

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE DAÑO EN
EDIFICACIONES CON IRREGULARIDAD TORSIONAL
MEDIANTE EL MONITOREO DE LA SALUD
ESTRUCTURAL”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

ELVIS DANIEL GUIZADO CACERES

ID: 0009-0006-4932-6695

ASESOR:

Dr. MIGUEL AUGUSTO DÍAZ FIGUEROA

ID: 0000-0002-9421-4194

LIMA - PERÚ

2025

Dedicatoria

A mi familia por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

A mi querida familia por el apoyo brindado durante estos años. En especial a mi madre Guillerma por su paciencia, ejemplo y motivación. A Sofía Cupe por su apoyo incondicional y compañía.

A mis maestros de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería por brindarme una formación académica y profesional de calidad.

Al Laboratorio de Estructuras del CISMID por brindarme las facilidades y la oportunidad de desarrollar la parte experimental de la presente investigación.

A mi asesor el Dr. Miguel Augusto Díaz Figueroa, por sus enseñanzas y apoyo en la elaboración de la presente tesis.

A mis amigos del CISMID por su apoyo y recomendaciones en la parte teórica y experimental de esta investigación.

Al Dr. Edison Moscoso y al Ing. Julián Palacios por sus consejos durante el desarrollo de la presente investigación.

Un agradecimiento especial al Programa Presupuestal 0068, Programa para la Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres – PRE-VAED, por el financiamiento para el desarrollo de los ensayos experimentales en mesa vibradora.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract	5
Prólogo	6
Lista de tablas	7
Lista de figuras	8
Lista de símbolos y siglas	13
Capítulo I: Introducción	19
1.1 Generalidades	19
1.2 Descripción del problema de investigación	20
1.2.1 Problema general	21
1.3 Objetivo del estudio	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
1.4 Metodología	22
1.5 Antecedentes referenciales	23
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	26
2.1 Marco teórico	26
2.1.1 Irregularidad torsional	26
2.1.1.1 Grado de irregularidad torsional (G_{it})	26
2.1.1.2 Fuentes de irregularidad torsional en edificaciones	27
2.1.2 Análisis estructural	28
2.1.2.1 Modelos no lineales de los elementos estructurales	28
2.1.2.2 Consideraciones del modelo	43
2.1.2.3 Análisis estático no lineal	43
2.1.2.4 Análisis dinámico no lineal tiempo historia	43
2.1.3 Métodos de procesamiento de señales	44
2.1.3.1 Integración numérica: método de la aceleración promedio	44
2.1.3.2 Diferencias finitas	45
2.1.3.3 Análisis de Fourier	46
2.1.3.4 Transformada de ondículas	47

2.1.4	Métricas de rendimiento de modelos de predicción	49
2.1.4.1	Error cuadrático medio	49
2.1.4.2	Raíz del error cuadrático medio	50
2.1.4.3	Coeficiente de determinación	50
2.2	Marco conceptual	50
2.2.1	Centro de rigidez	50
2.2.2	Centro de masa	51
2.2.3	Excentricidad	51
2.2.4	Monitoreo de la salud estructural	51
2.2.5	Respuesta sísmica de un edificio	51
2.2.6	Curva de capacidad	51
2.2.7	Coeficiente sísmico	51
2.2.8	Machine learning	51
2.2.9	Datos de entrenamiento y de prueba de un modelo de machine learning	52
Capítulo III:	Simulación numérica	53
3.1	Registros para la simulación numérica	53
3.1.1	Corrección de registros	53
3.1.1.1	Corrección de registros por filtro pasa banda	53
3.1.2	Registros sísmicos corregidos	53
3.2	Definición de las características de los modelos	62
3.3	Definición de parámetros estructurales y sísmicos	66
3.3.1	Parámetros estructurales	66
3.3.2	Parámetros sísmicos	67
3.3.3	Parámetros de respuesta sísmica	67
3.4	Análisis modal	68
3.5	Análisis no lineal tiempo historia	69
3.5.1	Configuraciones previas al análisis	69
3.5.2	Análisis dinámico y sistematización con Python	70
3.5.3	Resultados de interés y obtención de parámetros a partir de los análisis estáticos y dinámicos	72
3.6	Algoritmo de predicción	77
3.6.1	Algoritmo de machine learning para la predicción del grado de irregu- laridad torsional	77
3.6.1.1	Proceso de muestreo	77
3.6.1.2	Selección de modelo de predicción	79

Capítulo IV: Programa experimental	87
4.1 Configuración estructural de los especímenes	87
4.2 Esquema de monitoreo de especímenes	89
4.3 Registros sísmicos para los ensayos en la mesa vibradora	95
4.4 Procedimiento experimental	96
4.5 Resultados de los ensayos en mesa vibradora	97
4.5.1 Procedimiento del procesamiento de datos y resultados	97
4.5.1.1 Cálculo de aceleraciones relativas de la estructura	97
4.5.1.2 Aplicación de la integración numérica	97
4.5.1.3 Aplicación de la transformada de ondículas	98
4.5.1.4 Resultados de la respuesta estructural	99
Capítulo V: Desarrollo de la metodología	108
5.1 Cálculo de respuestas máximas a partir de un sensor	108
5.1.1 Modelo híbrido de predicción	110
5.1.2 Relación entre el G_{it} y los parámetros propuestos	112
5.2 Cálculo de respuestas máximas a partir de dos sensores	115
5.2.1 Resultados del cálculo de respuestas máximas	120
5.2.2 Aplicación para el cálculo de la historia de desplazamientos	124
5.2.2.1 Resultados del cálculo de la historia de desplazamientos y aceleraciones para una estructura con efectos de torsión	125
5.2.2.2 Curvas de histéresis para estructuras con irregularidad torsional	133
Capítulo VI: Discusión de resultados	136
6.1 Desarrollo de la metodología y base de datos	136
6.2 Evaluación del modelo de predicción	136
6.3 Validación experimental y ajuste del modelo	136
6.4 Relación entre el G_{it} y la respuesta estructural	137
6.5 Cálculo de respuestas a partir del monitoreo en dos puntos	137
Conclusiones	138
Recomendaciones	140
Referencias bibliográficas	141
Anexos	144

RESUMEN

La amenaza sísmica en el Perú hace esencial el monitoreo estructural de hospitales e instituciones educativas. Tradicionalmente, este se realiza en el centro de masa mediante acelerómetros, pero en estructuras con irregularidad torsional, la máxima respuesta sísmica no ocurre en ese punto debido a la excentricidad entre el centro de rigidez y el centro de masa. Esta investigación desarrolla una metodología para estimar el daño en edificaciones con irregularidad torsional a partir del monitoreo en su centro de masa. Se realizaron simulaciones numéricas y ensayos experimentales para formular un modelo predictivo de la respuesta máxima. Se analizaron 36 modelos estructurales simplificados con análisis dinámico no lineal, obteniendo un modelo que estima las distorsiones máximas con un error del 4.054 % y un coeficiente de determinación de 0.955. Luego, se realizaron ensayos en mesa vibradora con 8 especímenes, ajustando el modelo con los datos experimentales, reduciendo el error al 3.56 % y aumentando el coeficiente de determinación a 0.98. Se estableció una expresión matemática que relaciona la amplificación de la respuesta torsional con parámetros estructurales y sísmicos obtenidos del monitoreo. Además, se propuso y validó un método basado en datos de monitoreo de dos puntos en el techo, logrando estimaciones precisas con un error máximo del 9.22 % y un coeficiente de determinación de 0.929. Esta metodología permitirá evaluar con mayor precisión el estado de edificaciones con irregularidad torsional tras un sismo.

Palabras clave: Grado de irregularidad torsional, monitoreo de la salud estructural, distorsión máxima, simulación numérica, ensayos dinámicos

ABSTRACT

The seismic threat in Peru makes it essential to monitor the structural health of hospitals and educational buildings. Traditionally, this is done at the center of mass using accelerometers. However, in structures with torsional irregularity, the maximum seismic response does not occur at this point due to the eccentricity between the center of rigidity and the center of mass. This research develops a methodology to estimate damage in buildings with torsional irregularity by monitoring their seismic response at the center of mass. Numerical simulations and experimental tests were conducted to formulate a predictive model for the maximum response. A nonlinear dynamic analysis of 36 simplified structural models was performed, resulting in a model that estimates maximum distortions with a percentage mean square error of 4.054 % and a coefficient of determination of 0.955. Subsequently, shake table tests on 8 specimens were conducted, adjusting the model with experimental data, reducing the error to 3.56 %, and improving the coefficient of determination to 0.98. A mathematical expression was established to relate response amplification due to torsion with structural and seismic parameters obtained from center-of-mass monitoring. Additionally, a method based on monitoring two points on the roof was proposed and validated, achieving accurate seismic response estimations, with a maximum error of 9.22 % and a coefficient of determination of 0.929. This methodology enables more precise assessments of torsionally irregular buildings after earthquakes.

Keywords: Degree of torsional irregularity, structural health monitoring, maximum drift, numerical simulation, dynamic tests

PRÓLOGO

En este trabajo, el autor ha realizado un estudio detallado sobre el comportamiento sísmico de las edificaciones con irregularidad torsional, con el objetivo de desarrollar una metodología para la estimación del daño causado por los efectos de torsión. El autor ha propuesto un conjunto de parámetros estructurales y sísmicos destinados al desarrollo de un modelo predictivo que permita estimar la amplificación de la respuesta sísmica debido a dichos efectos. Estos parámetros fueron obtenidos a partir de las respuestas sísmicas no lineales calculadas en el centro de masa de estructuras con distintos grados de torsión, mediante múltiples simulaciones numéricas. Los resultados mostraron una correlación significativa entre los parámetros propuestos y el grado de irregularidad torsional.

Con el fin de reforzar y validar los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas, se llevaron a cabo ensayos experimentales dinámicos en una mesa vibradora, utilizando especímenes con diferentes grados de torsión. En este documento se detalla la obtención de las respuestas sísmicas de los especímenes a partir de un sistema de monitoreo de la salud estructural que emplea sensores de desplazamiento y aceleración. La integración de los resultados numéricos y experimentales han permitido crear un modelo predictivo robusto, a partir del cual fue posible estimar las respuestas máximas de los especímenes en términos del desplazamiento lateral máximo. Estos resultados, además, han permitido establecer una relación explícita entre el grado de irregularidad torsional y los parámetros propuestos en este trabajo.

Adicionalmente, se detalla un proceso de cálculo para determinar las respuestas máximas a partir de la respuesta registrada en dos puntos de una misma planta de estructuras con irregularidad torsional.

Por lo expuesto, se considera que el autor proporciona conclusiones sumamente útiles para ser compartidas con la comunidad científica y profesionales relacionados con la reducción de la vulnerabilidad estructural, a la vez que se ha identificado posibles temas para investigaciones futuras.

Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Tipos de irregularidad torsional	27
Tabla N° 3.1: Registros sísmicos base	61
Tabla N° 3.2: Propiedades de las secciones de vigas y columnas	64
Tabla N° 3.3: Dimensiones y parámetros de los modelos	65
Tabla N° 3.4: Resumen estadístico de los parámetros numéricos	76
Tabla N° 3.5: Categorías e intervalos de valores del parámetro $dr_{y,CM}$	77
Tabla N° 3.6: Distribución de datos respecto a las categorías del parámetro $dr_{y,CM}$	78
Tabla N° 3.7: Métricas de rendimiento del modelo de Regresión Lineal	80
Tabla N° 3.8: Métricas de rendimiento del modelo de Árbol de Decisión	81
Tabla N° 3.9: Métricas de rendimiento del modelo de Bosques Aleatorios	82
Tabla N° 3.10: Errores absolutos promedio y errores cuadráticos medios normalizados de los modelos de predicción	82
Tabla N° 3.11: Métricas de rendimiento del modelo final	84
Tabla N° 3.12: Métricas de rendimiento del modelo final para desplazamientos	86
Tabla N° 4.1: Lista de sensores instalados para el monitoreo de los especímenes	91
Tabla N° 4.2: Resumen de propiedades de los especímenes	94
Tabla N° 4.3: Resumen de especímenes y número de señales sísmicas	97
Tabla N° 5.1: Resumen estadístico de los parámetros experimentales	109
Tabla N° 5.2: Métricas de rendimiento para la predicción del G_{it} experimental	111
Tabla N° 5.3: Métricas de rendimiento para la estimación de $dr_{y,max}$	112
Tabla N° 5.4: Métricas de rendimiento del modelo de Regresión Lineal Múltiple	114
Tabla N° 5.5: Métricas de rendimiento para el cálculo de distorsiones	115
Tabla N° 5.6: Métricas de rendimiento para el registro LIMA-1974	121
Tabla N° 5.7: Métricas de rendimiento para el registro PISCO-2007	123
Tabla N° 5.8: Métricas de rendimiento del cálculo de las historias de desplazamientos para el registro LIMA-1974	129
Tabla N° 5.9: Métricas de rendimiento del cálculo de las historias de desplazamientos para el registro PISCO-2007	133

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Imagen de planta irregular de estructura en el condominio de la Plaza García Calderón	20
Figura N° 1.2: Diagrama de flujo de la metodología	23
Figura N° 2.1: Irregularidad torsional en planta	26
Figura N° 2.2: Rotación de una edificación debido a la irregularidad torsional ante una fuerza sísmica	27
Figura N° 2.3: Modelo estructural para vigas	28
Figura N° 2.4: Sección transversal de viga de concreto armado	29
Figura N° 2.5: Modelo de viga con cargas de momento antisimétricas	29
Figura N° 2.6: Comportamiento no lineal por flexión del elemento viga	30
Figura N° 2.7: Modelo de Histéresis tri-lineal del resorte no lineal de flexión	33
Figura N° 2.8: Modelo de resorte no lineal de corte de elemento viga	34
Figura N° 2.9: Relación fuerza cortante-deformación del resorte no lineal de corte	34
Figura N° 2.10: Modelo estructural para columnas	36
Figura N° 2.11: Sección transversal de una columna de concreto armado	36
Figura N° 2.12: Modelo de columna con cargas de momento antisimétricas	37
Figura N° 2.13: Modelo de columna bajo cargas de corte y de flexión	40
Figura N° 2.14: Modelo de Histéresis multi-lineal de los resortes no lineales de corte	41
Figura N° 2.15: Modelo de resortes múltiples en una sección rectangular de una columna	41
Figura N° 2.16: Modelos histeréticos de resortes no lineales verticales	42
Figura N° 2.17: Condición de equilibrio en la sección de la columna	42
Figura N° 2.18: Aceleración promedio constante	45
Figura N° 2.19: Ondícula madre y función de escalamiento de la familia B-Spline de orden 4	48
Figura N° 3.1: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva PRQ 17/10/1966	54
Figura N° 3.2: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva PRQ 31/05/1970	54
Figura N° 3.3: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva PRQ 03/10/1974	55
Figura N° 3.4: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva LIM005 29/04/1991	55
Figura N° 3.5: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación César Vizcarra Vargas MOQ001 23/06/2001	56

Figura N° 3.6: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación UN-SA AQP001 07/07/2001	56
Figura N° 3.7: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Jorge Basadre Grohmann University TAC001 07/07/2001	57
Figura N° 3.8: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Jorge Basadre Grohmann University TAC001 13/06/2005	57
Figura N° 3.9: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación César Vizcarra Vargas MOQ001 13/06/2005	58
Figura N° 3.10: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación UN-SA AQP001 13/06/2005	58
Figura N° 3.11: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Dirección de Hidrografía y Navegación CAL001 15/08/2007	59
Figura N° 3.12: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación UNICA ICA002 15/08/2007	59
Figura N° 3.13: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Casa Dr. Piqué LIM004 15/08/2007	60
Figura N° 3.14: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación César Vizcarra Vargas MOQ001 01/04/2014	60
Figura N° 3.15: Vista en planta de los 3 grados de libertad de los modelos simplificados	62
Figura N° 3.16: Configuración estructural del modelo simplificado	63
Figura N° 3.17: Capacidad y coeficientes sísmicos del modelo	64
Figura N° 3.18: Modos de vibración de modelo simplificado.	68
Figura N° 3.19: Configuración de opciones para el Análisis No Lineal Tiempo Historia	69
Figura N° 3.20: Diagrama de flujo para los análisis dinámicos	70
Figura N° 3.21: Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado en Python para realizar el análisis tiempo historia no lineal en STERA 3D	71
Figura N° 3.22: Diagrama para el filtro de datos	74
Figura N° 3.23: Histogramas de los parámetros estructurales y sísmicos.	75
Figura N° 3.24: Histograma de categorías del parámetro $dr_{y,CM}$. En el eje X se indican las categorías y en el eje Y la cantidad de datos	78
Figura N° 3.25: Errores de predicción del modelo de Regresión Lineal	79
Figura N° 3.26: Ejemplo del modelo Árbol de Decisión, el eje X indica los valores de entrada del modelo Árbol de Decisión y el eje Y, los valores de salida	80
Figura N° 3.27: Errores de predicción del modelo de Árbol de Decisión	81
Figura N° 3.28: Errores de predicción del modelo de Bosques Aleatorios	82
Figura N° 3.29: Comparación entre el G_{it} de predicción y el G_{it} de análisis.	83

Figura N° 3.30: Importancia de parámetros	84
Figura N° 3.31: Errores de predicción del modelo final	84
Figura N° 3.32: Relación entre el grado de irregularidad torsional y la distorsión del centro de masa	85
Figura N° 3.33: Comparación entre las distorsiones máximas de análisis y las distorsiones máximas calculadas a partir del modelo de predicción	86
Figura N° 4.1: Esquema en planta del espécimen E-1	88
Figura N° 4.2: Esquema en planta del espécimen E-2	88
Figura N° 4.3: Esquema en planta del espécimen E-3	89
Figura N° 4.4: Esquema en planta del espécimen E-4	89
Figura N° 4.5: Esquema de ensayo, vista lateral	90
Figura N° 4.6: Esquema de ensayo, vista en planta	90
Figura N° 4.7: Sistema de monitero para espécimen en la mesa vibradora	92
Figura N° 4.8: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-1	92
Figura N° 4.9: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-2	93
Figura N° 4.10: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-3	93
Figura N° 4.11: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-4	93
Figura N° 4.12: Registro original del sismo de Lima del año 1974	95
Figura N° 4.13: Registro original del sismo de Pisco del año 2001	95
Figura N° 4.14: Registro de aceleraciones y contenido de frecuencias del registro LIMA-1974	96
Figura N° 4.15: Registro de aceleraciones y contenido de frecuencias del registro PISCO-2007	96
Figura N° 4.16: Diagrama de flujo del procesamiento de señales	99
Figura N° 4.17: Trayectoria descrita por el centro de masa de los especímenes de prueba para el registro de LIMA-1974	100
Figura N° 4.18: Comportamiento histerético de los especímenes de prueba para el registro de LIMA-1974	101
Figura N° 4.19: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con el PGA en los especímenes para el registro de LIMA-1974	102
Figura N° 4.20: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con la distorsión en los especímenes para el registro de LIMA-1974	103
Figura N° 4.21: Trayectoria descrita por el centro de masa de los especímenes de prueba para el registro de PISCO-2007	104

Figura N° 4.22: Comportamiento histerético de los especímenes de prueba para el registro de PISCO-2007	105
Figura N° 4.23: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con el PGA en los especímenes para el registro de PISCO-2007	106
Figura N° 4.24: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con la distorsión en los especímenes de prueba para el registro de PISCO-2007	107
Figura N° 5.1: Relación del G_{it} con los parámetros de estudio	108
Figura N° 5.2: Histogramas de los parámetros experimentales	109
Figura N° 5.3: Diagrama de flujo para la creación del modelo híbrido de predicción	110
Figura N° 5.4: Comparación entre el G_{it} experimental y el G_{it} de predicción	111
Figura N° 5.5: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado a partir del modelo de predicción	112
Figura N° 5.6: Comparación entre el G_{it} experimental y el G_{it} calculado	114
Figura N° 5.7: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado	115
Figura N° 5.8: Esquema general de puntos y vectores en planta	116
Figura N° 5.9: Esquema de vectores unitarios	118
Figura N° 5.10: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-1 para el registro de LIMA-1974	120
Figura N° 5.11: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-2 para el registro de LIMA-1974	120
Figura N° 5.12: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-3 para el registro de LIMA-1974	121
Figura N° 5.13: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974	121
Figura N° 5.14: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-1 para el registro de PISCO-2007	122
Figura N° 5.15: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-2 para el registro de PISCO-2007	122
Figura N° 5.16: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-3 para el registro de PISCO-2007	123

Figura N° 5.17: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007	123
Figura N° 5.18: Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo de las respuestas dinámicas a partir de dos sensores	125
Figura N° 5.19: Historia de desplazamientos calculados para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974	126
Figura N° 5.20: Historia de aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974	127
Figura N° 5.21: Contenido de frecuencias de las aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974	128
Figura N° 5.22: Historia de desplazamientos calculados para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007	130
Figura N° 5.23: Historia de aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007	131
Figura N° 5.24: Contenido de frecuencias de las aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007	132
Figura N° 5.25: Comportamiento histerético de las columnas del espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974	134
Figura N° 5.26: Comportamiento histerético de las columnas del espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007	135

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

1_x	: Vector unitario en la dirección X
1_y	: Vector unitario en la dirección Y
Ar_i	: Registro de aceleraciones relativas en el punto i
A_i	: Registro de aceleraciones absolutas en el punto i
Ag	: Registro de aceleraciones en la base
A_s	: Área total de refuerzo en la sección
$A(t)$	: Función aceleración dependiente del tiempo
A	: Punto en planta cuya respuesta es conocida
a_i	: i-ésimo peso del i-ésimo parámetro de entrada de la regresión lineal
a_0	: Constante de la regresión lineal
a_1	: Área de refuerzo en la dirección Y de una columna o área de las barras de refuerzo superiores de una viga
a_2	: Área de refuerzo en la dirección X de una columna o área de las barras de refuerzo inferiores de una viga
a_c	: Área de refuerzo en las esquinas de la columna
a_s	: Área de las barras de refuerzo en la losa
$a_{x,CM}$	: Aceleración máxima del centro de masa del entrepiso en la dirección X
$a_{y,CM}$	: Aceleración máxima del centro de masa del entrepiso en la dirección Y
α	: Fracción de degradación de rigidez
α_p	: Razón de las dimensiones en planta de los modelos simplificados de 3 grados de libertad
α_k	: Razón de rigideces laterales de los modelos simplificados de 3 grados de libertad
α_y	: Factor de degradación de la rigidez en el punto de fluencia
B	: Dimensión de la columna en la dirección X, ancho de una viga, ancho de la estructura en planta o punto en planta cuya respuesta es desconocida
C	: Matriz de amortiguamiento
C_n	: n-ésimo valor de la transformada finita de Fourier del registro $y(t)$
$c_k^{(j)}$	: Secuencia de coeficientes para f_i en la transformada de wavelet

D	: Peralte de una viga o dimensión de una columna en la dirección Y
d	: Profundidad efectiva
D_{Bx}	: Componente X del vector $\vec{D}_B$
D_{By}	: Componente Y del vector $\vec{D}_B$
$D_{Bx}(t_i)$	: Componente X del vector desplazamiento $\vec{D}_B(t_i)$ en el tiempo (t_i)
$D_{By}(t_i)$	: Componente Y del vector desplazamiento $\vec{D}_B(t_i)$ en el tiempo (t_i)
d_1	: Distancia al centro de las barras superiores o distancia al centro de las barras de refuerzo en la dirección Y
d_2	: Distancia al centro de las barras inferiores de una viga o distancia al centro de las barras de refuerzo en la dirección X
$d_{x,CM}$	: Desplazamiento máximo relativo del centro de masa del entrepiso en la dirección X
$d_{y,CM}$	: Desplazamiento máximo relativo del centro de masa del entrepiso en la dirección Y
$dr_{y,CM}$	: Distorsión máxima del centro de masa del entrepiso en la dirección Y
$dr_{y,max}$	: Distorsión máxima del entrepiso en la dirección Y
D_{Ox}	: Componente X del vector $\vec{D}_O$
D_{Oy}	: Componente Y del vector $\vec{D}_O$
D_{Ax}	: Componente X del vector $\vec{D}_A$
D_{Ay}	: Componente Y del vector $\vec{D}_A$
$D(t)$	: Función desplazamiento dependiente del tiempo
$D'(t)$	: Primera derivada de la función $D(t)$
$D''(t)$	: Segunda derivada de la función $D(t)$
$d_k^{(j)}$	: Secuencia de coeficientes para g_i en la transformada de wavelet
Δ_{CM}	: Desplazamiento en planta del centro de masa de la estructura
Δ_{max}	: Desplazamiento máximo en planta de la estructura
η_A	: Rotación en el extremo A de una viga producida por la fuerza cortante
η_B	: Rotación en el extremo B de una viga producida por la fuerza cortante
η_s	: Fracción efectiva de la losa
e_x	: Excentricidad de la estructura en la dirección X
f'_c	: Resistencia especificada a la compresión del concreto
f_n	: Frecuencia del término C_n
f_y	: Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo

$f(u)$	: Fuerza lateral resistente de la estructura en función del desplazamiento
ϕ	: Rotación no lineal de elemento producida por flexión
ϕ_m	: Rotación objetivo
$\psi(x)$	: Ondícula madre
$\phi(x)$	: Función de escalamiento
γ	: Factor de reducción
G_{it}	: Grado de irregularidad torsional
h_1	: Fracción de amortiguamiento del primer modo de vibración
h_2	: Fracción de amortiguamiento del segundo modo de vibración
I_e	: Momento de inercia de la sección
I_{e0}	: Momento de inercia de la viga sin considerar la losa
j	: Distancia entre los centros de esfuerzo en la sección
k_0	: Rigidez elástica
k_{y3}	: Rigidez después de la fluencia
k_y	: Rigidez tangencial en el punto de fluencia
K_y	: Rigidez total de la estructura en la dirección Y
K_x	: Rigidez total de la estructura en la dirección X
l	: Luz libre de una viga o luz libre de una columna
L	: Largo de la estructura en planta
L_s	: Longitud transversal de la losa entre apoyos
M	: Matriz de masas de la estructura
M_c	: Momento de agrietamiento de la sección o momento de agrietamiento del resorte de flexión
MSE	: Error Cuadrático Medio (Mean Squared Error)
μ_y	: Media de los datos originales o medidos
M_y	: Momento de fluencia del resorte de flexión o momento de fluencia
N	: Carga axial en una columna o número de datos del registro $y(t)$
n	: Relación de módulos de elasticidad del acero y del concreto
n_0	: Fracción de carga axial
N_b	: Carga axial de equilibrio
N_{max}	: Carga axial máxima
$NRMSE$	: Raíz del error cuadrático medio normalizado

O	: Centro de masa de la planta cuya respuesta es conocida
PGA	: Aceleración máxima del registro en valor absoluto
P_i	: i-ésimo parámetro de entrada
p_t	: Cuantía de refuerzo a la tracción
p_w	: Cuantía de refuerzo de corte
Q_c	: Fuerza cortante de agrietamiento
Q_y	: Fuerza cortante de fluencia
Q_u	: Fuerza cortante última
Q_i	: Fuerza cortante en el entrepiso i
$\frac{Q_i}{W}$	: Coeficiente sísmico
R^2	: Coeficiente de determinación
$RMSE$	: Raíz del Error Cuadrático Medio (Root Mean Squared Error)
S	: Ancho efectivo de la losa
s_c	: Deformación de agrietamiento
s_y	: Deformación de fluencia
s_u	: Deformación última
SSE	: Suma de cuadrados de los errores
SST	: Suma total de cuadrados o varianza
σ_0	: Esfuerzo axial en la columna
T	: Duración total en segundos del registro $y(t)$
τ	: Rotación lineal de elemento producida por flexión
θ	: Rotación total de elemento producida por flexión
θ_c	: Rotación de agrietamiento total del elemento viga
θ_y	: Rotación de fluencia total del elemento viga
θ_{CM}	: Ángulo de rotación del centro de masa
$T_{x,est}$	: Periodo de respuesta de la estructura en la dirección X
$T_{y,est}$	: Periodo respuesta de la estructura en la dirección Y
$T_{y,sismo}$	: Periodo predominante del registro sísmico en la dirección Y
u	: Vector de desplazamiento
$\dot{u}$	: Vector de velocidad
$\ddot{u}$	: Vector de aceleración
$U1$	: Vector $\vec{OA}$

$U2$	: Vector $\vec{OB}$
$u2$	: Vector unitario del vector $U2$
$ U2 $	: Módulo del vector $U2$
$u1_x$	: Componente X del vector unitario $u1$
$u1_y$	: Componente Y del vector unitario $u1$
$u2_x$	: Componente X del vector unitario $u2$
$u2_y$	: Componente Y del vector unitario $u2$
$u1_x(t_i)$	: Componente X del vector unitario $u1(t_i)$ en el tiempo t_i
$u1_y(t_i)$	: Componente Y del vector unitario $u1(t_i)$ en el tiempo t_i
$V(t)$	: Función velocidad dependiente del tiempo
W	: Peso total de la estructura analizada
w	: Longitud del intervalo de datos $w = \text{máx}(y) - \text{mín}(y)$
w_1	: Frecuencia circular del primer modo de vibración
w_2	: Frecuencia circular del segundo modo de vibración
$X(t_i)$	: Coordenada X del punto B en el tiempo t_i
$X1(t_i)$	: Coordenada X del punto O en el tiempo t_i
$Y(t_i)$	: Coordenada Y del punto B en el tiempo t_i
$Y1(t_i)$	: Coordenada Y del punto O en el tiempo t_i
y_k	: k -ésimo valor del registro $y(t)$
y_t	: Distancia de la fibra extrema a tracción al centro de gravedad de la sección de una viga
$y(x)$	: Función dependiente de la variable x
$y'(x)$	: Primera derivada de la función $y(x)$
$y''(x)$	: Segunda derivada de la función $y(x)$
$y^{(i)}$	: Valor original o medido
$\hat{y}^{(i)}$	: Valor predicho o calculado

SIGLAS

ANLTH:	: Análisis no lineal tiempo historia
ASCE	: American Society of Civil Engineers
CEOIS	: Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
CM	: Centro de masa
CR	: Centro de rigidez
NTE	: Norma Técnica
PGA	: Peak Ground Acceleration
REMOED	: Red de Monitoreo de Edificaciones
STERA 3D	: Structural Earthquake Response Analysis 3D

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Las edificaciones en Perú se encuentran expuestas a una gran amenaza sísmica debido a la ubicación del país sobre el Cinturón del Fuego del Pacífico. Por ello, es esencial contar con un sistema de monitoreo continuo de la salud estructural en edificaciones esenciales como establecimientos de salud e instituciones educativas. En un estudio realizado por Ibrahim et al. (2020) se refuerza la idea de que el monitoreo continuo de las estructuras permite conocer de manera rápida la información sobre la salud estructural de una edificación tras un evento sísmico. Esto permite que los equipos de rescate puedan priorizar la asistencia a las edificaciones más vulnerables, contribuyendo así a la prevención de pérdidas humanas. En el Perú, una de las instituciones que realiza el monitoreo continuo de las estructuras es el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), que opera el Centro de Observación de Ingeniería Sísmica (CEOIS). El CEOIS está compuesta por tres redes de monitoreo que abarcan todo el territorio peruano. Entre estas redes se encuentra la Red de Monitoreo de Edificaciones (REMOED), con la cual, en la actualidad se están monitoreando varios edificios en todo el país (Gonzales et al., 2023).

Gokdemir et al. (2013) señalan que es importante estudiar las irregularidades en las estructuras, en particular, la irregularidad torsional. La excentricidad entre el centro de masa de las edificaciones y su centro de rigidez es la causa de que las estructuras sufran efectos de torsión ante un evento sísmico. Bajo excesivos efectos de torsión, los elementos pueden llegar a fallar por momento torsional o la estructura puede superar los límites de la deflexión lateral para la que fue diseñada inicialmente. Por lo tanto, estos efectos pueden causar el colapso de las estructuras. Además, es probable que ocurran impactos entre edificaciones vecinas debido a las excesivas deflexiones laterales generadas por la torsión.

Es importante señalar también que los códigos internacionales, como el ASCE/SEI 41-17, recomiendan factores de amplificación para el diseño de edificaciones que presentan irregularidad torsional. Sin embargo, estos factores no representan completamente la respuesta real de las estructuras. Además, Suzuki et al. (2021) resaltan que existe una falta de estudios experimentales de las demandas de desplazamiento en sistemas con torsión donde se consideren los daños y la degradación de la resistencia de los elementos estructurales de las edificaciones.

Finalmente, cabe destacar que en la actualidad los algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*) han tomado mucha importancia. Actualmente, se aplican en el campo de la ingeniería, donde se puede destacar como campo de aplicación

a la dinámica estructural. Oh et al. (2020) emplearon este tipo de algoritmos para predecir el daño en modelos estructurales de edificaciones ante un evento sísmico. En ese sentido, se emplearán algoritmos de aprendizaje automático en la presente investigación.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Según un estudio realizado por Pulido et al. (2015) la costa peruana se encuentra expuesta a un gran peligro sísmico. Existe la expectativa de que un sismo severo ocurra en la costa central de Perú y afecte principalmente a la ciudad de Lima. El peligro sísmico al que se ven expuestas las estructuras en el país, hace aún más necesario que éstas sean construidas con configuraciones regulares en planta.

Sin embargo, según Espinoza y Fort (2019) en las últimas 2 décadas las ciudades del Perú se han expandido cerca del 50%. Solo en Lima se generaron más de 25 000 hectáreas de suelo urbano, esto provoca que actualmente las áreas de expansión urbana sean limitadas. Este problema se suma a que existe una alta necesidad de construir infraestructuras (viviendas, oficinas, centros comerciales, etc.) en Lima Metropolitana (Valdivia, 2020). La cantidad limitada de áreas que en la actualidad existe, ha conllevado a que se construyan estructuras que presentan una configuración estructural irregular en planta, esto se puede observar en algunos condominios de Lima Metropolitana, como el condominio de la Plaza García Calderón de San Borja (ver Figura N° 1.1). Esta configuración irregular en planta provoca un desbalance entre el centro de masa y de rigidez de las edificaciones, lo que resulta en estructuras más vulnerables ante eventos sísmicos. Ya que, ante posibles sismos, la irregularidad torsional provoca la concentración del daño en los elementos estructurales más alejados del centro de rigidez de las edificaciones, superando al nivel de daño esperado en el análisis y diseño (Gokdemir et al., 2013).



FIGURA N° 1.1: Imagen de planta irregular de estructura en el condominio de la Plaza García Calderón.

Debido al peligro existente y a la vulnerabilidad que presentan los edificios con irregularidad torsional, en la actualidad existen algunas edificaciones importantes que están siendo monitoreadas con tecnologías de observación sísmica. Los sensores que monitorean a estas estructuras suelen estar instalados cerca al centro de masa de las losas. Sin embargo, debido a la irregularidad torsional, el punto de respuesta máxima suele ubicarse lejos del centro de masa, esto imposibilita que se pueda medir la respuesta de este punto directamente, por lo tanto, esto provoca que no se pueda detectar el nivel de daño concentrado ocasionado por los efectos de torsión.

La presente investigación busca solucionar el problema que se tiene al medir el daño concentrado en edificaciones con efectos de torsión mediante el monitoreo de la salud estructural. Para ello, se realizarán ensayos experimentales y simulaciones numéricas de estructuras con diferentes grados de irregularidad torsional con el fin de desarrollar metodologías que permitan calcular o predecir la respuesta máxima en este tipo de edificaciones. Con ello, se busca proporcionar una nueva herramienta a los ingenieros que les permita brindar una respuesta inmediata a los propietarios sobre el estado de su edificación. Permitiendo así, que se tenga un juicio más certero entre la ocupación inmediata, reparación o demolición de la estructura.

1.2.1 Problema general

¿Cómo se puede determinar el nivel de daño en edificaciones con irregularidad torsional a partir del monitoreo de la salud estructural del centro de masa?

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para la determinación del nivel de daño en edificaciones con irregularidad torsional mediante un sistema de monitoreo de la salud estructural.

1.3.2 Objetivos específicos

- Crear modelos estructurales numéricos con distintos grados de torsión, que permitan generar una base de datos en términos de características estructurales y sísmicas, a partir de análisis dinámicos no lineales, para el desarrollo de un algoritmo de machine learning que prediga el grado de irregularidad torsional, con el fin de estimar las distorsiones máximas en los modelos numéricos.
- Desarrollar un modelo de machine learning que prediga el grado de irregularidad torsional de los modelos estructurales numéricos con distintos grados

de torsión ante diferentes escenarios sísmicos.

- Realizar ensayos dinámicos incrementales en mesa vibradora con especímenes que presenten diferentes grados de torsión y ajustar el modelo de predicción con los resultados experimentales, con el fin de predecir el grado de irregularidad torsional para la estimación de las distorsiones máximas.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo a seguir para el desarrollo de una nueva metodología que permita estimar el nivel de daño en estructuras con irregularidad torsional a partir del monitoreo de la salud estructural utilizando acelerómetros se muestra a continuación:

- **Recopilación de la información**

Se buscará información relacionada al tema de la irregularidad torsional en edificaciones, el monitoreo de la salud estructural y algoritmos de machine learning. Para ello se investigarán tesis de pregrado y posgrado, reportes de investigación, libros y artículos de revistas académicas.

- **Modelamiento numérico y simulaciones**

Se utilizará el programa STERA 3D para simular los modelos numéricos representativos, con el objetivo de conocer su comportamiento sísmico. Para ello se realizarán simulaciones frente a diferentes demandas sísmicas mediante análisis no lineales tiempo historia. Posteriormente, se generará una base de datos de las respuestas dinámicas de los modelos en términos de características estructurales y sísmicas.

- **Ensayos dinámicos de especímenes en mesa vibradora**

Se realizarán ensayos dinámicos en especímenes con diferentes grados de irregularidad torsional en una mesa vibradora. En estos ensayos se buscará que la estructura incurra en su rango elástico e inelástico. Se realizará el monitoreo de las respuestas dinámicas en el centro de masa de cada espécimen y en los lugares donde pueda suceder la respuesta máxima de la estructura debido al efecto de torsión.

- **Desarrollo de algoritmos para estimar la máxima respuesta sísmica en edificaciones con irregularidad torsional**

Mediante los datos obtenidos de las simulaciones numéricas se desarrollará un modelo de predicción que permita estimar la respuesta máxima con el

uso de aprendizaje automático. El modelo de predicción desarrollado se ajustará y validará con los resultados experimentales obtenidos de los ensayos dinámicos en mesa vibradora.

- **Discusión de resultados**

Se evaluará la precisión de los resultados obtenidos con la metodología propuesta.

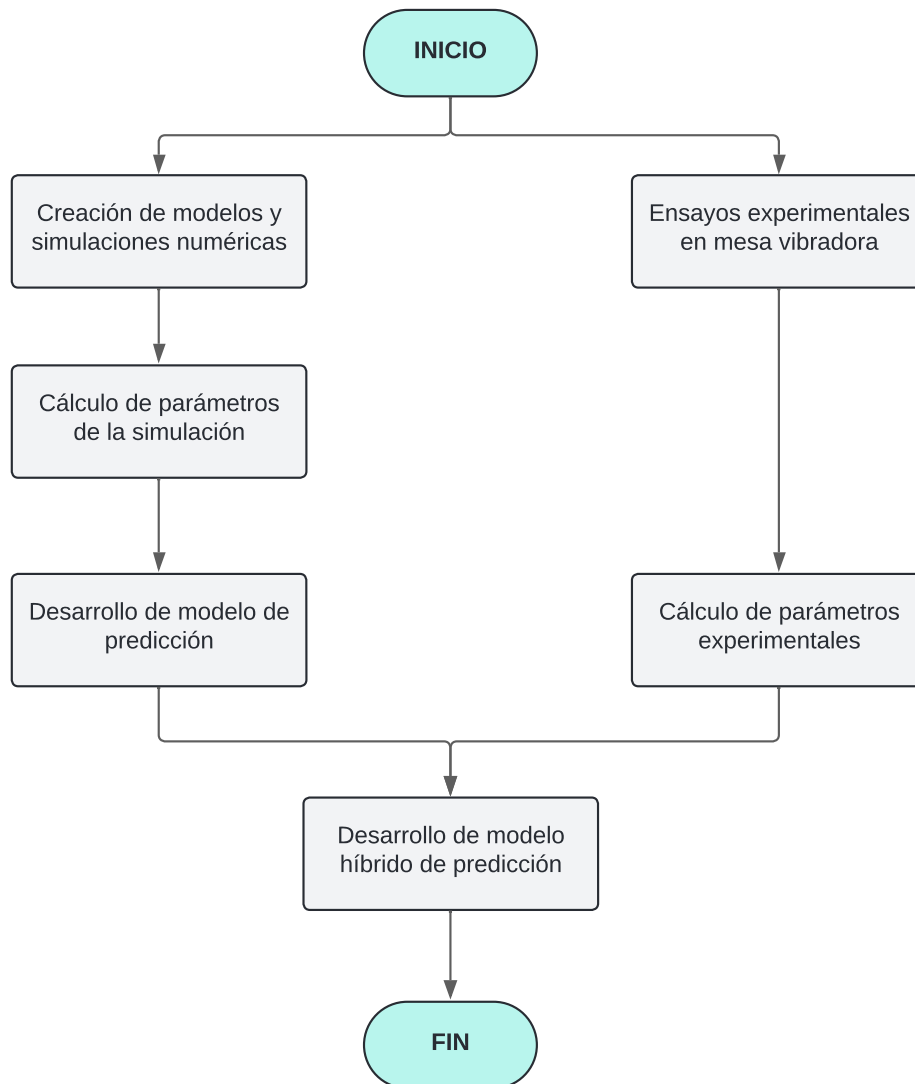


FIGURA N° 1.2: Diagrama de flujo de la metodología.

1.5 ANTECEDENTES REFERENCIALES

El monitoreo de la salud estructural de las edificaciones permite tener conocimientos más profundos sobre el comportamiento de éstas ante un evento sísmico. La instalación de sistemas de monitoreo es aún más necesaria en el Perú debido a la actividad sísmica y a la vulnerabilidad de edificaciones importantes como hos-

pitales y colegios. Jaramillo et al. (2023) realizaron el estudio del comportamiento dinámico de un edificio aislado. En dicha investigación se emplearon los resultados de obtenidos a partir de los sensores de monitoreo instalados en la edificación mencionada. A partir de las respuestas obtenidas ante distintos escenarios sísmicos, se calcularon las propiedades dinámicas del edificio. Con el estudio realizado, se calibró el modelo numérico de la edificación, lo cual permitirá obtener una respuesta más certera de la estructura ante un evento sísmico.

Ortiz (2019) estudió el efecto de la simultaneidad de las componentes sísmicas en estructuras que presentan irregularidad torsional. Para ello, analizó modelos numéricos simplificados de tres grados de libertad con excentricidades en una sola dirección y distintos grados de irregularidad torsional. Estos modelos fueron sometidos a sismos reales y sintéticos mediante análisis dinámicos tiempo historia. Los resultados mostraron que existe amplificación en la respuesta sísmica de los modelos debido a la irregularidad torsional y a la simultaneidad de componentes del sismo.

Debido a la escasez de estudios experimentales de estructuras con irregularidad torsional, en el año 2021, Suzuki et al. (2021) propusieron una metodología que permite el cálculo de las demandas de desplazamiento considerando los efectos no lineales de torsión. En dicha investigación, se realizó la evaluación de dos especímenes de concreto armado con irregularidad torsional de siete niveles, ambos de escala reducida al 50 %. Estos especímenes fueron sometidos a registros sísmicos unidireccionales en una mesa vibradora del laboratorio de Tainan (Taiwán).

Por otro lado, en una investigación realizada por Oh et al. (2020) se desarrolló un modelo de predicción basado en redes neuronales con el objetivo de estimar la máxima respuesta sísmica en edificaciones. El modelo fue desarrollado para predecir la distorsión máxima de entrepiso y el desplazamiento máximo considerando las características de las estructuras y de los registros sísmicos como parámetros de entrada. Para el desarrollo del algoritmo de predicción se usaron modelos estructurales regulares en planta de tres, cuatro y seis grados de libertad y un modelo estructural de un edificio de concreto armado. Las predicciones del modelo desarrollado mostraron gran precisión.

De las investigaciones mencionadas anteriormente se puede concluir que es esencial realizar el monitoreo continuo de las edificaciones mediante el uso de acelerómetros, en particular sobre las estructuras que presentan irregularidad torsional. Este tipo de estructuras son especialmente susceptibles a sufrir amplificaciones locales en sus respuestas sísmicas debido a los efectos de torsión. Además, es importante destacar que no existen muchos estudios experimentales que representen la respuesta sísmica de las edificaciones con irregularidad torsional en planta. Finalmente, es relevante mencionar que los algoritmos de machine learning han

demostrado gran precisión para predecir la respuesta de modelos estructurales.

Este estudio tiene como objetivo principal desarrollar una metodología que permita estimar el daño en edificaciones con irregularidad torsional, teniendo en consideración su respuesta no lineal.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Irregularidad torsional

Según Gokdemir et al. (2013) la irregularidad torsional se genera en estructuras con plantas complejas, donde el centro de masa y el centro de rigidez no se encuentran ubicados en el mismo lugar. Además, mientras la distancia entre estos puntos sea mayor, la estructura rotará alrededor de un núcleo rígido bajo solicitaciones sísmicas, provocando grandes momentos de torsión. En la Figura N° 2.1 se muestra la excentricidad existente entre estos puntos.

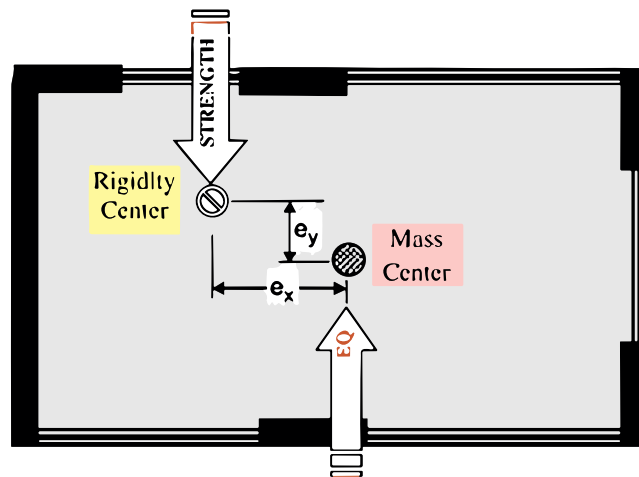


FIGURA N° 2.1: Irregularidad torsional en planta producida por la excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez. Gokdemir et al. (2013)

2.1.1.1 Grado de irregularidad torsional (G_{it})

Se define el grado de irregularidad torsional como la relación entre el desplazamiento máximo en planta de un entrepiso y el desplazamiento del centro de masa. Este índice refleja el valor de la amplificación de la respuesta provocada por los efectos de torsión en planta.

En la Figura N° 2.2 se puede observar un esquema en planta de una edificación, donde se muestran su centro de masa (CM), centro de rigidez (CR), la excentricidad (e), el desplazamiento lateral del centro de masa (Δ_{CM}) y el desplazamiento lateral máximo (Δ_{max}).

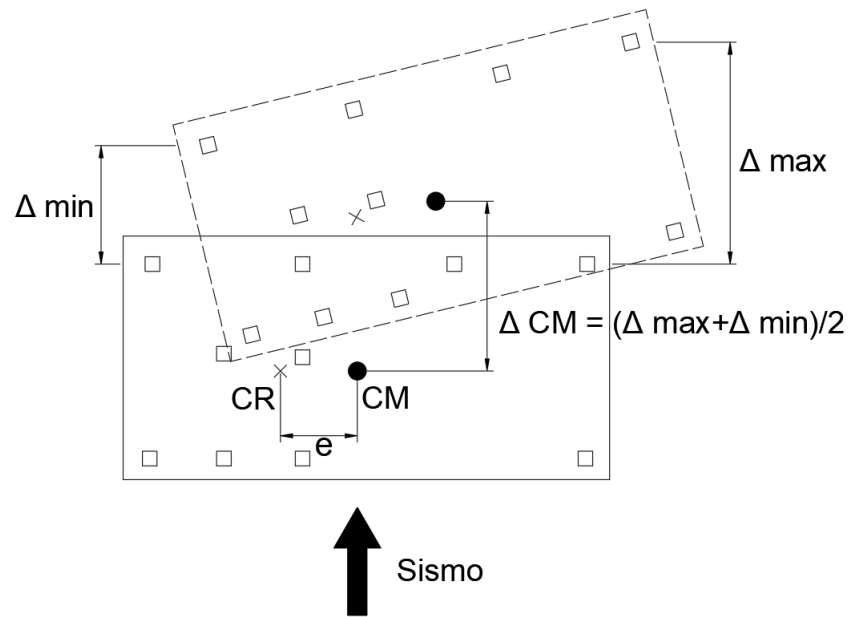


FIGURA N° 2.2: Rotación de una edificación debido a la irregularidad torsional ante una fuerza sísmica.

La expresión $\frac{1}{2}[\Delta_{max} + \Delta_{min}]$ se puede considerar equivalente al desplazamiento relativo del centro de masa Δ_{CM} del entrepiso en análisis. Estos valores se pueden relacionar para obtener el valor de G_{it} como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$G_{it} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{CM}} \quad (2.1)$$

Este parámetro se utiliza para definir los diferentes tipos de irregularidades torsionales según la NTE E.030-2018 como se muestra en la Tabla N° 2.1.

TABLA N° 2.1: Tipos de irregularidad torsional. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018-2019)

Rango	Tipo de irregularidad torsional
$G_{it} < 1.3$	No existe irregularidad torsional
$1.3 \leq G_{it} < 1.5$	Irregularidad torsional
$1.5 \leq G_{it}$	Irregularidad torsional extrema

2.1.1.2 Fuentes de irregularidad torsional en edificaciones

Según Gokdemir et al. (2013) se puede considerar como fuente principal de la irregularidad torsional a las formas no simétricas e irregulares en planta que presentan algunas edificaciones. La distribución asimétrica de los elementos estructurales, como las placas de concreto, las columnas, los huecos en las losas, etc., son otras

fuentes comunes de irregularidad torsional, ya que, pueden generar excentricidades considerables.

2.1.2 Análisis estructural

En esta tesis se tomará en cuenta el comportamiento no lineal de los elementos estructurales, para ello se utilizará el programa STERA 3D V11.0 en el cual se realizará el modelamiento, el análisis modal, el análisis estático no lineal y el análisis dinámico no lineal tiempo historia como parte del estudio de la irregularidad torsional.

2.1.2.1 Modelos no lineales de los elementos estructurales

Los elementos estructurales que conforman a los modelos simplificados de tres grados de libertad que se presentarán más adelante son: vigas y columnas. El material de estos elementos es el concreto armado.

- **Vigas de concreto armado**

El modelo estructural que representa a una viga se muestra en la Figura N° 2.3, este modelo representa a un elemento barra que está compuesto por dos resortes no lineales de flexión en sus extremos y un resorte no lineal de corte en su parte central (Saito, 2021).

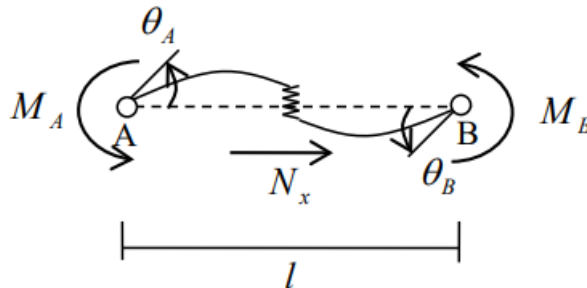


FIGURA N° 2.3: Modelo estructural para vigas. Saito (2021)

El modelo estructural anterior puede representar el comportamiento de una viga que tiene una sección con las características que se muestran en la Figura N° 2.4.

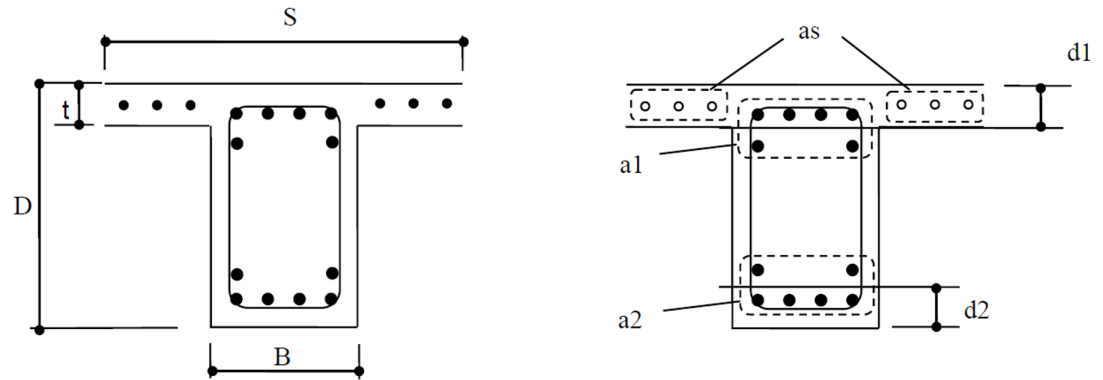


FIGURA N° 2.4: Sección transversal de viga de concreto armado. Saito (2021)

Donde:

- B : Ancho de la viga
- D : Peralte de la viga
- S : Ancho efectivo de la losa ($S = \eta_s L_s$)
- η_s : Fracción efectiva de la losa ($\eta_s = 0.1$)
- L_s : Longitud transversal de la losa entre apoyos
- d_1 : Distancia al centro de las barras superiores
- d_2 : Distancia al centro de las barras inferiores
- a_1 : Área de las barras de refuerzo superiores
- a_2 : Área de las barras de refuerzo inferiores
- a_s : Área de las barras de refuerzo en la losa

• Resorte no lineal de flexión

El modelo de comportamiento de un resorte no lineal de flexión se define mediante la relación momento-rotación de una viga con cargas antisimétricas como se muestra en la Figura N° 2.5.

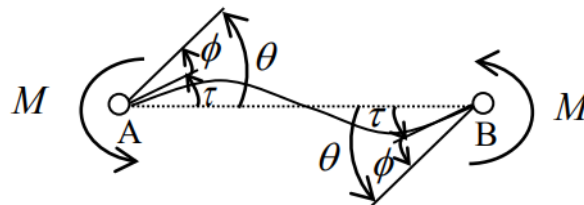


FIGURA N° 2.5: Modelo de viga con cargas de momento antisimétricas. Saito (2021)

Donde:

- τ : Rotación lineal del elemento viga
- ϕ : Rotación no lineal del elemento viga
- θ : Rotación total del elemento viga

En la Figura N° 2.6 se muestra el modelo que representa el comportamiento no lineal a flexión del elemento viga, donde se observa la variación del momento resistente del resorte no lineal de flexión con el incremento de la rotación total de la sección.

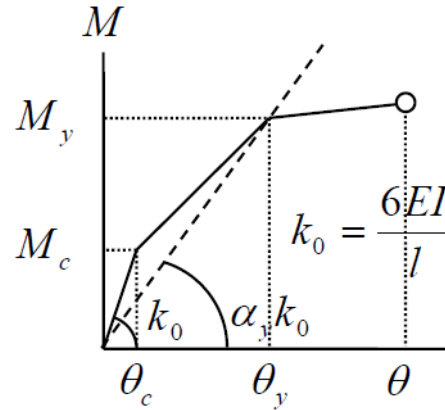


FIGURA N° 2.6: Comportamiento no lineal a flexión del elemento viga. Saito (2021)

Donde:

- M_y : Momento de fluencia del resorte de flexión
- θ_y : Rotación de fluencia total del elemento viga ($\theta_y \cong 0.01$)
- M_c : Momento de agrietamiento del resorte de flexión
- θ_c : Rotación de agrietamiento total del elemento viga
- k_0 : Rigidez elástica
- α_y : Factor de degradación de la rigidez en el punto de fluencia
- l : Longitud del elemento viga
- θ : Rotación última del elemento viga

El momento de agrietamiento de la sección de la viga de la Figura N° 2.4 se puede calcular con la Ecuación 2.2.

$$M_c = 1.8 \sqrt{f'_c} \frac{I_e}{y_t} \quad (2.2)$$

Donde:

- M_c : Momento de agrietamiento de la sección en $kgf - cm$
 I_e : Momento de inercia de la sección en cm^4
 y_t : Distancia de la fibra extrema a tracción al centro de gravedad de la sección en cm
 f'_c : Resistencia especificada a la compresión del concreto en kgf/cm^2

Además, el momento de fluencia de la sección de la viga se puede calcular con la Ecuación 2.3 cuando hay tracción en las barras superiores o con la Ecuación 2.4 cuando hay tracción en las barras inferiores.

$$M_{y1} = 0.9a_1f_y(D - d_1) + 0.9a_sf_y(D - t/2) \quad (2.3)$$

$$M_{y2} = 0.9a_2f_y(D - d_2) \quad (2.4)$$

La rigidez tangencial en el punto de fluencia se puede calcular con la Ecuación 2.5.

$$k_y = \alpha_y k_0 \quad (2.5)$$

Donde:

k_y : Rigidez tangencial en el punto de fluencia

El factor de degradación de la rigidez en el punto de fluencia se puede calcular con las Ecuaciones 2.6 y 2.7, las cuales son fórmulas empíricas.

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.63np_t + 0.043\frac{l}{2D}\right) \left(\frac{d}{D}\right)^2, \quad \left(\frac{l}{2D} \leq 2\right) \quad (2.6)$$

$$\alpha_y = \left(-0.0836 + 0.159\frac{l}{2D}\right) \left(\frac{d}{D}\right)^2, \quad \left(\frac{l}{2D} > 2\right) \quad (2.7)$$

Donde:

n : Relación de módulos de elasticidad del acero y del concreto ($n = \frac{E_s}{E_c}$)

p_t : Cuantía de refuerzo a la tracción,

$p_t = \frac{a_1 + a_s}{BD}$ cuando hay tracción en las barras superiores

$p_t = \frac{a_2}{BD}$ cuando hay tracción en las barras inferiores

d : Profundidad efectiva

$d = D - d_1$ cuando hay tracción en las barras superiores

$d = D - d_2$ cuando hay tracción en las barras inferiores

Cuando hay tracción en las barras superiores el factor α_y es modificado según la Ecuación 2.8.

$$\alpha'_y = \alpha_y \frac{I_{e0}}{I_e} \quad (2.8)$$

$$I_{e0} = \frac{(BD^3)}{12} \quad (2.9)$$

Donde:

I_e : Momento de inercia de la sección de la viga incluyendo la losa

I_{e0} : Momento de inercia de la viga sin considerar la losa

La rotación de fluencia de la viga se puede obtener con la Ecuación 2.10.

$$\phi_y = \left(\frac{1}{\alpha_y} + \gamma - 1 \right) \frac{M_y}{k_\theta} \quad (2.10)$$

Donde:

γ : Factor de reducción ($\gamma = 0.7$)

Según Saito (2021) se asume que la rotación de agrietamiento de la sección se puede calcular según la Ecuación 2.11.

$$\phi_c = 0.001\phi_y \quad (2.11)$$

Se consideró en el modelo no lineal como ángulo de rotación final $\theta = 1/50$, siendo este el ángulo a partir del cual empieza la degradación de la resistencia del elemento.

Para el modelo de histéresis del resorte no lineal de flexión del elemen-

to viga se considerará un modelo de degradación tri-lineal basado en el Modelo de Takeda, el cual se muestra en la Figura N° 2.7. Los parámetros del modelo tri-lineal de histéresis se calculan con las Ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14.

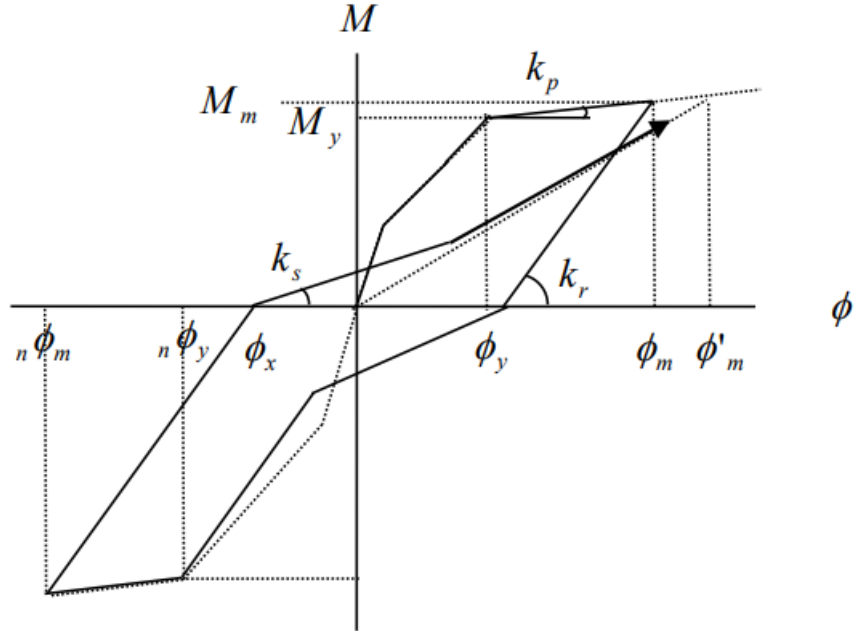


FIGURA N° 2.7: Modelo de Histéresis tri-lineal del resorte no lineal de flexión. Saito (2021)

Donde:

M_y : Momento de fluencia

ϕ_m : Rotación objetivo

$$k_p = n \frac{M_y}{\phi_y}, \quad n = 0.001 \quad (2.12)$$

$$k_r = \frac{M_y}{\phi_y} \left| \frac{\phi_y}{\phi_n} \right|^\alpha, \quad \alpha = 0.5 \quad (2.13)$$

$$k_s = \frac{M_m}{\phi_m - \phi_x} \left| \frac{\phi_y}{\phi_n} \right|^\beta, \quad \beta = 0.00 \quad (2.14)$$

Donde:

α : Fracción de degradación de rigidez

• Resorte no lineal de corte

El modelo de comportamiento no lineal de un resorte de corte se define

mediante la relación fuerza cortante - elongación por corte del resorte, el comportamiento representa al modelo de una viga sometida a cargas de momento que se muestra en la Figura N° 2.8.

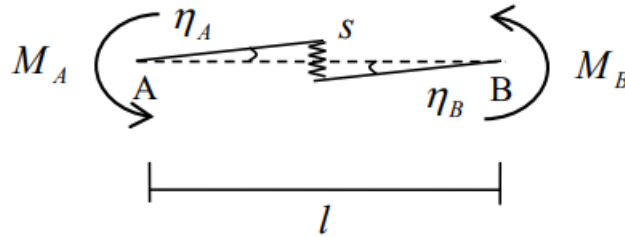


FIGURA N° 2.8: Modelo de resorte no lineal de corte de elemento viga. Saito (2021)

Donde:

η_A y η_B : Rotaciones en los extremos de la viga producida por la fuerza cortante

En la Figura N° 2.9 se muestra el modelo que representa el comportamiento no lineal por corte del elemento viga, donde se observa la variación de la fuerza cortante del resorte no lineal de corte con el incremento de la deformación total del resorte de corte producida por la fuerza cortante.

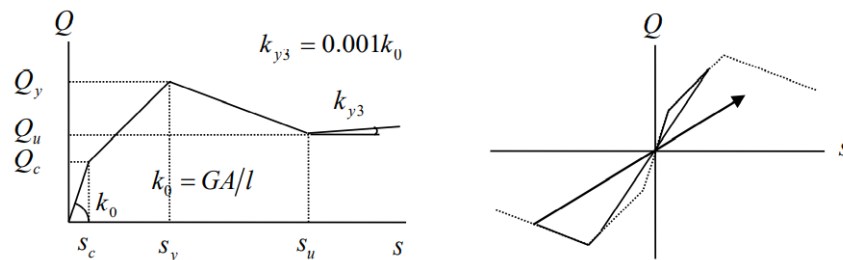


FIGURA N° 2.9: Relación fuerza cortante-deformación del resorte no lineal de corte. Saito (2021)

Donde:

Q_c : Fuerza cortante de agrietamiento
 s_c : Deformación de agrietamiento
 Q_y : Fuerza cortante de fluencia
 s_y : Deformación de fluencia
 Q_u : Fuerza cortante última
 s_u : Deformación última
 k_0 : Rigidez elástica
 k_{y3} : Rigidez después de la fluencia

La fuerza cortante de fluencia, Q_y , se puede calcular con la Ecuación 2.15.

$$Q_y = \left[\frac{0.053 p_t^{0.23} (f'_c + 18)}{\frac{M}{QD} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w f_{yt}} \right] b j \quad (2.15)$$

Donde:

- p_t : Cuantía de refuerzo a la tracción
- p_w : Cuantía de refuerzo de corte
- j : Distancia entre los centros de esfuerzo en la sección ($j = \frac{7}{8}d$)
- d : Profundidad efectiva

La fuerza cortante de agrietamiento, Q_c , y la fuerza cortante última se calculan con las Ecuaciones 2.16 y 2.17 respectivamente.

$$Q_c = \frac{Q_y}{3} \quad (2.16)$$

$$Q_u = Q_y + k_{y3} (s_u - s_y) \quad (2.17)$$

Asimismo, las deformaciones de agrietamiento, s_c , de fluencia, s_y , y deformación última, s_u , se calculan con las Ecuaciones 2.18, 2.19 y 2.20 respectivamente.

$$s_c = \frac{Q_c}{GA} l \quad (2.18)$$

$$s_y = \frac{l}{250} \quad (2.19)$$

$$s_u = \frac{l}{100} \quad (2.20)$$

• Columnas de concreto armado

El modelo estructural que representa a una columna se muestra en la Figura N° 2.10. El cual es un elemento barra que está compuesto por dos resortes no lineales de flexión en sus extremos y dos resortes no lineales de corte en su parte central en las direcciones X e Y (Saito, 2021).

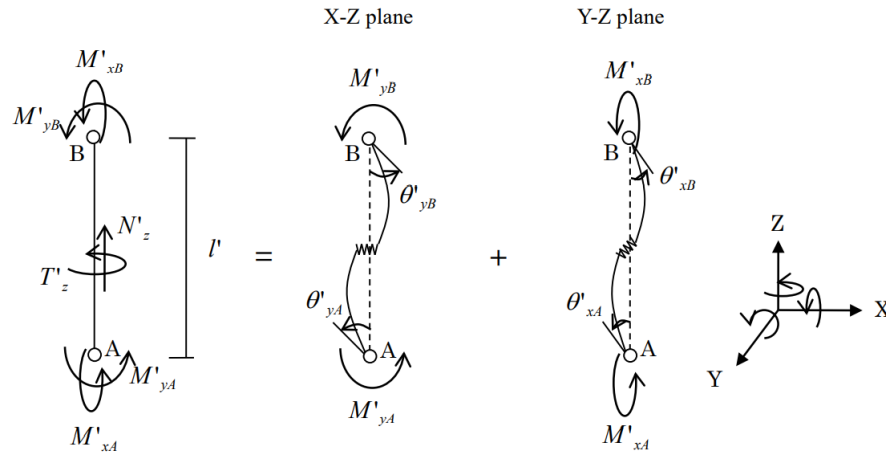


FIGURA N° 2.10: Modelo estructural para columnas. Saito (2021)

El modelo estructural anterior puede representar el comportamiento de una columna que tiene una sección con las características que se muestran en la Figura N° 2.11.

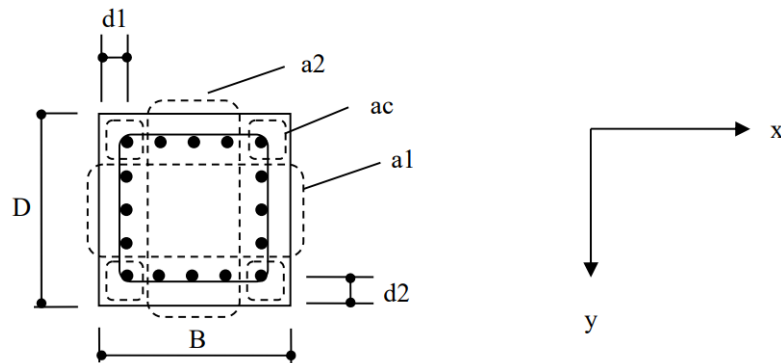


FIGURA N° 2.11: Sección transversal de una columna de concreto armado. Saito (2021)

Donde:

- B : Dimensión de la columna en la dirección X
- D : Dimensión de la columna en la dirección Y
- a_1 : Área de refuerzo en la dirección Y
- a_2 : Área de refuerzo en la dirección X
- a_c : Área de refuerzo en las esquinas de la columna
- d_1 : Distancia al centro de las barras de refuerzo en la dirección Y
- d_2 : Distancia al centro de las barras de refuerzo en la dirección X

- **Resorte no lineal de flexión** El modelo del comportamiento de un resorte no lineal de flexión se define mediante la relación momento-rotación de una columna con cargas antisimétricas como se muestra en la Figura

N° 2.12.

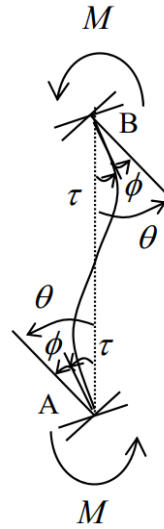


FIGURA N° 2.12: Modelo de columna con cargas de momento antisimétricas. Saito (2021)

Donde:

- τ : Rotación lineal del elemento columna
- ϕ : Rotación no lineal del elemento columna
- θ : Rotación total del elemento columna

Los resortes de flexión de los modelos de las vigas y columnas son los mismos, por lo que tendrán el mismo comportamiento no lineal, dicho comportamiento se mostró en la Figura N° 2.6.

El momento de agrietamiento de la sección de la columna de la Figura N° 2.11 se puede calcular con la Ecuación 2.21.

$$M_c = 1.8 \sqrt{f'_c} \frac{I_e}{y_t} + \frac{ND}{6} \quad (2.21)$$

Donde:

- M_c : Momento de agrietamiento de la sección $kgf - cm$
- N : Carga axial kgf
- I_e : Momento de inercia de la sección cm^4
- y_t : Distancia de la fibra extrema a tracción al centro de gravedad de la sección cm

Además, el momento de fluencia de la sección mencionada se puede calcular con las ecuaciones 2.22 y 2.23 según sea el caso.

$$M_y = 0.8a_t f_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{BDf'_c}\right), \quad 0 < N \leq N_b \quad (2.22)$$

$$M_y = (0.8a_t f_y D + 0.12BD^2 f'_c) \left(\frac{N_{max} - N}{N_{max} - N_b}\right), \quad N_b < N \leq N_{max} \quad (2.23)$$

Donde:

N_b : Carga axial de equilibrio ($N_b \approx 0.4BDf'_c$)

N_{max} : Carga axial máxima ($N_{max} \approx BDf'_c + A_s f_y$)

La rigidez tangencial en el punto de fluencia se puede calcular con la Ecuación 2.24.

$$k_y = \alpha_y k_0 \quad (2.24)$$

Donde:

k_y : Rigidez tangencial en el punto de fluencia

El factor de degradación de la rigidez en el punto de fluencia se puede calcular con las Ecuaciones 2.25 y 2.26, las cuales son fórmulas empíricas.

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.63np_t + 0.043\frac{l}{2D} + 0.325n_0\right) \left(\frac{d}{D}\right)^2, \quad \frac{l}{2D} \leq 2 \quad (2.25)$$

$$\alpha_y = \left(-0.0836 + 0.159\frac{l}{2D} + 0.169n_0\right) \left(\frac{d}{D}\right)^2, \quad \frac{l}{2D} > 2 \quad (2.26)$$

Donde:

n : Relación de módulos de elasticidad del acero y del concreto ($n = \frac{E_s}{E_c}$)

p_t : Cuantía de refuerzo a la tracción,

$p_t = \frac{a_c + a_s}{BD}$ cuando hay tracción en el refuerzo en la dirección X

$p_t = \frac{a_c + a_s}{BD}$ cuando hay tracción en el refuerzo en la dirección Y

l : Luz libre de la columna

d : Profundidad efectiva

$d = D - d_1$ cuando hay tracción en el refuerzo en la dirección Y

$d = D - d_2$ cuando hay tracción en el refuerzo en la dirección X

n_0 : Razón de carga axial ($n_0 = \frac{N}{BDf'_c}$)

La rotación de fluencia de la columna se puede obtener con la Ecuación 2.27.

$$\phi_y = \left(\frac{1}{\alpha_y} + \gamma - 1 \right) \frac{M_y}{k_0} \quad (2.27)$$

Donde:

γ : Factor de reducción ($\gamma = 0.7$)

Se volverá a asumir que la rotación de agrietamiento de la sección se puede calcular según la Ecuación 2.28.

$$\phi_c = 0.001\phi_y \quad (2.28)$$

• Resorte no lineal de corte

El modelo estructural de una columna presenta dos resortes no lineales de corte, uno en la dirección X y otro en la dirección Y. El comportamiento no lineal de estos resortes es el mismo que se definió para el resorte de corte de una viga, el cual se mostró en la Figura N° 2.9. Para definir la relación fuerza-desplazamiento de los resortes no lineales de corte se consideró la interacción entre las fuerzas axiales y de corte, para ello se utilizó un modelo de columna sometida a cargas axiales y de momento como se muestra en la Figura N° 2.13.

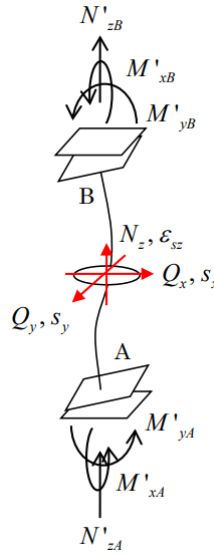


FIGURA N° 2.13: Modelo de columna bajo cargas de corte y de flexión. Saito (2021)

La fuerza cortante de fluencia, Q_y , se puede calcular con la Ecuación 2.29.

$$Q_y = \left[\frac{0.053 p_t^{0.23} (f'_c + 18)}{\frac{M}{QD} + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w f_{yt}} + 0.1 \sigma_0 \right] b j \quad (2.29)$$

Donde:

- p_t : Cuantía de refuerzo a la tracción
- p_w : Cuantía de refuerzo de corte
- j : Distancia entre los centros de esfuerzo en la sección $j = \frac{7}{8}d$
- d : Profundidad efectiva
- σ_0 : Esfuerzo axial en la columna

La fuerza cortante de agrietamiento, Q_c , y la fuerza cortante última se calculan con las Ecuaciones 2.16 y 2.17 respectivamente. Asimismo, las deformaciones de agrietamiento, s_c , de fluencia, s_y , y deformación última, s_u , se calculan con las ecuaciones 2.18, 2.19 y 2.20 respectivamente.

Para el modelo de histéresis de los resortes no lineales de corte del elemento columna se considerará un modelo de degradación multi-lineal, el cual se muestra en la Figura N° 2.14.

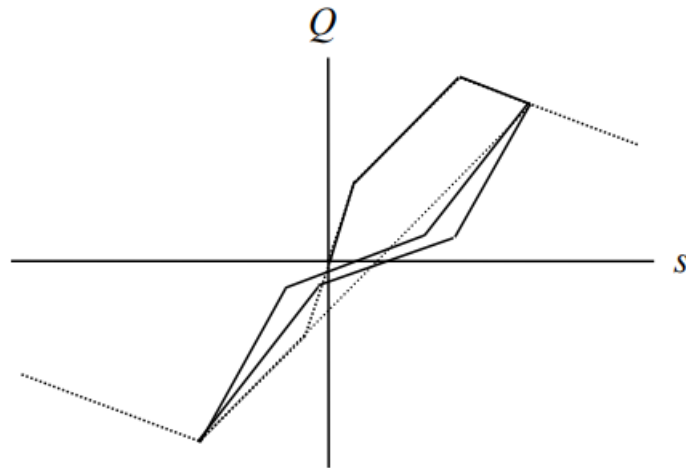


FIGURA N° 2.14: Modelo de Histéresis multi-lineal de los resortes no lineales de corte. Saito (2021)

• Resortes no lineales verticales

El modelo empleado para representar el comportamiento a tracción y a compresión de una columna es conocido como modelo de resortes múltiples. En este modelo se divide la sección de la columna en cinco áreas: cuatro áreas en las esquinas con resortes de acero y resortes de concreto y un área en el centro con un resorte de concreto. La representación de este modelo se puede observar en la Figura N° 2.15.

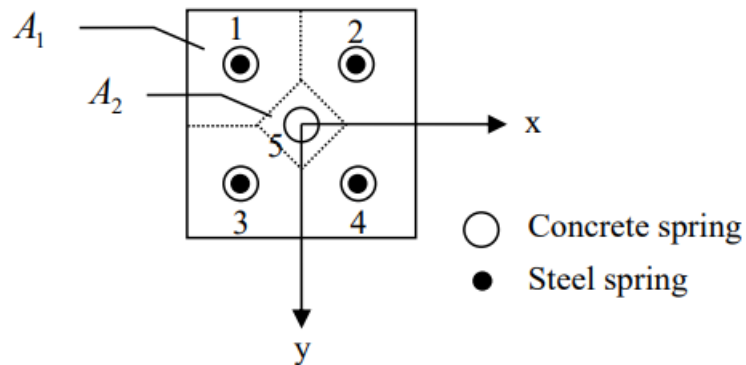


FIGURA N° 2.15: Modelo de resortes múltiples en una sección rectangular de una columna. Saito (2021)

En la Figura N° 2.16a y en la Figura N° 2.16b se puede observar el comportamiento histérico de los resortes acero y de concreto respectivamente.

En la Figura N° 2.17 se muestra la condición de equilibrio en la sección de la columna, a partir de esta condición se pueden determinar las sollicitaciones en cada uno de los resortes del modelo multi-resorte.

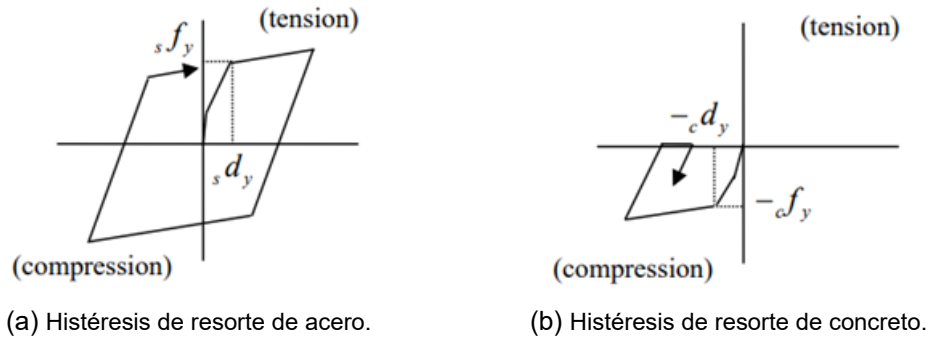


FIGURA N° 2.16: Modelos histéreticos de resortes no lineales verticales. Saito (2021)

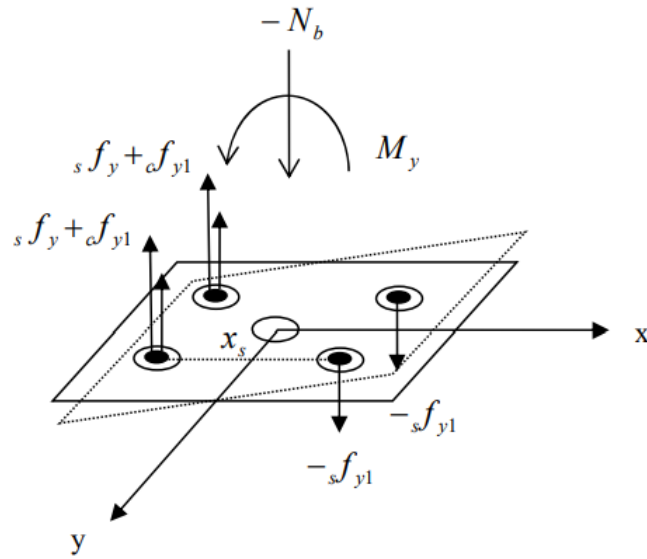


FIGURA N° 2.17: Condición de equilibrio en la sección de la columna. Saito (2021)

La fuerza en un resorte de acero se puede determinar con la cuarta parte del área de refuerzo total de la sección como se expresa en la Ecuación 2.30.

$$s f_y = \left(\frac{A_s f_y}{4} \right) \quad (2.30)$$

Donde:

A_s : Área total de refuerzo en la sección

f_y : Resistencia especificada a la fluencia del refuerzo

La fuerza en uno de los resortes de concreto que se encuentran en las esquinas se puede determinar con la Ecuación 2.31, la cual se obtiene a partir de la condición de equilibrio del esquema observado en la Figura N° 2.17. Además, el área de los resortes de concreto en las esquinas se

puede determinar con la Ecuación 2.32.

$${}_cf_{y1} = \frac{N_b}{2} = 0.2BDf'_c \quad (2.31)$$

$$A_1 = \frac{{}_cf_{y1}}{0.85f'_c} \quad (2.32)$$

El área del resorte de concreto que se encuentra en el centro se puede determinar con la Ecuación 2.33 y la fuerza actuante en dicha área se puede determinar con la Ecuación 2.34.

$$A_2 = BD - 4A_1 \quad (2.33)$$

$${}_cf_{y2} = 0.85kf'_cA_2, \quad k = 1.3 \quad (2.34)$$

2.1.2.2 Consideraciones del modelo

Se realizaron las siguientes consideraciones para los modelos estructurales analizados en el programa STERA 3D:

- Las columnas están perfectamente empotradas en el suelo.
- Los modelos poseen diafragma rígido.
- La distribución de la masa del entrepiso se realizará equitativamente en todos los nodos.

2.1.2.3 Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal se realizó en el programa STERA 3D, el objetivo de este análisis es obtener la curva de capacidad y el coeficiente sísmico. Se considerará que la fuerza estática lateral se aplica en el centro de gravedad de los modelos.

2.1.2.4 Análisis dinámico no lineal tiempo historia

La Ecuación 2.35 representa la ecuación del movimiento de una estructura sometida a un movimiento del suelo en las direcciones X e Y.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + f(u) = -M(1_x\ddot{u}_{gx} + 1_y\ddot{u}_{gy}) \quad (2.35)$$

Donde:

- M : Matriz de masas de la estructura
 C : Matriz de amortiguamiento de la estructura
 $f(u)$: Fuerza lateral resistente de la estructura en función del desplazamiento
 1_x : Vector unitario en la dirección X
 1_y : Vector unitario en la dirección Y
 $\ddot{u}$: Vector de aceleración
 $\dot{u}$: Vector de velocidad
 u : Vector de desplazamiento

Se empleará el método numérico de la aceleración promedio (*average acceleration*) para resolver la Ecuación 2.35.

Además, la matriz de amortiguamiento C se calculará con la ecuación de Rayleigh, la cual se muestra en la Ecuación 2.36.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (2.36)$$

Los coeficientes a_0 y a_1 se pueden determinar con las Ecuaciones 2.37 y 2.38.

$$a_0 = \frac{2w_1 w_2 (w_1 h_2 - w_2 h_1)}{w_1^2 - w_2^2} \quad (2.37)$$

$$a_1 = \frac{2(w_1 h_2 - w_2 h_1)}{w_1^2 - w_2^2} \quad (2.38)$$

Donde:

- w_1 y w_2 : Frecuencias circulares de los dos primeros modos de vibración
 h_1 y h_2 : Fracciones de amortiguamiento de los dos primeros modos de vibración ($h_1 = h_2 = 0.05$)

2.1.3 Métodos de procesamiento de señales

2.1.3.1 Integración numérica: método de la aceleración promedio

En este método se considera que la variación de la aceleración en un paso de tiempo es constante e igual a la aceleración promedio (Chopra, 2020). En la Figura

N° 2.18 se puede observar de forma gráfica lo mencionado anteriormente. Además, lo mostrado en la gráfica se puede expresar con la Ecuación 2.39.

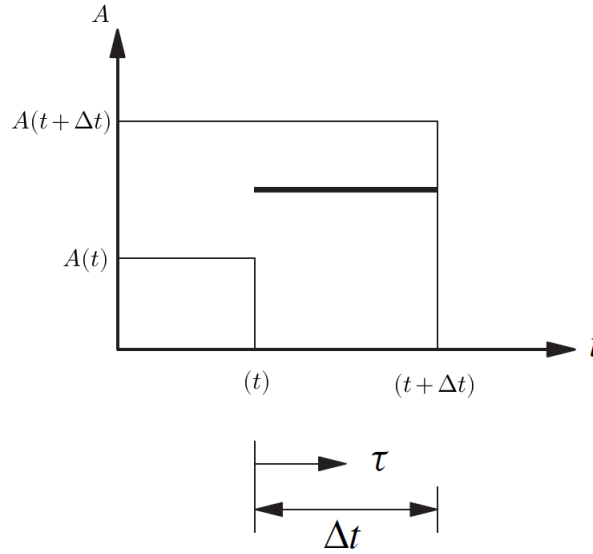


FIGURA N° 2.18: Aceleración promedio constante. Chopra (2020)

$$A(\tau) = \frac{1}{2} (A(t) + A(t + \Delta t)) \quad (2.39)$$

Si se tiene un registro de aceleraciones A de N puntos que varía en función del tiempo t con un intervalo de muestreo Δt , se pueden calcular las funciones de velocidad y desplazamiento utilizando las Ecuaciones 2.40 y 2.41 (Shibata, 2010).

$$V(t + \Delta t) \approx V(t) + \frac{1}{2} (A(t) + A(t + \Delta t)) \Delta t \quad (2.40)$$

$$D(t + \Delta t) \approx D(t) + V(t) \Delta t + \frac{1}{4} (A(t) + A(t + \Delta t)) \Delta t^2 \quad (2.41)$$

2.1.3.2 Diferencias finitas

Según Kincaid y Cheney (1991) la diferenciación numérica de una función y se puede expresar a partir de la definición de su derivada según la Ecuación 2.42. El error de este método es proporcional a h ($O(h)$), considerando que el valor de h tiende a cero.

$$y'(x) \approx \frac{y(x+h) - y(x)}{h} \quad (2.42)$$

- Diferencias finitas centrales

Según Kincaid y Cheney (1991) un método superior al presentado en la Ecuación

ción 2.42 es el método de diferencias finitas centrales (ver Ecuación 2.43). El error de este método es proporcional a h^2 ($O(h^2)$).

$$y'(x) \approx \frac{y(x+h) - y(x-h)}{2h} \quad (2.43)$$

Además, la segunda derivada de la función y se puede calcular según la Ecuación 2.44.

$$y''(x) \approx \frac{y(x+h) - 2y(x) + y(x-h)}{h^2} \quad (2.44)$$

- Diferenciación de funciones en el dominio del tiempo

Según Bathe (1996) el método de diferencias finitas centrales puede ser efectivo para el cálculo de velocidades y aceleraciones a partir de un registro de desplazamientos. Considerando que la función y representa un registro de desplazamientos D de N puntos que varía en función del tiempo t . Donde, el incremento del intervalo h se puede reemplazar por el intervalo de muestreo Δt . Las ecuaciones 2.43 y 2.44 se pueden expresar de la siguiente manera:

$$D'(t) \approx \frac{D(t+\Delta t) - D(t-\Delta t)}{2\Delta t} \quad (2.45)$$

$$D''(t) \approx \frac{D(t+\Delta t) - 2D(t) + D(t-\Delta t)}{\Delta t^2} \quad (2.46)$$

Considerando que la función velocidad se define como $V(t) = D'(t)$ y la función aceleración se define como $A(t) = D''(t)$, estas dos funciones se pueden calcular utilizando las Ecuaciones 2.47 y 2.48.

$$V(t) \approx \frac{D(t+\Delta t) - D(t-\Delta t)}{2\Delta t} \quad (2.47)$$

$$A(t) \approx \frac{D(t+\Delta t) - 2D(t) + D(t-\Delta t)}{\Delta t^2} \quad (2.48)$$

2.1.3.3 Análisis de Fourier

Según Shibata (2010), este método nos permite conocer el contenido de frecuencias de una función que varía en el tiempo $y(t)$ a partir de su descomposición en componentes simples como $\cos(\omega t)$, $\sin(\omega t)$ y $e^{i\omega t}$. El análisis de Fourier transforma una función del dominio del tiempo en una función en el dominio de la frecuencia (Shibata, 2010).

- Transformada finita de Fourier

Método usado para funciones discretas no periódicas, en la cual se considera que la función no periódica $y(t)$ tiene un periodo infinito ($T \rightarrow \infty$).

$$C_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_k e^{-i \frac{2\pi n}{N} k} \quad (2.49)$$

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} C_n e^{i \frac{2\pi n}{N} k} \quad (2.50)$$

Donde:

C_n : n -ésimo valor de la transformada finita de Fourier de la función $y(t)$

y_k : k -ésimo valor de la función $y(t)$

N : número de datos de la función $y(t)$

Con la Ecuación 2.49 se puede calcular la transformada finita de Fourier de la función $y(t)$. Se puede notar que la onda $y(t)$ puede ser expresada como una combinación de las componentes vibratorias $e^{i \frac{2\pi n}{N} k}$, las cuales tienen una amplitud igual a C_n . El módulo de C_n permite conocer el peso que tiene cada una de las ondas $e^{i \frac{2\pi n}{N} k}$ de frecuencia f_n en la composición de la onda $y(t)$. La frecuencia f_n se puede calcular con la Ecuación 2.51.

$$f_n = \frac{n}{N \Delta t} \quad (2.51)$$

Donde:

f_n : frecuencia del término C_n

2.1.3.4 Transformada de ondículas

Según las investigaciones de Jaramillo et al. (2023), la transformada de wavelet es un método de análisis que se basa en el uso de ondas de duración finita, conocidas como ondículas (*wavelets*). Este método implica la comparación de una señal con versiones escaladas y desplazadas de una ondícula madre. Esta característica permite un análisis más efectivo de señales no estacionarias en comparación con el análisis de Fourier, como se destacó en el estudio realizado por Jaramillo et al. (2023).

- Transformada discreta de ondículas

Una señal discreta $y(t)$ de N puntos que varía en función del tiempo t con un intervalo de muestreo dt , puede ser descompuesta mediante la DWT (*discrete wavelet transform*) en n sub-señales sucesivas g_i (coeficientes de detalle) y sus residuos f_i (coeficientes de aproximación), donde n es el resultado de redondear la expresión $\log_2(N)$, con lo cual se definen los rangos $i = 1, 2, \dots, n$ (Jaramillo et al., 2023). Según Jaramillo et al. (2023) cada una de estas sub-señales está asociada con una frecuencia de Nyquist $f_{s,i}$ para el rango i la cual se define como se muestra en la Ecuación 2.52.

$$f_{s,i} = \frac{2^{-i}}{2dt} \quad (2.52)$$

Los coeficientes g_i y f_i pueden ser calculados mediante las Ecuaciones 2.53 y 2.54 respectivamente (Jaramillo et al., 2023).

$$g_i = \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^i x - k) \quad (2.53)$$

$$f_i = \sum_k c_k^{(j)} \phi(2^i x - k) \quad (2.54)$$

Donde:

$d_k^{(j)}$: secuencia de coeficientes para g_i

$c_k^{(j)}$: secuencia de coeficientes para f_i

$\psi(x)$: ondícula madre

$\phi(x)$: función de escalamiento

En esta investigación, se utilizó la familia B-Spline de orden 4 como ondícula madre y función de escalamiento, las cuales se muestran en la Figura N° 2.19.

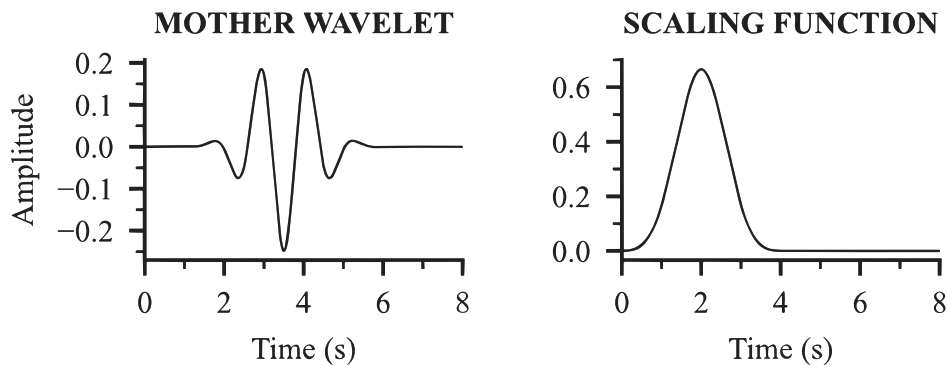


FIGURA N° 2.19: Ondícula madre y función de escalamiento de la familia B-Spline de orden 4. Jaramillo et al. (2023)

Si se aplica la DWT a la señal y , los coeficientes g_1 y f_1 obtenidos corresponden al rango $i = 1$. Cada uno de estos coeficientes tiene $N/2$ datos, g_2 y f_2 son obtenidos para el rango $i = 2$ al aplicar la DWT a f_1 , así sucesivamente, la DWT puede ser aplicada n veces, en donde en cada aplicación la cantidad de datos es reducida a la mitad (Jaramillo et al., 2023). Luego de obtener los coeficientes g_i y f_i , la señal original y puede ser reconstruida como se muestra en la Ecuación 2.55.

$$y = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n + f_n \quad (2.55)$$

Según Jaramillo et al. (2023) una ventaja significativa de este método radica en la capacidad de conocer las componentes g_i y f_i de la señal original y después de aplicar la DWT. Esto permite calcular las integrales de cada componente de manera independiente. Posteriormente, se tiene la flexibilidad de eliminar cualquiera de estas componentes luego de evaluar sus contenidos de frecuencias.

Es importante destacar que las componentes de baja y alta frecuencia pueden introducir errores al calcular los desplazamientos a partir de las aceleraciones mediante la doble integración. La elección de qué componentes eliminar dependerá tanto de la frecuencia natural de la estructura bajo monitoreo como de su respuesta ante un evento sísmico.

2.1.4 Métricas de rendimiento de modelos de predicción

Para evaluar el rendimiento de los modelos o algoritmos de predicción, es esencial utilizar métricas de evaluación que comparen los valores originales y con los predichos $\hat{y}$, algunas de las cuales se presentan a continuación:

2.1.4.1 Error cuadrático medio

El error cuadrático (MSE por sus siglas en inglés) medio se puede calcular usando la Ecuación 2.56 (Raschka et al., 2022).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2 \quad (2.56)$$

Donde:

$y^{(i)}$: valor original o medido

$\hat{y}^{(i)}$: valor predicho o calculado

2.1.4.2 Raíz del error cuadrático medio

La raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) se puede calcular tomando la raíz cuadrada del MSE como se muestra en la Ecuación 2.57. (Raschka et al., 2022).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2} \quad (2.57)$$

También es posible calcular el RMSE normalizado (NRMSE) con el objetivo de expresar el rendimiento en términos porcentuales utilizando la Ecuación 2.58.

$$NRMSE = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2} \right) / w \quad (2.58)$$

Donde:

w : longitud del intervalo de datos $w = \text{máx}(y) - \text{mín}(y)$

2.1.4.3 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (R^2), denotado como R^2 , se puede calcular mediante la Ecuación 2.59. Los valores de R^2 pueden variar en un rango de 0 a 1, donde un valor de R^2 igual a 1 indica que los datos predichos o calculados se ajustan perfectamente a los datos originales o medidos (Raschka et al., 2022).

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.59)$$

Donde:

SSE : suma de cuadrados de los errores $\sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)})^2$

SST : suma total de cuadrados o varianza $\sum_{i=1}^n (y^{(i)} - \mu_y)^2$

μ_y : media de los datos medidos

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 Centro de rigidez

Según Kumar et al. (2017) el centro de rigidez es el punto en cierto piso de un edificio donde si este punto coincide con el punto de aplicación de las fuerzas laterales, éstas no producirían la rotación del piso.

2.2.2 Centro de masa

Según Kumar et al. (2017) “el centro de masa es un punto definido como la posición promedio de todas las partes de un sistema, ponderados según sus masas”

2.2.3 Excentricidad

Cheung y Tso (1986) definen a la excentricidad estructural como la distancia entre el centro de rigidez en cada nivel y la resultante de las fuerzas laterales en cada nivel.

2.2.4 Monitoreo de la salud estructural

Según Ren (2020) el Monitoreo de la Salud Estructural implica un conjunto de técnicas que permiten el monitoreo continuo del estado de las edificaciones ante movimientos sísmicos, estas técnicas; en las cuales se suelen emplear sensores como los acelerómetros, permiten un conocimiento profundo de la ubicación y severidad de los daños que puedan presentar las edificaciones.

2.2.5 Respuesta sísmica de un edificio

Según Barkhordari y Tehranizadeh (2020) la respuesta estructural, que puede deberse a fuerzas sísmicas (respuesta sísmica), se ve reflejada en la aceleración, las distorsiones de entrepiso, los desplazamientos laterales, las velocidades y la fuerza cortante en la base de la edificación.

2.2.6 Curva de capacidad

La curva de capacidad cuantifica la resistencia de la edificación a la fuerza lateral y representa la relación entre la fuerza cortante basal y el desplazamiento relativo del entrepiso (Pujades et al., 2015).

2.2.7 Coeficiente sísmico

También denominado coeficiente de cortante basal o coeficiente de fuerza lateral, usado por las normas de diseño sismorresistente para representar el coeficiente que multiplica al peso de la edificación para obtener la fuerza cortante basal (Chopra, 2020). Este valor se obtiene de la curva de capacidad.

2.2.8 Machine learning

Según Géron (2019) “Machine learning es la ciencia de programar computadoras para que puedan aprender a partir de datos”; es decir, un modelo de machine learning

ning tiene la capacidad de aprender para luego predecir resultados a partir de una serie de datos que sirven como entrenamiento para el algoritmo.

2.2.9 Datos de entrenamiento y de prueba de un modelo de machine learning

Según Géron (2019), un modelo de machine learning tiene la capacidad de aprender de los datos. Este aprendizaje se logra a partir de su entrenamiento mediante un porcentaje de la información disponible, estos datos son denominados como datos de entrenamiento (*train data*).

El porcentaje restante de la información se usa con el fin de validar los resultados de predicción del modelo entrenado. Estos datos son denominados como datos de prueba (*test data*).

CAPÍTULO III: SIMULACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo se realizó el análisis de modelos simplificados de 3 grados de libertad con excentricidad en una sola dirección. En primer lugar, se definirán los registros sísmicos para las simulaciones numéricas. Luego, se establecerán las características de los modelos numéricos a simular: altura, longitud, ancho, peso sísmico, la configuración estructural y las dimensiones de los elementos estructurales. Posteriormente, se definirán los parámetros estructurales y sísmicos que serán estudiados para cada uno de los modelos creados ante múltiples eventos sísmicos. Finalmente, se realizarán los análisis no lineales tiempo historia y a partir de los resultados obtenidos se establecerá una base de datos con los parámetros definidos previamente para el desarrollo del algoritmo de predicción.

3.1 REGISTROS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

En este estudio se tomaron en cuenta 14 eventos sísmicos como base. Estos eventos corresponden a diferentes años y zonas del Perú. La variedad de eventos considerados se debe a que se necesita una amplia base de datos para el entrenamiento del modelo de predicción del grado de irregularidad torsional. Cada evento sísmico consta de 2 registros de aceleraciones horizontales, haciendo un total de 28 señales sísmicas. Además, a partir de estos 28 registros, mediante el uso de 10 factores de amplificación, se generaron 280 señales para realizar los análisis dinámicos. En este estudio no se consideró la simultaneidad de las componentes de los sismos, por ello se consideraron como registros independientes cada una de las componentes horizontales.

3.1.1 Corrección de registros

3.1.1.1 Corrección de registros por filtro pasa banda

Para la corrección de los registros sísmicos se empleó el método de la Transformada Finita de Fourier y el filtro pasa banda de Butterworth. En la corrección se eliminaron las componentes de la señal con frecuencias menores a 0.10 Hz y mayores a 25 Hz. Este rango se definió con el objetivo de no considerar señales con frecuencias que no son propias del sismo, sino de ruidos ambientales o del propio equipo de medición.

3.1.2 Registros sísmicos corregidos

Desde la Figura N° 3.6 a la Figura N° 3.8 se muestran los registros sísmicos de aceleraciones corregidos por filtro de pasa banda, donde g es la aceleración de la

gravedad, PGA es la máxima aceleración absoluta del registro sísmico y f_{gy} es su frecuencia predominante.

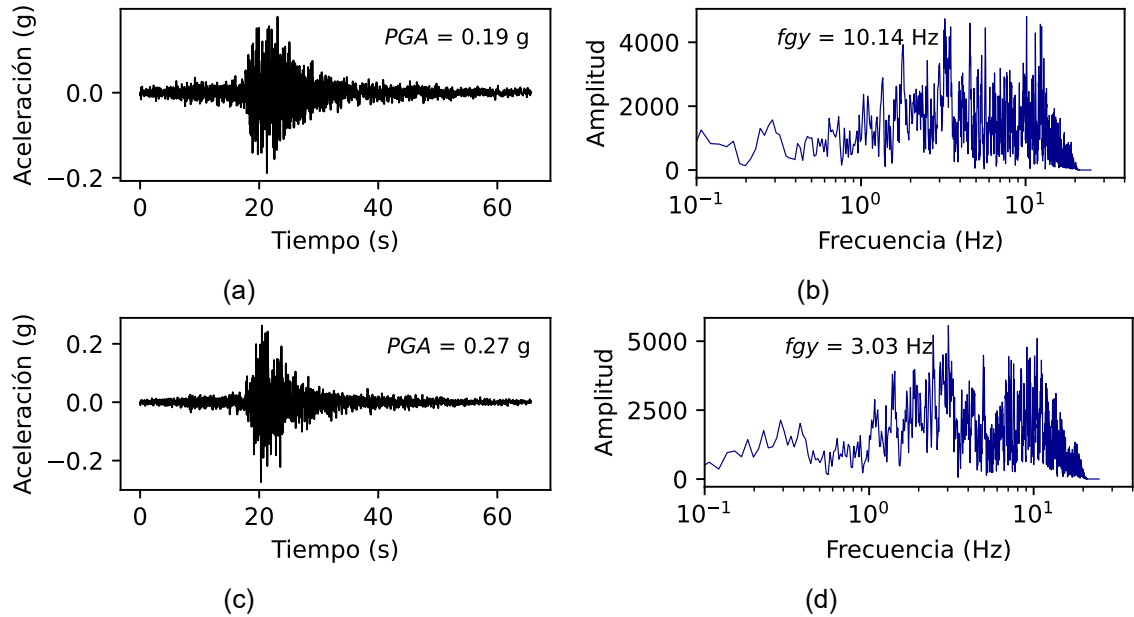


FIGURA N° 3.1: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva PRQ 17/10/1966: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

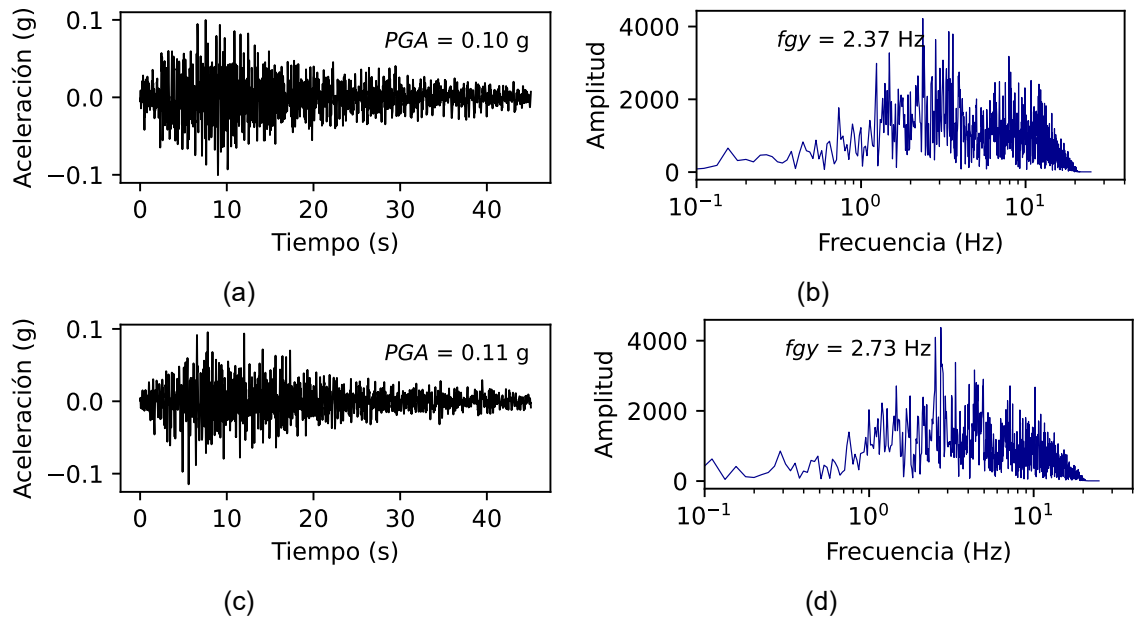


FIGURA N° 3.2: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva PRQ 31/05/1970: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

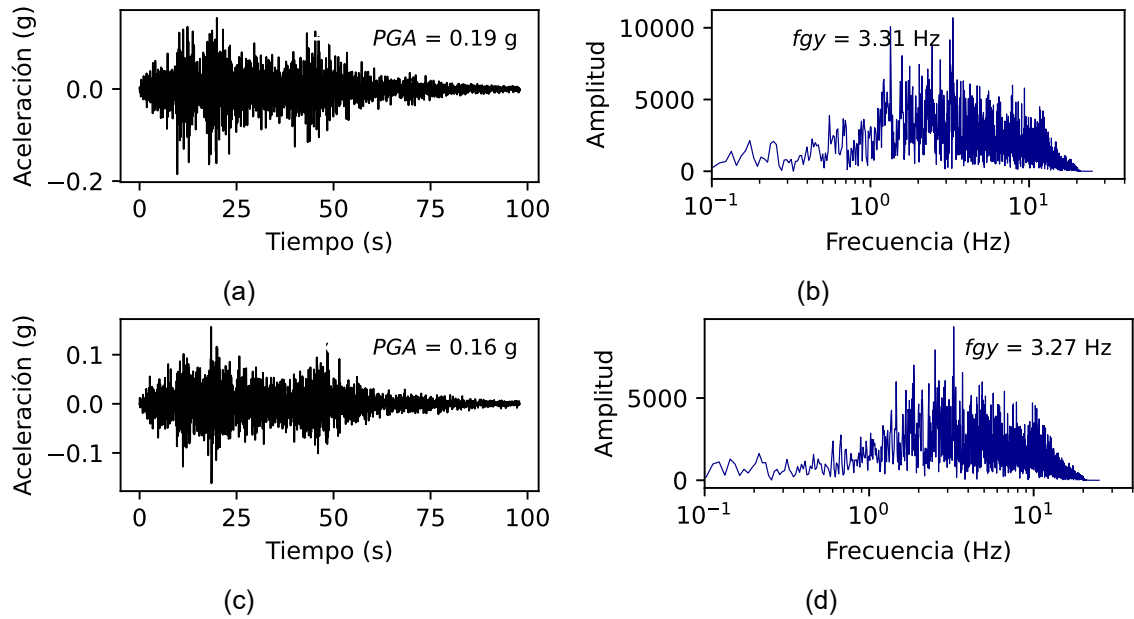


FIGURA N° 3.3: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva PRQ 03/10/1974: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

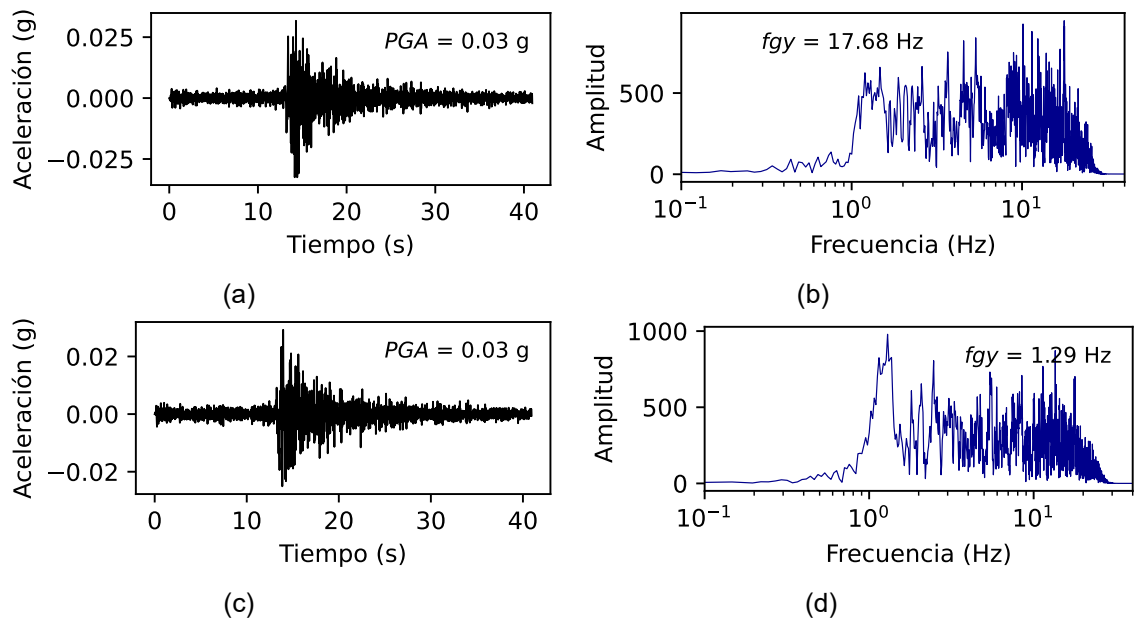


FIGURA N° 3.4: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Parque de la Reserva LIM005 29/04/1991: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

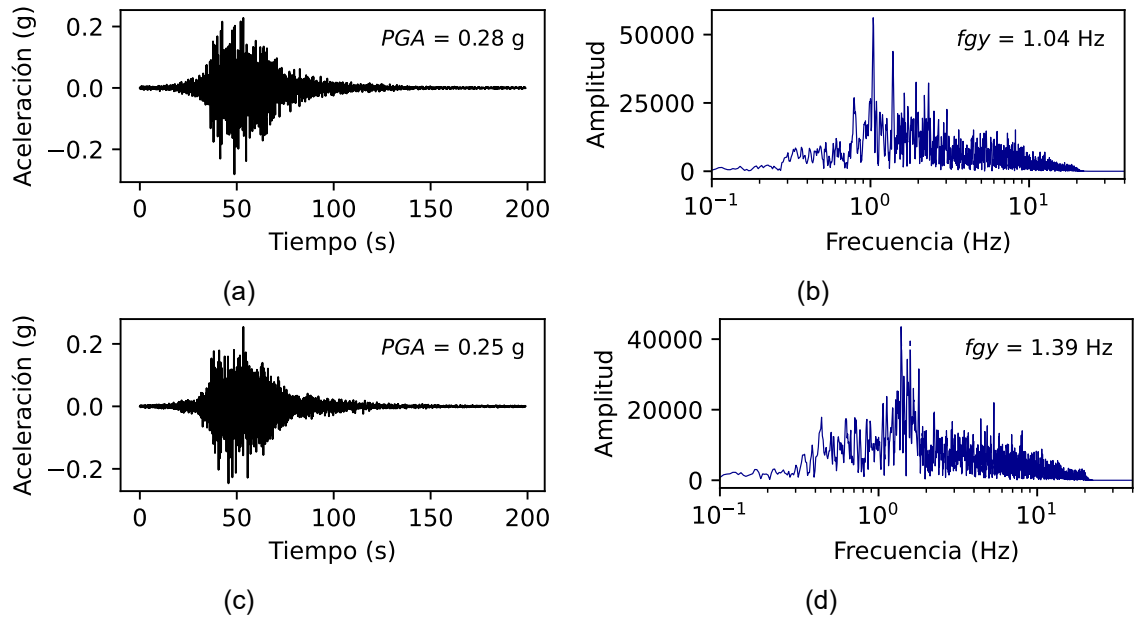


FIGURA N° 3.5: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación César Vizcarra Vargas
MOQ001 23/06/2001: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d)
contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

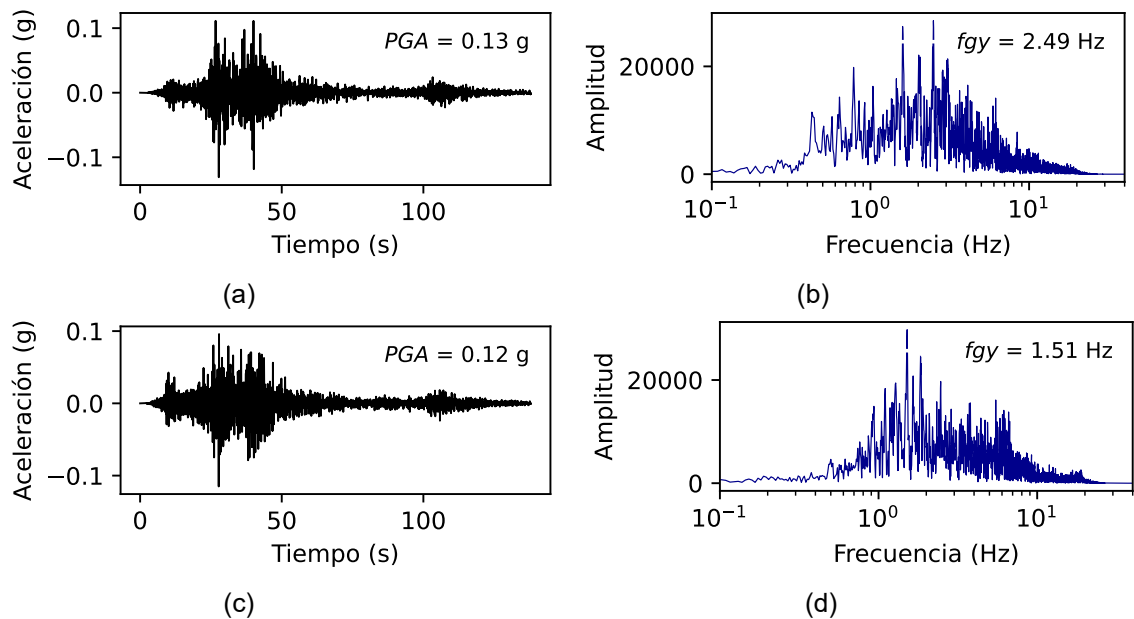


FIGURA N° 3.6: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación UNSA AQP001 07/07/2001:
(a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS.
CISMID (s.f.)

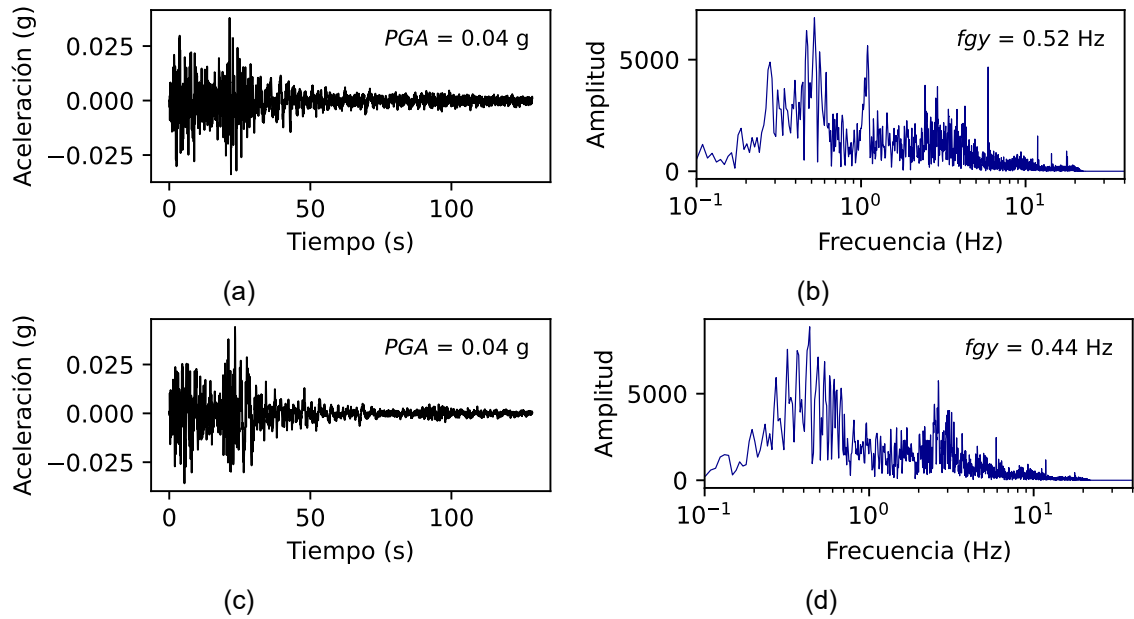


FIGURA N° 3.7: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Jorge Basadre Grohmann University TAC001 07/07/2001: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

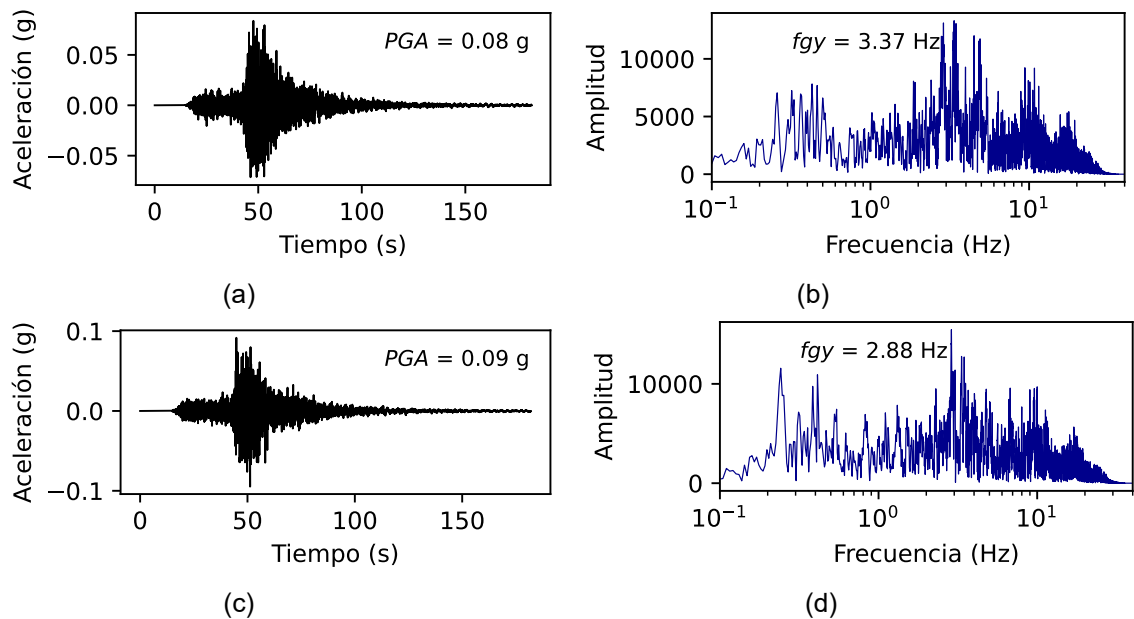


FIGURA N° 3.8: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Jorge Basadre Grohmann University TAC001 13/06/2005: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

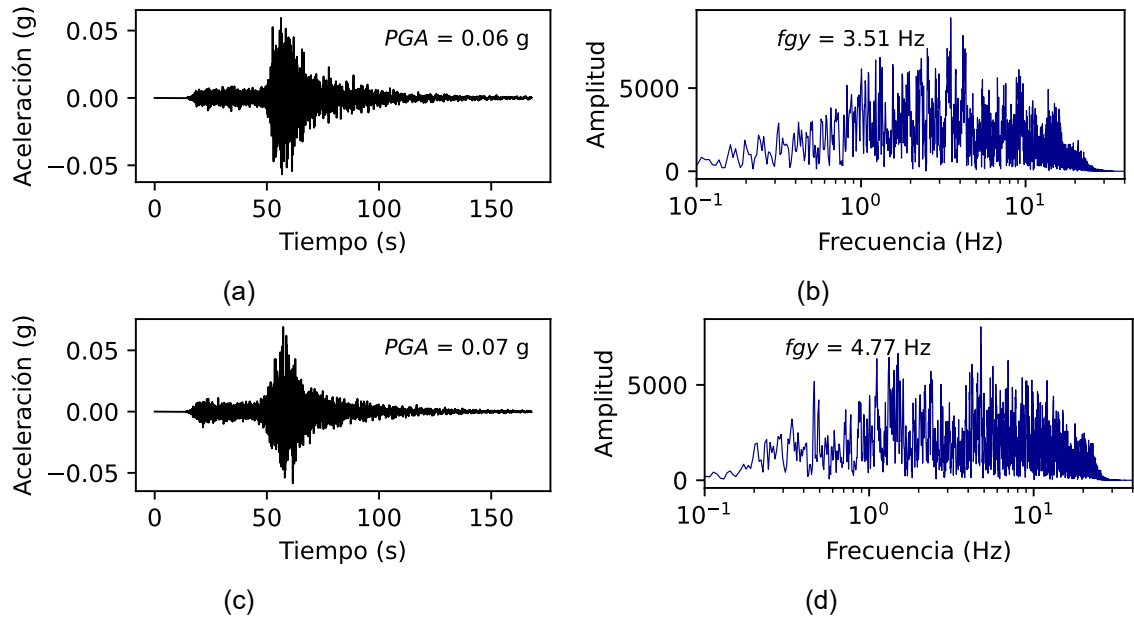


FIGURA N° 3.9: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación César Vizcarra Vargas MOQ001 13/06/2005: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

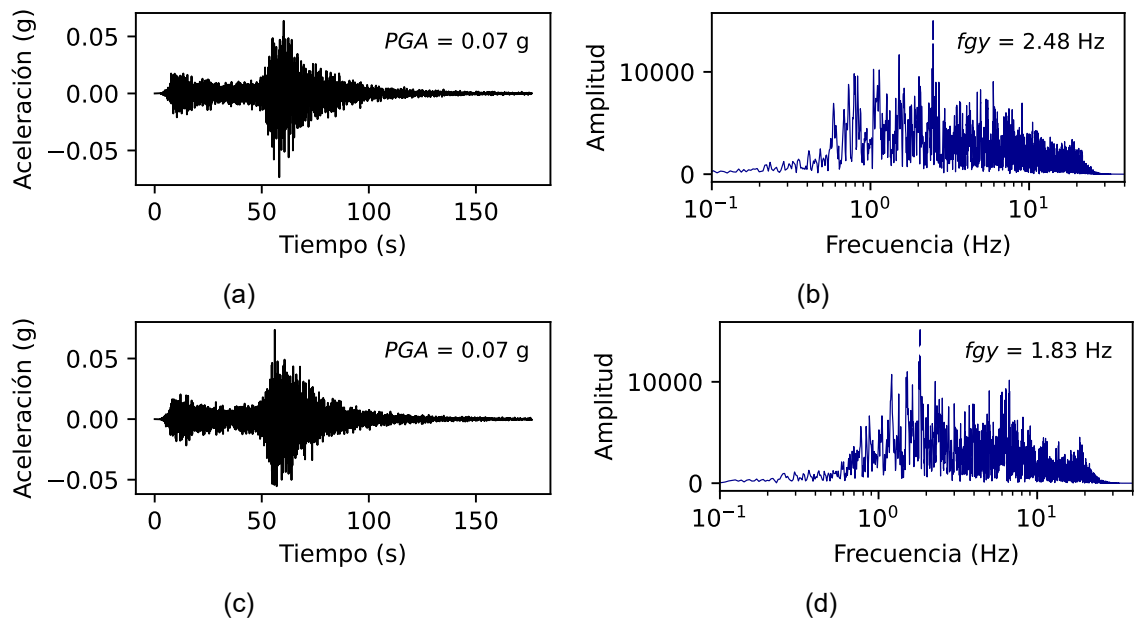


FIGURA N° 3.10: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación UNSA AQP001 13/06/2005: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

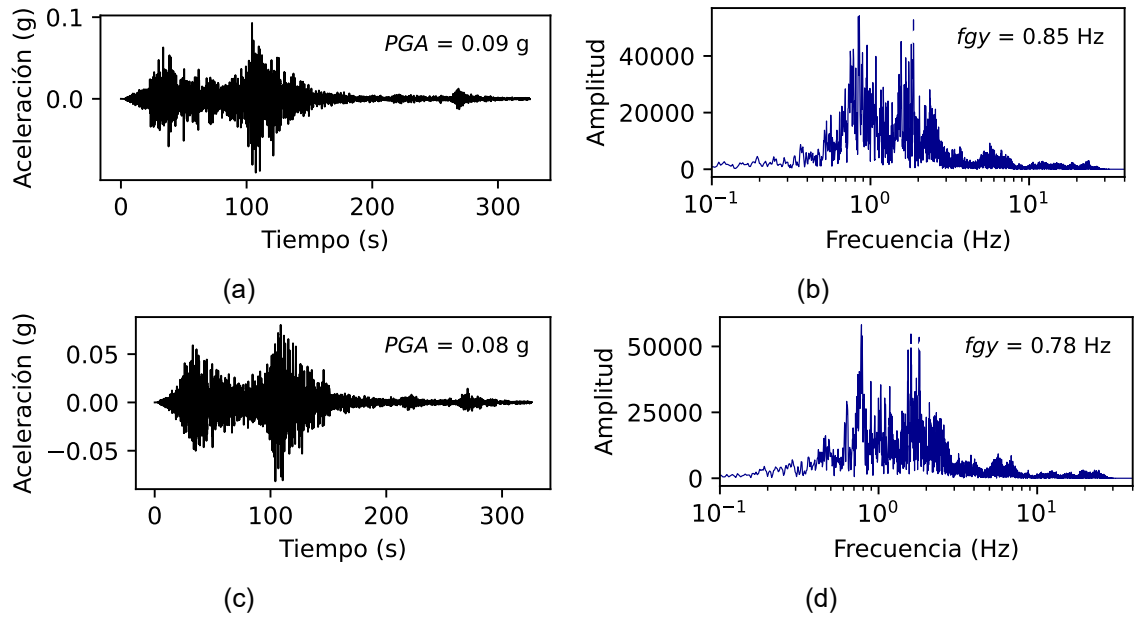


FIGURA N° 3.11: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Dirección de Hidrografía y Navegación CAL001 15/08/2007: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

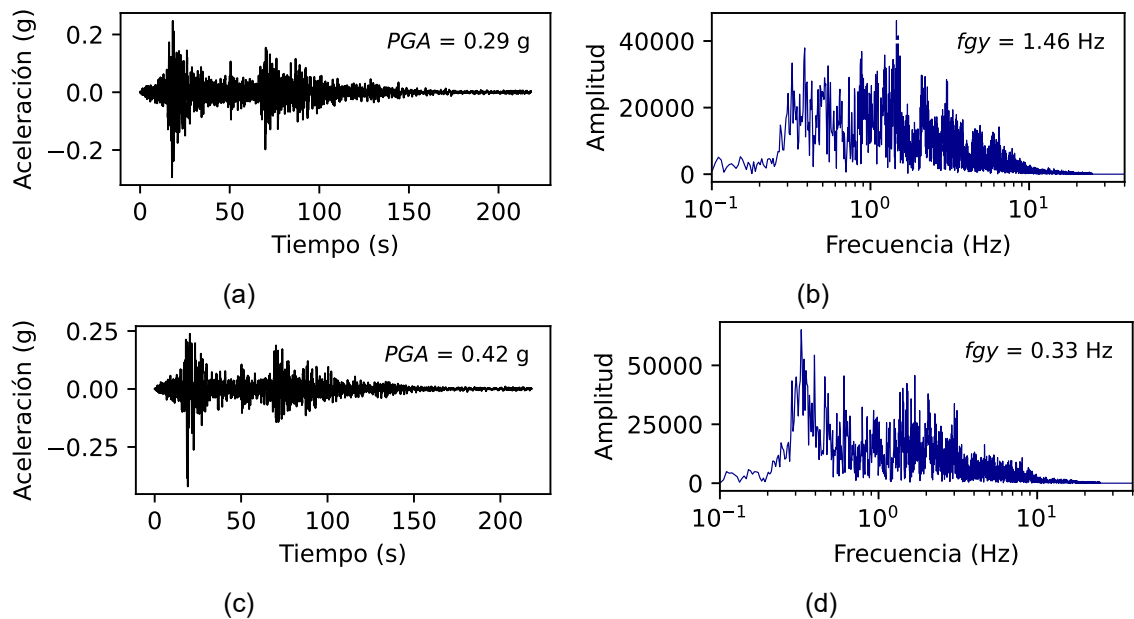


FIGURA N° 3.12: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación UNICA ICA002 15/08/2007: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

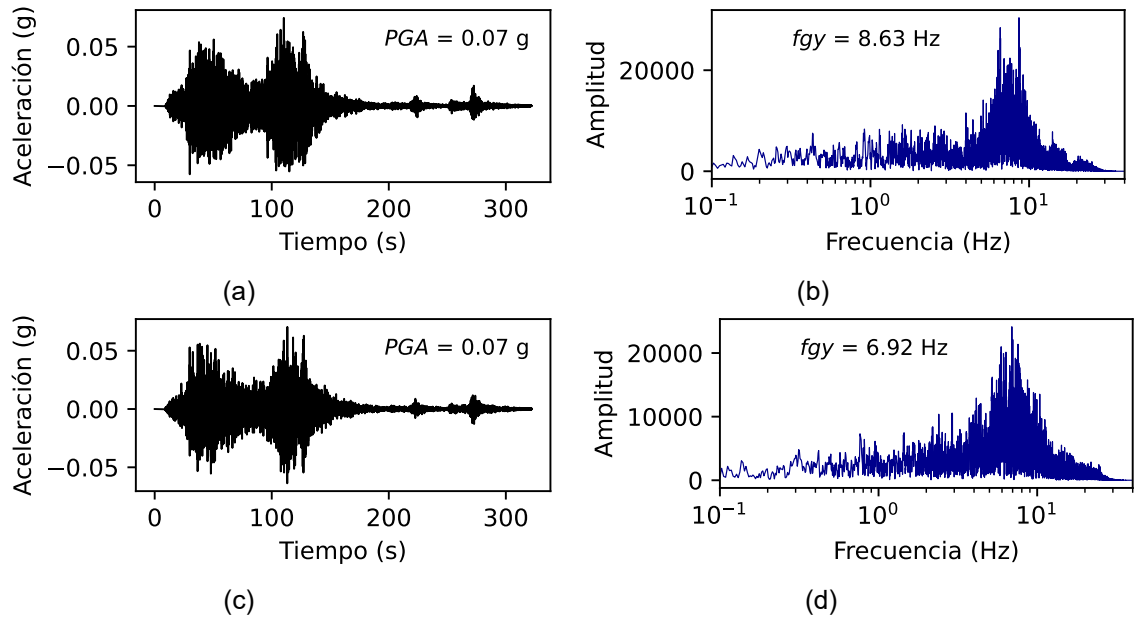


FIGURA N° 3.13: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación Casa Dr. Piqué LIM004 15/08/2007: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

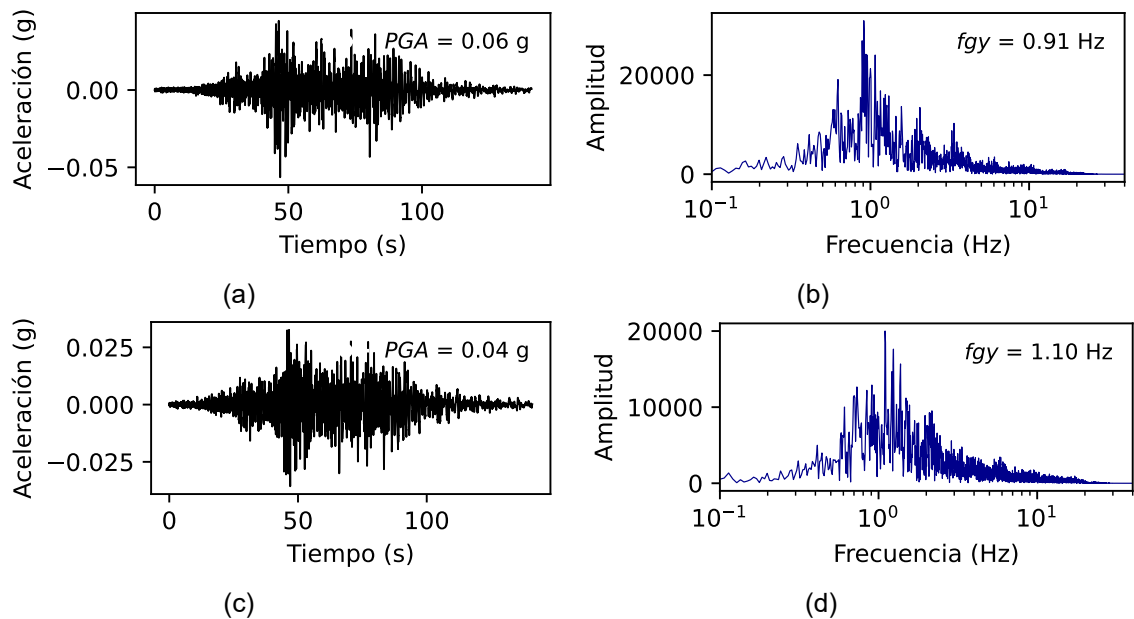


FIGURA N° 3.14: Registro sísmico de aceleraciones corregido, estación César Vizcarra Vargas MOQ001 01/04/2014: (a) registro EO, (b) contenido de frecuencias EO, (c) registro NS, (d) contenido de frecuencias NS. CISMID (s.f.)

Los 28 registros sísmicos base empleados en esta investigación fueron tomadas de la página web del CEOIS. En la Tabla N° 3.1 se puede observar un resumen de los registros utilizados, donde se muestra la ubicación y fecha de ocurrencia

del evento, estación de registro y el PGA en las direcciones Este-Oeste (EO) y Norte-Sur (NS).

TABLA N° 3.1: Registros sísmicos base.

Ubicación	Fecha de ocurrencia	Nombre de la estación	PGA (<i>g</i>)	
			EO	NS
Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima	17 de octubre, 1966	Parque de la Reserva	0.19	0.27
Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima	31 de mayo, 1970	Parque de la Reserva	0.10	0.11
Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima	03 de octubre, 1974	Parque de la Reserva	0.19	0.16
Parque de la Reserva, Cercado de Lima, Lima	29 de abril, 1991	Parque de la Reserva	0.03	0.03
Complejo Deportivo Rolando Catacora, Moquegua, Mariscal Nieto	23 de junio, 2001	César Vizcarra Vargas	0.28	0.25
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Arequipa	07 de julio, 2001	Estación UNSA	0.13	0.12
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Tacna	07 de julio, 2001	Jorge Basadre Grohmann University	0.04	0.04
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Tacna	13 de junio, 2005	Jorge Basadre Grohmann University	0.08	0.09
Complejo Deportivo Rolando Catacora, Moquegua, Mariscal Nieto	13 de junio, 2005	César Vizcarra Vargas	0.06	0.07
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Arequipa	13 de junio, 2005	Estación UNSA	0.07	0.07
Dirección de Hidrografía y Navegación, La Punta, Callao	15 de agosto, 2007	Dirección de Hidrografía y Navegación	0.09	0.08
Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica, Ica	15 de agosto, 2007	UNICA	0.29	0.42
Casa del Dr. Javier Piqué, La Molina, Lima	15 de agosto, 2007	Casa Dr. Piqué	0.07	0.07
Complejo Deportivo Rolando Catacora, Mariscal Nieto	01 de abril, 2014	César Vizcarra Vargas	0.06	0.04

Debido a que se desea conocer la respuesta de las estructuras con irregularidad torsional ante múltiples escenarios, se escalaron los registros sísmicos por 10 factores enteros de amplificación (del 1 al 10) con el objetivo de modificar sus PGAs, obteniendo un total de 280 señales sísmicas. Estos 280 registros se emplearán para realizar el análisis dinámico no lineal tiempo historia en el software STERA 3D.

3.2 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS

Se estructuraron 36 modelos simplificados de 3 grados de libertad, los grados de libertad considerados se pueden observar en la Figura N° 3.15. Los modelos simplificados representan a una estructura de concreto armado de 1 solo nivel con 2 pórticos en las direcciones X e Y.

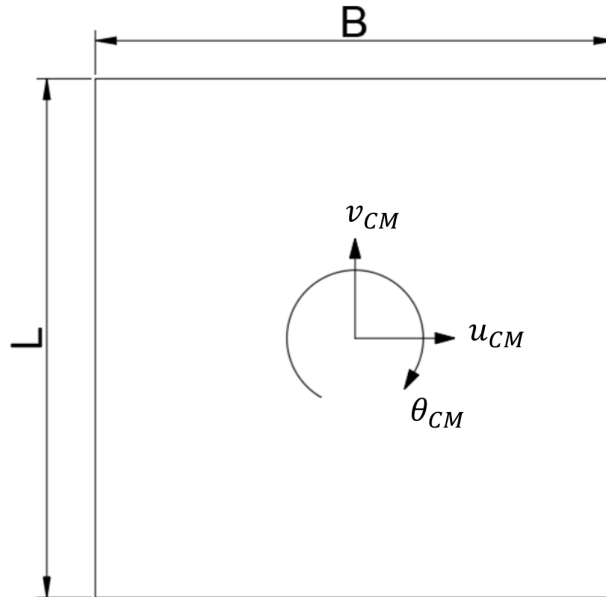


FIGURA N° 3.15: Vista en planta de los 3 grados de libertad de los modelos simplificados.

Con el objetivo de generar la excentricidad en los modelos estructurales, se consideraron 2 pórticos diferentes en la dirección Y para cada modelo. Con esta consideración se induce una excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez en la dirección X (e_x) como se muestra en la Figura N° 3.16b.

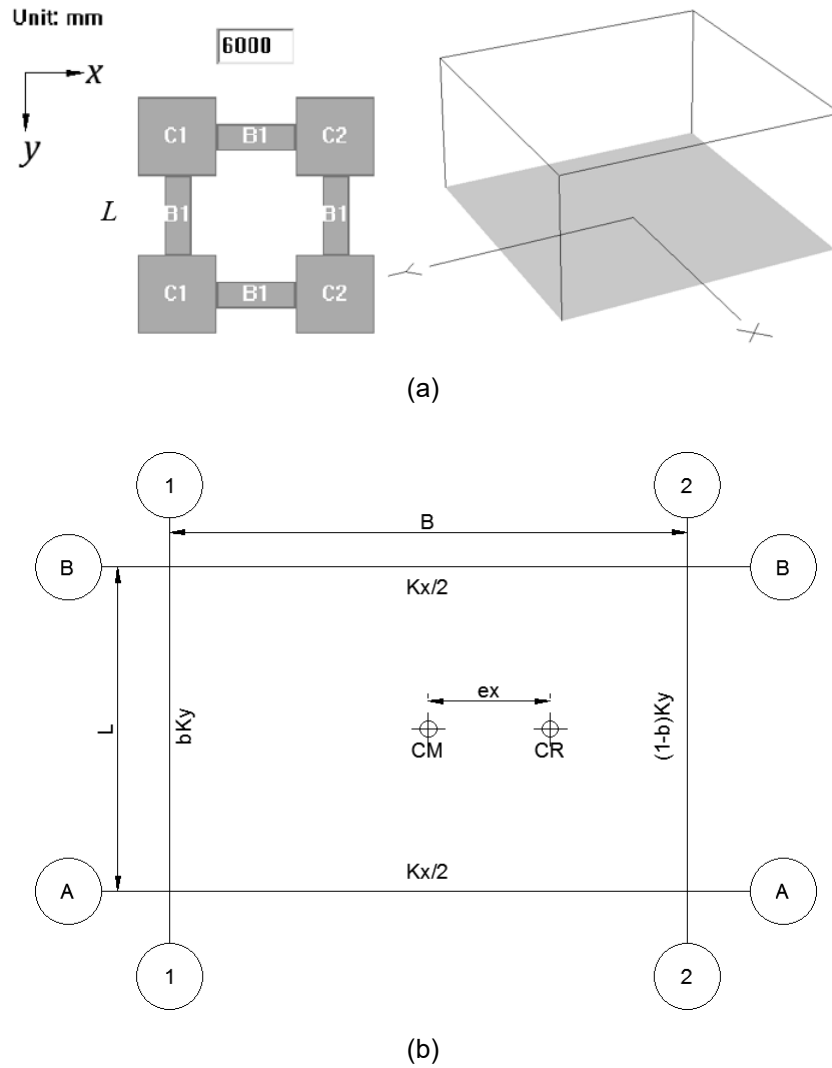


FIGURA N° 3.16: Configuración estructural del modelo simplificado: (a) vista en planta y tridimensional de los elementos estructurales del modelo simplificado, (b) vista en planta de la excentricidad generada para el modelo simplificado en la dirección X.

Donde:

K_y : Rigidez total de la estructura en la dirección Y

K_x : Rigidez total de la estructura en la dirección X

e_x : Excentricidad de la estructura en la dirección X

Se definieron las dimensiones de los 36 modelos simplificados manteniendo el ancho $B = 6m$ constante y modificando la longitud L desde $2.5m$ hasta $6m$ cada $0.1m$. Para definir las secciones de las vigas y las columnas se analizó la capacidad máxima de los modelos mediante análisis no lineales estáticos. Se buscó que los modelos alcancen un coeficiente sísmico que cumpla la restricción de la Ecuación 3.1.

$$0.1 < \frac{Q_i}{W} < 0.6 \quad (3.1)$$

En la Figura N° 3.17 se muestra el coeficiente sísmico Q_i/W para el modelo N° 6 (ver características del modelo en la Tabla N° 3.3) y se observa que cumple con las restricciones planteadas en la Ecuación 3.1.

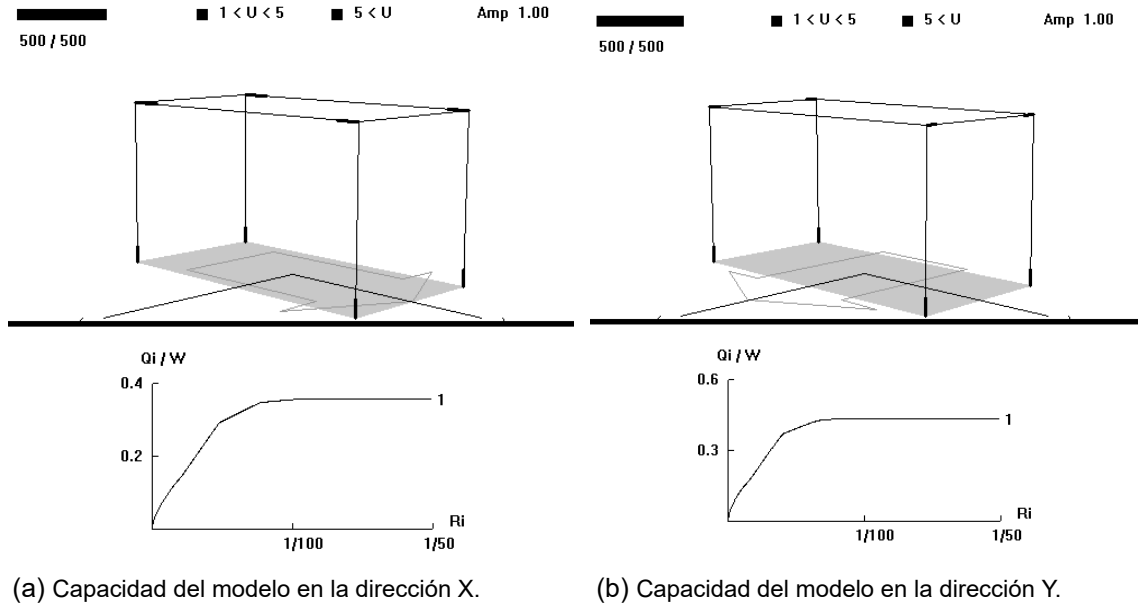


FIGURA N° 3.17: Capacidad y coeficientes sísmicos del modelo.

Las secciones de vigas y columnas que permiten obtener un coeficiente sísmico para los modelos que cumplan con la Ecuación 3.1 se muestran en la Tabla N° 3.2. Esto permitirá que los modelos incurrieren en el rango no lineal al ser sometidos a los registros sísmicos descritos en el capítulo 3. El peralte de las vigas se estimó considerando $h = L/10 = 60\text{cm}$.

TABLA N° 3.2: Propiedades de las secciones de vigas y columnas.

Elemento	b (cm)	h (cm)	$f'_c \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$	$f_y \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right)$
C1	30	30	280	4200
C2	30	60		
B1	30	60		

Con las secciones de las vigas y columnas definidas se calcularon las demás propiedades de cada uno de los modelos que se muestran en la Tabla N° 3.3. Además, en esta tabla se muestran los coeficientes sísmicos obtenidos para cada uno de los 36 modelos en las direcciones X e Y.

TABLA N° 3.3: Dimensiones y parámetros de los modelos.

N° de modelo	B (m)	L (m)	$\frac{e_x}{B}$	$\left(\frac{L}{B}\right)^2$	Peso Sísmico (kN)	$\frac{Q_{ix}}{W}$	$\frac{Q_{iy}}{W}$
1	6	2.5	0.1572	0.17	141.48	0.570	0.590
2	6	2.6	0.1569	0.19	145.43	0.580	0.585
3	6	2.7	0.1565	0.20	149.39	0.562	0.582
4	6	2.8	0.1562	0.22	153.34	0.557	0.577
5	6	2.9	0.1559	0.23	157.30	0.552	0.572
6	6	3	0.1555	0.25	161.25	0.547	0.567
7	6	3.1	0.1552	0.27	165.21	0.542	0.562
8	6	3.2	0.1549	0.28	169.16	0.537	0.557
9	6	3.3	0.1546	0.30	173.12	0.535	0.555
10	6	3.4	0.1543	0.32	177.07	0.530	0.550
11	6	3.5	0.1540	0.34	181.03	0.525	0.545
12	6	3.6	0.1536	0.36	184.99	0.520	0.540
13	6	3.7	0.1533	0.38	188.94	0.513	0.533
14	6	3.8	0.1530	0.40	192.90	0.508	0.528
15	6	3.9	0.1527	0.42	196.85	0.503	0.523
16	6	4	0.1524	0.44	200.81	0.498	0.518
17	6	4.1	0.1521	0.47	204.76	0.493	0.513
18	6	4.2	0.1518	0.49	208.72	0.488	0.508
19	6	4.3	0.1515	0.51	212.67	0.483	0.503
20	6	4.4	0.1512	0.54	216.63	0.478	0.498
21	6	4.5	0.1510	0.56	220.58	0.473	0.493
22	6	4.6	0.1507	0.59	224.54	0.466	0.486
23	6	4.7	0.1504	0.61	228.49	0.461	0.481
24	6	4.8	0.1501	0.64	232.45	0.456	0.476
25	6	4.9	0.1498	0.67	236.41	0.450	0.470
26	6	5	0.1495	0.69	240.36	0.445	0.465
27	6	5.1	0.1493	0.72	244.32	0.440	0.460

N° de modelo	B (m)	L (m)	$\frac{e_x}{B}$	$\left(\frac{L}{B}\right)^2$	Peso Sísmico (kN)	$\frac{Q_{ix}}{W}$	$\frac{Q_{iy}}{W}$
28	6	5.2	0.1490	0.75	248.27	0.435	0.455
29	6	5.3	0.1487	0.78	252.23	0.430	0.450
30	6	5.4	0.1485	0.81	256.18	0.425	0.445
31	6	5.5	0.1482	0.84	260.14	0.420	0.440
32	6	5.6	0.1479	0.87	264.09	0.415	0.435
33	6	5.7	0.1477	0.90	268.05	0.410	0.430
34	6	5.8	0.1474	0.93	272.00	0.403	0.423
35	6	5.9	0.1471	0.97	275.96	0.398	0.418
36	6	6	0.1469	1.00	279.91	0.370	0.390

3.3 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE ESTRUCTURALES Y SÍSMICOS

En esta sección se definirán tres tipos de parámetros: estructurales, sísmicos y de respuesta sísmica. Estos parámetros serán calculados más adelante a partir de los resultados de las simulaciones numéricas con el fin de generar una base de datos para el desarrollo de un algoritmo de predicción del G_{it} .

3.3.1 Parámetros estructurales

Según Ortiz (2019) el grado de irregularidad torsional definido a partir de un análisis estático lineal se puede calcular a partir de la Ecuación 3.3.

$$G_{it} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{CM}} \quad (3.2)$$

$$G_{it} = 1 + \frac{\alpha_k \left(\frac{e_x}{B}\right)}{2f} \quad (3.3)$$

$$f = \frac{1}{4} (\alpha_p^2 + \alpha_k) \quad (3.4)$$

Donde:

G_{it} : Grado de irregularidad torsional

α_p : Razón de lados en planta $\frac{L}{B}$

α_k : Razón de rigideces laterales $\frac{K_y}{K_x}$

Debido a que la Ecuación 3.3 se determina a partir de un análisis estático lineal, esta no se tomará en cuenta para el cálculo del valor de G_{it} , ya que, en esta investigación se desea considerar el comportamiento dinámico no lineal de las estructuras. Sin embargo, esta ecuación permite establecer una relación entre el G_{it} y parámetros como el cuadrado de la razón de lados en planta $\alpha_p^2 = \left(\frac{L}{B}\right)^2$ y la razón de rigideces laterales $\alpha_k = \frac{K_y}{K_x}$. Con el fin de simplificar los cálculos de las rigideces laterales, se calculará esta última relación en función de los periodos de vibración de la estructura.

El periodo de vibración lateral para una estructura se puede calcular con las Ecuaciones 3.5 y 3.6 para cada dirección de análisis:

$$T_x = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_x}} \quad (3.5)$$

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_y}} \quad (3.6)$$

A partir de las Ecuaciones 3.5 y 3.6 se obtiene la Ecuación 3.7, en la cual se tiene la razón de rigideces laterales en función de los periodos de vibración de la estructura:

$$\frac{k_y}{k_x} = \left(\frac{T_x}{T_y}\right)^2 \quad (3.7)$$

Finalmente, se consideraron como parámetros estructurales al cuadrado de la razón de lados $(L/B)^2$ y al cuadrado de la relación de periodos laterales $(T_{x,est}/T_{y,est})^2$.

3.3.2 Parámetros sísmicos

Se consideraron como parámetros sísmicos a la aceleración máxima del sismo (PGA) y al periodo predominante del registro sísmico ($T_{y,sismo}$) el cual es igual a la inversa de la frecuencia predominante (fgy).

3.3.3 Parámetros de respuesta sísmica

Se consideraron como parámetros de respuesta sísmica a los desplazamientos laterales máximos del centro de masa en las direcciones Y ($d_{y,CM}$) y X ($d_{x,CM}$), y a la aceleración máxima de entrepiso del centro de masa Y ($a_{y,CM}$) y X ($a_{x,CM}$).

Los parámetros mencionados anteriormente serán obtenidos de los resultados de los ANLTH de los modelos simplificados de 3 grados de libertad. Estos parámetros se calcularán en el instante en el que el desplazamiento del centro de masa en la dirección Y sea máxima.

3.4 ANÁLISIS MODAL

Se realizó el análisis modal para los 36 modelos en STERA 3D. En la Figura N° 3.18 se muestran las primeras 3 formas de modo de los modelos.

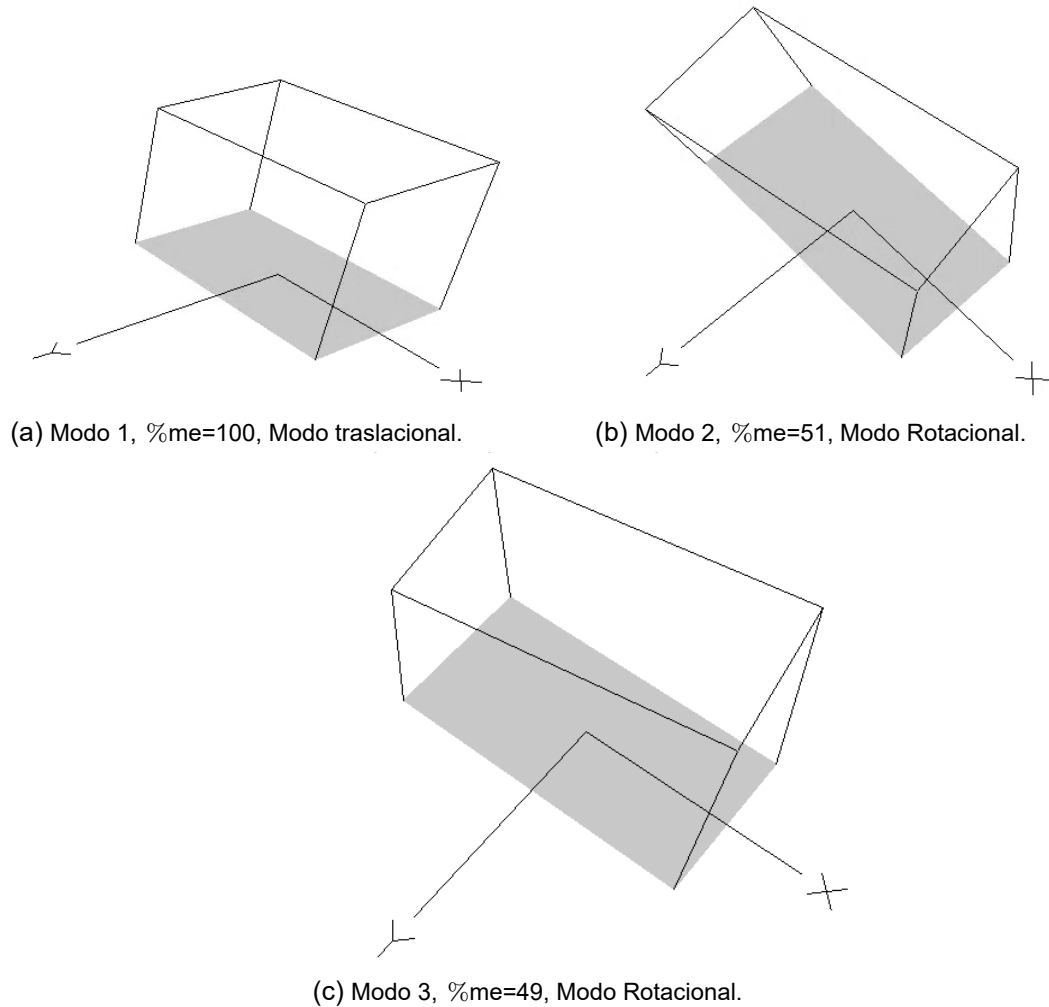


FIGURA N° 3.18: Modos de vibración de modelo simplificado: (a) primera forma de modo, (b) segunda forma de modo, (c) tercera forma de modo.

3.5 ANÁLISIS NO LINEAL TIEMPO HISTORIA

3.5.1 Configuraciones previas al análisis

Se empleó el programa de análisis sísmico estructural STERA 3D para realizar el ANLTH de los 36 modelos estructurales simplificados. En este análisis se emplearon los 280 registros sísmicos descritos anteriormente. Las consideraciones para el análisis dinámico se listan a continuación:

- Se calculó la matriz de amortiguamiento con la ecuación de Rayleigh (ver Ecuación 2.36).
- Factores de amortiguamiento de los dos primeros modos de vibración iguales a 0.05 ($h_1 = h_2 = 0.05$).
- Se utilizó el método de integración numérica de la aceleración promedio.
- Se definió el límite superior (fH) e inferior (fL) para el filtro de pasa banda aplicado a los registros sísmicos.

Las consideraciones se configuraron en el programa STERA 3D. Esta configuración se muestra en la Figura N° 3.19.

Dynamic Analysis

No. of Subdivision of Time: 5

Subdivision of time in output files: ☐ Yes ☒ No

Damping

Damping Type: 3. [C]=a[K0]+b[M]

Damping Factor: h1: 0.05, h2: 0.05

Numerical Integration Method

☒ Average Acceleration ☐ Operator Splitting

Input Motion

☒ Earthquake ☐ Vibrator ☐ Wind

Filter to get Ground Displacement

fL: Low Cut: 0.1 (Hz)

fH: High Cut: 25 (Hz)

Order: 10

Butterworth Band-pass Filter

OK

FIGURA N° 3.19: Configuración de opciones para el ANLTH.

3.5.2 Análisis dinámico y sistematización con Python

Para el análisis dinámico, los 280 registros sísmicos serán aplicados con 3 ángulos de incidencia distintos, iguales a 90° , 45° y 30° medidos respecto al eje X positivo. Teniendo en cuenta que se deben analizar las 36 estructuras propuestas ante 280 registros sísmicos evaluados con 3 ángulos de incidencia distintos, se tendrán que realizar un total de 30,240 simulaciones. Esto se resume en el diagrama mostrado en la Figura N° 3.20.

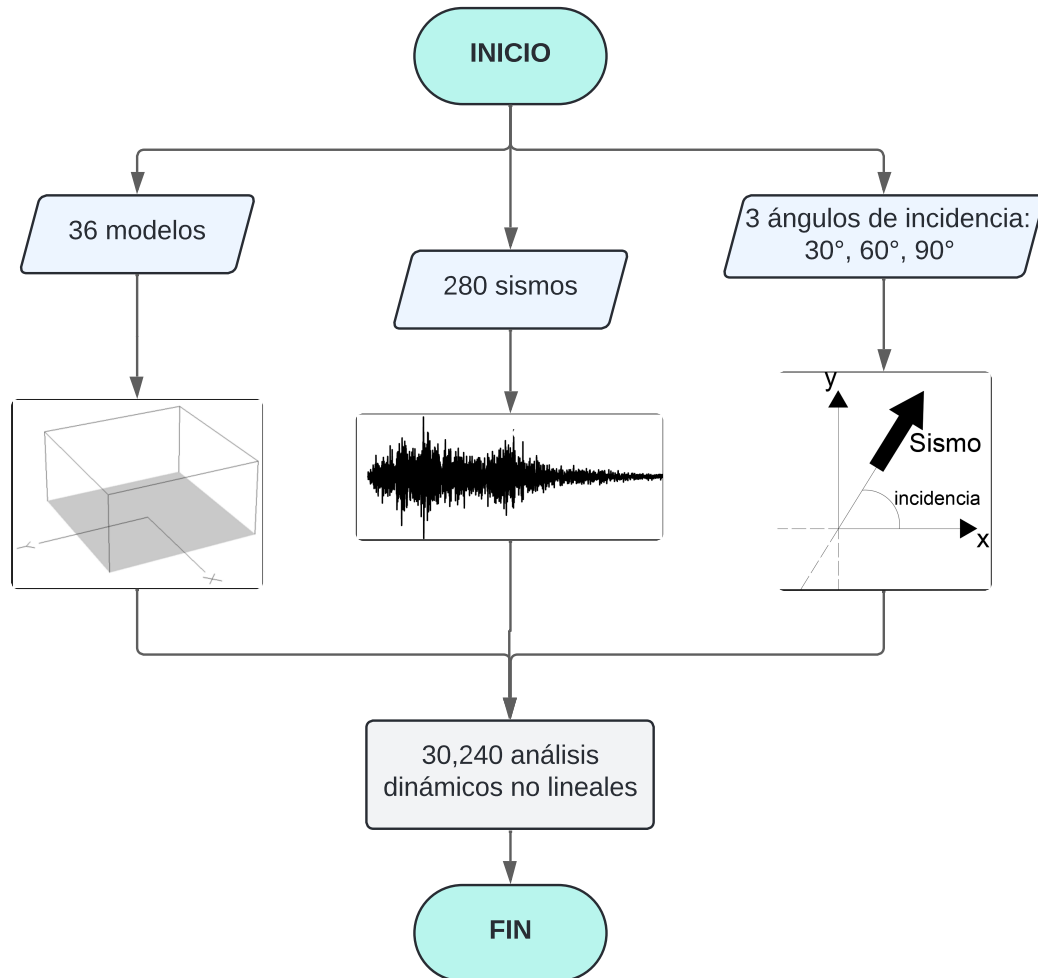


FIGURA N° 3.20: Diagrama de flujo para los análisis dinámicos.

Realizar 30,240 análisis sísmicos implicaría un gran esfuerzo y sería ineficiente realizarlo de forma manual. Por ello, se decidió desarrollar un algoritmo programado en Python V3.8.10 con el fin de automatizar la ejecución de los análisis. El programa desarrollado modifica los datos de entrada (rutas de salida de los resultados, dimensiones en planta, pesos de los modelos y registros sísmicos) que requiere el software STERA 3D para realizar el análisis no lineal tiempo historia. En la Figura N° 3.21 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo desarrollado.

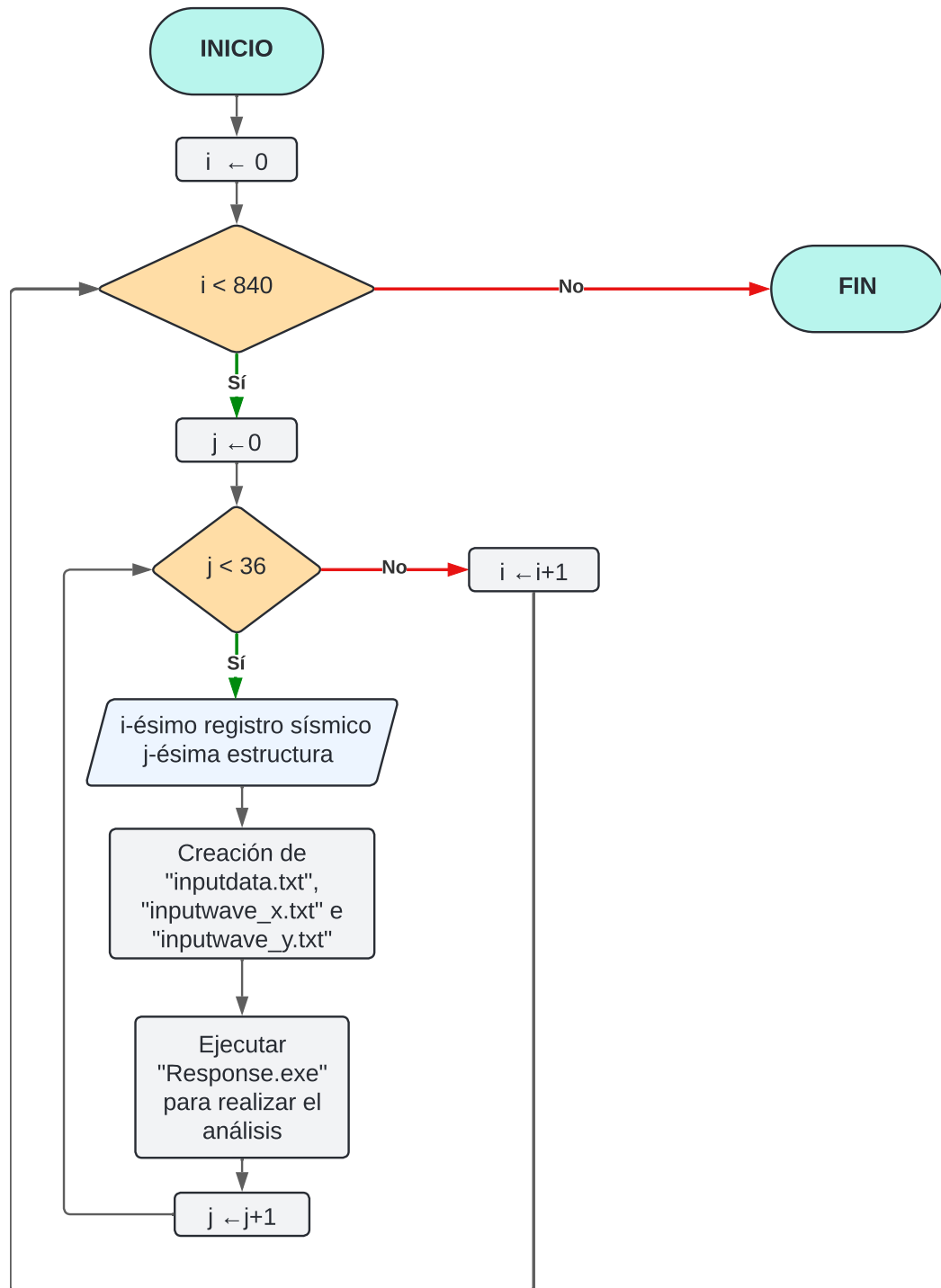


FIGURA N° 3.21: Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado en Python para realizar el análisis tiempo historia no lineal en STERA 3D.

3.5.3 Resultados de interés y obtención de parámetros a partir de los análisis estáticos y dinámicos

Luego de concluir los análisis, se obtuvieron los resultados que se mencionan a continuación:

- Desplazamiento relativo del centro de masa de los entrepisos en las direcciones X e Y: $d_{x,CM}$ y $d_{y,CM}$.
- Distorsión máxima del centro de masa en la dirección Y: $dr_{y,CM}$.
- Distorsión máxima de los entrepisos en la dirección Y: $dr_{y,max}$.
- Aceleraciones relativas máximas del centro de masa de los entrepisos en las direcciones X e Y: $a_{x,CM}$ y $a_{y,CM}$.
- Periodos de respuesta de las estructuras en las direcciones X e Y: $T_{x,est}$ y $T_{y,est}$.
- Periodo de vibración y aceleración máxima de los registros sísmicos: $T_{y,sismo}$ y PGA .

A partir de los resultados obtenidos de los análisis dinámicos, se obtuvieron los siguientes parámetros:

- Relación entre la aceleración relativa máxima del centro de masa del entrepiso en la dirección Y y el PGA , $a_{y,CM}/PGA$.
- Relación de aspecto al cuadrado, $(L/B)^2$.
- Relación de los periodos de vibración de la estructura elevada al cuadrado, $(T_{x,est}/T_{y,est})^2$.
- Relación entre el periodo de vibración de la estructura y el periodo del registro sísmico, $T_{y,est}/T_{y,sismo}$.
- Relación entre el desplazamiento en el eje X con el desplazamiento en el eje Y, $d_{x,CM}/d_{y,CM}$.
- Relación entre la aceleración en el eje X con la aceleración en el eje Y, $a_{x,CM}/a_{y,CM}$.
- Grado de irregularidad torsional, $G_{it} = dr_{y,max}/dr_{y,CM}$.

Luego de obtener los resultados, estos se filtraron para considerar solo aquellos que cumplan las condiciones que se listan a continuación:

- Desplazamiento del centro de masa en la dirección Y menor a 4.95cm (distorsión de 1.5%). Esta consideración se tomó teniendo en cuenta que la norma peruana E030-2018 establece un límite para las distorsiones de estructuras de concreto armado igual a 0.7%. Se decidió considerar respuestas más desfavorables a dicho límite.
- Desplazamiento del centro de masa en la dirección Y mayor a 0.33cm (distorsión de 0.1%). Esta consideración se tomó con el objetivo de no considerar casos con desplazamientos muy pequeños ya que se desea estudiar los casos más desfavorables para las estructuras.
- Aceleración máxima del suelo menor a $1g$ (9.81m/s^2). Como se mostró en la Tabla N° 3.3, los modelos simplificados presentan coeficientes sísmicos de hasta 0.5g, sin embargo, se decidió considerar aceleraciones mayores ya que se desea analizar las respuestas máximas y no lineales.

Luego de aplicar el filtro, la cantidad de resultados se redujo de 30,240 a 9,358. A partir de estos resultados se calcularán los parámetros estructurales y sísmicos definidos anteriormente. Esto se resume en el diagrama mostrado en la Figura N° 3.22.

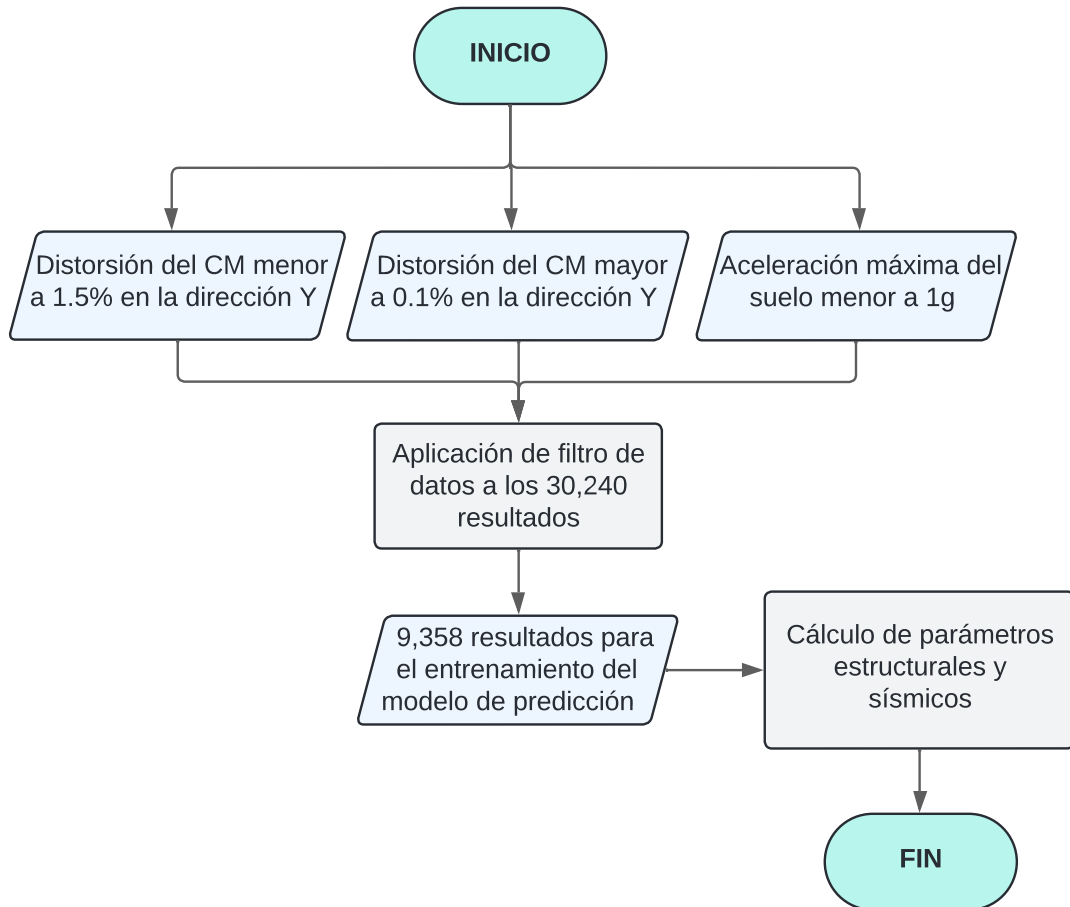


FIGURA N° 3.22: Diagrama para el filtro de datos.

Los 9,358 resultados obtenidos se emplearán para entrenar y validar el modelo de predicción. En la Figura N° 3.23 se muestra la distribución de los parámetros obtenidos a través de histogramas y en la Tabla N° 3.4 se muestra un resumen de los parámetros estadísticos de los datos obtenidos luego de la aplicación del filtro.

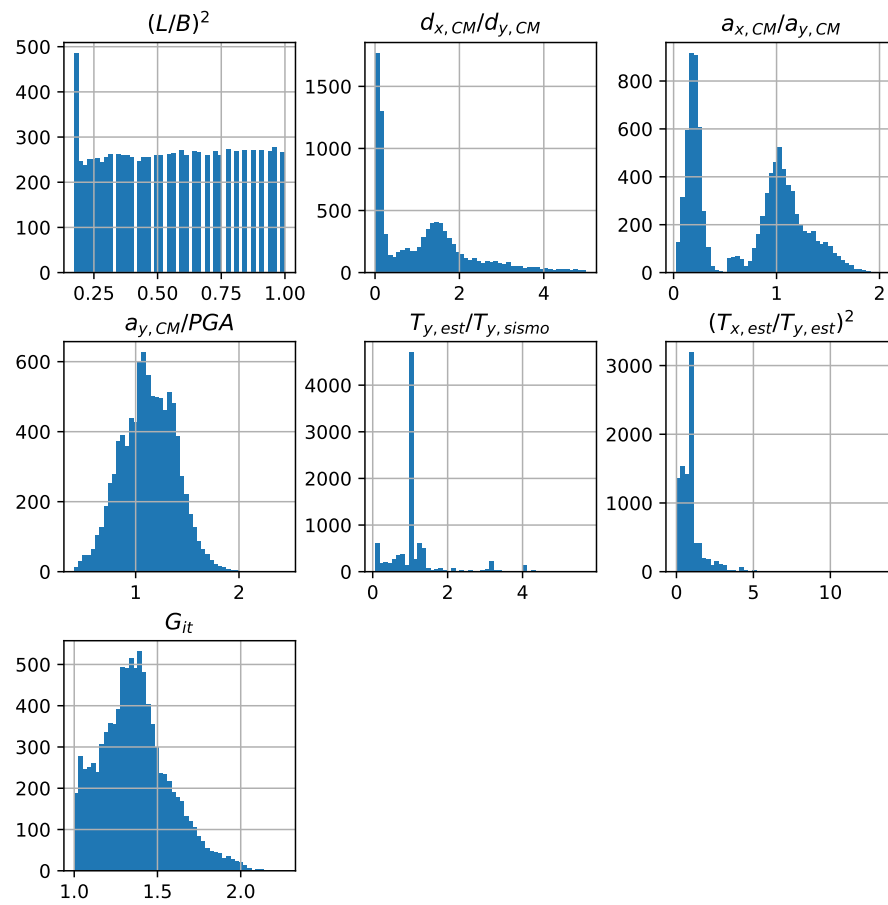


FIGURA N° 3.23: Histogramas de los parámetros estructurales y sísmicos.

TABLA N° 3.4: Resumen estadístico de los parámetros numéricos.

Estadístico	$(L/B)^2$	$d_{x,CM}/d_{y,CM}$	$a_{x,CM}/a_{y,CM}$	$a_{y,CM}/PGA$	$T_{y,est}/T_{y,sismo}$	$(T_{x,est}/T_{y,est})^2$	G_{it}
Cantidad	9358	9358	9358	9358	9358	9358	9358
Promedio	0.54	1.19	0.73	1.13	1.10	0.95	1.37
Desv. Estándar	0.25	1.13	0.49	0.26	0.72	0.85	0.21
Mínimo	0.17	0.01	0.03	0.41	0.07	0.001	1.00
Q1	0.32	0.14	0.21	0.94	0.99	0.45	1.22
Q2	0.51	1.09	0.88	1.12	1.00	0.91	1.35
Q3	0.75	1.74	1.11	1.31	1.09	1.00	1.49
Máximo	1.00	5.00	2.07	2.44	5.69	13.68	2.27

3.6 ALGORITMO DE PREDICCIÓN

En esta sección se desarrollará el algoritmo de machine learning para la predicción del valor del G_{it} . Para lograrlo, se iniciará con el proceso de muestreo, con el objetivo de seleccionar los datos para las fases de prueba y de entrenamiento. Luego se entrenarán tres modelos distintos de predicción y se seleccionará el que presente mejor rendimiento. Después, se aplicará el modelo seleccionado a los datos de prueba y se obtendrán las métricas de rendimiento del modelo final. Por último, se calcularán los valores de las distorsiones máximas a partir de los valores de G_{it} predichos.

3.6.1 ALGORITMO DE MACHINE LEARNING PARA LA PREDICCIÓN DEL GRADO DE IRREGULARIDAD TORSIONAL

Se empleó el lenguaje de programación Python V3.8.10 con el objetivo de realizar el análisis, clasificación y agrupación de datos, además, se usó la librería scikit-learn de Python para desarrollar el algoritmo de machine learning para la predicción del valor del G_{it} .

3.6.1.1 Proceso de muestreo

Para realizar el muestreo es importante que los datos de entrenamiento y de prueba sean representativos de todo el conjunto de datos. Para ello, se ha considerado a la distorsión del centro de masa $dr_{y,CM}$ como referencia. El objetivo es que la distribución de los datos de prueba sea similar a la distribución de los datos totales respecto a este parámetro. A continuación, en la Tabla N° 3.5 se han creado 5 categorías según los intervalos que corresponden al valor de $dr_{y,CM}$.

TABLA N° 3.5: Categorías e intervalos de valores del parámetro $dr_{y,CM}$.

Categorías	Intervalos
1	$0.001 < dr_{y,CM} < 0.002$
2	$0.002 \leq dr_{y,CM} < 0.004$
3	$0.004 \leq dr_{y,CM} < 0.006$
4	$0.006 \leq dr_{y,CM} < 0.008$
5	$0.008 \leq dr_{y,CM} < 0.015$

En la Figura N° 3.24 se muestra el histograma de las categorías del parámetro $dr_{y,CM}$.

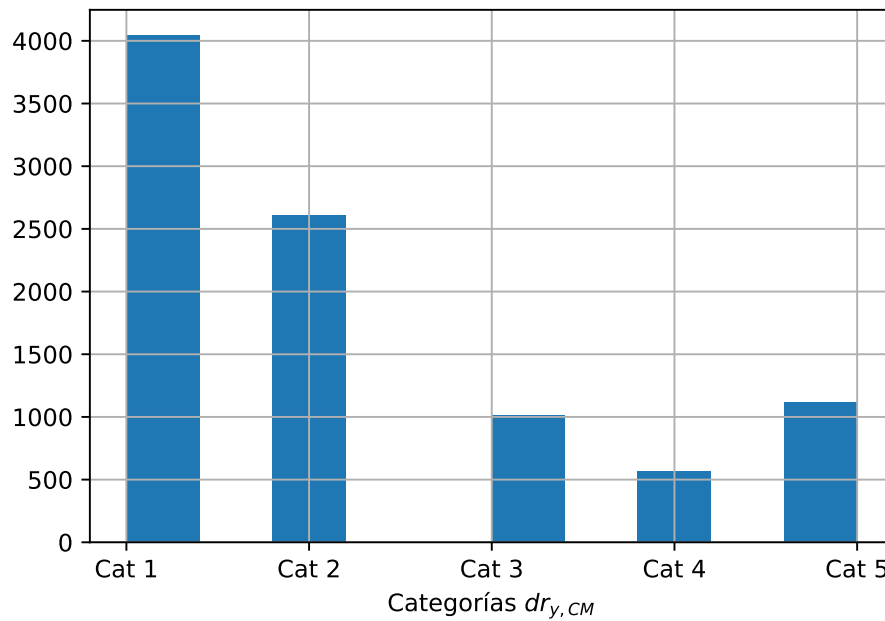


FIGURA N° 3.24: Histograma de categorías del parámetro $dr_{y,CM}$. En el eje X se indican las categorías y en el eje Y la cantidad de datos.

Para realizar el muestreo se consideró que el tamaño de la muestra de prueba será el 20% de todos los datos. El proceso de muestreo se realizó considerando las categorías descritas anteriormente. En la Tabla N° 3.6 se muestra la distribución de los datos de la muestra de prueba y de la totalidad de los datos respecto a las categorías de $dr_{y,CM}$. Como se puede observar en la tabla mencionada, la distribución de los datos es similar, por lo cual, se puede concluir que se ha obtenido una muestra representativa de la totalidad de los datos. El proceso de muestreo descrito se realizó con la herramienta StratifiedShuffleSplit de la librería scikit-learn de Python.

TABLA N° 3.6: Distribución de datos respecto a las categorías del parámetro $dr_{y,CM}$.

Categorías	Distribución de datos en la muestra	Distribución de la población de datos
1	43.21 %	43.23 %
2	27.83 %	27.85 %
3	10.90 %	10.86 %
4	6.09 %	6.09 %
5	11.97 %	11.97 %

3.6.1.2 Selección de modelo de predicción

Como primer paso se proponen tres modelos de machine learning con el propósito de determinar cuál de ellos ofrece mejores resultados, para ello se evaluarán sus métricas de rendimiento. Estos modelos son: Regresión Lineal, Árbol de Decisión y Bosques Aleatorios.

- Regresión Lineal

Según Géron (2019), en el modelo de Regresión Lineal, el parámetro de salida es la suma ponderada de los parámetros de entrada, más el valor de una constante. Esta descripción se presenta en la Ecuación 3.8.

$$G_{it} = a_0 + a_1P_1 + a_2P_2 + \dots + a_iP_i + \dots + a_nP_n \quad (3.8)$$

Donde:

P_i : i-ésimo parámetro de entrada

a_i : i-ésimo peso del i-ésimo parámetro de entrada

a_0 : constante

Para aplicar el modelo de Regresión Lineal a los datos obtenidos del ANLTH, se utilizó la función LinearRegression de la librería scikit-learn de Python. En la Figura N° 3.25 se muestra la distribución de errores porcentuales del modelo de Regresión Lineal.

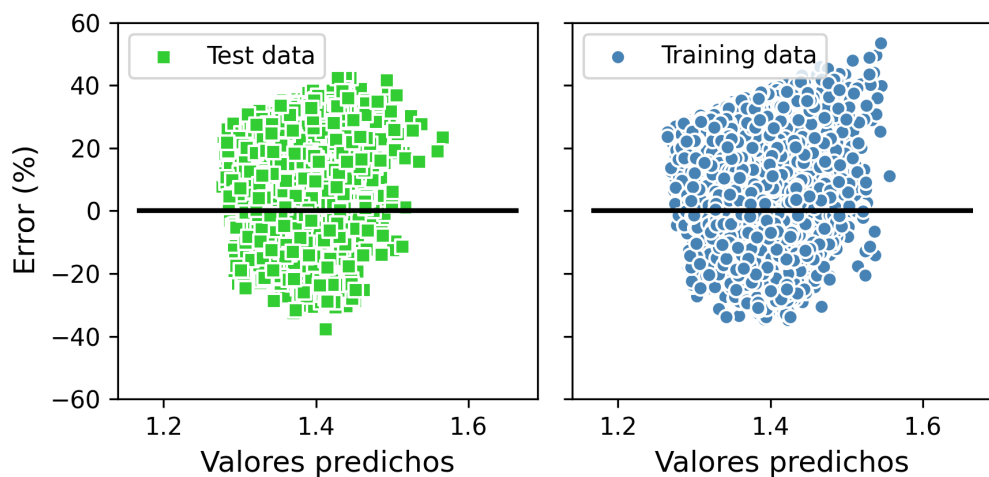


FIGURA N° 3.25: Errores de predicción del modelo de Regresión Lineal.

El error promedio obtenido con el modelo de regresión lineal fue igual a 11.90%. Asimismo, en la Tabla N° 3.7 se muestran las métricas de rendimiento del modelo.

TABLA N° 3.7: Métricas de rendimiento del modelo de Regresión Lineal

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.203	16.028	0.044

- Árbol de decisión

Según Géron (2019) el modelo Árbol de Decisión divide el grupo de datos de entrenamiento en varios conjuntos, cada conjunto posee una serie de datos cuyos valores de salida presentan poca dispersión. En este caso, el parámetro usado para medir la dispersión de los datos en cada conjunto es el error cuadrático medio (MSE). En la Figura N° 3.26 se muestra un ejemplo gráfico de cómo el modelo Árbol de Decisión divide ciertos datos en 4 conjuntos o regiones, en cada región se muestra el promedio de los datos de cada conjunto (línea roja), el cual representa el valor de predicción del modelo.

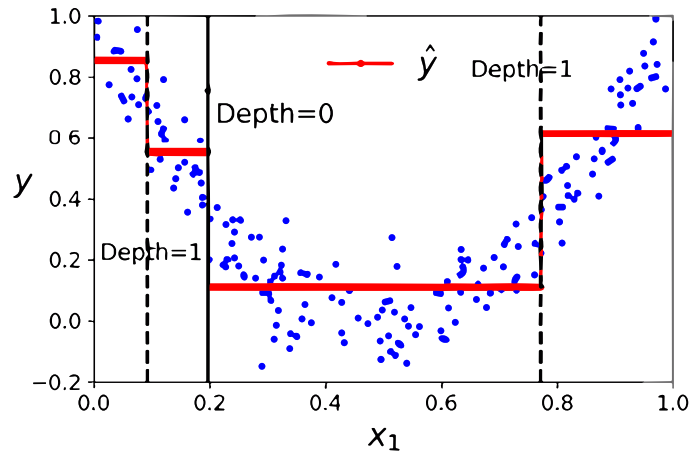


FIGURA N° 3.26: Ejemplo del modelo Árbol de Decisión, el eje X indica los valores de entrada del modelo Árbol de Decisión y el eje Y, los valores de salida. Géron (2019)

Para aplicar el modelo Árbol de Decisión a los datos obtenidos del ANLTH se utilizó la función `DecisionTreeRegressor` de la librería `scikit-learn` de Python. En la Figura N° 3.27 se muestra la distribución de errores porcentuales del modelo de Árbol de Decisión. En esta figura se observa claramente el sobreajuste del modelo sobre los datos de entrenamiento (*Training data*), lo cual no se refleja en la distribución de los errores de los datos de prueba (*Test data*).

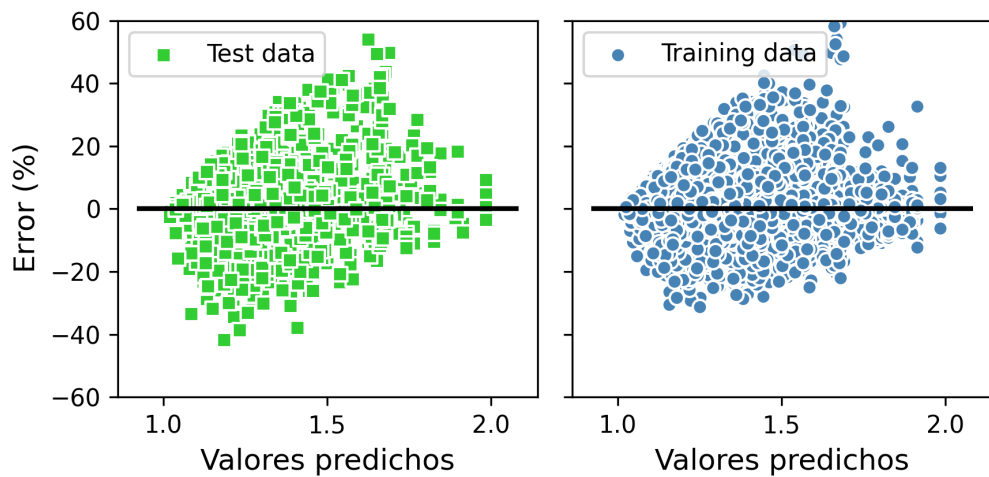


FIGURA N° 3.27: Errores de predicción del modelo de Árbol de Decisión.

El error promedio obtenido con el modelo de árbol de decisión fue igual a 8.30%. Asimismo, en la Tabla N° 3.8 se muestran las métricas de rendimiento del modelo.

TABLA N° 3.8: Métricas de rendimiento del modelo de Árbol de Decisión

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.159	12.597	0.410

- Bosques Aleatorios

Según Géron (2019) el modelo de Bosques Aleatorios es un conjunto de Árboles de Decisión, en el cual el valor de la predicción final del modelo de Bosques Aleatorios será el valor de la moda de todas las predicciones hechas por los árboles de decisión que componen el bosque. Para entrenar el modelo Bosques Aleatorios con los resultados de las simulaciones numéricas se utilizó la función RandomForestRegressor de la librería scikit-learn de Python. En la Figura N° 3.28 se muestra la distribución de errores porcentuales del modelo de Bosques Aleatorios, considerando 50 árboles de decisión.

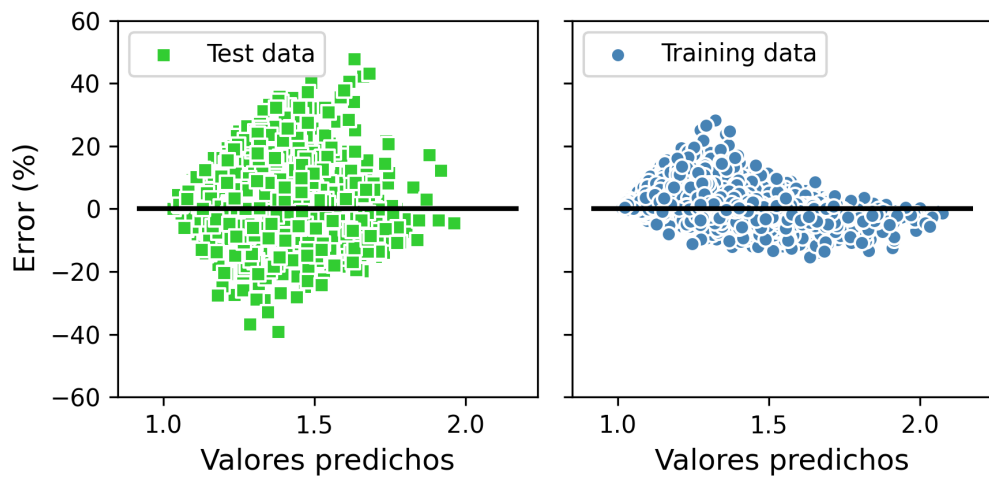


FIGURA N° 3.28: Errores de predicción del modelo de Bosques Aleatorios.

El error promedio obtenido con el modelo de bosques aleatorios fue igual a 7.07%. Asimismo, en la Tabla N° 3.9 se muestran las métricas de rendimiento del modelo.

TABLA N° 3.9: Métricas de rendimiento del modelo de Bosques Aleatorios

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.137	10.820	0.564

Finalmente, en la Tabla N° 3.10 se muestra un resumen de los resultados obtenidos luego de evaluar los modelos propuestos. Se puede observar, que el modelo con menor error y mejor métrica de rendimiento es el modelo de Bosques Aleatorios, por lo tanto, el algoritmo de predicción del valor del G_{it} se desarrollará con este modelo.

TABLA N° 3.10: Errores absolutos promedio y errores cuadráticos medios normalizados de los modelos de predicción.

Modelo	Error Absoluto Promedio (%)	NRMSE (%)
Regresión Lineal	11.90	16.03
Árbol de Decisión	8.30	12.60
Bosques Aleatorios	7.07	10.82

- Modelo final de predicción

Luego de definir el modelo de Bosques Aleatorios para el desarrollo del algoritmo final de predicción, se determinó que la cantidad de árboles de decisión óptima es de 800. Finalmente, se realizó la evaluación de los datos obtenidos del ANLTH con este modelo. En la Figura N° 3.29 se muestran los resultados de la predicción del modelo comparados con los valores de análisis, donde valores más altos en la escala gráfica de colores indican mayor densidad de puntos. Además, en la Figura N° 3.30 se muestra la clasificación de los parámetros de estudio según su importancia en la predicción del modelo.

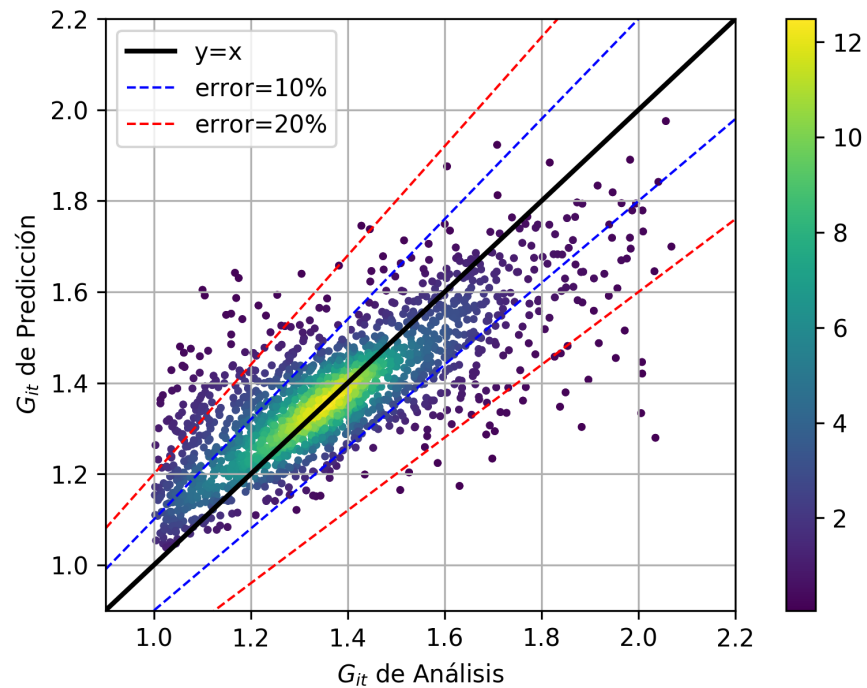


FIGURA N° 3.29: Comparación entre el G_{it} de predicción y el G_{it} de análisis.

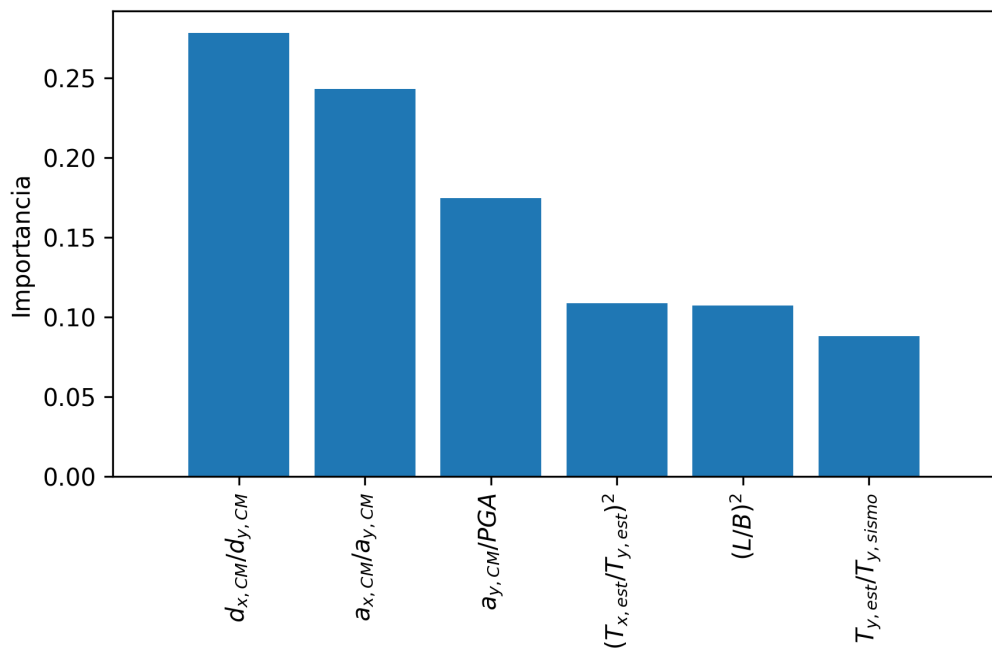


FIGURA N° 3.30: Importancia de parámetros.

En la Figura N° 3.31 se muestra la distribución de errores porcentuales del modelo final.

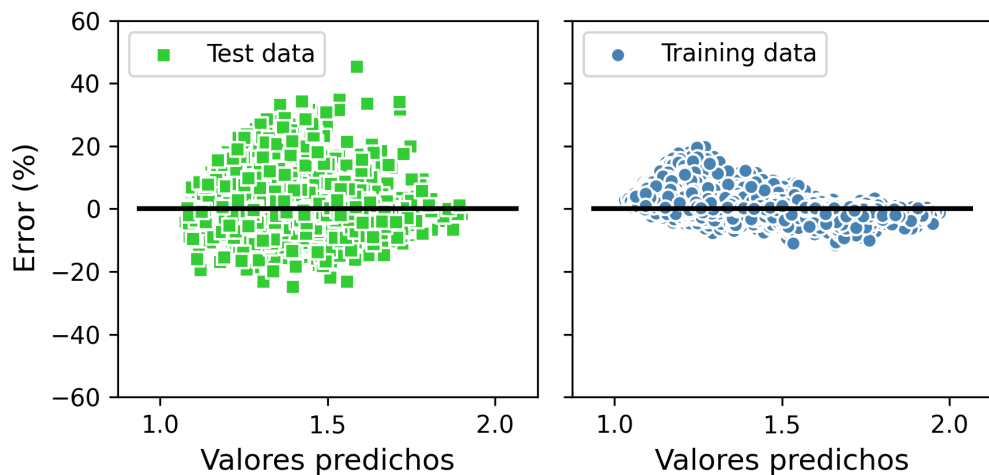


FIGURA N° 3.31: Errores de predicción del modelo final.

El error promedio obtenido con el modelo final fue igual a 6.98%. Asimismo, en la Tabla N° 3.11 se muestran las métricas de rendimiento del modelo.

TABLA N° 3.11: Métricas de rendimiento del modelo final

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.135	10.654	0.578

En la Figura N° 3.32 se puede observar la distribución de los valores del grado de irregularidad torsional respecto a los valores de las distorsiones en el centro de masa, donde valores más altos en la escala gráfica de colores indican mayor densidad de puntos. De esta figura se puede observar que el grado de irregularidad tiende a decrecer cuando las distorsiones del centro de masa son mayores.

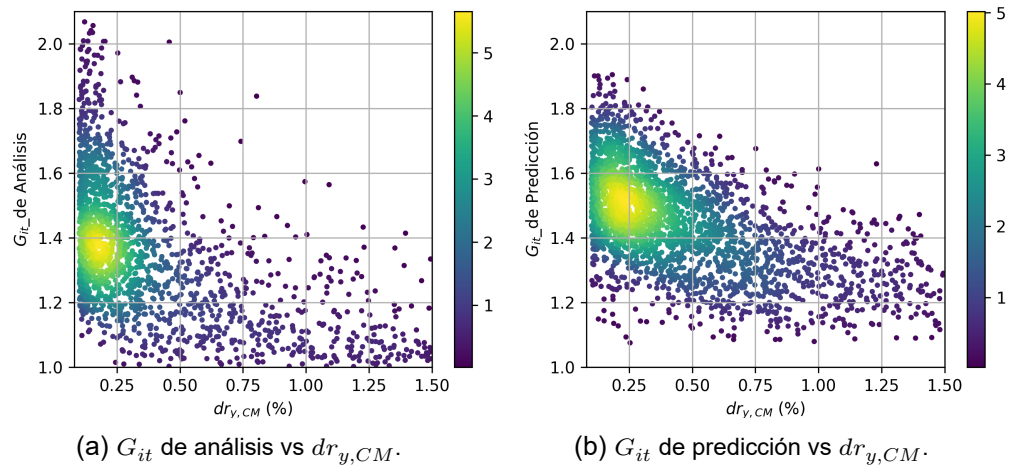


FIGURA N° 3.32: Relación entre el grado de irregularidad torsional y la distorsión del centro de masa.

Como se conoce el desplazamiento relativo del centro de masa en cada uno de los análisis, se pueden calcular las distorsiones máximas de la estructura con la expresión $dr_{y,max} = dr_{y,CM} * G_{it}$. En dicha expresión se pueden reemplazar los valores del G_{it} de análisis y los valores del G_{it} de predicción. Con ello, se obtendrán valores de $dr_{y,max}$ de análisis y valores de $dr_{y,max}$ a partir del modelo de predicción. En la Figura N° 3.33 se muestra la comparación entre los resultados de la distorsión máxima en la dirección Y obtenidos del análisis y a partir del modelo de predicción. Además, en esta figura se puede observar la mayor densidad de puntos con distorsiones menores a 7/1000, lo cual también se pudo observar en la Figura N° 3.32, esto causa la reducción de los errores cuadráticos medios del modelo, obteniéndose un modelo de predicción de alta precisión.

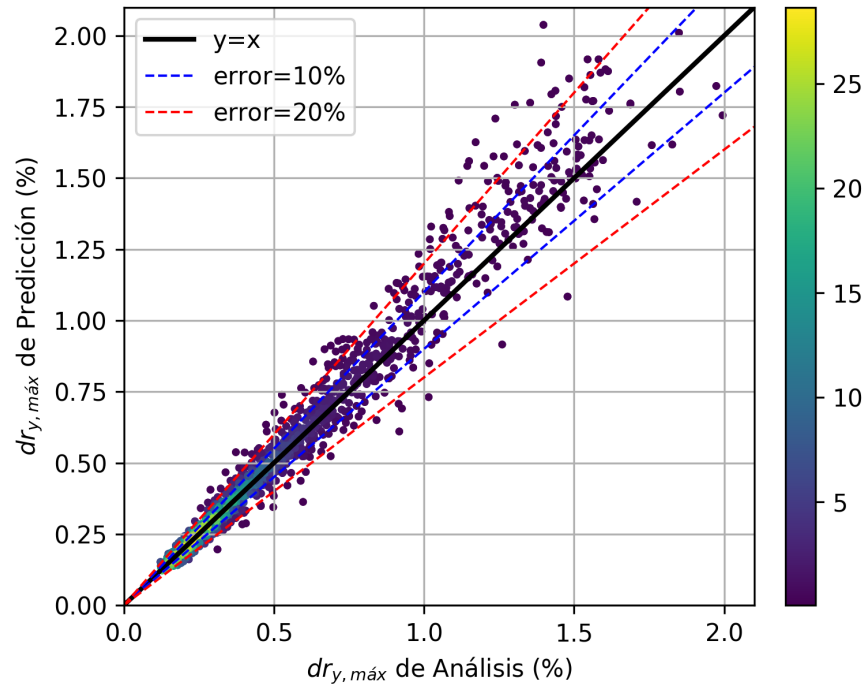


FIGURA N° 3.33: Comparación entre las distorsiones máximas de análisis y las distorsiones máximas calculadas a partir del modelo de predicción.

Finalmente, en la Tabla N° 3.12 se muestran las métricas de rendimiento del modelo final para la estimación de las distorsiones máximas.

TABLA N° 3.12: Métricas de rendimiento del modelo final para desplazamientos

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.001	4.054	0.955

Los resultados obtenidos permiten concluir que los parámetros estructurales propuestos son adecuados para predecir el grado de irregularidad torsional y a partir de este valor se puede estimar la distorsión máxima en estructuras con irregularidad torsional. El modelo de predicción propuesto se validará con resultados experimentales de ensayos dinámicos realizados en una mesa vibradora.

CAPÍTULO IV: PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se mostrará el desarrollo del proceso experimental y sus resultados. En primer lugar, se mostrarán las configuraciones estructurales y detalles de los especímenes ensayados en la mesa vibradora. Luego se mostrará el esquema de los sensores instalados para el monitoreo de la respuesta de las estructuras. Además, se mostrarán los resultados obtenidos para los especímenes durante los ensayos dinámicos incrementales. Con base en los resultados experimentales se ajustará y validará el modelo de predicción desarrollado en la Sección 3.6. Por otro lado, se propondrá un método alternativo para la estimación de la respuesta máxima en estructuras con irregularidad torsional a partir de dos sensores, este método se validará con los resultados experimentales.

4.1 CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS ESPECÍMENES

A continuación, se mostrarán los esquemas en planta de los especímenes. Los especímenes ensayados han sido contruidos con piezas de acero A36, tienen una altura de 45cm , un ancho y largo de 60cm , y su masa total es de aproximadamente 70kg . En la Figura N° 4.1 se muestra la configuración estructural del espécimen E-1, el cual presenta una configuración regular en planta. Las configuraciones de los demás especímenes se derivarán a partir de la configuración del espécimen E-1, modificando las columnas de las esquinas N3 y N4 para inducir mayor rigidez en el eje que conecta a estas columnas en la dirección Y. Las variaciones se hicieron teniendo en cuenta que las vibraciones de la mesa vibradora a la que serán sometidos los especímenes se harán en la dirección Y.

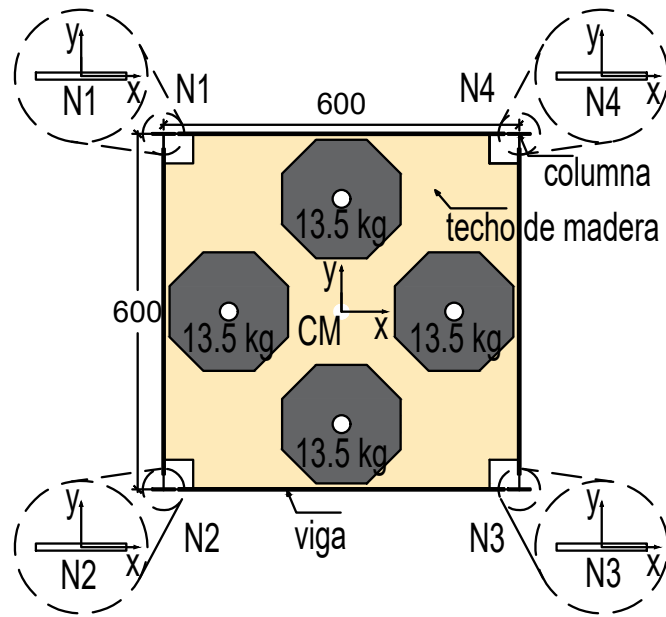


FIGURA N° 4.1: Esquema en planta del espécimen E-1.

En la Figura N° 4.2 se muestra el espécimen E-2, el cual presenta columnas con el doble de grosor en las esquinas N3 y N4 en comparación a las columnas de las esquinas N2 y N1.

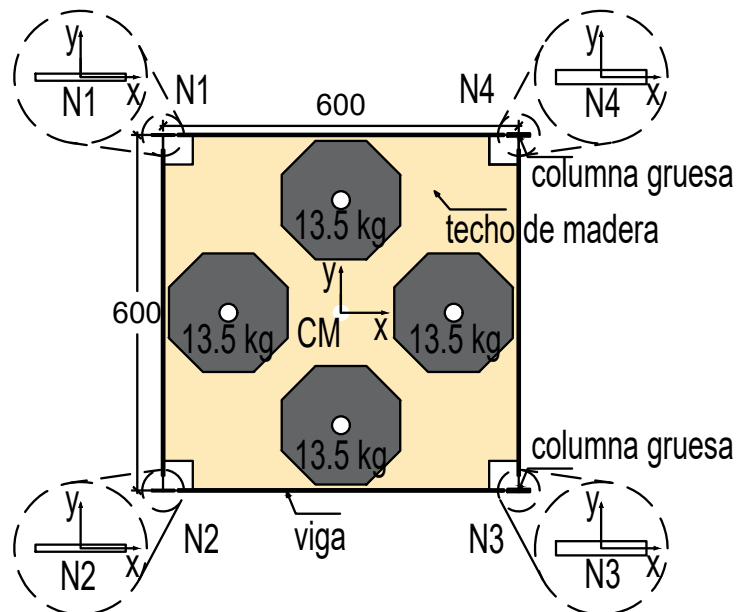


FIGURA N° 4.2: Esquema en planta del espécimen E-2.

En la Figura N° 4.3 se muestra el espécimen E-3, el cual presenta una columna rotada en la esquina N3.

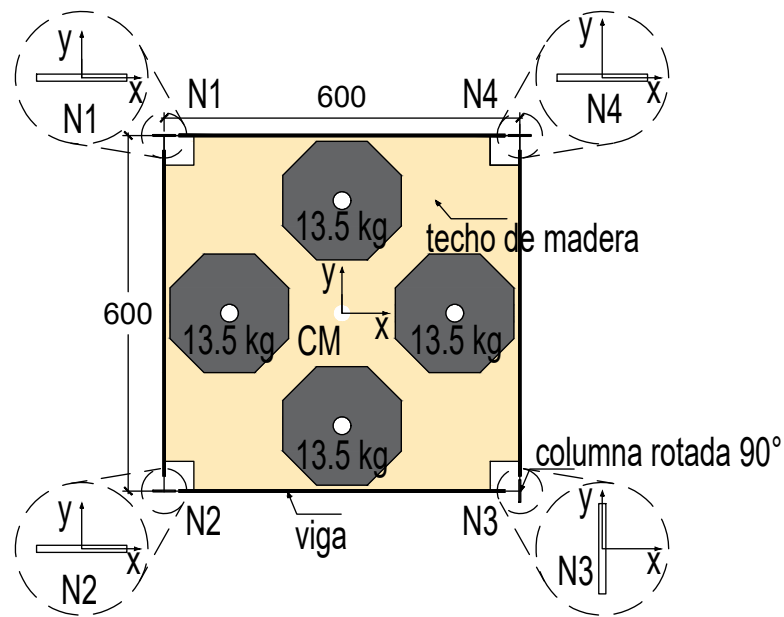


FIGURA N° 4.3: Esquema en planta del espécimen E-3.

En la Figura N° 4.4 se muestra el espécimen E-4, el cual presentan dos columnas rotadas en las esquinas N3 y N4 respectivamente.

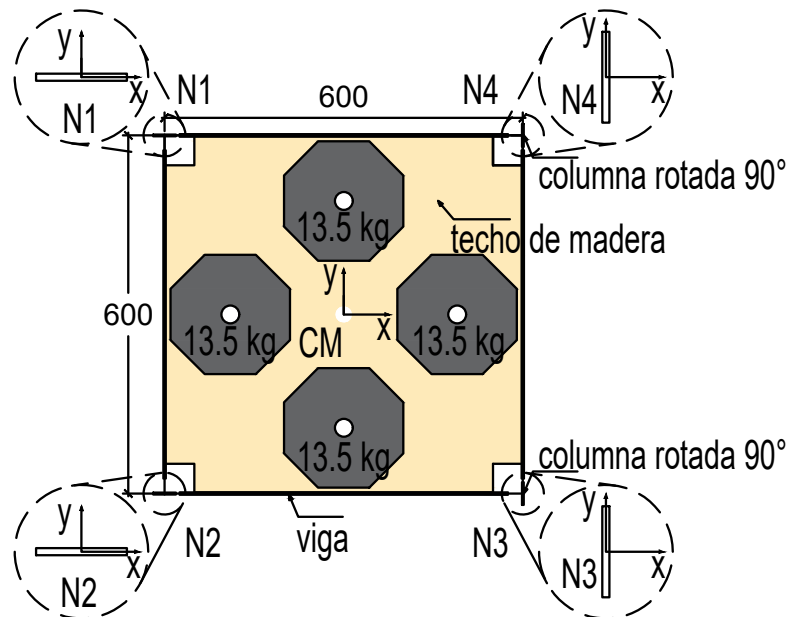


FIGURA N° 4.4: Esquema en planta del espécimen E-4.

4.2 ESQUEMA DE MONITOREO DE ESPECÍMENES

Para el monitoreo de la respuesta de los especímenes ante eventos sísmicos producidos a través del movimiento de la mesa vibradora, se utilizaron sensores de

desplazamiento y de aceleración. En las Figuras 4.5 y 4.6 se presentan los esquemas de la vista lateral y la vista en planta respectivamente. En estos esquemas se muestran la ubicación de los sensores de desplazamiento y la disposición del espécimen sobre la mesa vibradora. Además, en la Tabla N° 4.1 se presenta una lista de los sensores utilizados para el monitoreo de cada uno de los puntos de interés en los especímenes.

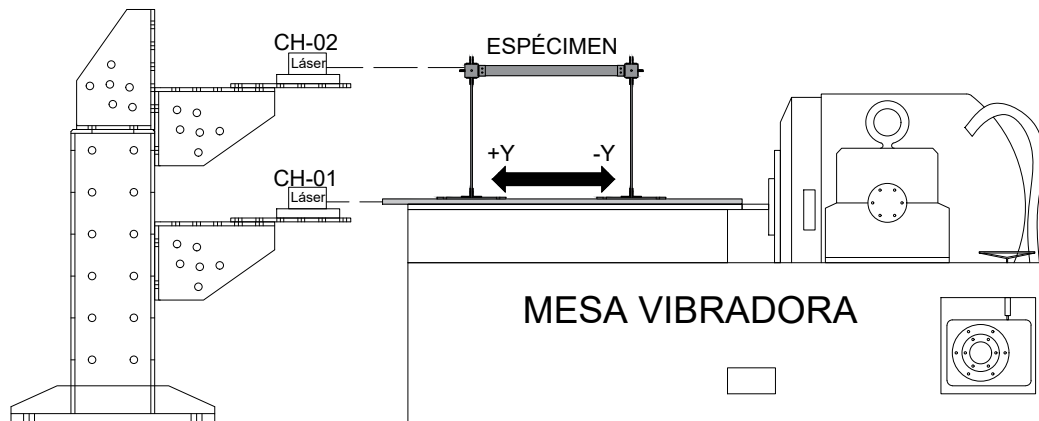


FIGURA N° 4.5: Esquema de ensayo, vista lateral.

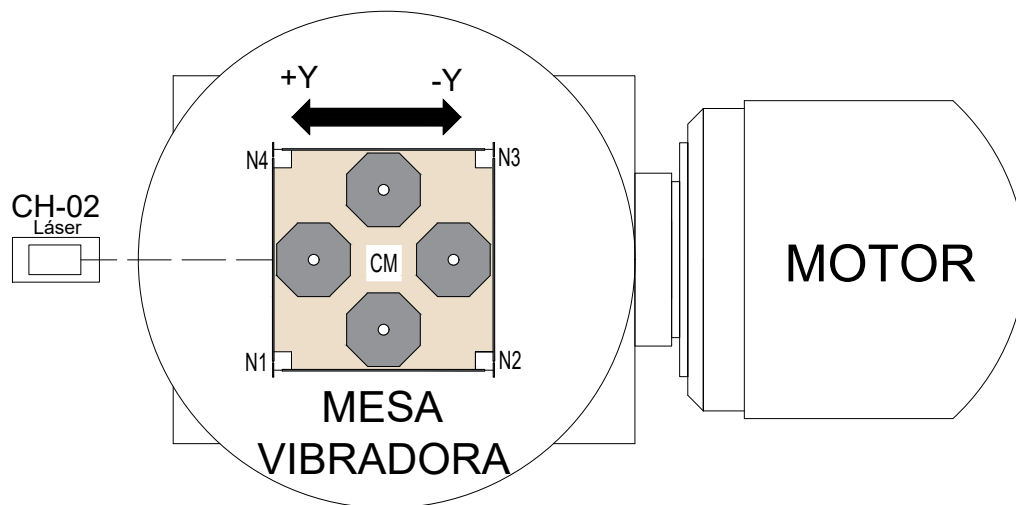


FIGURA N° 4.6: Esquema de ensayo, vista en planta.

TABLA N° 4.1: Lista de sensores instalados para el monitoreo de los especímenes

Canal	Tipo de sensor	Magnitud	Dirección	Punto monitoreado
CH01	Láser	Desplazamiento	Y	BASE
CH02	Láser	Desplazamiento	Y	CM
CH03	Acelerómetro	Aceleración	Y	BASE
CH04	Acelerómetro	Aceleración	X	BASE
CH05	Acelerómetro	Aceleración	Y	CM
CH06	Acelerómetro	Aceleración	X	CM
CH07	Acelerómetro	Aceleración	Y	N1
CH08	Acelerómetro	Aceleración	Y	N2
CH09	Acelerómetro	Aceleración	Y	N3
CH10	Acelerómetro	Aceleración	Y	N4
CH11	Acelerómetro	Aceleración	X	N1
CH12	Acelerómetro	Aceleración	X	N2
CH13	Acelerómetro	Aceleración	X	N3
CH14	Acelerómetro	Aceleración	X	N4

En la Figura N° 4.7 se muestra el sistema de monitoreo en uno de los especímenes instalado sobre la mesa vibradora. En las figuras del Anexo A, se pueden apreciar los sensores instalados en cada uno de los especímenes.

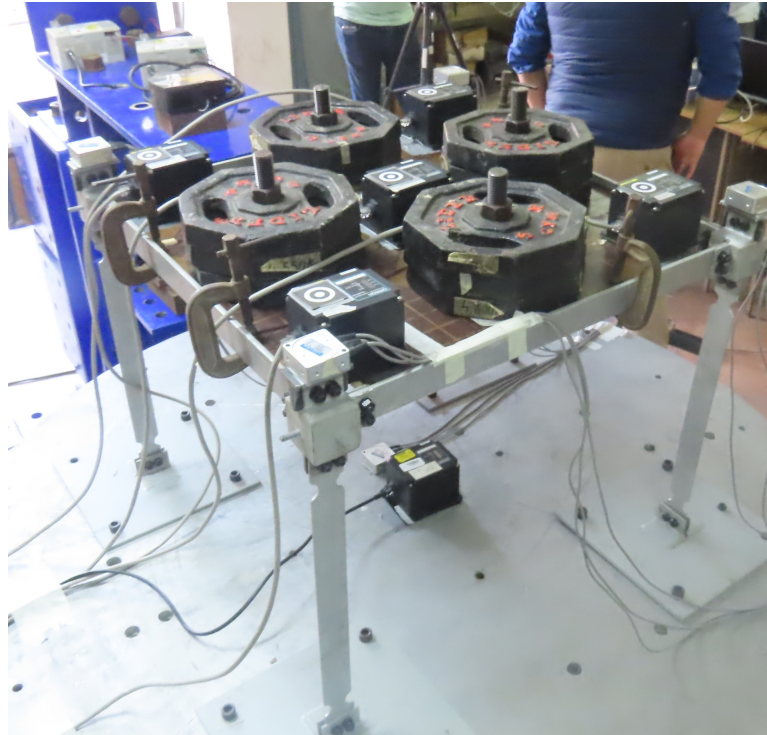


FIGURA N° 4.7: Sistema de monitoreo para espécimen en la mesa vibradora.

Luego de instalados los sensores de aceleraciones y desplazamientos, se monitoreó la vibración libre de los especímenes con el objetivo de determinar sus frecuencias naturales en la dirección Y. Desde de la Figura N° 4.8 hasta la Figura N° 4.11 se muestran los resultados obtenidos de la vibración libre para cada uno de los especímenes.

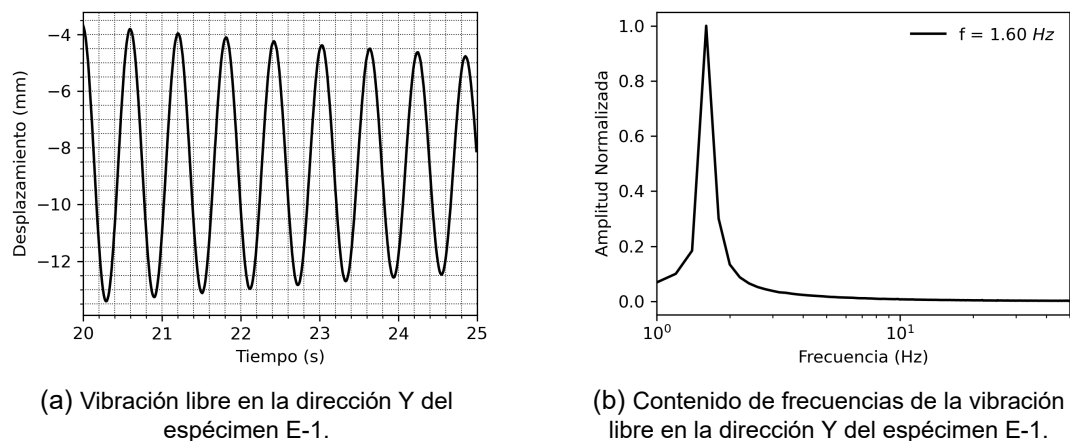


FIGURA N° 4.8: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-1.

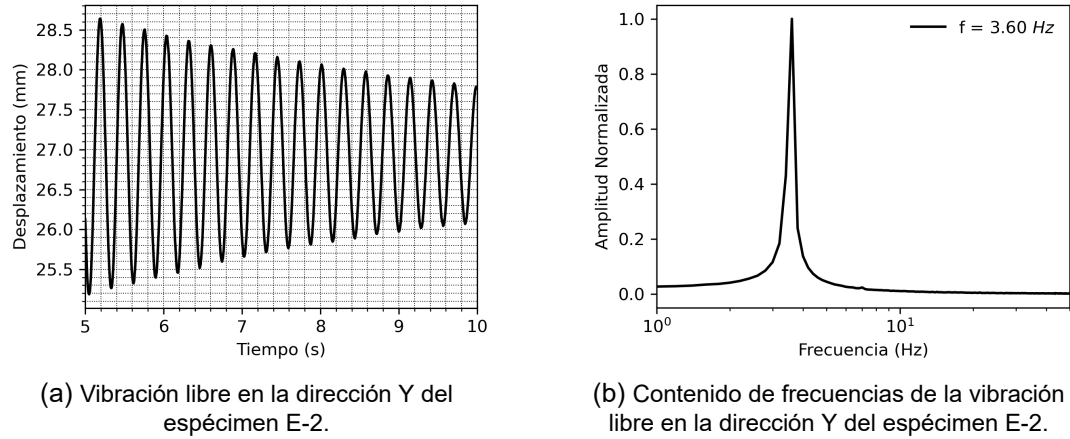


FIGURA N° 4.9: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-2.

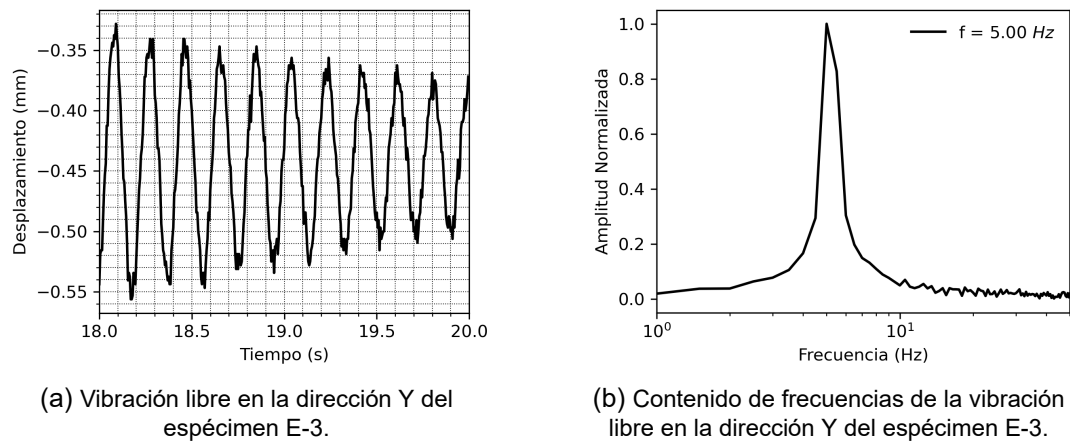


FIGURA N° 4.10: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-3.

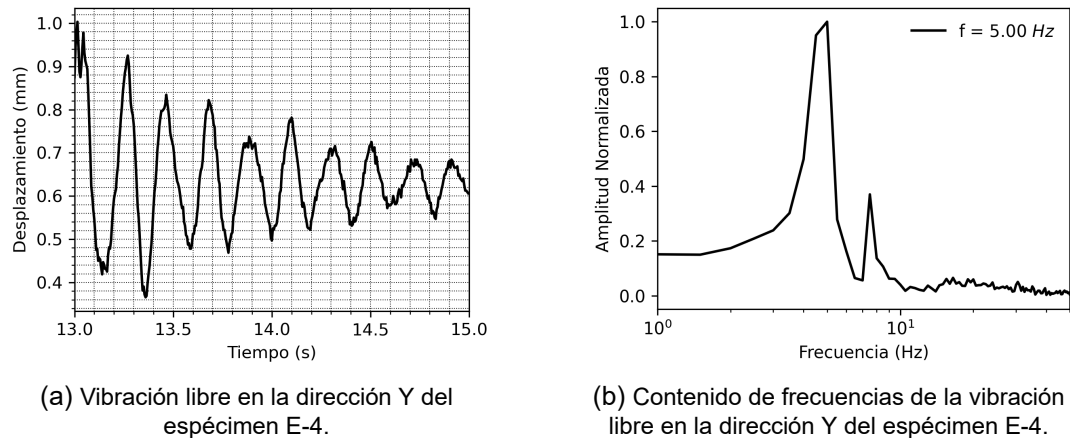


FIGURA N° 4.11: Vibración libre y contenido de frecuencias en la dirección Y del espécimen E-4.

En la Tabla N° 4.2 se resumen las propiedades como las frecuencias y periodos de vibración, además de las dimensiones de cada uno de los especímenes ensayados.

Donde:

TABLA N° 4.2: Resumen de propiedades de los especímenes.

Espécimen	f_y (Hz)	T_y (s)	Masa (kg)	B (mm)	L (mm)	h (mm)
E-1	1.60	0.63	70	600	600	450
E-2	3.60	0.28	70	600	600	450
E-3	5.00	0.20	70	600	600	450
E-4	5.00	0.20	70	600	600	450

f_y : frecuencia de vibración experimental del espécimen en la dirección Y

T_y : periodo de vibración experimental del espécimen en la dirección Y

E-1 : Especimen regular

E-2 : Especimen con dos columnas gruesas

E-3 : Especimen con una columna rotada

E-4 : Especimen con dos columnas rotadas

4.3 REGISTROS SÍSMICOS PARA LOS ENSAYOS EN LA MESA VIBRADORA

Los registros sísmicos utilizados para los ensayos en la mesa vibradora se generaron a partir de dos sismos históricos ocurridos en el Perú: sismo de Lima del año 1974 (ver Figura N° 4.12) y el sismo de Pisco del año 2007 (ver Figura N° 4.13).

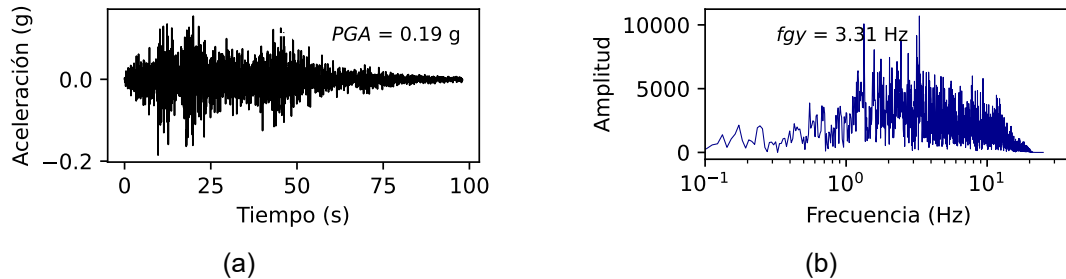


FIGURA N° 4.12: Registro original del sismo de Lima del año 1974.

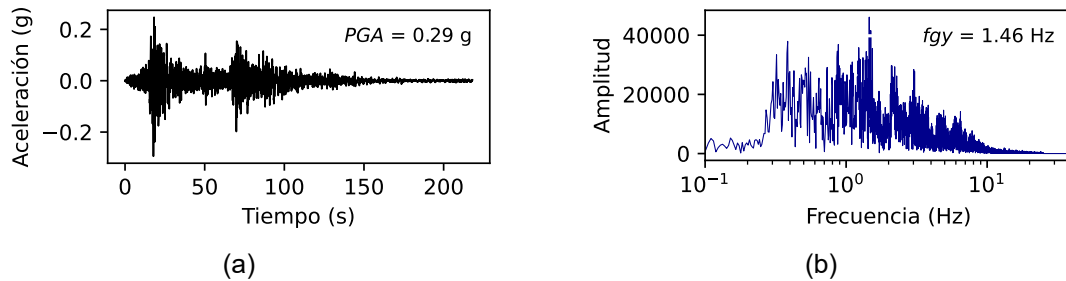


FIGURA N° 4.13: Registro original del sismo de Pisco del año 2001.

Los sismos fueron modificados con el objetivo de que el contenido de frecuencias en cada sismo incluya a las frecuencias naturales de los especímenes ensayados. Según las pruebas de vibración libre, los especímenes presentan frecuencias entre 1.60 Hz y 5 Hz. Sin embargo, el espécimen E-4 presenta una segunda frecuencia natural de vibración cercana a 10 Hz (ver Figura N° 4.11b). Por ello, se definió que los registros empleados para los ensayos dinámicos presenten un significativo contenido de frecuencias entre 1 Hz y 10 Hz. En la Figura N° 4.14 se muestra el sismo de Lima del año 1974 modificado, el cual fue registrado en la base de la mesa vibradora. La Figura N° 4.14a muestra el registro con amplitudes normalizadas, es decir, las amplitudes del registro original se dividieron entre la amplitud máxima del mismo. Además, en la Figura N° 4.14b se muestra el contenido de frecuencias de esta nueva señal. Este nuevo registro se denominará LIMA-1974.

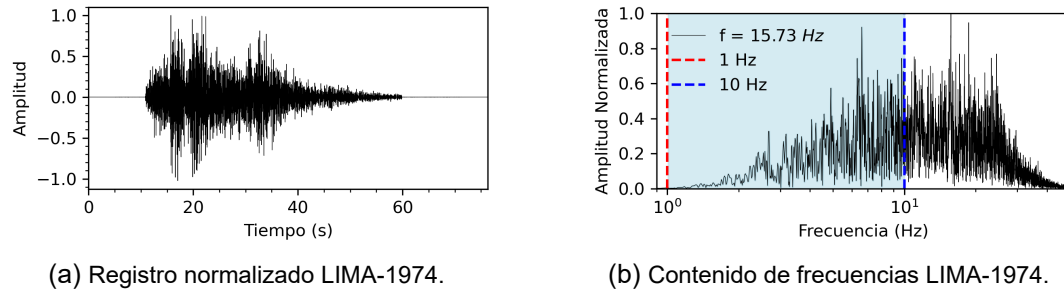


FIGURA N° 4.14: Registro de aceleraciones y contenido de frecuencias del registro LIMA-1974. En la Figura N° 4.15 se muestra el sismo de Pisco del año 2007 modificado, el cual fue registrado en la base de la mesa vibradora. La Figura N° 4.15a muestra el registro con amplitudes normalizadas, es decir, las amplitudes del registro original se dividieron entre la amplitud máxima del mismo. Además, en la Figura N° 4.15b se muestra el contenido de frecuencias de esta nueva señal. Este nuevo registro se denominará PISCO-2007.

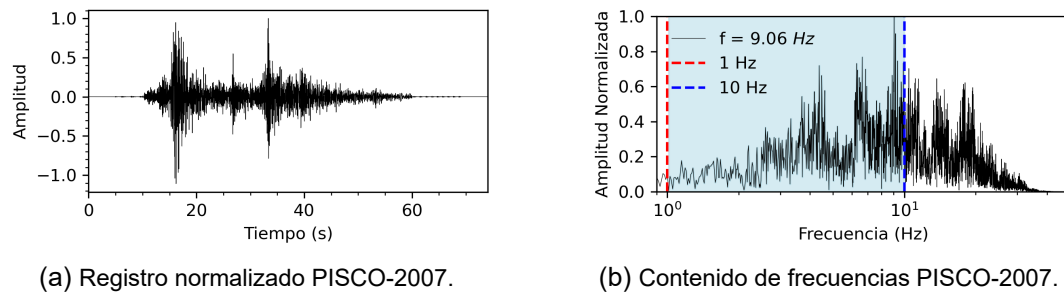


FIGURA N° 4.15: Registro de aceleraciones y contenido de frecuencias del registro PISCO-2007.

4.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Es importante señalar que se contó con 1 par de especímenes de cada tipo mostrado en la Sección 4.1, teniendo en cuenta ello, en total se ensayaron 8 especímenes. Un grupo de 4 especímenes fue sometido al registro de LIMA-1974, y el otro grupo fue sometido al registro de PISCO-2007. El procedimiento experimental consistió en un ensayo dinámico incremental, es decir, se empezó el ensayo enviando una señal de pequeña amplitud a la mesa vibradora y luego se envió una nueva señal con la amplitud incrementada, y así sucesivamente se fue ampliando la amplitud de la señal hasta que los especímenes incurrieran en el rango inelástico. Es importante señalar que los registros sísmicos fueron aplicados en la dirección Y de los especímenes. En la Tabla N° 4.3 se muestra el número de señales sísmicas a las que fueron sometidos los 8 especímenes.

TABLA N° 4.3: Resumen de especímenes y número de señales sísmicas.

Registro	Especimen	N° de señales sísmicas
LIMA-1974	E-1	8
	E-2	10
	E-3	12
	E-4	11
PISCO-2007	E-1	8
	E-2	10
	E-3	12
	E-4	10

4.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN MESA VIBRADORA

A continuación, se describirá el procedimiento realizado para el procesamiento de los datos y obtención de resultados del monitoreo de la salud estructural de cada uno de los especímenes.

4.5.1 Procedimiento del procesamiento de datos y resultados

4.5.1.1 Cálculo de aceleraciones relativas de la estructura

Las aceleraciones relativas de la estructura se calculan restando los valores de los registros de aceleraciones medidos en cada punto de la estructura con el registro de aceleraciones medido en la base como se muestra en la Ecuación 4.1.

$$Ar_i = A_i - Ag \quad (4.1)$$

Donde:

Ar_i : Registro de aceleraciones relativas en el punto i

A_i : Registro de aceleraciones absolutas en el punto i

Ag : Registro de aceleraciones en la base

4.5.1.2 Aplicación de la integración numérica

- Se aplicó la integración numérica para obtener desplazamientos a partir de los registros de aceleraciones con el método de la aceleración promedio descrito

en la Sección 2.1.3.1.

4.5.1.3 Aplicación de la transformada de ondículas

- Luego de obtener los desplazamientos, se aplicó la transformada de ondículas para descomponer estas señales en n rangos de frecuencias, donde $n = \log_2(N)$ y N es el número de datos del registro. Se seleccionaron los rangos de frecuencias con histéresis representativas de las respuestas de las estructuras. Los resultados se ilustran en las Figuras B.1 a B.8 para los registros en la base y en las Figuras B.13 a B.20 para las respuestas del centro de masa de las estructuras para el registro de LIMA-1974. Para el registro de PISCO-2007, consultar las Figuras B.27 a B.34 para los registros en la base y las Figuras B.39 a B.46 para las respuestas del centro de masa de las estructuras.
- Se sumaron las componentes de los rangos seleccionados para obtener las señales de desplazamientos filtradas.
- Se realizó la comparación entre el registro de aceleraciones de la base sin filtrar y las aceleraciones de la base filtradas con la transformada de ondículas. Además, se calcularon los contenidos de frecuencias de estas señales. Luego, las señales de desplazamientos de la base calculadas se compararon con los desplazamientos medidos. Finalmente, se calculó el contenido de frecuencias de estas nuevas señales. Ver las Figuras B.9 a B.12 para el registro de LIMA-1974. Para el registro de PISCO-2007, ver las Figuras B.35 a B.38.
- También se obtuvieron las respuestas filtradas en términos de aceleraciones relativas para cada uno de los especímenes en las direcciones X e Y. Además, se calculó el contenido de frecuencias de estas señales. Luego, las señales de desplazamientos del centro de masa calculadas se compararon con los desplazamientos medidos. Finalmente, se calculó el contenido de frecuencias de estas nuevas señales. Estos resultados se ilustran en las Figuras B.21 a B.24 para el registro de LIMA-1974. Para el registro de PISCO-2007, consultar las Figuras B.47 a B.50.
- Mediante el mismo proceso se obtuvieron los desplazamientos de las esquinas N1, N2, N3 y N4 para cada uno de los especímenes ensayados. Ver las Figuras B.25 y B.26 para el registro de LIMA-1974. Para el registro de PISCO-2007, ver las Figuras B.51 y B.52.

En la Figura N° 4.16 se muestra el diagrama de flujo que resume el procedimiento para el procesamiento de las respuestas obtenidas durante los ensayos dinámicos incrementales para cada uno de los especímenes.

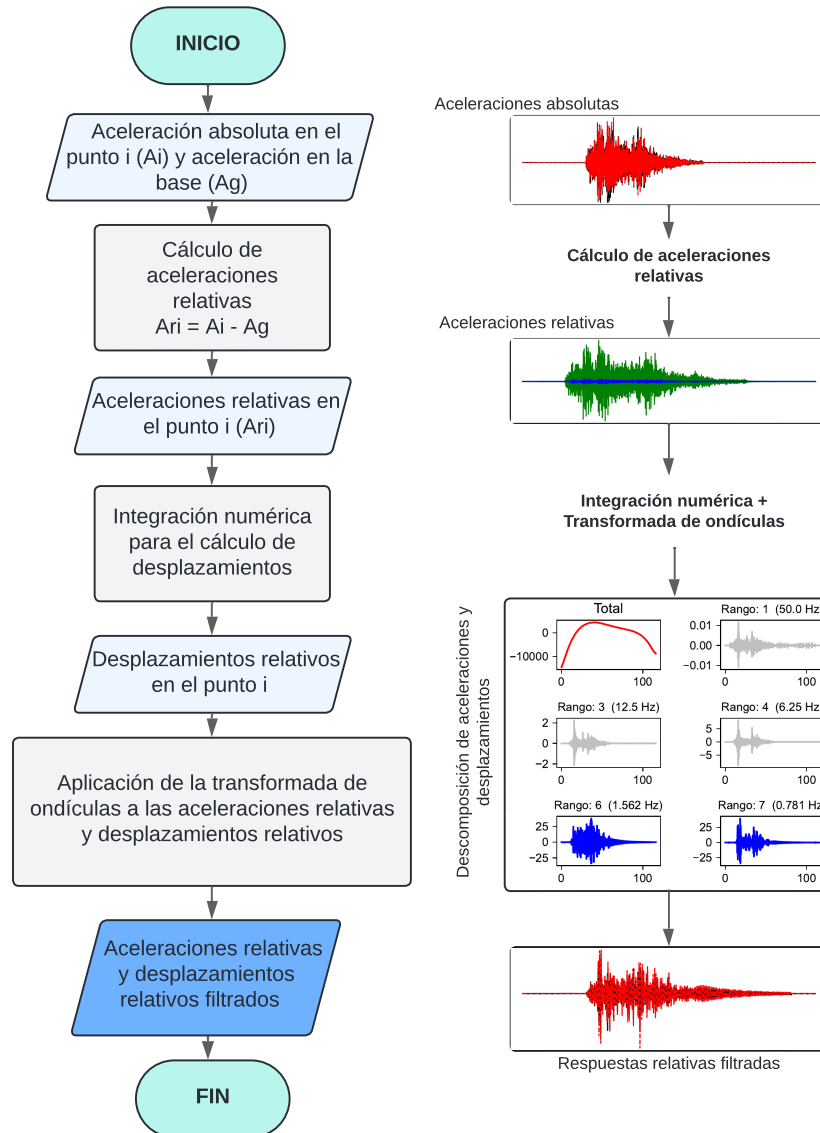


FIGURA N° 4.16: Diagrama de flujo del procesamiento de señales.

4.5.1.4 Resultados de la respuesta estructural

Luego de realizar el procesamiento de las señales del ensayo experimental incremental, se mostrarán las órbitas del centro de masa y las histéresis obtenidas para la última señal sísmica a la que fue sometido cada espécimen, es decir, para la señal con mayor amplitud. Además, se mostrará la variación del grado de irregularidad torsional para cada espécimen durante los ensayos dinámicos incrementales.

• Resultados para el registro de LIMA-1974

En la Figura N° 4.17 se pueden observar las órbitas o trayectorias descritas por los centros de masa de los especímenes E-1 (Figura N° 4.17a), E-2 (Figura N° 4.17b),

E-3 (Figura N° 4.17c) y E-4 (Figura N° 4.17d) para las últimas señales sísmicas del registro de LIMA-1974 a las que fueron sometidos respectivamente.

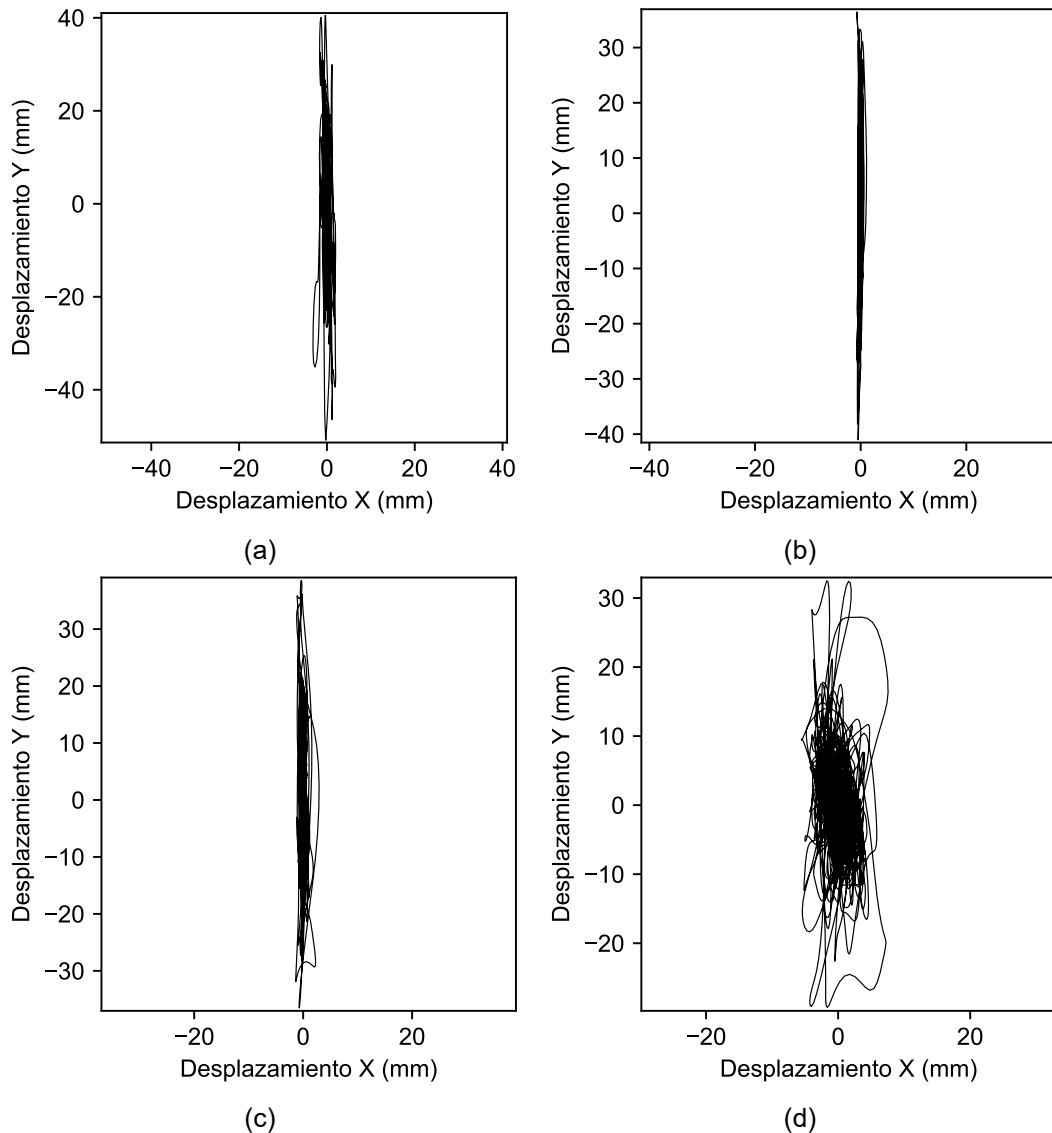


FIGURA N° 4.17: Trayectoria descrita por el centro de masa de los especímenes de prueba para el registro de LIMA-1974: (a) órbita del centro de masa del espécimen E-1, (b) órbita del centro de masa del espécimen E-2, (c) órbita del centro de masa del espécimen E-3, (d) órbita del centro de masa del espécimen E-4.

En la Figura N° 4.18 se muestran las curvas de histéresis, las cuales representan la relación entre la fuerza cortante en la base y el desplazamiento relativo del centro de masa de los especímenes E-1 (Figura N° 4.18a), E-2 (Figura N° 4.18b), E-3 (Figura N° 4.18c) y E-4 (Figura N° 4.18d) para las últimas señales sísmicas del registro de LIMA-1974 a las que fueron sometidos respectivamente. Además, se determinó la envolvente o curva de capacidad a partir del comportamiento histerético.

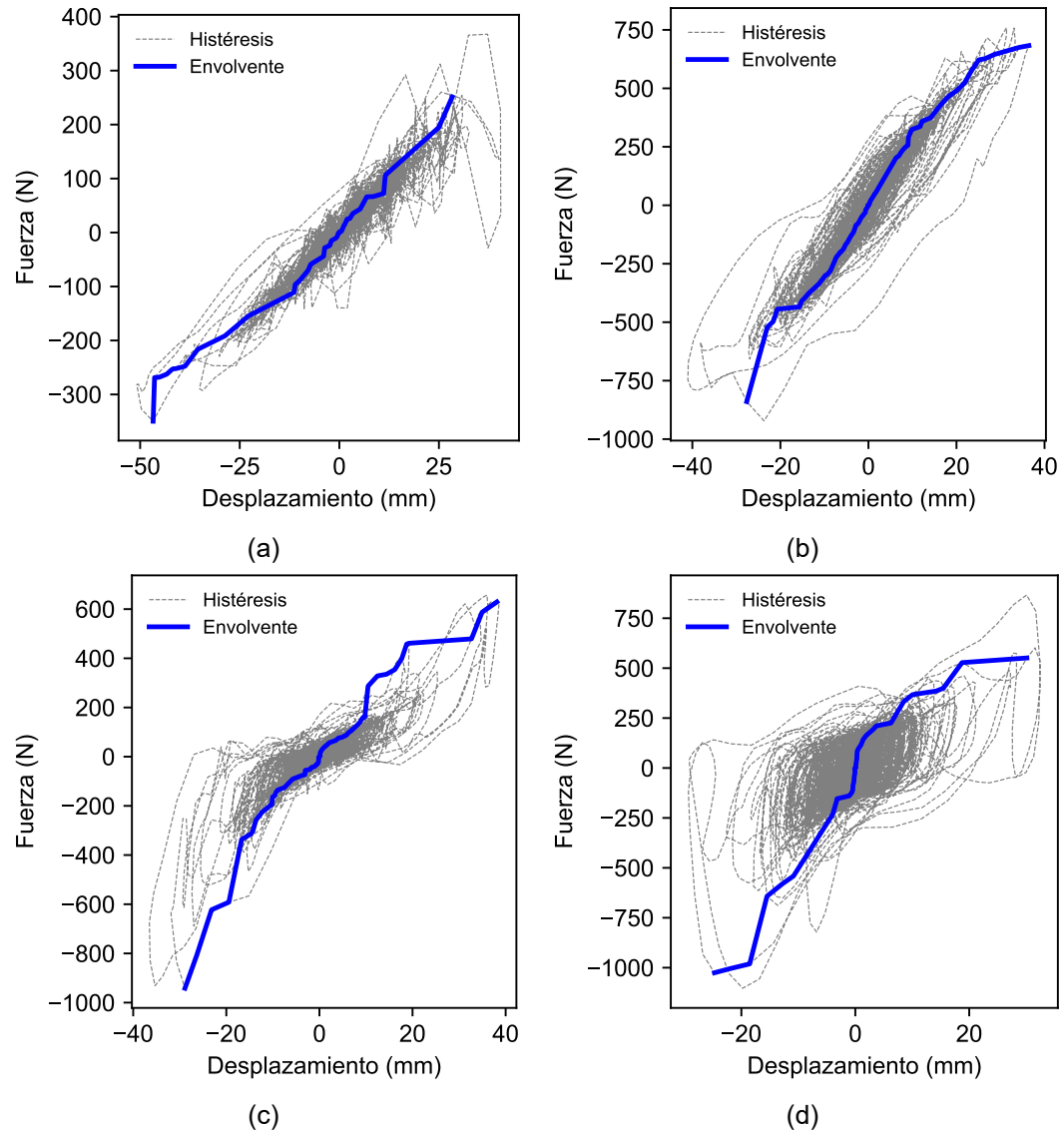


FIGURA N° 4.18: Comportamiento histerético de los especímenes de prueba para el registro de LIMA-1974: (a) histéresis del espécimen E-1, (b) histéresis del espécimen E-2, (c) histéresis del espécimen E-3, (d) histéresis del espécimen E-4.

Además, en la Figura N° 4.19 se muestra la variación del grado de irregularidad torsional G_{it} en función de diferentes valores del PGA de las señales sísmicas a las que fueron sometidos los especímenes E-1 (Figura N° 4.19a), E-2 (Figura N° 4.19b), E-3 (Figura N° 4.19c) y E-4 (Figura N° 4.19d) durante los ensayos dinámicos incrementales. Cada punto de las figuras representa el valor del G_{it} obtenido para cada señal enviada.

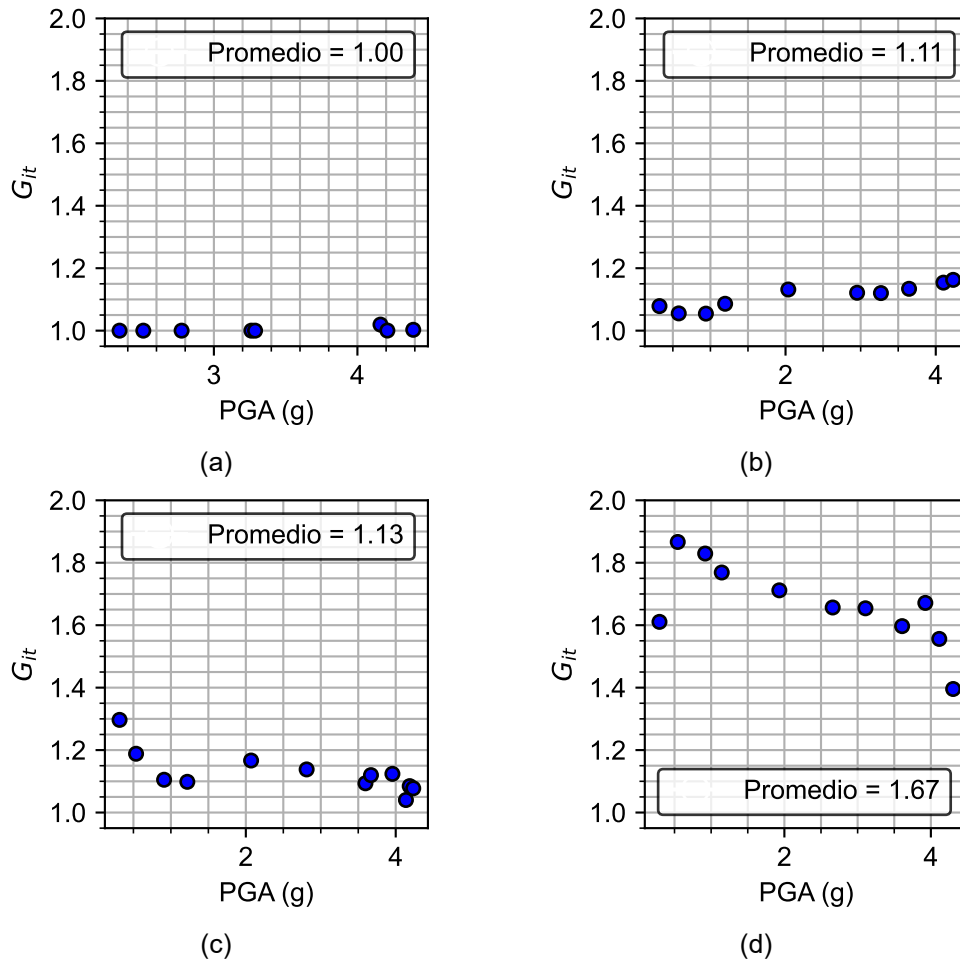


FIGURA N° 4.19: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con el PGA en los especímenes para el registro de LIMA-1974: (a) G_{it} del espécimen E-1, (b) G_{it} del espécimen E-2, (c) G_{it} del espécimen E-3, (d) G_{it} del espécimen E-4.

Finalmente, en la Figura N° 4.20 se muestra la variación del grado de irregularidad torsional G_{it} en función de diferentes valores de la distorsión en los especímenes E-1 (Figura N° 4.20a), E-2 (Figura N° 4.20b), E-3 (Figura N° 4.20c) y E-4 (Figura N° 4.20d) obtenidos durante los ensayos dinámicos incrementales. Cada punto de las figuras representa el valor del G_{it} obtenido para cada señal enviada. Se puede observar que el espécimen E-1 no presenta ningún tipo de amplificación de la respuesta debido a su configuración regular ($G_{it} = 1$). Los especímenes E-2 y E-3 presentan un valor de G_{it} mayor a la unidad, pero menor a 1.3, por lo cual son consideradas como estructuras regulares según los criterios de la norma peruana E.030-2018. Finalmente, la estructura E-4 presenta valores de G_{it} mayores a 1.5, por lo cual presenta irregularidad torsional extrema según la norma peruana. Además se observa que la amplificación de la respuesta para esta estructura decrece a medida que los desplazamientos de la estructura aumentan.

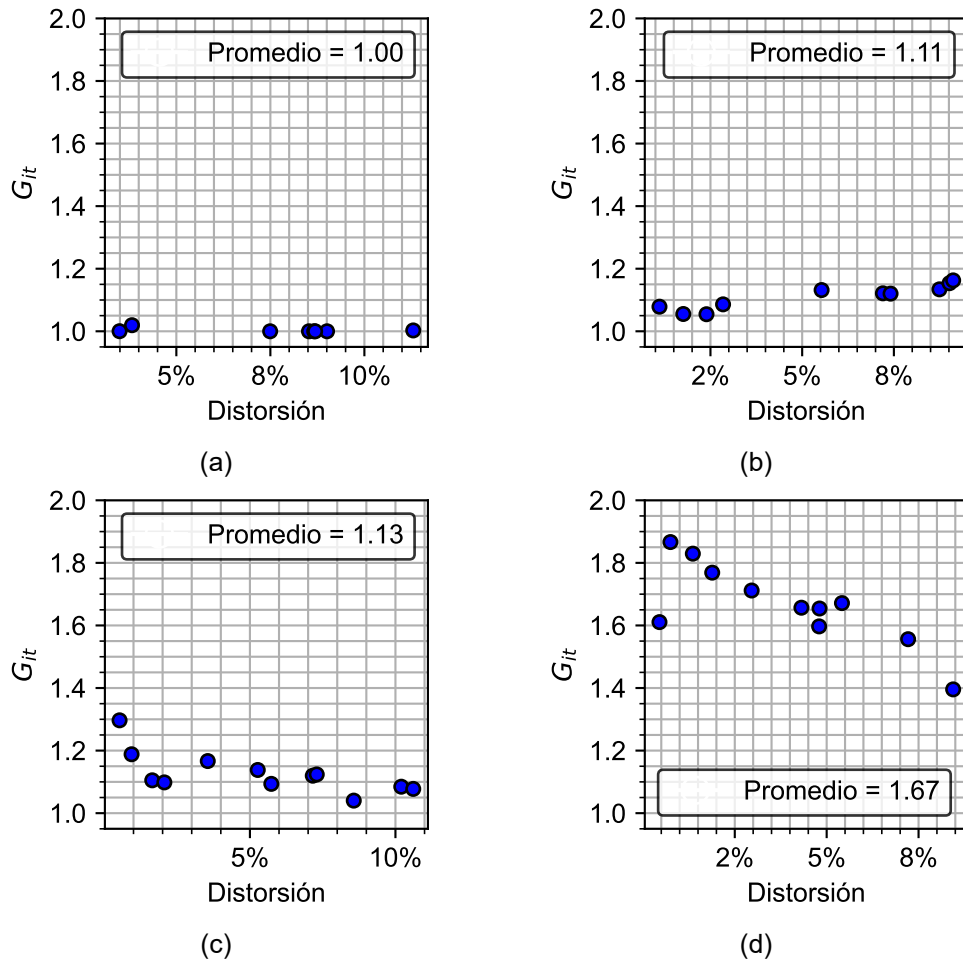


FIGURA N° 4.20: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con la distorsión en los especímenes para el registro de LIMA-1974: (a) G_{it} del espécimen E-1, (b) G_{it} del espécimen E-2, (c) G_{it} del espécimen E-3, (d) G_{it} del espécimen E-4.

• Resultados para el registro de PISCO-2007

En la Figura N° 4.21 se pueden observar las órbitas o trayectorias descritas por los centros de masa de los especímenes E-1 (Figura N° 4.21a), E-2 (Figura N° 4.21b), E-3 (Figura N° 4.21c) y E-4 (Figura N° 4.21d) para las últimas señales sísmicas del registro PISCO-2007 a las que fueron sometidos respectivamente.

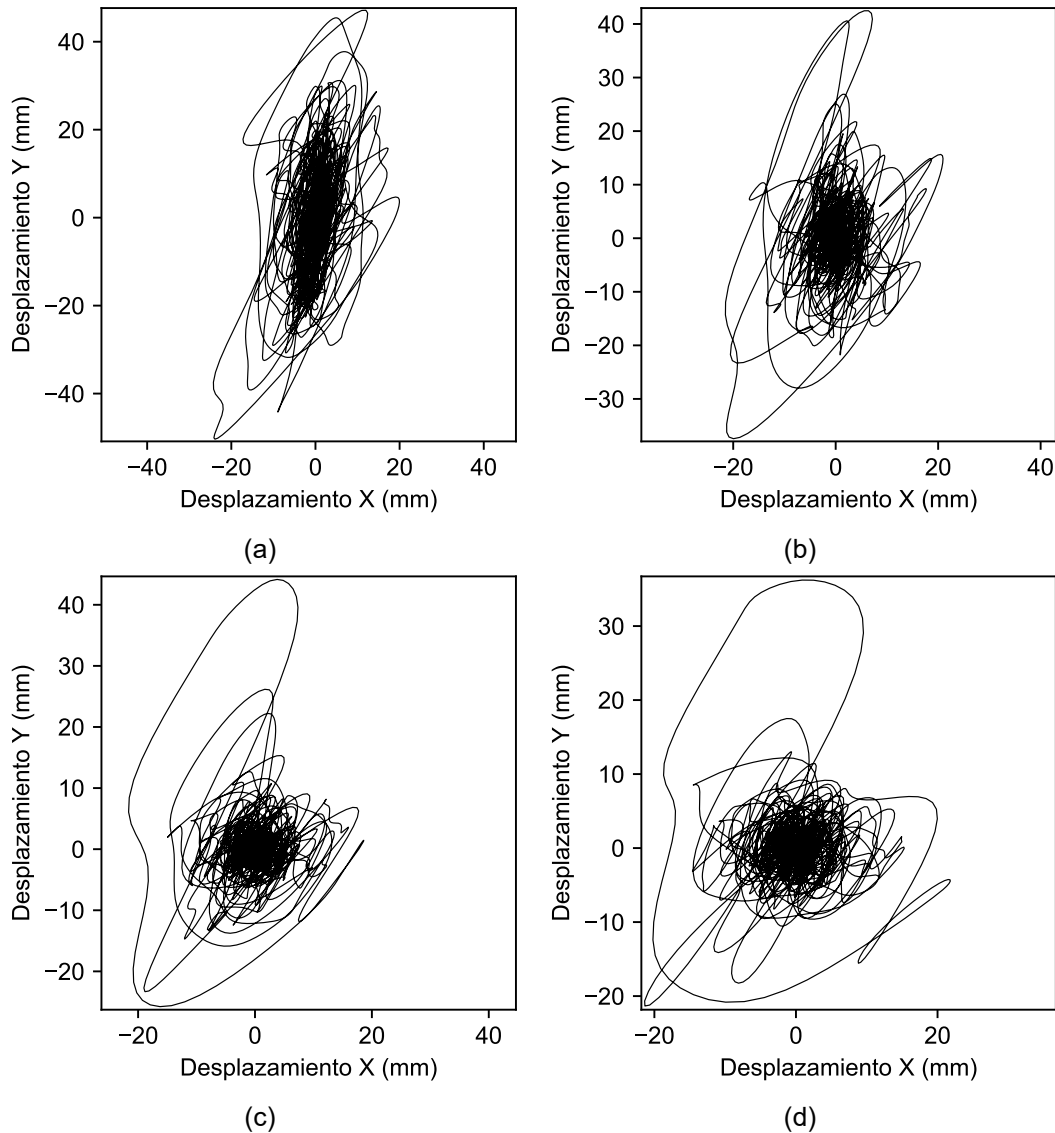


FIGURA N° 4.21: Trayectoria descrita por el centro de masa de los especímenes de prueba para el registro de PISCO-2007: (a) órbita del centro de masa del espécimen E-1, (b) órbita del centro de masa del espécimen E-2, (c) órbita del centro de masa del espécimen E-3, (d) órbita del centro de masa del espécimen E-4.

En la Figura N° 4.22 se muestran las curvas de histéresis, las cuales representan la relación entre la fuerza cortante en la base y el desplazamiento relativo del centro de masa de los especímenes E-1 (Figura N° 4.22a), E-2 (Figura N° 4.22b), E-3 (Figura N° 4.22c) y E-4 (Figura N° 4.22d) para las últimas señales sísmicas del registro PISCO-2007 a las que fueron sometidos respectivamente. Además, se determinó la envolvente o curva de capacidad a partir del comportamiento histerético.

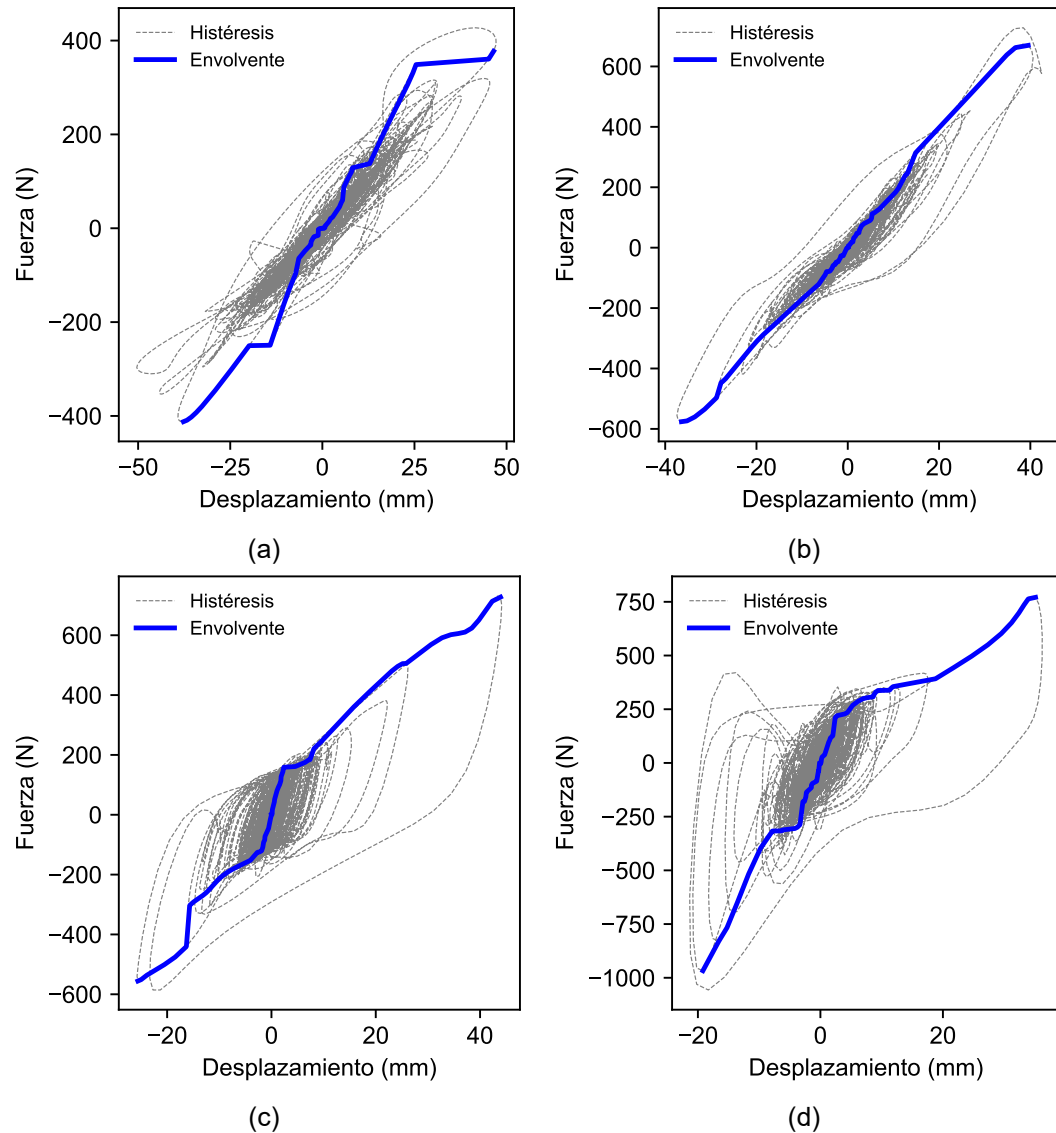


FIGURA N° 4.22: Comportamiento histerético de los especímenes de prueba para el registro de PISCO-2007: (a) histéresis del espécimen E-1, (b) histéresis del espécimen E-2, (c) histéresis del espécimen E-3, (d) histéresis del espécimen E-4.

Además, en la Figura N° 4.23 se muestra la variación del grado de irregularidad torsional G_{it} en función de diferentes valores del PGA de las señales sísmicas a las que fueron sometidos los especímenes E-1 (Figura N° 4.23a), E-2 (Figura N° 4.23b), E-3 (Figura N° 4.23c) y E-4 (Figura N° 4.23d) durante los ensayos dinámicos incrementales. Cada punto de las figuras representa el valor del G_{it} obtenido para cada señal enviada.

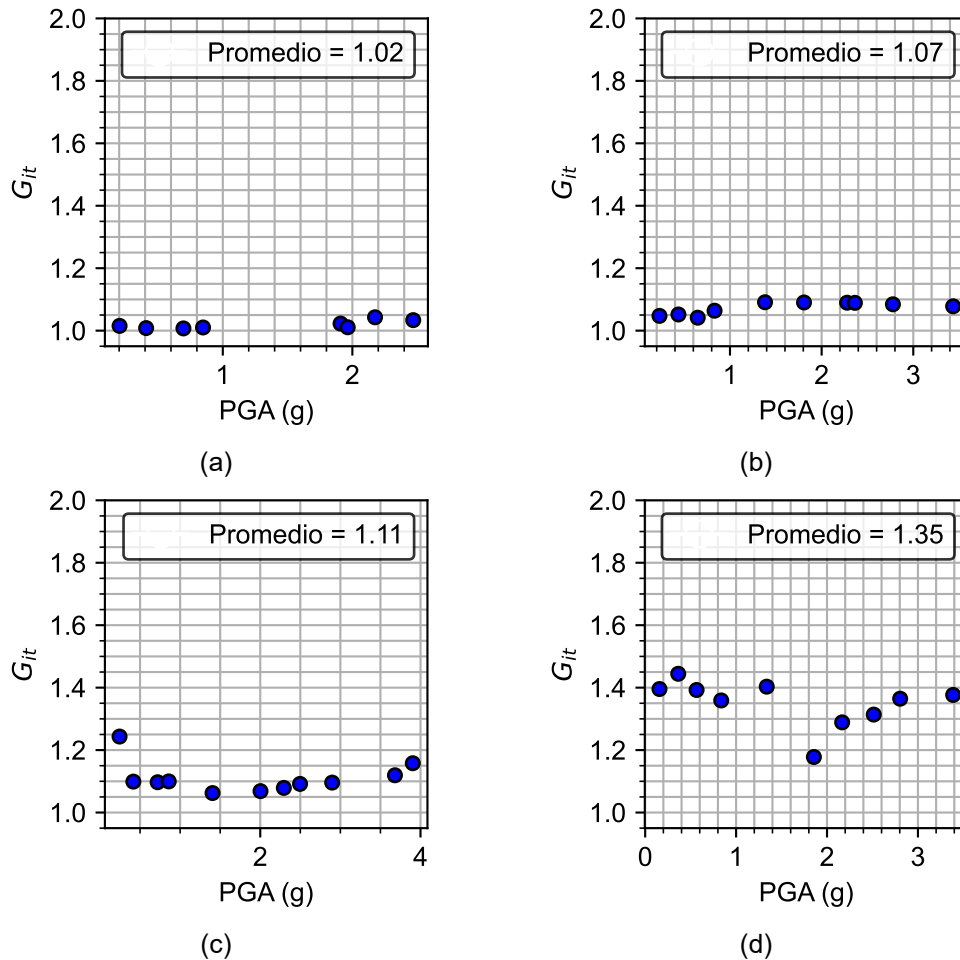


FIGURA N° 4.23: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con el PGA en los especímenes para el registro de PISCO-2007: (a) G_{it} del espécimen E-1, (b) G_{it} del espécimen E-2, (c) G_{it} del espécimen E-3, (d) G_{it} del espécimen E-4.

Finalmente, en la Figura N° 4.24 se muestra la variación del grado de irregularidad torsional G_{it} en función de diferentes valores de las distorsiones en los especímenes E-1 (Figura N° 4.24a), E-2 (Figura N° 4.24b), E-3 (Figura N° 4.24c) y E-4 (Figura N° 4.24d) obtenidos durante los ensayos dinámicos incrementales. Cada punto de las figuras representa el valor del G_{it} obtenido para cada señal enviada. Se puede observar que el espécimen E-1 presenta amplificaciones pequeñas de la respuesta debido a su configuración regular ($G_{it} \approx 1$). Los especímenes E-2 y E-3 presentan un valor de G_{it} mayor a la unidad, pero menor a 1.3, por lo cual son consideradas como estructuras regulares según los criterios de la norma peruana E.030-2018. Finalmente, la estructura E-4 presenta valores de G_{it} menores a 1.5 y mayores a 1.3 en la mayoría de puntos, por lo cual se concluye que presenta irregularidad torsional según la norma peruana.

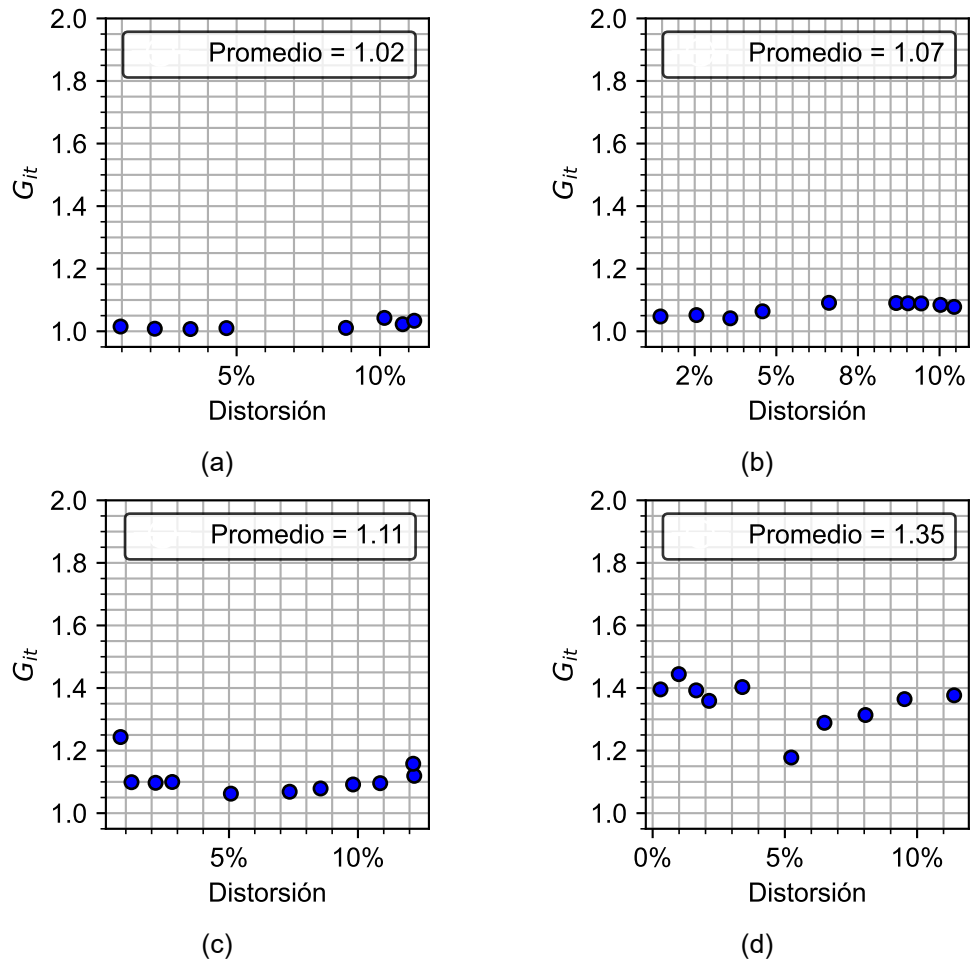


FIGURA N° 4.24: Variación del grado de irregularidad torsional G_{it} con la distorsión en los especímenes de prueba para el registro de PISCO-2007: (a) G_{it} del espécimen E-1, (b) G_{it} del espécimen E-2, (c) G_{it} del espécimen E-3, (d) G_{it} del espécimen E-4.

CAPÍTULO V: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

5.1 CÁLCULO DE RESPUESTAS MÁXIMAS A PARTIR DE UN SENSOR

De los resultados de los ensayos experimentales mostrados en las figuras 4.20 y 4.24 se pudo observar que el grado de irregularidad torsional presentado por el espécimen E-1 tiende a la unidad para los registros sísmicos empleados. Por ello, en esta sección se ajustará y validará el modelo de predicción desarrollado en la sección 3.6.1.2 utilizando los datos obtenidos para los especímenes E-2, E-3 y E-4. En la Figura N° 5.1 se puede observar la relación entre los valores experimentales del G_{it} y los parámetros de estudio, obtenidos para los especímenes E-2, E-3 y E-4. Por otro lado, se determinará una expresión matemática para el cálculo del G_{it} a partir de los parámetros validados en la Sección 3.6.1.2 utilizando los datos obtenidos para estos especímenes.

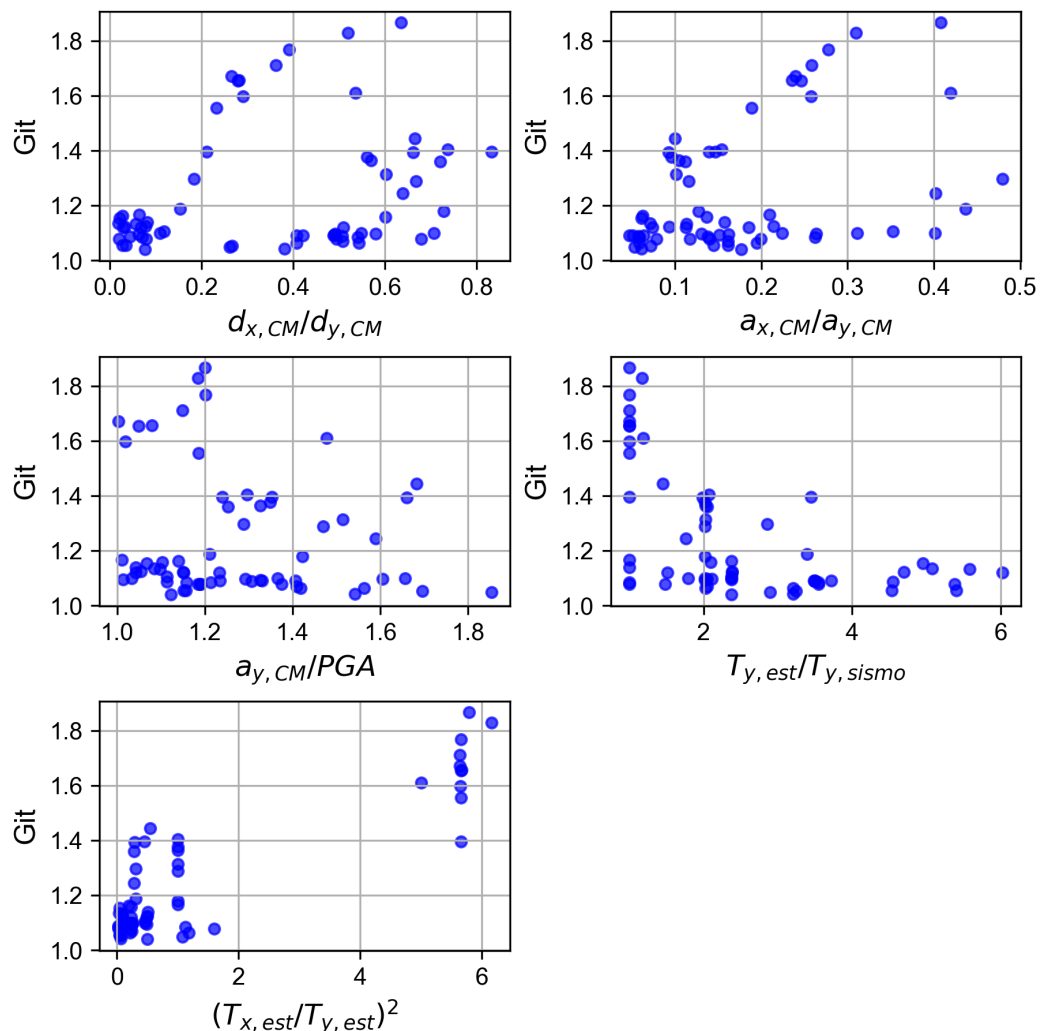


FIGURA N° 5.1: Relación del G_{it} con los parámetros de estudio.

En la tabla Tabla N° 5.1 se puede ver el resumen estadístico de los parámetros

obtenidos experimentalmente. En la Figura N° 5.2 se pueden observar los histogramas de estos parámetros.

TABLA N° 5.1: Resumen estadístico de los parámetros experimentales.

Estad.	$\frac{d_{x,CM}}{d_{y,CM}}$	$\frac{a_{x,CM}}{a_{y,CM}}$	$\frac{a_{y,CM}}{PGA}$	$\frac{T_{y,est}}{T_{y,sismo}}$	$\left(\frac{T_{x,est}}{T_{y,est}}\right)^2$	G_{it}
cant.	64	64	64	64	64	64
prom.	0.35	0.18	1.27	2.50	1.30	1.24
mín.	0.02	0.05	1.00	1.00	0.02	1.04
Q1	0.08	0.10	1.12	1.47	0.09	1.09
Q2	0.39	0.15	1.21	2.06	0.31	1.12
Q3	0.55	0.24	1.38	3.40	1.00	1.37
máx.	0.83	0.48	1.85	6.03	6.15	1.87

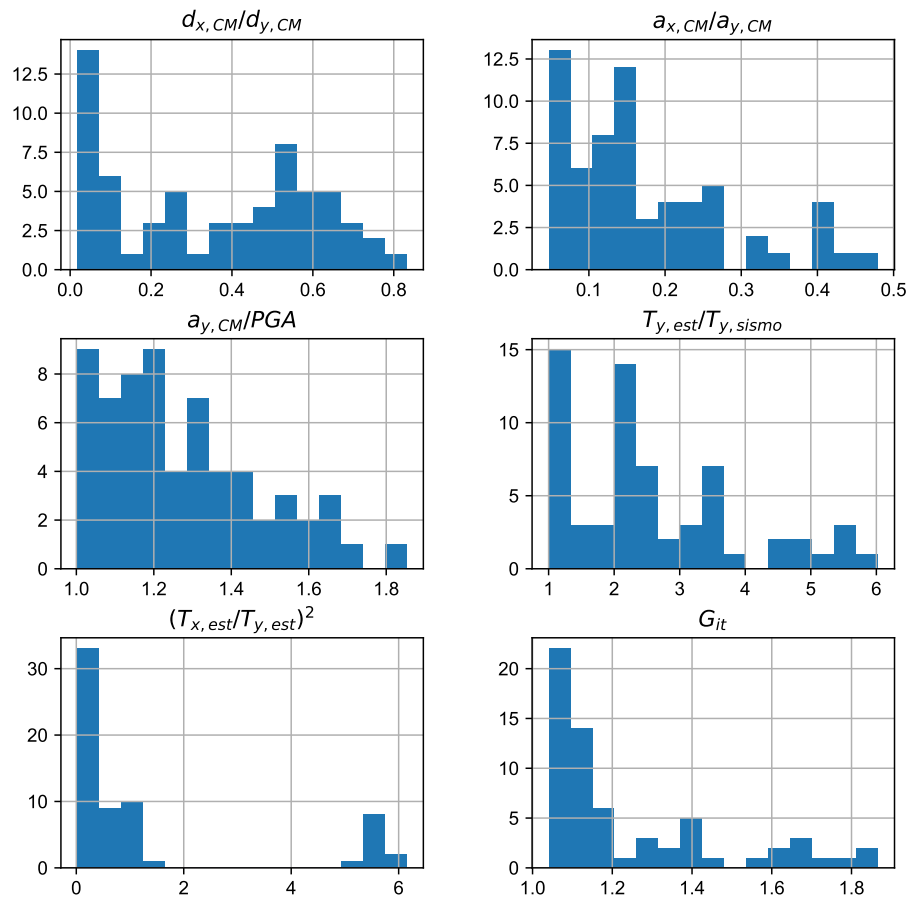


FIGURA N° 5.2: Histogramas de los parámetros experimentales.

5.1.1 Modelo híbrido de predicción

Luego de obtener los parámetros de estudio experimentales, se realizó el ajuste del modelo desarrollado en la Sección 3.6.1.2. Este ajuste se realizó mediante el entrenamiento del modelo de predicción con los datos experimentales. En este proceso, se seleccionó aleatoriamente un 40 % de los datos experimentales para el entrenamiento y el 60 % restante se empleó para validar el nuevo modelo. El nuevo modelo se denominará modelo híbrido de predicción, esto debido a que este modelo ha sido entrenado con datos de simulaciones numéricas y se ha ajustado con los datos experimentales. El proceso mencionado anteriormente se grafica en la Figura N° 5.3.

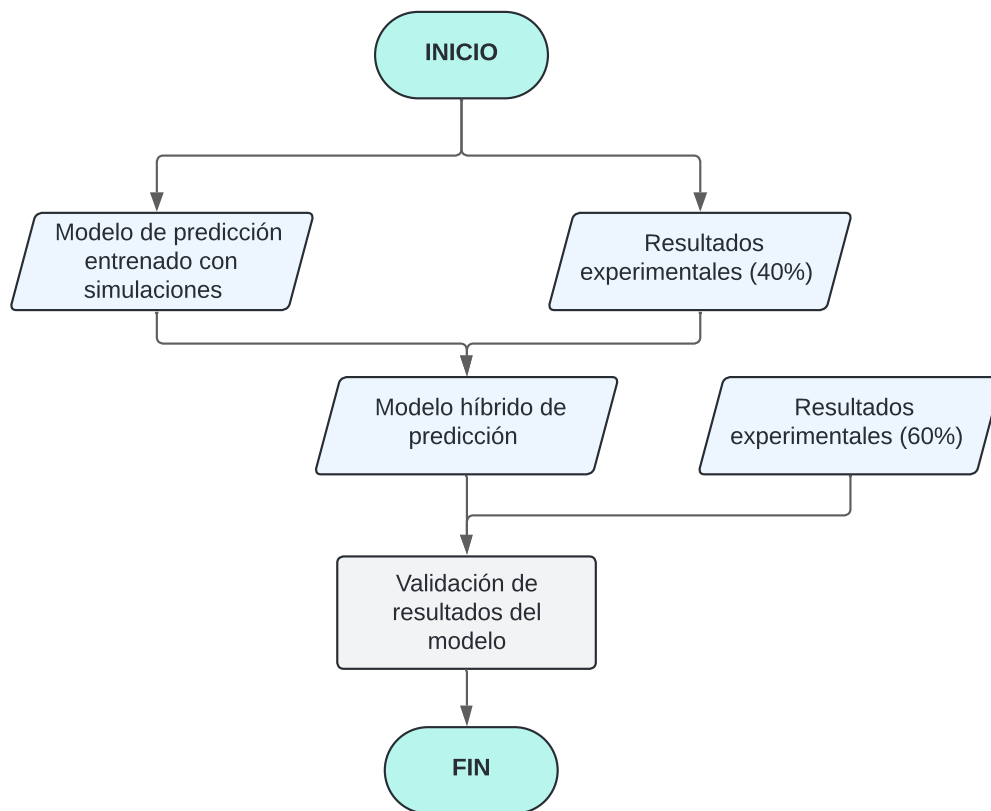


FIGURA N° 5.3: Diagrama de flujo para la creación del modelo híbrido de predicción.

Los resultados obtenidos de la evaluación del modelo de híbrido de predicción en los resultados experimentales de validación se pueden observar en la Figura N° 5.4.

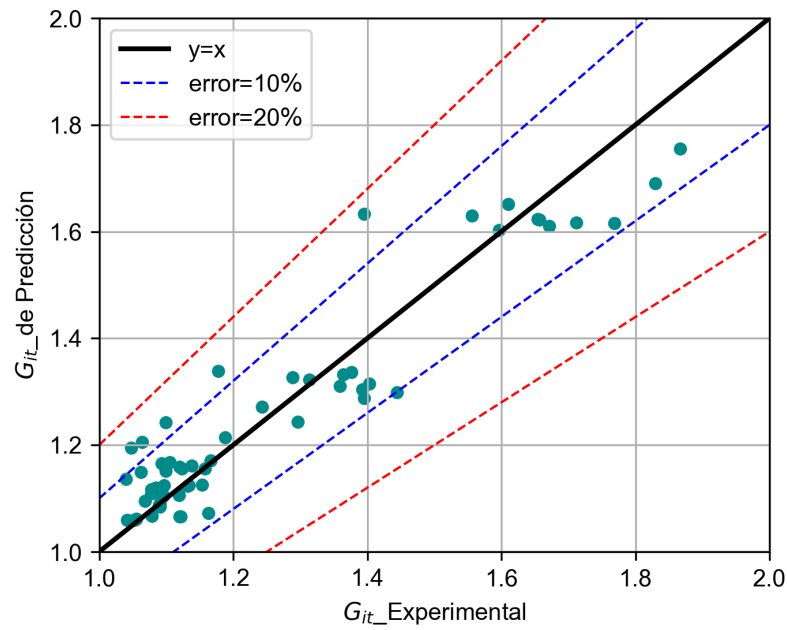


FIGURA N° 5.4: Comparación entre el G_{it} experimental y el G_{it} de predicción. Asimismo, se muestra la tabla de métricas de rendimiento del modelo de predicción para el cálculo del G_{it} :

TABLA N° 5.2: Métricas de rendimiento para la predicción del G_{it} experimental.

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.09	11.40	0.84

Como se conoce la distorsión del centro de masa en cada uno de los ensayos dinámicos, se pueden calcular las distorsiones máximas de los especímenes con la expresión $dr_{y,max} = dr_{y,CM} * G_{it}$ y comparar estos valores experimentales con los valores calculados. Dicha comparación se muestra en la Figura N° 5.5.

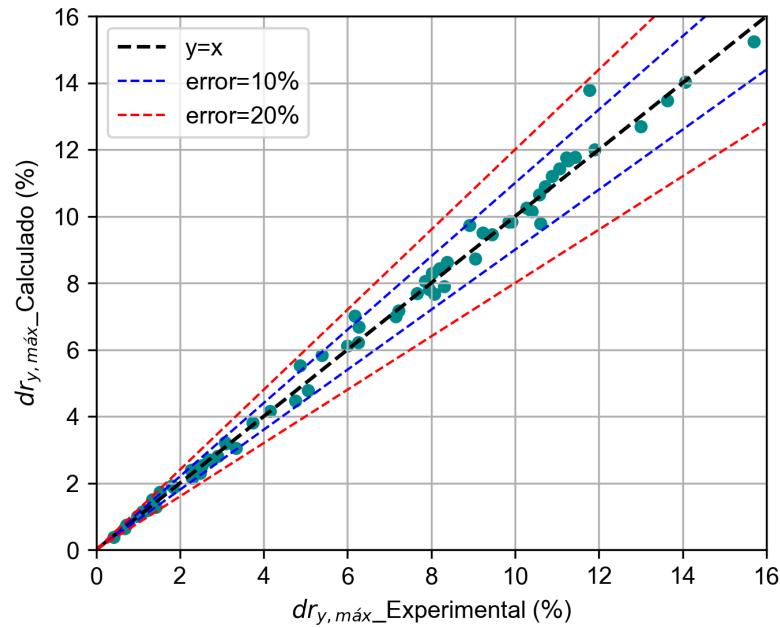


FIGURA N° 5.5: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado a partir del modelo de predicción.

Asimismo, se muestra la tabla de métricas de rendimiento del modelo de predicción para el cálculo del $dr_{y,max}$:

TABLA N° 5.3: Métricas de rendimiento para la estimación de $dr_{y,max}$.

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.005	3.56	0.98

Como se pudo observar en la Figura N° 5.5 y en la Tabla N° 5.3 los valores de las distorsiones máximas $dr_{y,max}$ obtenidos a partir del modelo de predicción se ajustan a los resultados experimentales. Sin embargo, la desventaja del modelo de predicción desarrollado es que no se cuenta con una ecuación explícita que relacione a los parámetros propuestos con el G_{it} . Por ello, en la siguiente sección, se propondrá una expresión matemática que permita calcular el G_{it} a partir de los resultados experimentales.

5.1.2 Relación entre el G_{it} y los parámetros propuestos

En esta sección se establecerá una expresión matemática para el cálculo del G_{it} con el fin de obtener una relación entre esta variable y los parámetros mostrados en la Figura N° 5.1, dicha expresión se obtuvo a partir de un proceso de regresión lineal múltiple. De la regresión lineal realizada se obtuvo la Ecuación 5.2, la cual relaciona el G_{it} con los parámetros propuestos. Nótese que no se ha incluido al

parámetro $(L/B)^2$ debido a que este es un valor constante igual a la unidad para todos los especímenes ensayados.

$$G_{it} = 1 + 0.26 \frac{d_{x,CM}}{d_{y,CM}} + 0.21 \frac{a_{x,CM}}{a_{y,CM}} + 0.00 \frac{a_{y,CM}}{PGA} + 0.02 \frac{T_{y,est}}{T_{y,sismo}} + 0.10 \left(\frac{T_{x,est}}{T_{y,est}} \right)^2 \quad (5.1)$$

$$G_{it} = 1 + 0.26 \frac{d_{x,CM}}{d_{y,CM}} + 0.21 \frac{a_{x,CM}}{a_{y,CM}} + 0.02 \frac{T_{y,est}}{T_{y,sismo}} + 0.10 \left(\frac{T_{x,est}}{T_{y,est}} \right)^2 \quad (5.2)$$

Donde:

- G_{it} : Grado de irregularidad torsional
- $d_{x,CM}$: Desplazamiento máximo del centro de masa en la dirección X
- $d_{y,CM}$: Desplazamiento máximo del centro de masa en la dirección Y
- $T_{x,est}$: Periodo de respuesta de la estructura en la dirección X
- $T_{y,est}$: Periodo de respuesta de la estructura en la dirección Y
- $T_{y,sismo}$: Periodo del registro sísmico en la dirección Y
- $a_{x,CM}$: Aceleración máxima del centro de masa en la dirección X
- $a_{y,CM}$: Aceleración máxima del centro de masa en la dirección Y
- PGA : Aceleración máxima del registro sísmico

Además, en la Figura N° 5.6 se muestra la comparación entre el G_{it} experimental y el G_{it} calculado con la ecuación propuesta anteriormente.

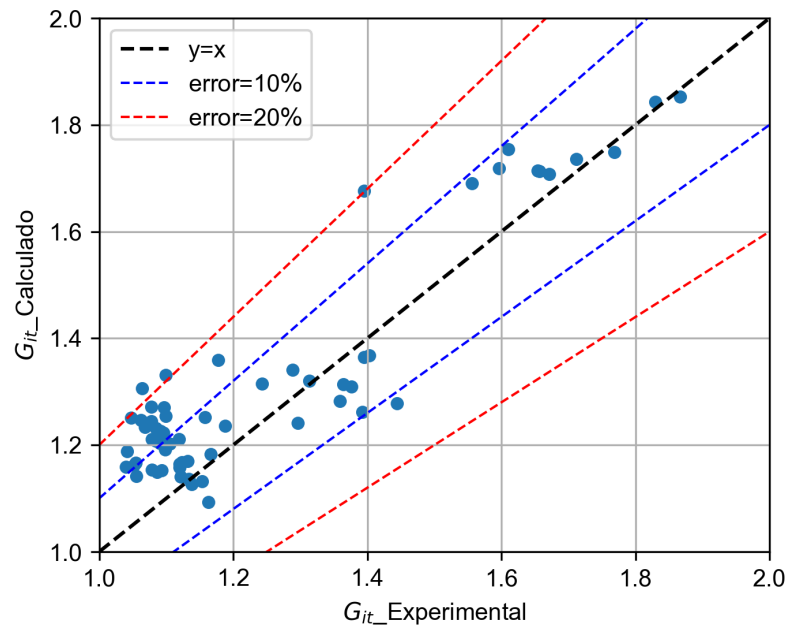


FIGURA N° 5.6: Comparación entre el G_{it} experimental y el G_{it} calculado.

Asimismo, se muestra la tabla de métricas de rendimiento del modelo de regresión lineal múltiple para el cálculo del G_{it} :

TABLA N° 5.4: Métricas de rendimiento del modelo de Regresión Lineal Múltiple

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.116	14.03	0.73

Como se conoce la distorsión del centro de masa en cada uno de los ensayos dinámicos, se pueden calcular las distorsiones máximas de los especímenes con la expresión $dr_{y,max} = dr_{y,CM} * G_{it}$ y comparar estos valores experimentales con los valores calculados. Dicha comparación se muestra en la Figura N° 5.7.

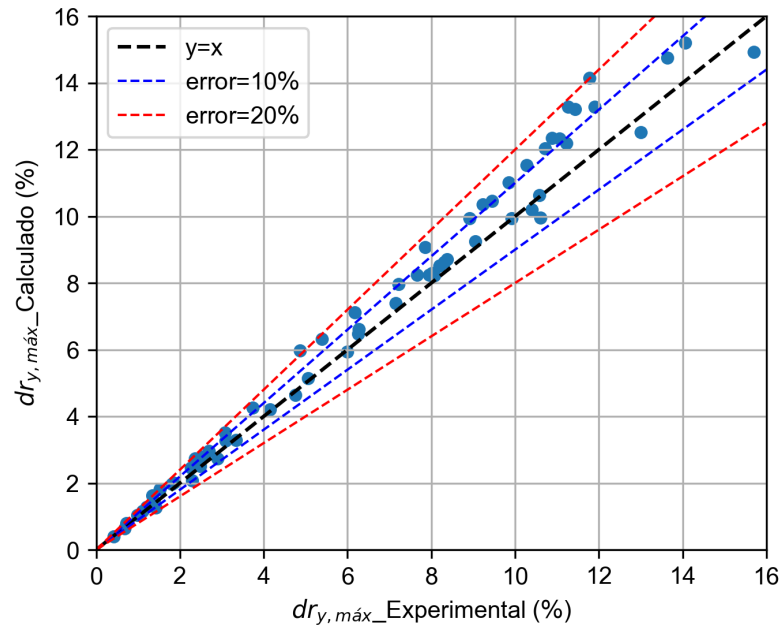


FIGURA N° 5.7: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado.

Asimismo, en la Tabla N° 5.5 se muestran las métricas de rendimiento para el cálculo de distorsiones máximas.

TABLA N° 5.5: Métricas de rendimiento para el cálculo de distorsiones

RMSE	NRMSE (%)	R2
0.008	5.08	0.964

5.2 CÁLCULO DE RESPUESTAS MÁXIMAS A PARTIR DE DOS SENSORES

En la sección anterior se ha propuesto un método mediante el cual se puede estimar la respuesta máxima de una estructura con irregularidad torsional a partir de la respuesta en el centro de masa. En esta sección se propone un método alternativo para el cálculo de las respuestas máximas de este tipo de estructuras considerando que se cuenta con la información de las respuestas de dos puntos en una misma planta. Uno de estos puntos de referencia será el centro de masa de la estructura, mientras que el otro será un punto ubicado en otra zona de la planta en estudio. A partir de estos dos puntos, se estimará la respuesta de un tercer punto. De esta manera, se establece un conjunto de tres puntos ubicados en una misma planta de la estructura. Esto se ilustra en la Figura N° 5.8. Se asumió que los desplazamientos considerados ocurren en el instante en el que el desplazamiento del centro de masa es el máximo en la dirección Y.

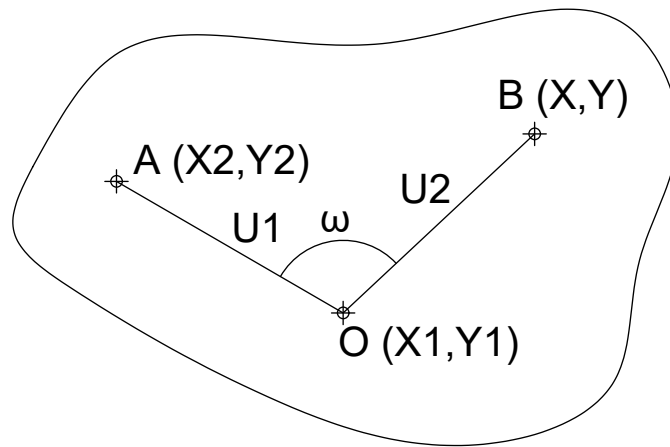


FIGURA N° 5.8: Esquema general de puntos y vectores en planta.

Donde:

- O : Centro de masa de la planta cuya respuesta es conocida
- A : Punto en planta cuya respuesta es conocida
- B : Punto en planta cuya respuesta es desconocida
- $U1$: Vector $\vec{OA}$
- $U2$: Vector $\vec{OB}$
- ω : Ángulo entre el vector $\vec{OA}$ y el vector $\vec{OB}$

El objetivo es determinar el desplazamiento del punto B con base en la información de los desplazamientos registrados en los puntos O y A . Además, se considera que estos puntos se encuentran en un diafragma rígido, por lo cual, el ángulo entre los vectores $U1$ y $U2$ se mantendrá constante.

Considerando que se conocen las coordenadas iniciales de los puntos $O (X1_0, Y1_0)$ y $A (X2_0, Y2_0)$ y sus vectores de desplazamiento $\vec{D}_O$ y $\vec{D}_A$ se pueden calcular las nuevas coordenadas de estos dos puntos como sigue:

$$X1 = D_{Ox} + X1_0 \quad (5.3)$$

$$Y1 = D_{Oy} + Y1_0 \quad (5.4)$$

$$X2 = D_{Ax} + X2_0 \quad (5.5)$$

$$Y2 = D_{Ay} + Y2_0 \quad (5.6)$$

Donde:

D_{Ox} : Componente X del vector $\vec{D}_O$

D_{Oy} : Componente Y del vector $\vec{D}_O$

D_{Ax} : Componente X del vector $\vec{D}_A$

D_{Ay} : Componente Y del vector $\vec{D}_A$

Las coordenadas del punto B pueden ser determinadas con la Ecuación 5.7.

$$B = O + U2 \quad (5.7)$$

Como las coordenadas del punto O son conocidas en cada instante de tiempo, solo restaría determinar el valor de las componentes del vector $U2$ para conocer las coordenadas del punto objetivo B . El vector $U2$ puede ser expresado mediante su vector unitario según la Ecuación 5.8:

$$U2 = u2|U2| \quad (5.8)$$

Donde:

$u2$: Vector unitario del vector $U2$

$|U2|$: Módulo del vector $U2$

Dado que se está considerando que los puntos están ubicados en un diafragma rígido, podemos asumir que el módulo del vector $U2$ permanecerá constante. Por lo tanto, lo único que resta por determinar son las componentes de su vector unitario para obtener por completo el vector $U2$. Debido a que se conocen las componentes del vector $U1$ y el ángulo que éste forma con el vector $U2$ se procederá a determinar las componentes del vector unitario $u2$ a partir del vector unitario $u1$. En la Figura N° 5.9 se muestra un esquema de los vectores unitarios mencionados dentro de una semi-circunferencia de radio 1.

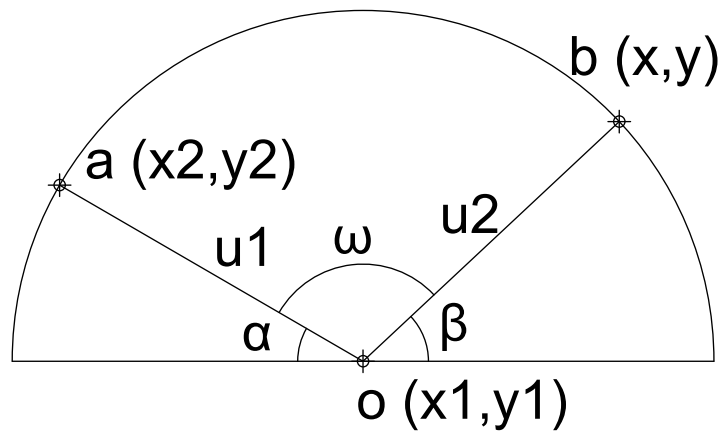


FIGURA N° 5.9: Esquema de vectores unitarios.

Las componentes de los vectores unitarios se pueden calcular como sigue:

$$u1_x = x2 - x1 \quad (5.9)$$

$$u1_y = y2 - y1 \quad (5.10)$$

$$u2_x = x - x1 \quad (5.11)$$

$$u2_y = y - y1 \quad (5.12)$$

Donde:

$u1_x$: Componente X del vector unitario $u1$

$u1_y$: Componente Y del vector unitario $u1$

$u2_x$: Componente X del vector unitario $u2$

$u2_y$: Componente Y del vector unitario $u2$

Se pueden calcular las funciones trigonométricas de los ángulos α y β según las Ecuaciones 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16:

$$\sin(\alpha) = y2 - y1 = u1_y \quad (5.13)$$

$$\cos(\alpha) = -(x2 - x1) = -u1_x \quad (5.14)$$

$$\sin(\beta) = y - y1 = u2_y \quad (5.15)$$

$$\cos(\beta) = x - x1 = u2_x \quad (5.16)$$

Por lo tanto, considerando que $\beta = 180^\circ - (\alpha + \omega)$ se pueden aplicar las funciones

trigonométricas a esta igualdad:

$$\sin(\beta) = \sin(180^\circ - (\alpha + \omega)) = \sin(\alpha) \cos(\omega) + \cos(\alpha) \sin(\omega) \quad (5.17)$$

$$\cos(\beta) = \cos(180^\circ - (\alpha + \omega)) = -\cos(\alpha) \cos(\omega) + \sin(\alpha) \sin(\omega) \quad (5.18)$$

Reemplazando las Ecuaciones 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 en las Ecuaciones 5.17 y 5.18 se obtiene lo siguiente:

$$u2_x = u1_x \cos(\omega) + u1_y \sin(\omega) \quad (5.19)$$

$$u2_y = -u1_x \sin(\omega) + u1_y \cos(\omega) \quad (5.20)$$

Por lo tanto se pueden calcular las coordenadas del punto B usando las Ecuaciones 5.21 y 5.22.

$$X = X1 + (u2_x)|U2| \quad (5.21)$$

$$Y = Y1 + (u2_y)|U2| \quad (5.22)$$

Reemplazando las Ecuaciones 5.19 y 5.20 en las Ecuaciones 5.21 y 5.22 se obtienen las Ecuaciones 5.23 y 5.24, con las que se podrán calcular las coordenadas del punto B :

$$X = X1 + (u1_x \cos(\omega) + u1_y \sin(\omega))|U2| \quad (5.23)$$

$$Y = Y1 + (-u1_x \sin(\omega) + u1_y \cos(\omega))|U2| \quad (5.24)$$

Conociendo las coordenadas del punto B desplazado, se puede calcular el vector desplazamiento del punto B ($\vec{D}_B$), considerando que se conocen sus coordenadas iniciales en reposo X_0 y Y_0 . Finalmente, en la Ecuación 5.25 se muestra el cálculo de las componentes del vector desplazamiento $\vec{D}_B$.

$$D_{Bx} = X - X_0 \quad (5.25)$$

$$D_{By} = Y - Y_0 \quad (5.26)$$

Donde:

D_{Bx} : Componente X del vector $\vec{D}_B$

D_{By} : Componente Y del vector $\vec{D}_B$

5.2.1 Resultados del cálculo de respuestas máximas

A continuación, se mostrarán los resultados de los cálculos de los desplazamientos máximos utilizando el método descrito anteriormente para cada espécimen.

• Resultados para el registro de LIMA-1974

En las Figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 se muestran los resultados de la aplicación del método descrito anteriormente para el registro de LIMA-1974. Para realizar la aplicación del método, se calcularon las respuestas máximas de los especímenes a partir de las respuestas obtenidas de los ensayos dinámicos incrementales en el centro de masas (CM) y en uno de las esquinas, en este caso, la esquina N3. A partir de estos puntos, se calcularon las distorsiones en las esquinas restantes con el método propuesto y se determinó la máxima distorsión entre éstas.

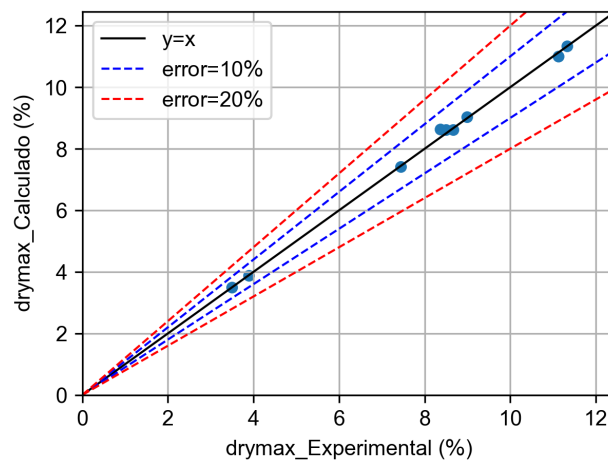


FIGURA N° 5.10: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-1 para el registro de LIMA-1974.

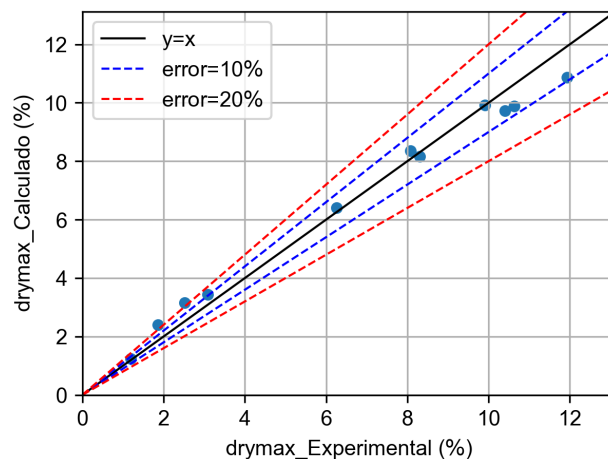


FIGURA N° 5.11: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-2 para el registro de LIMA-1974.

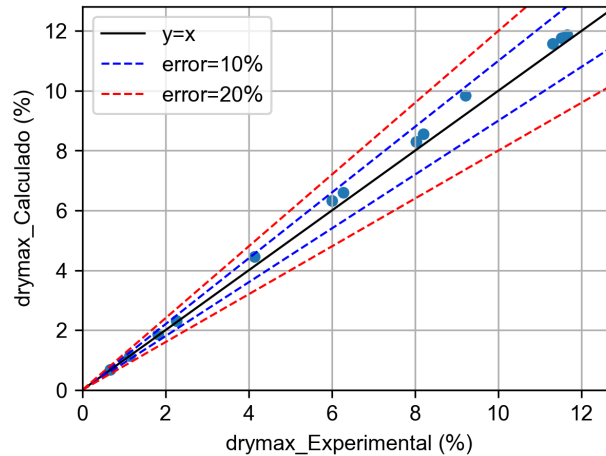


FIGURA N° 5.12: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-3 para el registro de LIMA-1974.

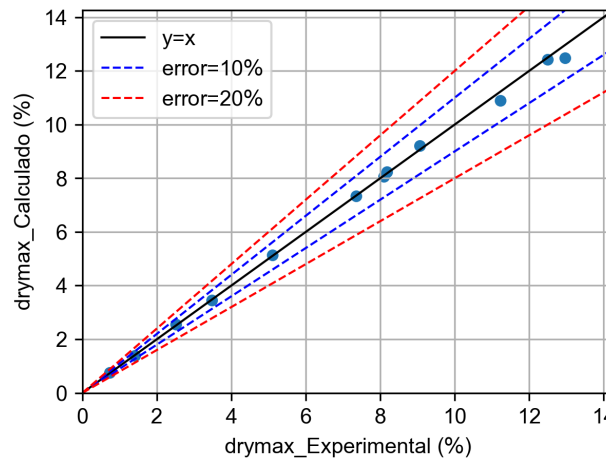


FIGURA N° 5.13: Comparación entre el $dr_{y,max}$ experimental y el $dr_{y,max}$ calculado para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974.

En la Tabla N° 5.6 se muestran las métricas de rendimiento para el cálculo de distorsiones máximas obtenidas a partir de dos sensores para los ensayos dinámicos incrementales realizados con el registro LIMA-1974.

TABLA N° 5.6: Métricas de rendimiento para el registro LIMA-1974.

ESPÉCIMEN	RMSE (%)	NRMSE (%)	R2
E-1	0.49	1.40	0.998
E-2	2.39	4.95	0.980
E-3	1.30	2.64	0.994
E-4	0.79	1.44	0.998

• Resultados para el registro de PISCO-2007

En las Figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 se muestran los resultados de la aplicación

del método descrito anteriormente para el registro de PISCO-2007. Para realizar la aplicación del método, se calcularon las respuestas máximas de los especímenes a partir de las respuestas obtenidas de los ensayos dinámicos incrementales en el centro de masas (CM) y en una de las esquinas, en este caso, la esquina N3. A partir de estos puntos, se calcularon las distorsiones en las esquinas restantes con el método propuesto y se determinó la máxima distorsión entre éstas.

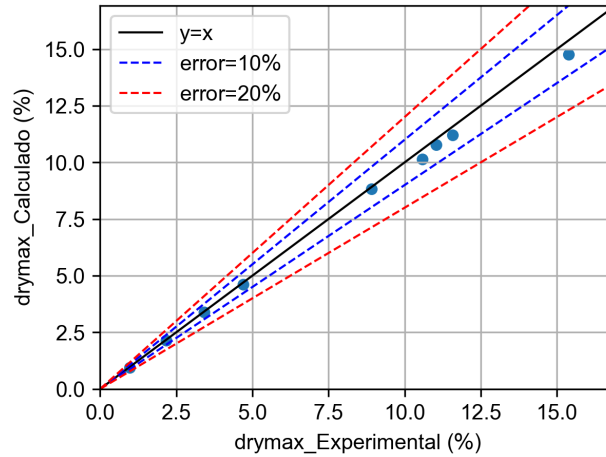


FIGURA N° 5.14: Comparación entre el $dr_{y\max}$ experimental y el $dr_{y\max}$ calculado para el espécimen E-1 para el registro de PISCO-2007.

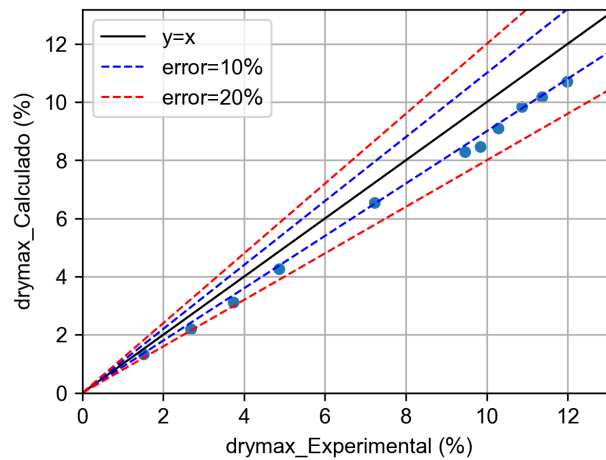


FIGURA N° 5.15: Comparación entre el $dr_{y\max}$ experimental y el $dr_{y\max}$ calculado para el espécimen E-2 para el registro de PISCO-2007.

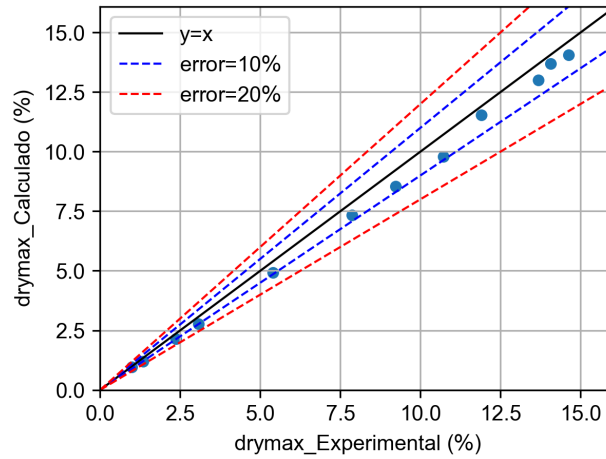


FIGURA N° 5.16: Comparación entre el $dr_{y\max}$ experimental y el $dr_{y\max}$ calculado para el espécimen E-3 para el registro de PISCO-2007.

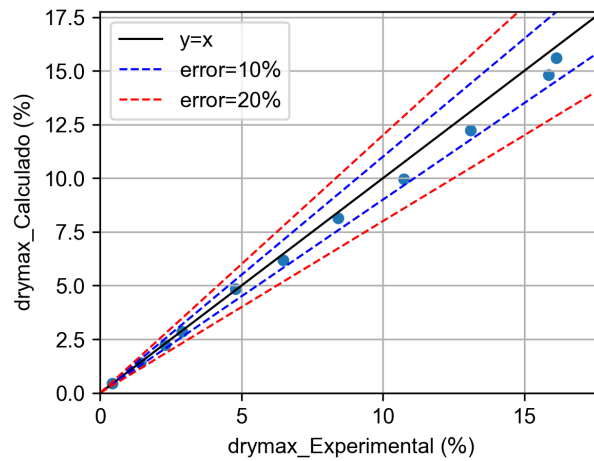


FIGURA N° 5.17: Comparación entre el $dr_{y\max}$ experimental y el $dr_{y\max}$ calculado para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007.

En la Tabla N° 5.6 se muestran las métricas de rendimiento para el cálculo de distorsiones máximas obtenidas a partir de dos sensores para los ensayos dinámicos incrementales realizados con el registro PISCO-2007.

TABLA N° 5.7: Métricas de rendimiento para el registro PISCO-2007.

ESPÉCIMEN	RMSE (%)	NRMSE (%)	R2
E-1	1.32	2.04	0.996
E-2	4.34	9.22	0.929
E-3	2.27	3.70	0.990
E-4	2.34	3.31	0.991

5.2.2 Aplicación para el cálculo de la historia de desplazamientos

Para este caso se considerará que se conocen los datos discretos de los desplazamientos de los puntos O y A , muestreados con un intervalo de tiempo igual a dt . El objetivo es obtener el conjunto de datos discretos de la respuesta del punto B a partir de las respuestas de los otros dos puntos de referencia.

Se pueden calcular las coordenadas del punto B en un tiempo t_i con las ecuaciones 5.27 y 5.28.

$$X(t_i) = X1(t_i) + (u1_x(t_i) \cos(\omega) + u1_y(t_i) \sin(\omega))|U2| \quad (5.27)$$

$$Y(t_i) = Y1(t_i) + (-u1_x(t_i) \sin(\omega) + u1_y(t_i) \cos(\omega))|U2| \quad (5.28)$$

Donde:

- $X(t_i), Y(t_i)$: Coordenadas del punto B en el tiempo t_i
- $X1(t_i), Y1(t_i)$: Coordenadas del punto O en el tiempo t_i
- $u1_x(t_i), u1_y(t_i)$: Componentes del vector unitario $u1(t_i)$ en el tiempo t_i

Finalmente, conociendo las coordenadas del punto B en un tiempo t_i , se pueden calcular los componentes del vector desplazamiento de este punto $\vec{D}_B(t_i)$ en el tiempo t_i según las Ecuaciones 5.29 y 5.30.

$$D_{Bx}(t_i) = X(t_i) - X_0(t_i) \quad (5.29)$$

$$D_{By}(t_i) = Y(t_i) - Y_0(t_i) \quad (5.30)$$

Donde:

- $D_{Bx}(t_i)$ Componente X del vector desplazamiento $\vec{D}_B(t_i)$ en el tiempo (t_i)
- $D_{By}(t_i)$ Componente Y del vector desplazamiento $\vec{D}_B(t_i)$ en el tiempo (t_i)

El proceso que se llevará a cabo para el cálculo de la respuesta en el punto B se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura N° 5.18.

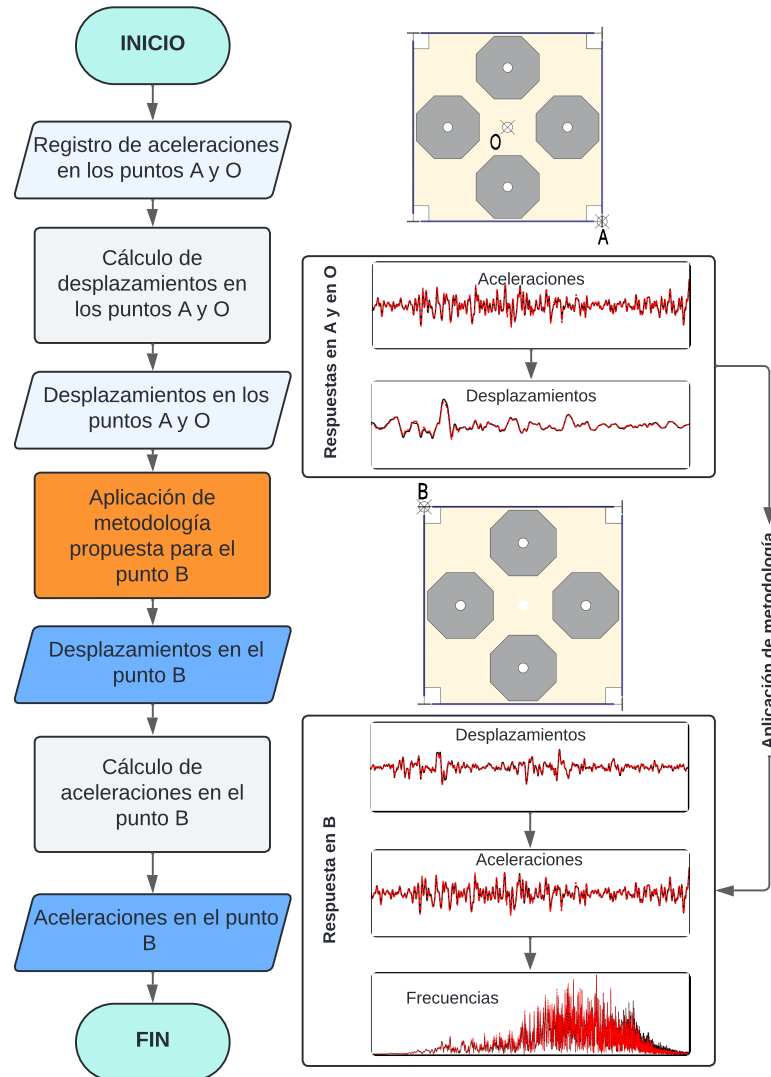


FIGURA N° 5.18: Diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo de las respuestas dinámicas a partir de dos sensores.

5.2.2.1 Resultados del cálculo de la historia de desplazamientos y aceleraciones para una estructura con efectos de torsión

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos mediante el algoritmo mostrado en la Figura N° 5.18. Las respuestas que se mostrarán se calcularon en cada una de las esquinas de los especímenes. Éstas se obtuvieron a partir de la aplicación de la metodología sobre las respuestas en el centro de masa y en una de las esquinas de los especímenes. La aplicación del método solo se mostrará para el espécimen E-4, debido a que éste presentó mayor grado de irregularidad torsional según los resultados experimentales.

• Resultados para el registro de LIMA-1974

En la Figura N° 5.19 se muestran los resultados de la aplicación del método descrito anteriormente para la respuesta del espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974. Los desplazamientos calculados mediante el método propuesto (línea roja) se comparan con los desplazamientos obtenidos luego de aplicar el proceso de integración numérica a las aceleraciones experimentales en cada una de las esquinas de los especímenes (línea negra).

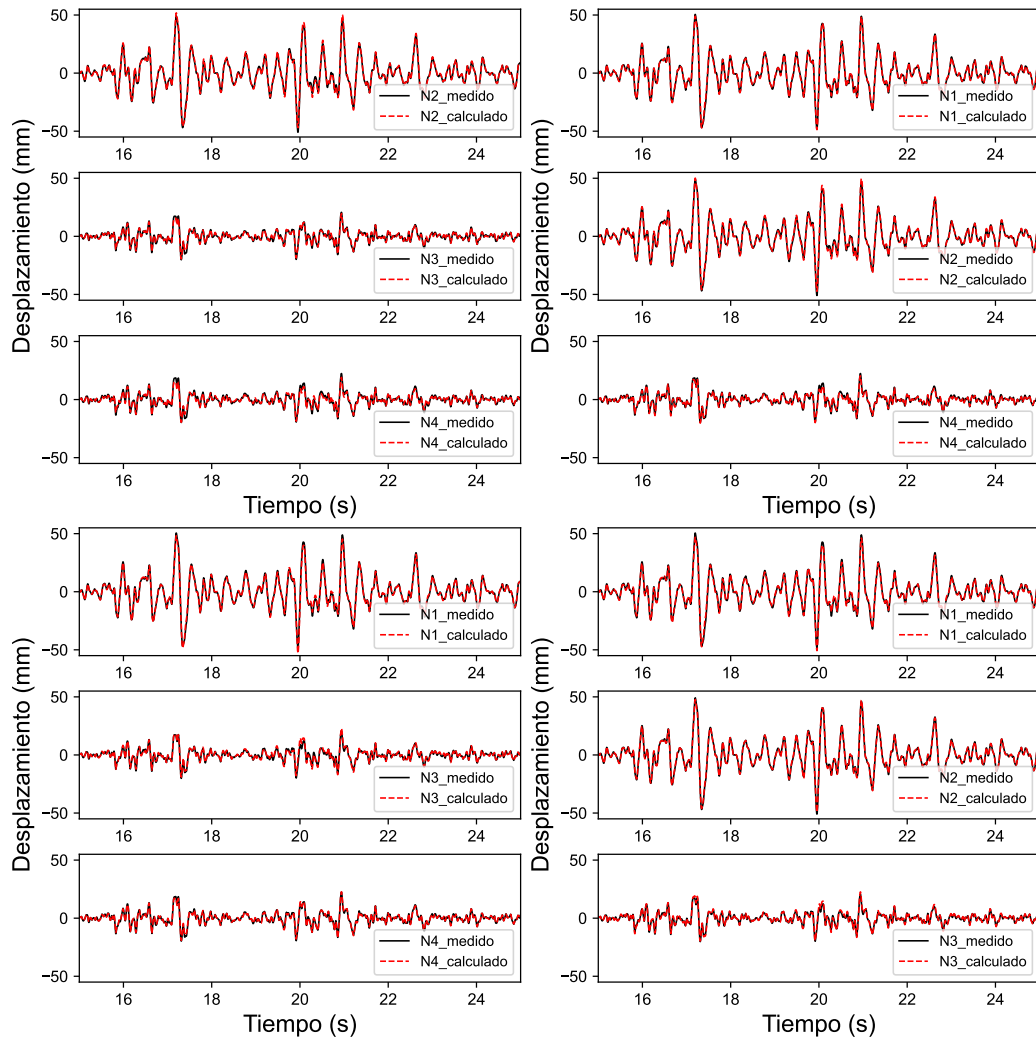


FIGURA N° 5.19: Historia de desplazamientos calculados para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974.

Luego de calcular los desplazamientos en las esquinas de los especímenes, se puede calcular la respuesta de estos puntos en función de la aceleración aplicando el método de diferencias finitas centrales. En la Figura N° 5.20 se observan las historias de las aceleraciones calculadas (línea roja) y de las aceleraciones medidas (línea negra).

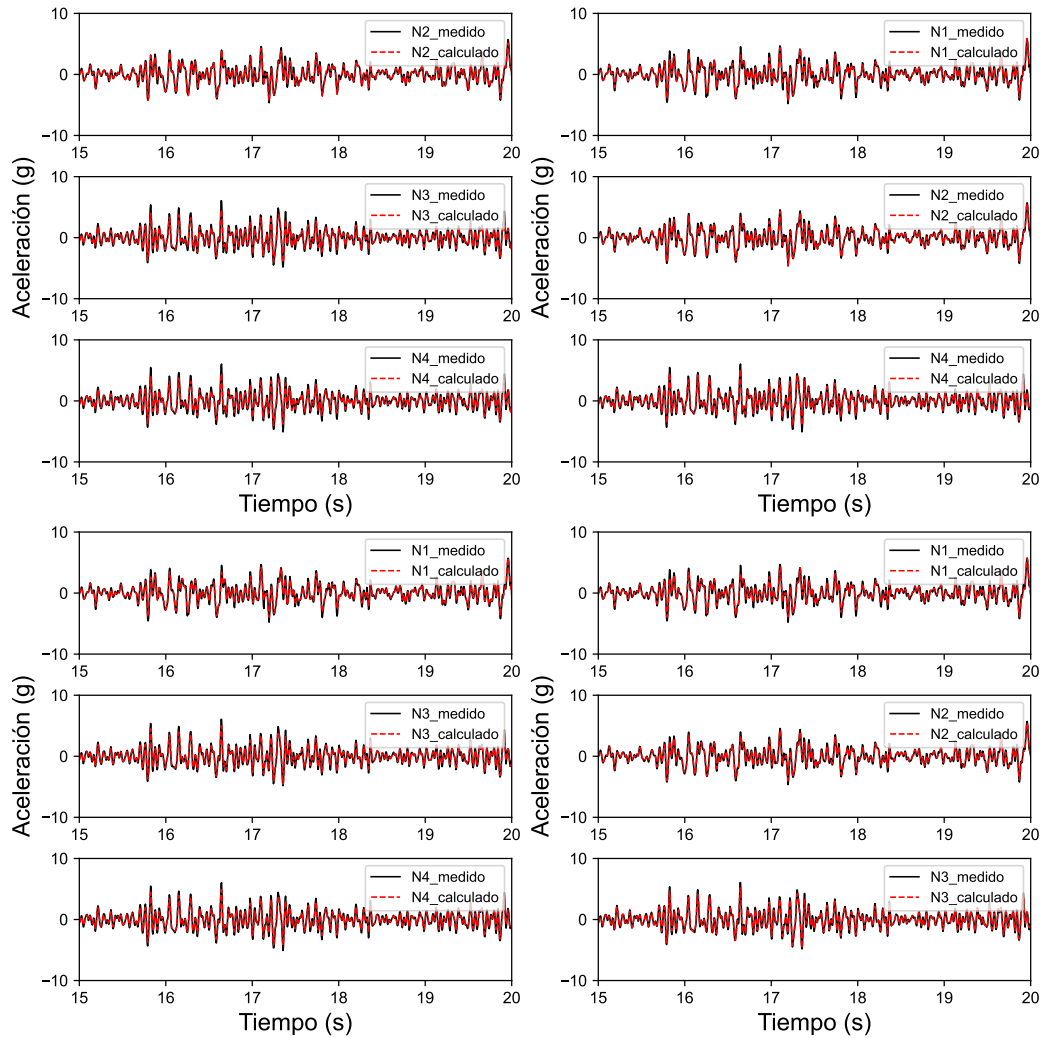


FIGURA N° 5.20: Historia de aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974.

Además, en la Figura N° 5.21 se observa el contenido de frecuencias de las aceleraciones calculadas anteriormente.

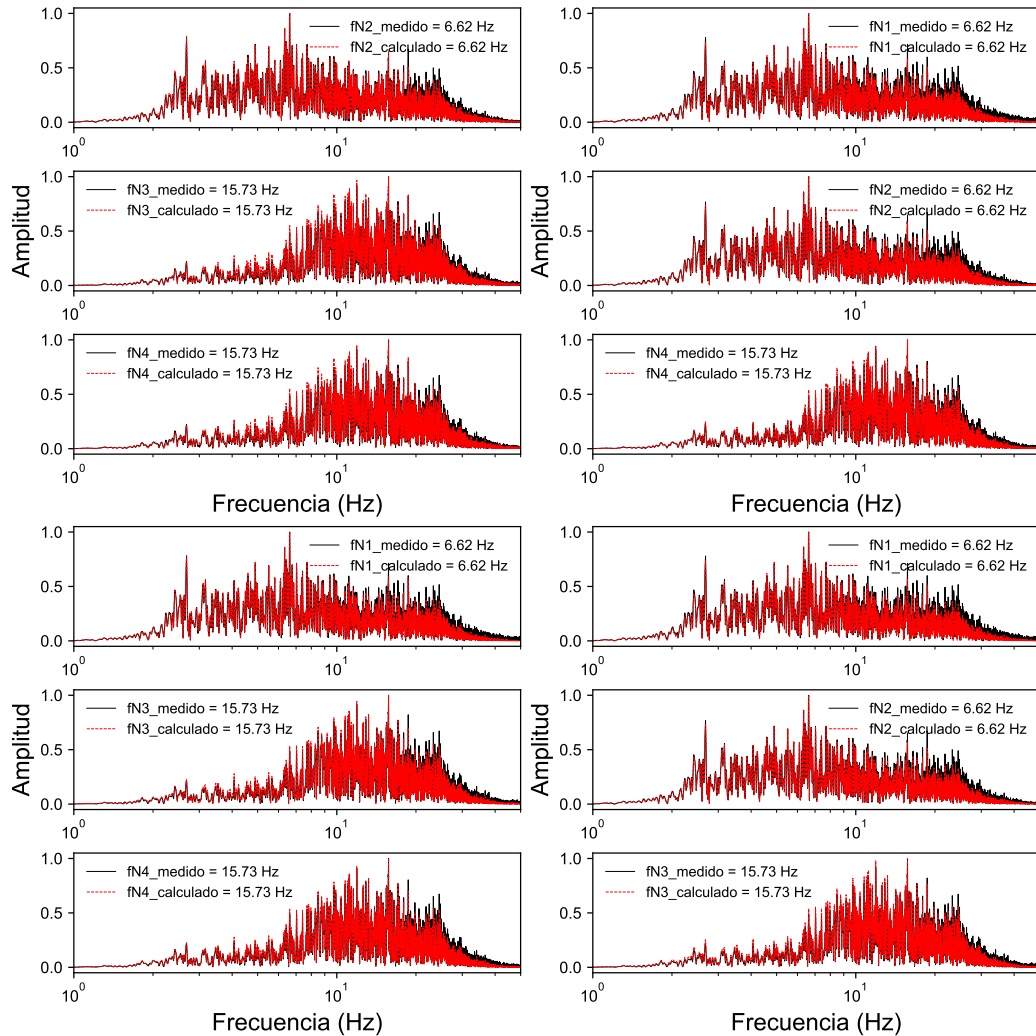


FIGURA N° 5.21: Contenido de frecuencias de las aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974.

Finalmente, en la Tabla N° 5.8 se muestran las métricas de rendimiento del método propuesto para el cálculo de los desplazamientos en cada una de las esquinas a partir de la respuesta de dos puntos.

TABLA N° 5.8: Métricas de rendimiento del cálculo de las historias de desplazamientos para el registro LIMA-1974.

Respuestas medidas	Respuestas calculadas	$NRMSE$ (%)	R^2
CM Y N1	N2	0.46	1
	N3	1	0.97
	N4	1.31	0.95
CM Y N2	N1	0.47	1
	N3	1.01	0.97
	N4	0.68	0.99
CM Y N3	N1	0.41	1
	N2	0.41	1
	N4	0.71	0.99
CM Y N4	N1	0.55	0.99
	N2	0.29	1
	N3	0.72	0.98

• Resultados para el registro de PISCO-2007

En la Figura N° 5.22 se muestran los resultados de la aplicación del método descrito anteriormente para la respuesta del espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007. Los desplazamientos calculados mediante el método propuesto (línea roja) se comparan con los desplazamientos obtenidos luego de aplicar el proceso de integración numérica a las aceleraciones experimentales en cada una de las esquinas de los especímenes (línea negra).

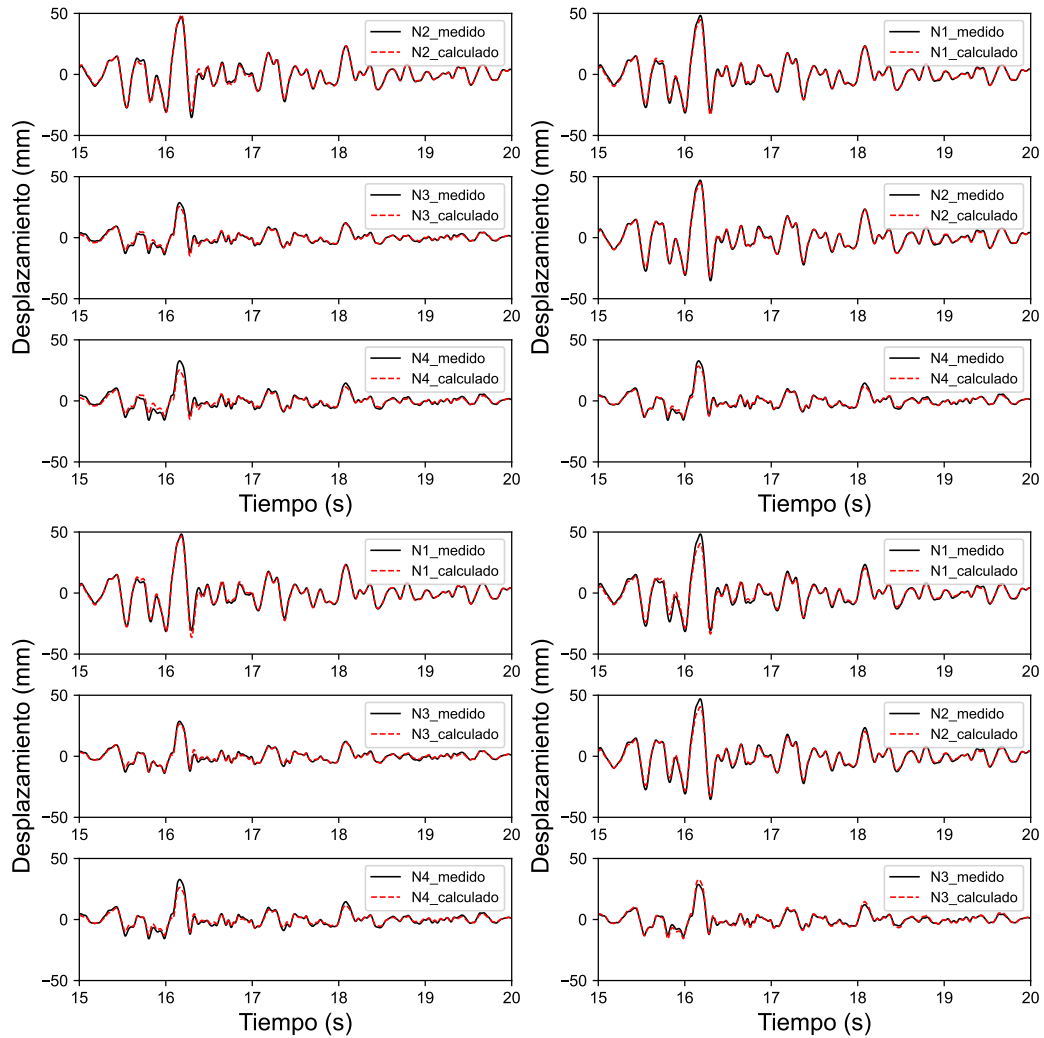


FIGURA N° 5.22: Historia de desplazamientos calculados para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007.

Luego de calcular los desplazamientos en las esquinas de los especímenes, se puede calcular la respuesta de estos puntos en función de la aceleración aplicando el método de diferencias finitas centrales. En la Figura N° 5.23 se observan las historias de las aceleraciones calculadas (línea roja) y de las aceleraciones medidas (línea negra).

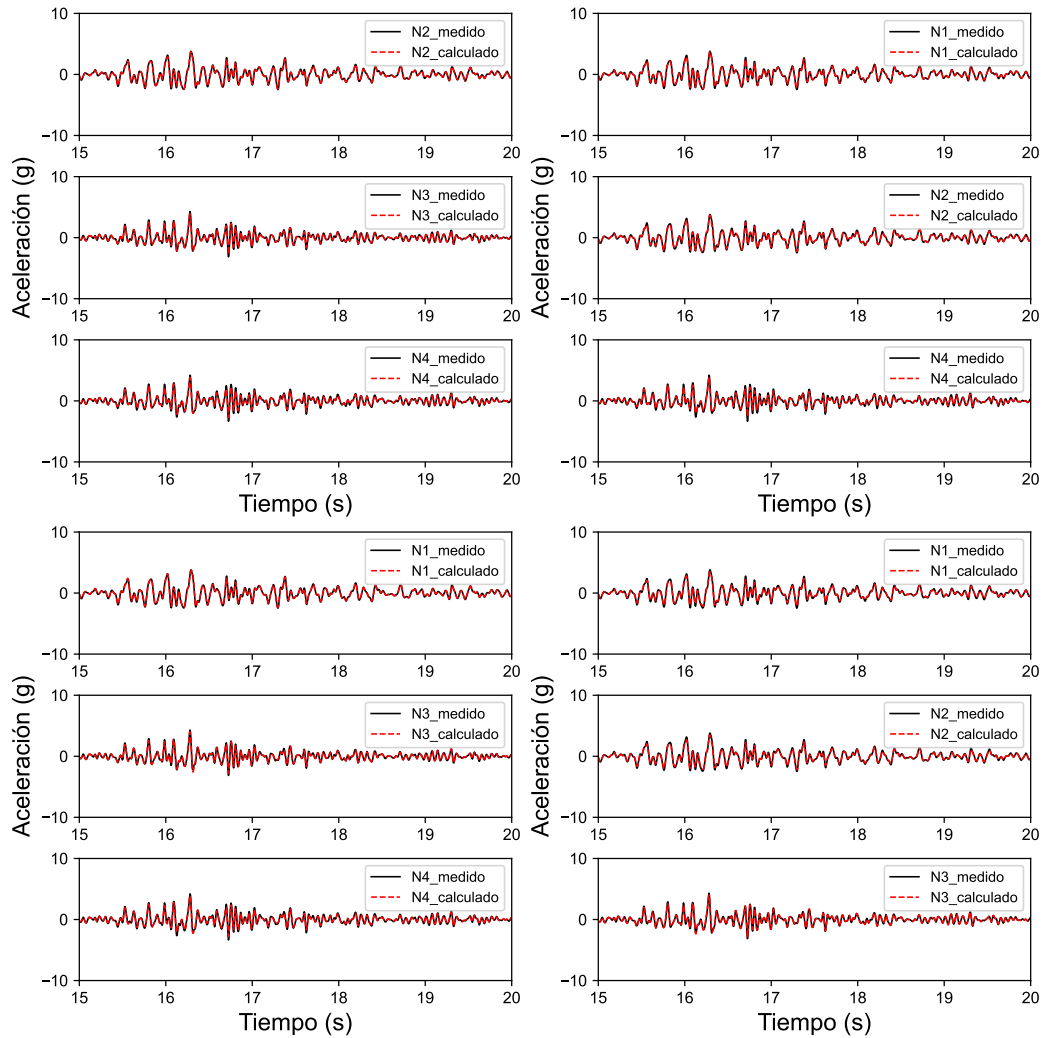


FIGURA N° 5.23: Historia de aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007.

Además, en la Figura N° 5.24 se observa el contenido de frecuencias de las aceleraciones calculadas anteriormente.

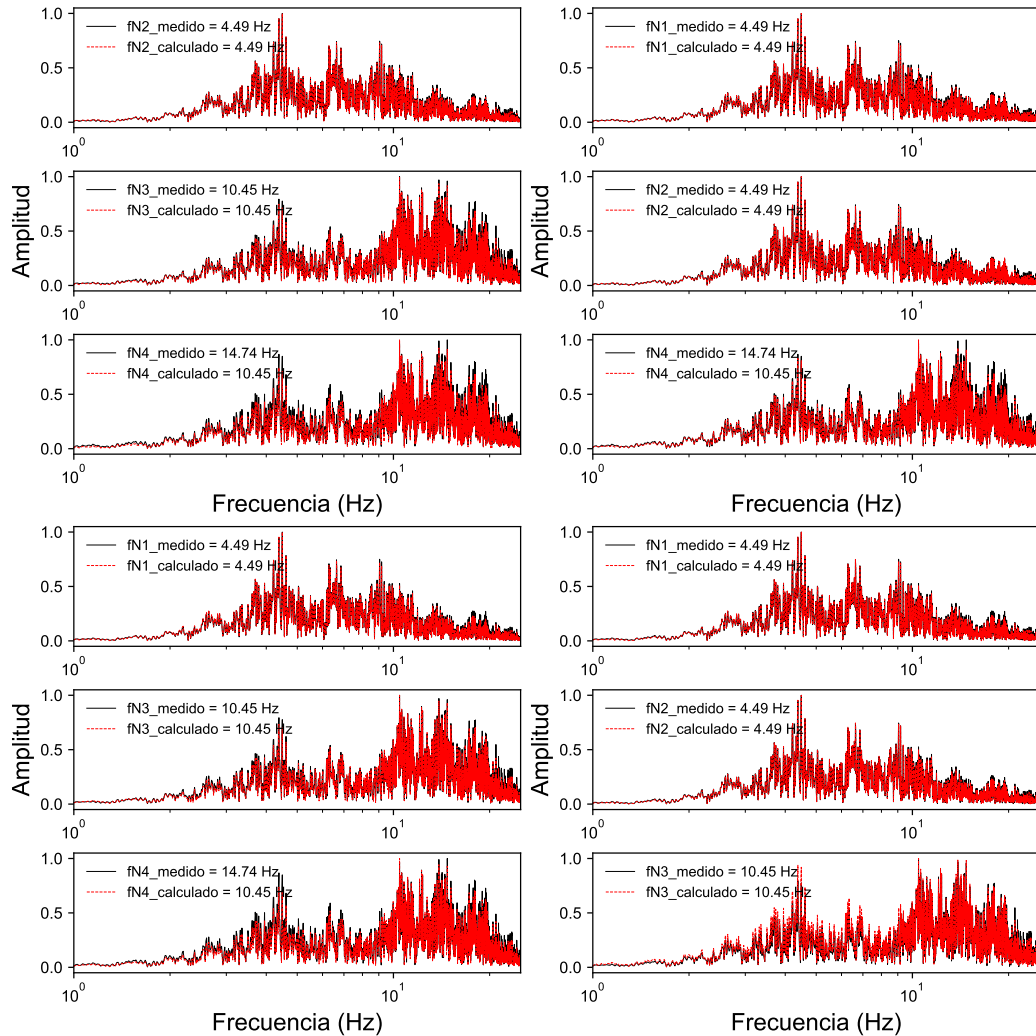


FIGURA N° 5.24: Contenido de frecuencias de las aceleraciones calculadas para el espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007.

Finalmente, en la la Tabla N° 5.9 se muestran las métricas de rendimiento del método propuesto para el cálculo de los desplazamientos en cada una de las esquinas a partir de la respuesta de dos puntos.

TABLA N° 5.9: Métricas de rendimiento del cálculo de las historias de desplazamientos para el registro PISCO-2007.

Respuestas medidas	Respuestas calculadas	$NRMSE$ (%)	R^2
CM Y N1	N2	0.44	0.99
	N3	0.88	0.96
	N4	1.27	0.92
CM Y N2	N1	0.46	0.99
	N3	0.79	0.97
	N4	1.11	0.94
CM Y N3	N1	0.47	0.99
	N2	0.41	0.99
	N4	0.84	0.97
CM Y N4	N1	0.77	0.98
	N2	0.65	0.98
	N3	0.96	0.96

5.2.2.2 Curvas de histéresis para estructuras con irregularidad torsional

Luego de calcular y validar el cálculo de las respuestas en los puntos N1, N2, N3 y N4, se pueden determinar los comportamientos histeréticos de cada una de las columnas del espécimen E-4. Para ello, se asumió que la masa total de los especímenes ensayados se distribuye de manera igualitaria en cada una de sus esquinas. La fuerza cortante dinámica que soporta cada columna se calculó con la Ecuación 5.31.

$$FN_i = m_i(Ar_i + Ag) \quad (5.31)$$

Donde:

FN_i : Fuerza cortante dinámica en el nodo i

Ar_i : Registro de aceleraciones relativas en el punto i

Ag : Registro de aceleraciones en la base

m_i : masa en el nodo i

Luego de calcular las fuerzas y los desplazamientos en cada columna, se puede obtener el comportamiento histerético en cada una de las columnas para cada espécimen. En la Figura N° 5.25 se muestra el comportamiento histerético de las

columnas del espécimen E-4 para el registro LIMA-1974.

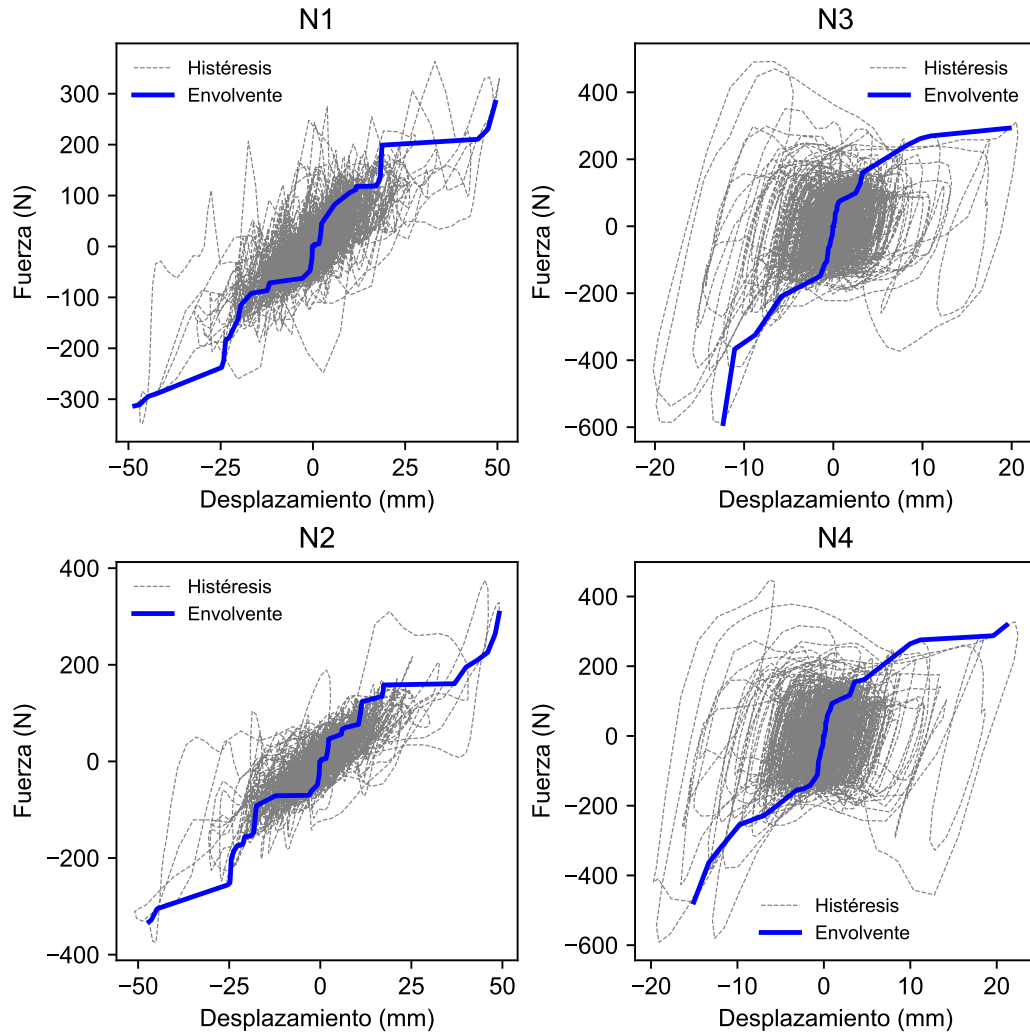


FIGURA N° 5.25: Comportamiento histerético de las columnas del espécimen E-4 para el registro de LIMA-1974.

Además, en la Figura N° 5.26 se muestra el comportamiento histerético de las columnas del espécimen E-4 para el registro PISCO-2007.

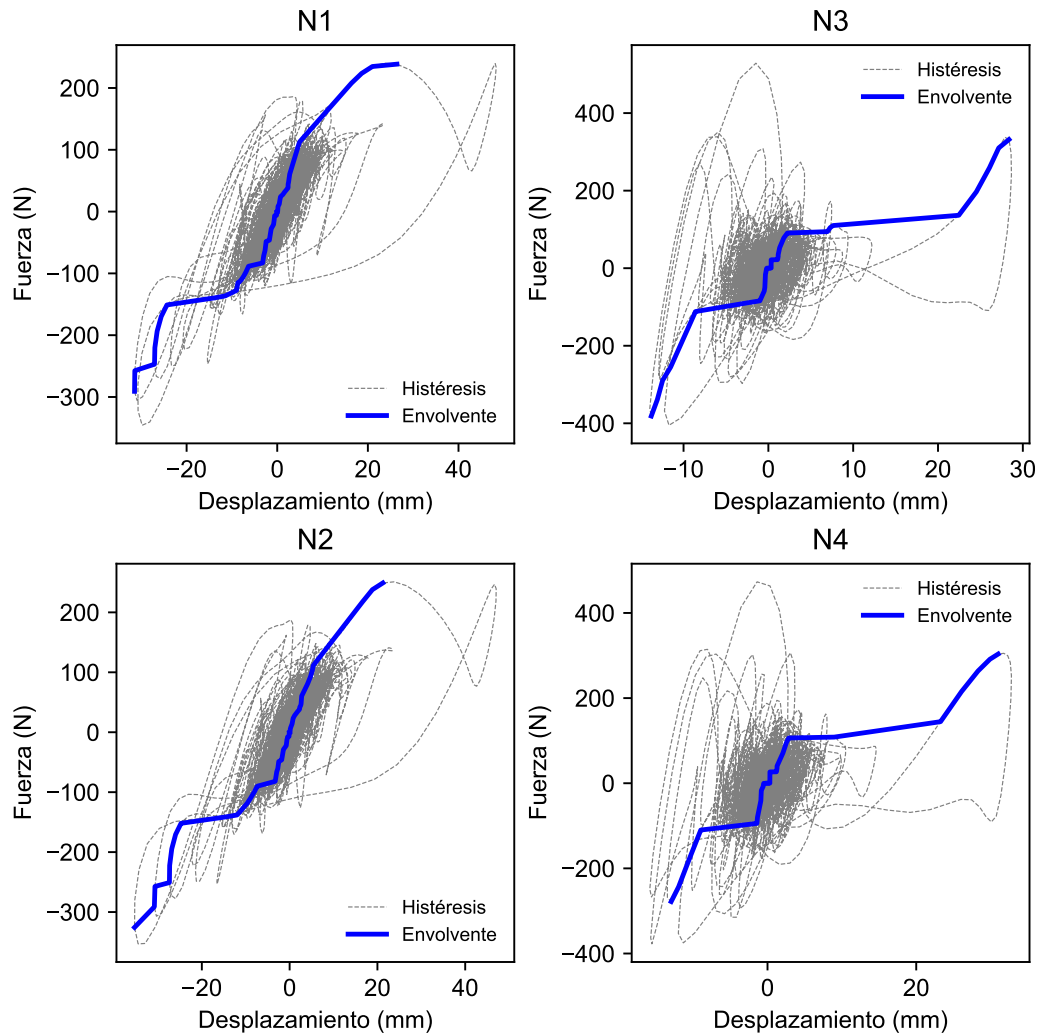


FIGURA N° 5.26: Comportamiento histerético de las columnas del espécimen E-4 para el registro de PISCO-2007.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan e interpretan los resultados obtenidos en la investigación, enfatizando su significado en el contexto de la predicción del grado de irregularidad torsional (G_{it}) y su relación con los parámetros estructurales y sísmicos propuestos.

6.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA Y BASE DE DATOS

La metodología desarrollada permitió la determinación del nivel de daño en edificaciones con irregularidad torsional a partir de parámetros estructurales y sísmicos. Los resultados numéricos obtenidos mediante simulaciones sísmicas sirvieron como base para la creación de un modelo de predicción del G_{it} .

Se generó una base de datos en términos de características estructurales y sísmicas. Entre ellos, la relación de los desplazamientos máximos en el eje X e Y del centro de masa ($d_{x,CM}/d_{y,CM}$) y la relación de aceleraciones máximas en el mismo punto ($a_{x,CM}/a_{y,CM}$) se destacaron como los parámetros de mayor influencia para la predicción del G_{it} .

6.2 EVALUACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN

Se evaluaron tres modelos de machine learning para la predicción del G_{it} y se determinó que el modelo de Bosques Aleatorios entrenado presentó el mejor desempeño, con un error absoluto promedio del 6.98 %, un $NRMSE$ del 10.654 % y un coeficiente de determinación R^2 de 0.578.

Los valores obtenidos del modelo también permitieron calcular las distorsiones máximas con gran precisión, logrando un $NRMSE$ del 4.054 % y un R^2 de 0.955. Estos resultados validan la hipótesis de que los parámetros estructurales y sísmicos propuestos son adecuados para la predicción del comportamiento torsional de estructuras expuestas a movimientos sísmicos.

6.3 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y AJUSTE DEL MODELO

Los ensayos experimentales en mesa vibradora permitieron evaluar el comportamiento de estructuras con distintos grados de torsión, los resultados obtenidos de estos ensayos permitieron realizar el ajuste del modelo de predicción inicial. Además, se observó que los especímenes de prueba incursionaron en rangos tanto elásticos como inelásticos, proporcionando información sobre el desempeño estructural en escenarios de alta demanda sísmica.

El modelo de predicción híbrido ajustado con un 40 % de los datos experimen-

tales y validado con el 60% restante demostró un buen rendimiento. Se obtuvo un $NRMSE$ de 11.40% y un R^2 de 0.84 para la predicción del G_{it} , y valores de $NRMSE$ y R^2 de 3.56% y 0.98, respectivamente, para la estimación de las distorsiones máximas. Estos resultados confirman que la integración de los datos numéricos y experimentales permite obtener un modelo capaz de estimar las distorsiones máximas en los especímenes ensayados ante diferentes escenarios sísmicos.

6.4 RELACIÓN ENTRE EL G_{it} Y LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Ante la limitante del modelo de predicción basado en Bosques Aleatorios de no brindar una relación explícita para el cálculo del G_{it} , se estableció una expresión matemática que permite relacionar linealmente el G_{it} con los parámetros estructurales y sísmicos propuestos.

6.5 CÁLCULO DE RESPUESTAS A PARTIR DEL MONITOREO EN DOS PUNTOS

Se propuso un método para estimar la respuesta máxima en estructuras con irregularidad torsional a partir del monitoreo de la respuesta de dos puntos en una misma planta. Este método se generalizó para el cálculo de la respuesta de cualquier punto no monitoreado en términos de sus historias de desplazamientos y aceleraciones.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología para la determinación del nivel de daño en edificaciones con irregularidad torsional a partir de parámetros estructurales y sísmicos, los cuales fueron calculados mediante datos obtenidos de un sistema de monitoreo de la salud estructural. Para el desarrollo de la metodología se realizaron simulaciones sísmicas de modelos simplificados. A partir de los resultados numéricos se desarrolló un modelo de predicción del grado de irregularidad torsional. La validación del modelo de predicción se realizó a partir de datos obtenidos de ensayos dinámicos incrementales en una mesa vibradora, donde se sometieron a los especímenes de prueba a múltiples registros sísmicos.

Se creó una base de datos en términos de características estructurales y sísmicas a partir de análisis dinámicos en modelos numéricos simplificados para el desarrollo de un modelo de predicción del G_{it} . Como se pudo observar en la Figura N° 3.30, los parámetros de mayor importancia en el modelo de predicción son la relación de los desplazamientos máximos en el eje X e Y del CM predominante del sismo en la dirección Y ($d_{x,CM}/d_{y,CM}$) y la relación de aceleraciones máximas en el eje X e Y del CM ($a_{x,CM}/a_{y,CM}$). Sumado a ello, el modelo de predicción del G_{it} presentó un buen rendimiento, con ello se puede concluir que los parámetros estructurales y sísmicos propuestos para el entrenamiento del modelo de predicción son adecuados.

Con la base de datos creada a partir de los análisis dinámicos en los modelos numéricos simplificados, se evaluaron tres modelos de machine learning para la predicción del grado de irregularidad torsional (G_{it}) a partir de la respuesta no lineal del centro de masa. En la Tabla N° 3.10 se pudo observar que el modelo de predicción basado en Bosques Aleatorios presentó los errores de menor valor. Con base en este modelo, se desarrolló el modelo final de predicción del G_{it} con el cual se obtuvo un error absoluto promedio igual a 6.98%, $NRMSE$ igual a 10.654% y R^2 igual a 0.578. Estos resultados permitieron calcular las distorsiones máximas con alta precisión (ver Figura N° 3.33); ya que, se obtuvieron valores de $NRMSE$ y R^2 iguales a 4.054% y 0.955 respectivamente.

Se llevaron a cabo ensayos experimentales dinámicos incrementales en una sola dirección con diferentes registros sísmicos en estructuras metálicas con distintos grados de torsión. Durante estos ensayos los especímenes incursionaron en su rango elástico e inelástico. A partir del modelo de predicción desarrollado con las simulaciones numéricas, se ajustó un nuevo modelo de predicción híbrido con el 40% de los resultados experimentales. Este modelo ajustado se validó con el 60% de la data experimental restante. Los resultados obtenidos con el modelo de predicción se ajustaron bien a los valores experimentales del G_{it} ya que se obtuvieron

valores de $NRMSE$ y R^2 iguales a 11.40 % y 0.84 respectivamente. Además, a partir de los valores de G_{it} predichos se calcularon las distorsiones máximas con gran precisión, ya que se obtuvieron valores de $NRMSE$ y R^2 iguales a 3.56 % y 0.98 respectivamente.

Se estableció una relación matemática entre el G_{it} y los parámetros estructurales y sísmicos de los especímenes ensayados, a partir de una regresión lineal múltiple. Una vez obtenidos los valores del G_{it} calculados con la expresión propuesta, se calcularon los valores de las distorsiones máximas para cada uno de los especímenes y se compararon con los respectivos resultados experimentales. El método propuesto permitió calcular la respuesta máxima con gran precisión en estructuras con irregularidad torsional ante eventos sísmicos, ya que se obtuvieron valores de $NRMSE$ y R^2 iguales a 5.08 % y 0.964 respectivamente.

De los resultados experimentales se observó que el espécimen E-4 presentó un valor de G_{it} máximo aproximadamente igual a 1.85 y un valor mínimo de 1.55 para el registro de LIMA-1974 (ver la Figura N° 4.20d). Sin embargo, para el registro de PISCO-2007, el mismo espécimen presentó un valor máximo de G_{it} de aproximadamente 1.45 y un valor mínimo de 1.15 (según la Figura N° 4.24d). De esta observación se puede concluir que el valor del grado de irregularidad torsional de una estructura depende del registro sísmico a la que esté expuesta.

Se propuso un método para estimar el daño a partir del cálculo de las respuestas máximas de desplazamientos en cualquier punto de las estructuras a partir de las respuestas del centro de masa y de otro punto monitoreado, considerando que dichos puntos se encuentran en una misma losa. Los cálculos resultaron en un valor máximo de $NRMSE$ igual a 4.95 % para el registro LIMA-1974 (ver Tabla N° 5.6) y un valor máximo de $NRMSE$ igual a 9.22 % para el registro PISCO-2007 (ver Tabla N° 5.7). Este método se generalizó para el cálculo de las historias de desplazamientos y aceleraciones, esto último se validó para el espécimen E-4. Donde, para el cálculo de desplazamientos se obtuvo un valor de $NRMSE$ máximo igual a 1.31 % para el registro de LIMA-1974 (ver Tabla N° 5.8) y un valor de $NRMSE$ máximo igual a 1.27 % para el registro de PISCO-2007 (ver Tabla N° 5.9).

RECOMENDACIONES

En la presente investigación se han definido parámetros estructurales y sísmicos, con los cuales se pudo desarrollar un modelo de predicción que se evaluó en los modelos numéricos simplificados. Se recomienda estudiar los parámetros propuestos en modelos basados en estructuras más complejas.

Se desarrolló un modelo de predicción basado en bosques aleatorios en la presente investigación. En futuras investigaciones sería recomendable evaluar modelos de predicción más complejos como las redes neuronales para la estimación del daño en estructuras con irregularidad torsional.

En los ensayos experimentales realizados se aplicaron los registros sísmicos en una de las direcciones de los especímenes estudiados, en futuras investigaciones experimentales se recomienda realizar la evaluación de la influencia de la bidireccionalidad del sismo en la respuesta de estructuras con distintos grados de irregularidad torsional.

En este estudio, se llevaron a cabo ensayos experimentales utilizando especímenes contruidos con piezas de acero. En futuras investigaciones, se podrían estudiar estructuras a escala real o reducida que involucren elementos de concreto armado y/o albañilería.

En esta investigación se estableció una relación lineal entre el grado de irregularidad torsional y los parámetros propuestos. Sería conveniente evaluar la existencia de posibles relaciones no lineales entre estos parámetros y el grado de irregularidad torsional.

La herramienta propuesta en esta investigación podría ser incluida en la Sección "Evaluación de Estructuras Después de un Sismo" de la NTE E.030-2018 con el fin de realizar una estimación adecuada del daño en estructuras con irregularidad torsional en planta.

Es recomendable que en el Capítulo "INSTRUMENTACIÓN" de la NTE E.030-2018 se exija la instalación de más de una estación acelerométrica en una misma planta en estructuras con irregularidad torsional y torsional extrema, esto permitiría conocer la respuesta en cualquier punto de la planta de estas estructuras como se vio en la Sección 5.2 de este documento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barkhordari, M., y Tehranizadeh, M. (2020). Ranking passive seismic control systems by their effectiveness in reducing responses of high-rise buildings with concrete shear walls using multiple-criteria decision making. *International Journal of Engineering*, 33(8), 1479-1490. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.08b.06>
- Bathe, K. (1996). *Finite element procedures*. Prentice-Hall.
- Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (2024, 20 de mayo). CEOIS - Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID/FIC/UNI. CISMID. <http://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>
- Cheung, V., y Tso, W. (1986). Eccentricity in irregular multistory buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 13(1), 46-52. <https://doi.org/10.1139/186-007>
- Chopra, A. (2020). *Dynamics of structures, theory and applications to earthquake engineering, fifth edition in SI units* (5a ed.). Pearson Education Limited.
- Espinoza, A., y Fort, R. (2019). *Mapeo y tipología de la expansión urbana en el Perú*. Asociación de Desarrolladores Inmobiliarios ADI Perú. <https://www.grade.org.pe>
- Gokdemir, H., Ozbasaran, H., Dogan, M., Unluoglu, E., y Albayrak, U. (2013). Effects of torsional irregularity to structures during earthquakes. *Engineering Failure Analysis*, 35, 713-717. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.028>
- Gonzales, C., Garay, R., Moya, L., Lazares, F., Aguilar, Z., Calderon, D., Diaz, M., Matsuoka, M., y Zavala, C. (2023). Preliminary system for the estimation of peak ground acceleration distribution in metropolitan Lima and Callao: Application in recent seismic events. *Journal of Disaster Research*, 18(4), 319-328. <https://doi.org/10.20965/jdr.2023.p0319>
- Géron, A. (2019). *Hands-on machine learning with scikit-learn, keras, and tensorflow concepts, tools, and techniques to build intelligent systems second edition* (2a ed.). O'Reilly Media.
- Ibrahim, A., Eltawil, A., Na, Y., y El-Tawil, S. (2020). A machine learning approach for structural health monitoring using noisy data sets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(2), 900-908. <https://doi.org/10.1109/TASE.2019.2950958>
- Jaramillo, J., Diaz, M., y Zavala, C. (2023). Wavelet transform method for the evaluation of the seismic response of one isolated building in the Li-

- ma Metropolitan area. *Journal of Disaster Research*, 18(4), 338-349.
<https://doi.org/10.20965/jdr.2023.p0338>
- Kincaid, D., y Cheney, W. (1991). *Numerical analysis mathematics of scientific computing*. Brooks/Cole Publishing Company.
- Kumar, B., Punith, N., Bhyrav, R., y Arpitha, T. (2017). Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for different setback buildings. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(5), 801-804.
<https://doi.org/10.17577/ijertv6is050488>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018-2019). *Norma E.030 diseño sismorresistente*. SENCICO.
- Oh, B., Glisic, B., Park, S., y Park, H. (2020). Neural network-based seismic response prediction model for building structures using artificial earthquakes. *Journal of Sound and Vibration*, 468. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115109>
- Ortiz, K. (2019). *Evaluación del efecto de la simultaneidad de las componentes de sismo en estructuras con irregularidad torsional*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
<https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/20548>
- Pujades, L., Vargas, Y., Barbat, A., y González, J. (2015). Parametric model for capacity curves. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(5), 1347-1376.
<https://doi.org/10.1007/s10518-014-9670-5>
- Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., y Yamazaki, F. (2015). Scenario source models and strong ground motion for future megaequakes: Application to lima, central Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 368-386.
<https://doi.org/10.1785/0120140098>
- Raschka, S., Liu, Y., y Mirjalili, V. (2022). *Machine learning with Pytorch and Scikit-learn : Develop machine learning and deep learning models with Python*. Packt Publishing Ltd.
- Ren, X. (2020). Full-scale building structural health monitoring by shake table tests and extreme learning machine. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(2), 1939-1947. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01140-4>
- Saito, T. (2021). *STERA 3D STructural Earthquake Response Analysis 3D* (7a ed.).
- Shibata, A. (2010). *Dynamic analysis of earthquake resistant structures*. Tohoku University Press, Sendai.
- Suzuki, T., Puranam, A., Elwood, K., Lee, H., Hsiao, F., y Hwang, S. (2021). Shake table tests of seven-story reinforced concrete structures with torsional irregu-

larities: Test program and datasets. *Earthquake Spectra*, 37(4), 2946-2970.
<https://doi.org/10.1177/87552930211016869>

Valdivia, G. (2020). *Mercado de edificaciones urbanas en Lima Metropolitana*.
Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO).

ANEXOS

Anexo A: Panel fotográfico de ensayos	145
Anexo B: Resultados experimentales	149

ANEXO A: PANEL FOTOGRÁFICO DE ENSAYOS

A.1 Especímenes sometidos al registro LIMA-1974



FIGURA A.1: Especímen E-1.

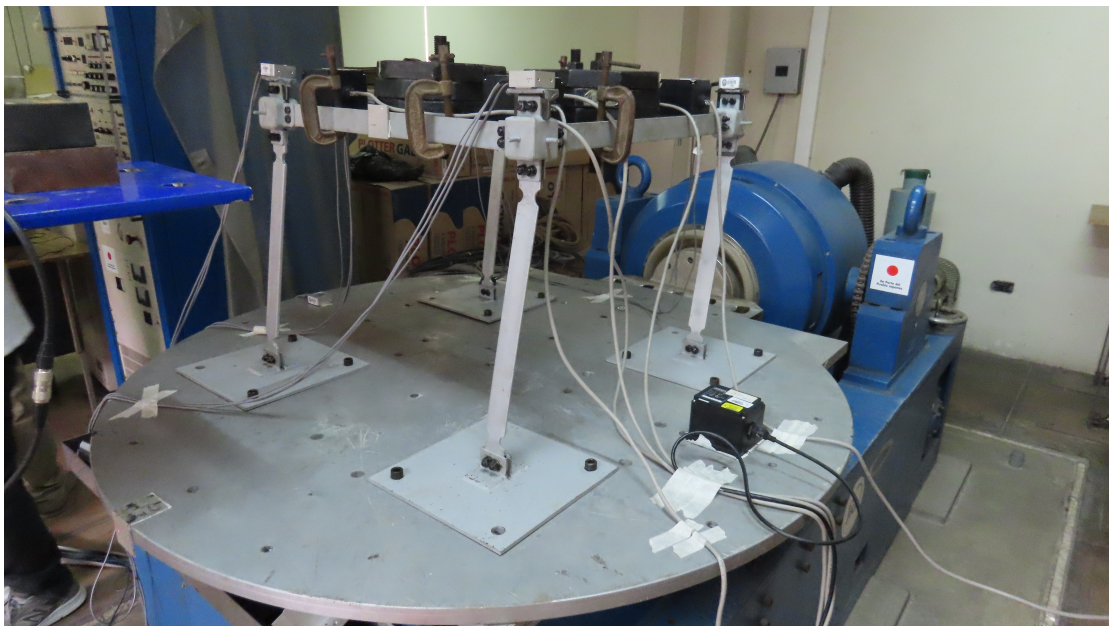


FIGURA A.2: Especímen E-2.

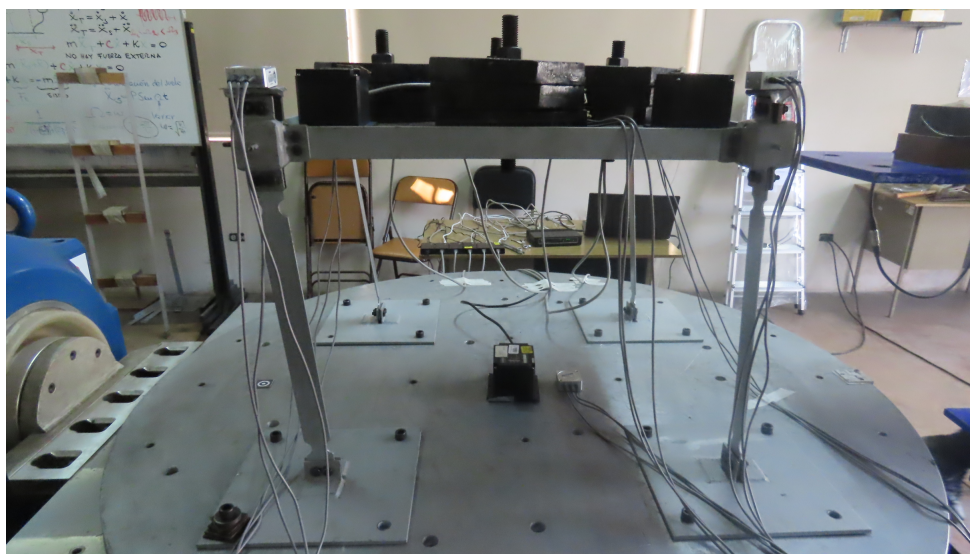


FIGURA A.3: Espécimen E-3.



FIGURA A.4: Espécimen E-4.

A.2 Especímenes sometidos al registro PISCO-2007

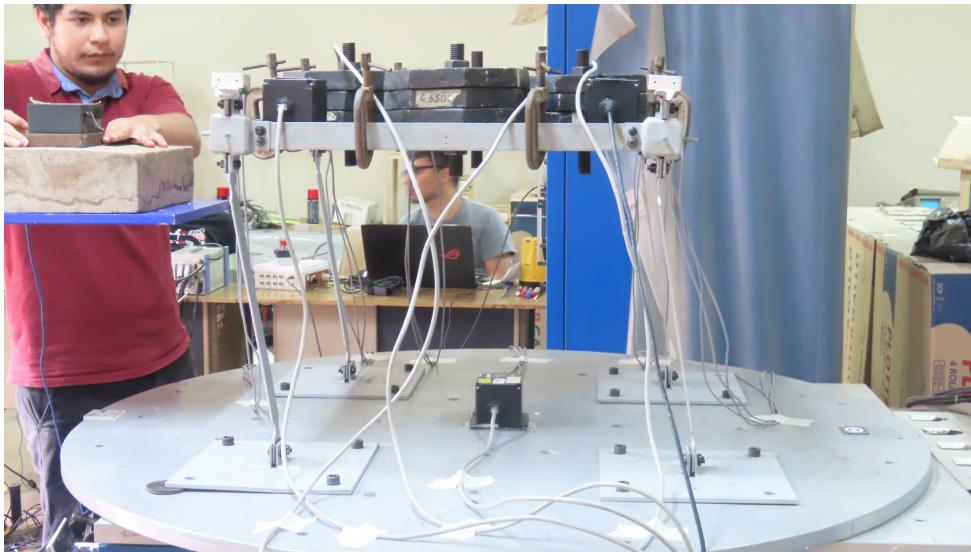


FIGURA A.5: Espécimen E-1.

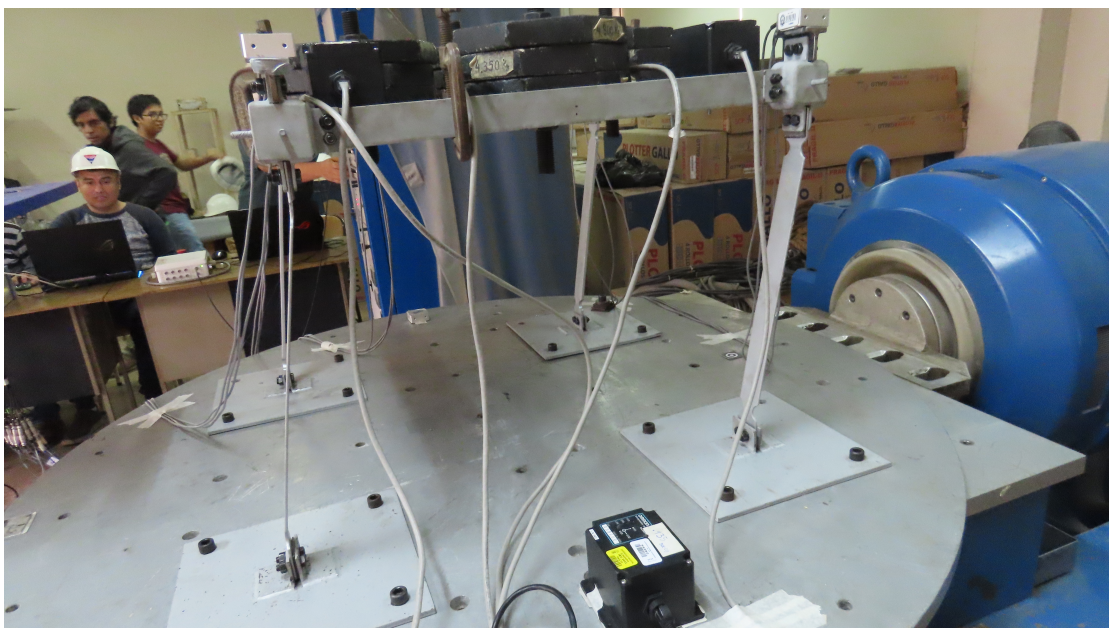


FIGURA A.6: Espécimen E-2.



FIGURA A.7: Espécimen E-3.

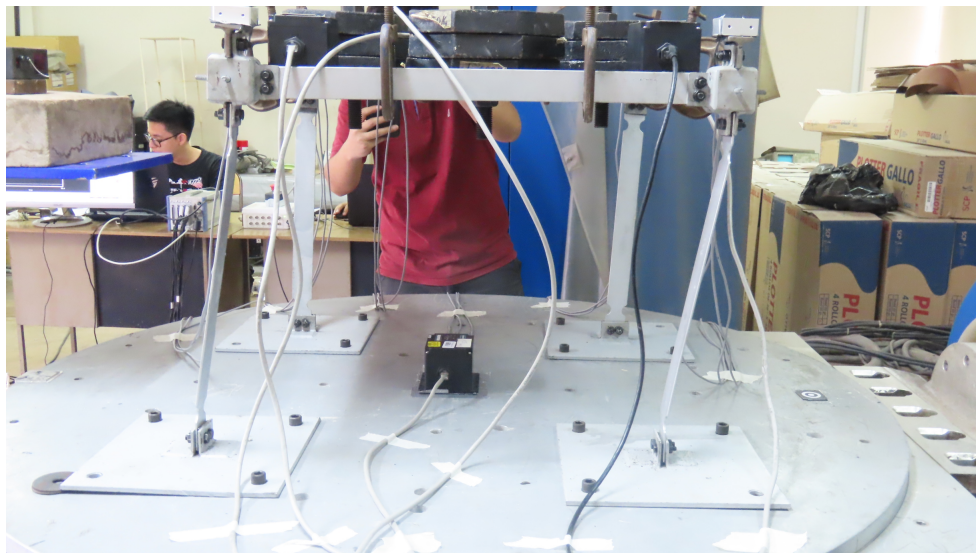


FIGURA A.8: Espécimen E-4.

ANEXO B: RESULTADOS EXPERIMENTALES

B.1 Resultados para el registro LIMA-1974

Transformada de wavelet para la aceleración en la base - Descomposición de desplazamientos

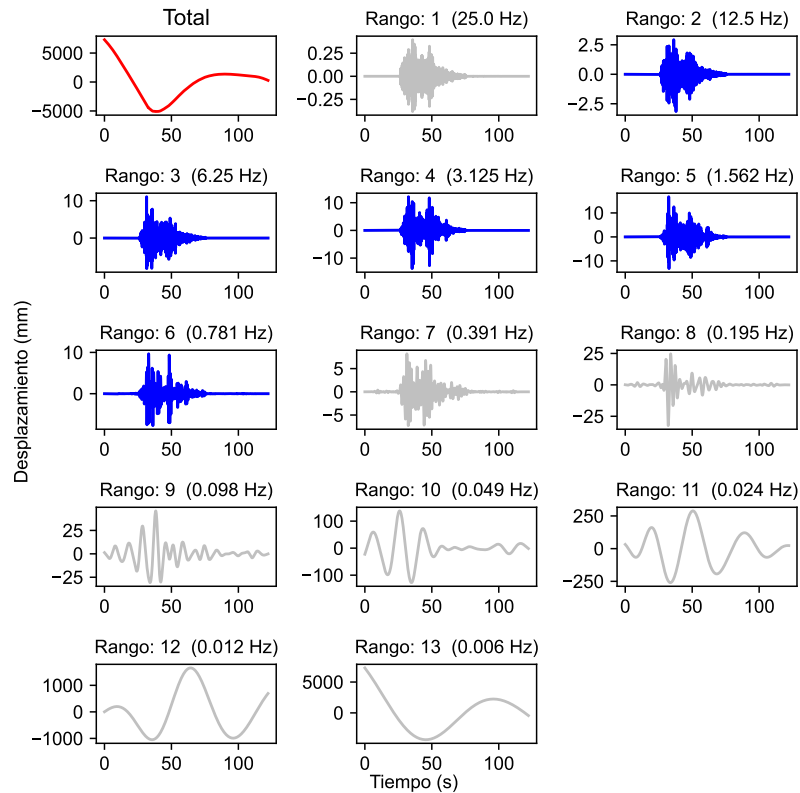


FIGURA B.1: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-1.

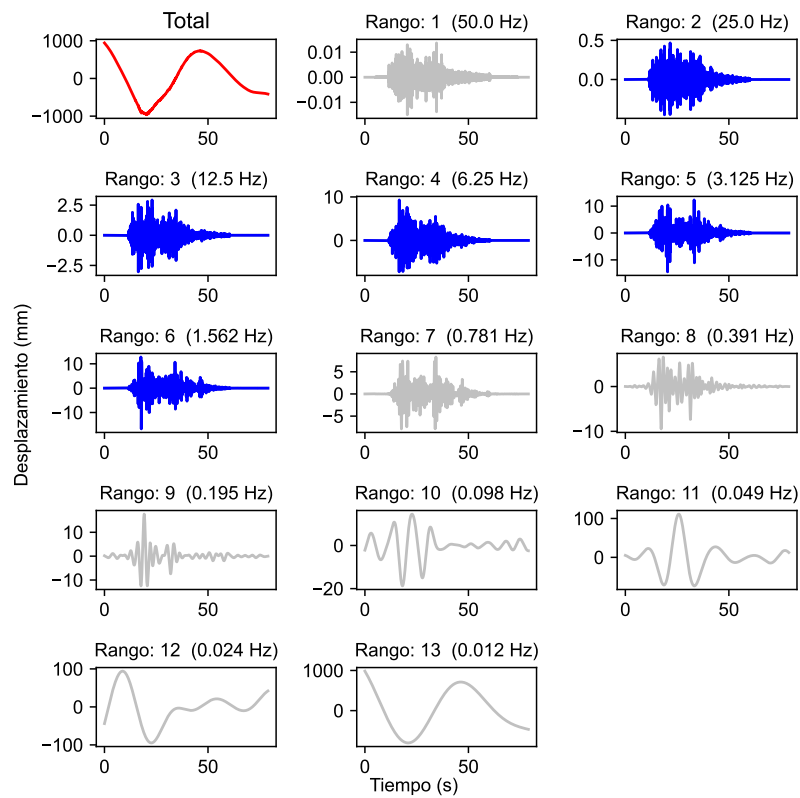


FIGURA B.2: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-2.

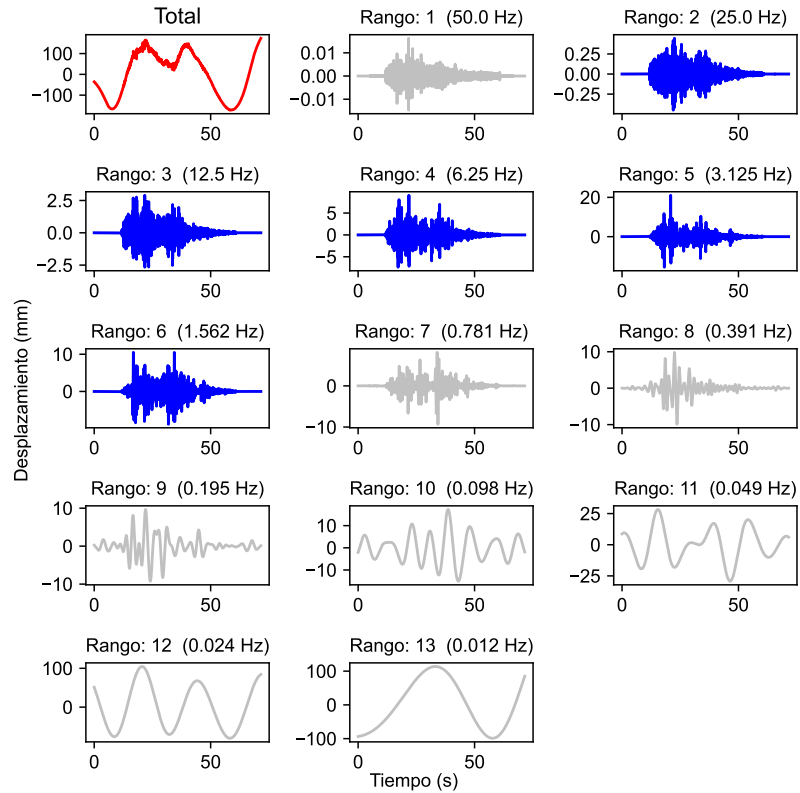


FIGURA B.3: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-3.

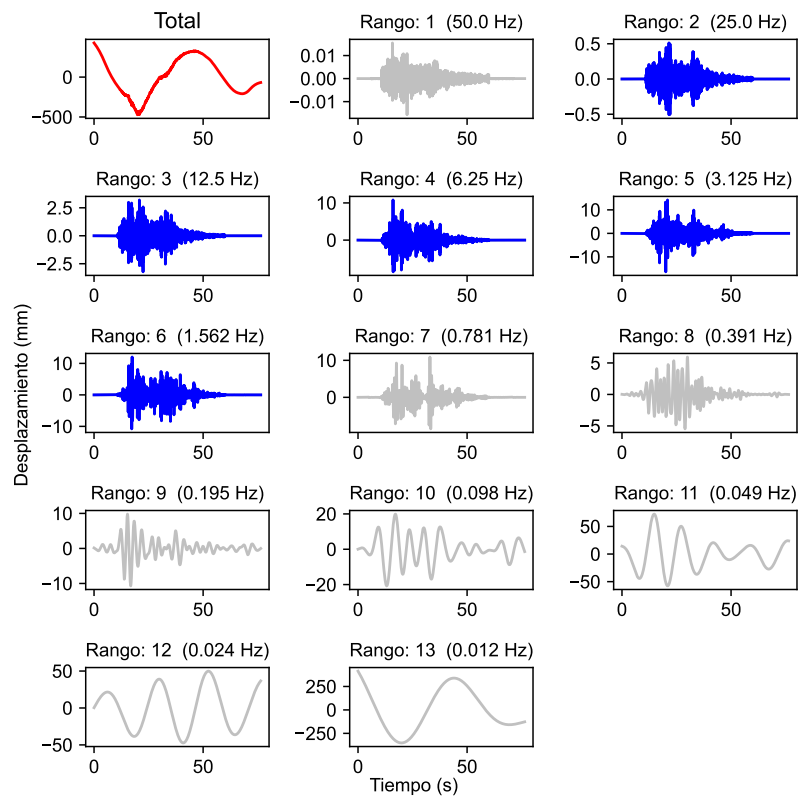


FIGURA B.4: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-4.

Transformada de wavelet para la aceleración en la base - Histéresis

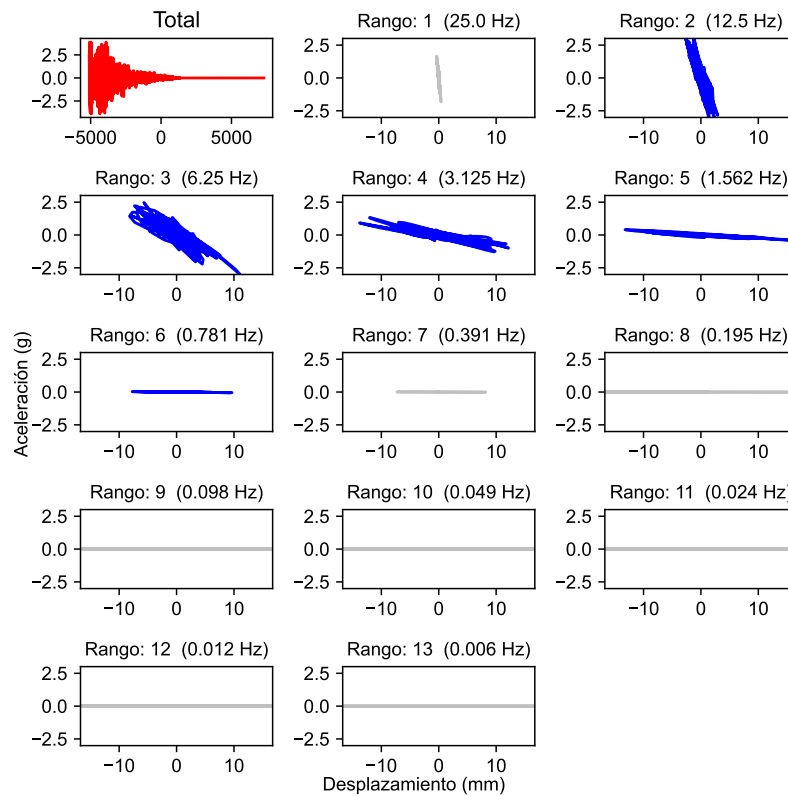


FIGURA B.5: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-1.

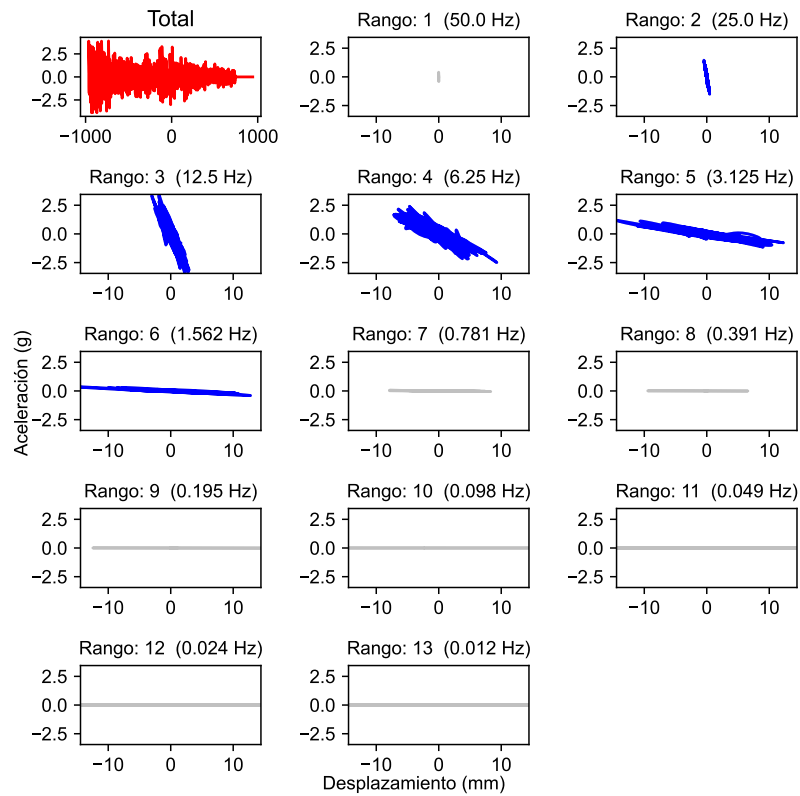


FIGURA B.6: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-2.

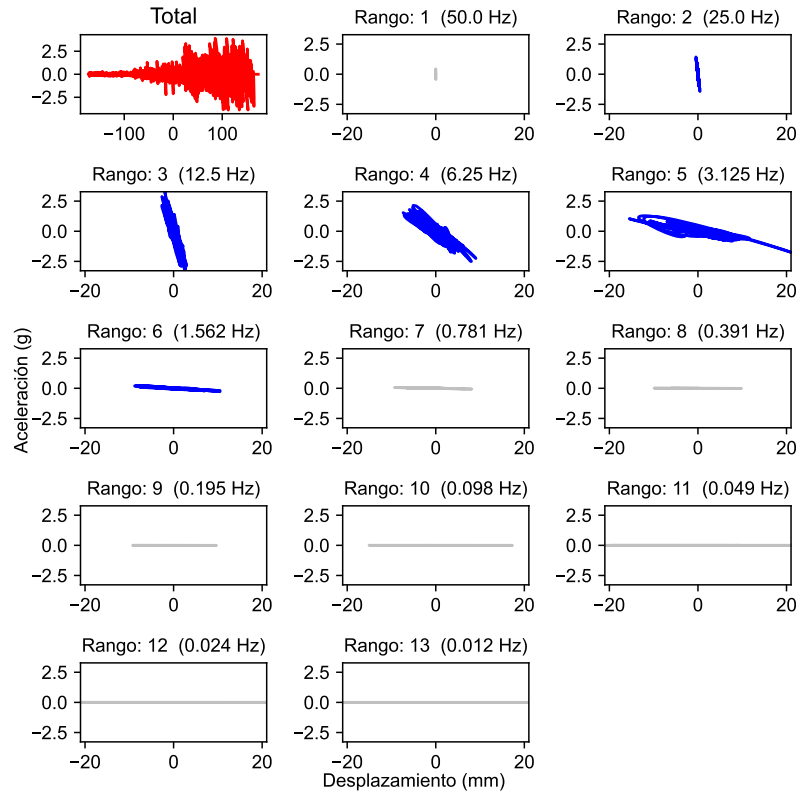


FIGURA B.7: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-3.

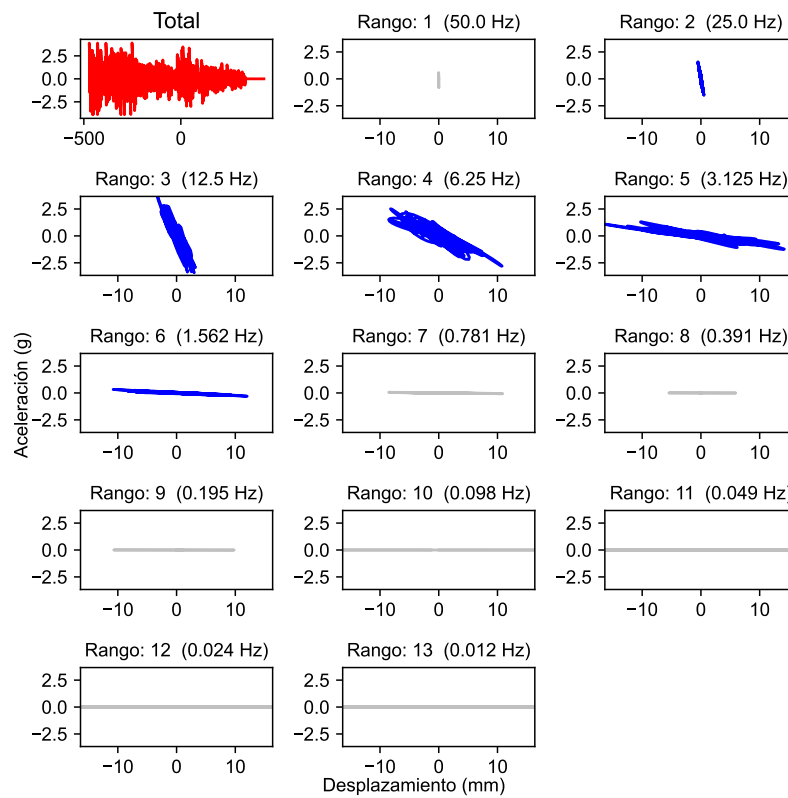
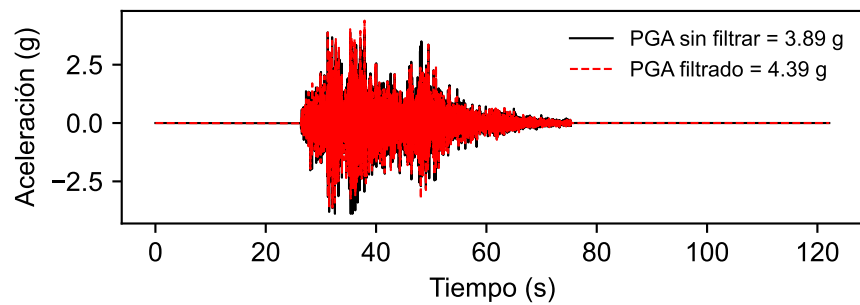
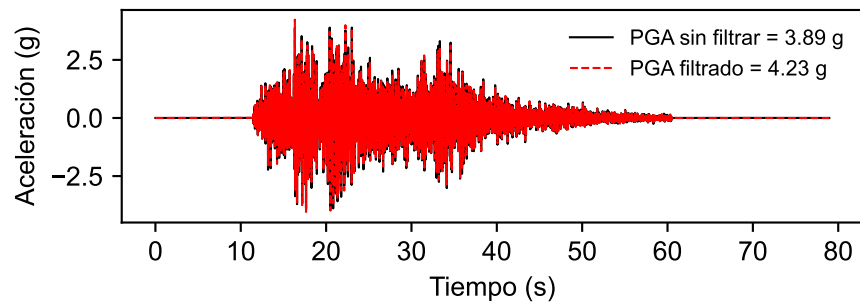


FIGURA B.8: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-4.

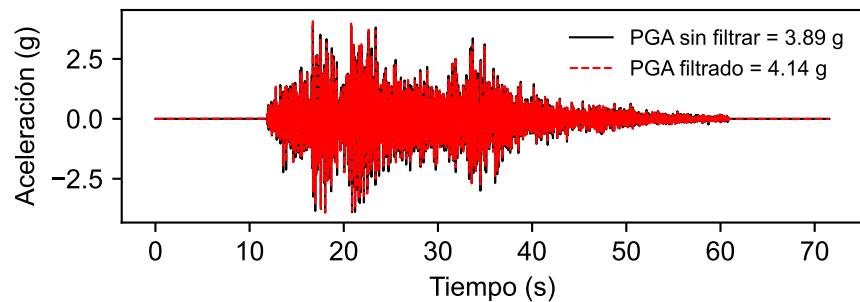
Aceleraciones en la base filtradas



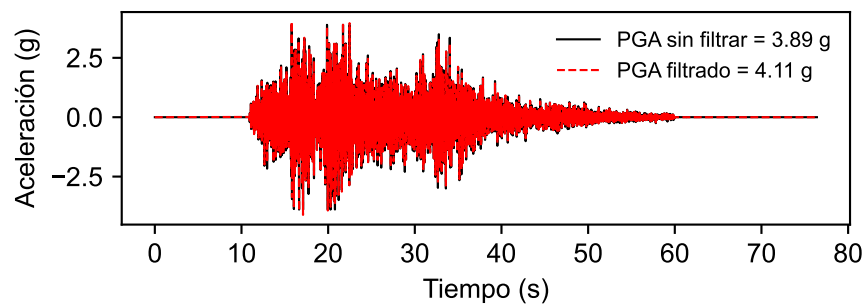
(a)



(b)



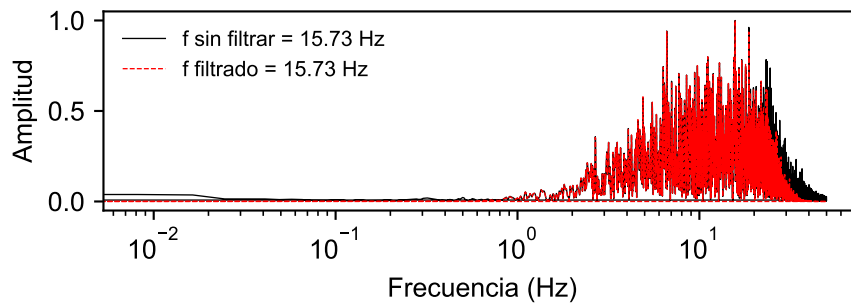
(c)



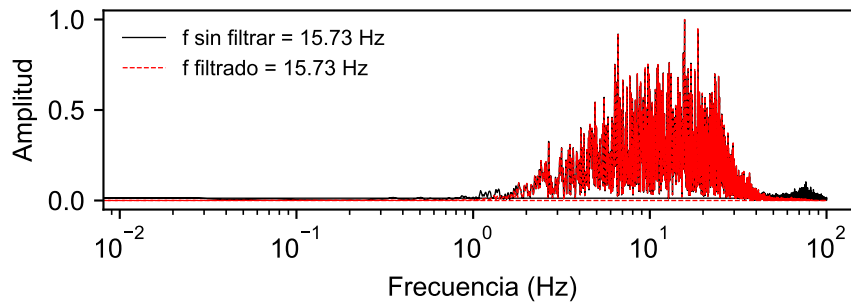
(d)

FIGURA B.9: Aceleración en la base de especímenes de prueba: (a) aceleración para el espécimen E-1, (b) aceleración para el espécimen E-2, (c) aceleración para el espécimen E-3, (d) aceleración para el espécimen E-4.

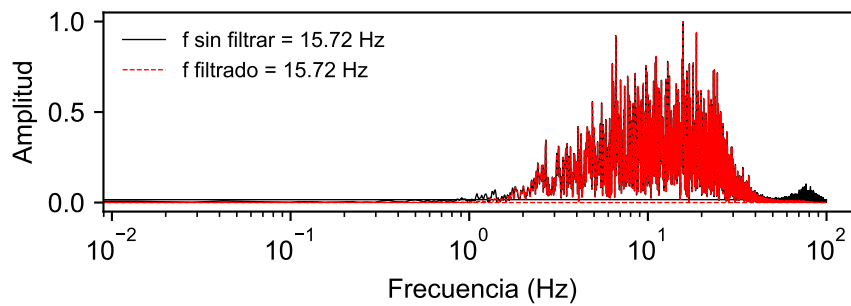
Contenidos de frecuencias de las aceleraciones en la base



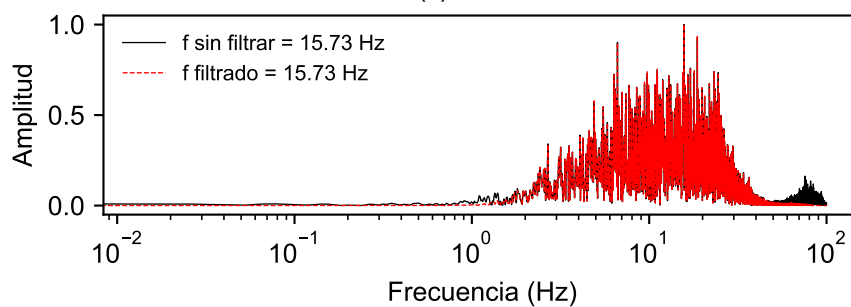
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.10: Aceleración en la base de especímenes de prueba: (a) FFT de la base para el espécimen E-1, (b) FFT de la base para el espécimen E-2, (c) FFT de la base para el espécimen E-3, (d) FFT de la base para el espécimen E-4.

Desplazamientos en la base

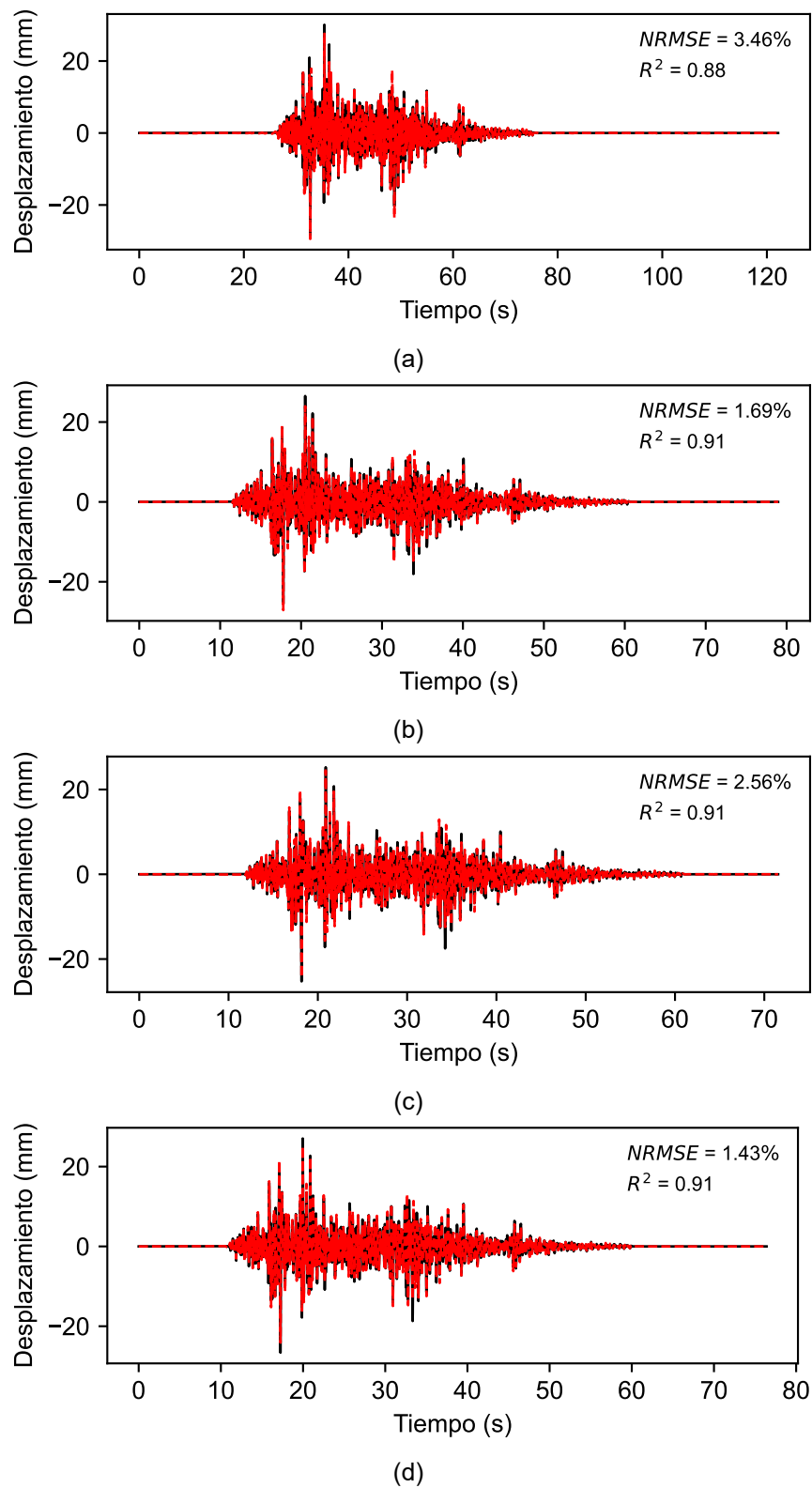
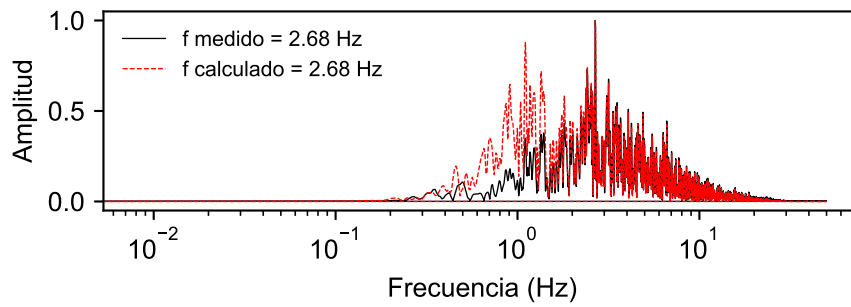
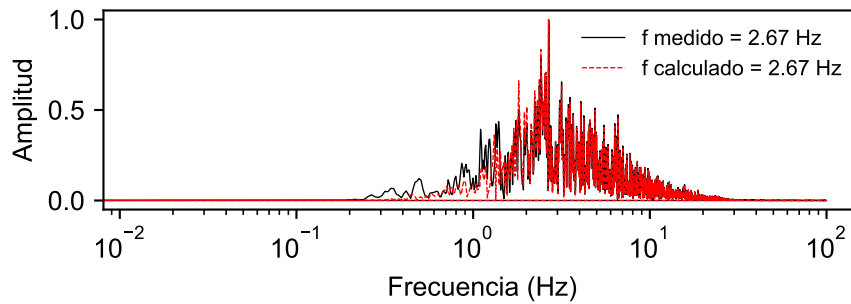


FIGURA B.11: Desplazamiento en la base de especímenes de prueba: (a) desplazamiento para el espécimen E-1, (b) desplazamiento para el espécimen E-2, (c) desplazamiento para el espécimen E-3, (d) desplazamiento para el espécimen E-4.

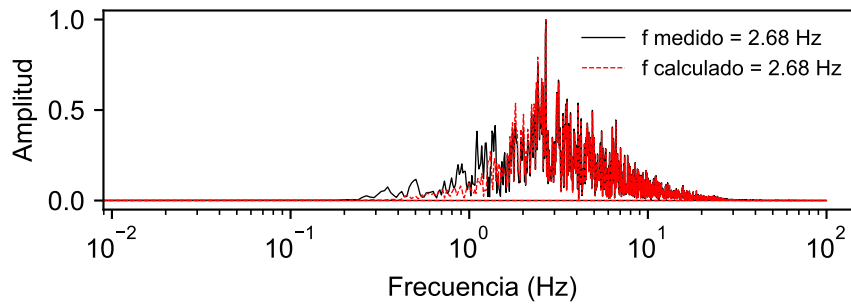
Contenidos de frecuencias de los desplazamientos en la base



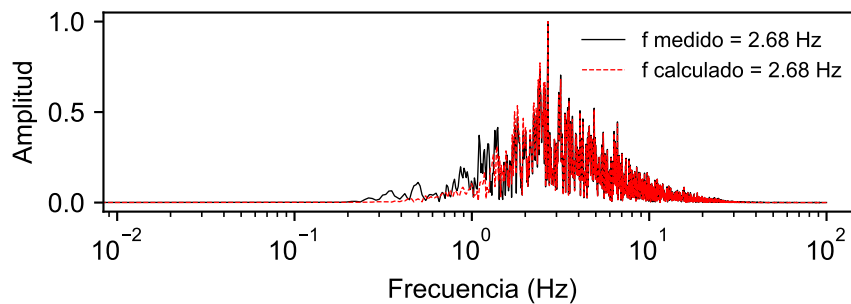
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.12: Comparación del contenido de frecuencias del desplazamiento calculado y el desplazamiento medido en la base: (a) comparación del FFT para el espécimen E-1, (b) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-2, (c) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-3, (d) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-4.

Transformada de wavelet para la aceleración relativa en el centro de masa - Descomposición de desplazamientos

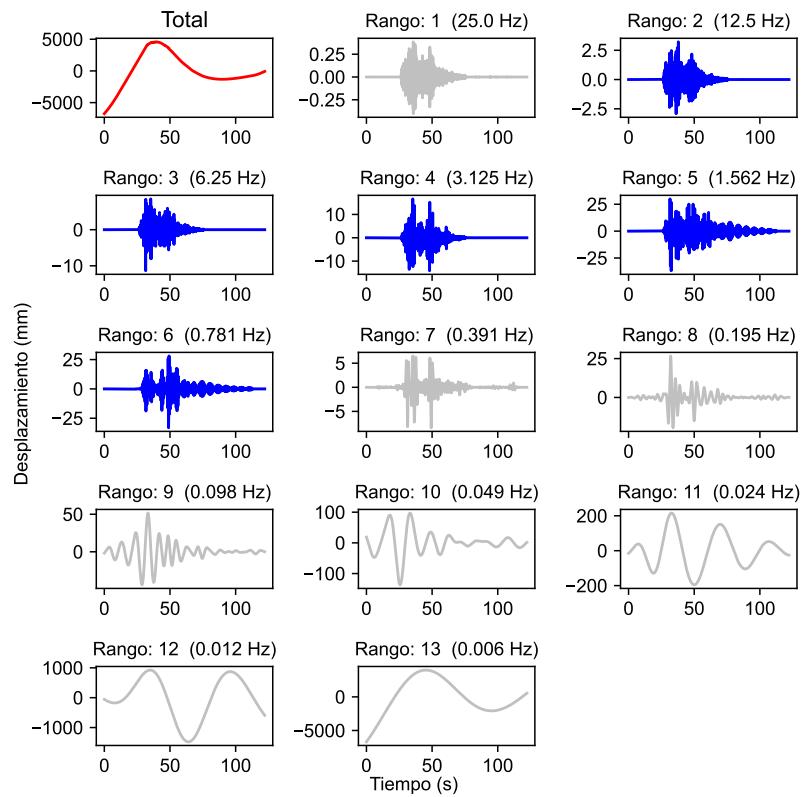


FIGURA B.13: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-1.

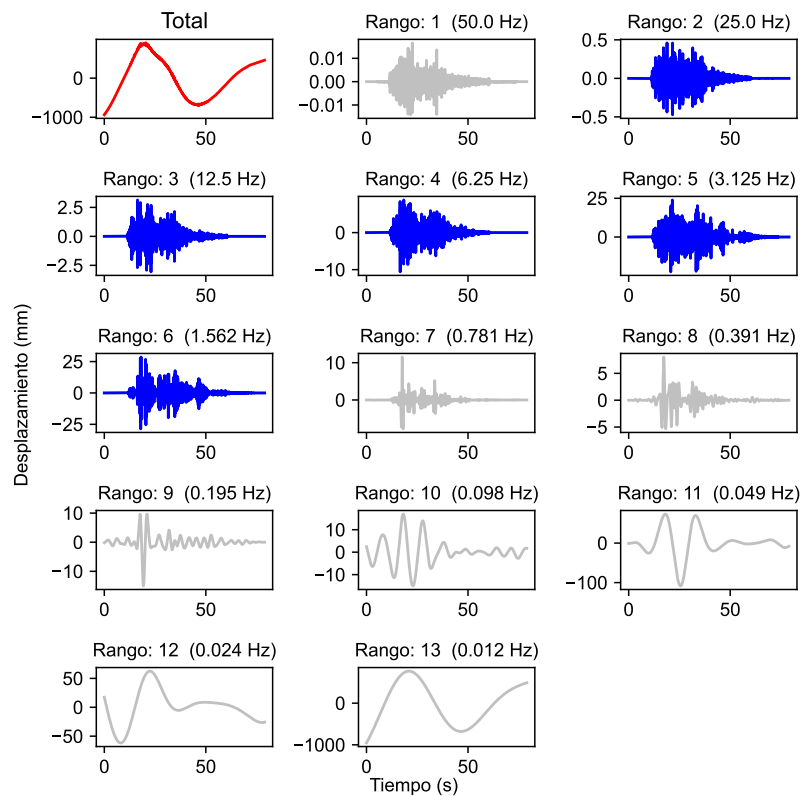


FIGURA B.14: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-2.

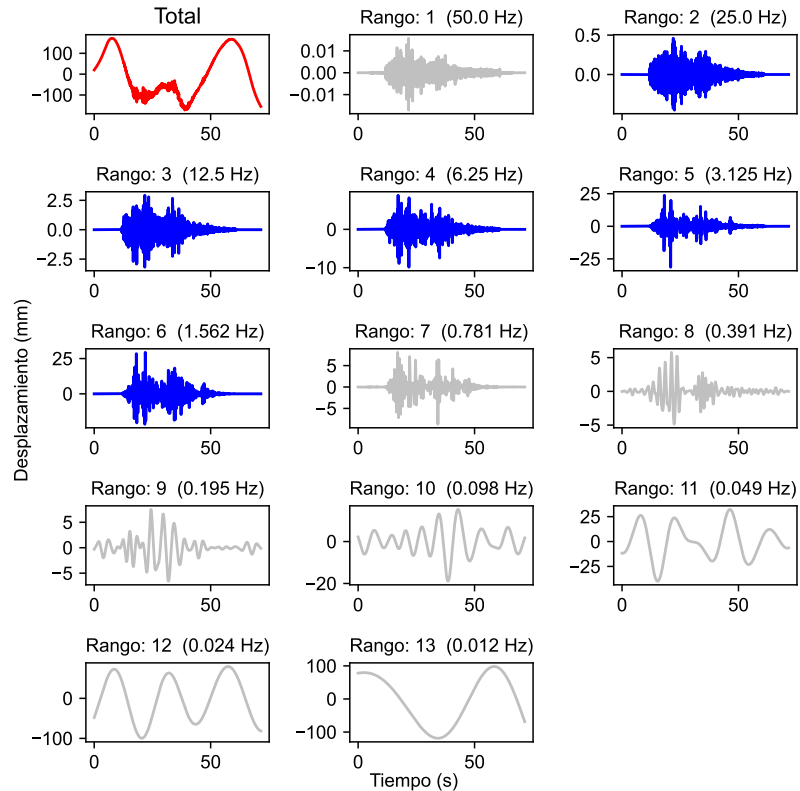


FIGURA B.15: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-3.

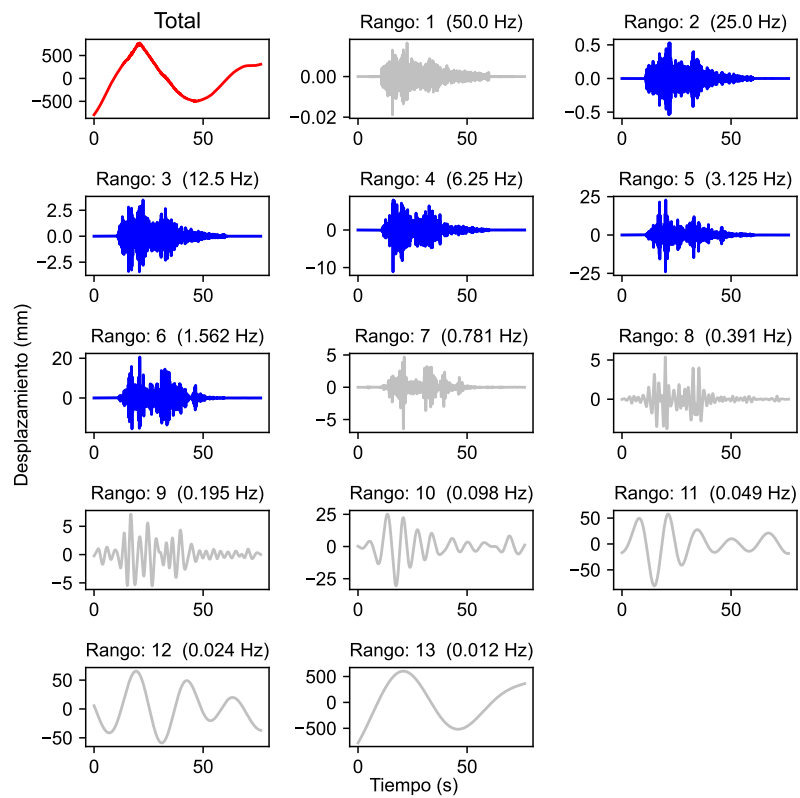


FIGURA B.16: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-4.

Transformada de wavelet para la aceleración relativa en el centro de masa - Histéresis

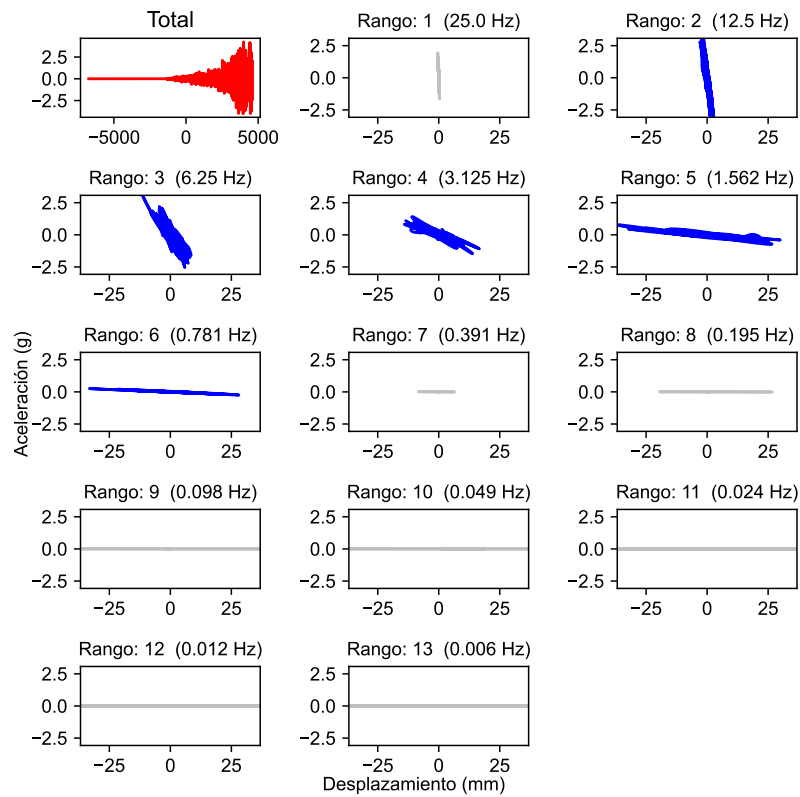


FIGURA B.17: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-1.

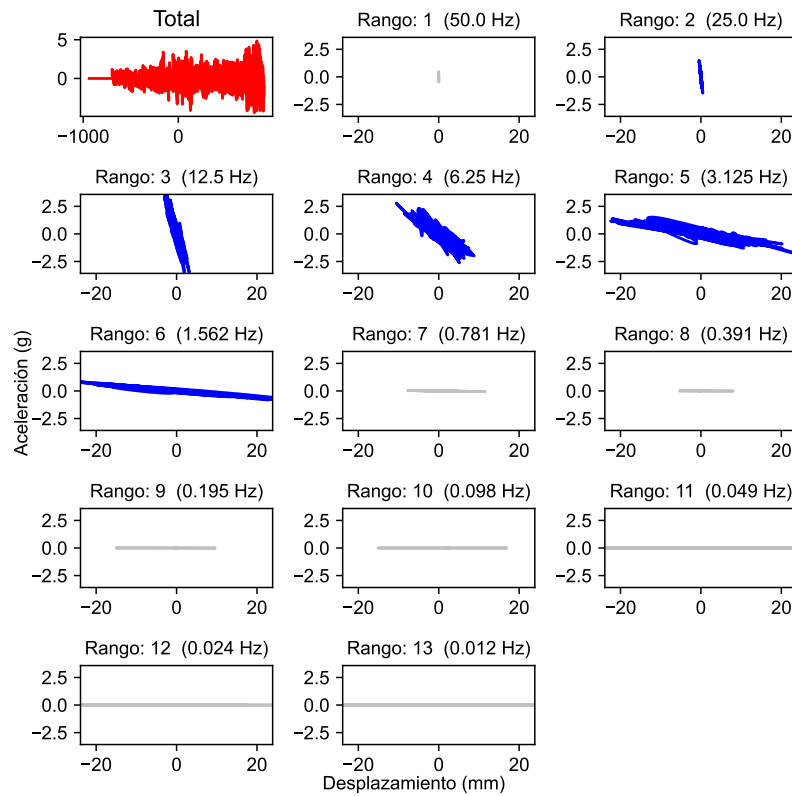


FIGURA B.18: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-2.

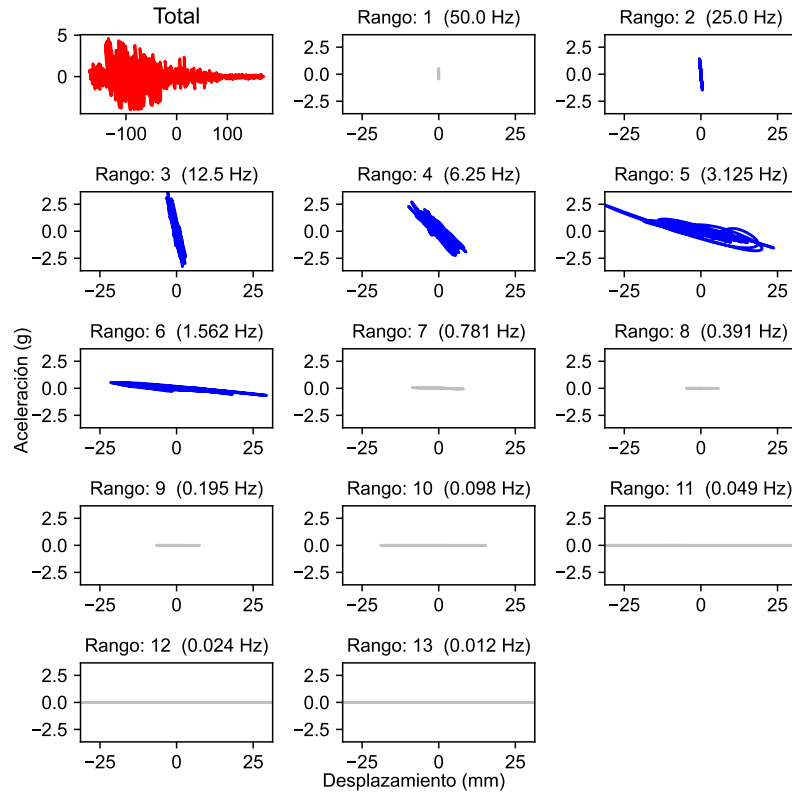


FIGURA B.19: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-3.

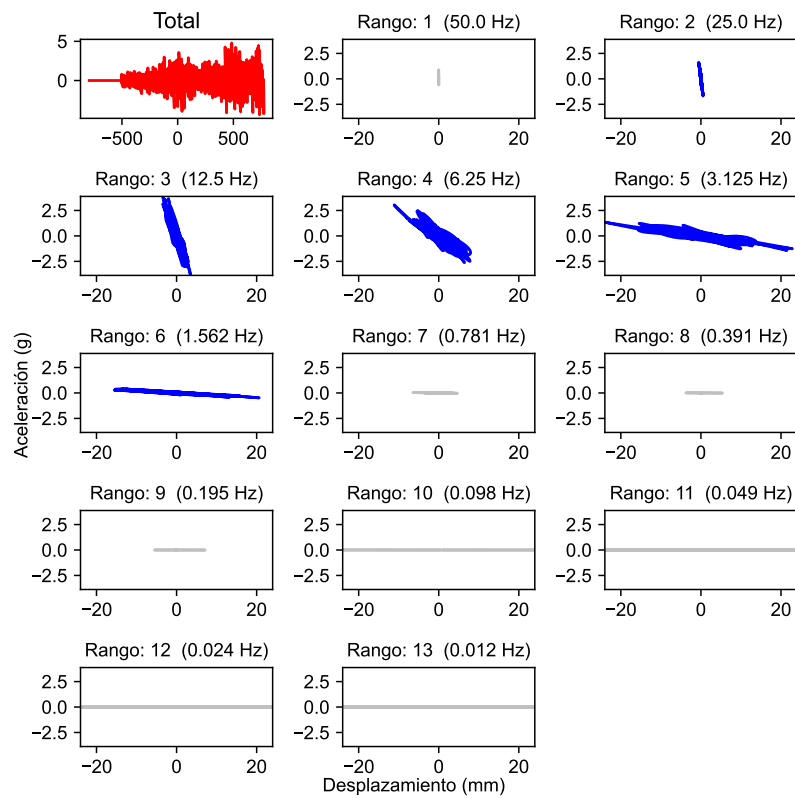
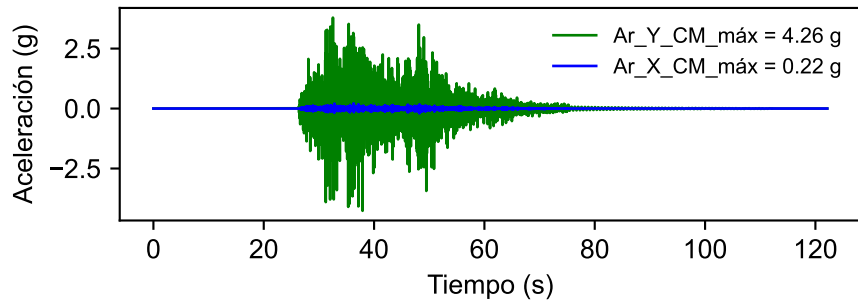
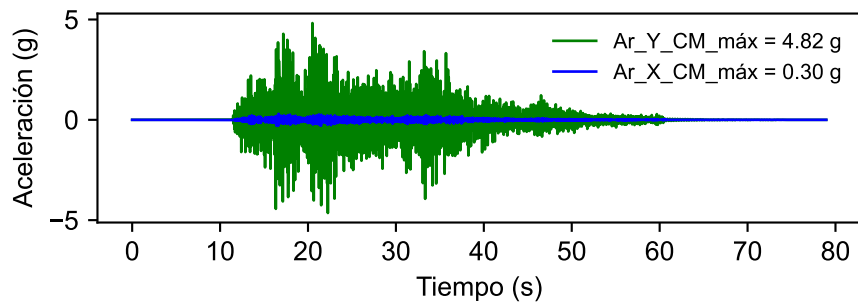


FIGURA B.20: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-4.

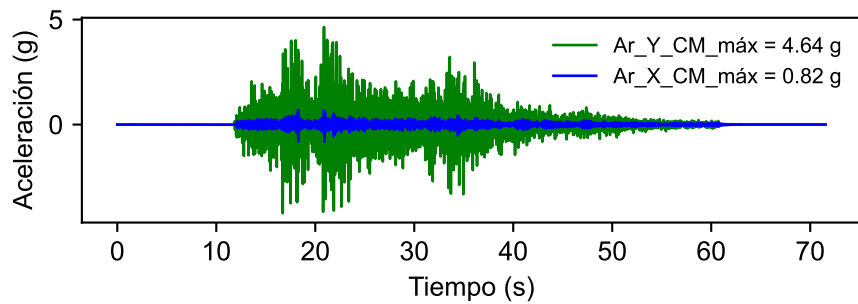
Aceleraciones en el centro de masa filtradas



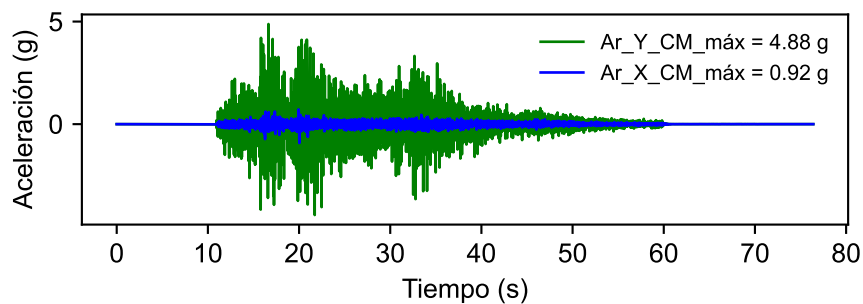
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.21: Aceleración relativa en el centro de masa de los especímenes de prueba: (a) aceleración del espécimen E-1, (b) aceleración del espécimen E-2, (c) aceleración del espécimen E-3, (d) aceleración del espécimen E-4.

Contenidos de frecuencias de las aceleraciones en el centro de masa

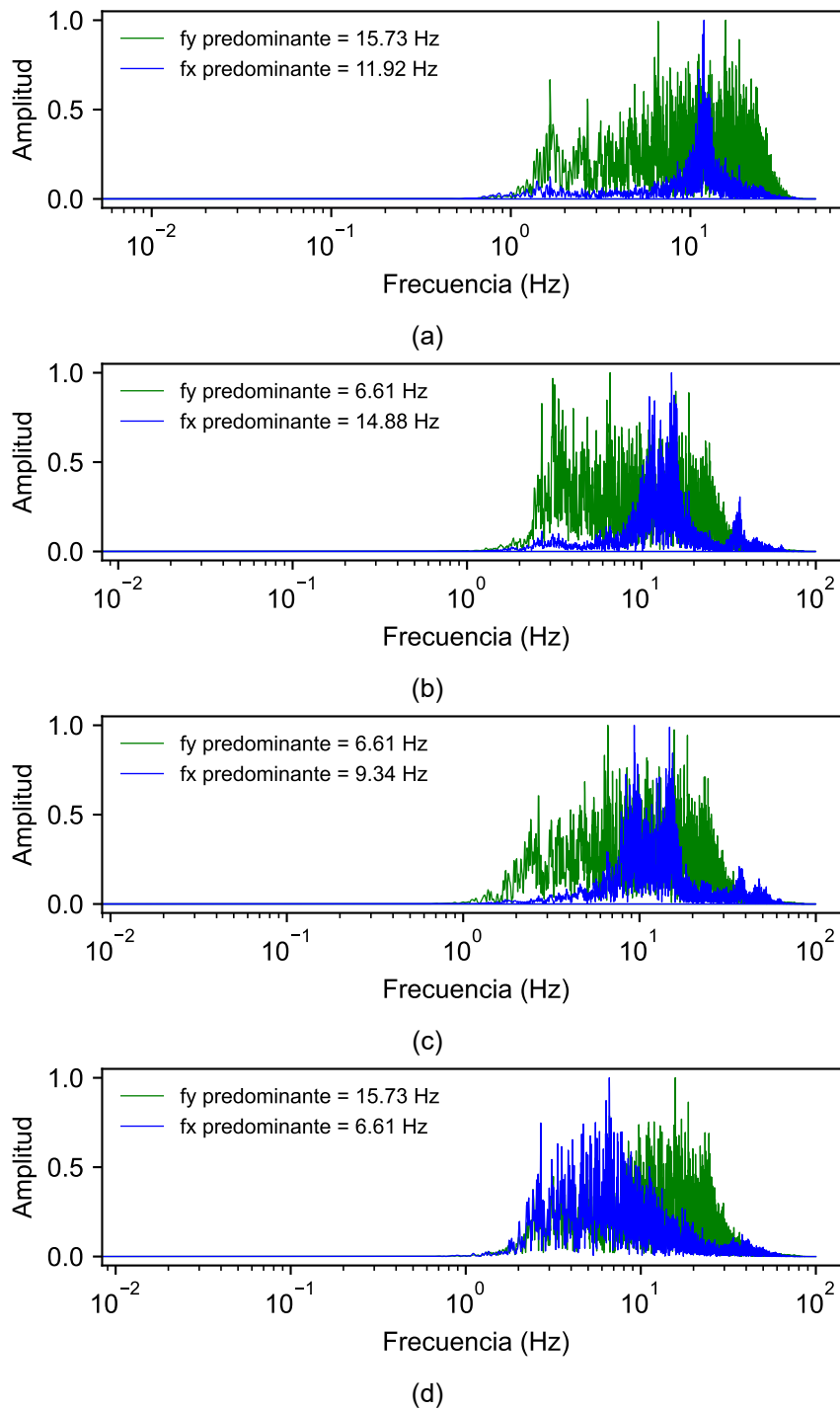


FIGURA B.22: Contenido de frecuencias de la respuesta de los especímenes en las direcciones X e Y: (a) FFT de la respuesta del espécimen E-1, (b) FFT de la respuesta del espécimen E-2, (c) FFT de la respuesta del espécimen E-3, (d) FFT de la respuesta del espécimen E-4.

Desplazamientos relativos en el centro de masa

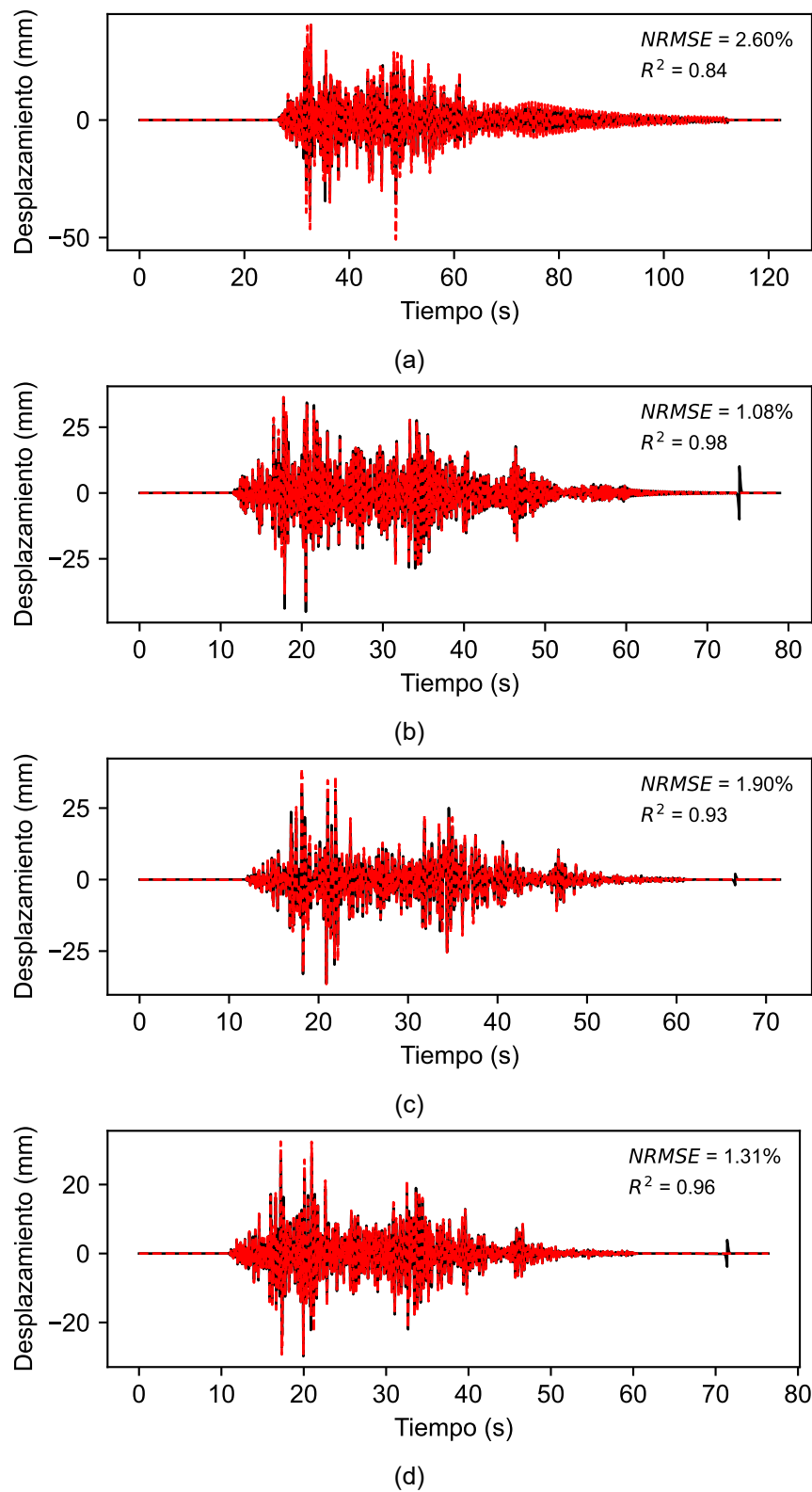
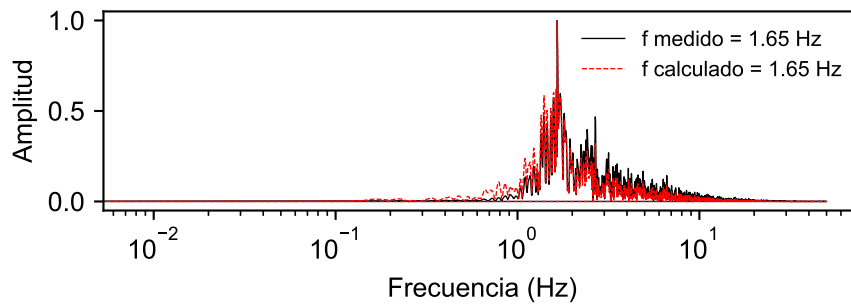
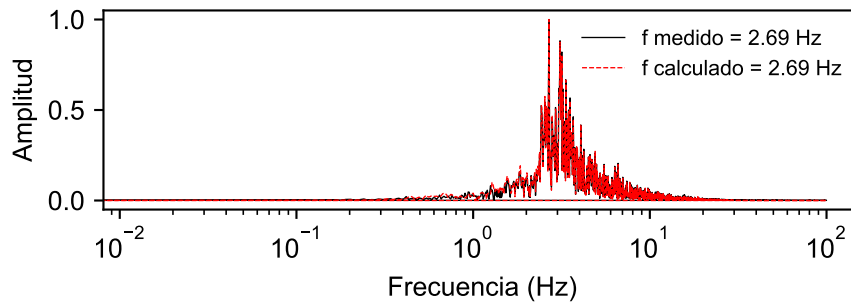


FIGURA B.23: Desplazamiento relativo del centro de masa de los especímenes de prueba: (a) desplazamiento del espécimen E-1, (b) desplazamiento del espécimen E-2, (c) desplazamiento del espécimen E-3, (d) desplazamiento del espécimen E-4.

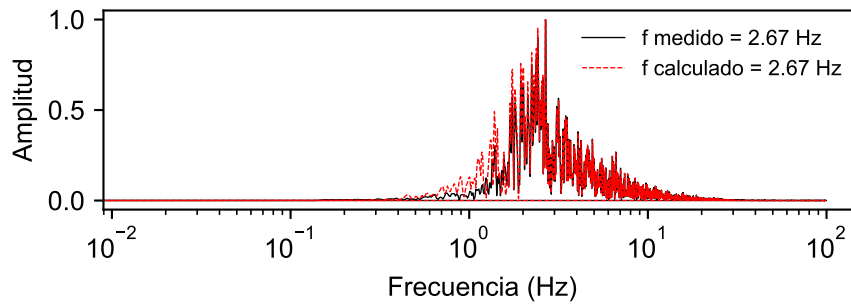
Contenidos de frecuencias de los desplazamientos relativos en el centro de masa



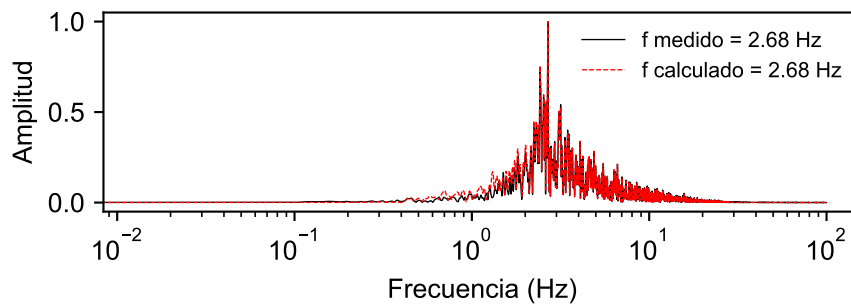
(a)



(b)



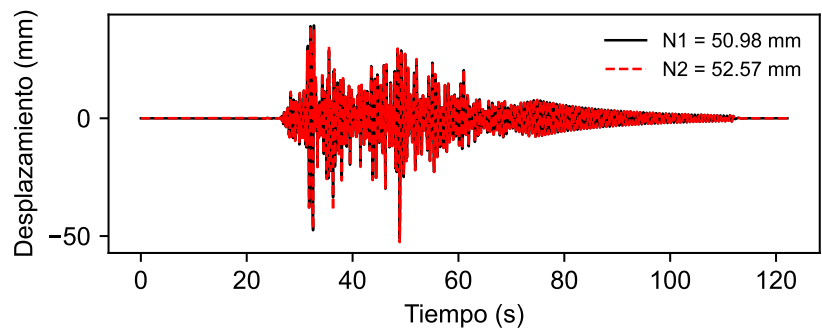
(c)



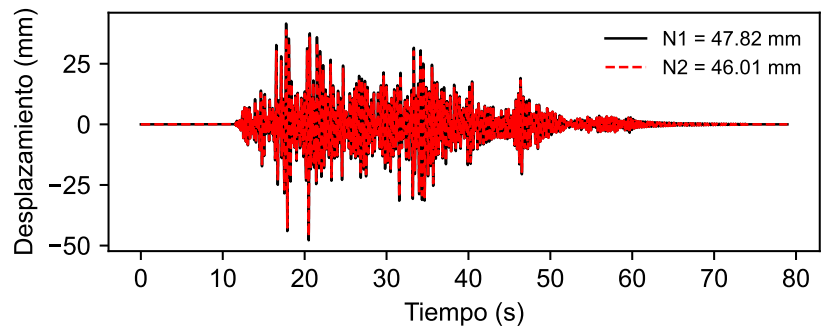
(d)

FIGURA B.24: Comparación del contenido de frecuencias del desplazamiento calculado y el desplazamiento medido en el centro de masa de los especímenes: (a) comparación del FFT para el espécimen E-1, (b) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-2, (c) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-3, (d) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-4.

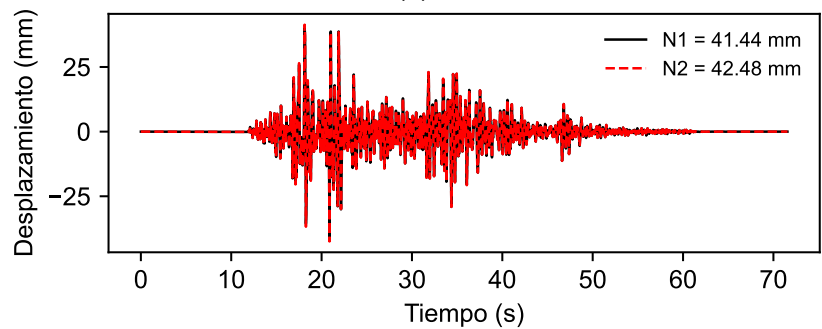
Desplazamientos relativos en las esquinas N1 y N2 de los especímenes



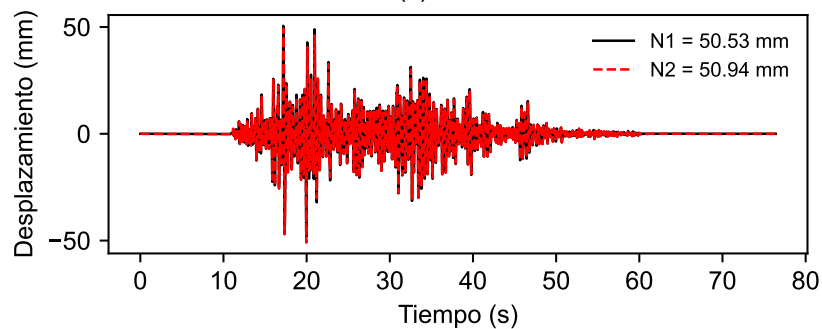
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.25: Desplazamiento relativo del eje A de los especímenes de prueba: (a) desplazamiento del espécimen E-1, (b) desplazamiento del espécimen E-2, (c) desplazamiento del espécimen E-3, (d) desplazamiento del espécimen E-4.

Desplazamientos relativos en las esquinas N3 y N4 de los especímenes

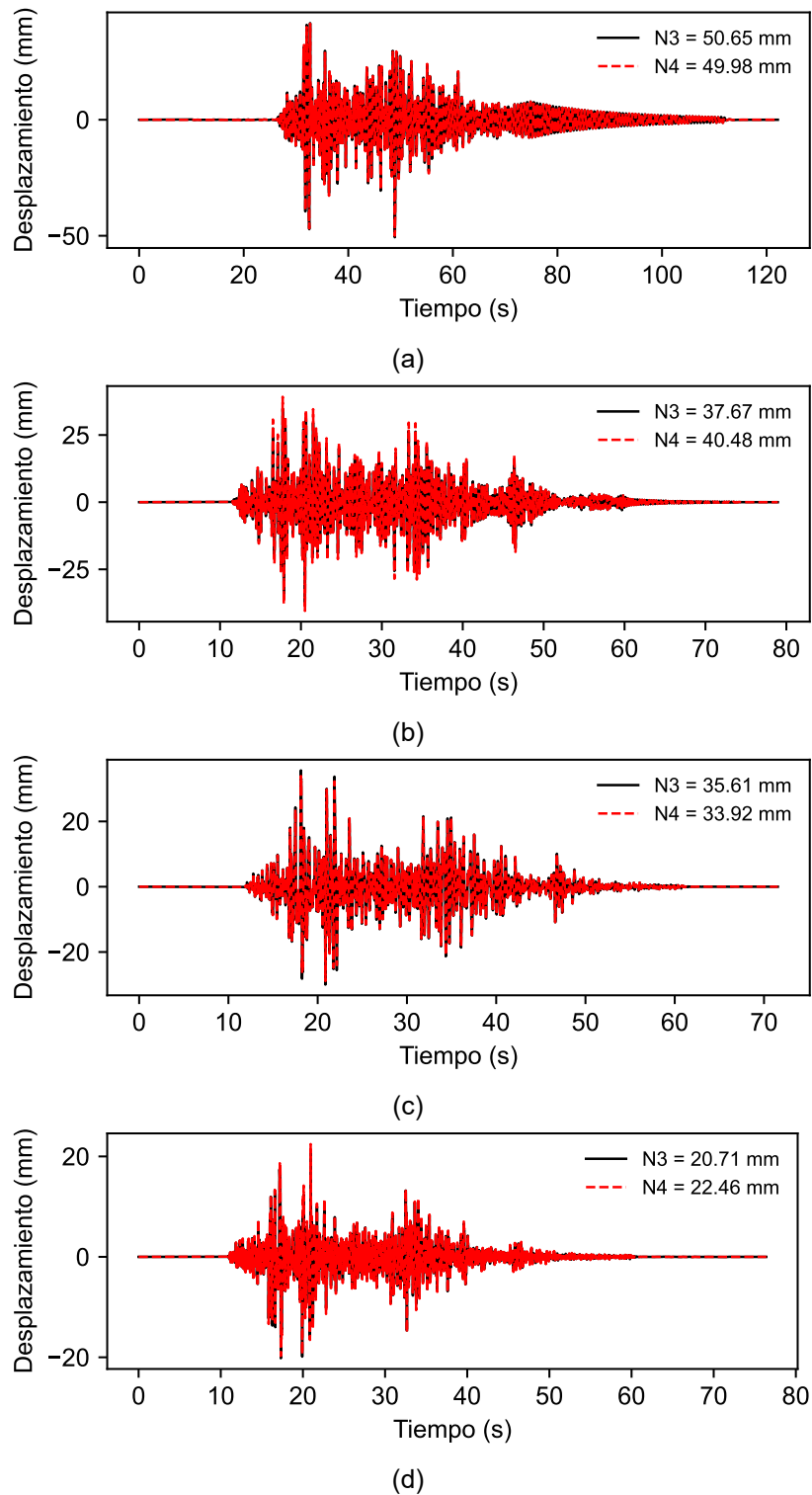


FIGURA B.26: Desplazamiento relativo del eje B de los especímenes de prueba: (a) desplazamiento del espécimen E-1, (b) desplazamiento del espécimen E-2, (c) desplazamiento del espécimen E-3, (d) desplazamiento del espécimen E-4.

B.2 Resultados para el registro PISCO-2007

Transformada de wavelet para la aceleración en la base - Descomposición de desplazamientos

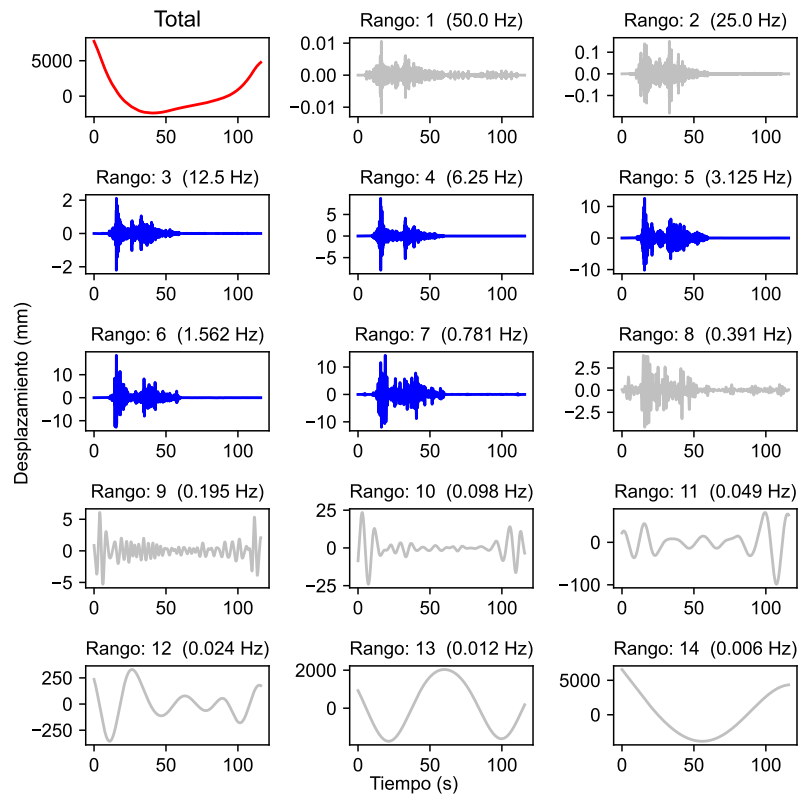


FIGURA B.27: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-1.

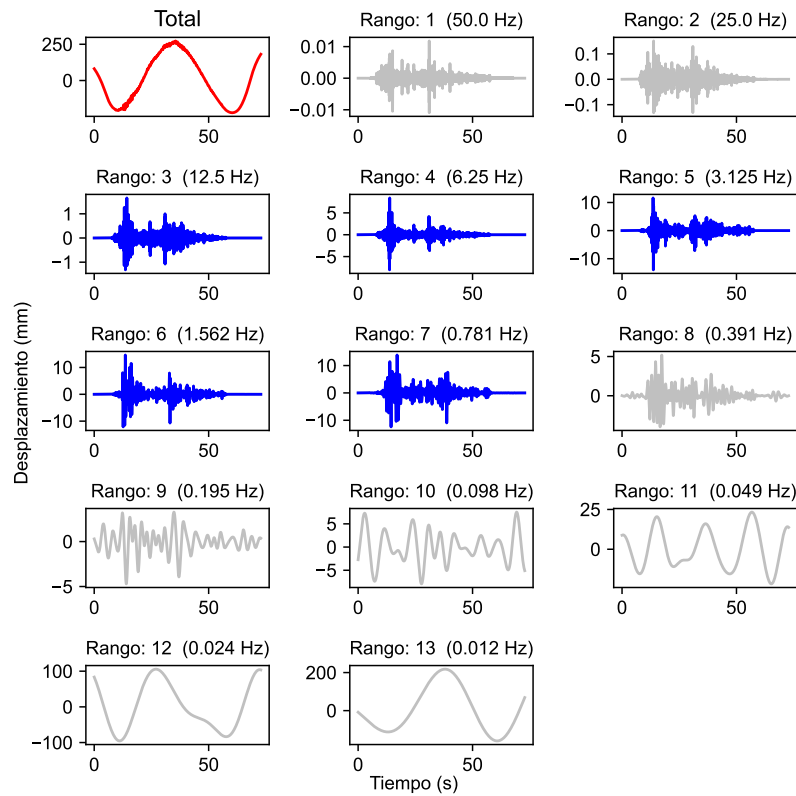


FIGURA B.28: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-2.

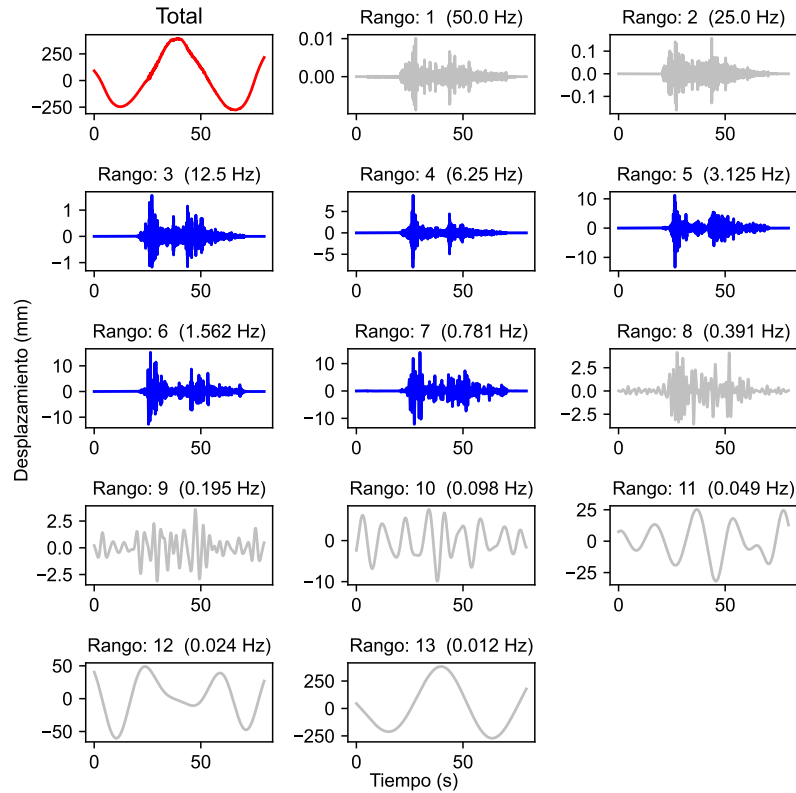


FIGURA B.29: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-3.

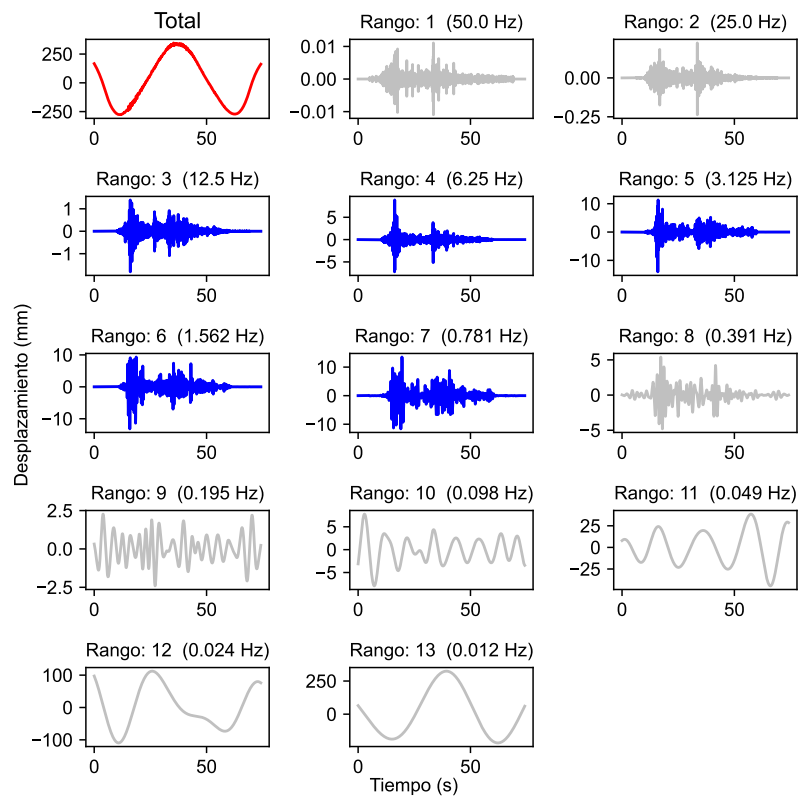


FIGURA B.30: Descomposición en rangos de frecuencias AgY E-4.

Transformada de wavelet para la aceleración en la base - Histéresis

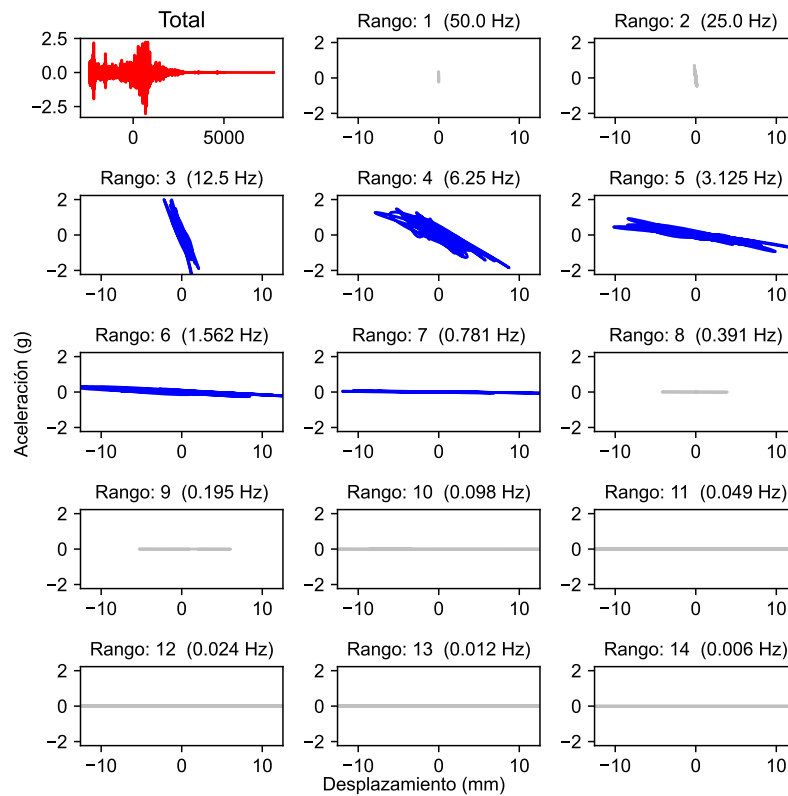


FIGURA B.31: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-1.

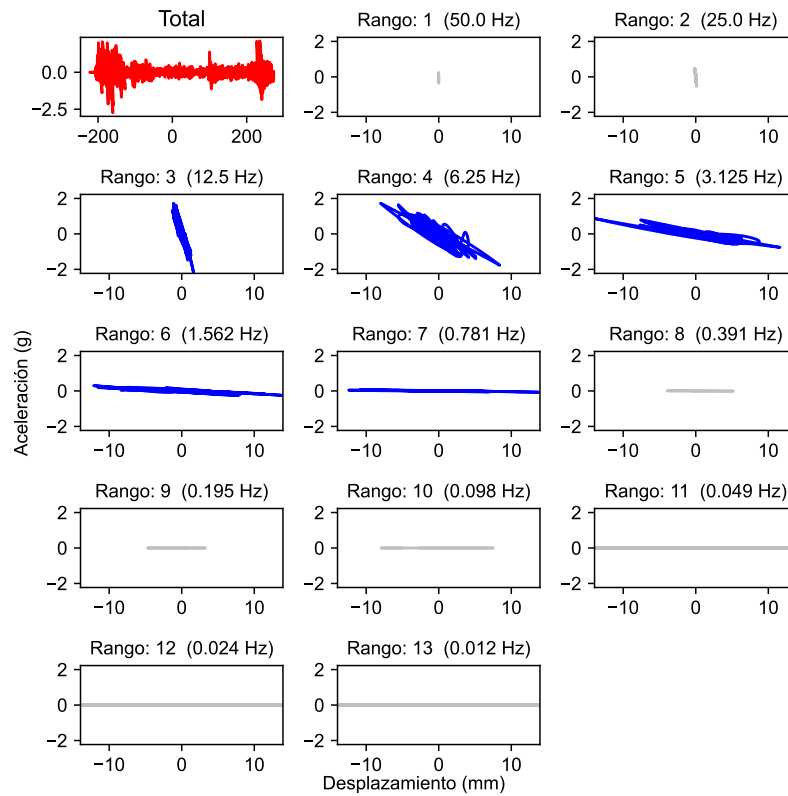


FIGURA B.32: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-2.

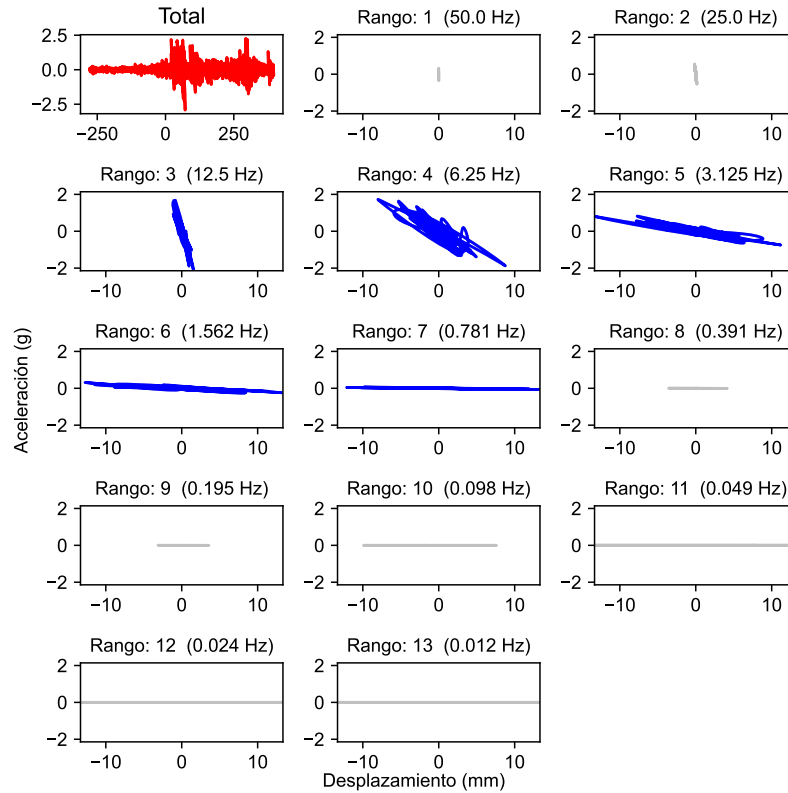


FIGURA B.33: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-3.

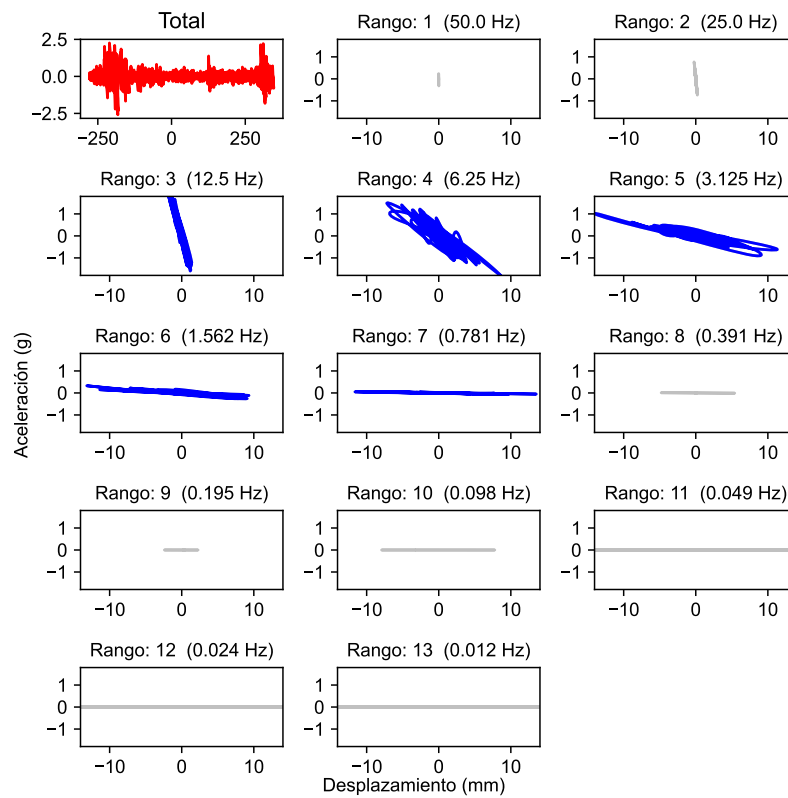


FIGURA B.34: Histéresis para distintos rangos de frecuencias AgY E-4.

Aceleraciones en la base filtradas

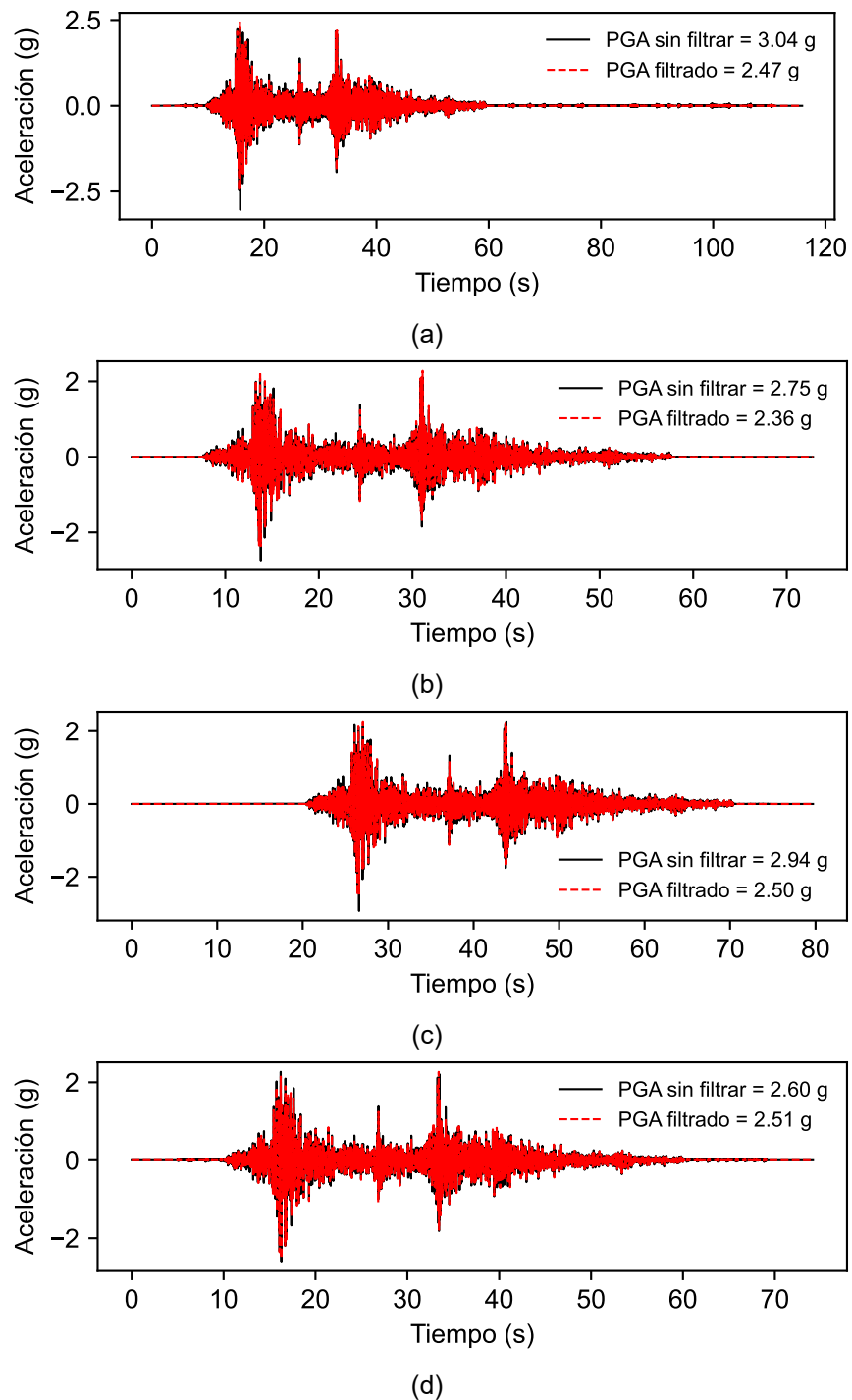


FIGURA B.35: Aceleración en la base de especímenes de prueba: (a) aceleración para el espécimen E-1, (b) aceleración para el espécimen E-2, (c) aceleración para el espécimen E-3, (d) aceleración para el espécimen E-4.

Contenidos de frecuencias de las aceleraciones en la base

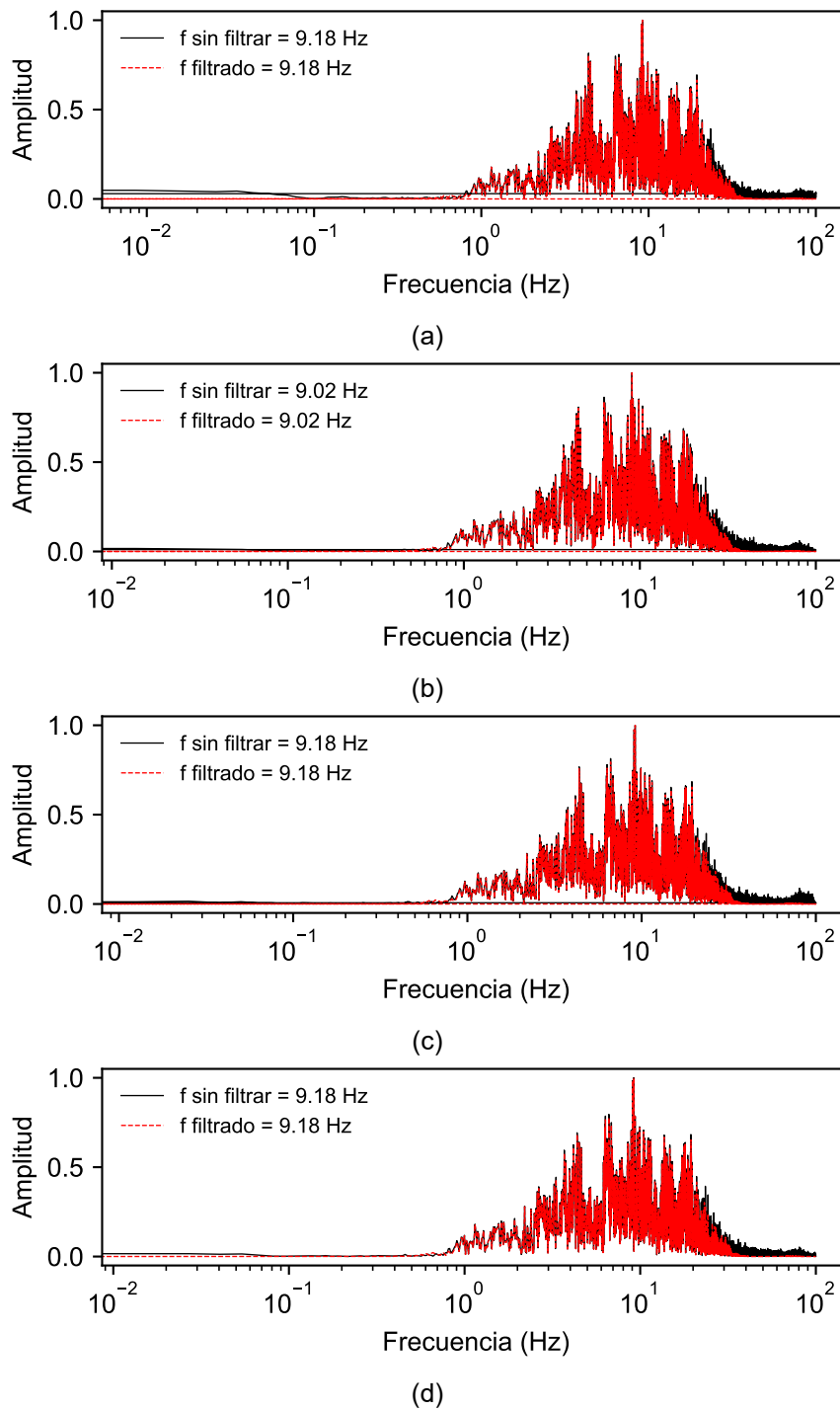


FIGURA B.36: Aceleración en la base de especímenes de prueba: (a) FFT de la base para el espécimen E-1, (b) FFT de la base para el espécimen E-2, (c) FFT de la base para el espécimen E-3, (d) FFT de la base para el espécimen E-4.

Desplazamientos en la base

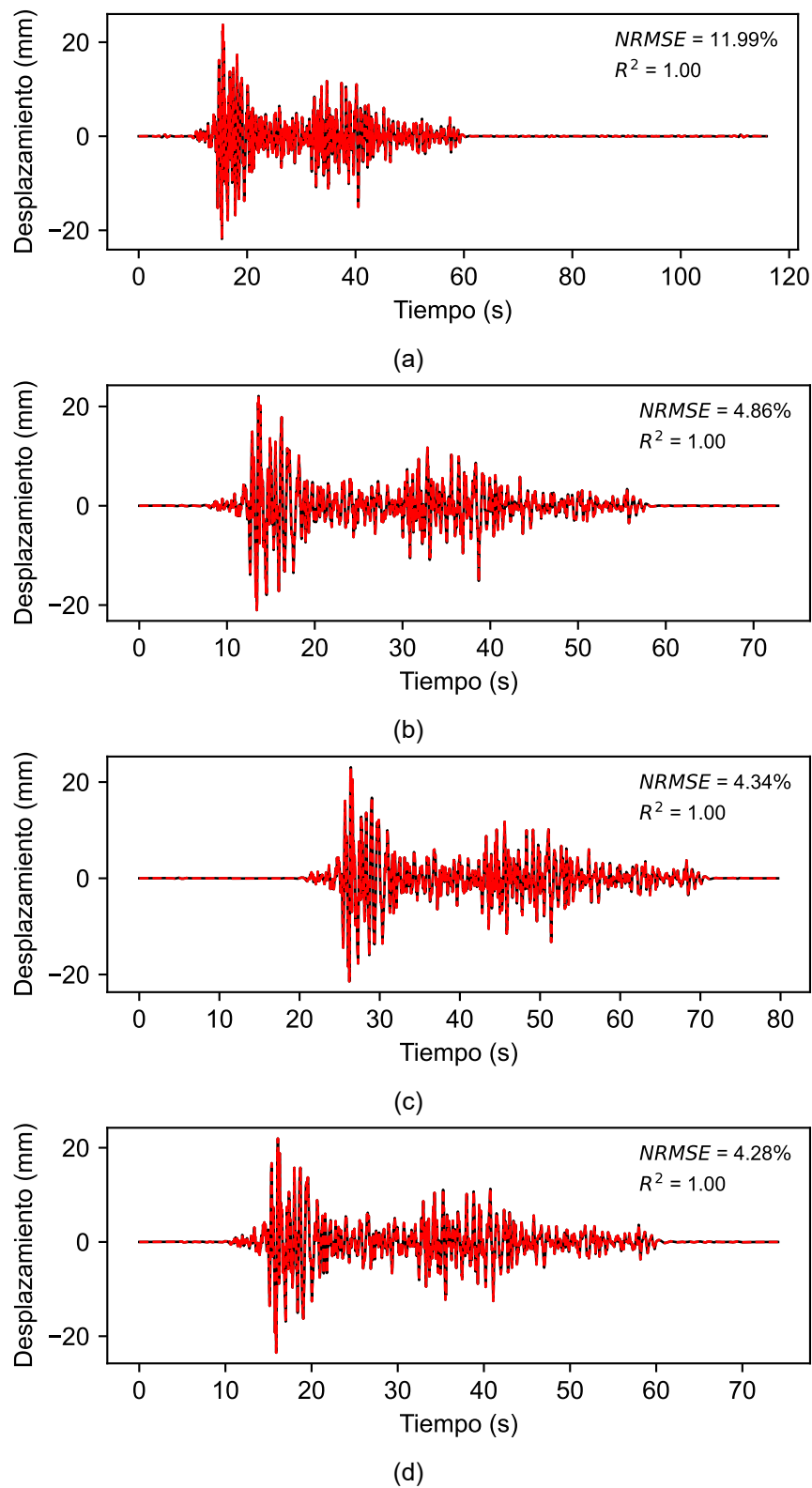


FIGURA B.37: Desplazamiento en la base de especímenes de prueba: (a) desplazamiento para el espécimen E-1, (b) desplazamiento para el espécimen E-2, (c) desplazamiento para el espécimen E-3, (d) desplazamiento para el espécimen E-4.

Contenidos de frecuencias de los desplazamientos en la base

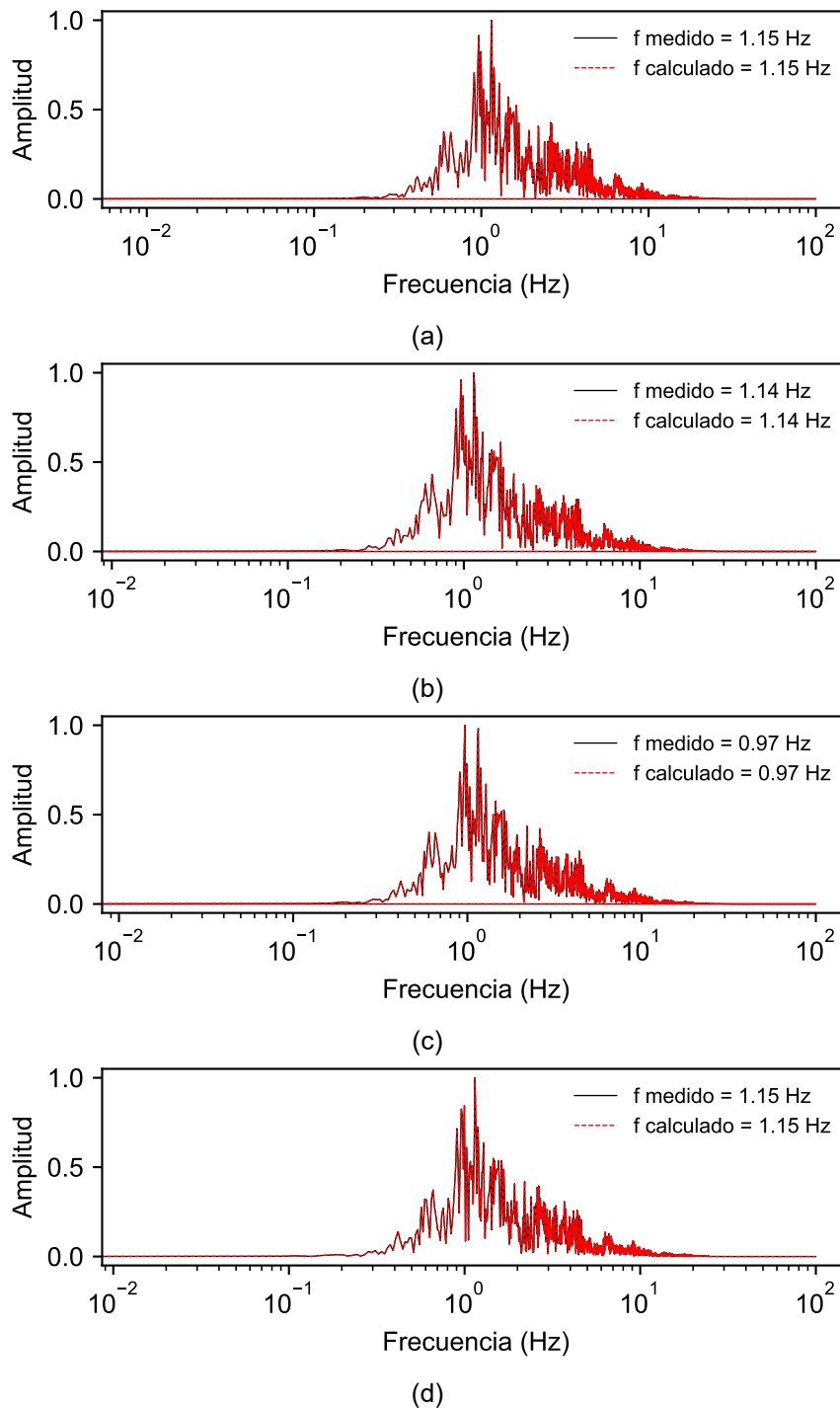


FIGURA B.38: Comparación del contenido de frecuencias del desplazamiento calculado y el desplazamiento medido en la base: (a) comparación del FFT para el espécimen E-1, (b) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-2, (c) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-3, (d) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-4.

Transformada de wavelet para la aceleración relativa en el centro de masa - Descomposición de desplazamientos

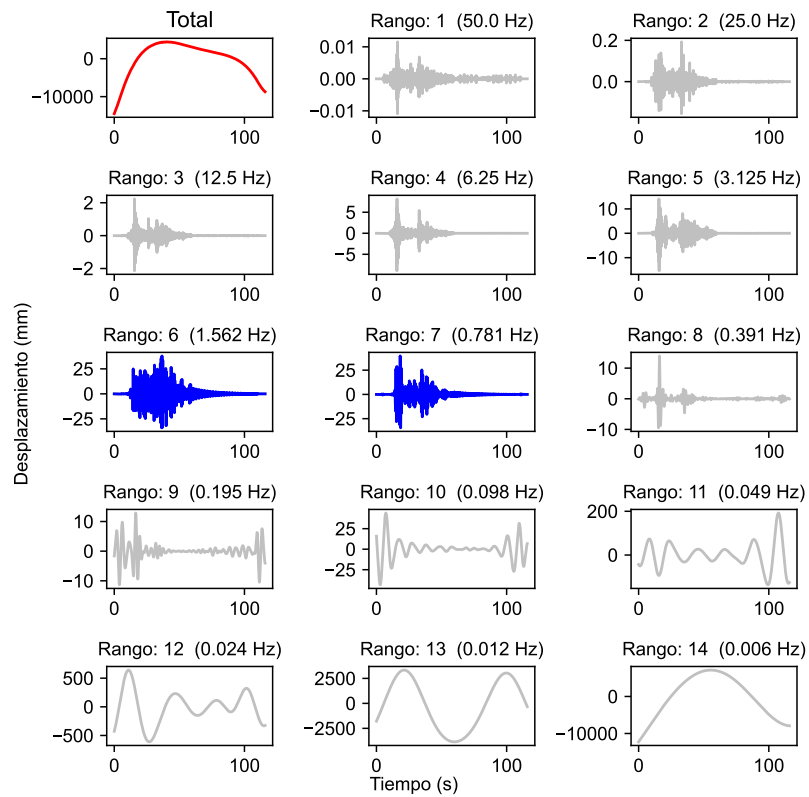


FIGURA B.39: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-1.

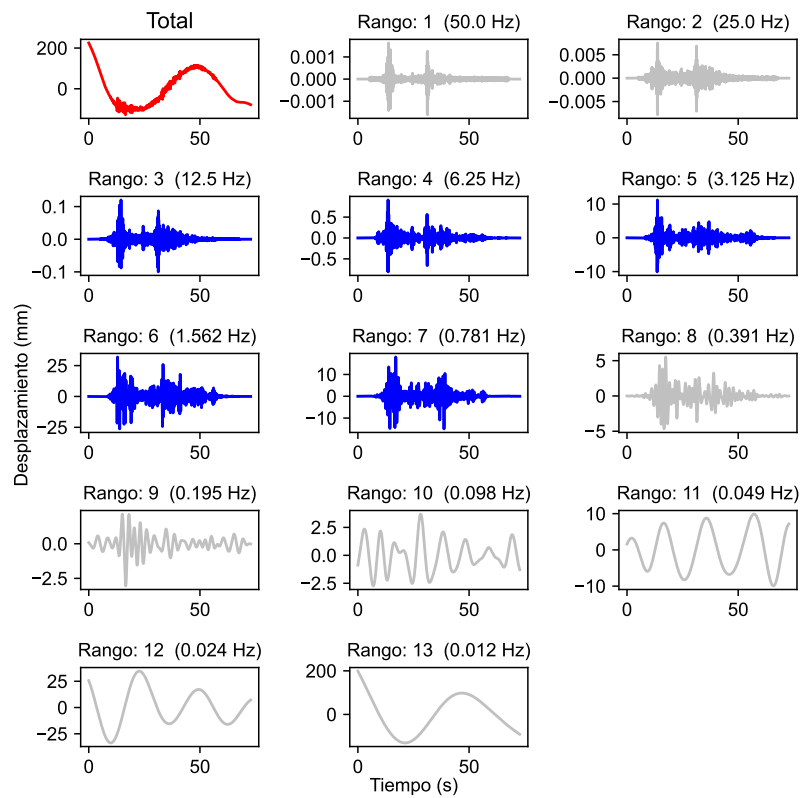


FIGURA B.40: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-2.

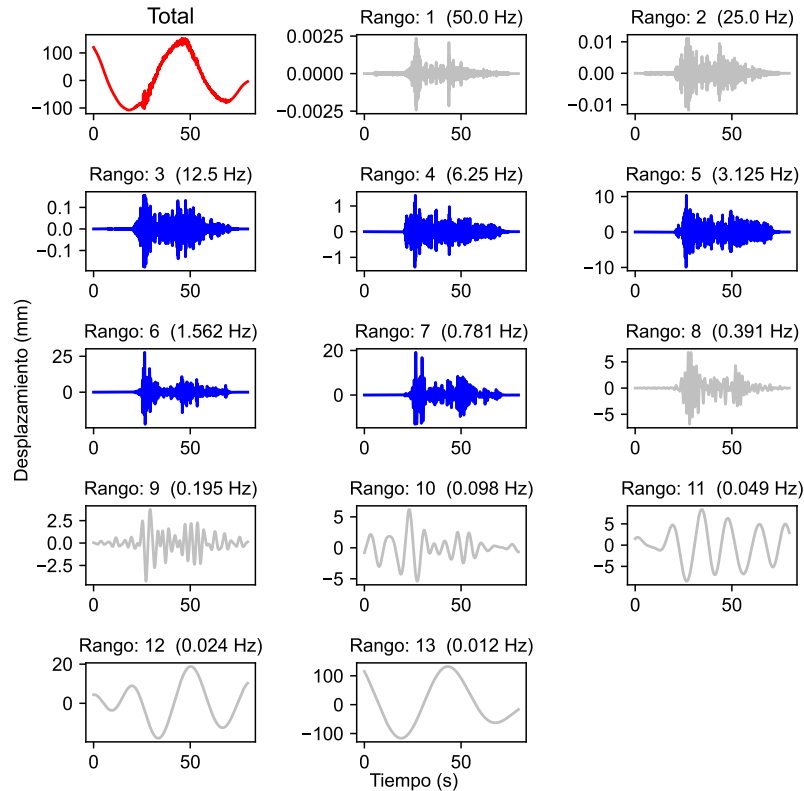


FIGURA B.41: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-3.

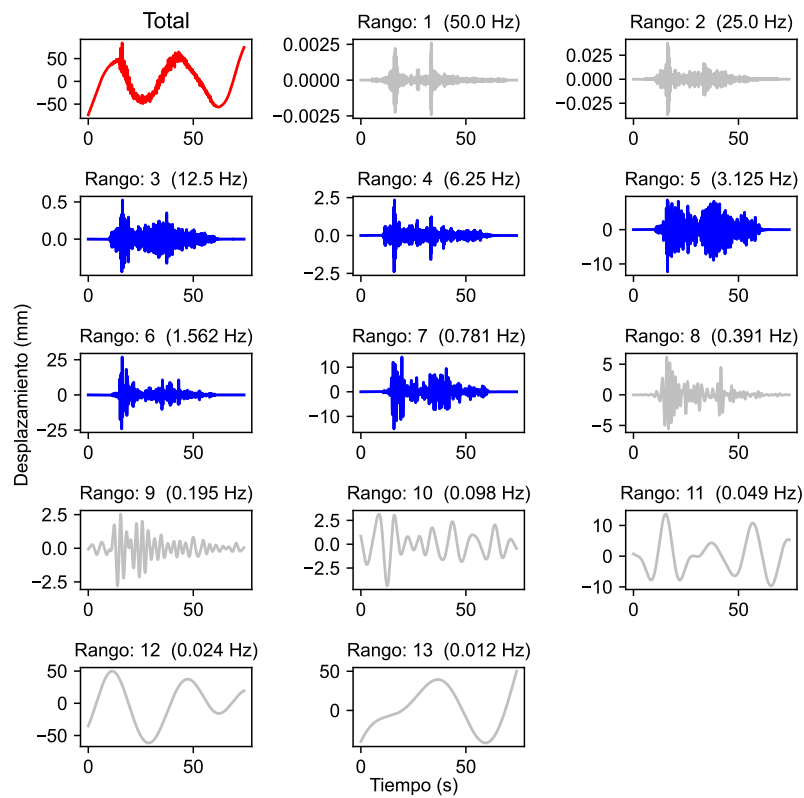


FIGURA B.42: Descomposición en rangos de frecuencias ayCM E-4.

Transformada de wavelet para la aceleración relativa en el centro de masa - Histéresis

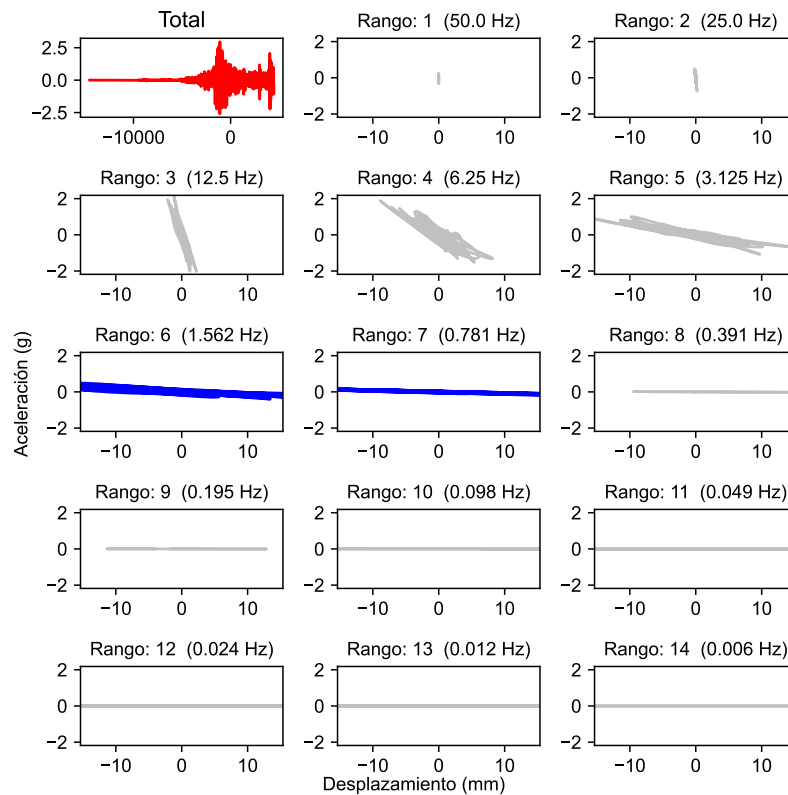


FIGURA B.43: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-1.

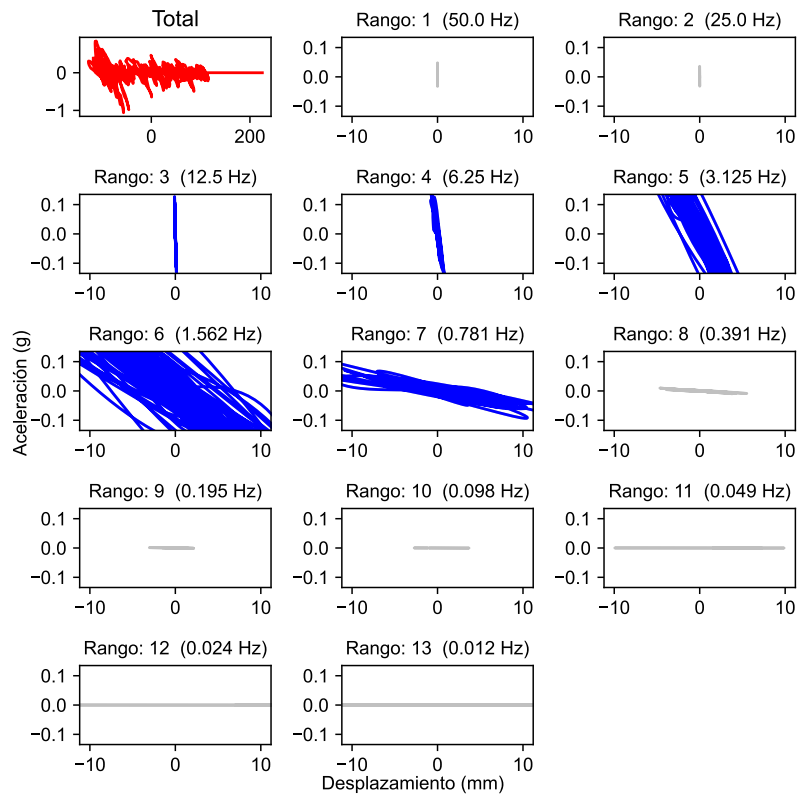


FIGURA B.44: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-2.

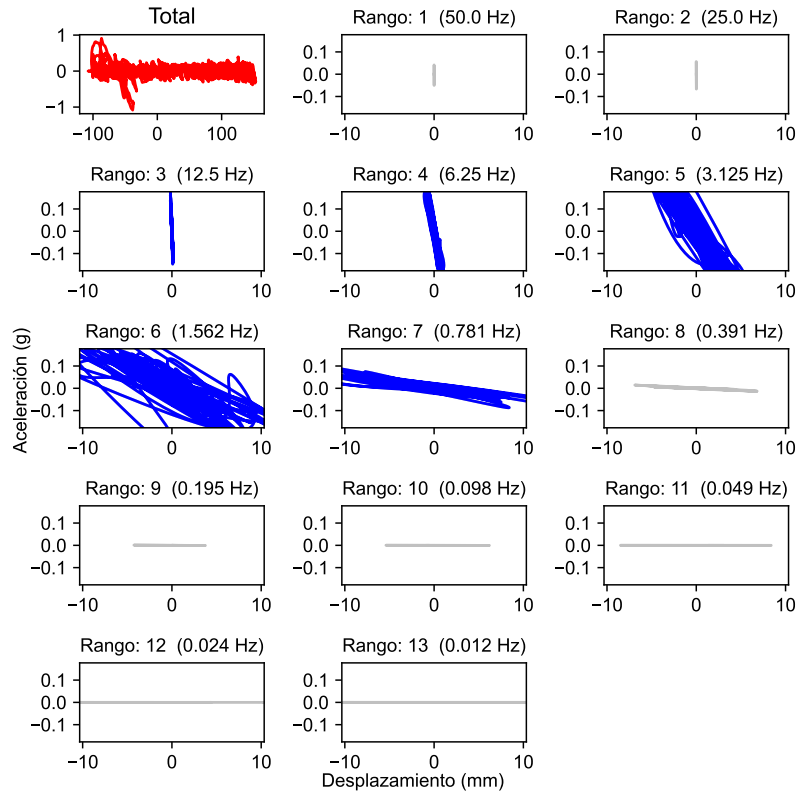


FIGURA B.45: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-3.

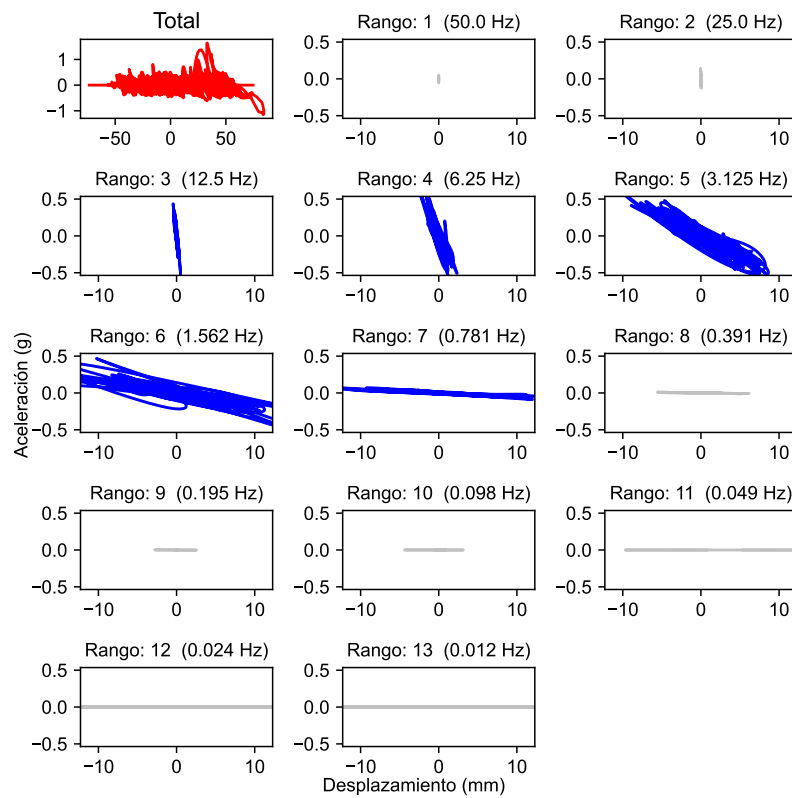
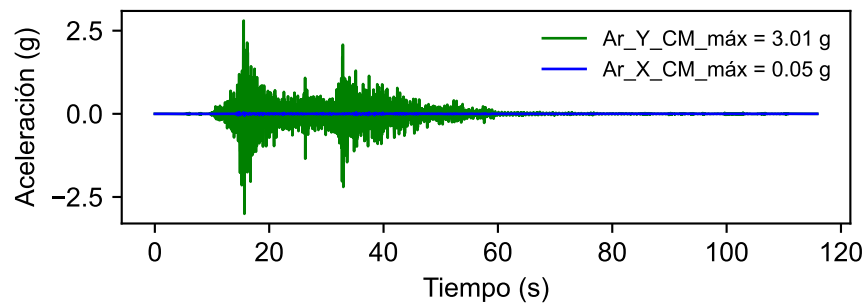
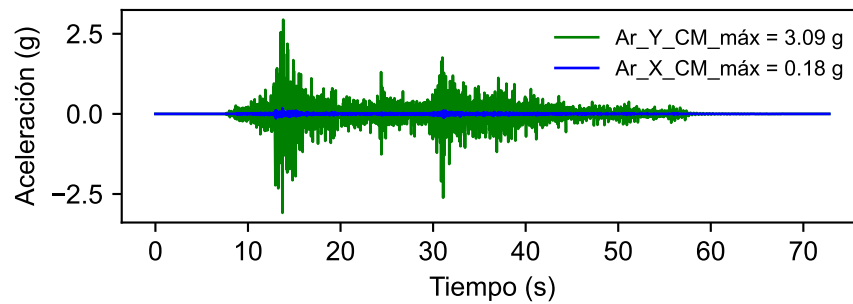


FIGURA B.46: Histéresis para distintos rangos de frecuencias ayCM E-4.

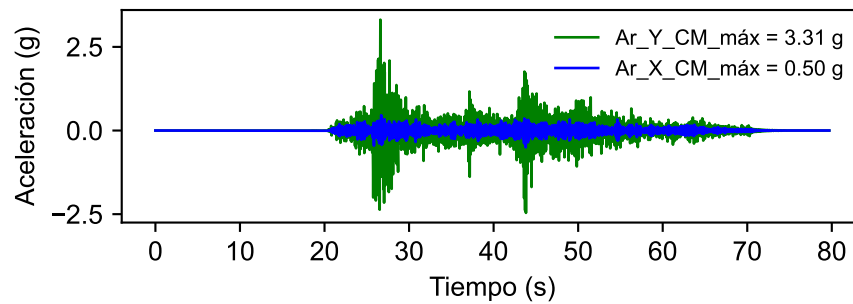
Aceleraciones en el centro de masa filtradas



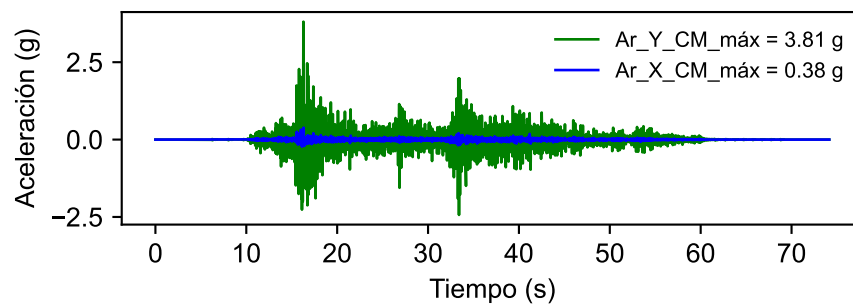
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.47: Aceleración relativa en el centro de masa de los especímenes de prueba: (a) aceleración del espécimen E-1, (b) aceleración del espécimen E-2, (c) aceleración del espécimen E-3, (d) aceleración del espécimen E-4.

Contenidos de frecuencias de las aceleraciones en el centro de masa

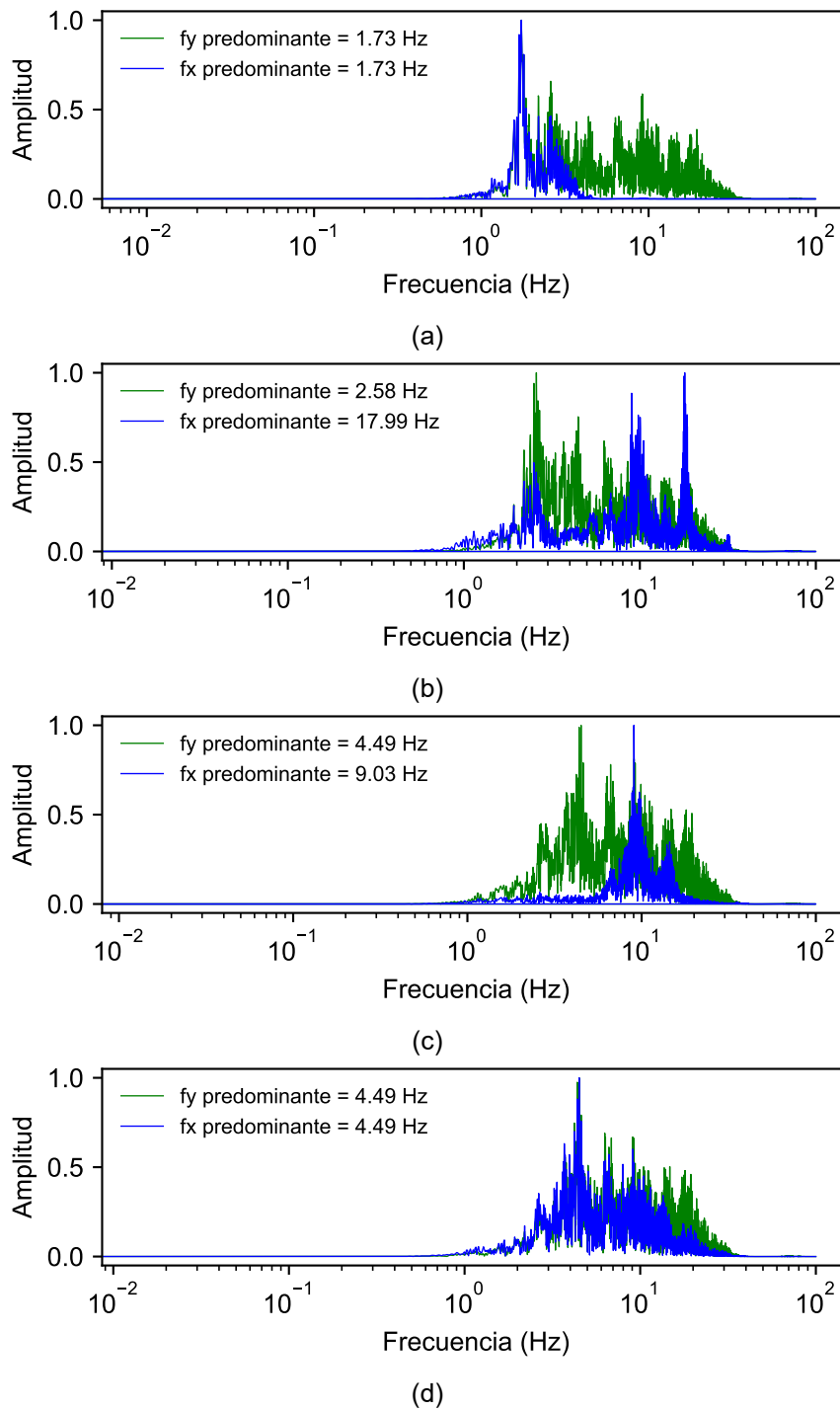
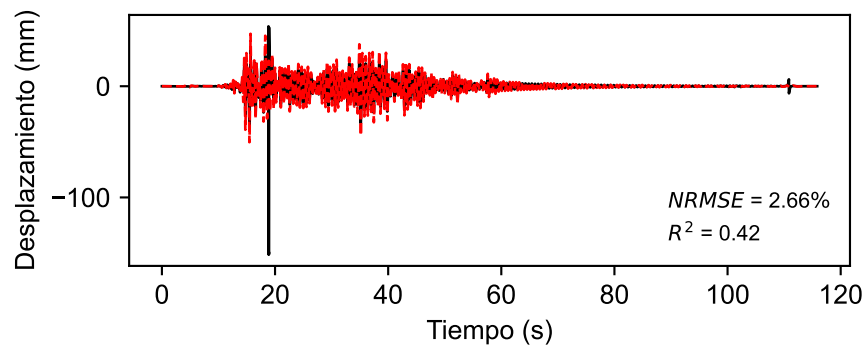
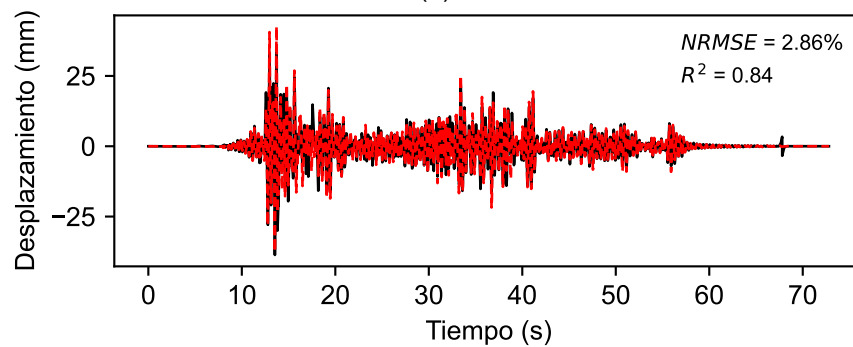


FIGURA B.48: Contenido de frecuencias de la respuesta de los especímenes en las direcciones X e Y: (a) FFT de la respuesta del espécimen E-1, (b) FFT de la respuesta del espécimen E-2, (c) FFT de la respuesta del espécimen E-3, (d) FFT de la respuesta del espécimen E-4.

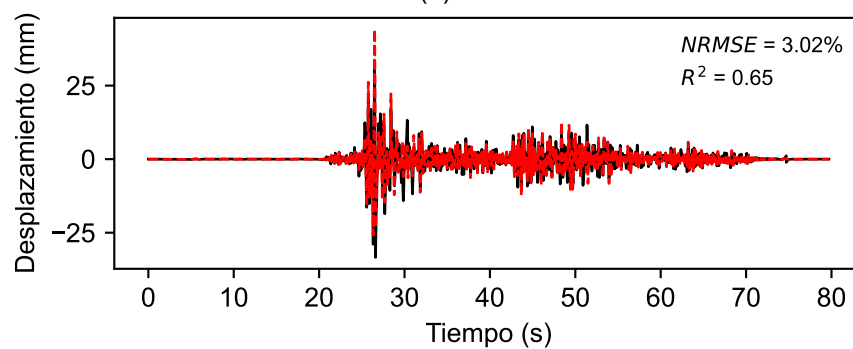
Desplazamientos relativos en el centro de masa



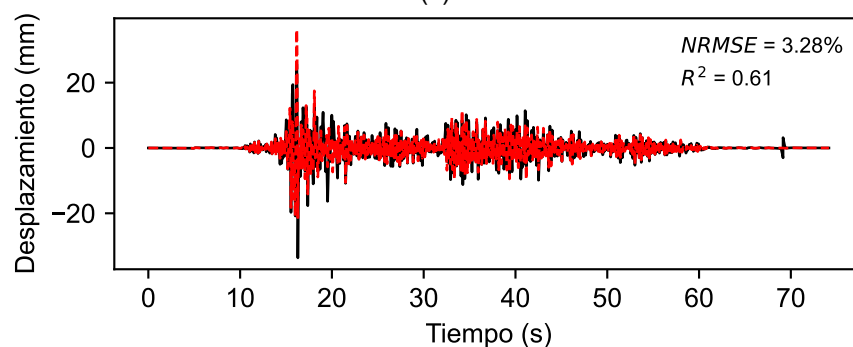
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.49: Desplazamiento relativo del centro de masa de los especímenes de prueba: (a) desplazamiento del espécimen E-1, (b) desplazamiento del espécimen E-2, (c) desplazamiento del espécimen E-3, (d) desplazamiento del espécimen E-4.

Contenidos de frecuencias de las aceleraciones en el centro de masa

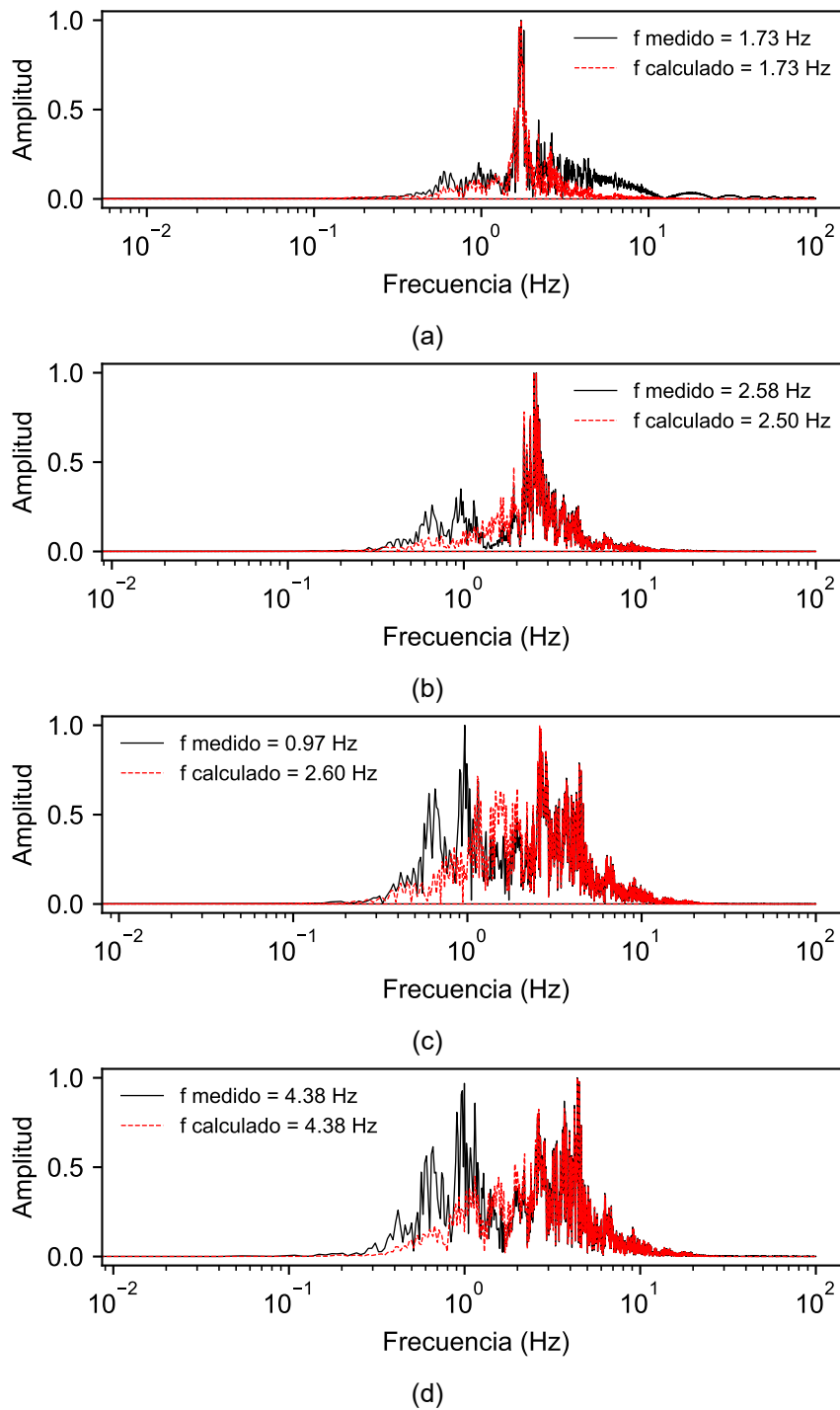
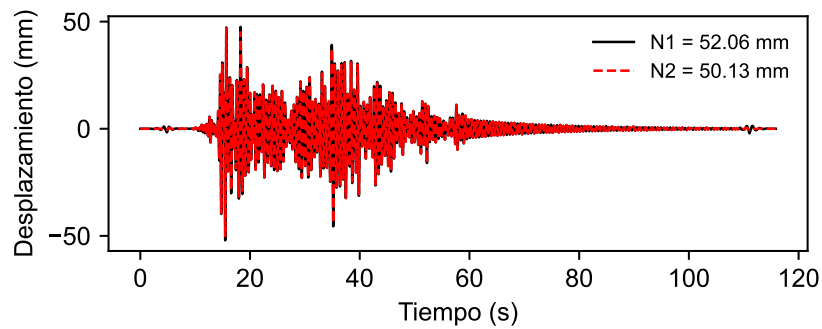
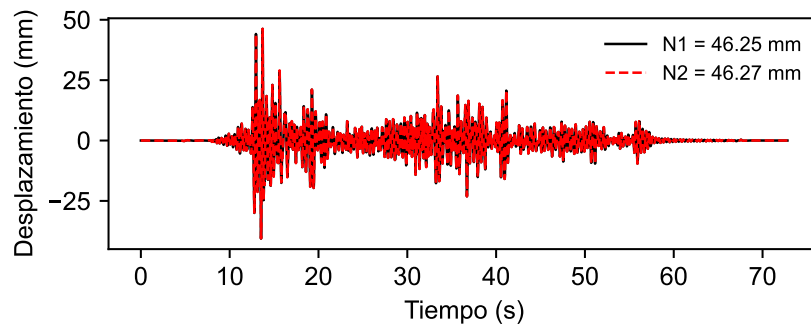


FIGURA B.50: Comparación del contenido de frecuencias del desplazamiento calculado y el desplazamiento medido en el centro de masa de los especímenes: (a) comparación del FFT para el espécimen E-1, (b) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-2, (c) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-3, (d) comparación del FFT para el desplazamiento del espécimen E-4.

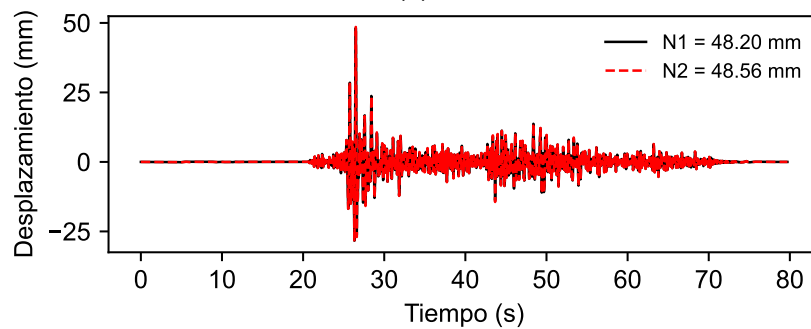
Desplazamientos relativos en las esquinas N1 y N2 de los especímenes



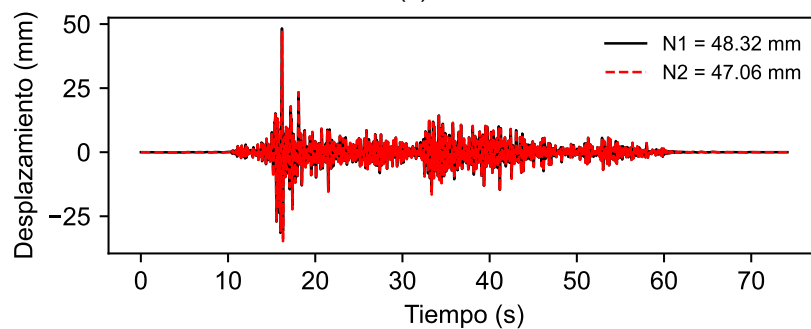
(a)



(b)



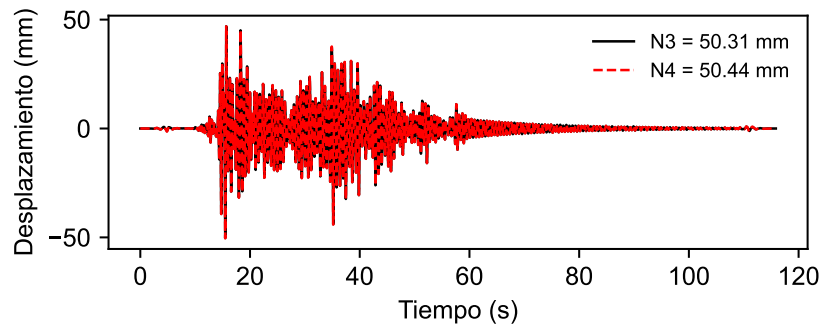
(c)



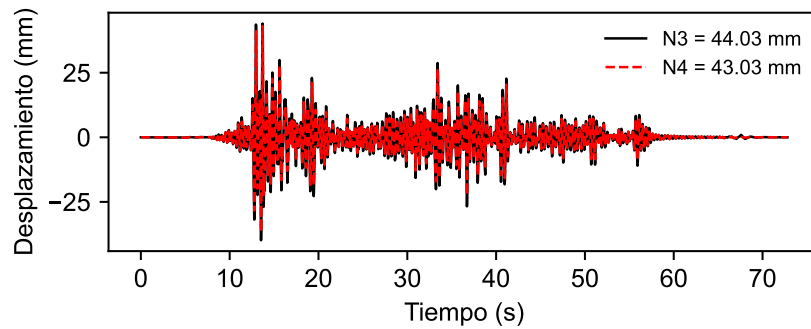
(d)

FIGURA B.51: Desplazamiento relativo del eje A de los especímenes de prueba: (a) desplazamiento del espécimen E-1, (b) desplazamiento del espécimen E-2, (c) desplazamiento del espécimen E-3, (d) desplazamiento del espécimen E-4.

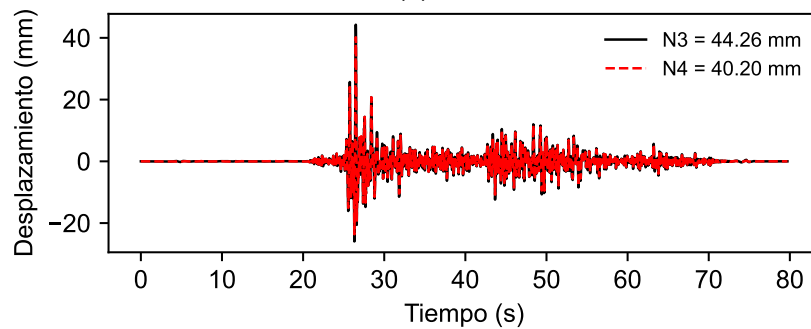
Desplazamientos relativos en las esquinas N3 y N4 de los especímenes



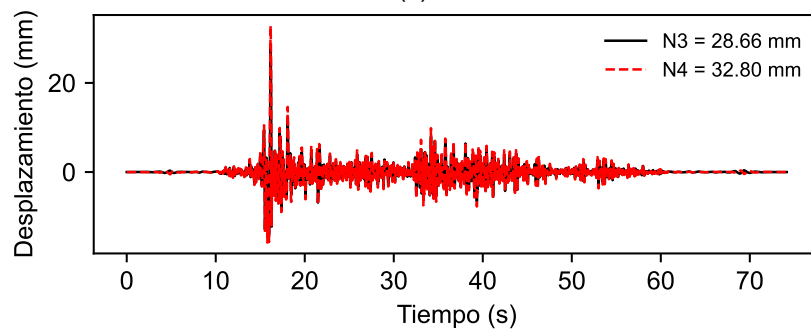
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA B.52: Desplazamiento relativo del eje B de los especímenes de prueba: (a) desplazamiento del espécimen E-1, (b) desplazamiento del espécimen E-2, (c) desplazamiento del espécimen E-3, (d) desplazamiento del espécimen E-4.