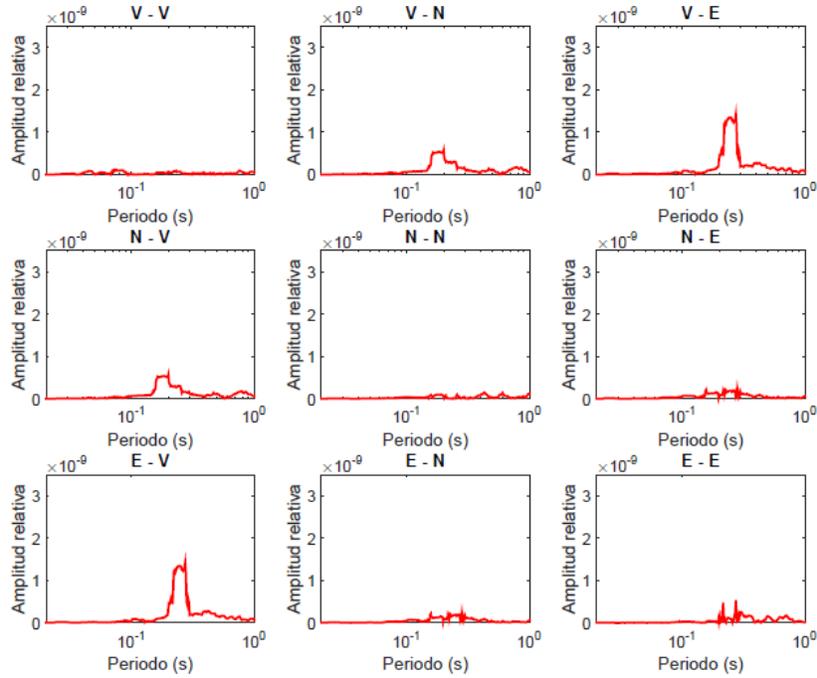


Figura 9.31. Deformación después de daño en el punto 3, P1.

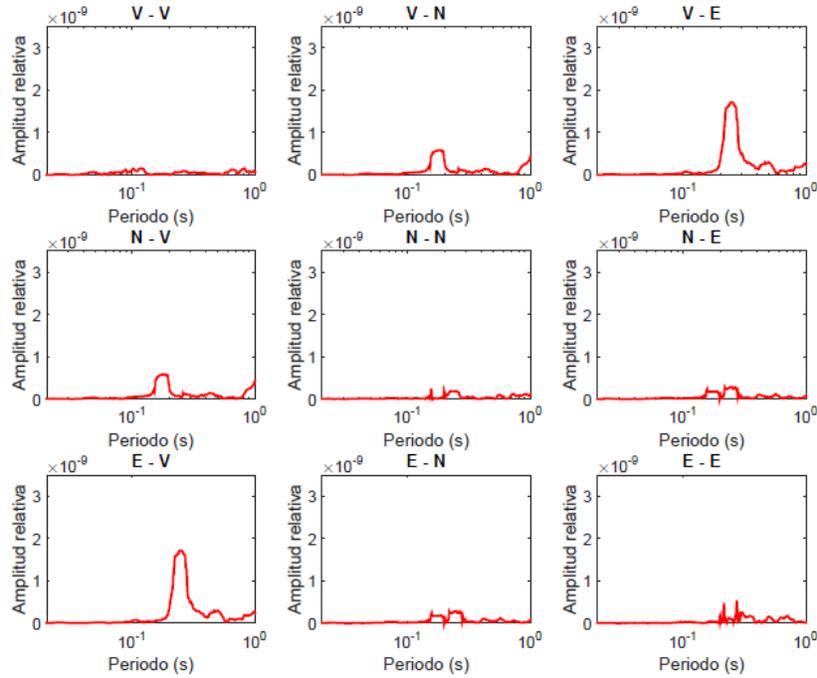


Figura 9.32. Deformación después de daño en el punto 4, P1.

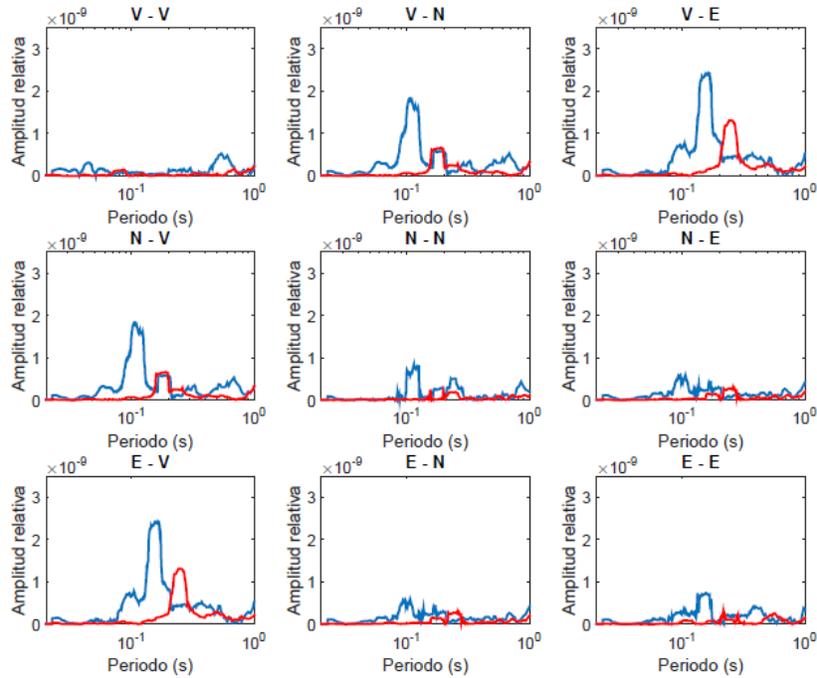


Figura 9.33. Deformación en el punto 1, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

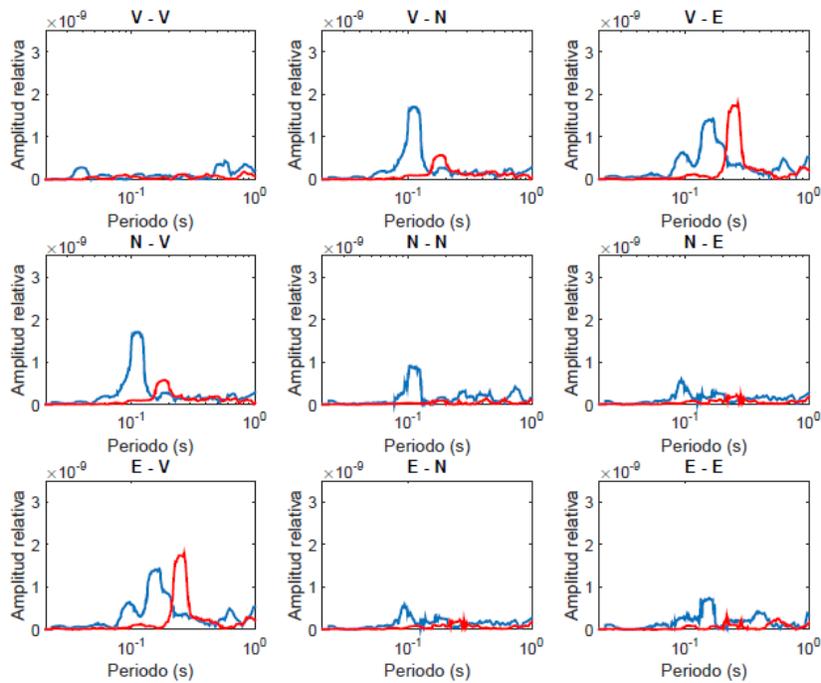


Figura 9.34. Deformación en el punto 2, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

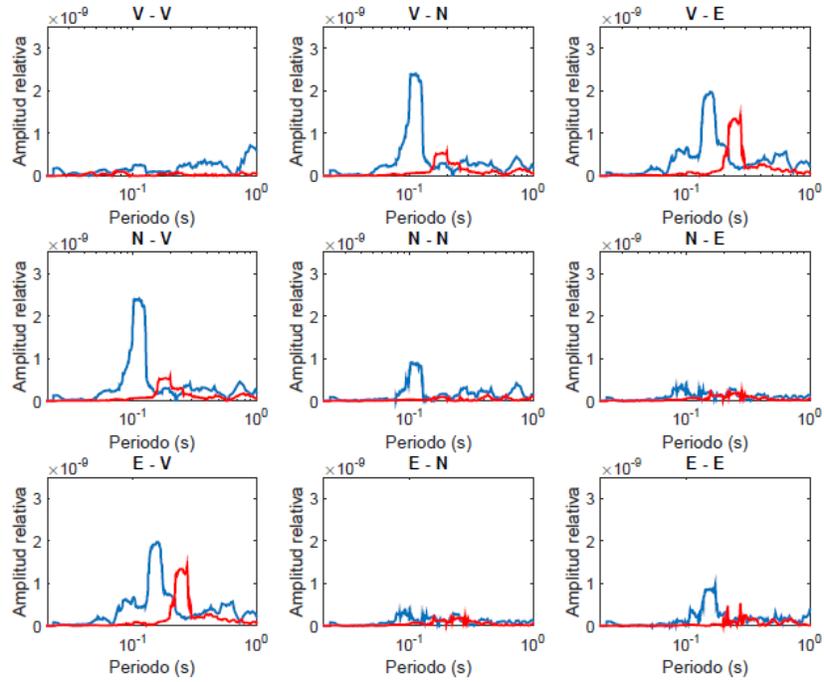


Figura 9.35. Deformación en el punto 3, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

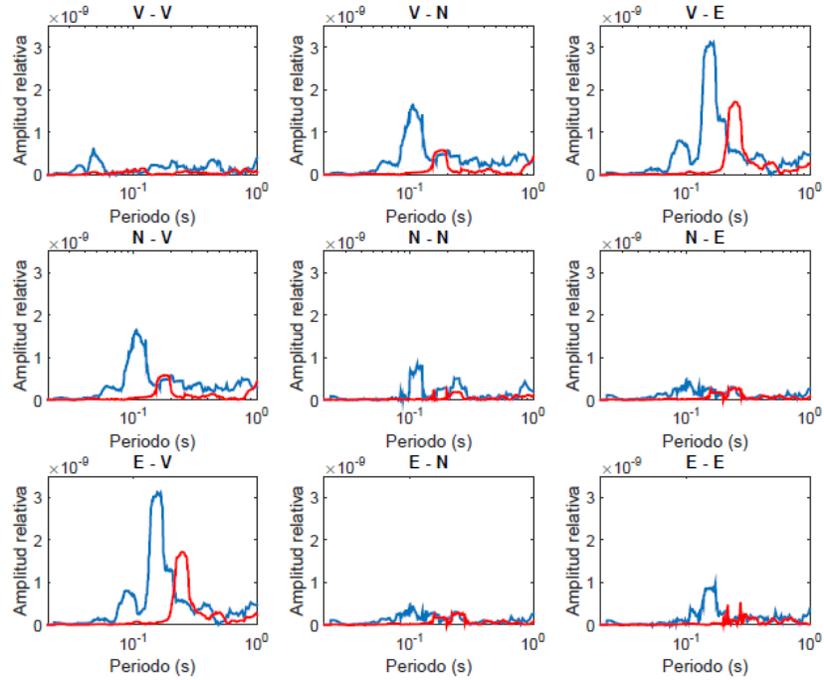


Figura 9.36. Deformación en el punto 4, P1. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

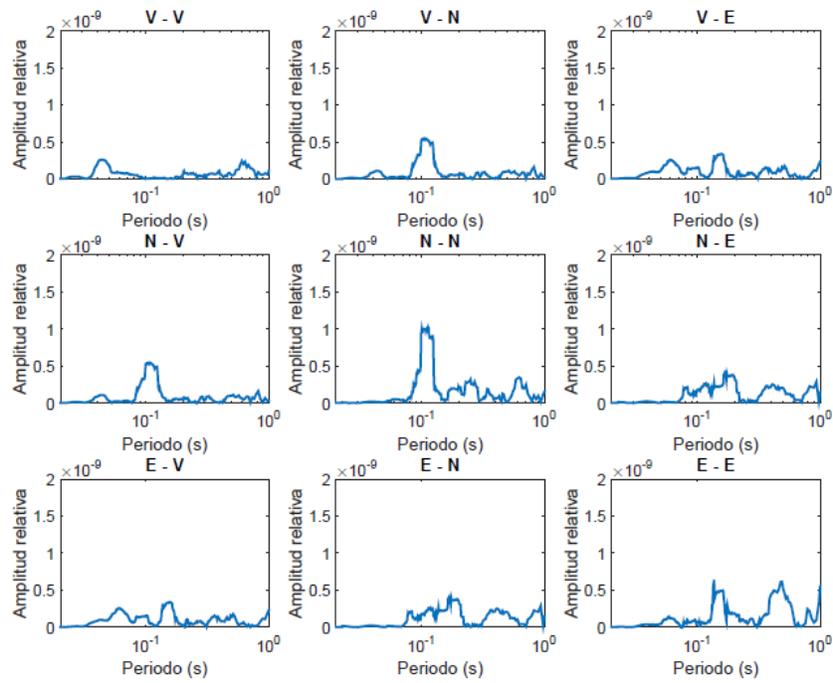


Figura 9.37. Deformación antes de daño en el punto 1, P2.

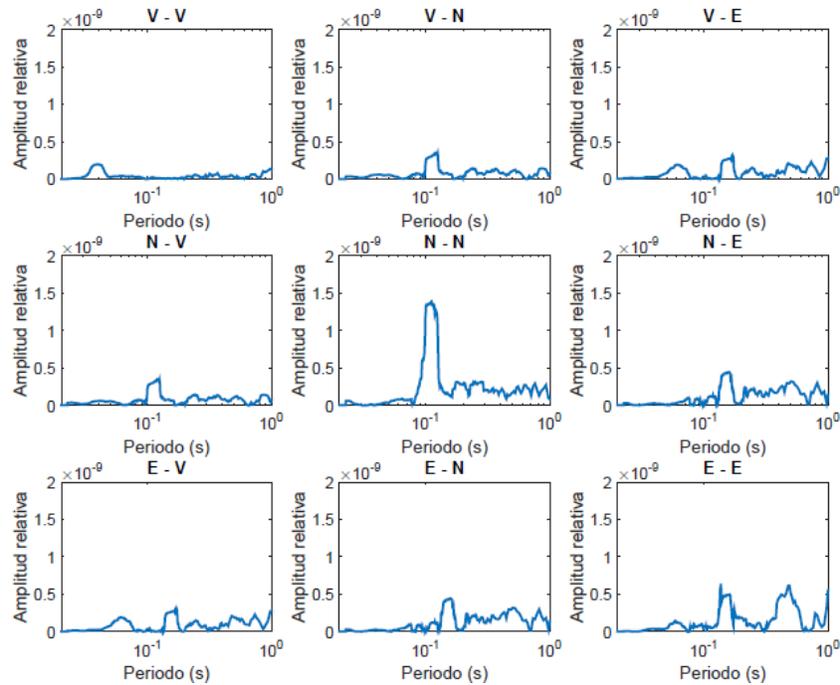


Figura 9.38. Deformación antes de daño en el punto 2, P2.

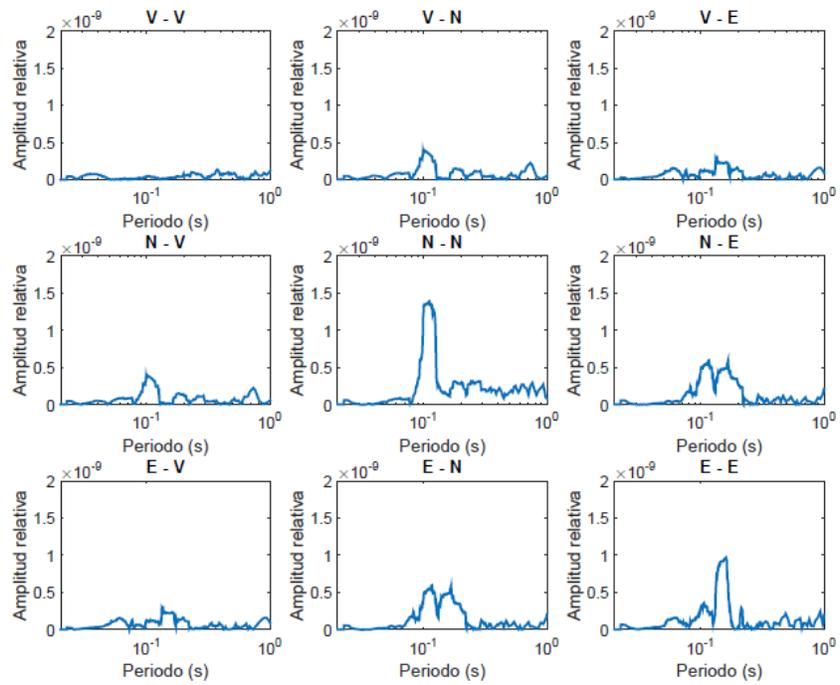


Figura 9.39. Deformación antes de daño en el punto 3, P2.

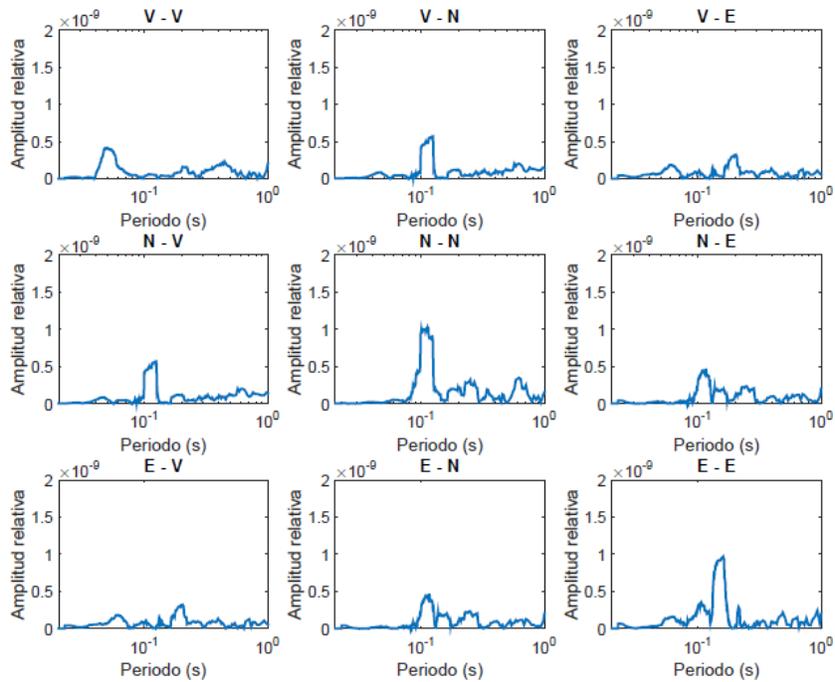


Figura 9.40. Deformación antes de daño en el punto 4, P2.

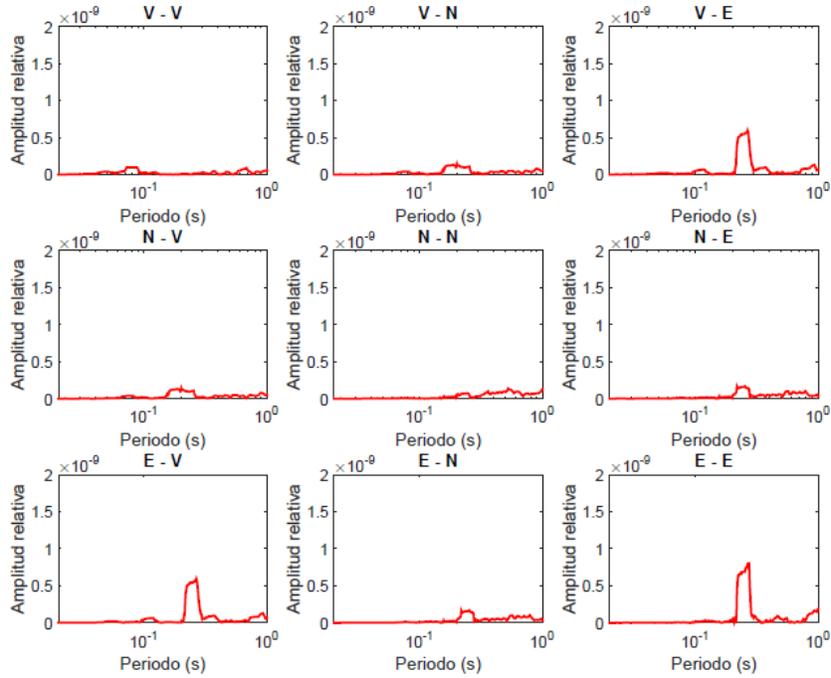


Figura 9.41. Deformación después de daño en el punto 1, P2.

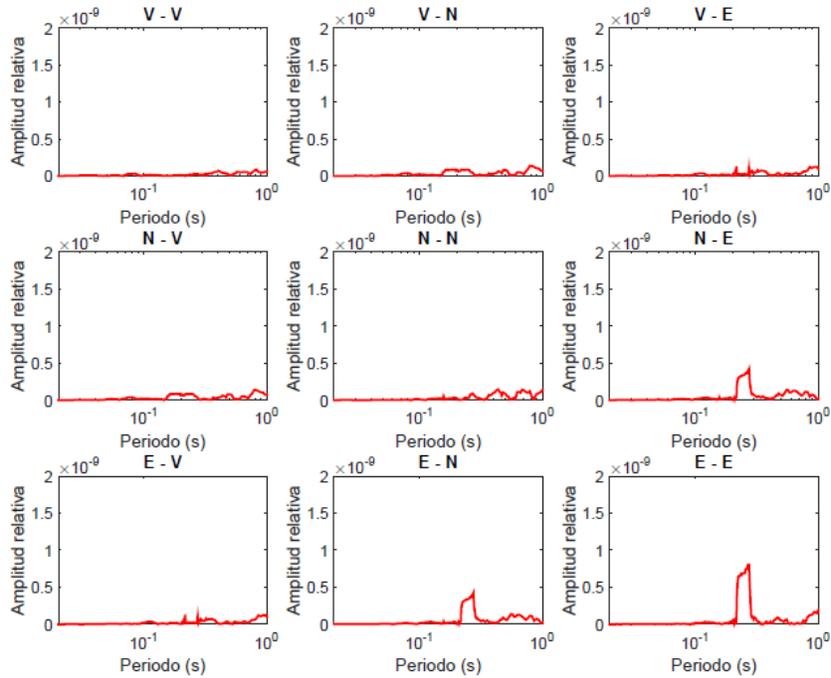


Figura 9.42. Deformación después de daño en el punto 2, P2.

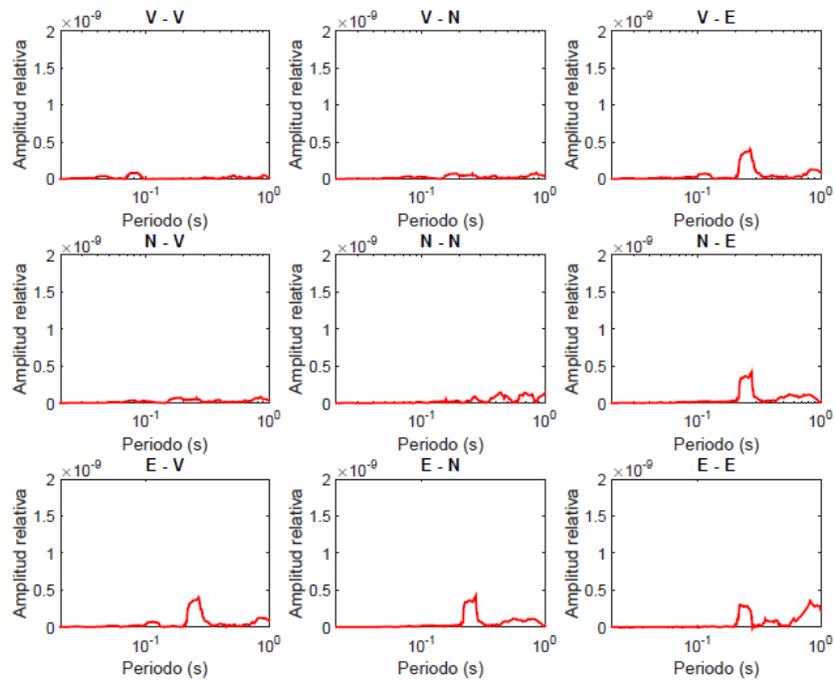


Figura 9.43. Deformación después de daño en el punto 3, P2.

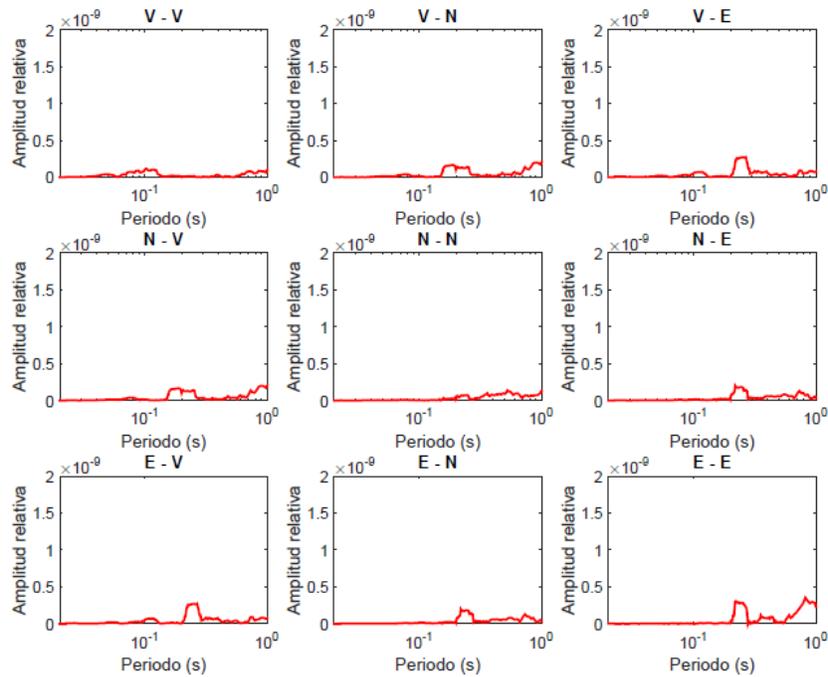


Figura 9.44. Deformación después de daño en el punto 4, P2.

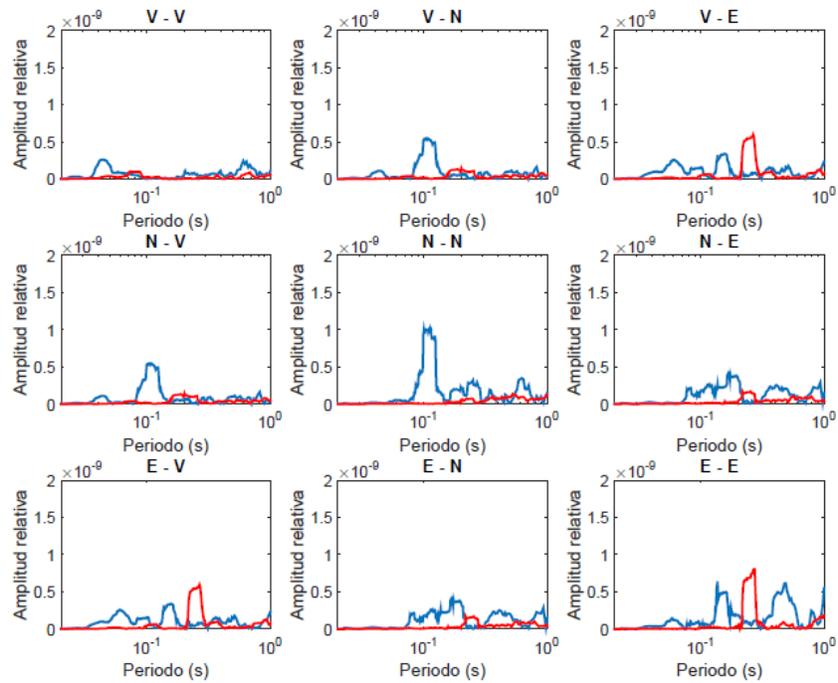


Figura 9.45. Deformación en el punto 1, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

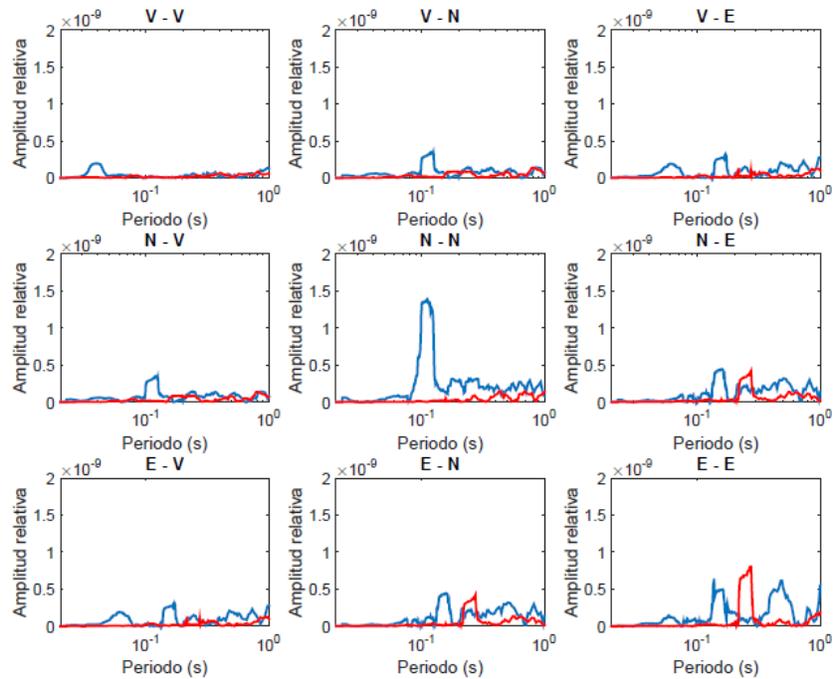


Figura 9.46. Deformación en el punto 2, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

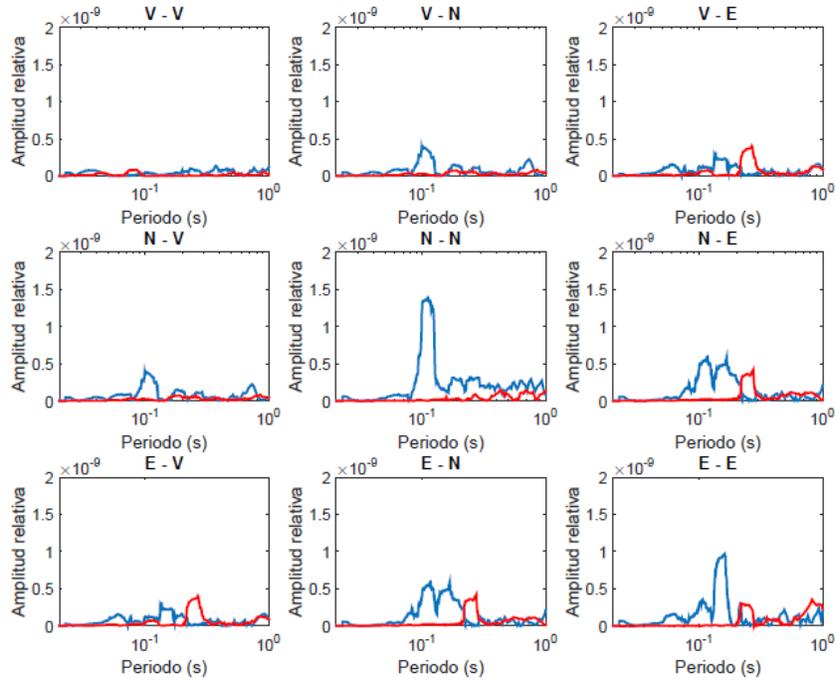


Figura 9.47. Deformación en el punto 3, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.

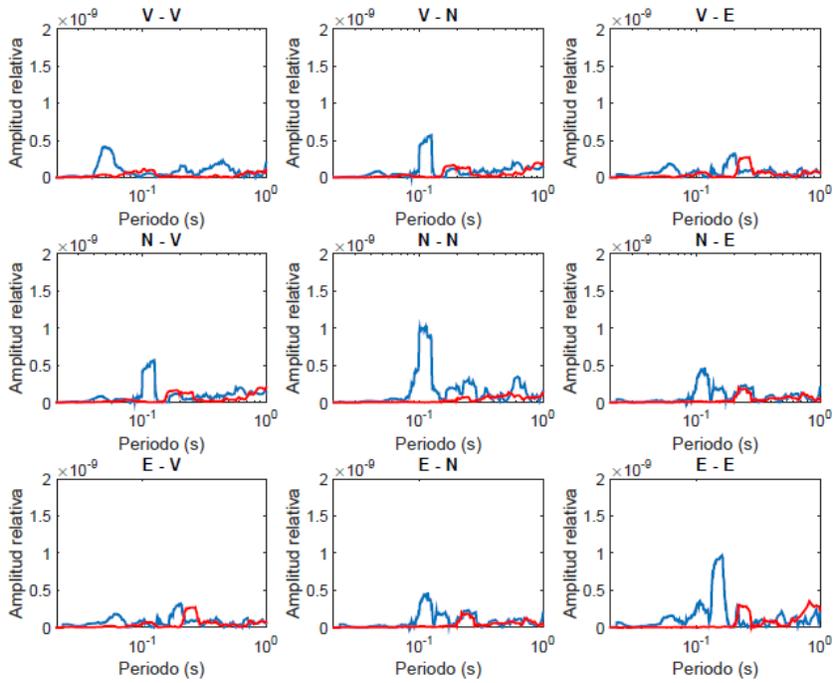


Figura 9.48. Deformación en el punto 4, P2. Estado inicial en azul, estado final en rojo.