

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



UNA INSTITUCIÓN ADVENTISTA

Comparación de la respuesta estructural en un edificio de 20 niveles con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular mediante modelos físicos a escala reducida

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Por:

Noemi Roxana Ayhuasi Sarmiento

Jhoel Erick Añamuro Capquequi

Asesor:

Ing. Jose Pacori Pacori

Juliaca, agosto de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS

Ing. José Pacori Pacori, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: “COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL EN UN EDIFICIO DE 20 NIVELES CON AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA DE TIPO CONVENCIONAL Y PENDULAR MEDIANTE MODELOS FÍSICOS A ESCALA REDUCIDA” constituye la memoria que presentan el Bachilleres Noemi Roxana Ayhuasi Sarmiento y el Bachiller Jhoel Erick Añamuro Capquequi para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Civil, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los seis días del mes de agosto del año dos mil veinte.



Ing. José Pacori Pacori



085

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 06 día(s) del mes de agosto del año 2020 siendo las 15:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: MSc. Lemmin Henry Centurion Julca, el secretario: Mg. Efraín Velazquez Mamani y los demás miembros: Ing. Herson Dubuly Pari Busi e Ing. Jorge Planos Elcora y el asesor: Ing. Jose Paero Paero

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Comparación de la respuesta estructural en un edificio de 20 niveles con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular mediante módulos físicos a escala reducida de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Noemi Roxana Pyhuasi Sarmiento b) Jhoel Erick Anamuro Capquequi conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil (Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Noemi Roxana Pyhuasi Sarmiento

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy bueno</u>

Candidato (b): Jhoel Erick Anamuro Capquequi

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy bueno</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente

Asesor

Candidato/a (a)

Secretario

Miembro

Miembro

Candidato/a (b)

Dedicatoria

A Dios por todas las bendiciones.

*A mi familia que siempre
fueron apoyo incondicional,
y la motivación principal
para ver cumplida esta meta.*

Noemí Roxana Ayhuasi Sarmiento

Dedicatoria

*A Dios por darnos la vida y salud.
A mis padres Urbano y Margarita,
a mis hermanos Julio Cesar y Dan Fredy,
por su amor, apoyo incondicional y su fe puesta en mí.
Quienes fueron la motivación principal, para ver cumplida esta meta.*

Jhoel Erick Añamuro Capquequi

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios creador del universo, fuente de la sabiduría, razón de nuestra existencia. Por habernos dado unos grandes padres y hermanos(as), quienes nos enseñaron el camino del bien y saber diferenciar entre lo bueno y lo malo. Han sabido como aconsejarnos primeramente a la toma de la decisión de seguir esta carrera y a lo largo de nuestra vida profesional.

Agradecer al Ing. Octavio Quispe Yucra, por su apoyo y confianza, de la misma manera al Ing. Herson Duberli Pari Cusi quien con su conocimiento, orientación y precisas observaciones nos llevó a culminar con este proyecto, y demás docentes e Ingenieros que formaron parte de este proyecto, enseñándonos a ser grandes profesionales, responsables y dedicados.

A nuestros amigos que, nos apoyaron y nos dieron ánimos para llegar hasta este momento.

Noemi Roxana Ayhuasi Sarmiento

Jhoel Erick Añamuro Capquequi

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	17
1.1.Situación problemática	17
1.2.Formulación del problema.....	18
1.2.1. Problema general	18
1.2.2. Problemas específicos	18
1.3.Justificación de la Investigación.....	19
1.4.Objetivos de la investigación.....	20
1.4.1. Objetivo general.	20
1.4.2. Objetivos específicos.....	20
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	21
2.1.Introducción	21
2.2.Antecedentes de la investigación.....	22
2.2.1. Antecedentes internacionales	22
2.2.2. Antecedentes nacionales	23
2.2.3. Antecedentes locales	23
2.3.Dinámica estructural.....	24
2.3.1. Masa, rigidez y amortiguamiento	24
2.3.2. Modelamiento dinámico	25
2.3.3. Ecuación de equilibrio dinámico.....	25
2.3.3.1. Cálculo de la matriz de masas	27
2.3.3.2. Cálculo de la matriz de rigideces y la relación de rigideces.....	27
2.3.3.3. Cálculo de la matriz de amortiguamiento.....	28
2.3.4. Determinación de las frecuencias, periodos y modos de vibración naturales	
29	
2.3.5. Matriz modal	33
2.4.Sistemas de control estructural.....	33

2.4.1. Sistemas de control pasivo	34
2.5. Amortiguador de masa sintonizada (AMS)	37
2.5.1. Clasificación de amortiguadores de masas sintonizada AMS.....	40
2.5.2. Parámetros de diseño de un AMS	42
2.5.2.1. Amortiguador de masa sintonizada pendular	45
2.6. Acelerogramas.....	48
2.6.1. Tratamiento de acelerogramas	49
2.6.1.1. Corrección instrumental	49
2.6.1.2. Corrección de la línea base o corrección de ceros	50
2.6.1.3. Corrección por filtrado	50
2.7. Ingeniería sísmica y ensayo sísmico de estructuras	51
2.7.1. Simulación sísmica.....	52
2.7.2. Sistemas utilizados en la simulación sísmica	53
2.7.2.1. Ensayo en mesa vibratoria.....	54
2.8. Mesa vibratoria sísmica.....	54
2.8.1. Componentes básicos de una mesa vibratoria.....	55
2.9. Modelamiento experimental de estructuras	56
2.9.1. Análisis experimental de estructuras	56
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	58
3.1. Metodología y diseño de investigación	58
3.1.1. Metodología de la investigación.....	58
3.1.2. Alcance de la investigación	58
3.1.3. Diseño de investigación	59
3.2. Formulación de hipótesis	59
3.2.1. Hipótesis general.....	59
3.3. Operacionalización de variables	59
3.4. Diseño y construcción del modelo estructural a escala.....	60
3.4.1. Descripción del modelo estructural usado para las simulaciones.....	60
3.4.2. Determinación teórica de los parámetros modales de la estructura	61

3.4.2.1. Modelo basado en leyes físicas	62
3.5. Aplicación de amortiguadores de masa sintonizados	69
3.5.1. Condiciones óptimas de los AMS	69
3.5.1.1. Calculo de masa	70
3.5.1.2. Calculo de rigidez	70
3.5.1.3. Calculo de amortiguamiento.....	71
3.5.2. Diseño del amortiguador de masa sintonizada convencional	71
3.5.3. Diseño del amortiguador de masa sintonizado pendular	73
3.5.3.1. Calculo de la longitud de cuerda.....	74
3.6. Acelerograma	76
3.6.1. Tratamiento de acelerograma	78
3.7. Construcción de la mesa vibratoria.....	80
3.7.1. Sistema de control.....	81
3.7.2. Construcción mecánica	89
3.8. Diseño y ensamblaje del sistema de captura de datos	91
3.8.1. Hardware de captura de datos	92
3.8.2. Programación de captura y grafica de datos en MATLAB R2014b	93
3.9. Análisis experimental.....	98
3.9.1. Medición 1 - estructura sin AMS	98
3.9.2. Medición 2 – estructura con AMS convencional.....	99
3.9.3. Medición 3 – estructura con AMS pendular	100
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	101
4.1. Análisis del acelerograma	101
4.2. Medición 1 – estructura sin AMS	104
4.3. Medición 2 – estructura con AMS convencional.....	107
4.4. Medición 3 – estructura con AMS pendular	110
4.5. Análisis comparativo de la estructura sin AMS, con AMS convencional y con AMS pendular.....	113
4.6. Análisis comparativo de los resultados obtenidos de los sismos ensayados.....	118

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
5.1.Conclusiones	121
5.2.Recomendaciones.....	122
REFERENCIAS	124
ANEXOS.....	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Condiciones de Sintonización Óptima para Amortiguadores (AMS) Unidos a una Estructura Primaria no Amortiguada	45
Tabla 2 Operacionalización de variables	59
Tabla 3 Parámetros de diseño del modelo físico de la estructura a escala reducida (1/50).	60
Tabla 4 Frecuencias y periodos de vibración de la estructura	63
Tabla 5 Peso de Estructura	68
Tabla 6 Parámetros de diseño de la mesa vibratoria.	80
Tabla 7 Comparación de aceleraciones de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 09/11/1974.	114
Tabla 8 Comparación de desplazamientos de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 09/11/1974.	114
Tabla 9 Comparación de aceleraciones de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 05/01/1974.	115
Tabla 10 Comparación de desplazamientos de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 05/01/1974.	116
Tabla 11 Comparación de aceleraciones de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Ancash 31/05/1970.	117
Tabla 12 Comparación de desplazamientos de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Ancash 31/05/1970.	117
Tabla 13 Comparación de aceleraciones de los resultados obtenidos de los sismos ensayados.	118
Tabla 14 Comparación de desplazamientos de los resultados obtenidos de los sismos ensayados.	119

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Modelo con varios grados de libertad: (a) Pórtico, (b) Modelo dinámico	25
<i>Figura 2.</i> Idealización del pórtico con masas concentradas a nivel de los pisos y rigideces equivalentes por piso. Diagrama de cuerpo libre del sistema estructural planteado.....	26
<i>Figura 3.</i> Vibración libre de un sistema no amortiguado en su primer modo de vibración natural: (a) marco de dos niveles; (b) formas modificadas en los instantes de tiempo a , b , c , d y e ; (c) coordenadas modales $q_1(t)$; (d) historia del desplazamiento.	30
<i>Figura 4.</i> Vibración libre de un sistema no amortiguado en su segundo modo de vibración natural: (a) marco de dos niveles; (b) formas modificadas en los instantes de tiempo a , b , c , d y e ; (c) coordenadas modales $q_2(t)$; (d) historia del desplazamiento.	30
<i>Figura 5.</i> Sistemas de control estructural.	34
<i>Figura 6.</i> Sistema de control pasivo con disipadores de energía.	36
<i>Figura 7.</i> Sistema de control pasivo con aislamiento sísmico en la base.....	37
<i>Figura 8.</i> a) AMS en su concepción clásica, b) ALS basado en el empleo de tanques de agua.....	39
<i>Figura 9.</i> Efecto de un Amortiguador de Masa Sintonizada, (a) estructura sin AMS, (b) estructura con AMS.	40
<i>Figura 10.</i> Influencia del AMS en la respuesta de una estructura sometida a una fuerza sinusoidal.....	40
<i>Figura 11.</i> Influencia del AMS en la respuesta de una estructura sometida a una fuerza sinusoidal.....	41
<i>Figura 12.</i> (a) Sistema AMS convencional, (b) Sistema AMS tipo péndulo y (c) Sistema AMS múltiple.....	42
<i>Figura 13.</i> Amortiguador de Masa Sintonizado montado sobre el Sistema Principal.....	43
<i>Figura 14.</i> Un simple amortiguador de masa sintonizado pendular: a) Sistema actual, b) Sistema equivalente.	46
<i>Figura 15.</i> Péndulo compuesto.	47
<i>Figura 16.</i> Componentes principales de un acelerograma.....	48
<i>Figura 17.</i> Comportamiento de los filtros ideales paso-bajas, paso-altas y paso-banda. .	51
<i>Figura 18.</i> Esquema general de una mesa vibratoria.....	55
<i>Figura 19.</i> Componentes principales de una mesa vibratoria.	56
<i>Figura 20.</i> (a) Planta típica, (b) Elevación del nivel 1 al 20.	61
<i>Figura 21.</i> Modos de vibración (1-4) de la estructura de 20 niveles.	66
<i>Figura 22.</i> Modos de vibración (5-8) de la estructura de 20 niveles.	67
<i>Figura 23.</i> a) Estructura sin último nivel, b) Estructura con acoplamiento del último nivel.	68
<i>Figura 24.</i> Vista en plata, del AMS de tipo convencional.	72

<i>Figura 25.</i> Vista en elevación, del AMS de tipo convencional.....	72
<i>Figura 26.</i> a) Vista en planta, b) vista frontal, c) vista lateral, del AMS de tipo convencional.	73
<i>Figura 27.</i> Vista en plata, del AMS de tipo pendular.	74
<i>Figura 28.</i> Vista en elevación, del AMS de tipo pendular.....	75
<i>Figura 29.</i> a) Vista frontal, b) vista lateral, del AMS de tipo pendular.....	75
<i>Figura 30.</i> Lista de sismos entre los años 1951-1974.....	76
<i>Figura 31.</i> Acelerograma La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058).	77
<i>Figura 32.</i> Acelerograma Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).....	77
<i>Figura 33.</i> Acelerograma Huaraz (Ancash 1970 – Cod. 7039).	78
<i>Figura 34.</i> Ingreso de datos del acelerograma para su tratamiento.	78
<i>Figura 35.</i> Grafica de aceleración, velocidad y desplazamiento real.....	79
<i>Figura 36.</i> Corrección de Acelerograma.	79
<i>Figura 37.</i> Acelerograma corregido.....	80
<i>Figura 38.</i> Sistema de control en lazo abierto.	81
<i>Figura 39.</i> Componentes electrónicos usados para la programación.....	81
<i>Figura 40.</i> Código para la reproducción de sismos en el programador Arduino.	88
<i>Figura 41.</i> Estructura previa hecha con perfiles de aluminio.	89
<i>Figura 42.</i> Se realizan pruebas del funcionamiento del motor con la estructura previa, a través del controlador.....	89
<i>Figura 43.</i> Finalizado del montaje de la mesa.	90
<i>Figura 44.</i> Se realizan pruebas del funcionamiento entre el controlador y la mesa.....	90
<i>Figura 45.</i> Ensamblaje del controlador electrónico de la mesa vibratoria.	90
<i>Figura 46.</i> Controlador electrónico finalizado.	91
<i>Figura 47.</i> Mesa vibratoria finalizada.	91
<i>Figura 48.</i> (a) Acelerómetro en el primer nivel, (b) Acelerómetro en el último nivel.....	92
<i>Figura 49.</i> (a) Microprocesador Arduino Uno, (b) Placa diseñada para la instrucción y recolección de datos.....	92
<i>Figura 50.</i> Sistema de adquisición de datos.....	93
<i>Figura 51.</i> Programa “ACCELERATION GRAPH”.....	97
<i>Figura 52.</i> Medición 1 - estructura sin AMS.....	98
<i>Figura 53.</i> Medición 2 - estructura con AMS convencional.....	99
<i>Figura 54.</i> Medición 3 - estructura con AMS Pendular.....	100
<i>Figura 55.</i> Aceleración corregida La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058).....	101
<i>Figura 56.</i> Desplazamiento corregido La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058).....	102
<i>Figura 57.</i> Aceleración corregida Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).	102
<i>Figura 58.</i> Desplazamiento corregido Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).....	103

<i>Figura 59.</i> Aceleración corregida Huaraz (Ancash 1970 – Cod. 7046).	103
<i>Figura 60.</i> Desplazamiento corregido Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).....	104
<i>Figura 61.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 1, sismo Lima 09/11/1974.....	104
<i>Figura 62.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 1, sismo Lima 09/11/1974..	105
<i>Figura 63.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 1, sismo Lima 05/01/1974.....	105
<i>Figura 64.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 1, sismo Lima 05/01/1974..	106
<i>Figura 65.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 1, sismo Ancash 31/05/1970. ...	106
<i>Figura 66.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 1, sismo Ancash 31/05/1970.	107
<i>Figura 67.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Lima 09/11/1974.....	107
<i>Figura 68.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Lima 09/11/1974..	108
<i>Figura 69.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Lima 05/01/1974.....	108
<i>Figura 70.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Lima 05/01/1974..	109
<i>Figura 71.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970. ...	109
<i>Figura 72.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970.	110
<i>Figura 73.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 3, sismo Lima 09/11/1974.....	110
<i>Figura 74.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 3, sismo Lima 09/11/1974..	111
<i>Figura 75.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Lima 05/01/1974.....	111
<i>Figura 76.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Lima 05/01/1974..	112
<i>Figura 77.</i> Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970. ...	112
<i>Figura 78.</i> Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970.	113
<i>Figura 79.</i> Comparación de las aceleraciones en el nivel 20 - sismo Lima 09/11/1974..	113
<i>Figura 80.</i> Comparación de desplazamientos en el nivel 20 - sismo Lima 09/11/1974. .	114
<i>Figura 81.</i> Comparación de las aceleraciones en el nivel 20 - sismo Lima 05/01/1974..	115
<i>Figura 82.</i> Comparación de desplazamientos en el nivel 20 - sismo Lima 05/01/1974. .	115
<i>Figura 83.</i> Comparación de las aceleraciones en el nivel 20 - sismo Ancash 31/05/1970.	116
<i>Figura 84.</i> Comparación de desplazamientos en el nivel 20 - sismo Ancash 31/05/1970.	116
<i>Figura 85.</i> Comparación de aceleraciones máximas obtenidas de los sismos ensayados.	119
<i>Figura 86.</i> Comparación de desplazamientos máximos obtenidas de los sismos ensayados.	119

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo estudiar el funcionamiento de un sistema de control estructural del tipo pasivo dentro de los cuales se encuentran los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) de tipo convencional y pendular, que al ser implementado a una estructura esta permite modificar las características dinámicas con el objetivo de reducir en ella la respuesta dinámica, debiendo responder de manera favorable ante una posible falla. De manera que, al acoplar los amortiguadores de masa sintonizados en un edificio simétrico, este disipa la energía que ingresa a la estructura producto de un sismo.

En esta investigación se analizó la respuesta sísmica de un modelo a escala de un edificio de 20 niveles, constituido por columnas y losas de madera balsa, mediante la incorporación de amortiguadores de masa sintonizados.

El modelo de AMS de tipo convencional consiste en un tubo de acero rectangular, sobre ruedas sujeta a resortes, del mismo modo el tipo pendular consiste en una bola de acero suspendida de una cuerda y sujeta a resortes; que le incorporan, masa, rigidez y amortiguamiento a la estructura con el fin de reducir los desplazamientos máximos de la estructura producidos por un sismo. Los sismos serán reproducidos por una mesa vibratoria de un solo grado de libertad.

El acoplamiento de los AMS tuvo resultados satisfactorios de acuerdo a su comportamiento en ambos casos, reduciendo los desplazamientos en comparación al modelo sin AMS.

Palabras clave: Amortiguadores de masa sintonizada, respuesta dinámica, reducción de desplazamientos, pruebas experimentales, sismorresistente.

ABSTRACT

This research aims to study the operation of a passive type structural control system within which are tuned mass dampers (TMD) of the conventional and pendulum type, which, when implemented to a structure, allows the dynamic characteristics to be modified, with the aim of reducing the dynamic response, and must respond favorably to a possible failure. So, by coupling the tuned mass dampers in a symmetrical building, it dissipates the energy that enters the structure as a result of an earthquake.

This research analyzed the seismic response of a scale model of a 20-level building, consisting of columns and balsa wood slabs, by incorporating tuned mass dampers

The conventional type TMD model consists of a rectangular steel tube, on wheels attached to springs, in the same way the pendulum type consists of a steel ball suspended from a rope and attached to springs; that incorporate, mass, rigidity and damping to the structure in order to reduce the maximum displacements of the structure produced by an earthquake. The earthquakes will be reproduced by a vibrating table with a single degree of freedom.

The coupling of the TMD had satisfactory results according to their behavior in both cases, reducing displacements compared to the model without TMD.

Key words: Tuned mass dampers, dynamic response, reduction of displacements, experimental tests, resistant earthquake.

CAPÍTULO I.

EL PROBLEMA

Situación problemática

Ante el acelerado crecimiento de la ciudad Juliaca, en un periodo de 10 años se presume que se construirán edificios de 20 niveles a más, los cuales se encontrarán vulnerables ante los efectos producidos por los sismos y vientos.

Según la Norma E.030 Diseño Sismorresistente, divide el territorio nacional en 4 zonas, lo que ubica a la ciudad de Juliaca en la Zona 3 con un factor de 0.35, este factor se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. Por otro lado, según el Mapa Eólico del Perú, Juliaca tiene vientos de 120 a 130 km/hora a 10 metros sobre el suelo con un periodo de ocurrencia de 50 años, lo que hace que sea denominada también como la Ciudad de los Vientos, teniéndose en la mayor parte del año presencia de vientos.

Estos acontecimientos ocurren en todo el mundo y viendo la necesidad de ir mejorando el comportamiento de edificaciones esenciales y de gran altura, se crean los sistemas de control estructural que, para el desarrollo de la presente investigación se estudiará el del tipo pasivo.

El sistema de control pasivo se ramifica en tres tipos los disipadores de energía, el aislamiento de base y por último el TMD o "Tuned Mass Dampers" o Amortiguadores de Masa Sintonizados, que viene hacer una masa adicional situada de preferencia en el último nivel del edificio, la cual crea una fuerza en sentido contrario a la fuerza lateral del sismo, reduciendo las oscilaciones de la estructura y absorbiendo la energía cinética de ingreso.

Lo que lleva considerar los Amortiguadores de Masa Sintonizada (Tuned Mass Dampers (TMD)), como un sistema eficiente para la reducción de los efectos producidos por los sismos y vientos. Surgiendo la necesidad de estudiar la eficiencia de sintonización de un amortiguador de masa sintonizada del tipo convencional y pendular, usando un

modelo físico a escala reducida que será sometidos a aceleraciones sísmicas en la base, generados por una mesa vibratoria.

Las mesas vibratorias existen desde hace décadas, actualmente en el Perú son pocas las Universidades que cuentan con este tipo de equipos, siendo la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca una de las muchas universidades que carece de este equipo. Por lo que es necesario construir una mesa vibratoria, que nos permita generar y simular movimientos sísmicos, lo cual nos proporciona un recurso para analizar, evaluar y mejorar las características de un sistema estructural frente a un sismo real.

El investigador Ray Paul Cotacallapa Turpo de la Universidad Nacional de San Agustín – Perú, 2018, en su tesis “Análisis de un edificio asimétrico de 10 niveles de concreto armado con amortiguadores de masa sintonizada”, en una de sus conclusiones indica que, “La eficiencia de los TMD en edificios de mediana altura como la presente tesis, no son muy eficientes frente a sismos, queda aún evaluar su eficiencia en edificios de gran altura para sismos, ya que son bastante eficientes para efectos de viento según la literatura”.

Formulación del problema

1.1.1. Problema general

En consecuencia, en el presente proyecto de investigación se busca responder a la siguiente interrogante: ¿Cuál es la respuesta estructural de un edificio de 20 niveles en modelos físicos a escala con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular, frente a aceleraciones sísmicas producidas en la base?

1.1.2. Problemas específicos

¿Qué modelo físico a escala se va utilizar para el análisis dinámico?

¿Cuán eficiente son los amortiguadores de masa sintonizada, como un sistema de control pasivo de vibraciones?

¿Cómo se construye una mesa vibratoria sísmica con un grado de libertad para el análisis dinámico de sistemas estructurales a escala, enlazando todos los componentes de una mesa vibratoria con un ordenador, para obtener un sistema automatizado?

Justificación de la Investigación

Se sabe que los sistemas estructurales (edificios, torres, puentes, etc.), son especialmente vulnerables ante los efectos de los sismos y vientos, lo que viene siendo una de las causas principales del colapso de estos. Por este motivo es que cuando se diseña una estructura que se situará en una zona de mediana o alta sismicidad, se busca evitar o al menos minimizar esta situación indeseable.

Ante esta situación surge una alternativa muy interesante y eficaz, que es la reducción de vibraciones que ingresan a la estructura a través de amortiguadores de masa sintonizados que pueden ser incorporados sin mayores inconvenientes a estructuras ya construidas y se transforma así en una de las formas más eficaces y de bajo costo para el mejoramiento de la seguridad de estructuras existentes.

Sin embargo, el interés principal en la presente investigación está en comparar la respuesta estructural de un modelo a escala con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular. Esto se justifica al observarse una tendencia creciente a diseñar edificios elevados, en los que los problemas relacionados con aceleraciones de piso y desplazamientos excesivos serán más frecuentes.

La necesidad de tener un mejor entendimiento teórico-práctico de lo que sucede al producirse un evento sísmico, asimismo el gran interés de investigar los efectos sísmicos producidos a distintas magnitudes, y debido al apogeo en la que se encuentra actualmente la ingeniería sísmica dentro de la ingeniería civil, hacen que el ensayo y análisis de estructuras a pequeña escala sobre mesas vibratorias sean una de las mejores opciones para comprender esta clase de estudios ya que mediante este tipo de tecnologías se ha

analizado y evaluado de la mejor manera el comportamiento sísmico de los sistemas estructurales, tanto de concreto armado, acero, mampostería, madera, etc.

Con todo lo expuesto y mencionado anteriormente se justifica el desarrollo de la presente tesis denominada “**Comparación de la respuesta estructural en un edificio de 20 niveles con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular mediante modelos físicos a escala reducida**”, desarrollado en la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca.

Objetivos de la investigación

1.1.3. Objetivo general.

Comparar la respuesta estructural en un edificio de 20 niveles con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular mediante modelos físicos a escala reducida, sometida a aceleraciones sísmicas en la base producida por una mesa vibratoria.

1.1.4. Objetivos específicos.

- Utilizar un modelo físico a escala reducida de un edificio de 20 niveles.
- Comprobar la eficiencia de los amortiguadores de masa sintonizada, como un sistema de control pasivo de vibraciones.
- Construir una mesa vibratoria sísmica con un grado de libertad para el análisis dinámico de sistemas estructurales a escala, enlazando todos los componentes de una mesa vibratoria con un ordenador, para obtener un sistema automatizado.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

Introducción

La realidad geográfica peruana exige el desarrollo de tecnologías antisísmicas con novedosos avances complementarios al diseño sismorresistente convencional para estructuras civiles de alta prioridad social. Siendo unas de estas tecnologías los amortiguadores de masa sintonizado (AMS), utilizado cada vez más debido a su simplicidad y eficacia. El principio en el cual este dispositivo se basa es la transferencia y disipación de energía cinética de la estructura al AMS (Yefi, 2011).

Los Amortiguadores de Masa Sintonizada (AMS), al ser implementados en una estructura modifican las propiedades dinámicas de la estructura, con la finalidad de lograr una reducción en la demanda dinámica de la estructura primaria, que le permite responder favorablemente ante la posibilidad de falla.

Según la teoría de control, un sistema AMS puede ser visto como un actuador pasivo, que por lo general consiste en una masa, un resorte y un amortiguador viscoso unido a una estructura principal, donde las fuerzas encargadas de compensar el movimiento estructural son generadas por el propio dispositivo según su sintonización. En los distintos métodos de diseño de controladores, es necesario contar con un modelo matemático que describa adecuadamente la dinámica del sistema estructural. Para este fin, se emplea el método de masas concentradas que nos permiten conocer la estimación de los parámetros modales y posterior construcción de un modelo dinámico.

Obtenido el modelo identificado, se procede con el diseño y sintonización del AMS. La frecuencia del amortiguador se ajusta a una frecuencia estructural particular de modo que cuando es excitado a esa frecuencia, el amortiguador resonará fuera de fase con el

movimiento estructural y la energía se disipa por la fuerza de inercia que actúa sobre el amortiguador de la estructura. Los parámetros de diseño del AMS que se deben hallar para lograr la máxima eficiencia del mismo, son la relación de frecuencia (frecuencia del amortiguador/frecuencia de la estructura), la relación de amortiguamiento y la relación de masa (masa AMS/masa de la estructura). Los AMS sólo pueden ser sintonizados a una sola frecuencia estructural (Ambrosini et al., 2004).

Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales.

- Universidad Industrial de Santander, “Análisis y diseño experimental de un sistema estructural con amortiguadores de masa sintonizada (AMS) bajo carga armónica”, “... La mayor eficiencia obtenida en la reducción de la respuesta dinámica para las condiciones de análisis se obtuvieron para la relación de masa μ del 13,89% que corresponde a una masa de 4 kg y 15 cm como longitud de los tensores del péndulo, logrando reducciones en las aceleraciones del orden de 72% y hasta del 87% en desplazamientos en el segundo piso para el primer modo de vibración” (Núñez & Tortello, 2015).
- Universidad Austral de Chile, “Diseño y construcción de una mesa vibratoria unidireccional portable, para ensayos de modelos a escala de estructuras, para distintas condiciones de frecuencia y amplitud de la sollicitación”, “... Las mesas vibratorias emulan, entre otros, el movimiento del suelo durante un evento sísmico. Esto nos permite someter estructuras a diversos movimientos con el motivo de estudiar su comportamiento frente a las sollicitaciones que se generan en la estructura. Estas, han facilitado avances significativos en el estudio de esta materia, al permitir realizar ensayos de estructuras ante estas excitaciones” (Oyarce, 2015).

2.1.2. Antecedentes nacionales.

- Universidad Nacional de San Agustín, “Análisis de un edificio asimétrico de 10 niveles de concreto armado con amortiguadores de masa sintonizada”, “...Al incorporar los amortiguadores de masa sintonizada en una estructura de mediana o gran altura, se modifica su respuesta dinámica, se logran menores derivas de entrepiso, menores esfuerzos en la estructura, se logran estructuras más seguras y el costo de los amortiguadores de masa son económicos, las limitaciones son que no es recomendable usarlas en estructuras de baja altura” (Cotacallapa, 2017).
- Universidad Nacional de Ingeniería, “Mejora de la respuesta dinámica de edificaciones usando amortiguadores de masa sintonizada”, “... Los amortiguadores de masa sintonizada son dispositivos diseñados de modo que su frecuencia natural de vibración sea similar a la frecuencia fundamental de la estructura principal, o coincida con la frecuencia de la excitación cuyos efectos se requiere minimizar. En condiciones óptimas, los AMS pueden absorber gran parte de la energía introducida al sistema por las fuerzas externas o la aceleración en la base, reduciéndose la amplitud de las vibraciones y el posible daño de los elementos frente a acciones muy severas” (Inga, 2015).

2.1.3. Antecedentes locales.

- Universidad Nacional del Altiplano Puno – Perú, “Análisis del comportamiento dinámico en estructuras a escala reducida empleando mesa vibratoria diseñada y fabricada en la UNA Puno”, “En la presente tesis se compararan las diferencias en los resultados de desplazamientos, entre el uso de software estructural y mesa vibratoria, para analizar el comportamiento dinámico de un modelo estructural a escala reducida” (Aruhuanca, 2016).

Dinámica estructural

La dinámica, percibida desde el punto de vista de la mecánica, es el estudio de los cuerpos o conjuntos de partículas en movimiento. El campo general de la dinámica se divide en dos grandes áreas: las cinemáticas y la cinética. La cinemática se ocupa exclusivamente del movimiento, es decir, de relacionar el desplazamiento, la velocidad o la aceleración con el tiempo, y de la geometría de los movimientos, sin tomar en consideración las causas del movimiento. Mientras que la cinética estudia la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, la masa del cuerpo y su movimiento, permitiendo predecir los movimientos que causan las fuerzas, o determinar las fuerzas necesarias para producir un movimiento dado. Esta investigación centra su análisis en el campo de la dinámica cinética específicamente lo que compete a la dinámica estructural (Maldonado & Chio, 2004).

Un análisis dinámico se diferencia de un análisis estático en que la respuesta estructural, como las cargas, varían con el tiempo, es decir, existe una solución diferente para cada instante de tiempo; mientras que la solución de un problema estático presenta una única solución independientemente del tiempo (Maldonado & Chio, 2004).

2.1.4. Masa, rigidez y amortiguamiento.

El análisis para determinar los efectos dinámicos sobre las edificaciones requiere tener en cuenta las propiedades dinámicas fundamentales de las edificaciones. Estas propiedades son determinadas por las dimensiones, el peso, la rigidez relativa, el periodo fundamental, el tipo de apoyo y el grado de elasticidad de los materiales de la estructura, y por diversas influencias amortiguadoras que están presentes; y pueden ser representados convenientemente por el modelo matemático mostrado en la figura 1, que tiene un elemento de masa m que representa la propiedad de masa o inercia de la estructura, un elemento k , que representa las fuerzas internas del sistema y la capacidad de la estructura e almacenar energía potencial (Rigidez), un elemento de amortiguación c

que equivale a las características friccionales y a la pérdida de energía de la estructura, y la fuerza de excitación $\mathbf{a(t)}$ que corresponde a las fuerzas externas que actúan sobre el sistema estructural en función del tiempo.

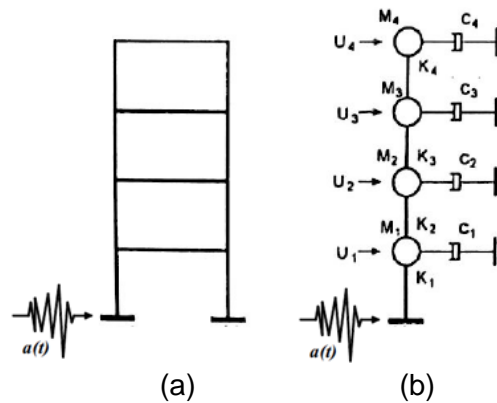


Figura 1. Modelo con varios grados de libertad: (a) Pórtico, (b) Modelo dinámico
Fuente: (Maldonado & Chio, 2004)

2.1.5. Modelamiento dinámico.

En el análisis dinámico de una estructura existe un aspecto de gran importancia y es la definición del modelo estructural que mejor represente el comportamiento real de la estructura. Definir un modelo exacto sería complejo y en la mayoría de los casos su exactitud se perdería, tanto por la complejidad de los modelos matemáticos que se utiliza en el análisis como por los errores generados durante el proceso de cálculo. Luego definir un modelo dinámico simplificado implica discretizar la estructura de tal manera que permita una formulación adecuada del modelo matemático y, posteriormente, permita el cálculo de la respuesta (Maldonado & Chio, 2004).

En el modelamiento dinámico de estructuras pueden utilizarse los siguientes métodos de discretización: método de las masas concentradas, método de los desplazamientos generalizados y método de los elementos finitos.

2.1.6. Ecuación de equilibrio dinámico.

En el caso de estructuras de edificación el análisis dinámico puede simplificarse considerando un modelo de masas concentradas, sin que ello resulte en una pérdida de

precisión significativa. La masa total del sistema se concentra sobre algunos elementos del mismo (fácilmente identificables) y la capacidad de deformación sobre otros.

Una estructura puede modelarse como un sistema de uno o varios grados de libertad, dependiendo de los grados de libertad que requiere para la descripción de su respuesta ante la acción dinámica. Los sistemas de múltiples grados de libertad son necesarios cuando la estructura no puede asumir, durante su movimiento, una forma única de desplazamientos.

Considerando el sistema de varios grados de libertad mostrado en la figura 2, cuyos apoyos tiene una fuerza de excitación $\mathbf{a}(t)$ y cuyas masas $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_n$ tienen desplazamientos $\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t), \dots, \mathbf{x}_n(t)$, respectivamente, unos elementos $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_n$ que representa las fuerzas internas del sistema (Rigidez), unos elementos de amortiguamiento $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_n$, que equivale a las características friccionales, y la fuerza de excitación $\mathbf{a}(t)$ que corresponde a las fuerzas externas.

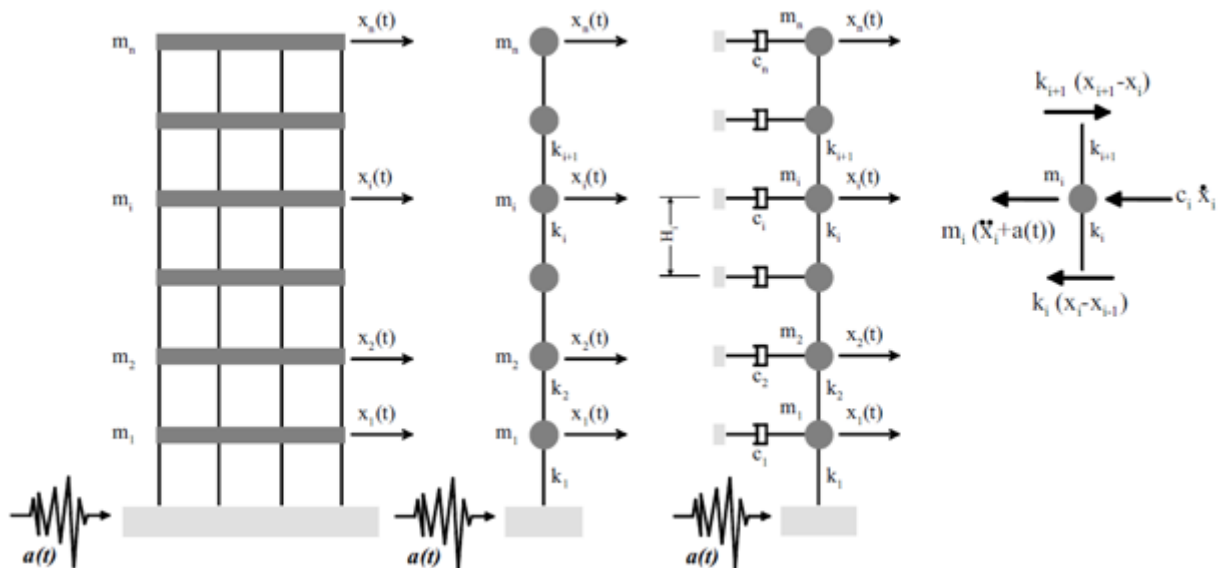


Figura 2. Idealización del pórtico con masas concentradas a nivel de los pisos y rigideces equivalentes por piso. Diagrama de cuerpo libre del sistema estructural planteado.

Fuente: (López & Méndez, 2018)

Planteando el equilibrio dinámico para cada uno de las masas \mathbf{m}_i (Figura 2), se obtiene:

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + (k_i + k_{i+1})x_i - k_{i+1}x_{i+1} - k_i x_{i-1} = -m_i a(t) \quad (1)$$

O, en forma matricial para todo el sistema:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -MJ a(t) \quad (2)$$

Donde **J** es un vector columna con todos sus elementos iguales a la unidad, **M** es la matriz de masa (diagonal), **K** es la matriz de rigidez, **C** es la matriz de amortiguamiento (diagonal), x, \dot{x}, \ddot{x} son vectores conteniendo, respectivamente los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada planta; y $a(t)$ es el acelerograma que define la acción sísmica en la base de la estructura.

2.1.6.1. Cálculo de la matriz de masas.

$$M = \begin{Bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_i & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & m_n \end{Bmatrix} \left(\frac{s^2}{cm} \text{kgf} \right) \quad (3)$$

Donde:

M : Masa de la estructura

m_1 : Masa del primer piso

m_n : Masa del último piso

2.1.6.2. Cálculo de la matriz de rigideces y la relación de rigideces.

$$K = \begin{Bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & & & \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 & & \\ & & \ddots & & \\ & & & -k_i & (k_i + k_{i+1}) & -k_{i+1} \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & k_n \end{Bmatrix} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}} \right) \quad (4)$$

Donde:

K : Rigidez de la estructura

k_1 : Rigidez del primer piso

k_n : Rigidez del último piso

El cálculo de la rigidez de entre piso se calcula como la sumatoria de las rigideces que aporta cada columna; cada una columna tiene una rigidez:

$$K = \frac{12EI_c}{h^3} \quad (5)$$

Donde:

K : Rigidez de cada columna

E : Modulo de elasticidad

h : Altura de piso

I_c : Momento de inercia de cada columna

El valor de I_c se calcula con la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{a \times b^3}{12} \quad (6)$$

Donde:

a: Lado de la sección de columna perpendicular al sismo

b: Lado de la sección de columna paralelo al sismo

2.1.6.3. Cálculo de la matriz de amortiguamiento.

$$C = \left\{ \begin{array}{cccc} c_1 & & & \\ & c_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & c_i & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & c_n \end{array} \right\} \left(\frac{kgf}{cm} \right) \quad (7)$$

Donde:

C : Amortiguamiento de la estructura

c_1 : Amortiguamiento del primer piso

c_n : Amortiguamiento del último piso

En general no es necesario calcular C ya que el efecto del amortiguamiento se toma en cuenta en los espectros de diseño.

Sin embargo, la determinación de la matriz de amortiguamiento en esta forma no resulta práctica porque a diferencia del módulo de elasticidad, que entra en el cálculo de la rigidez, las propiedades de amortiguamiento de los materiales no están bien establecidas. Lo ideal sería disponer de datos sobre el amortiguamiento determinados a partir de

movimientos sísmicos registrados en muchas estructuras de diversos tipos (edificios, puentes, presas, etcétera) que utilicen diferentes materiales (acero, concreto reforzado, concreto preesforzado, mampostería, madera, etcétera) (Chopra, 2014).

2.1.7. Determinación de las frecuencias, periodos y modos de vibración naturales.

Las características dinámicas intrínsecas de una estructura de n grados de libertad se obtienen considerando sus vibraciones libres no amortiguadas. En este caso está regida por la ecuación (2) con $-M\ddot{J}_a(t)=0$, que en los sistemas sin amortiguamiento es:

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (8)$$

Como se muestra en las figuras 3 y 4, existen dos formas características modificadas para este sistema de dos grados de libertad, de manera que, si se desplaza en una de estas formas y se libera, vibrará en un movimiento armónico simple, manteniendo la forma inicial modificada. Los dos niveles vibran en la misma fase, es decir, pasan a través de sus posiciones máxima, mínima o de equilibrio en el mismo instante de tiempo. Cada forma modificada característica se denomina **modo natural de vibración** del sistema de VGDL. Observe que los desplazamientos de ambos niveles tienen la misma dirección en el primer modo, pero direcciones opuestas en el segundo. El punto de desplazamiento cero, llamado **nodo**, no se mueve en absoluto (figura 4); a medida que el número de modo n aumenta, el número de nodos se incrementa en consecuencia (Chopra, 2014).

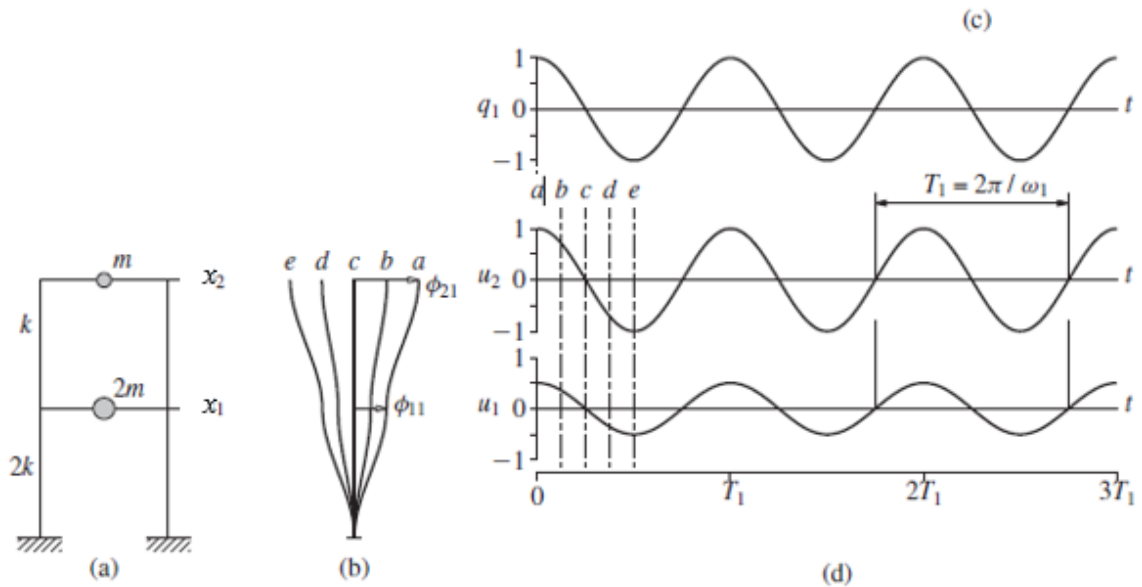


Figura 3. Vibración libre de un sistema no amortiguado en su primer modo de vibración natural: (a) marco de dos niveles; (b) formas modificadas en los instantes de tiempo a, b, c, d y e; (c) coordenadas modales $q_1(t)$; (d) historia del desplazamiento.

Fuente: (Chopra, 2014)

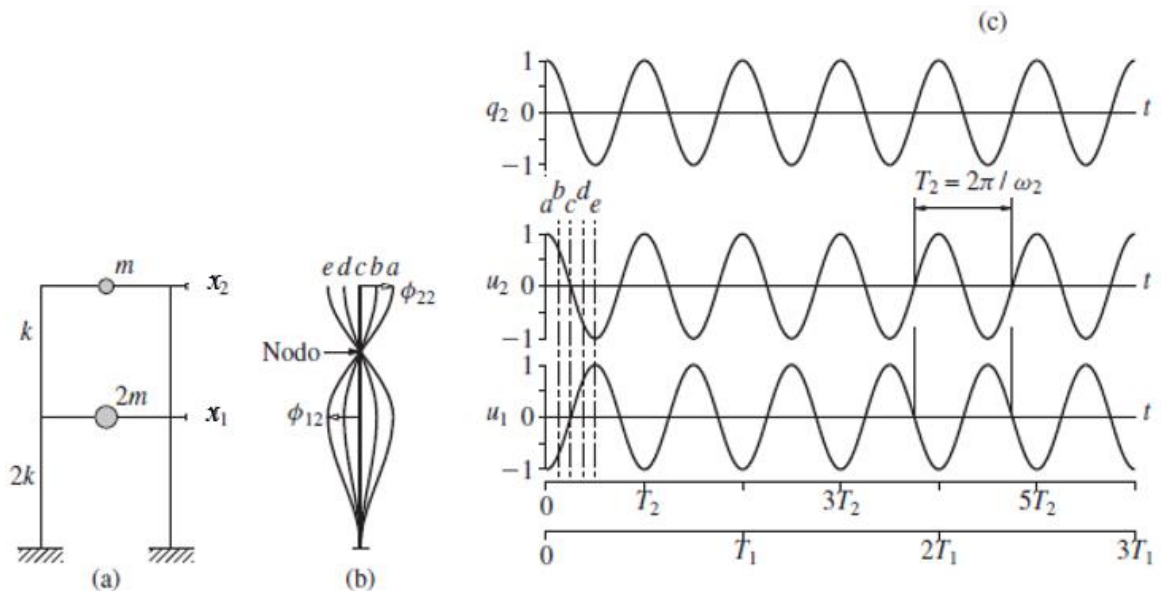


Figura 4. Vibración libre de un sistema no amortiguado en su segundo modo de vibración natural: (a) marco de dos niveles; (b) formas modificadas en los instantes de tiempo a, b, c, d y e; (c) coordenadas modales $q_2(t)$; (d) historia del desplazamiento.

Fuente: (Chopra, 2014)

Un periodo de vibración natural T_n de un sistema de VGDL es el tiempo requerido para un ciclo del movimiento armónico simple en uno de esos modos naturales. La correspondiente frecuencia circular natural de vibración es ω_n y la frecuencia cíclica natural de vibración es f_n , donde:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \text{o} \quad T_n = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (9)$$

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (10)$$

En las figuras 3 y 4 se muestra gráficamente la vibración libre de un sistema no amortiguado en una de sus modalidades de vibración natural; para un sistema de dos grados de libertad ésta puede describirse en forma matemática como

$$x(t) = q_n(t)\phi_n \quad (11)$$

donde la forma modificada ϕ_n no varía con el tiempo. La variación de los desplazamientos se describe mediante la función armónica simple

$$q_n(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \text{sen} \omega_n t \quad (12)$$

donde A_n y B_n son constantes que pueden determinarse a partir de las condiciones iniciales

que inician el movimiento. Si se combinan las ecuaciones (11) y (12), resulta

$$x(t) = \phi_n (A_n \cos \omega_n t + B_n \text{sen} \omega_n t) \quad (13)$$

donde ω_n y ϕ_n son incógnitas.

Al sustituir esta forma de $x(t)$ en la ecuación (8) se obtiene

$$\left[-\omega_n^2 M \phi_n + K \phi_n \right] q_n(t) = 0 \quad (14)$$

Esta ecuación puede satisfacerse de dos maneras. Ya sea que $q_n(t) = 0$, lo que implica que $x(t) = 0$ y que el sistema no tiene movimiento (ésta es la solución conocida como trivial), o que las frecuencias ω_n y los modos ϕ_n naturales satisfagan la siguiente ecuación algebraica:

$$K \phi_n = \omega_n^2 M \phi_n \quad (15)$$

La cual proporciona una condición útil. Esta ecuación algebraica se denomina **problema matricial de valor característico o eigenvalor**. Las matrices de rigidez K y

masa \mathbf{M} son conocidas, por lo que el problema consiste en determinar el escalar ω_n^2 y el vector ϕ_n .

Para indicar la solución formal de la ecuación (15) se reescribe como

$$[\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M}] \phi_n = 0 \quad (16)$$

que puede interpretarse como un conjunto de N ecuaciones algebraicas homogéneas para los N elementos ϕ_{jn} ($j = 1, 2, \dots, N$). Este conjunto siempre tiene la solución trivial $\phi_n = 0$, que no es útil porque implica que no existe movimiento. Se tienen soluciones no triviales si

$$\det[\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M}] = 0 \quad (17)$$

Al expandir el determinante se obtiene un polinomio de orden N en ω_n^2 . La ecuación (17) se conoce como **ecuación de frecuencia**. Esta ecuación tiene N raíces reales y positivas para ω_n^2 porque \mathbf{M} y \mathbf{K} , las matrices de masa y rigidez estructurales, son simétricas y positivas definidas.

La N raíces, ω_n^2 , de la ecuación (17) determinan las N frecuencias naturales de vibración ω_n ($n = 1, 2, \dots, N$), dispuestas por convención en secuencia de menor a mayor ($\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_N$). Estas raíces de la ecuación característica se conocen también como *valores propios*, *valores característicos* o *valores normales*. Cuando una frecuencia natural ω_n es conocida, la ecuación (16) puede resolverse para el correspondiente vector ϕ_n . El problema de valor característico no fija la amplitud absoluta de los vectores ϕ_n , sino sólo la forma del vector dada por los valores relativos de los N desplazamientos ϕ_{jn} ($j = 1, 2, \dots, N$). En correspondencia a las N frecuencias de vibración natural ω_n de un sistema de VGDL, existen N vectores independientes ϕ_n , que son conocidos como los **modos naturales de vibración**, o **las formas naturales de los modos de vibración**. Estos

vectores también se denominan *vectores propios*, *vectores característicos* o *modos normales*. El término natural se utiliza para calificar cada una de estas propiedades de vibración, a fin de enfatizar el hecho de que éstas son propiedades naturales de la estructura en vibración libre, y que sólo dependen de sus propiedades de masa y rigidez. El subíndice n indica el número del modo, y el primer modo ($n = 1$) también se conoce como el modo fundamental (Chopra, 2014).

2.1.8. Matriz modal.

Los N valores propios y los N modos naturales pueden ensamblarse de manera compacta en matrices. Si el modo natural ϕ_n correspondiente a la frecuencia natural ω_n tiene los elementos ϕ_{jn} , donde j indica los grados de libertad, entonces los N vectores propios pueden mostrarse en una sola matriz cuadrada, en la que cada una de sus columnas es un modo natural:

$$\Phi = [\phi_{jn}] = \begin{Bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1N} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \phi_{N2} & \cdots & \phi_{NN} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

La matriz Φ se llama la **matriz modal** para el problema de valor característico, ecuación (15) (Chopra, 2014).

Sistemas de control estructural

El control estructural ante acciones sísmicas está planteado como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, basado en la ductilidad y el hiperestatismo estructural. Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de los desplazamientos de una estructura haciendo uso de alguno o varios de los siguientes factores: a) La modificación de las propiedades dinámicas del edificio, de forma que este reduzca su “input” energético o evite actitudes resonantes, b) La disipación de energía

introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos. c) El control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica (Cahis, 2000).

Los Sistemas de Control de Respuesta Sísmica se clasifican dependiendo de los factores que utilicen. Los japoneses y estadounidenses utilizan dos nomenclaturas diferentes de clasificación de acuerdo con el mecanismo de funcionamiento. Los japoneses los clasifican en cuatro categorías: sistemas aislados en la base, sistemas de absorción de energía, sistemas de efecto de masa y sistemas de control activo. Los estadounidenses plantean tres categorías: sistemas aislados, sistemas de disipación pasiva de energía y sistema de control activo. La diferencia entre las clasificaciones radica en que los estadounidenses incluyen los sistemas de efecto de masa dentro de los sistemas de control pasivo o activo de energía (Oviedo & Duque, 2006).

Los sistemas de control estructural se dividen en pasivo, activos y sistemas híbridos.

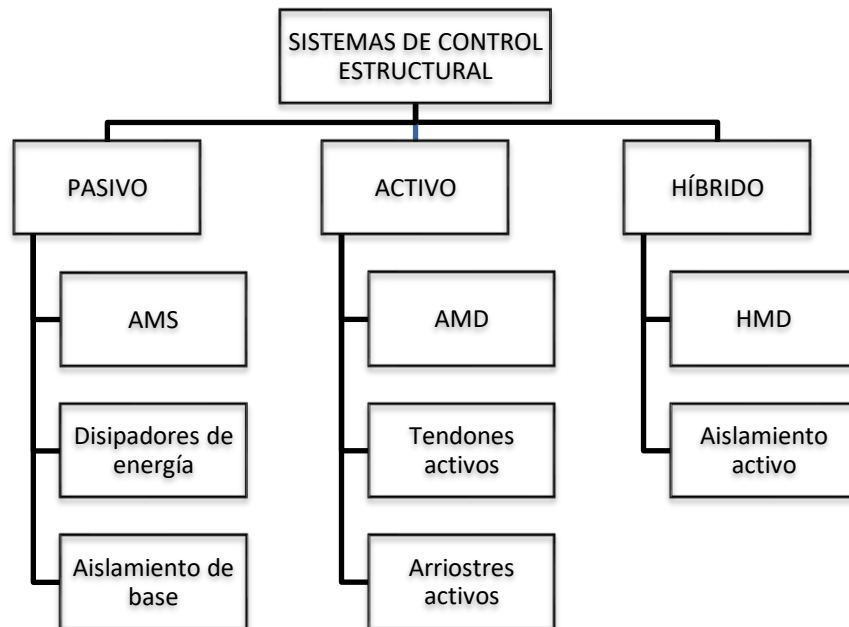


Figura 5. Sistemas de control estructural.
Fuente: (Chavez, 2017)

2.1.9. Sistemas de control pasivo.

Estos sistemas tienen un comportamiento reactivo directo, cuya respuesta no es controlable y depende únicamente de las condiciones de trabajo en que se encuentran,

es decir que no necesitan de ningún ordenador o sensor que quien procese la información y envíe a los disipadores la cantidad de amortiguamiento a actuar como lo hacen los sistemas activos o híbridos. Son sistemas que intervienen alterando las propiedades dinámicas del edificio, provocando una reducción de su respuesta estructural.

La gran ventaja de los sistemas de control pasivo, es que actúan independientemente en función a la energía sísmica de entrada, la disposición dada y ubicación propuesta, cabe indicar que debido a ello la parte económica es un factor positivo (Chavez, 2017).

Los sistemas de control pasivo pueden clasificarse en: disipadores de energía, aisladores sísmicos y los tuned mass damper (TMD) por sus siglas en inglés, traducido al español como amortiguador de masa sintonizada (AMS). La presente tesis se enfocará al estudio de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS)

Control pasivo con disipadores de energía

Son dispositivos los cuales tienen un desempeño propio sin influencia de nadie, solo de la fuerza sísmica lateral, dentro de este grupo se pueden clasificar en cuatro categorías: histeréticos, de fluidos, viscoelásticos y de fricción (figura 6). En su mayoría, se instalan en arriostres diagonales, dentro de los pórticos de la estructura o como complementos al sistema de aislamiento sísmico en la base.

Se resaltan por su economía y funcionalidad, los disipadores metálicos, histerético, basados en deformación plástica; especialmente los de acero que, debido a su homogeneidad, se convierten en un tipo de disipador de fácil caracterización mecánica. Algunos de los disipadores metálicos de acero usados en el mundo son las placas a flexión, los amortiguadores torsionales de barras, los anillos amortiguadores de influencia y las riostras metálicas (Oviedo & Duque, 2006).

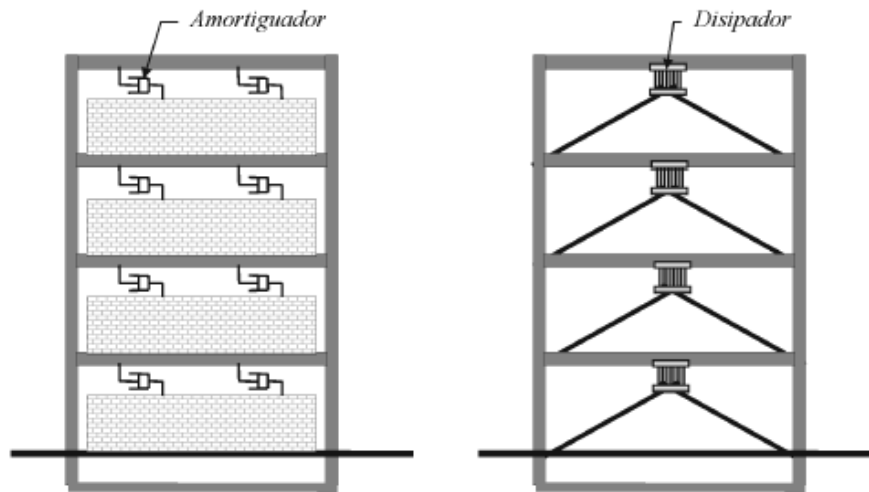


Figura 6. Sistema de control pasivo con disipadores de energía.
Fuente: (Oviedo & Duque, 2006)

Control pasivo con aisladores sísmicos

El aislamiento sísmico en la base es una estrategia de diseño que se fundamenta en el aislamiento de la estructura del movimiento del suelo para proteger a esta del efecto de los sismos figura 7. Entre los dispositivos empleados en la técnica de aislamiento sísmico en la base se cuenta con los aisladores flexibles y los aisladores de fricción deslizantes o basculantes, combinados con amortiguadores (Oviedo & Duque, 2006).

El aislamiento es más recomendable en estructuras rígidas sobre terrenos firmes. El principal inconveniente que se presentan en estructuras con una elevada relación altura – anchura son elevados momentos de vuelco que pueden suponer la pérdida de equilibrio. Para edificios con periodos largos de vibración el uso de aisladores no es muy recomendado, ya que se su presencia no implicaría un cambio drástico en las fuerzas de entrada a la superestructura.

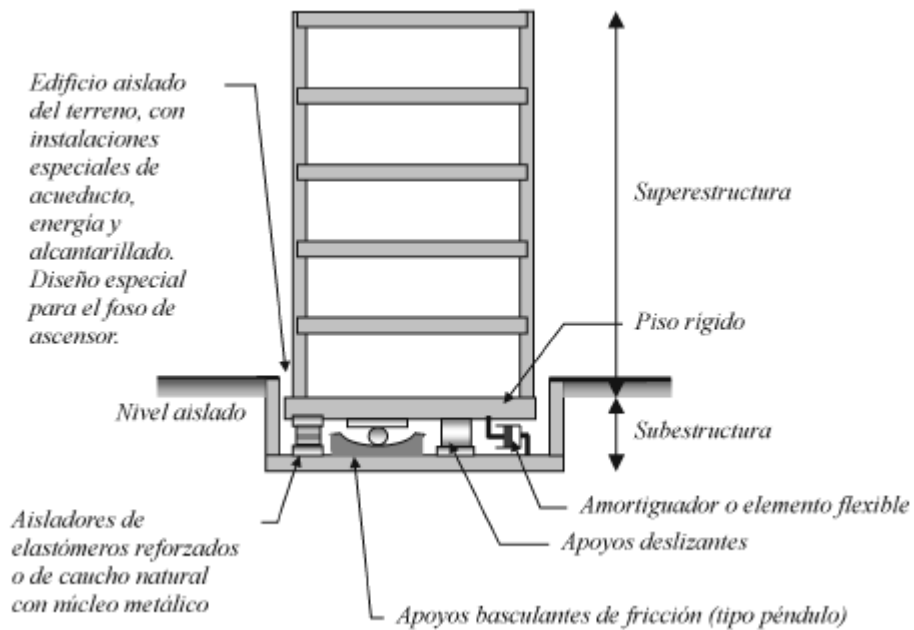


Figura 7. Sistema de control pasivo con aislamiento sísmico en la base.
Fuente: (Oviedo & Duque, 2006)

Amortiguador de masa sintonizada (AMS)

Dado que la presente investigación se desarrolla en el ámbito de control con amortiguadores de masa sintonizada (AMS), se ha visto por conveniente desarrollar de forma más amplia en esta sección.

La arquitectura moderna tiende a ser cambiante buscando realizar estructuras más livianas, de extensas luces y alturas; siendo las razones estéticas las que definen estructuras delgadas y con escasos apoyos que puedan interferir con la habilidad o la belleza. Desde el punto de vista estructural, esto conduce evidentemente a altas flexibilidades, períodos naturales elevados y por defecto a grandes desplazamientos por cargas dinámicas tales como viento o sismo. La inclusión de dispositivos mecánicos en las estructuras puede corregir adecuadamente sus propiedades, de manera que la respuesta dinámica sea compatible con las necesidades estructurales. La modificación de la rigidez, la masa o el amortiguamiento es un camino para solucionar esos problemas. El incremento de amortiguamiento es en ingeniería sísmica un hecho asociado al propósito de aumentar artificialmente la ductilidad, con la finalidad de disipar energía, reduciendo la respuesta estructural dinámica (Aliante, 2009).

Una opción muy atractiva y eficaz, es la disipación de la energía que ingresa a la estructura a través de los amortiguadores de masa sintonizados que pueden ser acoplados a una estructura principal sin inconvenientes. Después de su invención por Frahm en 1909, el concepto de amortiguadores de masa sintonizada ha atraído la atención de investigadores de diferentes campos para su aplicación para controlar vibraciones causadas por diferentes tipos de fuerzas (Ambrosini et al., 2004).

El AMS se ha demostrado efectivo para reducir la vibración del viento y también para resistir fuerzas sísmicas. La mayor desventaja del AMS es que requiere una gran masa e importante disponibilidad de espacio para su instalación. Para compensar este problema, recientemente se ha propuesto el uso de cubiertas de aislamiento respecto a la estructura inferior, o tanques de agua tal como se indica en la figura 8b.

Los amortiguadores de líquido sintonizado (tuned liquid damper), aprovechan la frecuencia de vibración del oleaje de un líquido contenido en tanques u otros depósitos que se sitúan, generalmente en el último nivel de la estructura; el oleaje del tanque produce una serie de frecuencias de vibración que reduce la respuesta de la estructura durante la excitación (Etedali & Rakhshani, 2018).

Otro inconveniente del sistema es que su efectividad se reduce a una banda estrecha de frecuencia cercanas al periodo fundamental del edificio, y pueden presentarse situaciones en las que el edificio se sitúe fuera de su periodo fundamental: a) un edificio esbelto se puede manifestar con distinta intensidad modos de vibración diferentes al fundamental, en función de las características de la excitación, b) durante terremotos severos la estructura puede llegar a comportarse plásticamente, alargando el periodo de la estructura y comportando una pérdida de sintonía con el AMS (Cahis, 2000).

Los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) son una herramienta ingenieril clásica tal como se indica en la figura 8, consta de los siguientes componentes: una masa, un resorte y un amortiguador viscoso acoplados al sistema vibrante principal con el fin de aminorar la vibración no deseada a una frecuencia determinada.

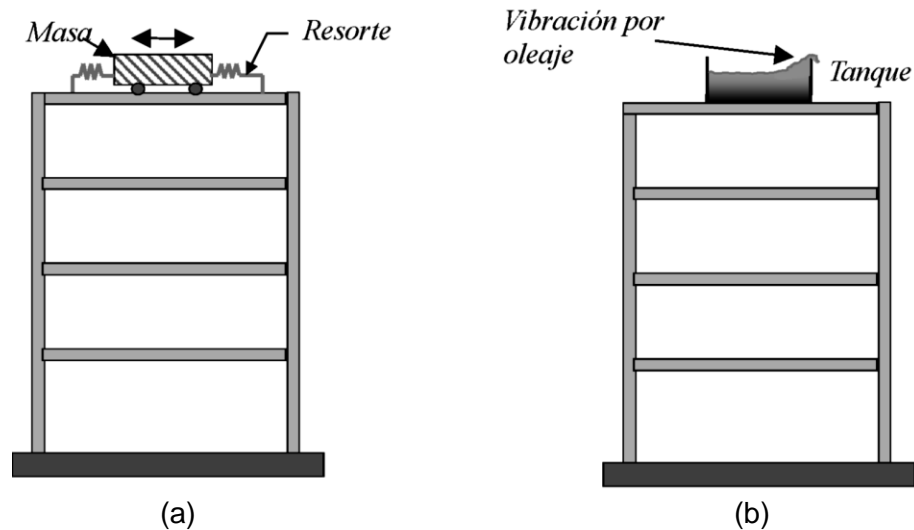


Figura 8. a) AMS en su concepción clásica, b) ALS basado en el empleo de tanques de agua.

Fuente: (Oviedo & Duque, 2006)

Los amortiguadores de masa sintonizada son dispositivos diseñados de modo que su frecuencia natural de vibración sea similar a la frecuencia fundamental de la estructura principal, o coincida con la frecuencia de la excitación cuyos efectos se requiere minimizar. En condiciones óptimas, los AMS pueden absorber gran parte de la energía introducida al sistema por las fuerzas externas o la aceleración en la base, reduciéndose la amplitud de las vibraciones figura 9 y el posible daño de los elementos frente a acciones muy severas.

En la figura 10 se observa cómo influye el AMS en el comportamiento de una estructura sometida a una fuerza sinusoidal. El único propósito de agregar un AMS es reducir el pico resonante de la amplitud a su valor más bajo posible.

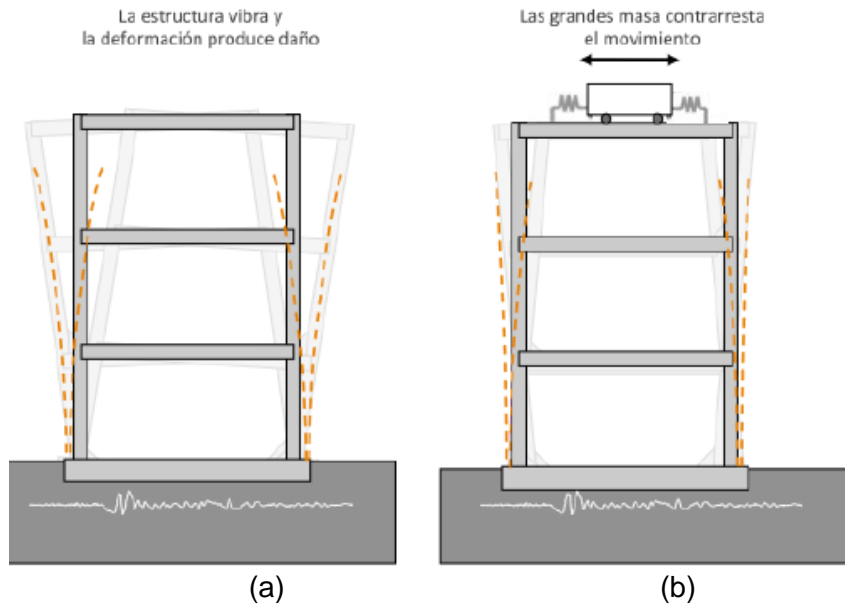


Figura 9. Efecto de un Amortiguador de Masa Sintonizada, (a) estructura sin AMS, (b) estructura con AMS.

Fuente: (Cotacallapa, 2017)

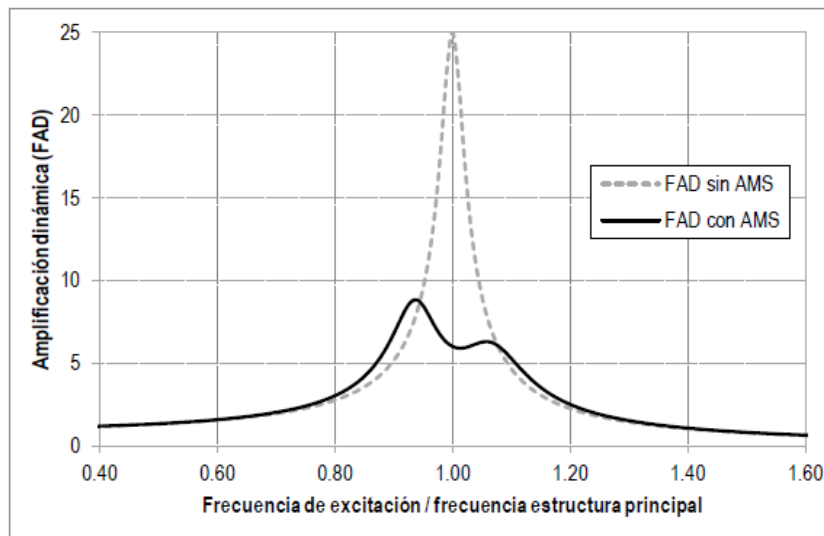


Figura 10. Influencia del AMS en la respuesta de una estructura sometida a una fuerza sinusoidal

Fuente: (Inga, 2015)

2.1.10. Clasificación de amortiguadores de masas sintonizada AMS.

Los AMS se clasifican en: AMS convencionales o traslacional, AMS pendular (AMSP), AMS múltiple (AMSM).

En la figura 11 se presenta las características más importantes sobre las tipologías de los AMS, presentándose sobre cada una de ellas las ventajas y las desventajas de los ítems que conciernen a su funcionamiento, destacándose principalmente la complejidad

del montaje de cada sistema y el coste que implica su respectivo mantenimiento en relación a los beneficios que ofrece el sistema AMS en general.

ITEM	TMD Traslacional	Pendular PTMD	Múltiple TMD
Montaje del Sistema	Sistemas de movimiento unidireccionales o bidireccionales restringidas a menudo mediante la colocación de la masa en un conjunto de rieles o rodamientos de rodillos.	Consiste en una masa soportada por un cable que pivota alrededor de un punto. Son comúnmente modelados como un péndulo simple.	Estos sistemas utilizan múltiples TMD para reducir las vibraciones estructurales. La implementación del sistema sobre el conjunto de rieles tal como el TMD traslacional, limita también su movimiento de acción.
Fuente de Energía	Como sistemas pasivos, cada tipología comparte la característica de la ausencia de una fuente externa de energía, es decir, que no contienen ningún elemento activo en el sistema, tal como un actuador		
Robustez	Falta de Robustez a las condiciones de Desintonización	Falta de Robustez a las condiciones de Desintonización	Su diseño permite mayor robustez a las condiciones de Desintonización
Costos \ Mantenimiento \ Durabilidad	Sistemas relativamente económicos. Sus costos operativos adicionales se caracterizan en el mantenimiento de su mecanismo de desplazamiento (<i>por lo general cojinetes o mecanismos de rodillos</i>)	Sistemas relativamente económicos. No presenta costos operativos adicionales posteriores a su instalación.	Singularizado de acuerdo a cada sistema pasivo de control implementado,
Eficacia \ Rendimiento	La eficacia del sistema depende de la exactitud de su sintonización inicial, y si existe alguna desafinación estructural posterior.	La eficiencia de control de la PTMD depende de las propiedades de control pasiva asumidos para el dispositivo, es decir sus parámetros de diseño.	La eficacia del sistema depende de la exactitud de su sintonización inicial, y si existe alguna desafinación estructural posterior.

Figura 11. Influencia del AMS en la respuesta de una estructura sometida a una fuerza sinusoidal.

Fuente: (Núñez & Tortello, 2015)

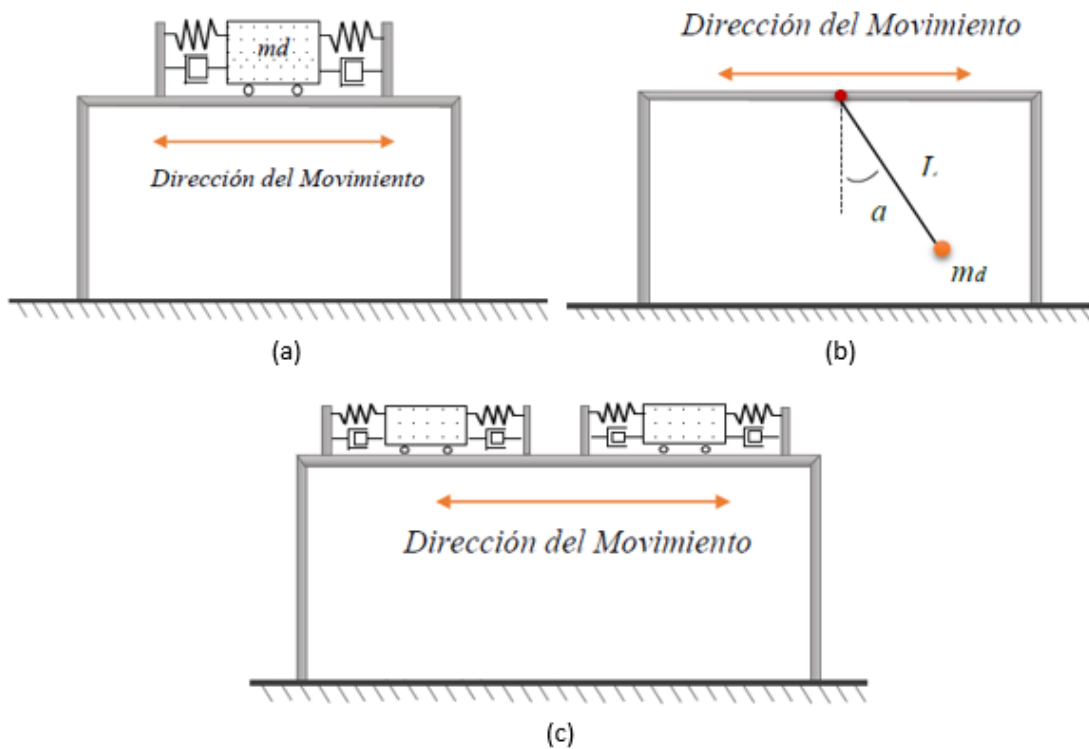


Figura 12. (a) Sistema AMS convencional, (b) Sistema AMS tipo péndulo y (c) Sistema AMS múltiple.

Fuente: (Núñez & Tortello, 2015)

2.1.11. Parámetros de diseño de un AMS.

Un AMS, es un efectivo y confiable mecanismo de control de vibración estructural normalmente acoplado al sistema primario vibrante para controlar las vibraciones inducidas por cargas de viento y sismo, tal como muestra la figura 13. La frecuencia natural del AMS es sintonizada en resonancia con el modo fundamental de la estructura principal, para que una cantidad importante de la energía estructural vibrante sea transferida al AMS y después disipada por los amortiguadores cuando la estructura principal es sometida a excitaciones externas. Por consiguiente, la seguridad y habitabilidad son mucho mejores (Aliante, 2009).

Según (Ambrosini et al., 2004) Los parámetros de diseño del AMS que se deben hallar para lograr la máxima eficiencia del mismo, son la relación de frecuencia (frecuencia del amortiguador/frecuencia de la estructura), la relación de amortiguamiento y la relación de masa (masa AMS/masa de la estructura). Algunos criterios de optimización de los parámetros son:

- Desplazamiento mínimo de la estructura principal (seguridad estructural)
- Rigidez dinámica máxima de la estructura principal
- Mínima trayectoria de la masa amortiguada con respecto a la estructura principal.
- Mínima aceleración de la estructura principal (confort y funcionalidad).

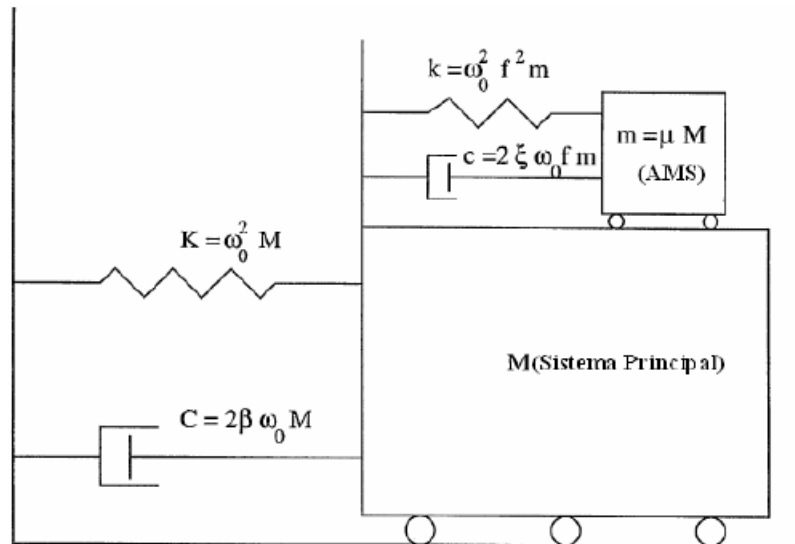


Figura 13. Amortiguador de Masa Sintonizado montado sobre el Sistema Principal.
Fuente: (Aliante, 2009)

Las expresiones para los parámetros óptimos del AMS son determinadas por: μ es la relación de masa (masa del AMS/masa de la estructura), f es el cociente de frecuencias entre la frecuencia del AMS y la frecuencia de la estructura y ξ es la relación de amortiguamiento del AMS.

$$\mu = \frac{m}{M} = \frac{\text{masa AMS}}{\text{masa estructura}} = \text{relación de masa} \quad (19)$$

$$\omega_a^2 = \frac{k}{m} = \text{frecuencia natural del AMS} \quad (20)$$

$$\omega_E^2 = \frac{K}{M} = \text{frecuencia natural de la estructura principal} \quad (21)$$

$$f = \frac{\omega_a^2}{\omega_E^2} = \text{relación de frecuencia natural} \quad (22)$$

$$c_a = 2\xi \omega_a m = \text{amortiguamiento del AMS} \quad (23)$$

El punto de partida para la sintonización del AMS son las relaciones que planteo (Den Hartog, 1985) hace casi un siglo, quien planteo las siguientes relaciones para lograr la mayor disminución de desplazamientos en la estructura:

$$f_{\text{óptimo}} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (24)$$

$$\xi_{a,\text{óptimo}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} \quad (25)$$

De hecho, diferentes investigadores han considerado muchos otros criterios. Algunos de estos se dan a continuación:

- desplazamiento mínimo de la estructura principal (Thompson 1981, Jacqout y Hoppe 1973, Fujino y Abe 1993).
- máxima rigidez dinámica de la estructura principal (Falcon et al. 1967)
- máximo amortiguamiento efectivo de la combinación estructura/ sistema TMD (Luft 1979).
- Un criterio mixto que implica la sintonización de frecuencia utilizando el criterio de desplazamiento mínimo y la determinación del amortiguamiento del TMD utilizando la máxima eficiencia efectiva del amortiguamiento (Luft 1979).
- Recorrido mínimo de la masa del amortiguador en relación con la estructura principal (Luft 1979).
- velocidad mínima de la estructura principal (Warburton 1982)
- aceleración mínima de la estructura principal (Ioi and Ikeda 1978)
- fuerza mínima en la estructura principal (Warburton 1982)

En la tabla 1 se enumeran las condiciones óptimas de sintonización (frecuencia y amortiguación), en función de varios criterios de optimización para AMSs amortiguados unidas a estructuras primarias no amortiguadas (Christopoulos & Filiatrault, 2006).

Tabla 1

Condiciones de Sintonización Óptima para Amortiguadores (AMS) Unidos a una Estructura Primaria no Amortiguada

Caso de Carga	Criterios de Optimización	Condiciones de Sintonización Óptima	
		$f_{\text{óptimo}}$	$C/C_c (\xi_{\text{óptimo}})$
1) Carga armónica aplicada a la estructura primaria	Amplitud mínima de desplazamiento relativo de la estructura primaria	$\frac{1}{1 + \mu}$ Ecuación (24)	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}}$ Ecuación (25)
2) Carga armónica aplicada a la estructura primaria	Amplitud mínima de aceleración relativa de la estructura primaria	$\frac{1}{\sqrt{1 + \mu}}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8\left(1 + \frac{\mu}{2}\right)}}$
3) Aceleración armónica de Base	Amplitud mínima de desplazamiento relativo de la estructura primaria	$\frac{\sqrt{1 - \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)\left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}}$
4) Aceleración armónica de Base	Amplitud mínima de desplazamiento absoluta de la estructura primaria	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$
5) Carga aleatoria aplicada a la estructura primaria	Valor mínimo cuadrático medio del desplazamiento relativo de la estructura primaria	$\frac{\sqrt{1 - \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{\mu\left(1 + \frac{3\mu}{4}\right)}{4(1 + \mu)\left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}}$
6) Aceleración aleatoria de base	Valor mínimo cuadrático medio del desplazamiento relativo de la estructura primaria	$\frac{\sqrt{1 - \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{\mu\left(1 - \frac{\mu}{4}\right)}{4(1 + \mu)\left(1 - \frac{\mu}{2}\right)}}$

Fuente: (Original no consultado, citado por: Christopoulos & Filiatrault, 2006)

Una de las dificultades en el diseño de un Amortiguador de Masa Sintonizada para un edificio es la de sintonizar éste apropiadamente al periodo fundamental de la estructura (Breschi & Castillo, 2015).

2.1.11.1. Amortiguador de masa sintonizada pendular.

Los problemas asociados con los cojinetes pueden ser eliminados mediante el apoyo de la masa con cables que permiten que el sistema se comporte como un péndulo. La figura 14(a) muestra un péndulo simple unido a la cubierta. El movimiento del suelo excita el péndulo. El movimiento relativo del péndulo produce una fuerza horizontal que se

opone al movimiento de la cubierta. Esta acción puede ser representada por un sistema de un grado de libertad equivalente a un sistema que está conectado a la cubierta, como se indica en la figura 14(b) (Connor, 2003).

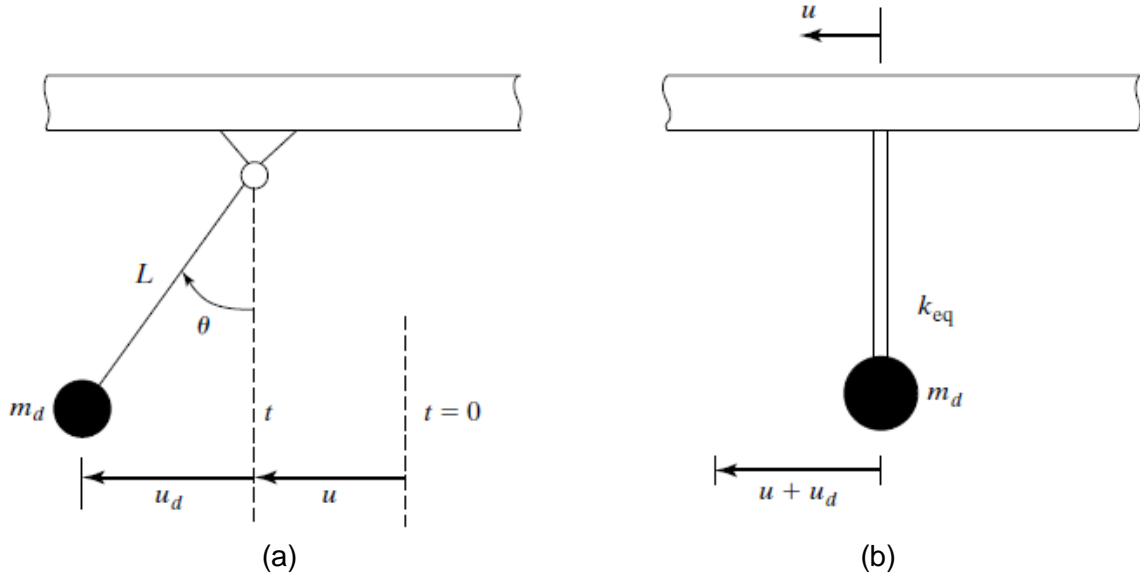


Figura 14. Un simple amortiguador de masa sintonizado pendular: a) Sistema actual, b) Sistema equivalente.
Fuente: (Connor, 2003)

La ecuación del movimiento para la dirección horizontal es:

$$T \sin \theta + \frac{W_d}{g} (\ddot{u} + \ddot{u}_d) = 0 \quad (26)$$

Donde T es la tensión del cable. Cuando θ es pequeño, son aplicadas las siguientes aproximaciones:

$$u_d = L \sin \theta \approx L \theta \quad (27)$$

$$T \approx W_d \quad (28)$$

Introduciendo estas aproximaciones, la ecuación del movimiento es:

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{L} u_d = -m_d \ddot{u} \quad (29)$$

La rigidez a corte equivalente del resorte puede ser considerado como:

$$k_{eq} = \frac{W_d}{L} \quad (30)$$

La frecuencia natural del péndulo está relacionada con k_{eq} por medio de:

$$\omega_d^2 = \frac{k_{eq}}{m_d} = \frac{g}{L} \quad (31)$$

El periodo natural del péndulo es:

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (32)$$

El concepto de péndulo simple para amortiguador de masa sintonizada tiene una seria limitación. El período depende de “L”. La longitud requerida para grandes T_d puede ser mayor que la altura típica de piso. Este problema puede ser eliminado si se sigue el esquema ilustrado en la figura 15.

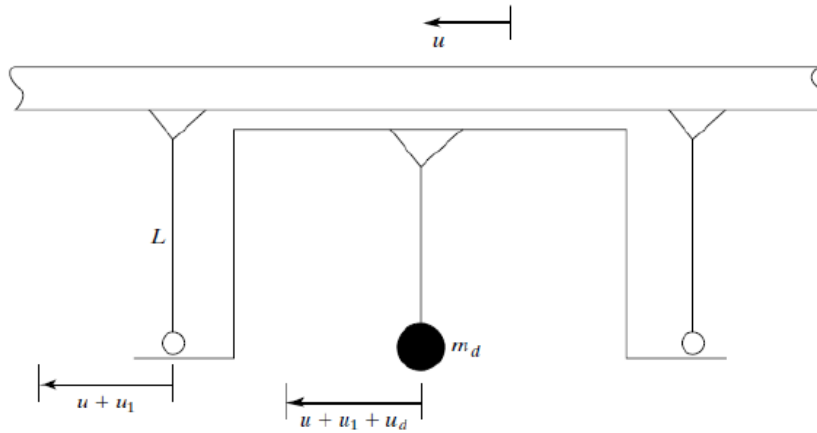


Figura 15. Péndulo compuesto.
Fuente: (Connor, 2003)

El vínculo rígido interior magnifica el movimiento para el péndulo y los resultados se visualizan en la siguiente ecuación de equilibrio:

$$m_d(\ddot{u} + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_d) + \frac{W_d}{L} u_d = 0 \quad (33)$$

El enlace rígido se mueve en fase con el amortiguador y tiene la misma amplitud de desplazamiento. Entonces:

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{W_d}{2L} u_d = -\frac{m_d}{2} \ddot{u} \quad (34)$$

La rigidez equivalente es $W_d/2L$, y se deduce que la longitud efectiva es igual a $2L$. Cada enlace adicional aumenta la longitud efectiva en L .

Acelerogramas

Para el diseño de estructuras civiles resistentes a sismos, es necesario tener algún conocimiento del movimiento del terreno. Estos movimientos sísmicos del suelo pueden ser registrados en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración. El movimiento del terreno, descrito como aceleración, es registrado con un acelerógrafo, dicho registro es denominado acelerograma (Soto, 2016).

El acelerograma es el registro de la aceleración en función del tiempo, en un sitio determinado, como el suelo o las estructuras. Comúnmente, la historia de las aceleraciones se registra en tres componentes: dos en el plano horizontal (llamadas longitudinal y transversal) y otra en sentido vertical. Muchas veces el instrumento se orienta de manera que la componente longitudinal coincida con la dirección Norte-Sur (Sauter, 1989).

Los acelerogramas obtenidos mediante instrumentos denominados acelerógrafos son registros de aceleraciones del suelo producido por cualquier movimiento de carácter sísmico.

En la figura 16 se aprecian los diferentes componentes básicos de un acelerograma: escala de tiempo, escala de aceleración, PGA o aceleración pico del terreno, así como la duración de la fase fuerte.

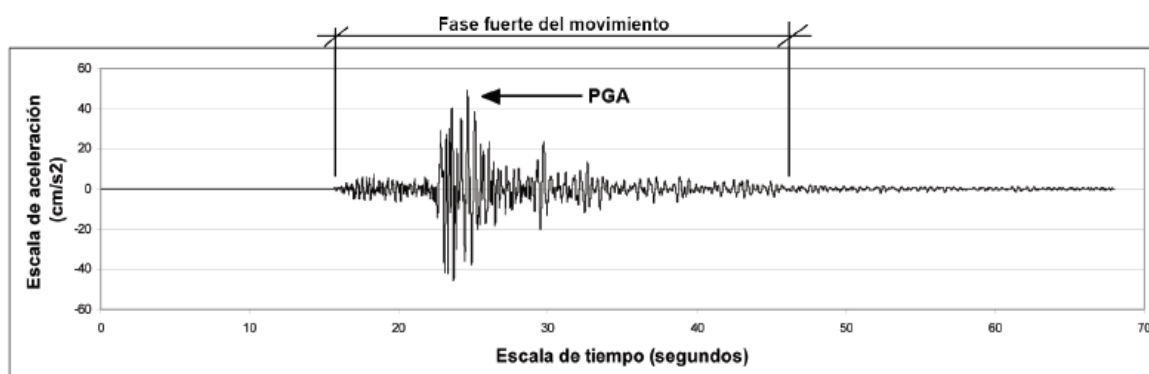


Figura 16. Componentes principales de un acelerograma.
Fuente: (Soto, 2016)

Debido a que la variación de la aceleración es muy irregular en el tiempo, es necesario que la toma de datos se realice en intervalos muy pequeños de tiempo, utilizándose generalmente valores de 0.01 o 0.02 s.

2.1.12. Tratamiento de acelerogramas.

Los acelerogramas por lo general presentan errores, tales como desplazamiento de la línea base y ruido, por lo que estos merecen ser considerados y tratados.

Los registros de aceleración, que luego serán usados en tareas de investigación y análisis estructural, deben ser previamente filtrados para eliminar ruidos de fondo y escalados para determinar los valores reales de aceleración. Además, se realiza una corrección del acelerograma usando distintas metodologías con objeto de determinar la línea de "aceleración cero", debido a que el instrumento se activa recién cuando la aceleración excede cierto valor límite.

Para obtener una determinación lo más exacta posible de los valores de aceleración que se han producido durante el terremoto en el lugar de registro, es necesario hacer un cuidadoso tratamiento de los registros. Puesto que los datos que se recogen en campo están en un formato original propio del acelerógrafo (binario), será necesario hacer una conversión de los mismos a formato ASCII con el que, generalmente se trabaja (Carreño et al., 1999).

El acelerograma obtenido, presenta una serie de errores, tanto instrumentales como aleatorios, que deberán ser corregidos para que dicho acelerograma sea apto para ser utilizado.

2.1.12.1. Corrección instrumental.

Consiste en la convolución del registro con la función de transferencia del instrumento. Debemos conocer para ello las constantes de calibración del instrumento, como son la sensibilidad del acelerómetro, la frecuencia natural y el amortiguamiento, obteniéndose así un acelerograma corregido (Carreño et al., 1999).

2.1.12.2. Corrección de la línea base o corrección de ceros.

Por lo general los valores del acelerograma se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración. Este error puede ocurrir porque el acelerómetro no está perfectamente nivelado en su emplazamiento, o bien porque el sistema de registro provoque una deriva de los datos respecto a la línea de base. Aunque este error puede ser inapreciable en aceleración, puede ser muy importante cuando se obtienen la velocidad y el desplazamiento por integración numérica, ya que estamos contabilizando el área que hay entre la curva de aceleración y la línea de base (Carreño et al., 1999).

2.1.12.3. Corrección por filtrado.

Una vez que el acelerograma ha sido corregido tanto de la corrección instrumental y de línea base, habrá que tener en cuenta la repercusión que el ruido tiene sobre el acelerograma. Este ruido puede estar causado tanto por fenómenos naturales como por el tratamiento de los datos.

Filtros ideales

Los filtros ideales, son aquellos que están definidos como una función escalón, del siguiente modo:

- Filtro ideal paso-bajas: Elimina todas las frecuencias superiores a una dada ω_0 , y deja pasar sin atenuación las frecuencias inferiores.
- Filtro ideal paso-altas: Elimina todas las frecuencias inferiores a una dada ω_0 , y deja pasar sin atenuación las frecuencias superiores.
- Filtro ideal paso-banda: Elimina todas las frecuencias inferiores a una dada ω_1 , y las superiores a ω_2 , y deja pasar sin atenuación las comprendidas entre ω_1 y ω_2 . Un ejemplo gráfico de todos ellos lo vemos representado en la Figura 17.

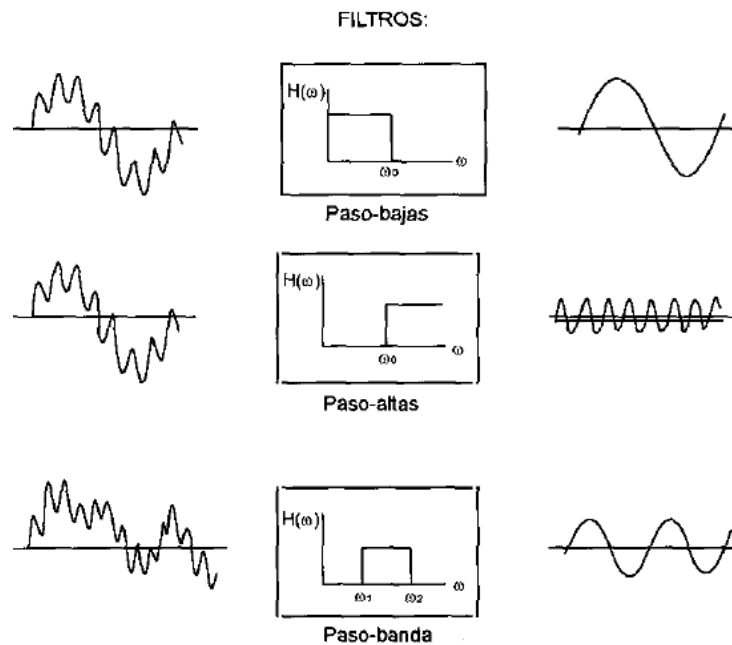


Figura 17. Comportamiento de los filtros ideales paso-bajas, paso-altas y paso-banda.
Fuente: (Carreño et al., 1999)

En la práctica, estos filtros ideales no se pueden utilizar, ya que su función de transferencia en el tiempo es de longitud infinita. Sin embargo, se utilizan aproximaciones a ellos, con filtros tales como el “box car” o “Bartlett”, el “Hanning”, el “Butterworth frecuencial” o los filtros gaussianos.

En la actualidad existen diversas herramientas computacionales que nos permiten realizar las correcciones y tratamientos necesarios a los acelerogramas, en la presente investigación se usara el software SeismoSignal V4.3.

Ingeniería sísmica y ensayo sísmico de estructuras

La Ingeniería sísmica cuyo origen es difícil de establecer con precisión, comenzó a desarrollarse en forma sistemática y progresiva a partir de 1906 donde se registró el sismo de San Francisco, con una magnitud estimada de 8,3, siendo uno de los terremotos que ha liberado la mayor cantidad de energía; el daño que causó este evento fue cuantioso, las pérdidas materiales millonarias y el número de víctimas considerable. Este sismo mostró la vulnerabilidad de los centros urbanos ubicados en zonas sísmicas, originando así un cambio significativo en los criterios de diseño y cálculo de esa época. A lo largo de

aproximadamente 100 años desde esa época, se han producido avances significativos, los cuales han permitido disponer en la actualidad de los medios para reducir el riesgo sísmico (Lema, 2013).

2.1.13. Simulación sísmica.

Los efectos catastróficos de terremotos, han llevado al desarrollo de medios efectivos para aumentar la resistencia sísmica de las estructuras. La verificación de la mayor resistencia requiere una experimentación bajo condiciones reales. En este punto es en el que entran los simuladores sísmicos, que son una de las herramientas principales de experimentación. Estos simuladores sísmicos pueden tener escalas muy diferentes dependiendo fundamentalmente del uso que se le vaya a dar y sobre todo de los medios de los que se dispongan. En el simulador sísmico se colocan los modelos de estructuras que se vayan a ensayar. Tras determinar la excitación sísmica o acelerograma que se le va a dar, es decir, el sismo que se va a implementar, se construye la estructura, se sujeta a la mesa y se somete al movimiento. En función del ensayo que se haga, puede que interese moverlo en una sola dirección o en dos o según a la necesidad requerida (Lozano, 2013).

En los ensayos sísmicos se va aumentando el nivel de excitación, generalmente hasta que la estructura ensayada llegue a romperse, ya que la rotura de la estructura nos proporciona muchísima información. Nos dice en qué zonas no resiste, cómo se distribuye la resistencia de la estructura y la ductilidad, que es la capacidad de deformarse sin romperse.

La simulación sísmica nos permite:

- Estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.

- Una observación detallada al sistema que se está simulando, puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- Experimentar nuevos sistemas constructivos, sobre las cuales tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.

2.1.14. Sistemas utilizados en la simulación sísmica.

Aquí se describen los tres grandes tipos de técnicas experimentales para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras. En función del tipo de problema planteado, puede ser preferible utilizar una técnica u otra, pero también debemos tener en cuenta que en muchos casos las propias limitaciones de cada una de estas técnicas hacen ya que no todas las técnicas sean técnicamente realizables o que, incluso, el problema se deba replantear en un modo menos exigente. Esto es debido a que en ingeniería sísmica los ejemplares a ensayar suelen ser de gran tamaño y el nivel requerido de fuerzas y deformaciones dinámicas también es generalmente muy alto, de manera que es muy fácil llegar a las capacidades máximas de los sistemas de control de carga utilizados en cada caso.

Podemos encontrar principalmente tres metodologías existentes para la simulación sísmica, estos son los ensayos **cuasi estáticos** que son los más recomendables para caracterizar el comportamiento de elementos o estructuras y pueden ser aplicados a grandes modelos obteniendo una gran precisión en las medidas. Por otra parte, tenemos los ensayos en **mesa vibrante** que permiten obtener la verdadera respuesta dinámica a un terremoto específico, teniendo el problema de estar limitados a pequeños modelos. Por último, tenemos los ensayos **pseudodinámicos** que combinan en principio las ventajas de los dos tipos de ensayos anteriores.

2.1.14.1. *Ensayo en mesa vibratoria.*

Este ensayo nos permite introducir una verdadera excitación dinámica en la base de la mesa vibratoria, que pueda recrear con gran fidelidad los parámetros de un terremoto. Consiste de una plataforma rígida que es movida por una serie de actuadores hidráulicos o eléctricos, controlados de tal manera que reproduzcan la historia de movimientos de un terremoto determinado. Si el movimiento se da en una sola dirección, se dice que la mesa tiene un grado de libertad o que es uniaxial. Existen mesas vibratorias con uno, dos y hasta tres grados de libertad de desplazamiento, a veces combinados con hasta tres grados de libertad rotacional.

Mesa vibratoria sísmica

Una mesa vibratoria tiene como fin simular, con alta precisión, los movimientos generados por un sismo. Esta herramienta experimental proporciona un recurso para analizar, evaluar y, finalmente, mejorar las características de estructuras y construcciones ante un sismo real (Anastasopoulos et al., 2010).

Una mesa vibratoria es una plataforma móvil que simula los movimientos de un sismo sobre un modelo estructural, tal como se observa en la figura 18 (Carrillo et al., 2013). Esta herramienta consta generalmente de una plataforma móvil, una masa de reacción, uno o más actuadores y apoyos para la plataforma, que generalmente son rodamientos lineales.

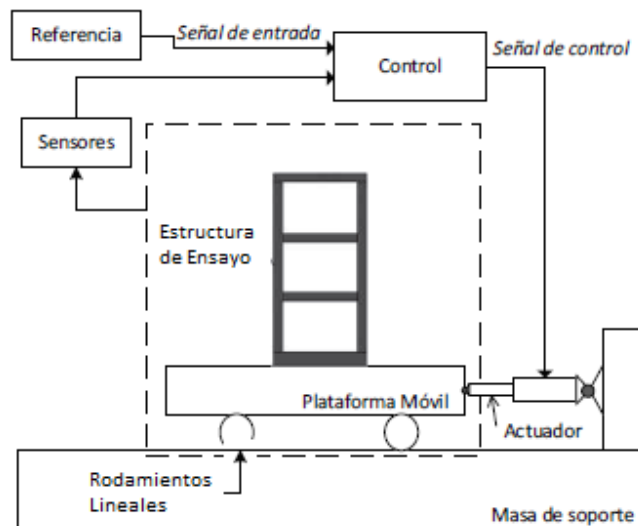


Figura 18. Esquema general de una mesa vibratoria.
Fuente: (Carrillo et al., 2013)

En la actualidad, las mesas vibratorias son la aproximación más natural a los movimientos sísmicos, y la gran experiencia adquirida por el uso de simuladores sísmicos en trabajos investigativos hace que la ingeniería sísmica y su evolución se base fuertemente en la práctica. (Sollogoub, 2007 citado en Coral et al., 2010)

La clasificación que reciben las mesas vibratorias es muy variada debido a que no existe una regulación al respecto. Generalmente las mesas vibratorias se pueden clasificar según su tamaño, tipo de actuador, grados de libertad, aceleraciones, velocidades, desplazamientos máximos, frecuencias de operación, ubicación (en interiores o exteriores), entre otras. Las mesas se pueden clasificar por su tamaño en mesas grandes, aquellas que permiten realizar ensayos de construcciones en escala real, mesas medianas, aquellas que se pueden utilizar para ensayar modelos a escala mesas pequeñas, que permiten realizar ensayos sobre modelos simples y/o pequeños. (Lehmann et al., 2012)

2.1.15. Componentes básicos de una mesa vibratoria.

Una mesa vibradora unidireccional está compuesta básicamente por cinco partes:

- Masa de reacción: cuando se realicen las pruebas en el simulador, el actuador deberá ser fijado a una masa de reacción, que va a permitir que la fuerza del actuador reaccione sobre esta.

- Un actuador: es el sistema motor encargado de dar movimiento a la mesa.
- Una plataforma móvil: es una plataforma de gran rigidez donde se colocan los modelos a ensayar.
- Un sistema de rodamientos lineales: son rieles y patines de muy bajo rozamiento donde se desliza la placa rígida
- Sistemas de control y adquisición de datos: es el sistema encargado de controlar al actuador y de adquirir y digitalizar las señales analógicas de los sensores colocados en el modelo para su posterior procesamiento y análisis.

En la Figura 19, se muestra los componentes principales de una mesa vibratoria de una manera general, cualquier mesa que analicemos en principio van a disponer de todos estos elementos:

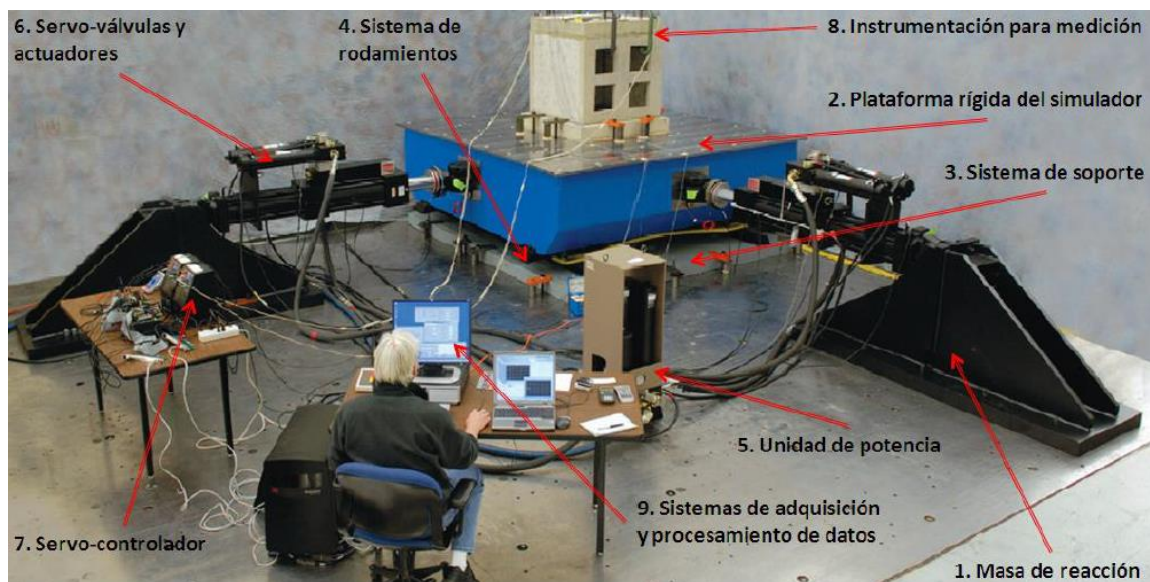


Figura 19. Componentes principales de una mesa vibratoria.
Fuente: (Mesa bi-axial de MTS)

Modelamiento experimental de estructuras

2.1.16. Análisis experimental de estructuras

El análisis por medio de pruebas experimentales usualmente busca estudiar estructuras complejas y la verificación del método numérico.

El análisis experimental consiste en realizar ensayos de simulación sísmica a modelos estructurales, y es de vital importancia para la ingeniería, ya que mediante este tipo de procesos se ha podido desarrollar, analizar y entender de una mejor manera comportamiento sísmico de elementos, modelos o sistemas estructurales, tanto de acero, mampostería, concreto armado, madera, etc.

En principio los ensayos se realizan en modelos con el objeto de evaluar el comportamiento total de la estructura, estos modelos pueden ser a escala natural o reducida, dependiendo no solo del costo, sino también de la técnica de ensayo que se esté utilizando.

Para el estudio del desempeño sísmico de estructuras se disponen principalmente con tres tipos de pruebas experimentales: el estudio dinámico en mesa vibratoria, los ensayos pseudo-dinámicos, y los ensayos cuasi-estáticos. Estos dos últimos usualmente utilizan un marco de carga o un muro de reacción.

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología y diseño de investigación

3.1.1. Metodología de la investigación.

La metodología que se aplicará en la presente tesis será del tipo CUANTITATIVO

“El enfoque cuantitativo (que representa, como dijimos, un conjunto de procesos) es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar o eludir” pasos, el orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica” (Hernández et al., 2010).

Según (Hernández et al., 2010), “La investigación cuantitativa nos ofrece la posibilidad de generalizar los resultados más ampliamente, nos otorga control sobre los fenómenos, así como un punto de vista de conteo y las magnitudes de éstos. Asimismo, nos brinda una gran posibilidad de réplica y un enfoque sobre puntos específicos de tales fenómenos, además de que facilita la comparación entre estudios similares”.

3.1.2. Alcance de la investigación.

El alcance de la investigación será de tipo DESCRIPTIVO.

Los **estudios descriptivos** buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas (Hernández et al., 2010).

3.1.3. Diseño de investigación.

La presente investigación, se realizará con un diseño de investigación CUASI-EXPERIMENTAL, debido a que se pueden manipular libremente, como mínimo, una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes, sólo se difieren de los experimentos “puros” en el grado de seguridad o confiabilidad que puede tenerse sobre la equivalencia inicial de los grupos. “En los diseños cuasiexperimentales los sujetos no se asignan al azar a los grupos ni se emparejan, sino que dichos grupos ya están formados antes del experimento: son grupos intactos (la razón por la que surgen y la manera como se formaron es independiente o aparte del experimento)” (Hernández et al., 2010).

Formulación de hipótesis

3.1.4. Hipótesis general.

Los resultados de respuesta estructural de un modelo a escala con amortiguadores de masa sintonizada de tipo pendular son más eficientes que el tipo convencional, frente a aceleraciones sísmicas.

Operacionalización de variables

Tabla 2

Operacionalización de variables

Objeto de Estudio	Tipo de Variable	Variable	Definición Conceptual
Modelos a escala reducida	Independiente	AMS Convencional	Es un sistema mecánico (masa, resorte y amortiguador), que se acopla a un sistema vibratorio con la intención de reducir la amplitud del movimiento de éste (Venkataramana & Vinod, 2019).
		AMS Pendular	Es un sistema mecánico (masa, cable y amortiguador), que se acopla a un sistema vibratorio con la intención de reducir la amplitud del movimiento de éste (Venkataramana & Vinod, 2019).
	Dependiente	Respuesta estructural	Permite conocer las aceleraciones y desplazamientos, frente a fuerzas externas (sismos, vientos, etc)
		Medición 1	
Medición 2			
		Medición 3	

Fuente: Elaboración Propia

Diseño y construcción del modelo estructural a escala

En esta sección vemos el modelo de la estructura a escala, para estudiar el comportamiento y el desempeño del sistema AMS diseñado.

Se utilizó un modelo a escala de una estructura de 20 grados de libertad. Si bien este sistema no refleja fielmente el comportamiento dinámico de una estructura real, es el punto de partida para evaluar la efectividad del sistema AMS.

Para lo cual se construyó un modelo a escala de una estructura civil, ya que sin ellos no sería posible la realización de dicho ensayo dinámico. El material que se utilizó en la construcción del modelo a escala fue la madera balsa.

3.1.5. Descripción del modelo estructural usado para las simulaciones.

El modelo estructural será un pórtico, el cual estará conformado por los siguientes elementos:

- Columnas
- Diafragma o losa

El modelo de estudio al cual se le efectuó el respectivo análisis para el objeto de este trabajo corresponde a un pórtico, que se modeló como un sistema de 20 grados de libertad. Las características del modelo físico a escala se muestran en la tabla 3. El esquema de la planta y elevación se muestran en las figuras 20 respectivamente.

Tabla 3

Parámetros de diseño del modelo físico de la estructura a escala reducida (1/50).

Descripción	Características
Columnas	0.5 cm x 0.5 cm
Losa	30 cm x 30 cm, e=0.15 cm
Altura del primer nivel	7.4 cm
Altura de entre niveles	5.4 cm
Número de niveles	20
Número de ejes	4 x 4
Distancia entre ejes	10 cm

Fuente: Elaboración propia

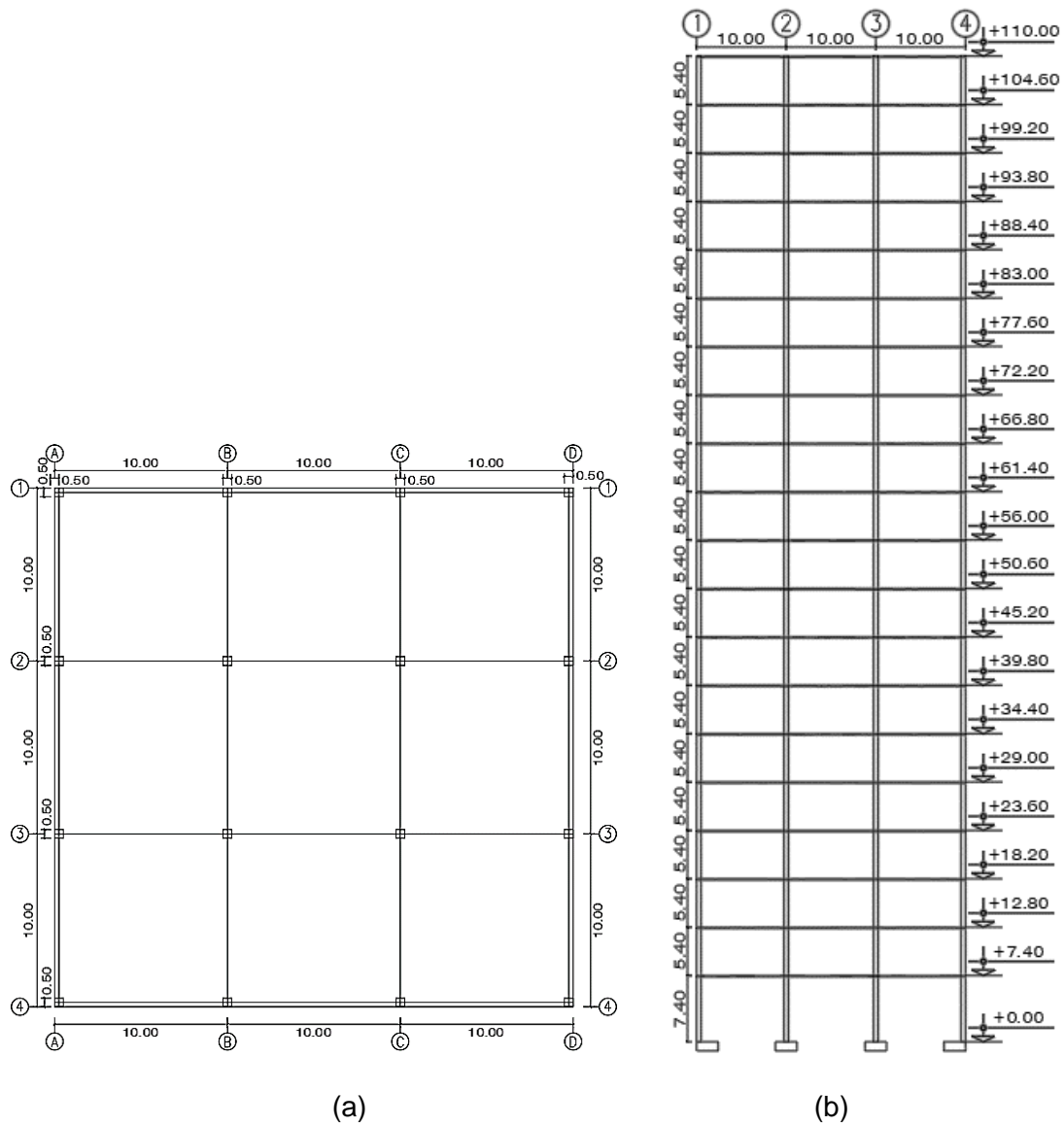


Figura 20. (a) Planta típica, (b) Elevación del nivel 1 al 20.
Fuente: Elaboración Propia

3.1.6. Determinación teórica de los parámetros modales de la estructura.

Para el diseño de un sistema de control estructural, es necesario conocer y definir el comportamiento dinámico esperado de la estructura a controlar, para ello se hace uso de herramientas que posibilitan el modelamiento de estructuras; una de ellas corresponde al modelo basado en leyes físicas a partir del método de las masas concentradas.

7	2183.820	46.731	0.134	7.438
8	2857.850	53.459	0.118	8.508
9	3587.270	59.894	0.105	9.532
10	4354.430	65.988	0.095	10.502
11	5140.660	71.698	0.088	11.411
12	5926.710	76.985	0.082	12.253
13	6693.320	81.813	0.077	13.021
14	7421.670	86.149	0.073	13.711
15	8093.830	89.966	0.070	14.318
16	8693.290	93.238	0.067	14.839
17	9205.270	95.944	0.065	15.270
18	9617.200	98.067	0.064	15.608
19	9918.890	99.594	0.063	15.851
20	10102.920	100.513	0.063	15.997

Fuente: Elaboración propia

- **Vectores de vibración**

Calculada de acuerdo al método propuesto en la sección 2.3.4 y 2.3.5

$v_1 =$	1.000	1.384	1.760	2.128	2.484	2.829	3.158	3.472	3.768	4.046	4.302	4.537	4.749	4.937	5.099	5.236	5.347	5.430	5.486	5.514
$v_2 =$	1.000	1.343	1.624	1.830	1.953	1.986	1.927	1.781	1.552	1.253	0.896	0.498	0.077	-0.348	-0.756	-1.130	-1.452	-1.707	-1.884	-1.975
$v_3 =$	1.000	1.260	1.358	1.281	1.040	0.666	0.206	-0.281	-0.731	-1.088	-1.305	-1.354	-1.229	-0.947	-0.543	-0.069	0.414	0.843	1.164	1.336
$v_4 =$	1.000	1.135	0.982	0.581	0.033	-0.524	-0.948	-1.132	-1.029	-0.666	-0.135	0.431	0.888	1.120	1.068	0.746	0.236	-0.335	-0.820	-1.098
$v_5 =$	1.000	0.969	0.532	-0.128	-0.734	-1.033	-0.899	-0.389	0.284	0.838	1.041	0.808	0.237	-0.434	-0.923	-1.025	-0.699	-0.080	0.573	0.985

v6=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.764 \\ 0.053 \\ -0.691 \\ -1.005 \\ -0.694 \\ 0.049 \\ 0.762 \\ 1.000 \\ 0.616 \\ -0.151 \\ -0.825 \\ -0.985 \\ -0.533 \\ 0.251 \\ 0.879 \\ 0.959 \\ 0.443 \\ -0.349 \\ -0.924 \end{bmatrix}$	v7=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.526 \\ -0.400 \\ -0.982 \\ -0.721 \\ 0.160 \\ 0.903 \\ 0.870 \\ 0.089 \\ -0.768 \\ -0.966 \\ -0.333 \\ 0.586 \\ 1.001 \\ 0.556 \\ -0.367 \\ -0.975 \\ -0.745 \\ 0.125 \\ 0.887 \end{bmatrix}$	v8=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.260 \\ -0.772 \\ -0.936 \\ -0.047 \\ 0.895 \\ 0.831 \\ -0.168 \\ -0.977 \\ -0.688 \\ 0.375 \\ 1.016 \\ 0.515 \\ -0.566 \\ -1.010 \\ -0.318 \\ 0.731 \\ 0.959 \\ 0.108 \\ -0.864 \end{bmatrix}$	v9=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.028 \\ -1.016 \\ -0.570 \\ 0.681 \\ 0.971 \\ -0.110 \\ -1.035 \\ -0.500 \\ 0.741 \\ 0.936 \\ -0.191 \\ -1.048 \\ -0.426 \\ 0.798 \\ 0.895 \\ -0.271 \\ -1.054 \\ -0.349 \\ 0.849 \end{bmatrix}$	v10=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.331 \\ -1.095 \\ 0.017 \\ 1.100 \\ 0.298 \\ -1.014 \\ -0.589 \\ 0.846 \\ 0.831 \\ -0.608 \\ -1.005 \\ 0.320 \\ 1.096 \\ -0.006 \\ -1.098 \\ -0.309 \\ 1.010 \\ 0.598 \\ -0.838 \end{bmatrix}$
-----	---	-----	---	-----	--	-----	--	------	--

v11=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.641 \\ -0.985 \\ 0.664 \\ 0.970 \\ -0.686 \\ -0.954 \\ 0.708 \\ 0.938 \\ -0.729 \\ -0.921 \\ 0.750 \\ 0.904 \\ -0.771 \\ -0.887 \\ 0.791 \\ 0.868 \\ -0.811 \\ -0.850 \\ 0.831 \end{bmatrix}$	v12=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.951 \\ -0.684 \\ 1.179 \\ 0.292 \\ -1.276 \\ 0.132 \\ 1.232 \\ -0.541 \\ -1.052 \\ 0.890 \\ 0.756 \\ -1.142 \\ -0.377 \\ 1.267 \\ -0.044 \\ -1.253 \\ 0.460 \\ 1.100 \\ -0.825 \end{bmatrix}$	v13=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ -1.254 \\ -0.205 \\ 1.384 \\ -0.672 \\ -0.958 \\ 1.279 \\ 0.147 \\ -1.372 \\ 0.723 \\ 0.914 \\ -1.303 \\ -0.088 \\ 1.359 \\ -0.773 \\ -0.869 \\ 1.324 \\ 0.029 \\ -1.342 \\ 0.822 \end{bmatrix}$	v14=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ -1.542 \\ 0.419 \\ 1.156 \\ -1.483 \\ 0.209 \\ 1.290 \\ -1.397 \\ -0.004 \\ 1.401 \\ -1.285 \\ -0.218 \\ 1.486 \\ -1.150 \\ -0.427 \\ 1.543 \\ -0.994 \\ -0.629 \\ 1.572 \\ -0.819 \end{bmatrix}$	v15=	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ -1.807 \\ 1.141 \\ 0.455 \\ -1.680 \\ 1.536 \\ -0.141 \\ -1.370 \\ 1.764 \\ -0.720 \\ -0.910 \\ 1.799 \\ -1.222 \\ -0.351 \\ 1.638 \\ -1.590 \\ 0.246 \\ 1.298 \\ -1.784 \\ 0.817 \end{bmatrix}$
------	--	------	--	------	--	------	---	------	--

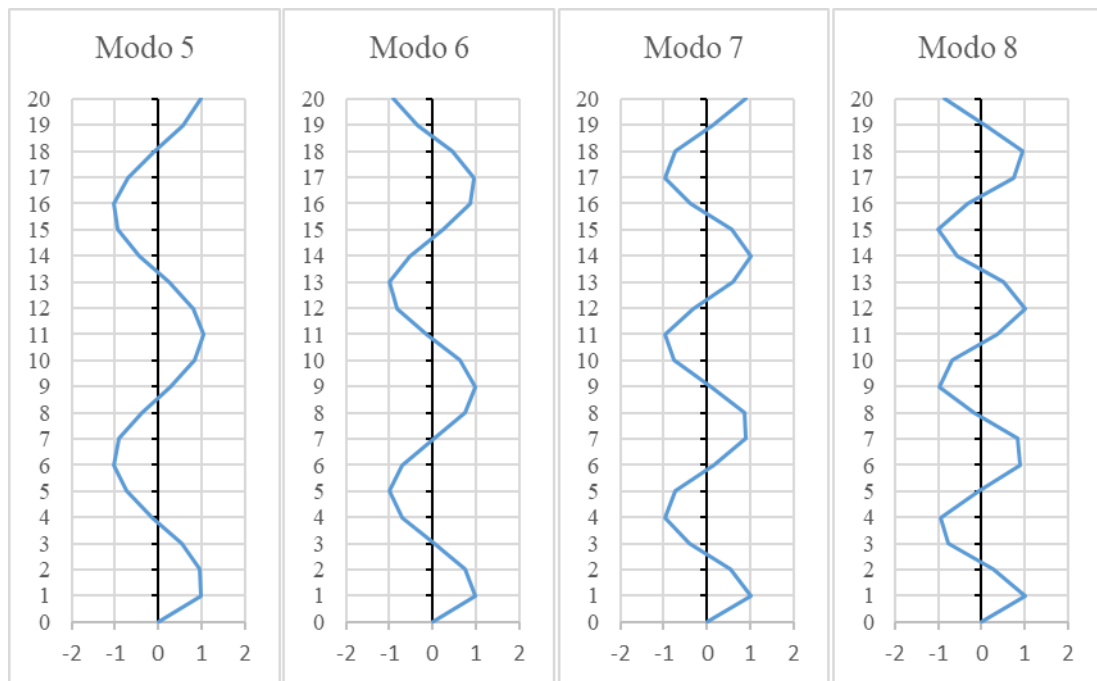


Figura 22. Modos de vibración (5-8) de la estructura de 20 niveles.
Fuente: Elaboración propia

Se aprecia un modelo simplificado de una estructura de 20 grados de libertad. Si bien este sistema no refleja fielmente el comportamiento dinámico de una estructura real, es el punto de partida para evaluar la efectividad de los Amortiguadores de Masa Sintonizados.

Se incrementó la masa de la estructura, a fin de que el periodo sea semejante al periodo natural de una estructura real de 20 niveles. Se adicionaron 2 platinas de acero de 0.180 kg, para cada uno de los niveles de la estructura, con la finalidad de que no afecte la respuesta estructural del modelo en estudio.

Si bien se tenía planeado construir 3 modelos estructurales para los 3 casos: caso 1 estructura sin AMS, caso 2 estructura con AMS convencional y caso 3 estructura con AMS pendular, se construyó un solo modelo a escala con el último nivel acoplable. Esto con la finalidad de no alterar la respuesta estructural del modelo, ya que este puede variar por el proceso constructivo.

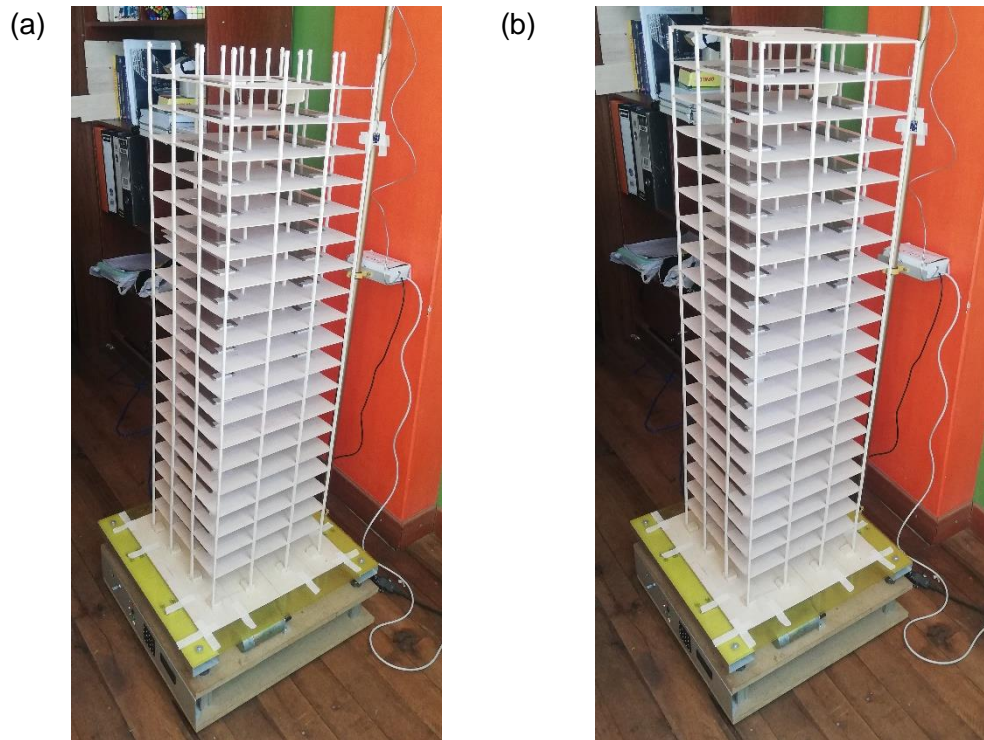


Figura 23. a) Estructura sin último nivel, b) Estructura con acoplamiento del último nivel.
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo anterior, se muestra el peso propio de la estructura correspondiente a los elementos estructurales (columnas y losas), y el peso de las platinas de acero, para cada uno de los niveles de la estructura.

Tabla 5
Peso de Estructura

Nivel	Peso propio [kg]	Peso de platinas [kg]	Peso total por nivel [kg]
1	0.034	0.360	0.394
2	0.032	0.360	0.392
3	0.032	0.360	0.392
4	0.032	0.360	0.392
5	0.032	0.360	0.392
6	0.032	0.360	0.392
7	0.032	0.360	0.392
8	0.032	0.360	0.392
9	0.032	0.360	0.392
10	0.032	0.360	0.392
11	0.032	0.360	0.392
12	0.032	0.360	0.392
13	0.032	0.360	0.392

14	0.032	0.360	0.392
15	0.032	0.360	0.392
16	0.032	0.360	0.392
17	0.032	0.360	0.392
18	0.032	0.360	0.392
19	0.032	0.360	0.392
20	0.032	0.360	0.392
Peso total Estructura			7.846

Fuente: Elaboración propia

Aplicación de amortiguadores de masa sintonizados

Una vez definida las propiedades estructurales y el comportamiento dinámico de la estructura en estudio, se procede con la aplicación de los Amortiguadores de Masa Sintonizados, por lo que es necesario definir los parámetros óptimos, requisitos de diseño, propiedades, geometría, entre otros puntos que serán detallados a continuación.

3.1.7. Condiciones óptimas de los AMS.

Para la determinación de las condiciones óptimas de los AMS, tanto para el tipo convencional y el tipo pendular, se consideraron los siguientes criterios, de acuerdo al método propuesto por Den Hartog, presentado en la sección 2.5.2.

En este trabajo se decidió trabajar con $\mu=5\%$, ya que está dentro del rango de valores que se han observado en la literatura y es un valor conservador teniendo en cuenta los problemas estructurales y constructivos de trabajar con valores mayores.

- Se adoptó una masa equivalente al 5% de la masa total de la estructura. Lo que viene a ser $\mu=0.05$

Para la determinación de las condiciones de sintonización de los amortiguadores (AMS) se consideraron lo siguientes criterios, de acuerdo a la tabla 1 presentado en la sección 2.5.2.

- Se adoptó una relación de frecuencias entre AMS y estructura igual a:

$$f_{\text{óptimo}} = \frac{1}{1+0.05} = 0.952 \text{ (sintonía perfecta). Calculada según la ecuación (24)}$$

- Se adoptó una razón de amortiguamiento entre AMS y estructura igual a:

$$\xi_{a,\text{óptimo}} = \sqrt{\frac{3(0.05)}{8(1+0.05)^3}} = 0.127 \text{ lo que equivale a una 12.7\% (amortiguamiento}$$

perfecto). Calculada según la ecuación (25)

3.1.7.1. Cálculo de masa.

La masa “ m ” corresponde al 5% del peso total de la estructura indicado en la tabla

5. Por lo tanto, la masa “ m ”, se calcula según la ecuación (19), es la siguiente:

$$m = 0.05 \times 7.846$$

$$m = 0.3923 \text{ kg}$$

3.1.7.2. Cálculo de rigidez.

La rigidez del AMS se calcularon a partir de las ecuaciones que propuso Den Hartog, relacionando el periodo del AMS (desconocido) y el periodo de la estructura (conocido).

La rigidez de cada AMS corresponde a la suma de las rigideces horizontal de los resortes, la cual se calcula según la ecuación (24).

$$f_{\text{óptimo}} = \frac{f_a}{f_E}$$

Usando la ecuación (9) y (10) descrito en la sección 2.3.4., se deduce los siguiente.

$$\frac{f_a}{f_E} = \frac{\frac{1}{T_a}}{\frac{1}{T_E}} = \frac{T_E}{T_a} = \frac{T_E}{2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}}$$

Relacionando ecuaciones obtenemos el valor de k .

$$\frac{1.751 \text{ s}}{2\pi\sqrt{\frac{0.0003999 \frac{s^2}{cm} kg}{k}}} = \frac{1}{1+0.05}$$

$$k = 0.00466 \frac{kg}{cm}$$

3.1.7.3. Cálculo de amortiguamiento .

Con los datos obtenidos en los puntos anteriores y considerando un factor de amortiguamiento óptimo para el sistema igual a 12.7%, el amortiguamiento del AMS se calculó según la ecuación (22), descrito en la sección 2.5.2.

$$\xi_{a, \text{óptimo}} = \sqrt{\frac{3(0.05)}{8(1+0.05)^3}} = 0.127$$

$$c_a = 2 \times 0.127 \times \sqrt{\frac{0.00466 \frac{kg}{cm}}{0.0003999 \frac{s^2}{cm} kg} \times 0.0003999 \frac{s^2}{cm} kg}$$

$$c_a = 0.000347 \frac{kg \cdot s}{cm}$$

Según los cálculos realizados se observó que la rigidez y el amortiguamiento son valores mínimos $k, c_a \approx 0$, por lo que se decidió trabajar con resortes, que puedan aportar rigidez y amortiguamiento, requerido para el sistema de AMS.

3.1.8. Diseño del amortiguador de masa sintonizada convencional.

Tal como se indicó en la sección 2.5., el sistema del Amortiguador de masa sintonizada convencional se conformó por dos resortes, de comportamiento lineal, que entregan rigidez y amortiguamiento al sistema AMS, y un bloque de acero que aporta la masa requerida. Todos estos elementos permiten confeccionar un sistema de control pasivo de respuesta sísmica (AMS) provisto de masa, rigidez y amortiguamiento.

En la figura 24 y 25 se muestra el diseño final del sistema AMS convencional, utilizado en el desarrollo de la presente investigación.

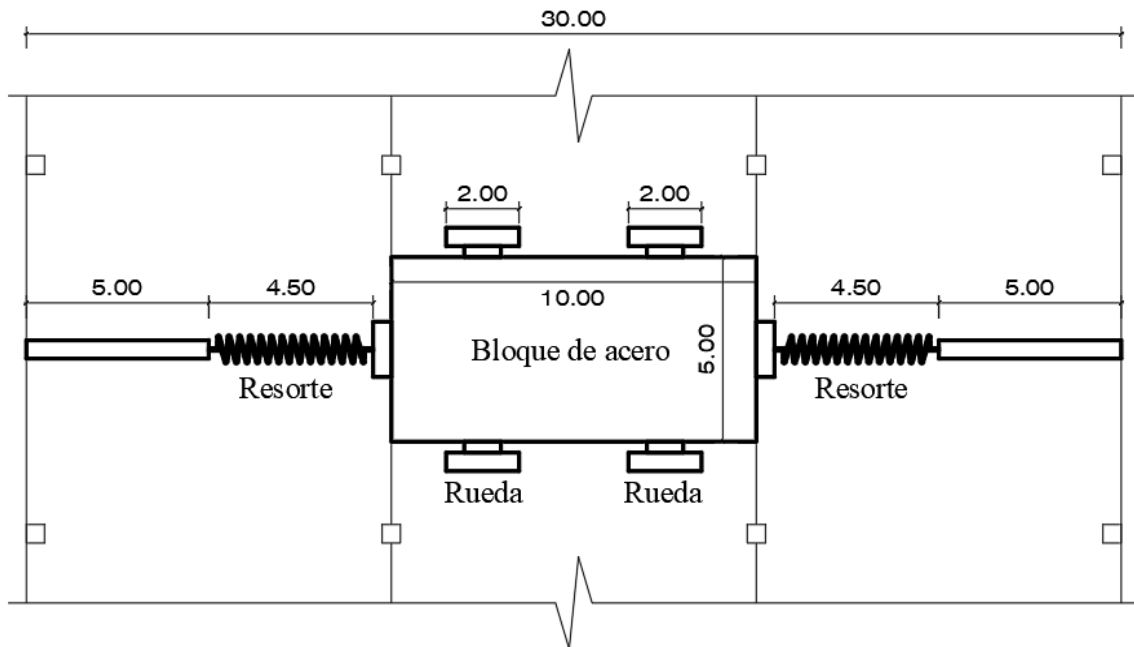


Figura 24. Vista en planta, del AMS de tipo convencional.
Fuente: Elaboración propia

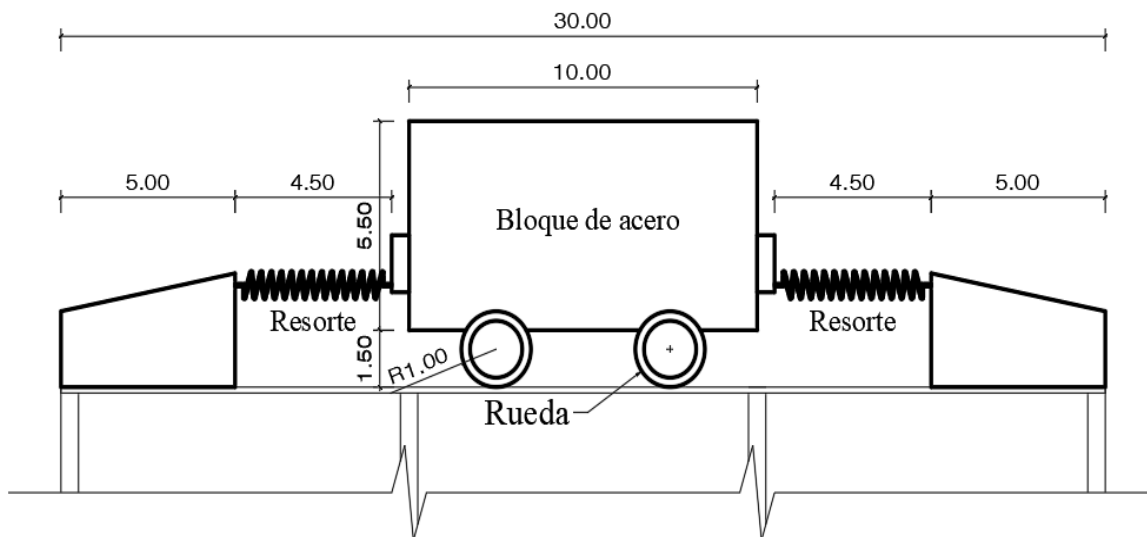


Figura 25. Vista en elevación, del AMS de tipo convencional.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 26 se muestra la construcción y acoplamiento del AMS de tipo convencional, en el último nivel de la estructura.

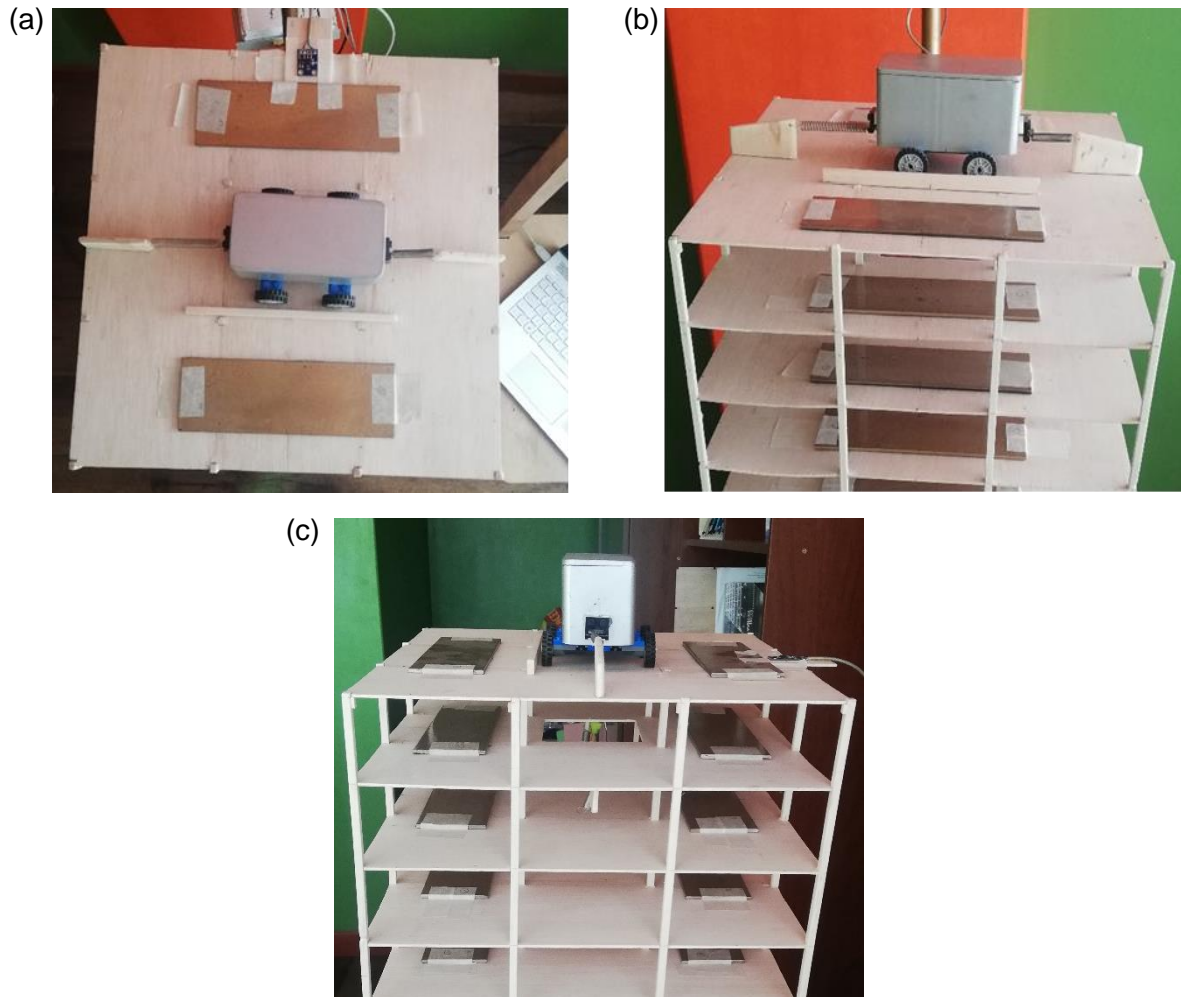


Figura 26. a) Vista en planta, b) vista frontal, c) vista lateral, del AMS de tipo convencional.
Fuente: Elaboración propia

3.1.9. Diseño del amortiguador de masa sintonizado pendular.

Tal como se indicó en la sección 2.5.2.1., el sistema del Amortiguador de masa sintonizada pendular se conformó por una cuerda, dos resortes, de comportamiento lineal, que entregan rigidez y amortiguamiento al sistema AMS, y una esfera de acero, que aporta la masa requerida. Todos estos elementos permiten confeccionar un sistema de control pasivo de respuesta sísmica AMS provisto de masa, rigidez y amortiguamiento.

De acuerdo a lo anterior el diseño de los AMS se dividirá en dos partes; diseño de la rigidez y amortiguamiento (resortes), realizado en la sección 3.6.1., y la longitud de la cuerda de la que estará suspendida la masa.

3.1.9.1. Cálculo de la longitud de cuerda.

Utilizando la ecuación (9), calculamos el periodo del AMS.

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{0.0003999 \frac{s^2}{cm} kg}{0.00466 \frac{kg}{cm}}}$$

$$T_a = 1.841 \text{ s}$$

Utilizando la ecuación (32), calculamos la longitud de cuerda.

$$1.841 \text{ s} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{981 \frac{cm}{s^2}}}$$

$$L = 84.22 \text{ cm}$$

En la figura 27 y 28 se muestra el diseño final del sistema AMS convencional, utilizado en el desarrollo de la presente investigación.

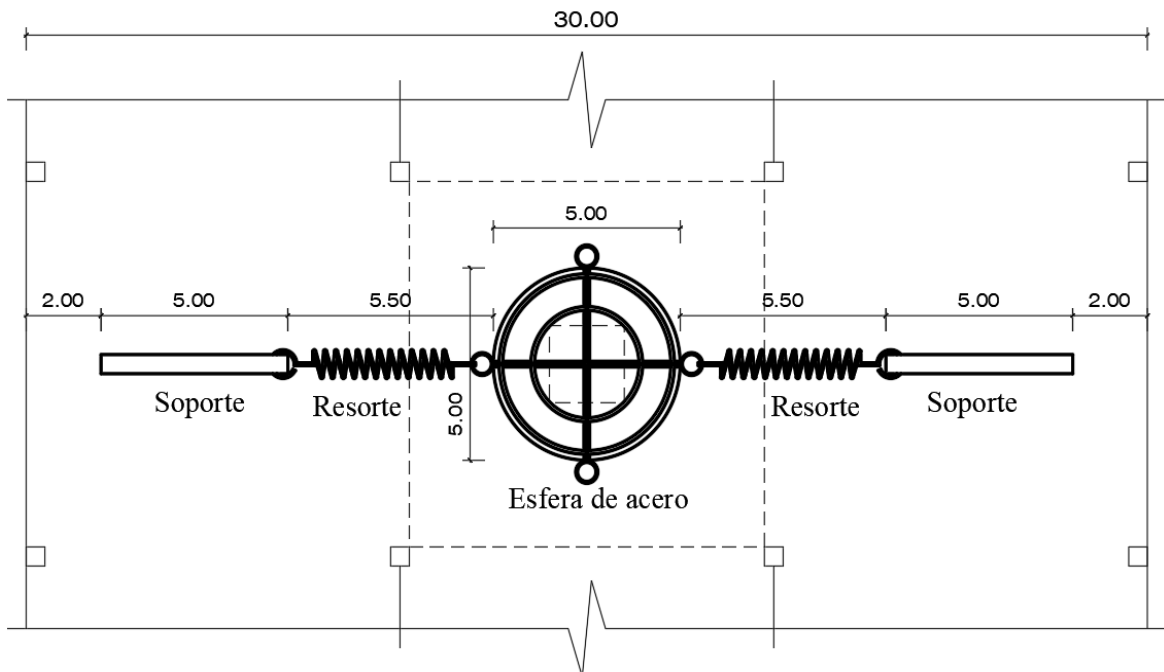


Figura 27. Vista en plata, del AMS de tipo pendular.
Fuente: Elaboración propia

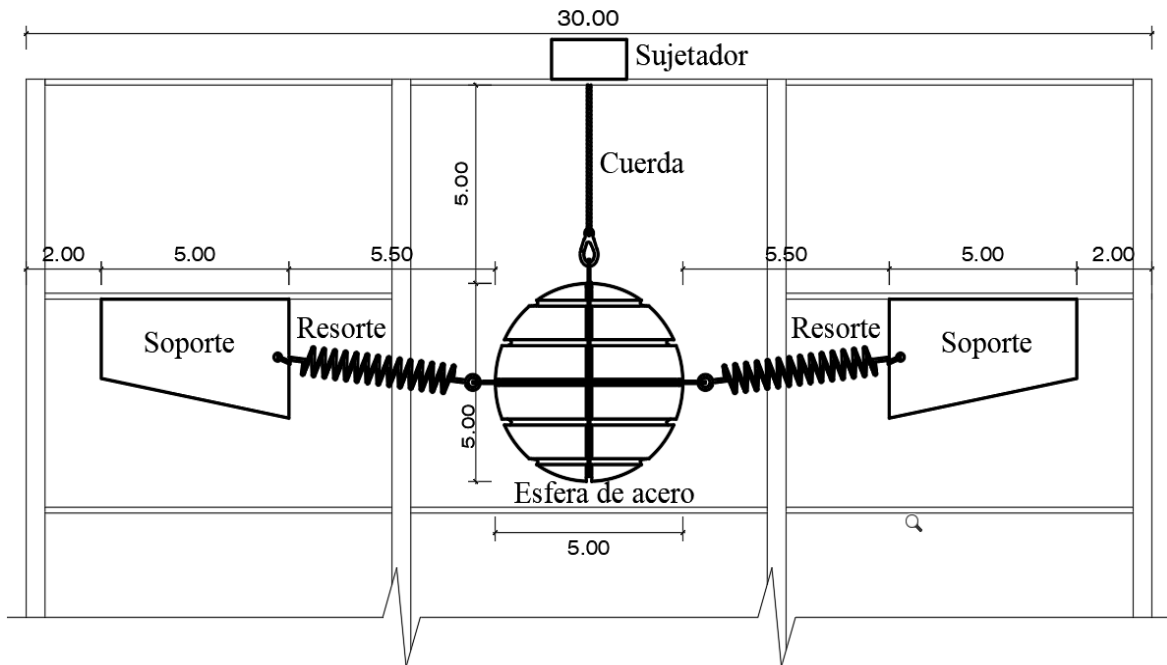


Figura 28. Vista en elevación, del AMS de tipo pendular.
Fuente: Elaboración propia

Se sabe que la longitud calculada es de 84.22 cm cuyo valor en escala de 1/50 es de 1.68 cm, sin embargo, en la figura 28 la longitud de la cuerda es de 5 cm, siendo esta la longitud óptima para nuestro modelo.

En la figura 29 se muestra la construcción y acoplamiento del AMS de tipo pendular, en el último nivel de la estructura.

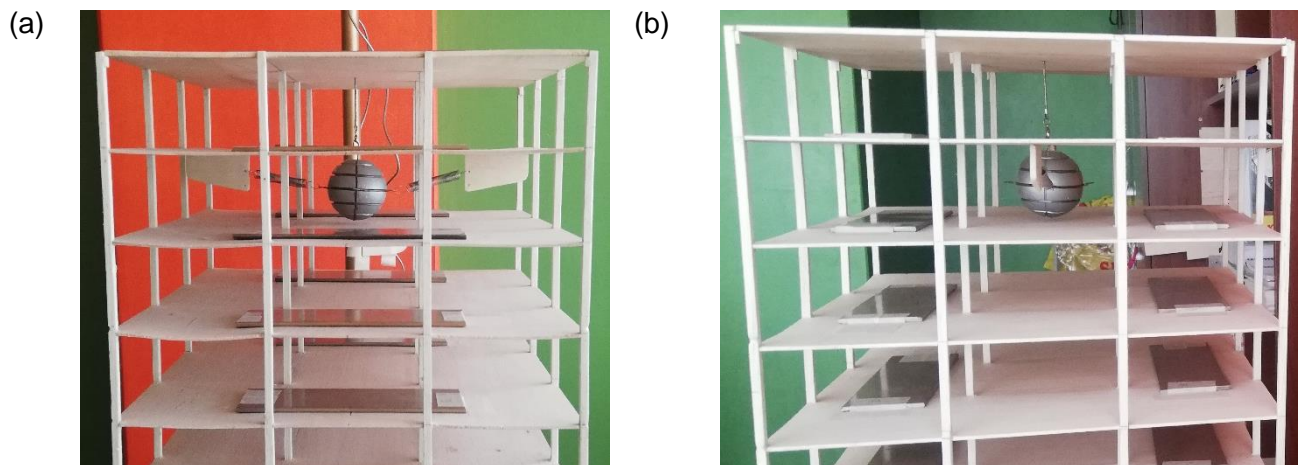


Figura 29. a) Vista frontal, b) vista lateral, del AMS de tipo pendular.
Fuente: Elaboración propia

Acelerograma

Para poder realizar uso y seleccionar un acelerograma adecuado para las pruebas a realizarse en la mesa vibratoria, se utilizó un datálogo de los sismos más representativos del Perú, los cuales se produjeron entre los años 1951 y 1974; además cuyos valores fueron usados para la elaboración de la norma E-030 sismo-resistente ver Figura 30.

DATALOGO DE SISMOS PERUANOS

COD	FECHA	DENOMINACION	COMPONENTE	DATA	PGA	PGV	PGD
7031	31-Ene-51	1639 GCT	VERTICAL	1479	18.66	-0.54	-0.29
7032	31-Ene-51	1639 GCT-N82W	HORIZONTAL	1478	-60.44	-1.65	-0.31
7033	31-Ene-51	1639 GCT-NO8W	HORIZONTAL	1480	45.70	0.92	0.15
7034	17-Oct-66		VERTICAL	3284	94.25	10.61	13.50
7035	17-Oct-66	N82W	HORIZONTAL	3283	-180.59	13.23	7.35
7036	17-Oct-66	NO8E	HORIZONTAL	3282	-269.34	-21.60	-16.60
7037	31-May-70		VERTICAL	2252	73.52	4.51	1.48
7038	31-May-70		HORIZONTAL	2259	-104.82	4.71	1.55
7039	31-May-70		HORIZONTAL	2259	-97.75	6.98	2.64
7040	29-Nov-71		VERTICAL	2004	23.00	1.17	0.56
7041	29-Nov-71	N82W	HORIZONTAL	2010	53.55	4.08	1.74
7042	29-Nov-71	NO8E	HORIZONTAL	2010	86.54	-4.22	-1.25
7043	5-Ene-74		VERTICAL	1805	-30.32	-2.04	0.66
7044	5-Ene-74	N82W	HORIZONTAL	1804	66.76	4.03	0.59
7045	5-Ene-74	NO8E	HORIZONTAL	1804	-72.28	-2.15	-0.45
7046	5-Ene-74	ZARATE L	HORIZONTAL	1641	-139.59	3.23	1.30
7047	5-Ene-74	ZARATE V	VERTICAL	1641	-77.10	-2.27	0.76
7048	5-Ene-74	ZARATE V	HORIZONTAL	1642	-156.18	4.40	1.08
7049	3-Oct-74	1421 GCT	VERTICAL	4899	99.75	-7.03	-5.81
7050	3-Oct-74	1421 GCT NO8E	HORIZONTAL	4899	178.95	10.30	-5.34
7051	3-Oct-74	1421 GCT N82W	HORIZONTAL	4899	-192.49	14.48	6.41
7052	3-Oct-74	1421 GCT N82W	HORIZONTAL	4879	192.35	-20.48	7.93
7053	3-Oct-74	1421 GCT	VERTICAL	4879	-126.32	12.00	-4.61
7054	3-Oct-74	1421 GCT	HORIZONTAL	4879	-207.12	16.94	8.03
7055	9-Nov-74		VERTICAL	2390	-28.00	-3.24	-1.79
7056	9-Nov-74		HORIZONTAL	2392	46.21	-3.60	1.80
7057	9-Nov-74		HORIZONTAL	2391	-69.21	-4.91	-1.81
7058	9-Nov-74	LA MOLINA	HORIZONTAL	1972	-116.78	-7.89	2.43
7059	9-Nov-74	LA MOLINA	VERTICAL	1972	-41.26	5.33	2.59
7060	9-Nov-74	LA MOLINA	HORIZONTAL	1971	-93.71	-5.35	1.28

PGA: cm/seg²

PGV: cm/seg

PGD: cm

Figura 30. Lista de sismos entre los años 1951-1974.

Fuente: Centro Sismológico del Perú

Del listado anterior se toma en cuenta los siguientes acelerogramas:

a) *Acelerograma La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058)*

Se presenta su registro sísmico en la Figura 31

b) *Acelerograma Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046)*

Se presenta su registro sísmico en la Figura 32

c) *Acelerograma Huaraz (Ancash 1970 – Cod. 7039)*

Se presenta su registro sísmico en la Figura 33

Con el fin de poder realizar el ensayo de desplazamientos sobre la mesa vibratoria, aplicada al modelo a escala reducida en el presente trabajo de investigación.

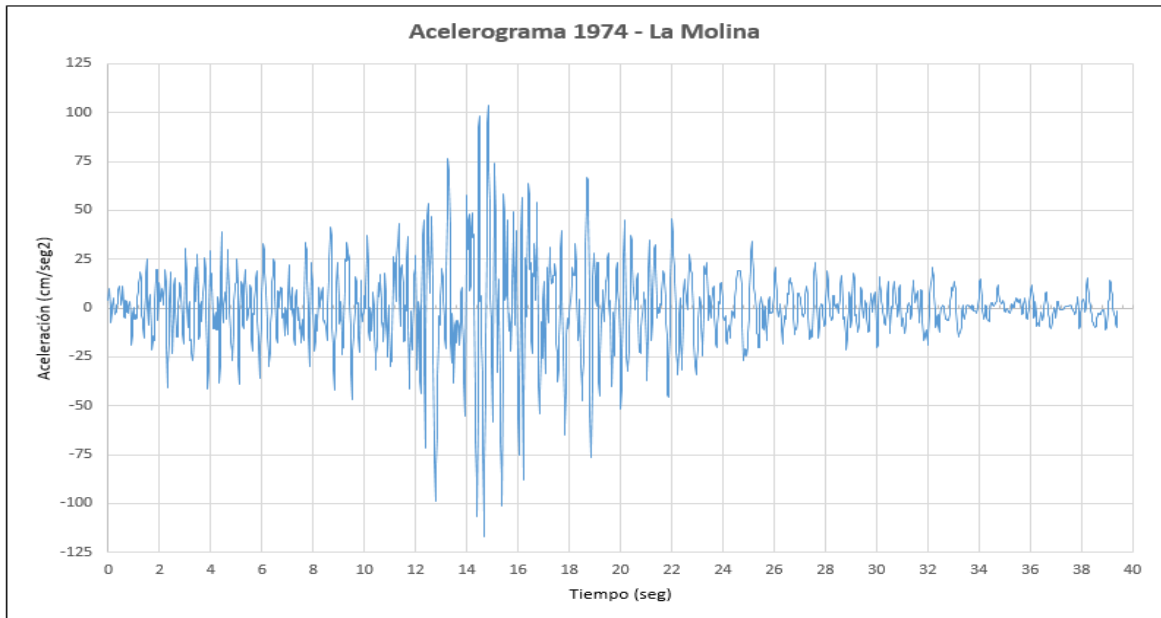


Figura 31. Acelerograma La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058).
Fuente: Elaboración propia

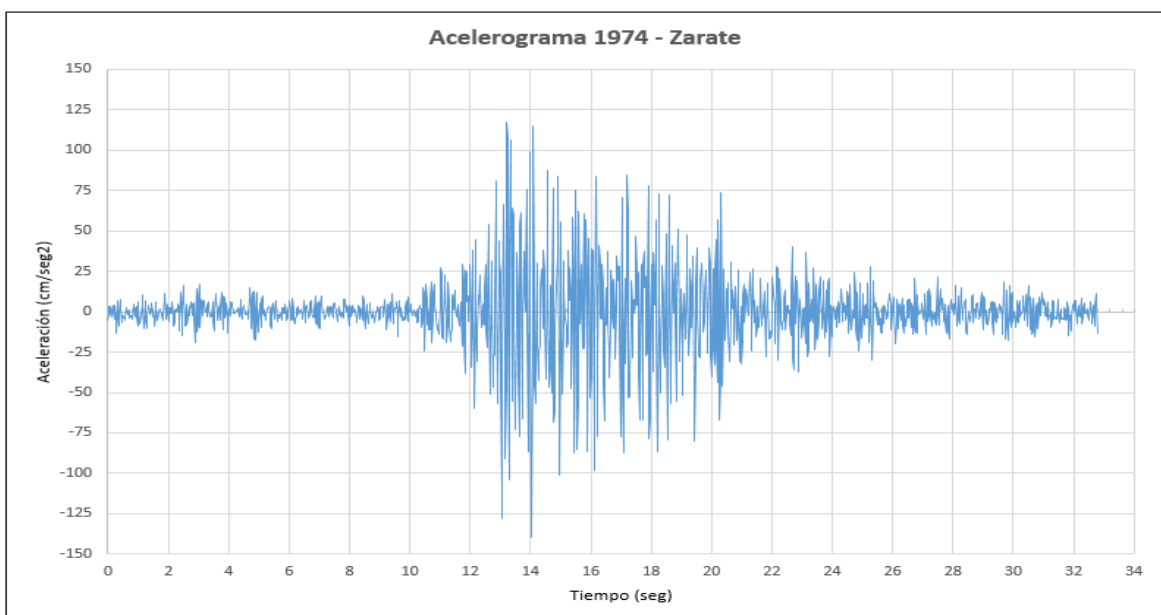


Figura 32. Acelerograma Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).
Fuente: Elaboración propia

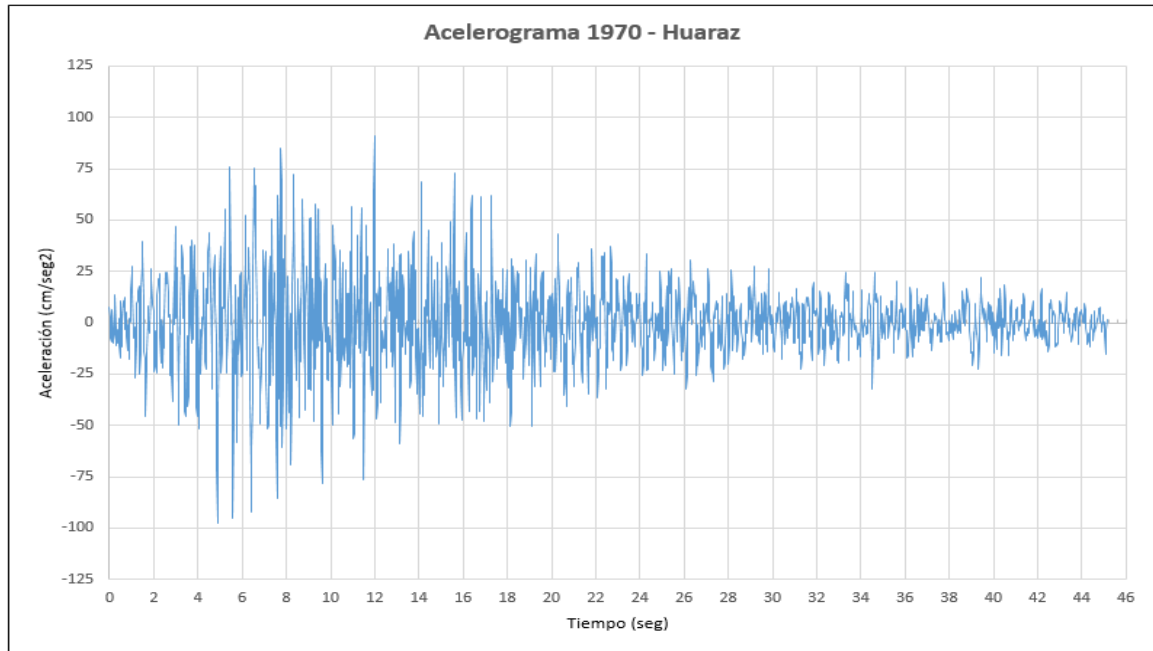


Figura 33. Acelerograma Huaraz (Ancash 1970 – Cod. 7039).
Fuente: Elaboración propia

3.1.10. Tratamiento de acelerograma.

Considerando la literatura de la sección 2.6.1., se realizó el tratamiento del acelerograma con el software SeismoSignal V4.3, que nos permitió obtener la aceleración, velocidad y desplazamiento corregido.

En la figura 34 se muestra el ingreso de datos del acelerograma para su posterior tratamiento.

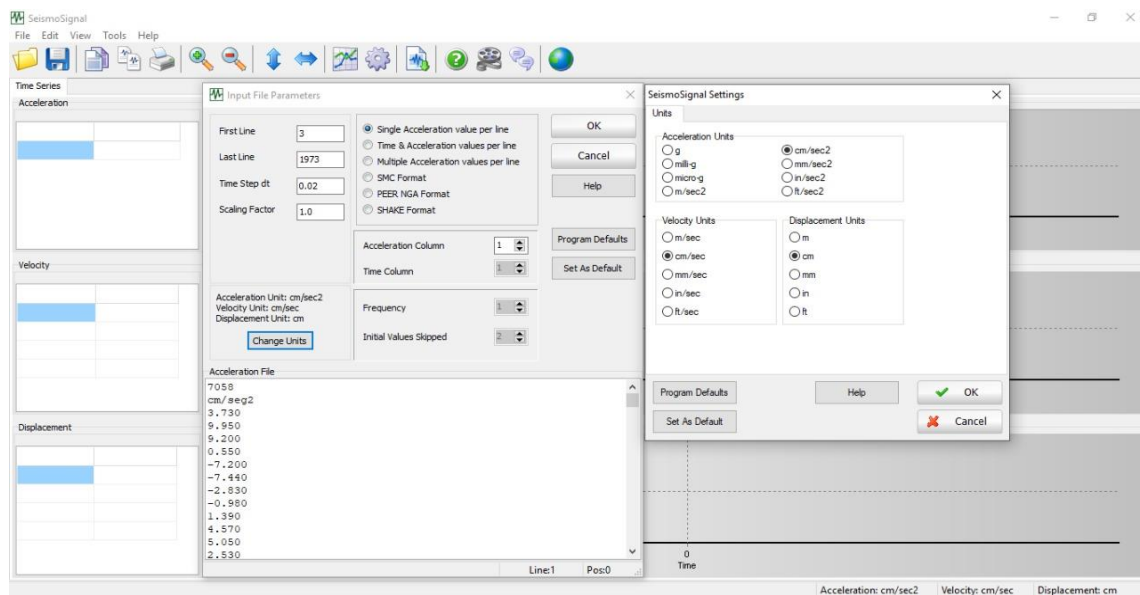


Figura 34. Ingreso de datos del acelerograma para su tratamiento.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 35 el software muestra la gráfica de aceleración, velocidad y desplazamiento real.

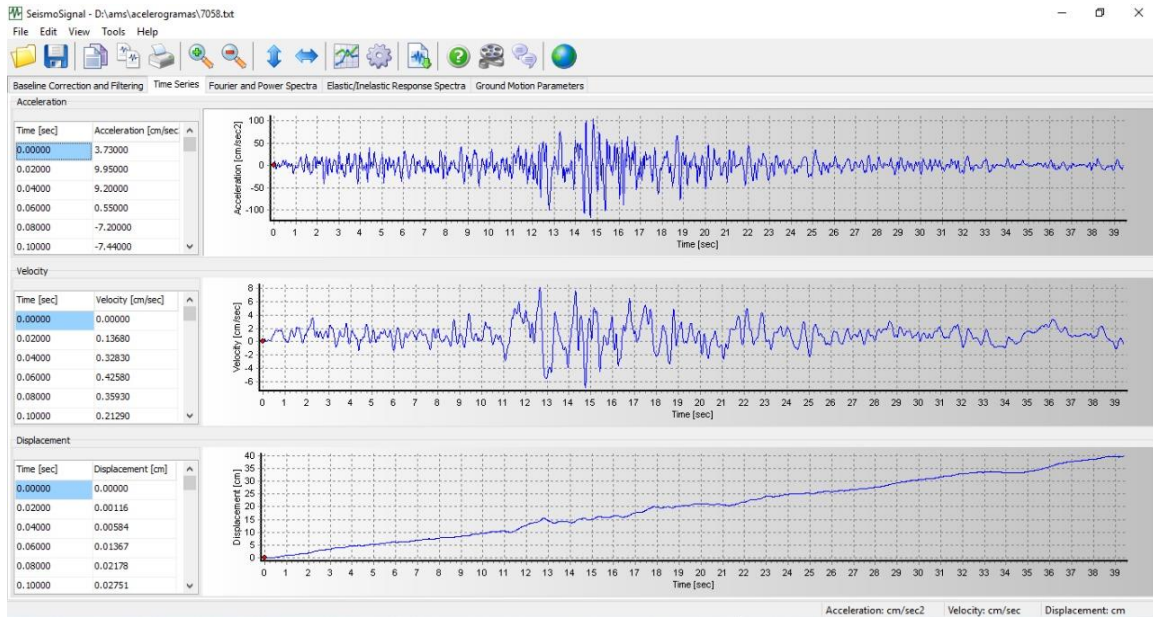


Figura 35. Grafica de aceleración, velocidad y desplazamiento real.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 36 se muestra las correcciones aplicadas al acelerograma.

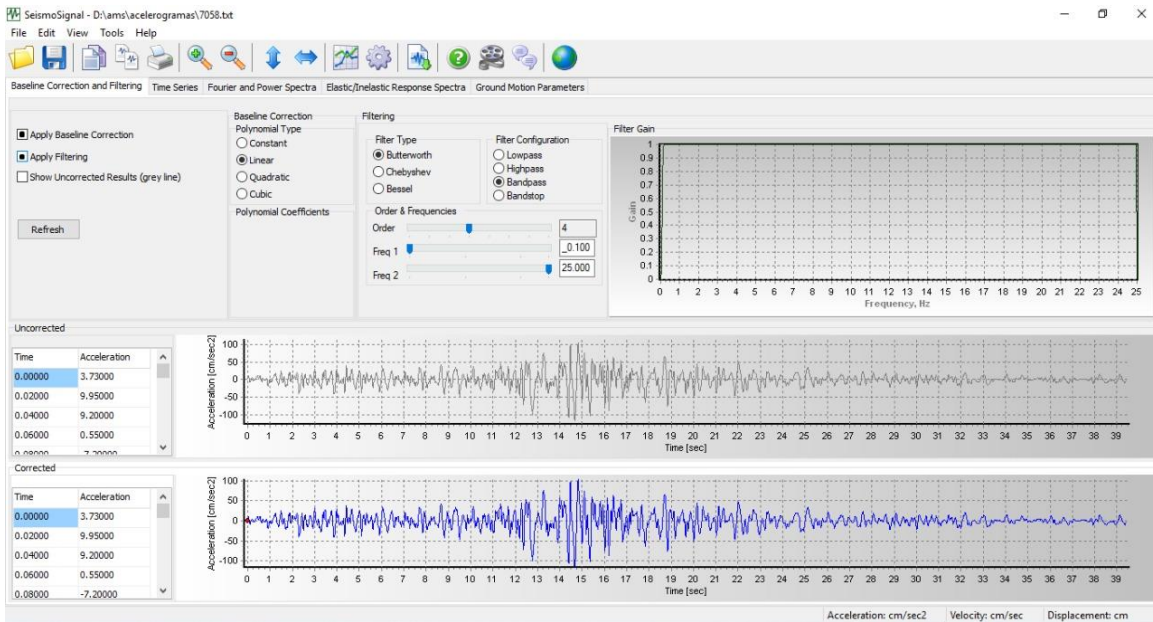


Figura 36. Corrección de Acelerograma.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 37 se muestra el acelerograma corregido del sismo La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058)

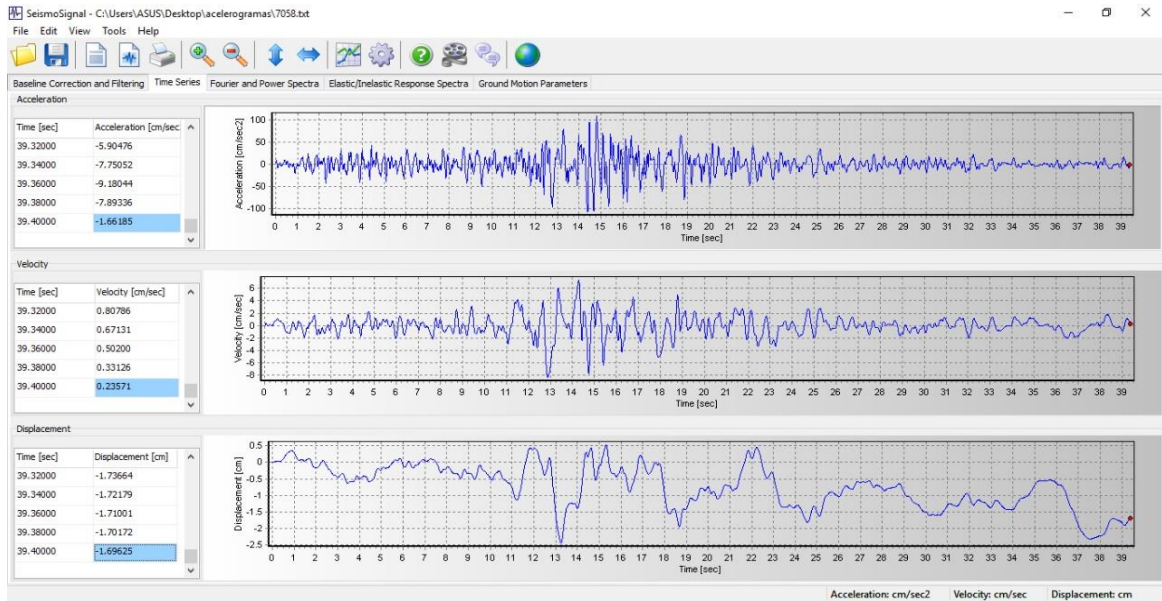


Figura 37. Acelerograma corregido.
Fuente: Elaboración propia

Para los acelerogramas; Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046) y Huaraz (Ancash 1970 – Cod. 7039), se realizó el mismo tratamiento.

Construcción de la mesa vibratoria

Se construyó una mesa vibratoria de un grado de libertad con aplicación en el estudio de estructuras sismorresistentes, permitiendo validar y complementar modelos dinámicos estructurales mediante la simulación de efectos sísmicos en estructuras a escala reducida.

Primeramente, se escogió los valores de aceleración (acelerograma), velocidad, desplazamiento, según las condiciones sísmicas del territorio peruano. Luego, para la construcción de la mesa vibratoria se estimó la capacidad de carga, definiéndose así los componentes mecánicos y electrónicos de la mesa para su automatización.

La mesa vibratoria construida tiene los siguientes parámetros:

Tabla 6

Parámetros de diseño de la mesa vibratoria.

Parámetros	Descripción
Grados de libertad	1 (horizontal)

La programación es la siguiente:

```
/* ***** Incluyendo Librerias ***** */  
  
#include <SD.h> //Tarjeta SD  
  
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // LCD por I2C  
  
#include <Wire.h> //comunicación I2C  
  
#include <Keypad.h> //Teclado  
  
#include <TimerOne.h> //Temporizador  
  
//PINES Y CONTROL DE MOTOR DC  
  
const byte motorPWM = 45; // Salida PWM a la patilla del motor a través de un  
puente  
  
const byte motorOut1 = 47; // 1ra salida del motor puente H.  
const byte motorOut2 = 49; // 2da salida del motor puente H.  
  
//Entradas Encoder  
  
const byte encA = 2; // Entrada de la señal A del encoder Interr. 0.  
const byte encB = 3; // Entrada de la señal B del encoder Interr. 1.  
  
//Variables Globales PID  
  
// ***** Parametros PID *****  
  
unsigned long lastTime = 0, SampleTime = 0; // Variables de tiempo.  
  
double Input = 0.0, Setpoint = 0.0; // Variables de posición del motor y posición  
designada  
  
double ITerm = 0.0, dInput = 0.0, lastInput = 0.0;  
  
// Variables de error integral, error derivativo y posición anterior  
  
double kp = 0.0, ki = 0.0, kd = 0.0; // Constantes: proporcional, integral y  
derivativa.  
  
double outMin = 0.0, outMax = 0.0; // Límites para no sobrepasar la resolución del  
PWM.
```

```

double error = 0.0;

// Desviación o error entre la posición real del motor y la posición designada.

double Out = 0.0;

// ***** Otras Variables PID *****

volatile long contador = 0; // Aquí se guarda los pulsos del encoder (distancia o
ángulo).

byte ant = 0, act = 0; // Sólo se usa los dos primeros bits de estas variables y
servirán para decodificar el encoder. (ant=anterior, act=actual)

byte cmd = 0; // Un byte que utilizamos para la comunicación serie.
(cmd=comando.)

byte pwm = 0; // Es el PWM, se transformará en voltaje real en las bobinas de los
motores.

//Variables Globales Posicionar-PID

// ***** Parametros PID *****

unsigned long lastTimeP = 0, SampleTimeP = 0; // Variables de tiempo.

double InputP = 0.0, SetpointP = 0.0;

// Variables de posición del motor y posición designada

double ITermP = 0.0, dInputP = 0.0, lastInputP = 0.0;

// Variables de error integral, error derivativo y posición anterior

double kpP = 0.0, kiP = 0.0, kdP = 0.0; // Constantes: proporcional, integral y
derivativa.

double outMinP = 0.0, outMaxP = 0.0;

// Límites para no sobrepasar la resolución del PWM.

double errorP = 0.0;

// Desviación o error entre la posición real del motor y la posición designada.

double OutP = 0.0;

// ***** Otras Variables Posicionar-PID *****

```

volatile long contadorP = 0; // Aqui se guarda los pulsos del encoder (distancia o ángulo).

byte antP = 0, actP = 0; // Sólo se usa los dos primeros bits de estas variables y servirán para decodificar el encoder. (ant=anterior, act=actual)

byte pwmP = 0; // Es el PWM, se transformará en voltaje real en las bobinas de los motores.

```
double local = 0.0;
```

```
// ***** Mas Variables *****
```

```
int flagInManualA = 0; //para modo Manual
```

```
int tau = 0; //Para potenciómetro
```

```
int flagPID = 0; //para pid
```

```
double valAUT = 0; //Para PWM de automatico
```

```
double a = 0, b = 0; //Tolerancia en posicionamiento
```

```
byte Signo = 0; //1=positivo , 0=negativo
```

```
byte otraLect = 0; //1=Mover , 0=parar
```

```
// ***** Variables Retardo en Automatico *****
```

```
int periodo = 0; // tiempo de espera retardo en automatico
```

```
byte temporizador = 0; //estado del temporizador, 1= activo 0= inactivo
```

```
unsigned long tiempoAnterior = 0; //guarda tiempo de referencia para comparar
```

```
byte flagRetardo = 0; //estado retardo , 1 = deactivo 0 = activo
```

```
//Entrada cambio Nivel LCD
```

```
int entradaNivel = 19; //Interrupcion 4.
```

```
//Entrada analogica potenciómetro
```

```
const int potenciómetro = A0; //Entrada analogica
```

```
//Leds Indicativos
```

```
//*****Modo Funcionamiento*****
```

```
int ledModoR = 23; //No usado
```

```

int ledModoV = 25; //Automatico

int ledModoA = 27; //Manual

//*****Tarjeta SD*****

int ledSDR = 22; //Error

int ledSDV = 24; //Encontrado

int ledSDA = 26; //Leyendo SD

//*****Posicionar-Iniciar*****

int ledPosIR = 29; //Movimiento por teclado

int ledPosIV = 31; //Posicionamiento

int ledPosIA = 33; //Iniciar

//Botones

int btnOrigen = 4; //btn origen.

int btnIniciar = 46; //btn empezar automatico.

int btnModo = 44; //btn modo uso.

int btnPosicionar = 48; //btn posicionar.

//LECTURA BOTONES

int readPosicion = 1; //Asignando lectura x pull-up

int readIniciar = 1; //Asignando lectura x pull-up

int readOrigen = 1; //Asignando lectura x pull-up

//VARIABLES PARA TARJETA SD

File archivo;

File myFile; //Objeto para leer datos de tarjeta SD

String archivoSD = "Pruebas1.txt";

String archivoSD1 = "Pruebas2.txt";

String archivoSD2 = "Pruebas3.txt";

int LectPosSD = 0; //Lectura # de lineas en SD

int UltimaPocicion = 0; //Último dato

```

```

int flagA = 0;      //Flag indicativo
int flagB = 0;      //Flag indicativo
int Tope;          //Tope numero de lineas a leer
int flagBloqLect = 0; //Parar Lectura de tarjeta SD
int datoOutSD;     //Dato leido de tarjeta SD
int datoFinalSD;   //Dato post lectura SD
int datoOutTeclado; //Dato leido de teclado
double DatoProc = 0; //Dato para el setpoint
int sdA = 0, sdB = 0;
int flagInSD = 0;

//PANTALLA LCD. npxmp
const byte mp = 16;      //Numero de columnas
const byte np = 2;      //Numero de filas
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, mp, np); //Direccion del controlador I2C con direccion
0x27

//TECLADO-KEYPAD DE ntxmt
const byte nt = 4;
const byte mt = 4;
char tabla[nt][mt] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '.', 'D'}
};
byte PinF[nt] = {10, 11, 12, 13}; //Pines de la fila
byte PinC[mt] = {6, 7, 8, 9}; //Pines de la columna
Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(tabla), PinF, PinC, nt, mt);

//VARIABLES PARA LCD Y KEYPAD

```

```

float numB = 0;

double numA = 0;

String num1;

int tamano = 0;

int tamano1 = 0;

byte cualnum = 0;

boolean haypunto = 0;

boolean haysigno = 0;

int flagLCDNivel = 0; //para lcd

//FLAG USADAS

boolean flagPanelA = 0; //Flag

boolean flagPanelM = 0; //Flag

int flagCtrlMov = 0; //Flag Bloq movimiento

int flagCtrlPos = 0; //Flag bloquear lect. btn,modo,pos

int flagCentro = 0; //Flag de centro/origen

int flagONPos = 0; //Flag solo para posicionar

int flagONNuc = 0; //Flag solo para iniciar

int flagPos = 0; //Flag orden posicionar

int flagNuc = 0; //Flag orden iniciar

boolean flagModo = 0; //Flag orden modo

int flagledSD = 0; //Flag para led SD

int flagledPosl = 0; //Flag para el posicionamiento e Inicio

int flagFinPosicion = 0; //Flag para bloq posicionamiento

int flagledPosl_ledR = 0; //Flag para cambio color

int flagTeclaAsignar = 0; //Flag para activar-desactivar teclado

boolean flagTeclado = 0; //Flag activar Teclado.

boolean flagInterrT = 0; //Flag activar Inter. con Teclado

```

```
int flagBloqAutomat = 0; //Flag bloquear automatico
```

```
int flagTemporizar = 0; //Flag pequeño retardo
```

```
int flagManOFF = 0; //Flag motor manual
```

```
/* ***** Subrutinas ***** */
```

```
...1128 líneas de código mas
```

```
//esta es la secuencia repetitiva
```



```
MesaArd Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
MesaArd
/* ***** Incluyendo Librerias ***** */
#include <SD.h> //Tarjeta SD
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // LCD por I2C
#include <Wire.h> //comunicación I2C
#include <Keypad.h> //Teclado
#include <TimerOne.h> //Temporizador

//PINES Y CONTROL DE MOTOR DC
const byte motorPWM = 45; // Salida PWM a la patilla del mot
const byte motorOut1 = 47; // 1ra salida del motor puente H.
const byte motorOut2 = 49; // 2da salida del motor puente H.

//Entradas Encoder
const byte encA = 2; // Entrada de la señal A del encoc
const byte encB = 3; // Entrada de la señal B del encoc

//Variables Globales PID
// ***** Parametros PID *****
unsigned long lastTime = 0, SampleTime = 0; // Variables de
```

Figura 40. Código para la reproducción de sismos en el programador Arduino.
Fuente: Elaboración propia

3.1.12. Construcción mecánica.

Se inicia el montaje previo para el acoplamiento del motor DC de 24v HITACHI, a una faja dentada.



Figura 41. Estructura previa hecha con perfiles de aluminio.
Fuente: Elaboración propia

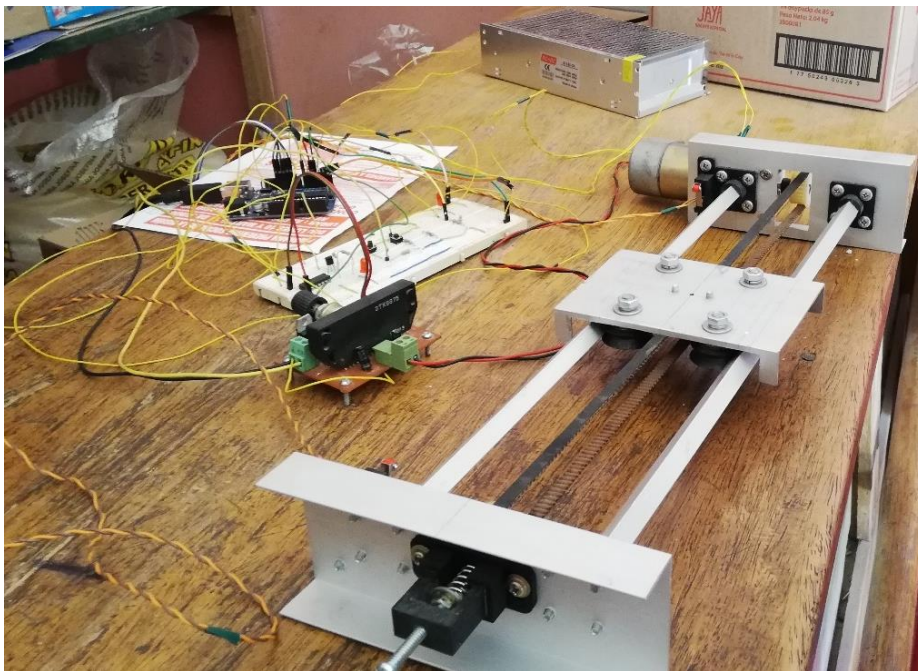


Figura 42. Se realizan pruebas del funcionamiento del motor con la estructura previa, a través del controlador.
Fuente: Elaboración propia

Se continúa con el montaje utilizando una base de MDF de $e = \frac{1}{2}$ ", guía lineal SBR10 de 350mm y rodamiento lineal SBR10UU de 10mm, tubo rectangular de aluminio de $2 \frac{1}{4}$ "x1" y policarbonato alveolar de $e = 6$ mm.

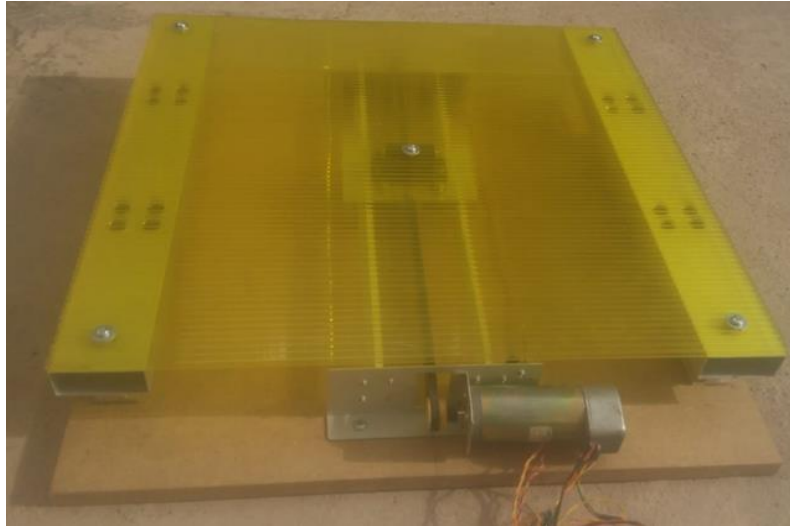


Figura 43. Finalizado del montaje de la mesa.
Fuente: Elaboración propia

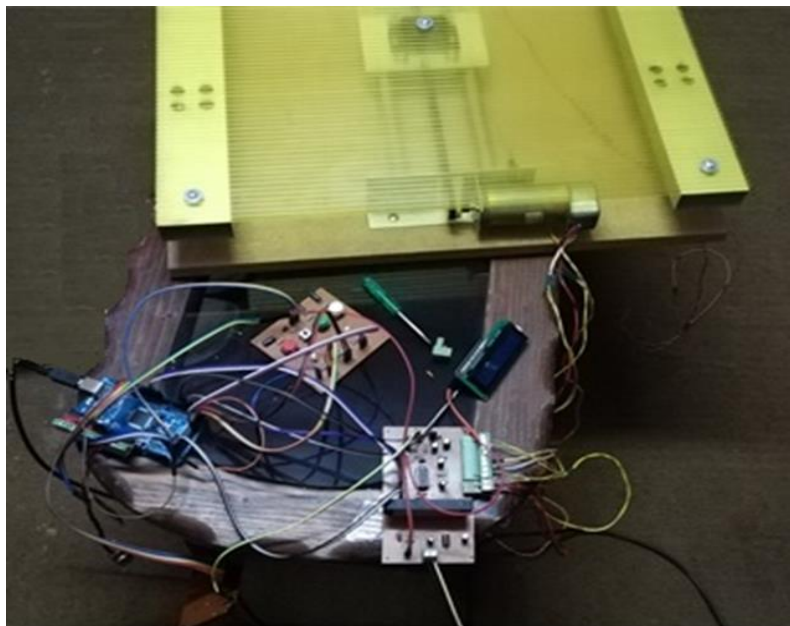


Figura 44. Se realizan pruebas del funcionamiento entre el controlador y la mesa.
Fuente: Elaboración propia

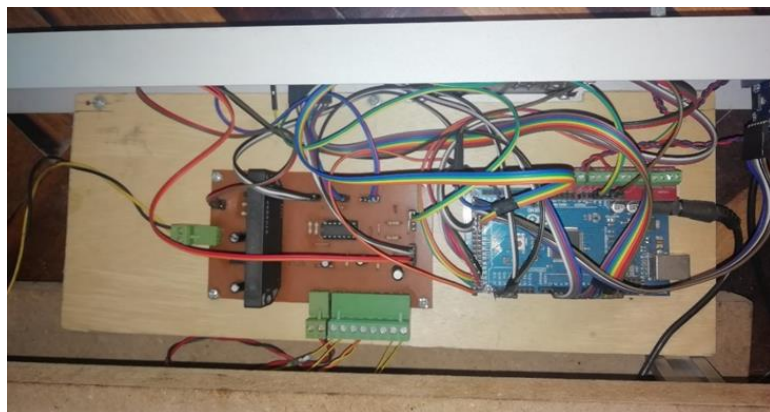


Figura 45. Ensamblaje del controlador electrónico de la mesa vibratoria.
Fuente: Elaboración propia



Figura 46. Controlador electrónico finalizado.
Fuente: Elaboración propia

Se finaliza la construcción de la mesa vibratoria con un grado de libertad, enlazando todos los componentes electrónicos y mecánicos con un ordenador, obteniéndose un sistema automatizado.



Figura 47. Mesa vibratoria finalizada.
Fuente: Elaboración propia

Diseño y ensamblaje del sistema de captura de datos

Una vez concluida la parte electrónica y mecánica de la mesa vibratoria, se procedió al diseño y ensamblaje de la parte electrónica de la captura de datos, cuya función será la de leer las aceleraciones del primer y último nivel, en el eje x. Graficarlos y obtener datos en el Software MATLAB R2014b, para su posterior análisis e interpretación, mediante integraciones sucesivas los diagramas de velocidades y diagramas de desplazamientos; finalmente se realiza una comparación entre los datos obtenidos para cada medición.

3.1.13. Hardware de captura de datos.

Para la captura de datos se utilizó los acelerómetros adxl335 analógico 3 ejes x, y, z de los cuales solo se registraremos los valores en el eje “x”.

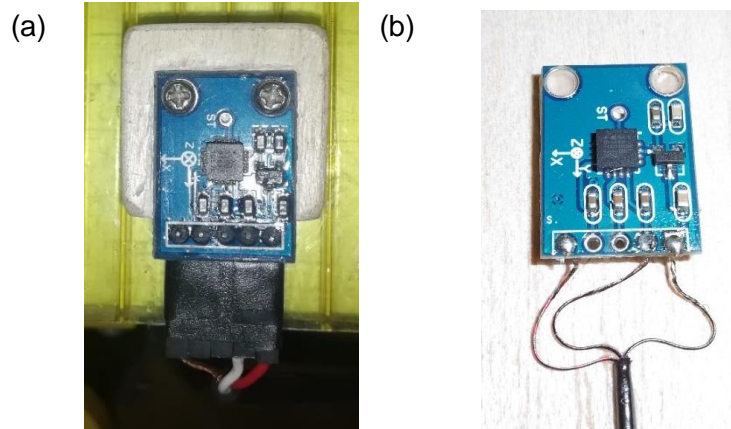


Figura 48. (a) Acelerómetro en el primer nivel, (b) Acelerómetro en el último nivel.
Fuente: Elaboración propia

El Arduino Uno se encarga de interpretar las señales enviadas por los acelerómetros montado en el primer y último nivel del modelo a escala usado.

Debido a que los sensores son sensibles a agentes externos que afectan la lectura correcta de las aceleraciones, para la cual se diseña una placa que filtra las vibraciones externas, el ruido y la temperatura.

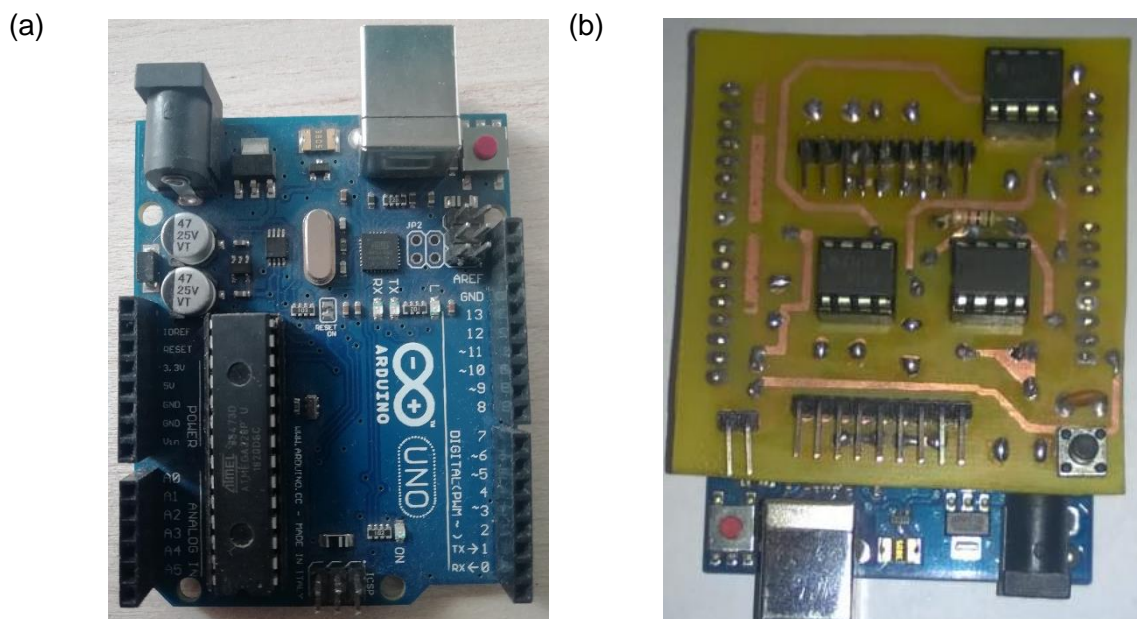


Figura 49. (a) Microprocesador Arduino Uno, (b) Placa diseñada para la instrucción y recolección de datos.
Fuente: Elaboración propia

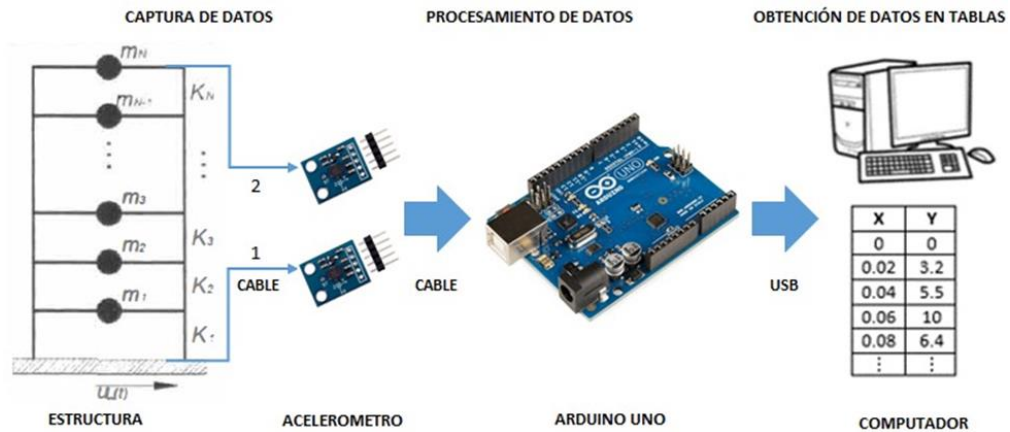


Figura 50. Sistema de adquisición de datos.
Fuente: Elaboración propia

3.1.14. Programación de captura y grafica de datos en MATLAB R2014b.

Se encarga de la recepción de señales en tiempo real de los 2 acelerómetros sobre el modelo a escala.

```
function varargout = Prueba(varargin)
% PRUEBA MATLAB code for Prueba.fig
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Captura de aceleraciones en tiempo real con Arduino
% Noemi Roxana Ayhuasi Sarmiento y Jhoel Erick Añamuro Capquequi
% Tesis 2020
%Para cambiar nombre de pantalla
set(handles.figure1,'Name','ACCELERATION GRAPH');
%borrar previo
BAUD=9600;
PUERTO='COM3';%3 9
delete(instrfind({'Port'},{PUERTO}))
clc; clear IOard;%clear all;
%crear objeto serie
IOard = serial(PUERTO,'BaudRate',BAUD,'Terminator','CR/LF');%
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
%abrir puerto
fopen(IOard);
Sensor = fscanf(IOard,'%d,%d,%d');
A1=Sensor(1);%Sensor(1);
A2=Sensor(2);
A3=Sensor(3);
fclose(IOard);
delete(IOard);
% clear IOard;
% Niveles
axisX=10;
axisY=135;
axisY1=200;
axes(handles.Graf);
title(handles.Graf,'CAPTURA DE ACELERACIÓN')
xlabel(handles.Graf,'Tiempo (seg)')
ylabel(handles.Graf,'Aceleracion (m/s^2)')%'Gráfico F(t)'
grid on
grid minor
```

```

%Piso Base
axes(handles.PrincipalG);
title(handles.PrincipalG, 'ACELERACIÓN EN LA BASE')
xlabel(handles.PrincipalG, 'Tiempo (seg)')
ylabel(handles.PrincipalG, 'Aceleracion (m/s^2)')%'Gráfico F(t)'
grid on
grid minor
%Solo boton on-off
x=imread('ROJO.png');
axes(handles.Fig);
imshow(x);
x1=imread('AZUL.png');
axes(handles.Fig1);
imshow(x1);
%Grafico sismo
x2=imread('FigSismo.jpeg');
axes(handles.grafSISMO);
imshow(x2);
%Otras variables
parar=false;
function btnON_Callback(hObject, eventdata, handles)
global t tune parar Total axisX axisY axisY1;
global valor1 valor2 bloqLect bloqUpdate;
global h1 h2 h3;
global linea1 linea2 linea3;
global output1 output2 output3;
global tau Tmax ajuste PUERTO IOard;
global A1 A2 A3 BAUD bloqTime time;
if t==0
    parar=0;
    bloqTime=0;
    bloqLect=0;
    bloqUpdate=1;
    ajuste=49.8;%33 49.3 52.3
    clear IOard;
    %borrar previos
    delete(instrfind({'Port'}, {PUERTO}))
    clc; clear IOard;%clear all;
    %crear objeto serie
    IOard = serial(PUERTO, 'BaudRate', BAUD, 'Terminator', 'CR/LF');%
    warning('off', 'MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
    %abrir puerto
    fopen(IOard);
    bloqSerie=1;
    %Reiniciando graficos
    cla(handles.Graf, 'reset');
    cla(handles.PrincipalG, 'reset');
    axes(handles.Graf);
    title(handles.Graf, 'CAPTURA DE ACELERACIÓN');
    xlabel(handles.Graf, 'Tiempo (seg)');
    ylabel(handles.Graf, 'Aceleración (cm/s^2)')%'Gráfico F(t)'
    %Piso Base
    axes(handles.PrincipalG);
    title(handles.PrincipalG, 'ACELERACIÓN EN LA BASE')
    xlabel(handles.PrincipalG, 'Tiempo (seg)')
    ylabel(handles.PrincipalG, 'Aceleracion (cm/s^2)')%'Gráfico F(t)'
    %%Definiendo lineas
    linea1=line('parent', handles.PrincipalG, 'xdata', [], 'ydata', [], 'Color',
    'r', 'LineWidth', 1.2);%1.5
    linea2=line('parent', handles.Graf, 'xdata', [], 'ydata', [], 'Color', 'k', 'L
    ineWidth', 1.2);%1.5
    linea3=line('parent', handles.PrincipalG, 'xdata', [], 'ydata', [], 'Color',
    'b', 'LineWidth', 1.2);%1.5, 'DisplayName', 'Piso2'

```

```

output=[0];
output1=[0];
output2=[0];
output3=[0];
%%Función graficar
%tiempo a graficar Grafico 1 axisX axisY
limX=[0 Tmax];% de 0 a 10 segundos
set(handles.PrincipalG,'xlim',limX);
limY=[-axisY axisY];%Eje Y -3 3
set(handles.PrincipalG,'ylim',limY);
set(handles.PrincipalG,'xgrid','on','xminorgrid','on');
set(handles.PrincipalG,'ygrid','on','yminorgrid','on');
%tiempo a graficar Grafico 2
limX=[0 Tmax];% de 0 a 10 segundos
set(handles.Graf,'xlim',limX);
limY1=[-axisY1 axisY1];%Eje Y -3 3
set(handles.Graf,'ylim',limY1);
set(handles.Graf,'xgrid','on','xminorgrid','on');
set(handles.Graf,'ygrid','on','yminorgrid','on');
%Lectura Datos
Archivo=load('Aceler.txt');
Archivo1=load('Acelerar.txt');
Total=length(Archivo);
%Total=length(load('Aceler.txt'))
%%Grafico
tune=400;%1000----/512
a=1;
k=1;
tic
while (~parar) % && Total>=k
    % tau=toc;
    time=toc;
    if (time<3600 && bloqLect==0) % <=1 hora
        % leer del puerto serie
        Lect = fscanf(IOard,'%d,%d,%d');
        A1=Lect(1);
        A2=Lect(2);
        A3=Lect(3);
        First=0;
        tiempo=linspace(0,a/94,a);%49.7
        output=[output, First];
        h1=set(linea1,'xdata',tiempo,'ydata',output(1:a));
        h2=set(linea2,'xdata',tiempo,'ydata',output(1:a));
        pause(0.01);
        a=a+1;
    else if A3==330
        if bloqTime == 0
            tic
            bloqTime = 1;
        end
        % leer puerto serie
        Lect = fscanf(IOard,'%d,%d,%d');
        if A1==1200 % Lectura TXT
            if k<Total-1
                Y1(k)=Archivo(k)/0.99;
            else
                Y1(k)=0/0.99;
            end
            Y2(k)=Lect(2)-A2/0.99; %B=sprintf('%0.2f\n',A)
            if k<Total-1
                Y3(k)=Archivo1(k);
            else
                Y3(k)=0;
            end
        end
    end
end

```

```

end
else %distinto 1200 = Lectura normal
% leer del puerto serie
Y1(k)=Lect(1)/0.99;
Y2(k)=Lect(2)/0.99;
Y3(k)=Lect(3);
end
%Actualizamos variables del gráfico
tiempo=linspace(0,k/ajuste,k);%49.7 49.5 45.5 60.5
output1=[output1; Y1(k)];
output2=[output2; Y2(k)];
output3=[output3; Y3(k)];
%Graficar
h1=set(linea1,'xdata',tiempo,'ydata',output1(1:k),'Visible','on');
if valor1==1
h2=set(linea2,'xdata',tiempo,'ydata',output2(1:k),'Visible','on');
else
h2=set(linea2,'xdata',tiempo,'ydata',output2(1:k),'Visible','off');
end
if Total>k
h3=set(linea3,'xdata',tiempo,'ydata',output3(1:k),'Visible','off');
end
k=k+1
pause(0.015);
tau=toc;
if (tau >= (Tmax)) % || k>Total-1
x=imread('ROJO.png');
axes(handles.Fig);
imshow(x);
q=imread('CAFE.png');
axes(handles.Fig1);
imshow(q);
t=1;
% Llamada a dialogo con argumento 'Position'.
pos_size = get(handles.figure1,'Position');
rpta = DialogSave('Title','Guardar Lecturas');
switch rpta
case 'Si' % Para cerrar aplicacion
formatos = {'*.xlsx','Libro de Excel'};
[name,ruta] =
uiputfile(formatos,'Guardar');
if name==0, return, end
xlswrite([ruta
name],output1,'Hojal','A1');
xlswrite([ruta
name],output2,'Hojal','B1');
case 'No' % Ninguna accion
end
parar=1;
end
end
end
parar=1;
else
% Llamada a dialogo con argumento 'Position'.
pos_size = get(handles.figure1,'Position');
rpta = dialog('Title','Cambia MODO!!!');
switch rpta

```


Análisis experimental

Concluida la mesa vibratoria y el programa “ACCELERATION GRAPH”, se procedió a realizar los ensayos respectivos al modelo físico a escala reducida (estructura), con el fin de obtener los resultados requeridos; los cuales se realizaron según el siguiente orden: medición 1, medición 2 y medición 3.

3.1.15. Medición 1 - estructura sin AMS.

Esta medición se realizó utilizando la estructura sin AMS, el cual fue ensayado sobre la mesa vibratoria juntamente con el programa “ACCELERATION GRAPH” el cual nos permitió conocer la repuesta estructural. Como se muestra en figura 52.



Figura 52. Medición 1 - estructura sin AMS.
Fuente: Elaboración propia

3.1.16. Medición 2 – estructura con AMS convencional.

Esta medición se realizó utilizando la estructura primaria acoplado con el AMS convencional, el cual consta de una ruedas, resortes y bloque de acero. Como se muestra en figura 53.



Figura 53. Medición 2 - estructura con AMS convencional.
Fuente: Elaboración propia

3.1.17. Medición 3 – estructura con AMS pendular

Esta medición se realizó utilizando la estructura primaria acoplado con el AMS pendular, el cual consta de una cuerda, resortes y una esfera de acero. Como se muestra en figura 54.



Figura 54. Medición 3 - estructura con AMS Pendular.
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del acelerograma

Como se observa en la figura 56, la gráfica de desplazamiento sin tratamiento, difiere significativamente en comparación a la gráfica de desplazamiento con tratamiento. Es de suma importancia realizar este análisis, teniendo en cuenta que los datos a ingresarse a la mesa vibratoria son los desplazamientos, por lo que estos deben ser lo más cercanos a la realidad.

En la Figura 55 y 56, se presenta su registro de aceleración y desplazamiento corregido para el acelerograma La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058).

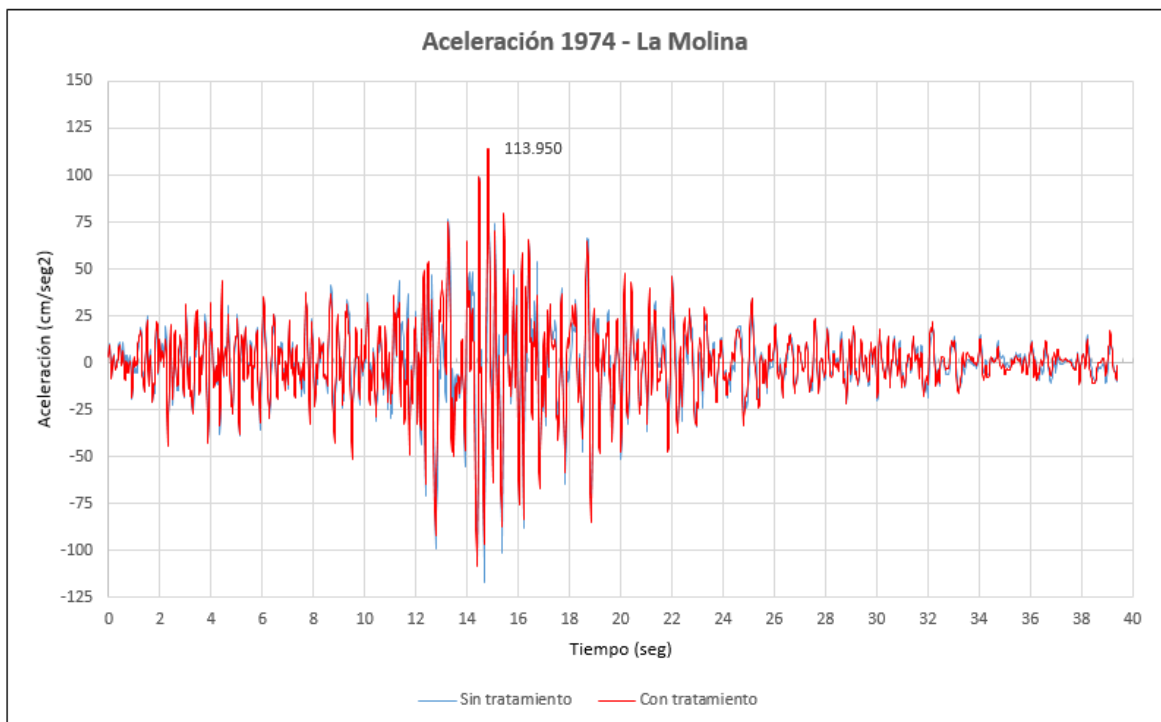


Figura 55. Aceleración corregida La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058).

Fuente: Elaboración propia

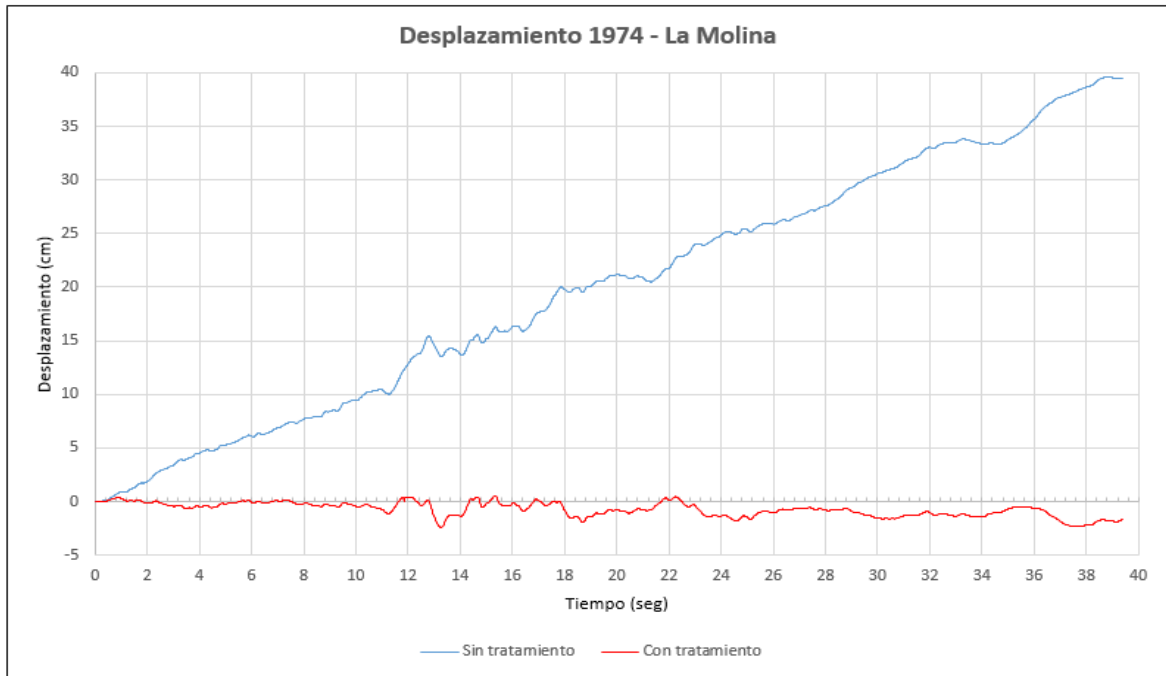


Figura 56. Desplazamiento corregido La Molina (Lima 1974 – Cod. 7058).
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 57 y 58, se presenta su registro de aceleración y desplazamiento corregido para el acelerograma Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).

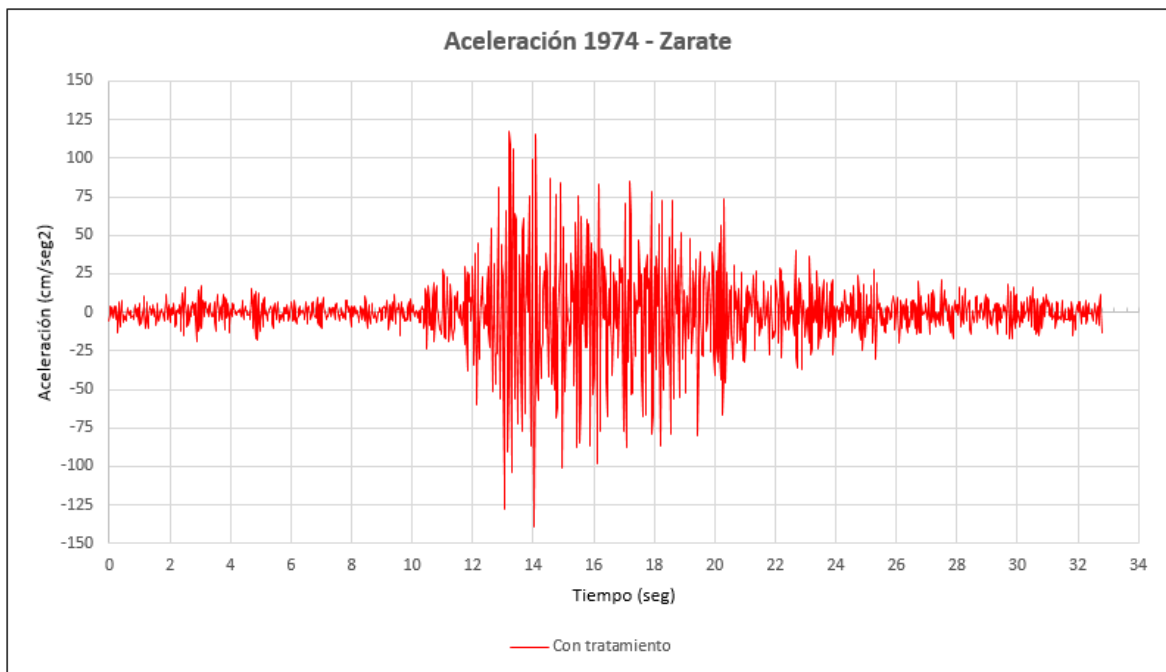


Figura 57. Aceleración corregida Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).
Fuente: Elaboración propia



Figura 58. Desplazamiento corregido Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).
 Fuente: Elaboración propia

En la Figura 59 y 60, se presenta su registro de aceleración y desplazamiento corregido para el acelerograma Huaraz (Ancash 1970 – Cod. 7039).

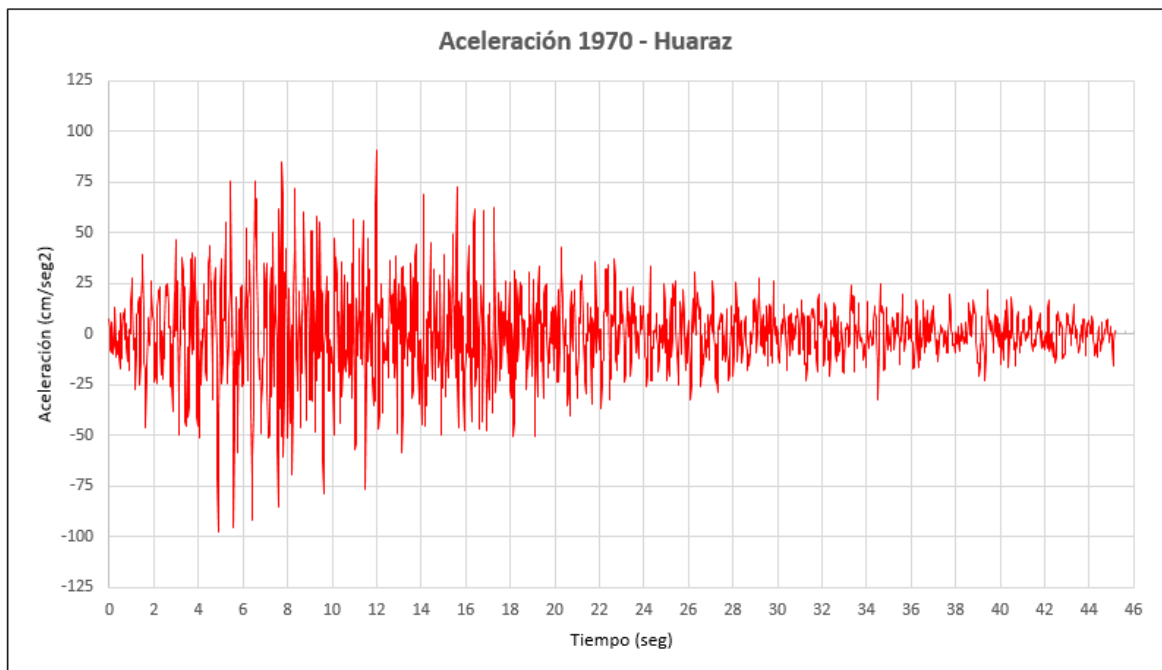


Figura 59. Aceleración corregida Huaraz (Ancash 1970 – Cod. 7046).
 Fuente: Elaboración propia

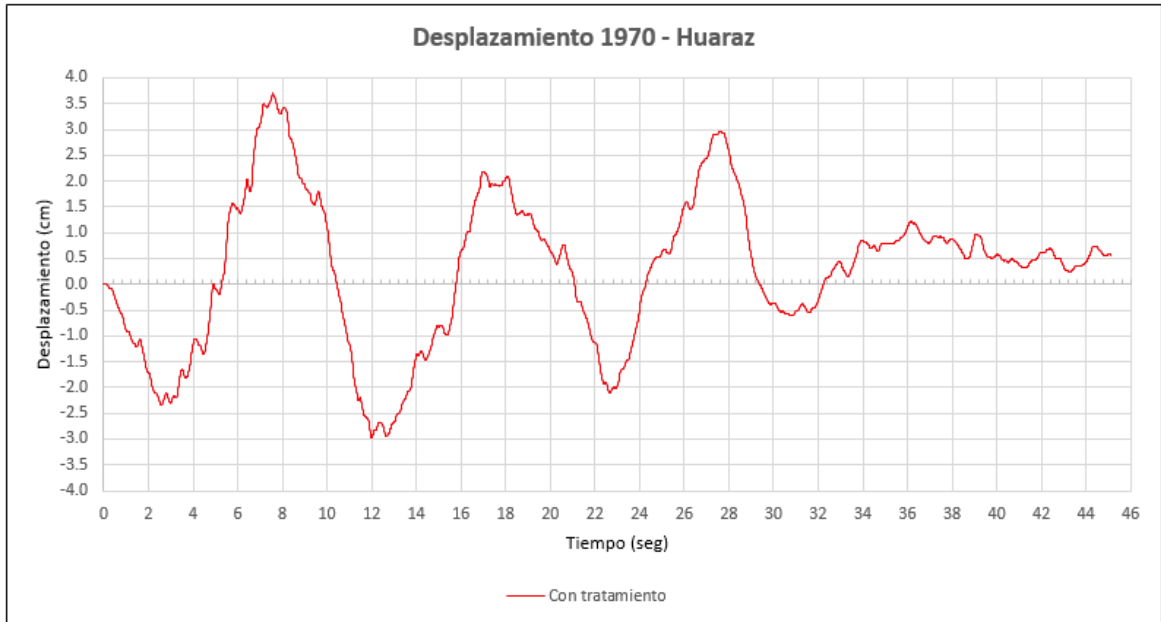


Figura 60. Desplazamiento corregido Zarate (Lima 1974 – Cod. 7046).
Fuente: Elaboración propia

Medición 1 – estructura sin AMS

Sismo Lima 09/11/1974, La Molina - 7058

En la figura 61 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura sin AMS. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 3.059 cm, como se muestra en la figura 62.

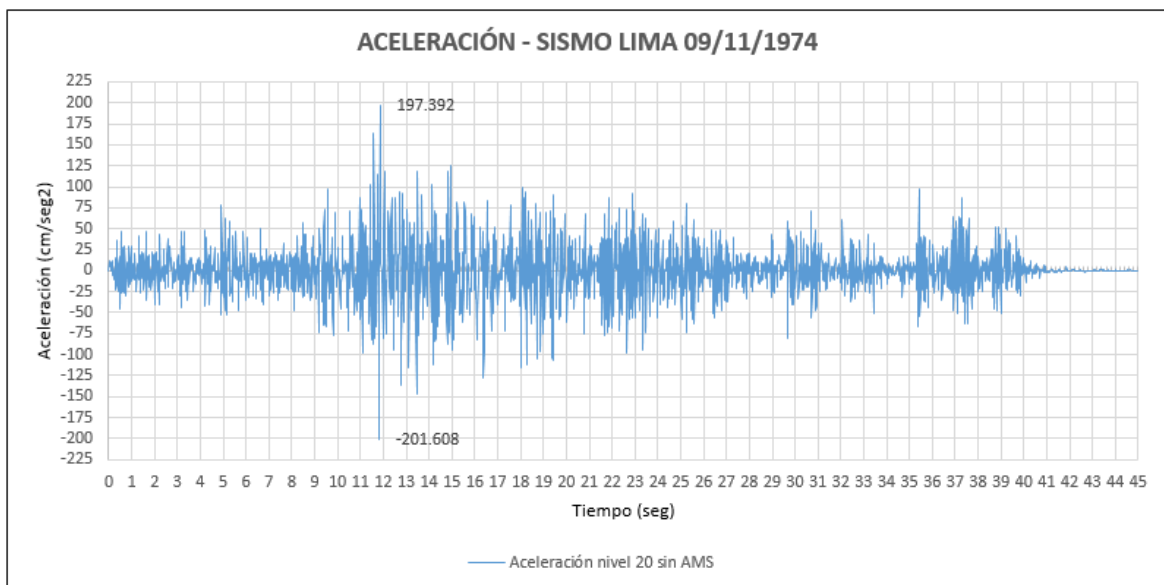


Figura 61. Datos obtenidos de aceleración – medición 1, sismo Lima 09/11/1974.
Fuente: Elaboración propia

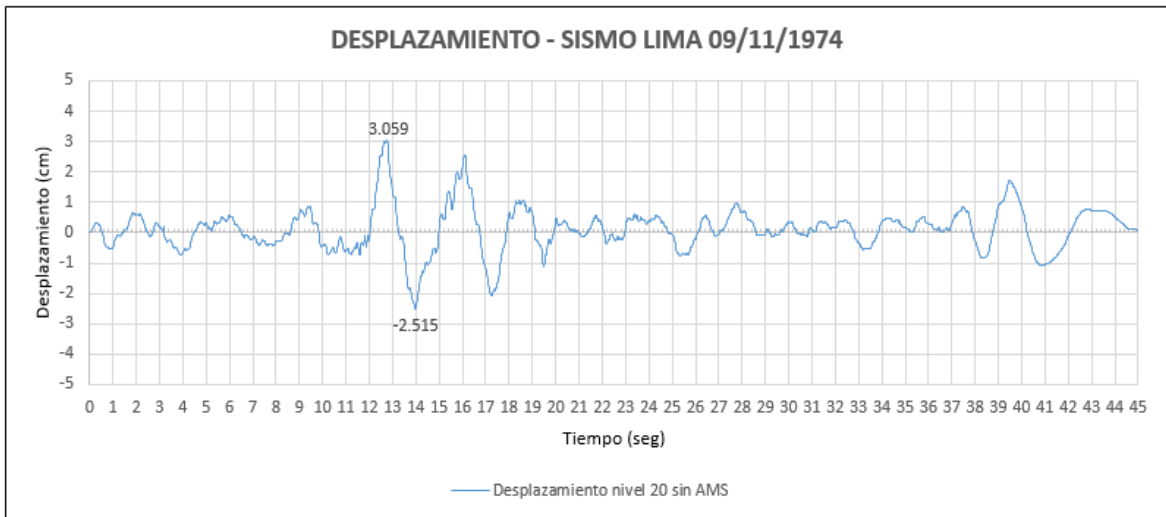


Figura 62. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 1, sismo Lima 09/11/1974.
Fuente: Elaboración propia

Sismo Lima 05/01/1974, Zarate – 7046

En la figura 63 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura sin AMS. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 2.223 cm, como se muestra en la figura 64.

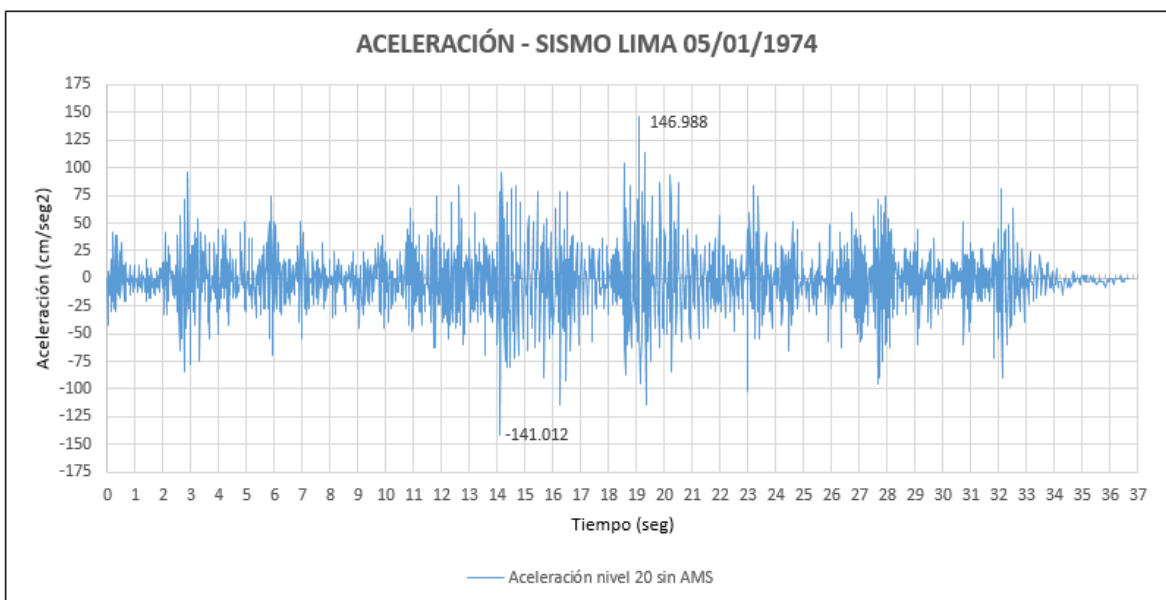


Figura 63. Datos obtenidos de aceleración – medición 1, sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

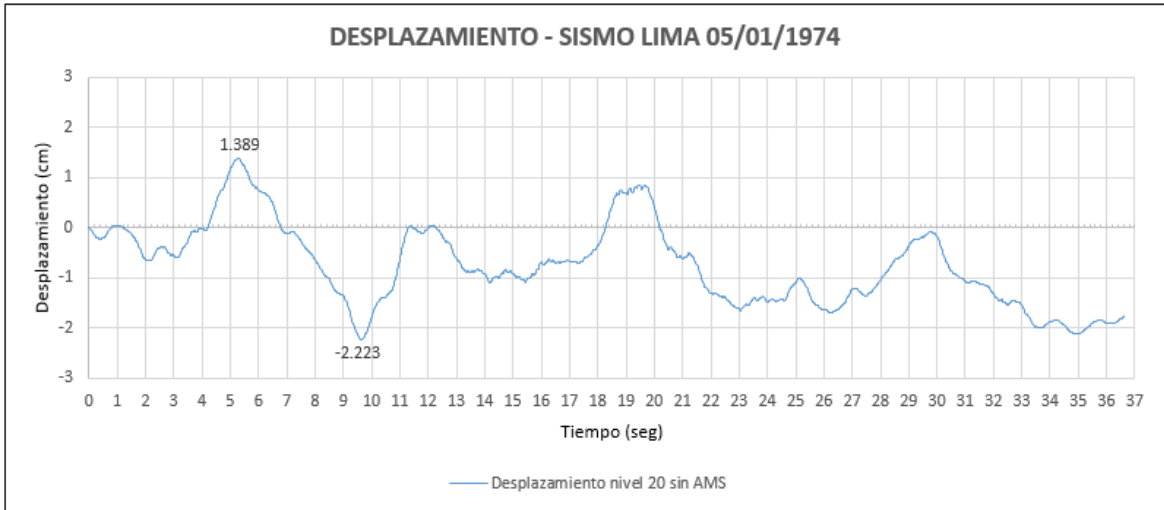


Figura 64. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 1, sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

Sismo Ancash 31/05/1970, Huaraz – 7039

En la figura 65 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura sin AMS. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 3.272 cm, como se muestra en la figura 66.

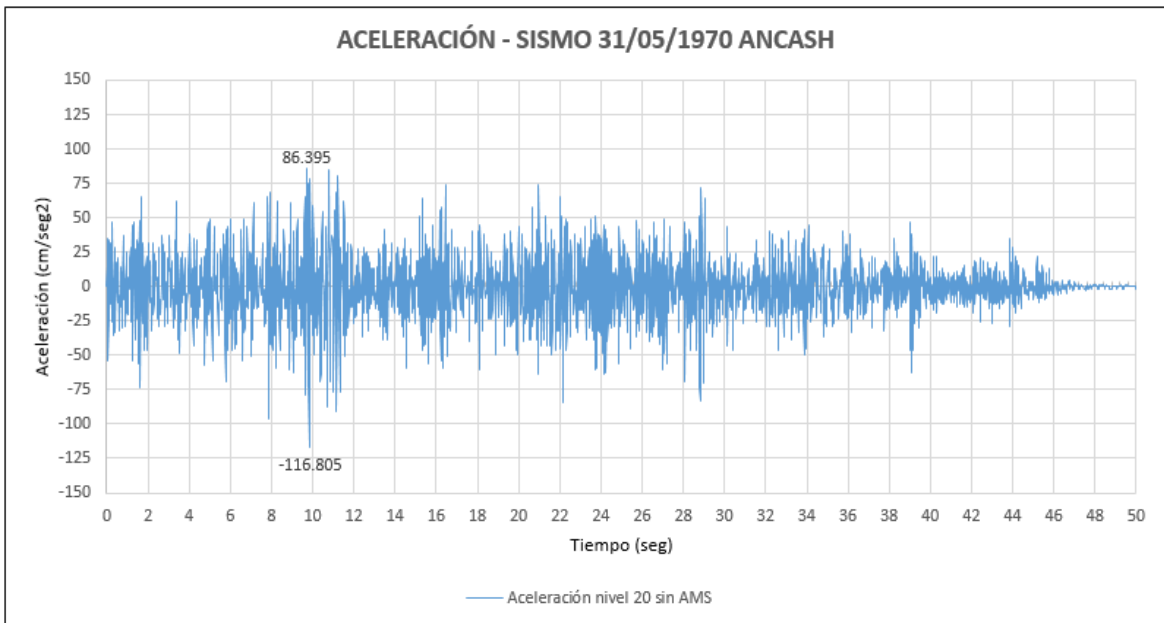


Figura 65. Datos obtenidos de aceleración – medición 1, sismo Ancash 31/05/1970.
Fuente: Elaboración propia

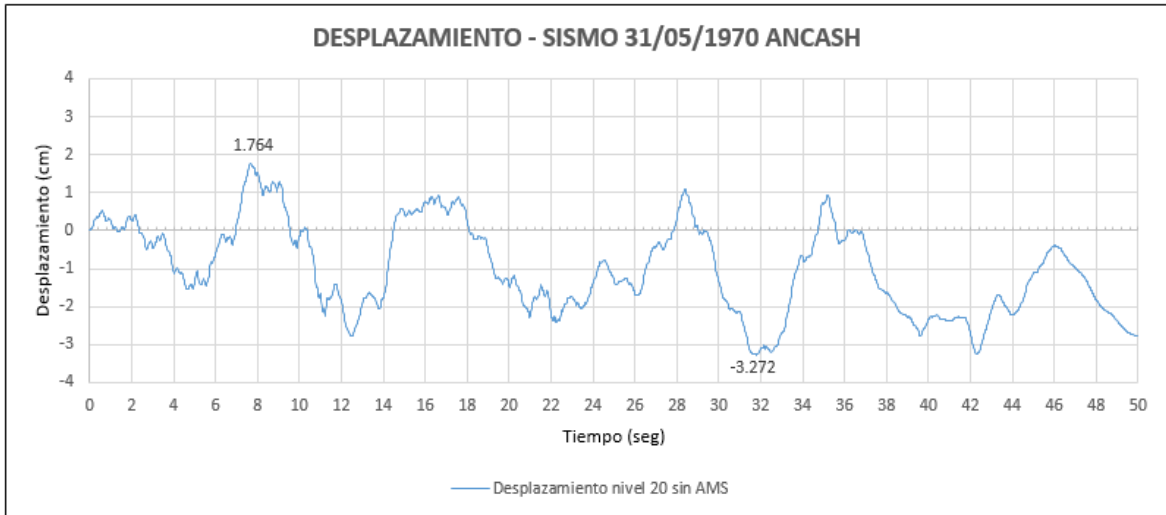


Figura 66. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 1, sismo Ancash 31/05/1970.
Fuente: Elaboración propia

Medición 2 – estructura con AMS convencional

Sismo Lima 09/11/1974, La Molina - 7058

En la figura 67 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura con AMS convencional. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 1.855 cm, como se muestra en la figura 68.

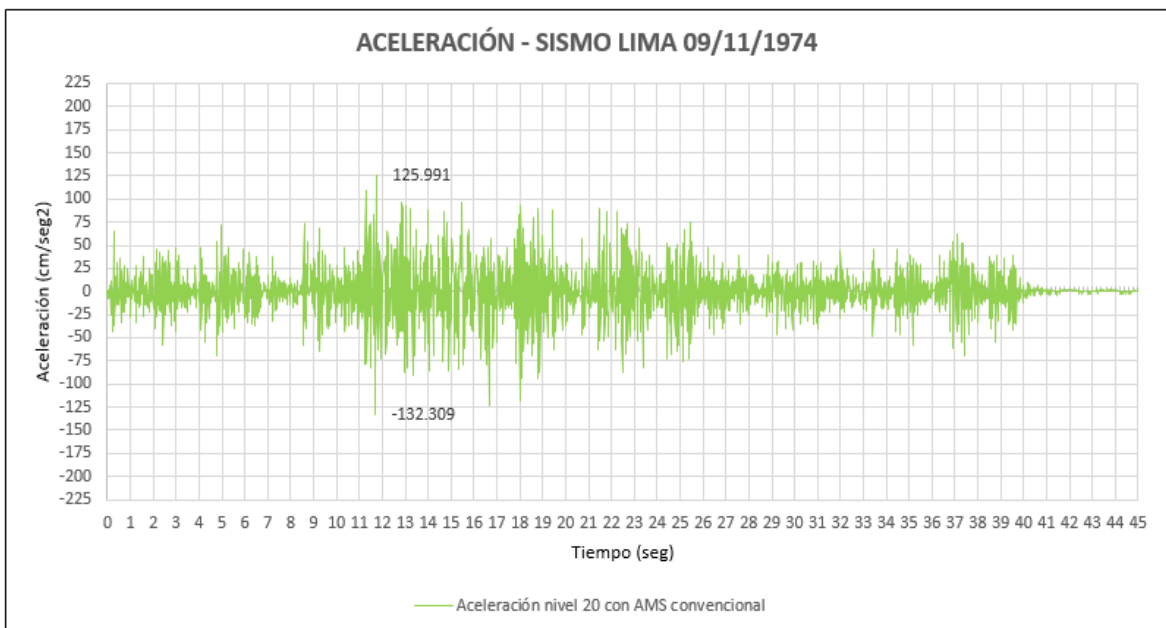


Figura 67. Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Lima 09/11/1974.
Fuente: Elaboración propia

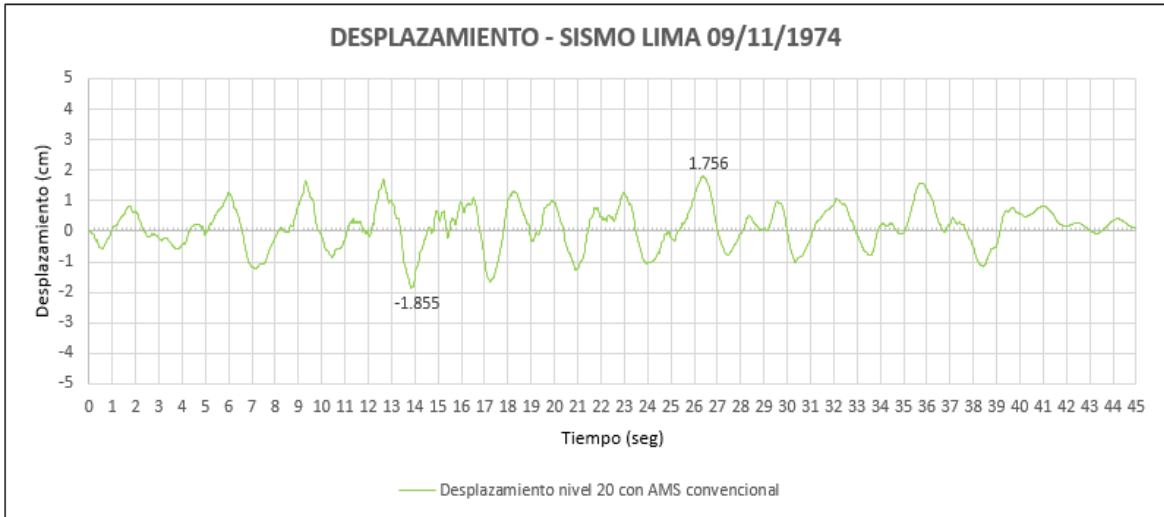


Figura 68. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Lima 09/11/1974.
Fuente: Elaboración propia

Sismo Lima 05/01/1974, Zarate – 7046

En la figura 69 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura con AMS convencional. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 1.329 cm, como se muestra en la figura 70.

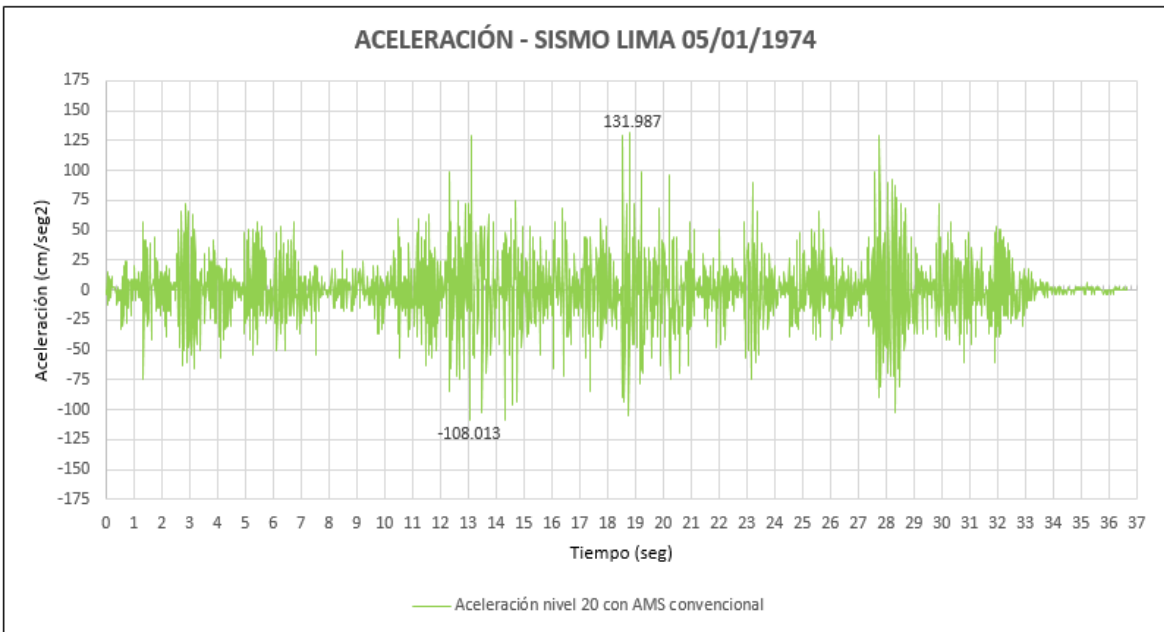


Figura 69. Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

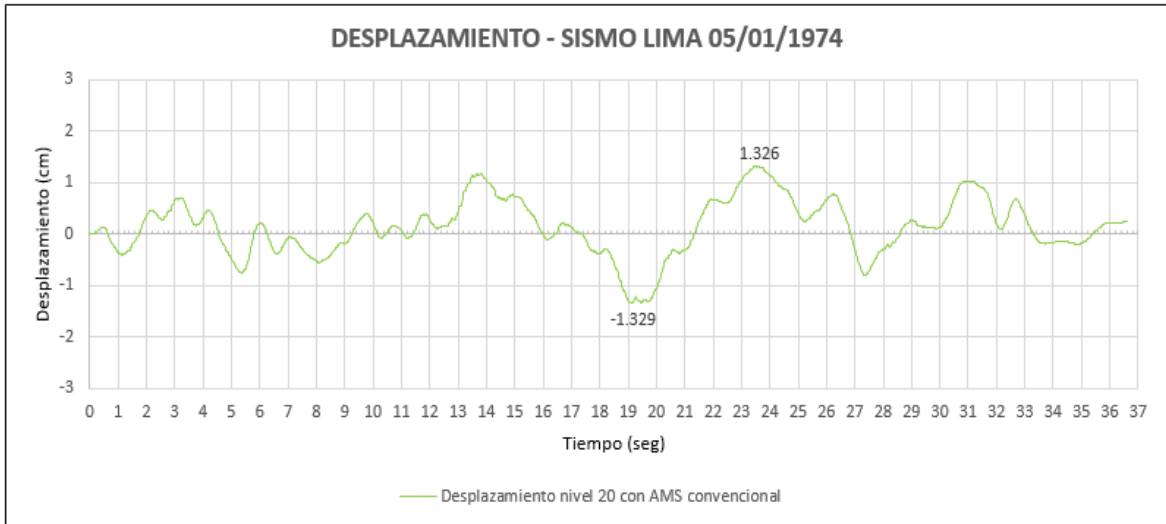


Figura 70. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

Sismo Ancash 31/05/1970, Huaraz – 7039

En la figura 71 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura con AMS convencional. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 2.223 cm, como se muestra en la figura 72.

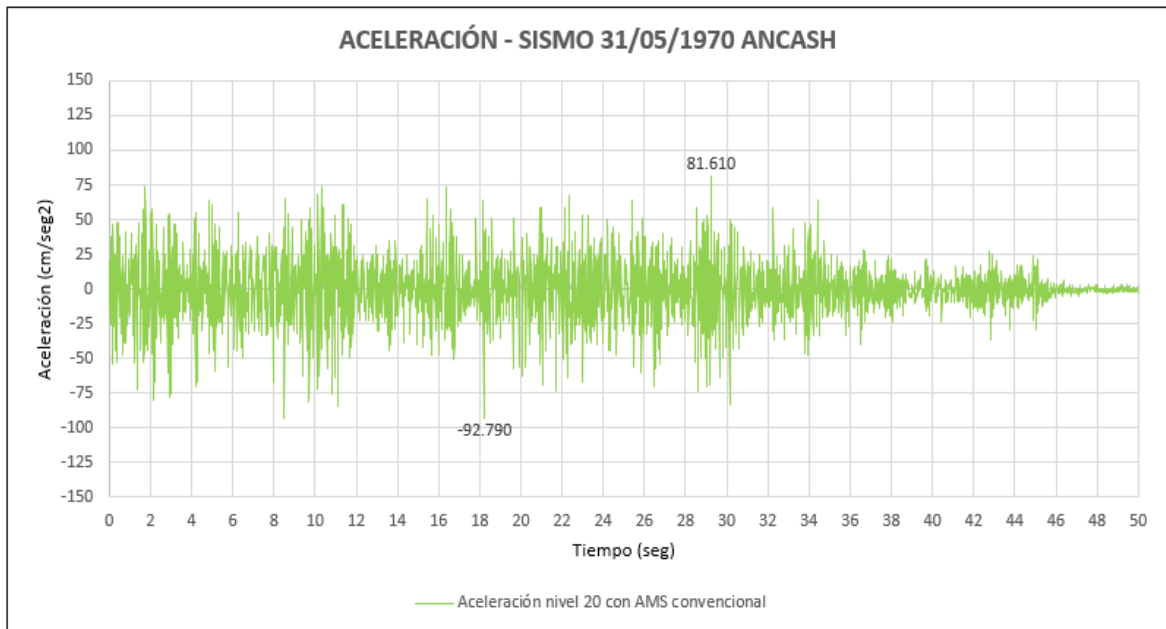


Figura 71. Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970.
Fuente: Elaboración propia

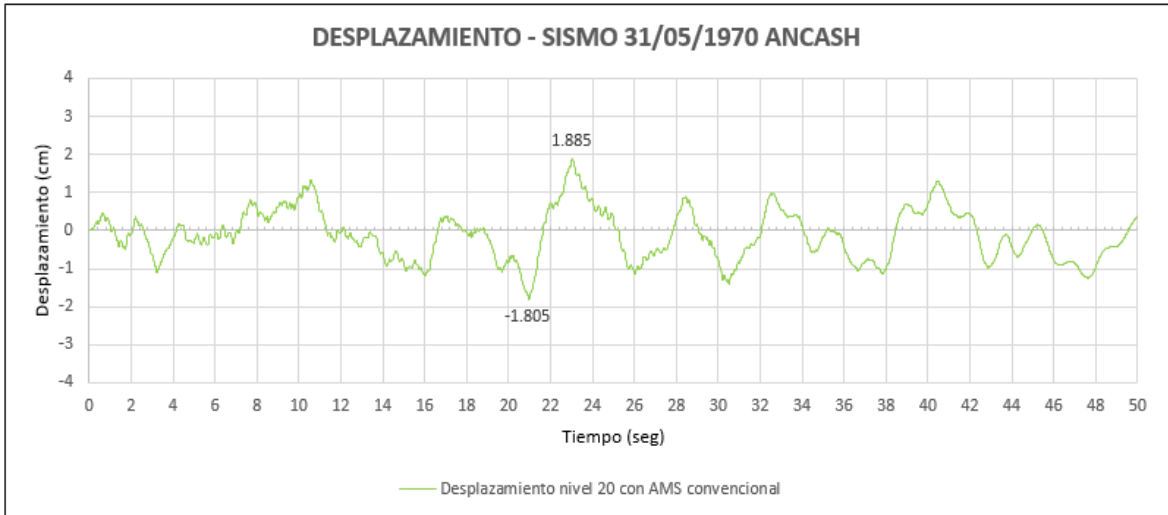


Figura 72. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970.
Fuente: Elaboración propia

Medición 3 – estructura con AMS pendular

Sismo Lima 09/11/1974, La Molina - 7058

En la figura 73 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura con AMS pendular. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 2.146 cm, como se muestra en la figura 74.

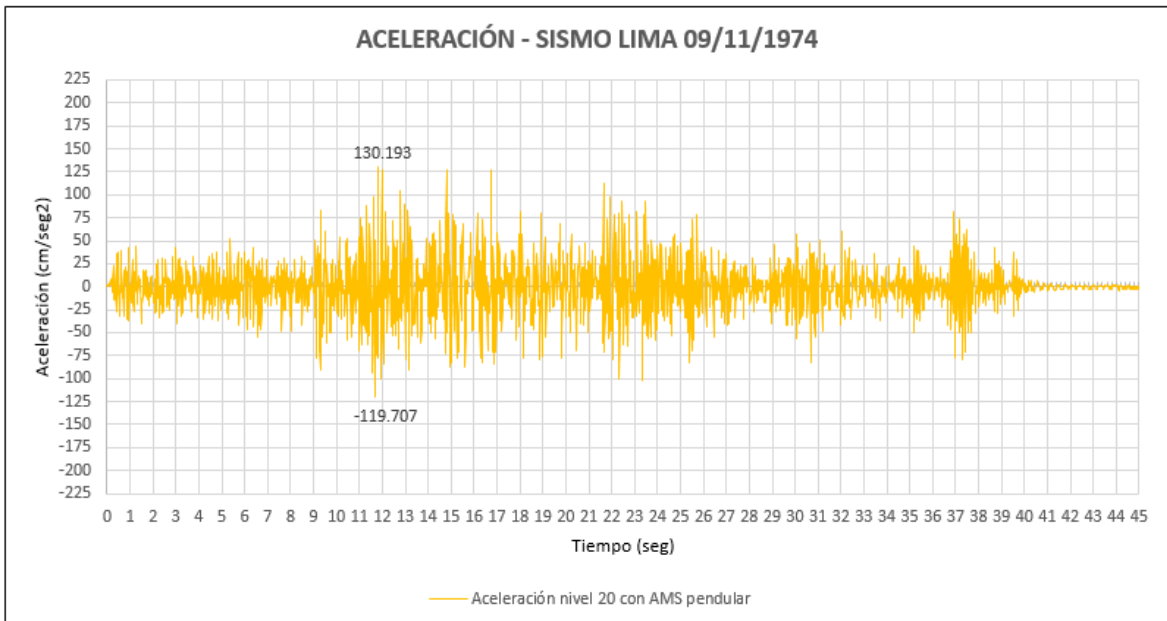


Figura 73. Datos obtenidos de aceleración – medición 3, sismo Lima 09/11/1974.
Fuente: Elaboración propia

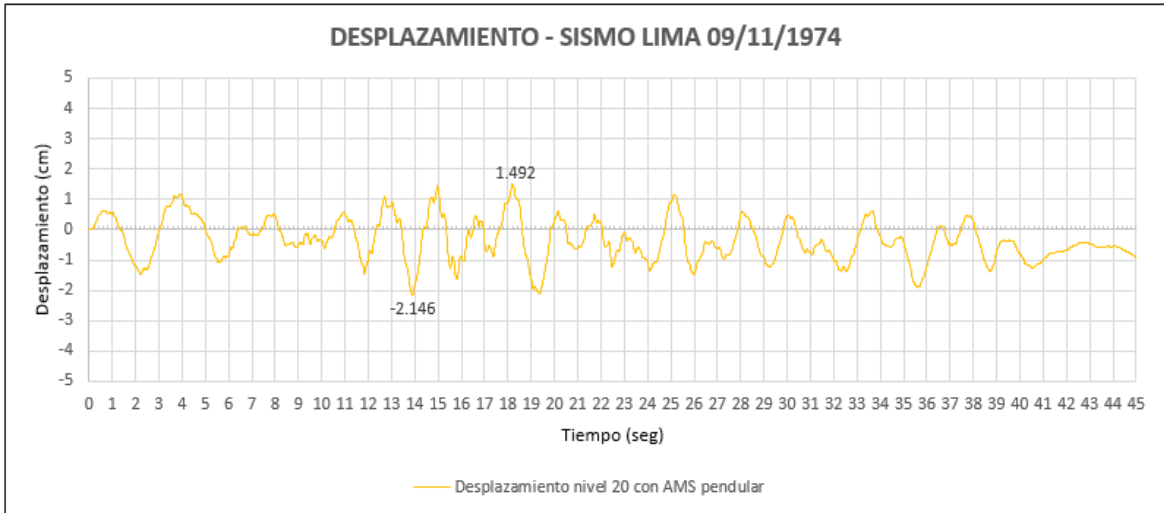


Figura 74. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 3, sismo Lima 09/11/1974.
Fuente: Elaboración propia

Sismo Lima 05/01/1974, Zarate – 7046

En la figura 75 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura con AMS pendular. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 1.329 cm, como se muestra en la figura 76.

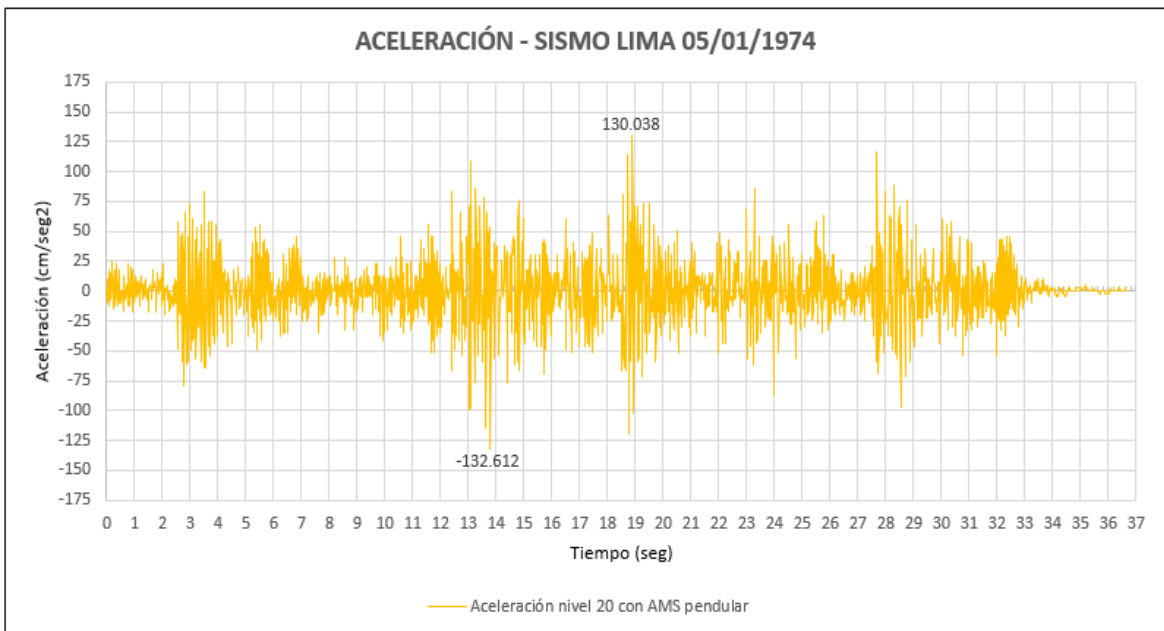


Figura 75. Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

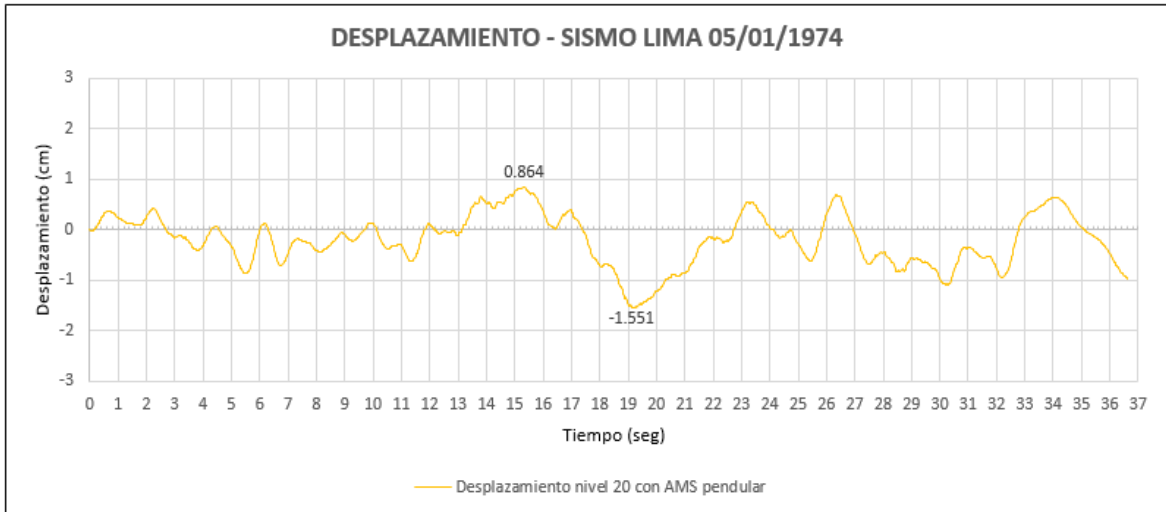


Figura 76. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

Sismo Ancash 31/05/1970, Huaraz – 7039

En la figura 77 se muestra el resultado del nivel 20 del ensayo realizado a la estructura con AMS convencional. A partir de los datos obtenidos, se procesa la información para obtener el desplazamiento máximo que es de 2.223 cm, como se muestra en la figura 78.

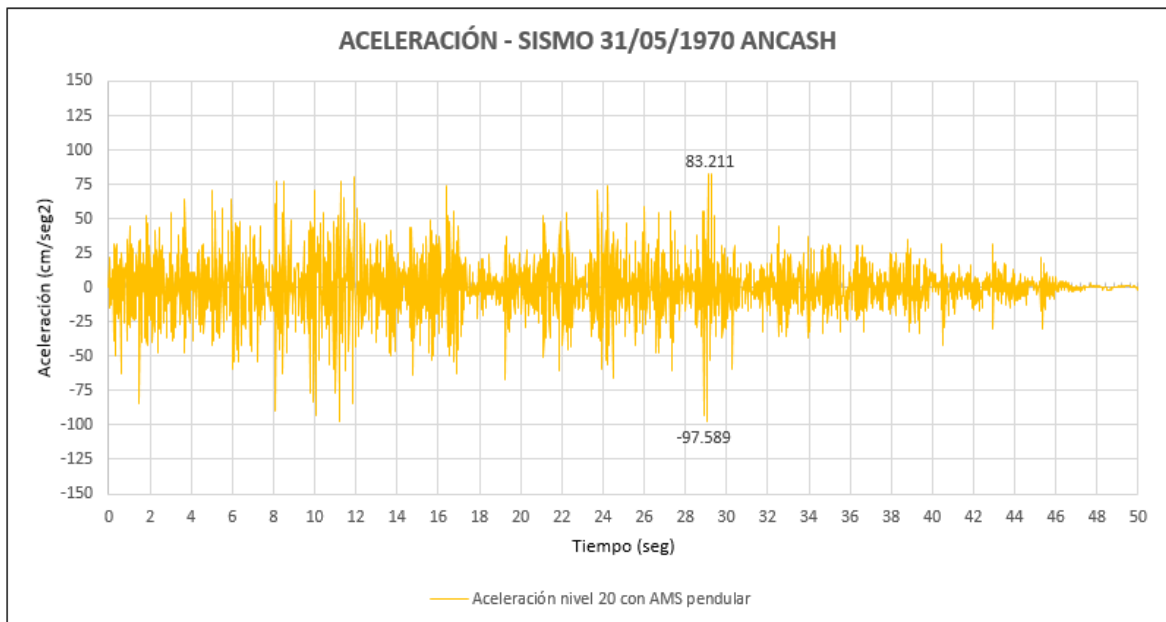


Figura 77. Datos obtenidos de aceleración – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970.
Fuente: Elaboración propia

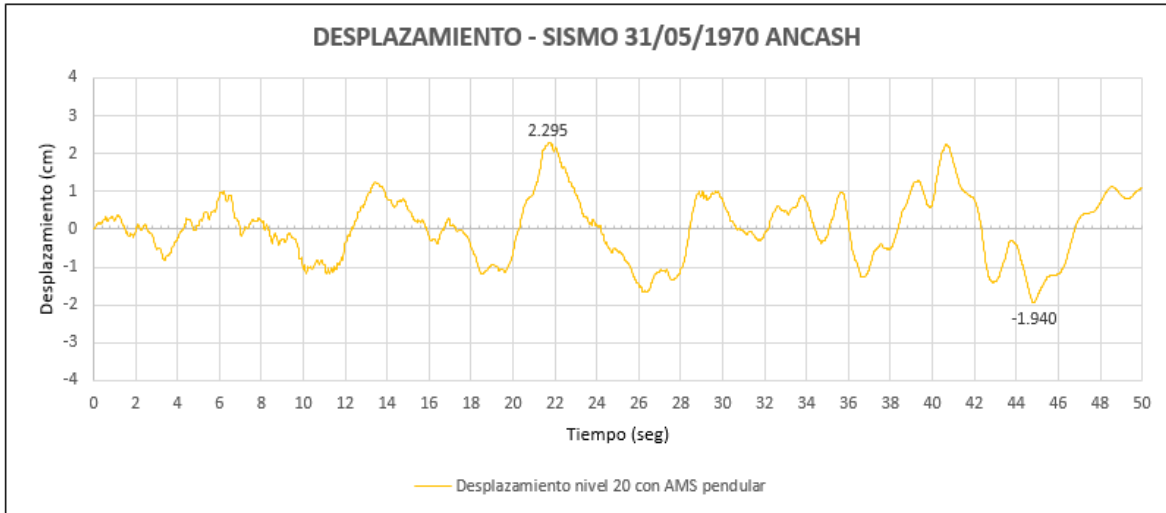


Figura 78. Datos obtenidos de desplazamiento – medición 2, sismo Ancash 31/05/1970. Fuente: Elaboración propia

Análisis comparativo de la estructura sin AMS, con AMS convencional y con AMS pendular

Sismo Lima 09/11/1974, La Molina - 7058

En la figura 79 y 80, se muestra una comparación de resultados en el nivel 20 del ensayo realizado a la estructura sin AMS, con AMS convencional y con AMS pendular.

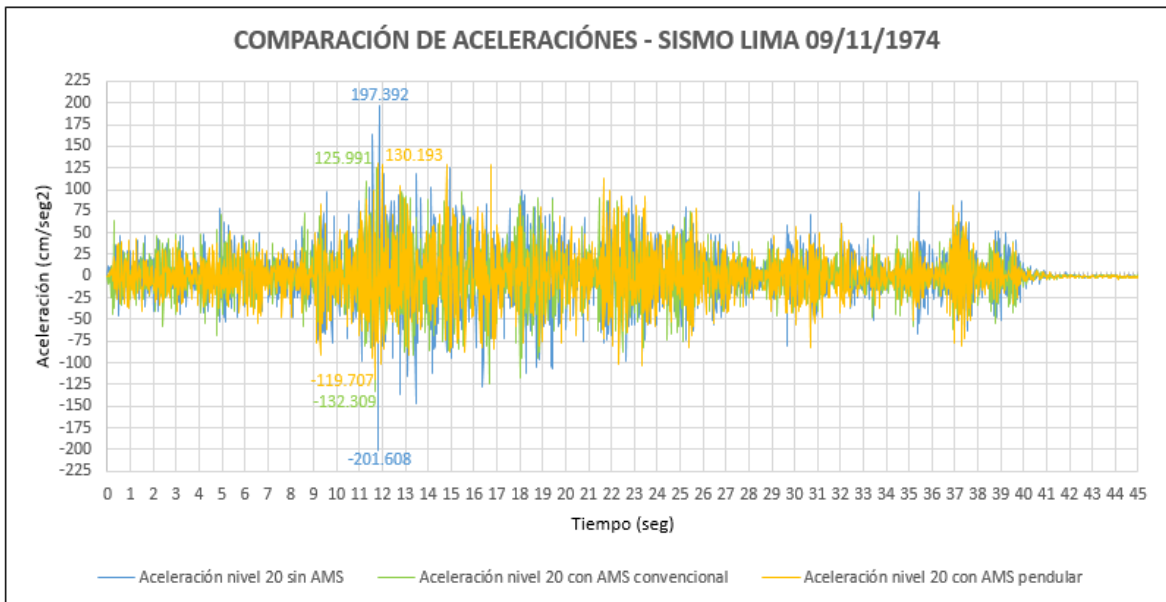


Figura 79. Comparación de las aceleraciones en el nivel 20 - sismo Lima 09/11/1974. Fuente: Elaboración propia

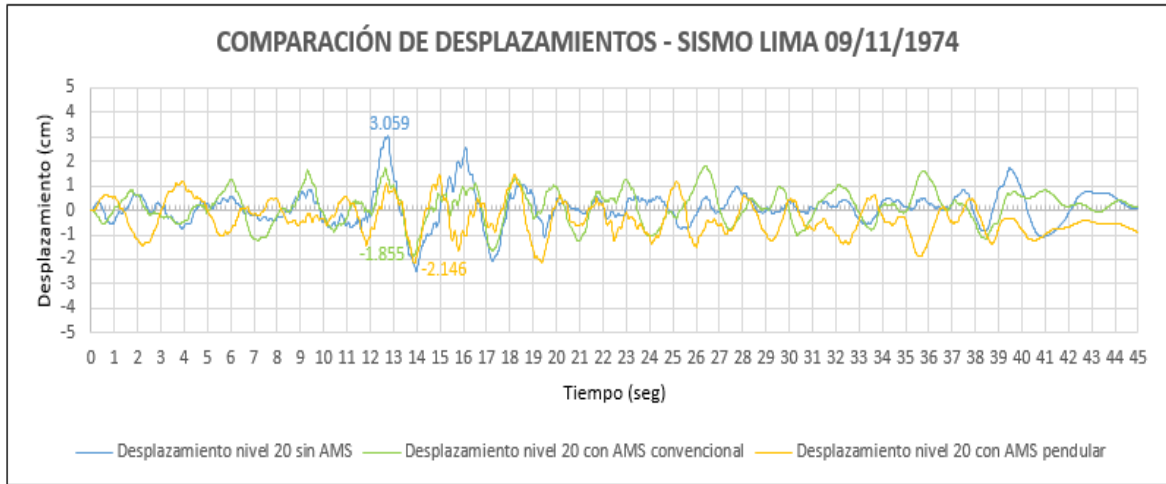


Figura 80. Comparación de desplazamientos en el nivel 20 - sismo Lima 09/11/1974.
Fuente: Elaboración propia

De la figura 79 y 80 podemos deducir que su porcentaje de reducción tanto en aceleración como en desplazamiento entre la estructura sin AMS y la estructura con AMS es la siguiente:

Tabla 7

Comparación de aceleraciones de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 09/11/1974.

Estructura	Aceleración (cm/s ²)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Nivel 20	201.608	132.309	34.37%	130.193	35.42%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Comparación de desplazamientos de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 09/11/1974.

Estructura	Desplazamiento (cm)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Nivel 20	3.059	1.855	39.36%	2.146	29.85%

Fuente: Elaboración propia

Sismo Lima 05/01/1974, Zarate – 7046

En la figura 81 y 82, se muestra una comparación de resultados en el nivel 20 del ensayo realizado a la estructura sin AMS, con AMS convencional y con AMS pendular.

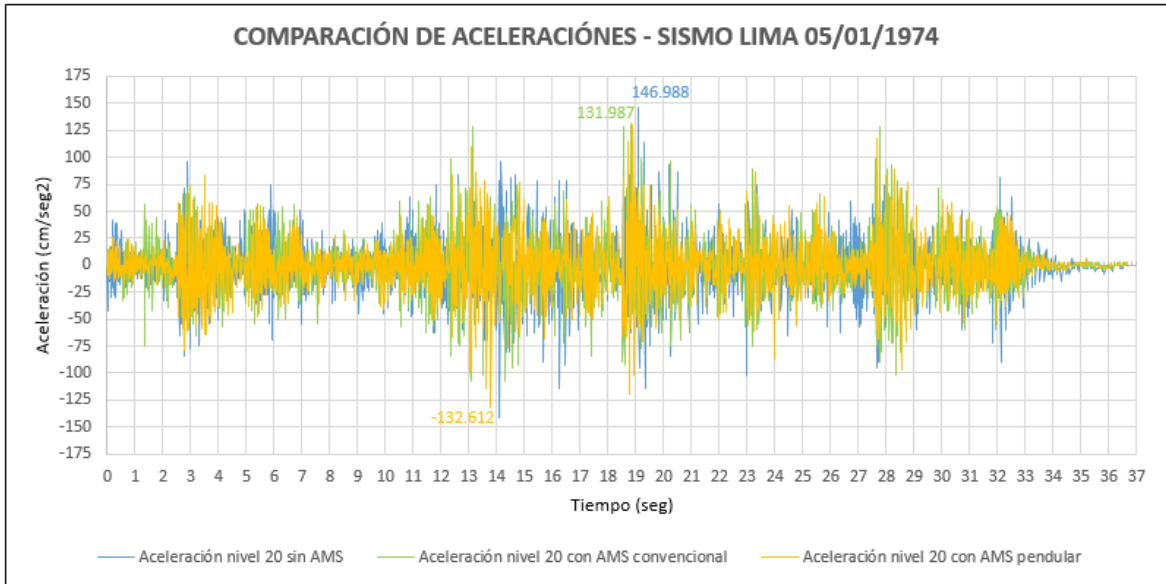


Figura 81. Comparación de las aceleraciones en el nivel 20 - sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

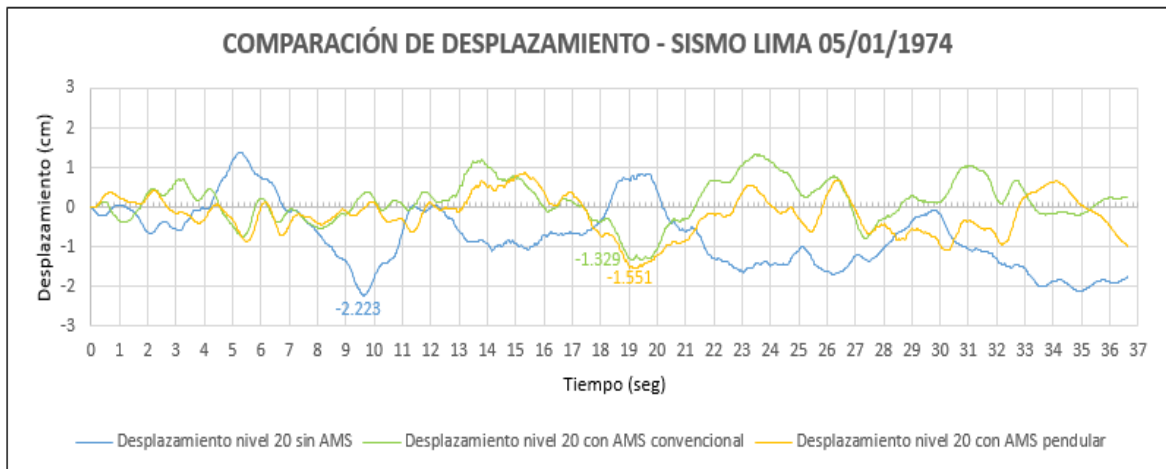


Figura 82. Comparación de desplazamientos en el nivel 20 - sismo Lima 05/01/1974.
Fuente: Elaboración propia

De la figura 81 y 82 podemos deducir que su porcentaje de reducción tanto en aceleración como en desplazamiento entre la estructura sin AMS y la estructura con AMS es la siguiente:

Tabla 9

Comparación de aceleraciones de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 05/01/1974.

Estructura	Aceleración (cm/s ²)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Nivel 20	146.988	131.987	10.21%	132.612	9.78%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Comparación de desplazamientos de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Lima 05/01/1974.

Estructura	Desplazamiento (cm)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Nivel 20	2.223	1.329	40.22%	1.551	30.23%

Fuente: Elaboración propia

Sismo Ancash 31/05/1970, Huaraz – 7039

En la figura 83 y 84, se muestra una comparación de resultados en el nivel 20 del ensayo realizado a la estructura sin AMS, con AMS convencional y con AMS pendular.

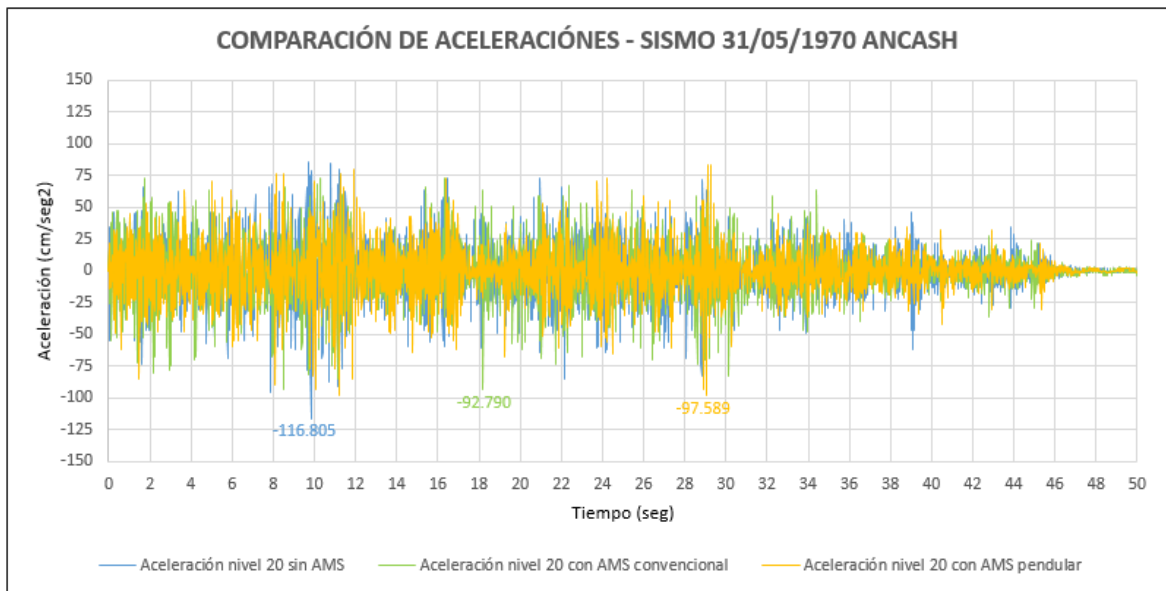


Figura 83. Comparación de las aceleraciones en el nivel 20 - sismo Ancash 31/05/1970. Fuente: Elaboración propia

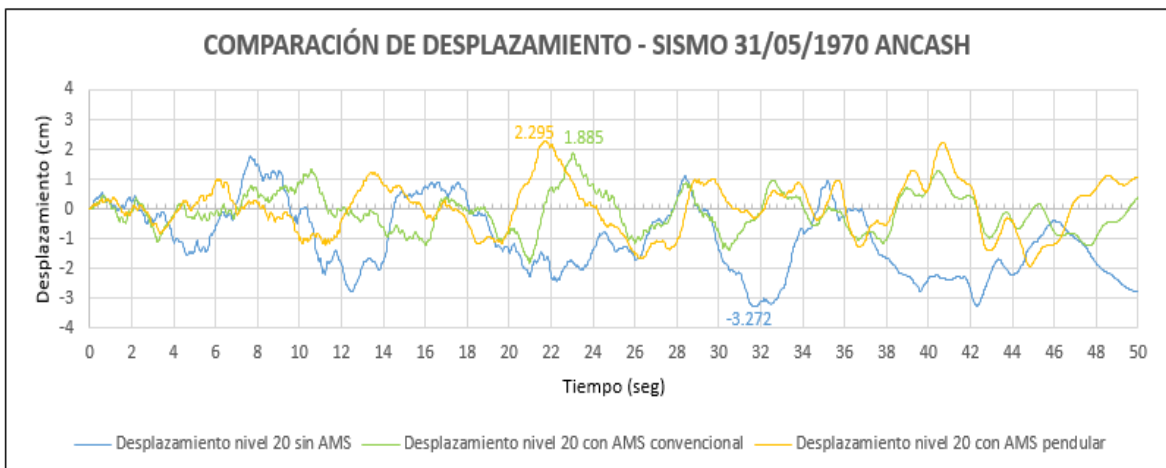


Figura 84. Comparación de desplazamientos en el nivel 20 - sismo Ancash 31/05/1970. Fuente: Elaboración propia

De la figura 83 y 84 podemos deducir que su porcentaje de reducción tanto en aceleración como en desplazamiento entre la estructura sin AMS y la estructura con AMS es la siguiente:

Tabla 11

Comparación de aceleraciones de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Ancash 31/05/1970.

Estructura	Aceleración (cm/s ²)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Nivel 20	116.805	92.790	20.56%	97.589	16.45%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Comparación de desplazamientos de la estructura sin AMS, con AMS convencional y AMS pendular, sismo Ancash 31/05/1970.

Estructura	Desplazamiento (cm)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Nivel 20	3.272	1.885	42.39%	2.295	29.86%

Fuente: Elaboración propia

De la figura 80, 82 y 84 se observa lo siguiente:

Con el objetivo de comparar la variación en los desplazamientos de la estructura al implementar los sistemas AMSs, se utilizó el software SEISMOSIGNAL 2020. A partir de este proceso de integración se obtienen las gráficas de comparación.

Para frecuencias menores a la frecuencia de sintonización, cuando la estructura cambia su forma modal se presenta un aumento en la respuesta dinámica (presencia de picos elevados donde inicialmente no se presenciaba) de la estructura. Esto se debe a que el sistema AMS se encuentra diseñado para controlar el primer modo de vibración, y por tanto ya no desempeña una función de control estructural para los demás modos de vibración de la estructura.

Para acciones sísmicas, con un contenido de frecuencias en un rango relativamente amplio, los AMS Pendulares son menos eficientes que los AMS Convencionales. En los registros de aceleración y desplazamiento, se observan algunos valores máximos similares

e incluso mayores a los que se tendrían sin el uso de un AMS. Sin embargo, si se observa las gráficas, se tienen siempre valores menores, lo que implica que el uso de un AMS contribuye en la reducción de la respuesta estructural.

Por otro lado, las excitaciones a las que se verá sometida la estructura son inciertas en cuanto a su distribución de frecuencias, esto conlleva la posibilidad cierta de generar un efecto contraproducente, ya que las respuestas pueden incluso ser peores con el uso del AMS (Breschi & Castillo, 2015).

Análisis comparativo de los resultados obtenidos de los sismos ensayados

En las tablas 13 y 14 se muestran las máximas respuestas dinámicas obtenidas de las 3 mediciones realizadas y su porcentaje de reducción entre la estructura sin sistema AMS y la estructura con sistema AMS.

Tabla 13

Comparación de aceleraciones de los resultados obtenidos de los sismos ensayados.

Estructura	Aceleración (cm/s ²)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Sismo Lima 09/11/1974	201.608	132.309	34.37%	130.193	35.42%
Sismo Lima 05/01/1974	146.988	131.987	10.21%	132.612	9.78%
Sismo Ancash 31/05/1970	116.805	92.790	20.56%	97.589	16.45%

Fuente: Elaboración propia

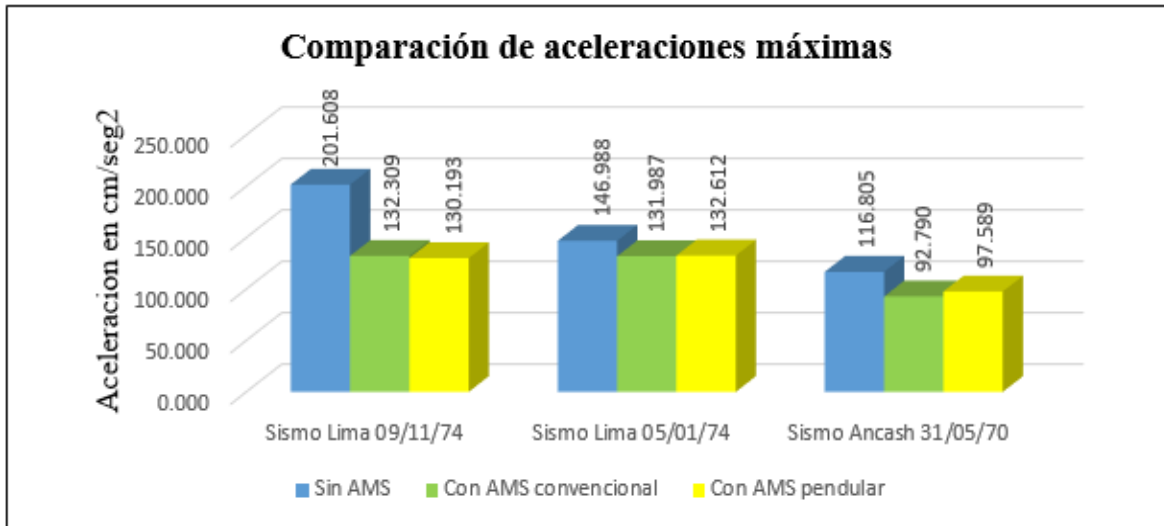


Figura 85. Comparación de aceleraciones máximas obtenidas de los sismos ensayados.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Comparación de desplazamientos de los resultados obtenidos de los sismos ensayados.

Estructura	Desplazamiento (cm)				
	Sin AMS	Con AMS convencional	Reducción	Con AMS pendular	Reducción
Sismo Lima 09/11/1974	3.059	1.855	39.36%	2.146	29.85%
Sismo Lima 05/01/1974	2.223	1.329	40.22%	1.551	30.23%
Sismo Ancash 31/05/1970	3.272	1.885	42.39%	2.295	29.86%

Fuente: Elaboración propia

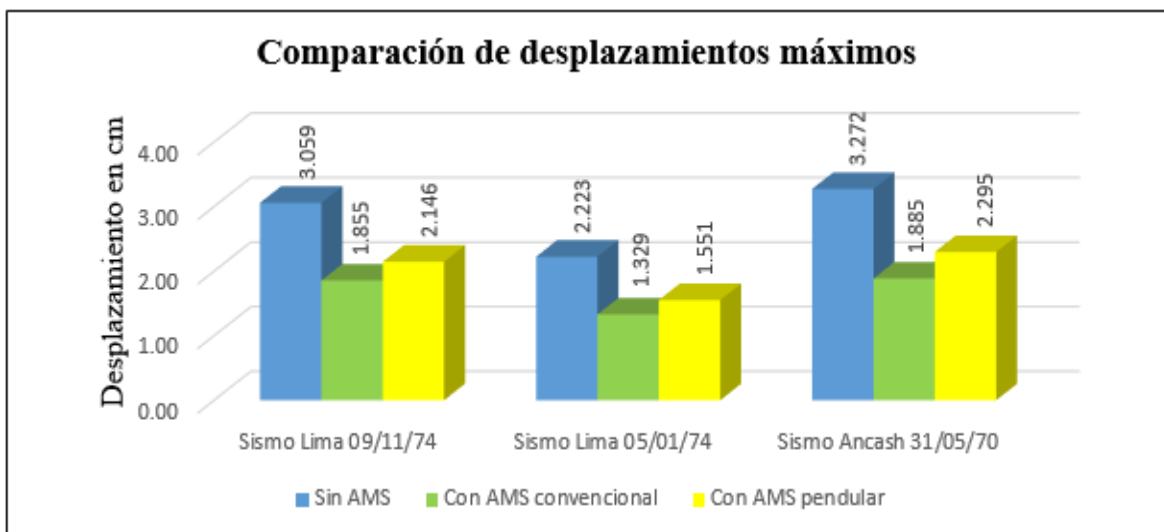


Figura 86. Comparación de desplazamientos máximos obtenidas de los sismos ensayados.
Fuente: Elaboración propia

Para comprobar que el sistema AMS está actuando en la estructura, en la tabla 14 y la figura 86, se muestra las máximas respuestas dinámicas obtenidas en el nivel 20 de la estructura y su porcentaje de diferencia entre la estructura sin AMS y la estructura con los sistemas AMS. Siendo uno de los más incidentes, el caso del sismo de Ancash, observándose una reducción del 42.39% entre la estructura sin AMS y con AMS Convencional.

De los cuadros anteriores se puede deducir que el sistema de AMS incorporado en la estructura actúa de manera más eficiente en el sismo Ancash el cual posee un mayor desplazamiento, seguido del sismo Lima 09/11/74 y por último el sismo Lima 05/01/74. Lo que indica que, a mayor fuerza de excitación aumenta la fuerza atenuante del AMS.

Independientemente del tipo de excitación, para estructuras más flexibles el desempeño del AMS es satisfactorio encontrándose reducciones en los desplazamientos entre el 29 y 43%. Es importante resaltar que se obtuvieron buenos resultados tanto para sismos de corta duración (Zárate - Lima) como para sismos de larga duración (Huaraz - Ancash). Las cuales se comprueban con las encontradas en la literatura.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El acoplamiento del sistema AMS Convencional reduce aproximadamente en un promedio de 40.66% los desplazamientos en el último nivel del modelo físico a escala analizado. El acoplamiento del sistema AMS Pendular reduce aproximadamente en un promedio de 29.98% los desplazamientos en el último nivel del modelo físico a escala analizado. Comparando los valores de desplazamiento entre un AMS convencional y un AMS pendular difieren en un 10.68%, teniendo el AMS convencional mejor respuesta estructural.
- Se utilizó un modelo físico a escala reducida de un edificio de 20 niveles. Teniendo en cuenta que una estructura real de 20 niveles tiene como periodo natural un valor aproximado a 2seg, el modelo a escala utilizado tiene un periodo natural de 1.751seg lo que le hace semejante al real, en cuanto a sus propiedades dinámicas se refiere. Si bien este modelo no refleja fielmente el comportamiento dinámico de una estructura real, fue el punto de partida para evaluar la efectividad de un sistema AMS.

- Para los ensayos realizados a la estructura con y sin AMS, se encontró para el caso de la frecuencia de sintonización, una disminución clara en la respuesta dinámica luego de implementar los AMSs en el último nivel. En cuanto a los desplazamientos se observa que para la estructura analizada se redujeron entre un 29 a 43%, resultado que promueve la investigación en este campo con el objetivo de reforzar estructuras construidas en nuestra zona.
- Es importante mencionar que, si bien la hipótesis planteada no se pudo comprobar en su totalidad, si se ha comprobado la eficiencia de la implementación de los Amortiguadores de Masa Sintonizados.

Como resultado de la prueba de hipótesis se observó una tendencia a mejorar la respuesta estructural del modelo físico con la incorporación del AMS Pendular y AMS Convencional, no pudiéndose confirmar que el AMS Pendular es más eficiente que el AMS Convencional, ya que no hubo suficiente evidencia estadística para afirmarlo categóricamente. Para lo cual se requiere realizar un estudio más extenso, con un mayor número de modelos físicos, para determinar la mayor incidencia en el desempeño del AMS Pendular sobre el AMS Convencional.

- Se construyó y se automatizó una mesa vibratoria con un grado de libertad (eje x), mediante el diseño y control de cada uno de sus componentes. Elaborándose un sistema de adquisición de datos, usando acelerómetros conectados a un módulo electrónico (Arduino) y diseño de un programa en MATLAB R2014b para poder visualizar los resultados en un ordenador.

Recomendaciones

- A fin de no afectar la respuesta estructural, se recomienda utilizar un mismo modelo físico a escala, para el análisis de los diferentes sistemas de control pasivo de estructuras.

- Se recomienda ampliar la investigación en materiales de construcción para la construcción de modelos físicos a escala.
- Se propone realizar investigaciones en el campo de los sistemas de control estructural, con el objetivo de encontrar el tipo de sistema más eficiente, realizando por ejemplo una comparación de respuestas entre los diferentes sistemas existentes, como:
 - Ensayos con diferentes tipos de AMS como: Columna líquida sintonizada, Tanque de agua, etc.
 - Ensayos con disipadores de energía.
 - Ensayo con aisladores sísmicos.
- Al ser modelo físico a escala simétrico tanto en planta como en elevación, se colocó el sistema AMS en centro de gravedad del último nivel, con la finalidad de que no exista efectos de torsión producidos por el sistema. En caso de que el modelo estructural fuera asimétrico, se debe estudiar más a detalle la ubicación en la planta del edificio que sería la correcta o tomar en cuenta la posibilidad de aumentar el número de masas que controlen las respuestas dinámicas.
- En caso de requerir un mayor control de las respuestas producidas por acciones sísmicas, se debe estudiar el incremento y la correcta ubicación de mayor cantidad de masas al sistema AMS.
- Es importante considerar que los resultados presentados, no pueden ser utilizados para otros diseños de modelos a escala de una estructura, ya que están sujetos a variaciones importantes en los parámetros de diseño.
- Separar el controlador (parte electrónica), de la mesa (parte mecánica), a fin de que el ruido o las vibraciones producidas por la mesa, no afecten en el correcto funcionamiento de la mesa vibratoria.

- Se recomienda que la base de la mesa vibratoria, debe estar empotrado a una superficie fija, a fin de que fuerzas externas no actúen sobre la mesa alterando los resultados de los ensayos a realizarse.
- Mejorar el sistema de adquisición de datos, utilizando sensores - acelerómetros piezoeléctricos de tamaños y masas despreciables y alta precisión.

REFERENCIAS

- Aliante, E. (2009). Control de efectos torsionales en un edificio asimétrico de hormigón armado con amortiguadores de masa sintonizados. En *Tesis de pregrado*. Universidad Austral de Chile.
- Ambrosini, D., Cuitiño, G., & Rebeco, J. (2004). Eficiencia de amortiguadores de masa sintonizados en estructuras sismorresistentes. *Mecánica Computacional*, XXIII, 447–462. <http://fing.uncu.edu.ar/>
- Anastasopoulos, I., Georgarakos, T., Georgiannou, V., Drosos, V., & Kourkoulis, R. (2010). Seismic performance of bar-mat reinforced-soil retaining wall : Shaking table testing versus numerical analysis with modified kinematic hardening constitutive model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 1089–1105. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.020>
- Aruhuanca, C. (2016). Análisis del comportamiento dinámico en estructuras a escala reducida empleando mesa vibratoria diseñada y fabricada en la UNA Puno. En *Tesis de pregrado*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.

- Breschi, L., & Castillo, A. (2015, agosto 30). Uso de amortiguador de masa sintonizada en ingeniería estructural: edificio parque Araucano en Santiago de Chile. *Alternativas*, 17, 123–128. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.234>
- Cahis, X. (2000). Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente. Análisis numérico y validación experimental de su comportamiento. En *Tesis de maestría*. Universidad politecnica de Cataluña.
- Carreño, E., Bravo, B., Suárez, A., & Tordesilla, J. (1999). Registro y tratamiento de acelerogramas. *Física de la Tierra*, 0(11), 81–111. <http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/FITE9999110081A>
- Carrillo, J., Bernal, N., & Porras, P. (2013, junio). Evaluación del Diseño de una Pequeña Mesa Vibratoria para Ensayos en Ingeniería Sismo-Resistente. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(1), 89–105. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91129721006>
- Chavez, J. (2017). *Diseño sismorresistente de edificios con disipadores de fluido viscoso* (J. Chavez (ed.); Primera Ed). Grupo Universitario S.A.C.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (4ta ed.). Pearson Education.
- Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2006). *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation* (1ra ed.). Pavia : IUSS Press.
- Connor, J. J. (2003). *Introduction To Structural Motion Control* (1ra ed.). Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall Pearson Education.
- Coral, H. A., Ramírez, J. M., Rosero, E. E., Thomson, P., Gómez, D., & Marulanda, J. (2010, diciembre 6). Diseño , construcción y control de un simulador sísmico uniaxial teleoperable para modelos estructurales a pequeña escala. *Ingeniería y Competitividad*, 12(2), 95–115.
- Cotacallapa, R. (2017). Análisis de un Edificio Asimétrico de 10 Niveles de Concreto Armado con Amortiguadores de Masa Sintonizada. En *Tesis para optar el Título de: Ingeniero Civil*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Den Hartog, J. (1985). *Mechanical vibrations* (4ta ed.). Dover.
- Etedali, S., & Rakhshani, H. (2018). Optimum design of tuned mass dampers using multi-

- objective cuckoo search for buildings under seismic excitations. *Alexandria Engineering*, 57, 3205–3218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.01.009>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2010). *Metodología de la investigación* (J. (Mc G. H. Mares (ed.); quinta).
- Inga, W. (2015). Mejora de la Respuesta Dinámica de Edificaciones Usando Amortiguadores de Masa Sintonizada. En *Tesis de pregrado*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Lehmann, A., Verri, A., Bertero, A., & Muñoz, S. (2012). Consideraciones de diseño y construcción de una mesa vibradora para ejecución de ensayos dinámicos. *Jornada Argentina de Ingeniería Estructural*.
- Lema, E. (2013). Análisis y Diseño de un Edificio con Aisladores Sísmicos Modelamiento en el ETABS. En *Tesis de pregrado*. Universidad Central del Ecuador.
- López, R., & Méndez, G. (2018). Modelo y análisis de una estructura metálica de 20 niveles con sistemas de masas sintonizadas. En *Tesis de pregrado*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Lozano, P. (2013). Diseño de un simulador sísmico. En *Tesis de pregrado*. Universidad de Almería.
- Maldonado, E., & Chio, G. (2004). *Análisis sísmico de edificaciones*. Universidad Industrial de Santander.
- Núñez, J. C., & Tortello, R. R. (2015). Análisis y diseño experimental de un sistema estructural con amortiguadores de masa sintonizada (AMS) bajo carga armónica. En *Tesis de pregrado*. Universidad Industrial de Santander.
- Oviedo, J. A., & Duque, M. del P. (2006, diciembre). Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones. *Revista EIA*, 6, 105–120. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=45266819&lang=es&site=ehost-live>
- Oyarce, F. (2015). Diseño y construcción de una mesa vibratoria unidireccional portable, para ensayos de modelos a escala de estructuras, para distintas condiciones de

- frecuencia y amplitud de la solicitación. En *Tesis de pregrado*. Universidad Austral de Chile.
- Sauter, F. (1989). *Fundamentos de Ingeniería Sísmica- Introducción a la sismología*. Tecnología de Costa Rica.
- Soto, J. (2016). Evaluación de espectros de respuesta mediante el análisis de respuesta de sitio unidimensional en siete distritos de Lima. En *Tesis de pregrado*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Venkataramana, G., & Vinod, Y. (2019, abril). Combined strategy of building vibration control by using tuned mass damper and base isolator. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6C2), 289–292.
- Yefi, S. (2011). Estudio de la eficiencia de los amortiguadores de masa sintonizada en la respuesta sísmica de edificios estructurados en base a marcos de hormigón armado. En *Tesis de pregrado*. Universidad Austral de Chile.

ANEXOS

Matriz de consistencia

TÍTULO	PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Comparación de la respuesta estructural en un edificio de 20 niveles con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular mediante modelos físicos a escala reducida	General	General	General	Variable Independiente	Metodología de la investigación
	¿Cuál es la respuesta estructural de un edificio de 20 niveles en modelos físicos a escala con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular, frente a aceleraciones sísmicas producidas en la base?	Comparar la respuesta estructural en un edificio de 20 niveles con amortiguadores de masa sintonizada de tipo convencional y pendular mediante modelos físicos a escala reducida, sometida a aceleraciones sísmicas en la base producida por una mesa vibratoria	Los resultados de respuesta estructural de un modelo a escala con amortiguadores de masa sintonizada de tipo pendular son más eficientes que el tipo convencional, frente a aceleraciones sísmicas.	AMS Convencional AMS Pendular	del tipo CUANTITATIVO
	Específicos	Específicos		Variable Independiente	Alcance de la investigación
	¿Qué modelo físico a escala se va utilizar para el análisis dinámico?	Utilizar un modelo físico a escala reducida de un edificio de 20 niveles.		Respuesta estructural	del tipo DESCRIPTIVO
	¿Cuán eficiente son los amortiguadores de masa sintonizada, como un sistema de control pasivo de vibraciones?	Comprobar la eficiencia de los amortiguadores de masa sintonizada, como un sistema de control pasivo de vibraciones.		Medición 1 Medición 2 Medición 3	Diseño de investigación
	¿Cómo se construye una mesa vibratoria sísmica con un grado de libertad para el análisis dinámico de sistemas estructurales a escala, enlazando todos los componentes de una mesa vibratoria con un ordenador, para obtener un sistema automatizado?	Construir una mesa vibratoria sísmica con un grado de libertad para el análisis dinámico de sistemas estructurales a escala, enlazando todos los componentes de una mesa vibratoria con un ordenador, para obtener un sistema automatizado.			del tipo EXPERIMENTAL desarrollándose como CUASIEXPERIMENTAL

Fuente: Elaboración propia

Registro de aceleración usado, sismo Lima 09/11/1974, La Molina – Cod. 7058

7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
3.730	-19.100	-6.950	-15.020	1.680	2.310	-2.090	-22.920	-1.830	-11.180
9.950	-14.430	5.250	-3.600	3.480	6.700	-6.070	-12.040	-5.210	-3.090
9.200	-8.660	14.520	2.760	-6.580	8.500	-3.530	-7.240	-0.090	-3.790
0.550	-2.740	13.060	6.430	-5.310	7.070	-0.490	-1.890	-15.790	-11.440
-7.200	0.180	19.600	12.140	7.220	1.000	-0.140	5.600	-18.730	-6.540
-7.440	-3.310	19.510	12.960	8.530	-5.720	0.390	13.790	-3.690	2.360
-2.830	-5.390	-4.580	10.550	13.900	6.170	7.270	16.590	5.930	10.490
-0.980	-3.070	-6.240	8.980	22.560	25.300	11.820	20.000	9.300	5.390
1.390	-4.400	4.110	5.000	25.990	30.140	10.280	25.470	1.970	0.130
4.570	-5.430	12.700	-3.980	20.580	22.210	-1.860	23.110	-6.100	3.650
5.050	-5.060	12.920	-13.380	8.510	10.250	-16.490	12.440	-0.800	5.190
2.530	0.040	7.330	-18.630	-5.670	5.620	-22.120	4.980	0.090	6.590
-3.130	5.820	3.430	-15.360	-21.490	-2.490	-10.710	-6.180	-7.200	8.490
-1.870	8.440	3.680	-4.090	-40.140	-11.180	-2.800	-15.070	-10.690	10.670
-2.720	11.950	7.040	15.800	-41.110	-17.970	-3.260	-18.000	-8.780	3.560
-1.900	13.070	9.960	30.800	-32.350	-17.920	-1.240	-5.860	-13.980	-5.690
0.870	15.540	4.670	27.200	-15.730	-22.010	4.520	8.730	-17.550	-7.750
1.410	18.650	1.540	19.650	0.630	-27.000	9.740	8.370	-9.790	-6.100
2.110	15.640	5.580	5.010	18.880	-25.190	15.400	0.390	-6.740	-7.110
5.470	3.950	12.160	-0.470	29.180	-13.470	19.170	3.580	-5.620	-9.060
9.240	-3.600	16.880	-9.720	16.500	-1.490	5.510	7.950	-13.300	-10.310
11.350	-5.700	19.490	-10.000	8.730	4.170	-6.910	10.120	-16.630	-10.270
10.340	-6.800	13.690	-0.720	17.890	9.180	-14.970	10.910	-10.730	-16.430
5.470	-10.210	2.520	3.290	10.790	12.210	-15.550	9.820	5.670	-15.460
2.510	-15.400	-20.560	-2.980	-3.150	13.300	-21.580	0.730	26.310	1.930
1.560	-12.130	-40.550	-16.600	-10.660	19.750	-35.630	-5.070	33.700	14.350
5.320	-1.750	-34.110	-16.300	-10.410	25.430	-32.250	-3.300	32.030	25.980
10.310	5.870	-28.140	-15.760	-7.770	13.660	-18.680	-2.770	30.100	36.030
11.170	11.020	-18.470	-23.060	-4.510	-8.370	-10.640	-4.110	23.270	39.750
3.090	18.280	-8.310	-26.620	-1.750	-30.120	-2.290	-13.250	14.170	41.500
-1.190	24.920	5.330	-26.100	-2.300	-38.770	7.360	-14.310	0.850	37.550
-4.290	16.330	16.610	-16.920	-10.840	-17.570	18.690	0.580	-15.330	14.220
-5.170	0.180	18.470	-3.940	-11.370	-0.790	28.460	-1.360	-29.950	-10.540
2.220	-8.760	2.610	10.480	-4.010	8.110	33.030	-7.310	-27.160	-18.250
4.130	-6.060	-16.880	21.030	6.100	12.580	29.820	-12.280	-4.340	-24.990
3.650	3.020	-22.930	11.050	1.310	13.860	23.830	-13.700	15.370	-32.360
0.650	7.120	-4.430	3.440	-22.260	11.650	17.900	7.950	23.480	-41.670
-1.800	1.330	5.760	19.850	-38.080	1.260	10.520	21.890	19.010	-34.190
-1.770	-10.280	12.040	27.330	-29.680	-8.660	6.840	19.140	13.400	-16.480
-2.360	-18.740	15.600	25.900	-7.210	-10.280	-5.780	7.760	6.940	-10.990
0.920	-21.330	10.770	10.880	19.200	0.700	-11.280	-1.040	-1.810	-1.180
3.570	-17.280	-1.880	-13.230	39.240	11.730	-15.330	-0.890	-11.830	13.690
3.100	-14.100	-9.700	-15.730	29.950	19.490	-22.470	4.400	-20.530	23.190
-5.020	-16.520	-9.100	-14.400	1.480	14.490	-29.990	10.540	-22.060	18.520
-15.730	-16.330	-14.550	-7.610	-7.380	5.760	-27.950	10.880	-17.070	17.770

7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
6.620	-7.020	17.650	23.650	39.150	-36.560	-106.480	-50.670	-87.820	-9.910
-8.180	-6.600	8.570	-10.290	47.060	-18.140	-55.430	-69.000	-83.130	9.630
-5.160	-3.990	-2.180	-34.850	43.920	-8.400	29.680	-86.320	-44.680	21.150
-0.750	-2.230	-9.380	-41.060	14.890	-6.210	92.980	-101.470	-2.260	5.200
3.310	-1.520	-16.810	-25.940	-28.830	-13.980	98.210	-95.620	25.940	-7.470
-12.860	6.490	-24.730	-11.020	-64.720	-17.740	42.120	-35.870	23.650	12.930
-23.790	5.140	-8.420	-1.390	-66.180	-8.430	3.400	31.190	5.130	28.210
-20.520	0.020	1.300	-10.720	-79.460	-6.140	6.690	58.450	-4.460	30.930
-20.260	11.200	-1.670	-21.180	-99.100	-6.860	-3.990	49.230	18.310	21.320
-12.390	25.990	-11.610	-9.850	-91.070	-9.150	-18.680	25.800	43.170	12.240
-6.270	34.050	-23.760	1.850	-79.870	-14.420	-33.190	4.280	63.980	14.940
8.790	36.970	-29.980	12.910	-65.860	-18.850	-50.100	6.580	58.440	13.800
22.780	24.340	-25.170	17.460	-50.940	-7.980	-74.930	22.950	27.700	12.790
24.900	1.150	-27.500	20.100	-34.360	2.780	-107.890	45.060	19.480	13.140
23.880	-12.510	-13.210	27.290	-17.520	8.300	-116.790	40.050	23.280	16.730
33.420	-16.690	12.180	20.170	-3.980	10.900	-78.160	6.230	-3.380	16.890
33.580	-10.510	26.290	-4.230	-5.470	5.900	-49.040	-11.890	-16.900	17.650
29.460	0.180	19.280	-28.450	-8.830	-7.240	-13.080	-5.880	-23.270	23.040
24.750	-4.130	19.590	-31.670	0.780	-16.750	29.050	-2.580	-1.660	18.000
28.330	-11.880	23.200	-14.870	6.430	-20.810	65.140	-8.760	17.660	7.170
25.830	-0.240	15.220	-3.160	13.530	-39.080	95.490	-20.280	16.020	-18.270
1.650	8.100	3.200	3.520	20.170	-55.340	104.060	-21.760	26.080	-22.420
-8.680	6.840	5.900	-1.750	19.250	-31.860	80.940	-4.690	33.190	-21.130
-16.560	1.490	25.650	-19.550	15.840	24.070	70.100	3.960	17.850	-37.660
-34.140	-5.880	32.290	-37.650	10.210	57.670	54.670	14.410	3.770	-31.550
-46.840	-14.990	31.680	-44.050	3.160	46.610	26.990	35.760	10.950	-14.130
-39.780	-23.840	32.550	-25.570	-4.450	29.940	4.680	49.220	37.250	-2.780
-21.480	-31.500	43.480	1.360	-15.860	33.370	-5.820	23.520	53.950	14.460
-14.570	-23.210	33.010	24.390	-20.920	44.870	-4.020	-6.460	33.930	31.430
-10.540	-19.550	5.680	38.170	-2.200	48.450	-30.640	-8.710	-5.640	39.660
-8.530	-16.690	-9.080	45.170	20.150	30.320	-58.210	16.340	-40.830	27.840
-2.310	0.500	7.080	13.880	47.180	9.120	-54.120	36.860	-54.020	3.800
11.250	13.070	20.440	-34.680	68.390	11.560	-15.200	39.890	-44.560	-15.880
15.830	13.180	21.880	-71.360	76.370	18.550	43.210	12.970	-42.700	-25.130
13.550	5.640	17.680	-52.770	70.410	41.700	74.310	-23.240	-24.830	-26.540
6.540	13.490	13.050	-10.350	65.870	48.740	68.600	-56.850	-6.870	-48.180
2.090	17.220	-0.600	35.510	62.440	36.530	49.300	-74.930	-16.200	-64.710
2.680	13.050	-17.050	40.420	42.700	36.190	18.220	-60.690	-25.520	-60.120
-3.140	4.590	-16.470	47.620	7.840	37.750	-11.090	-34.630	-8.690	-42.990
-15.510	-7.540	-5.460	53.400	-18.600	35.180	-32.920	-6.010	5.340	-26.510
-22.380	-10.460	1.810	45.320	-27.840	1.350	-10.800	11.600	13.780	-13.560
-14.670	-7.390	-1.250	28.390	-18.890	-40.810	13.080	41.190	3.140	-4.970
8.090	-16.930	2.710	10.540	-2.850	-69.070	14.650	56.500	-15.360	-7.880
14.520	-4.610	26.220	7.920	-12.900	-88.780	-5.030	26.880	-33.730	-10.330
0.230	9.780	36.530	19.090	-38.030	-103.680	-32.050	-36.420	-31.620	-7.460

7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
-2.150	-9.470	5.070	-7.640	2.010	14.910	6.590	-9.650	14.570	8.900
4.100	16.850	12.490	-22.350	8.560	10.350	-4.470	-4.190	10.230	3.940
3.760	27.260	19.520	-18.310	14.880	6.190	-6.350	-1.370	6.820	-0.730
4.250	28.130	23.160	-20.140	17.720	6.010	3.630	-1.220	5.590	-4.480
11.650	26.240	19.540	-22.930	18.990	3.330	6.530	-1.810	4.720	-3.860
17.370	16.020	8.870	-19.000	17.520	-0.860	0.270	-2.270	-1.080	0.130
20.740	7.490	2.830	-9.060	12.820	2.590	-4.860	-3.400	-11.070	2.480
16.920	4.010	4.340	-3.310	6.130	10.540	-0.910	-4.910	-12.650	0.880
17.820	1.180	-1.430	-3.090	-1.630	20.040	3.070	-1.440	-13.630	-5.880
17.100	11.220	-16.510	3.590	-7.820	27.610	7.030	5.560	-20.060	-8.540
16.730	23.230	-39.140	8.110	-13.440	26.720	9.370	9.890	-20.110	-11.700
28.010	23.100	-51.720	5.510	-23.800	22.780	9.870	12.720	-8.310	-18.460
33.270	-8.980	-42.260	3.920	-44.080	20.970	11.100	14.750	1.840	-15.180
23.780	-38.350	-20.790	0.770	-45.840	19.330	10.080	17.190	5.220	-10.310
15.120	-44.860	-2.970	-5.010	-39.130	17.800	-4.960	19.010	5.630	-6.790
4.130	-35.580	7.610	-19.920	-25.830	15.950	-11.020	19.300	5.120	-3.700
-7.880	-23.650	28.320	-36.880	-14.100	9.550	-18.570	19.190	1.300	-4.860
-16.170	-7.170	42.760	-33.750	-0.690	-1.050	-19.950	19.200	-2.950	-5.820
-16.490	-3.090	45.000	-15.410	15.830	-7.990	-13.950	19.220	-10.110	-3.300
-9.170	3.970	29.770	2.580	31.810	-19.090	-8.340	18.940	-10.910	-0.340
4.720	9.710	3.520	21.580	43.870	-27.170	-3.110	16.960	-5.080	2.650
-2.880	1.050	-23.220	35.110	45.970	-29.920	1.860	12.280	-1.160	5.520
-22.060	-6.800	-25.860	35.100	39.250	-34.220	3.480	6.280	1.050	7.550
-30.560	-4.020	-31.300	23.650	33.120	-33.230	2.150	-9.890	-3.200	7.260
-40.980	1.650	-32.550	3.900	27.140	-26.630	7.050	-25.560	-8.830	8.910
-47.520	9.260	-29.830	-15.680	21.800	-21.400	12.230	-26.860	-14.360	13.600
-35.340	14.320	-22.660	-16.430	12.840	-13.810	13.260	-25.130	-16.720	15.780
-28.130	13.290	-15.850	-7.300	1.460	-4.850	12.780	-23.580	-9.620	12.860
-27.140	16.580	-8.480	0.410	-10.030	1.740	9.900	-21.630	-2.780	11.600
-15.960	18.420	4.810	10.180	-22.770	4.100	5.820	-20.630	3.770	13.100
2.060	25.480	21.860	22.970	-28.680	5.560	0.820	-21.120	5.820	11.680
16.800	28.290	37.060	30.780	-34.290	2.680	-4.400	-23.220	1.340	7.150
33.880	15.700	34.580	32.460	-32.800	-2.550	-6.240	-24.420	-2.700	-0.300
50.470	1.880	20.330	29.430	-21.700	-9.660	-5.650	-20.110	-2.190	-5.900
63.060	-4.900	8.670	20.250	-12.050	-18.430	-5.510	-12.550	-2.550	-10.990
66.780	4.130	10.650	5.990	-2.800	-24.200	-3.890	-5.930	-2.430	-13.450
65.780	-5.440	8.090	-4.860	5.080	-19.730	-7.760	1.510	-2.180	-11.300
60.210	-31.990	3.150	-1.740	-1.960	-4.270	-16.680	10.530	-0.990	-9.800
47.130	-40.210	-0.680	0.200	-18.290	12.680	-18.460	19.390	1.490	-11.040
13.270	-18.710	4.110	-0.720	-26.300	21.410	-12.130	23.890	5.930	-11.180
-29.510	-2.190	4.440	-2.530	-31.450	17.430	-9.040	29.160	12.020	-6.690
-55.850	-7.730	10.320	-2.000	-24.700	18.250	-8.780	34.480	18.010	1.800
-76.330	-24.580	14.930	0.620	-8.820	23.370	-9.940	34.320	21.160	7.830
-71.620	-14.670	18.130	2.250	0.000	21.910	-13.100	25.640	18.960	7.870
-41.620	-6.370	7.280	1.440	9.520	16.450	-15.220	19.620	13.710	7.820

7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058	7058
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
6.560	-3.690	-21.320	-11.780	-0.630	2.810	-6.530	-9.790	-5.140	-0.550
5.110	-6.640	-21.450	-6.620	1.020	5.140	-9.470	-5.720	-3.570	-1.130
2.280	-9.120	-15.930	-0.050	4.450	6.360	-12.110	-1.700	-1.010	-1.560
-0.360	-9.370	-11.670	4.600	9.490	7.250	-10.010	1.500	1.340	-1.800
-2.290	-8.370	-6.840	7.780	13.970	8.480	-4.000	-0.240	0.740	-2.130
-3.480	-2.560	-1.750	6.370	11.420	9.010	-0.260	-3.570	-1.790	-2.390
-4.190	5.310	3.830	3.310	5.390	6.110	0.140	-5.930	-5.290	-2.110
-3.630	11.200	8.330	-1.970	4.250	-3.700	0.600	-5.620	-6.450	-0.270
-3.310	16.120	5.210	-1.060	2.610	-7.440	1.040	-3.930	-6.540	1.520
-2.640	18.870	-3.540	4.580	1.080	-5.180	1.310	-1.860	-6.740	2.270
-0.210	14.570	-9.850	6.630	-1.720	0.720	1.110	0.170	-5.780	1.500
6.790	9.670	-6.090	8.120	-4.460	5.460	0.980	1.150	-1.260	0.880
10.850	5.590	6.610	7.080	-0.700	9.150	0.420	1.630	2.530	0.260
11.260	1.860	15.690	2.840	5.290	8.800	-1.850	1.550	1.970	0.420
10.410	-1.910	18.120	-7.640	10.110	0.630	-4.760	1.230	2.310	1.730
7.700	-4.140	18.000	-16.100	11.990	-7.200	-5.830	0.930	2.670	2.970
2.360	-5.130	15.650	-20.220	8.160	-13.530	-5.750	0.930	1.670	4.240
-5.190	-5.980	5.260	-19.000	1.360	-16.670	-5.940	1.140	1.500	5.150
-12.270	-5.090	-3.720	-9.560	-7.000	-16.580	-6.000	1.070	1.230	4.930
-15.130	2.300	-2.950	2.330	-9.440	-14.640	-6.170	0.170	1.110	4.320
-15.850	6.620	-3.980	12.700	-6.070	-12.980	-6.270	-0.600	1.470	3.850
-14.570	6.550	-7.010	15.890	-5.040	-11.220	-5.970	0.110	2.120	3.410
-12.010	4.960	-9.770	11.770	-5.660	-10.830	-3.320	1.520	2.450	3.010
-10.350	1.780	-12.160	8.700	-7.120	-13.920	0.470	0.970	2.530	3.350
-15.020	0.450	-11.780	5.900	-11.610	-17.430	3.770	-0.190	3.460	4.220
-10.460	0.080	-9.440	3.220	-13.210	-18.850	6.720	-1.230	6.700	4.620
1.360	1.500	-6.930	0.840	-8.420	-13.530	9.410	-1.670	9.790	3.070
11.880	2.410	-2.120	-0.460	-4.870	-3.630	10.410	-1.210	11.830	0.670
18.340	1.930	3.260	-1.780	-2.820	3.020	9.430	-1.200	9.930	-1.450
21.470	0.380	8.070	-4.310	-1.770	7.930	8.990	-2.030	7.250	-3.290
23.110	-2.570	10.410	-7.260	-0.960	12.350	10.310	-2.700	4.800	-2.460
20.000	-1.650	8.990	-8.450	1.250	13.140	13.850	-2.240	3.550	0.180
13.230	1.110	6.800	-7.670	2.860	12.800	13.730	-0.510	2.810	2.250
7.160	3.880	0.740	-5.910	2.140	16.880	11.760	1.320	2.100	4.120
0.250	7.910	-4.870	-2.420	1.820	21.070	9.910	5.470	2.070	5.050
-6.650	12.230	-4.490	1.280	0.910	18.830	5.100	10.370	3.040	4.440
-12.450	16.560	1.580	7.540	-1.950	16.640	-1.970	13.640	3.800	1.140
-15.200	14.260	3.760	13.790	-5.520	11.710	-7.790	14.890	3.980	-1.960
-9.790	4.820	3.160	10.810	-3.430	5.680	-11.210	14.220	2.270	-4.870
-4.380	-2.880	2.490	1.590	-0.650	-0.300	-14.040	10.430	0.460	-5.510
-0.050	-5.860	-0.340	-7.450	6.610	-5.980	-14.830	6.440	-1.410	-4.600
1.320	-4.290	-5.450	-13.040	12.600	-10.050	-13.760	2.040	-2.070	-3.160
2.040	-5.230	-9.600	-9.390	14.020	-7.950	-12.460	-1.520	-1.300	-0.740
1.330	-7.260	-11.280	-1.530	11.170	-4.660	-11.720	-4.080	-0.680	1.270
-1.130	-12.890	-12.230	0.700	5.950	-3.360	-11.610	-5.530	-0.190	3.430

7058	7058	7058	7058
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
6.130	-1.290	1.000	-2.790
9.370	-0.250	3.280	-3.030
12.050	0.580	5.760	-2.970
11.490	-1.350	5.120	-2.460
8.700	-5.220	-0.690	-2.070
5.990	-4.820	-6.060	-1.490
0.690	-0.490	-10.770	-1.160
-5.300	2.540	-9.470	-0.760
-3.820	3.390	-5.030	-0.600
1.070	3.300	-1.870	-1.500
3.100	2.510	0.030	-5.520
-1.740	1.350	1.620	-9.260
-7.760	0.060	3.270	-11.030
-9.210	-0.830	4.820	-9.840
-7.860	-0.850	4.880	-8.910
-7.430	-0.780	2.250	-7.460
-7.380	-0.750	-0.270	-3.440
-8.520	-0.740	-2.220	2.450
-9.090	-0.690	0.580	3.650
-6.830	-0.560	6.570	4.730
-3.180	-0.140	11.610	10.120
-2.250	0.250	15.200	14.120
-4.610	0.670	13.220	13.330
-6.390	1.040	10.370	11.000
-6.190	1.270	7.760	9.110
-4.060	1.260	5.180	7.090
-2.150	1.220	3.140	3.980
0.980	1.190	1.680	-0.020
3.830	1.150	0.080	-2.780
6.140	1.110	-1.590	-3.500
7.840	1.090	-3.370	-4.490
8.380	1.190	-5.110	-5.970
6.050	1.420	-6.650	-8.130
3.770	1.440	-7.630	-9.960
1.490	1.340	-8.630	-9.090
-0.760	1.270	-9.240	-1.670
-3.040	0.960	-9.610	
-5.200	0.040	-9.930	
-7.350	-0.880	-9.240	
-9.400	-1.700	-7.150	
-10.810	-2.210	-5.180	
-9.620	-2.710	-3.960	
-7.640	-3.070	-3.350	
-5.480	-2.340	-2.610	
-3.070	-0.620	-2.480	

Registro de aceleración usado, sismo Lima 05/01/1974, Zarate – Cod. 7046

7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
-5.280	-3.090	-5.170	-2.640	0.170	3.190	-10.570	2.450	-2.160	3.510
-1.420	1.620	-5.280	-0.290	-3.350	1.250	0.160	-1.890	-3.020	4.150
3.580	3.270	-0.920	6.610	-5.640	0.770	2.800	0.890	-2.160	1.220
3.460	-4.070	7.970	5.620	-1.230	-1.900	5.490	0.430	0.060	-0.630
-0.650	-8.850	11.620	0.510	2.990	-1.970	1.530	0.770	3.350	0.880
-3.460	5.910	-2.350	-2.180	4.700	-1.500	-3.200	0.050	2.350	-0.550
-3.480	-0.190	-4.690	5.040	-5.100	0.880	-4.770	-1.670	-2.520	-4.500
1.390	-5.640	-1.690	5.580	3.060	-0.860	0.820	-4.910	-3.040	-6.870
4.310	-7.590	4.830	-5.310	11.760	-4.320	7.030	-3.550	0.790	-4.480
0.050	-1.530	-1.580	-19.410	5.400	9.530	2.420	6.520	3.180	0.440
-4.470	-0.690	-6.290	-3.040	-11.140	15.050	-6.220	7.120	2.870	4.100
1.130	4.010	-4.760	14.090	-5.980	1.680	-3.480	-4.160	-0.260	2.280
4.250	10.280	2.390	9.190	9.840	-10.310	-1.730	-7.130	-4.210	-1.630
-3.420	0.350	2.970	-12.290	8.080	2.690	-1.670	2.140	-2.390	-4.360
-13.440	-10.550	-1.300	-8.140	-4.110	11.800	-4.260	4.070	4.470	1.580
1.890	-8.480	-0.970	10.120	-1.330	-4.320	-0.950	2.440	5.650	1.750
6.820	3.890	2.220	17.500	5.720	-17.020	-0.940	-1.420	3.030	-5.570
0.760	6.770	5.960	2.850	-2.590	-4.720	-5.650	-3.270	0.600	-1.910
-8.990	-5.690	-1.470	-10.050	-13.110	13.150	-0.350	-4.190	-0.210	10.190
0.410	-10.570	-9.020	2.530	-8.100	1.810	2.900	-1.370	-1.360	7.130
7.490	-2.660	-7.040	7.360	1.760	-17.740	2.690	5.880	-5.720	-3.630
2.050	4.140	1.250	6.130	1.750	-2.580	-1.270	7.190	-1.800	-10.770
-6.550	3.090	1.470	-2.430	-2.250	12.300	-1.010	0.120	-1.910	-0.640
-3.450	1.730	1.610	1.980	2.240	4.210	4.170	-2.840	3.380	4.860
-1.580	1.660	0.360	6.680	5.960	-12.500	4.880	-2.410	2.040	5.090
-2.920	-1.820	-0.430	3.050	5.320	-6.040	-0.080	-2.340	-1.030	-3.530
-4.250	1.030	4.980	1.740	2.420	3.220	-5.630	-3.810	-3.460	-7.820
-4.170	5.290	1.430	0.310	1.250	5.610	-3.190	2.910	-0.850	-3.480
-5.250	-3.020	-11.800	-1.570	0.820	-9.790	-1.250	9.650	-0.350	2.370
-3.050	1.090	-4.350	-3.150	-0.950	-3.330	0.150	2.630	-2.770	5.830
2.580	1.730	12.330	4.020	-1.330	7.370	4.980	-7.000	-4.170	0.840
1.210	-4.010	10.270	5.910	-0.270	9.680	7.090	-8.380	7.450	-2.470
-1.410	-8.820	-6.530	1.500	0.580	-0.650	1.170	4.460	8.060	-4.130
-1.740	-3.210	-14.910	-2.970	0.930	-2.090	-5.570	6.110	4.190	-2.680
0.280	6.200	3.040	-2.210	0.780	1.190	-4.400	-1.910	-0.110	-0.240
1.080	2.950	16.350	-1.060	0.300	-0.090	4.650	-9.370	0.460	-1.000
-3.640	-3.280	5.910	-3.120	2.320	-5.490	8.160	-10.290	4.160	-5.220
-3.090	-5.470	-3.360	-2.910	-2.900	-1.470	2.400	4.520	2.410	-6.450
-2.390	-1.360	-9.250	6.370	-0.910	1.480	-5.630	9.770	-2.420	-0.750
-2.120	-0.060	5.070	4.140	5.570	1.590	-7.200	4.400	-9.020	0.510
-1.740	-0.080	4.260	-6.470	7.350	1.710	-4.640	-1.000	-5.700	0.290
-4.440	2.110	-8.530	-12.120	-0.890	2.550	-4.030	0.970	3.840	1.170
4.500	0.390	-4.220	0.520	-4.380	3.700	-3.090	1.120	2.560	3.400
3.450	-0.960	-0.850	11.150	0.990	1.170	1.930	-4.450	-2.920	1.330
-2.820	-2.170	3.680	7.820	4.110	-7.940	3.710	-3.880	-0.220	-5.610

7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
-4.220	-0.700	17.490	-3.240	53.860	-55.230	-10.100	26.970	-21.750	-7.160
0.670	-5.740	10.500	-21.120	54.150	-6.600	13.510	13.710	-77.530	20.670
2.690	1.470	3.150	1.890	1.790	21.850	38.340	-0.230	-28.770	-13.220
3.290	9.030	-1.310	29.480	-51.210	36.910	26.020	-47.300	31.510	-32.490
3.590	0.650	-3.860	19.020	-22.590	10.250	-7.890	-8.340	40.830	9.710
2.730	0.080	-11.280	-18.390	31.400	-41.560	-41.580	58.220	31.280	84.900
-3.300	1.890	-8.000	-37.710	1.080	-77.270	-36.970	25.070	-3.690	62.770
-3.430	4.550	-11.520	-8.740	-46.670	-31.710	48.790	-48.440	-4.790	4.630
7.780	0.860	-12.280	26.190	-35.020	53.940	87.390	-87.430	11.150	-53.510
7.700	-2.410	-14.120	23.660	-27.560	61.310	16.200	-1.740	29.560	-52.380
-4.200	-0.920	3.550	6.580	-26.320	9.430	-32.670	75.500	17.910	-37.440
-11.470	1.300	27.540	9.670	14.100	-66.080	-46.520	-12.890	-46.750	-7.390
-4.430	1.540	23.540	-1.690	68.590	-55.590	-12.600	-85.240	-67.510	19.270
5.090	1.270	-1.770	-6.040	81.240	-2.290	16.150	-57.630	-33.260	4.720
0.990	-3.210	-15.850	9.900	17.480	37.480	-29.730	33.980	-5.010	-28.480
-4.220	-1.070	-16.730	29.560	-56.540	17.800	-50.680	62.270	14.960	4.540
3.260	0.840	-2.840	2.560	-41.510	-0.130	15.000	-6.720	-8.420	7.570
6.580	0.880	16.770	-34.280	12.090	31.600	76.530	-7.310	8.420	-1.270
-2.620	-6.620	22.920	-2.630	44.200	75.760	22.120	29.280	37.130	4.910
-5.910	-6.190	15.680	38.540	31.190	69.880	-68.470	23.100	-5.630	22.900
5.410	1.320	-6.890	28.600	24.320	-14.380	-61.860	5.190	-25.160	46.890
11.140	3.740	-19.350	-43.310	-49.400	-86.970	-7.410	-22.830	-41.160	25.910
-2.380	1.770	-8.270	-60.120	-113.610	-24.330	14.340	15.240	-11.370	4.020
-7.640	2.210	15.720	1.040	-128.080	63.550	16.830	60.480	26.190	23.680
-1.690	-3.980	18.380	44.950	-23.100	99.390	34.550	-6.540	17.090	24.680
2.610	-10.060	6.720	-0.980	66.400	-2.380	84.180	-22.880	11.060	-41.930
2.120	-6.200	-9.240	-30.710	57.390	-139.590	70.380	18.550	-3.610	-67.140
2.400	15.240	-18.060	-10.690	-19.670	-127.350	-46.490	56.990	-10.090	-9.570
6.210	11.130	-14.340	10.690	-90.640	-20.900	-101.230	24.160	20.160	29.220
-4.050	-15.160	-10.780	4.340	-47.410	115.210	-7.450	-86.830	2.470	7.160
-15.220	-23.900	-2.320	4.160	42.170	112.900	55.400	-74.070	-28.820	-53.420
-5.410	5.370	10.760	22.970	117.420	20.360	37.410	31.030	-29.540	-67.020
7.220	17.360	1.530	14.630	108.620	-45.640	-49.130	45.140	2.080	30.060
2.610	7.620	7.820	-9.900	-15.480	-56.990	-51.310	-8.730	34.250	37.330
-3.250	-8.010	13.750	-6.350	-103.960	-18.430	-7.250	-53.240	22.980	15.150
-2.430	3.990	13.010	4.850	-85.780	30.190	31.500	-41.170	19.030	22.140
2.890	-0.940	2.440	-0.120	45.550	8.170	13.370	18.250	27.870	-7.800
-3.000	-11.510	-3.460	-7.300	106.130	-22.080	-5.440	38.820	28.380	-26.930
-5.200	-11.130	-2.360	-8.550	55.590	-42.520	-3.580	37.550	-19.240	-25.360
-4.410	9.490	5.010	16.040	-55.750	-23.870	-9.640	8.800	-76.880	19.970
-3.310	18.930	3.650	29.540	-40.970	-20.340	-22.110	-76.080	-20.490	78.010
-5.120	-5.960	-3.510	10.400	64.290	-1.950	-18.830	-98.150	70.880	37.720
-4.650	-18.950	-8.700	-12.900	60.140	14.810	30.740	-10.590	40.730	-78.940
3.170	-4.710	-4.450	-22.370	-9.420	26.700	38.380	83.620	-50.120	-66.770
7.230	12.270	6.520	11.370	-72.790	23.600	7.010	80.760	-87.470	-4.920

7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2	7046 cm/seg2
29.560	38.470	26.160	13.840	11.680	3.420	7.890	14.320	-12.600	-19.760
-4.940	-4.730	16.610	6.820	20.620	4.420	-23.550	4.020	-19.480	-6.640
-37.520	-30.780	-7.050	-13.320	-8.830	0.040	-14.850	-5.970	1.770	7.970
14.150	-23.120	-25.960	-20.360	-7.230	-0.800	2.790	-0.030	28.170	2.850
36.380	-6.550	-10.440	2.440	-5.260	1.000	16.830	5.250	14.040	-10.230
11.440	14.440	20.100	15.620	-1.920	-7.180	2.280	-0.520	-18.890	-7.320
3.820	-7.060	39.500	-2.490	3.500	-14.740	-17.050	4.050	-30.340	4.710
45.120	-52.110	29.400	-17.760	11.770	15.400	-6.810	-5.200	-4.600	2.570
56.920	-26.030	-5.000	1.200	13.090	40.610	-5.130	-1.830	19.370	-4.720
-15.440	8.030	-27.390	25.980	-0.210	10.040	13.260	5.100	12.140	-5.040
-86.480	11.070	-40.460	0.010	-27.830	-29.660	21.170	12.880	2.480	2.710
-77.070	-11.670	-11.350	-31.100	-5.470	-36.090	8.880	9.230	4.020	8.500
38.150	-17.120	26.540	-18.000	12.240	9.770	-3.640	-13.160	5.490	-9.300
73.120	28.710	2.220	3.440	17.640	22.470	-10.410	-3.890	-1.580	-13.640
7.920	47.780	-24.100	-13.750	4.360	-1.090	9.940	16.570	-8.210	3.800
-50.600	32.750	-32.770	-32.250	-13.390	-7.740	19.440	17.110	-1.670	-1.400
-26.450	-20.170	27.460	-18.920	-16.950	11.210	0.830	-9.540	2.890	-5.450
9.920	-26.990	44.870	11.580	-11.980	19.280	-16.250	-10.800	-2.990	-8.960
29.060	-10.460	-23.990	17.060	-16.070	-2.970	-4.350	-2.790	-8.160	-2.320
9.770	10.930	-43.570	7.300	-12.160	-37.460	13.210	1.470	-4.430	7.060
0.420	26.900	10.780	-6.980	11.880	-10.850	6.750	-3.110	-3.690	6.240
-25.220	13.380	56.760	4.660	21.560	6.410	-12.650	-3.800	-12.630	-4.160
-34.590	-9.350	12.310	13.940	12.040	7.470	-2.450	24.120	-13.390	7.840
-4.200	23.660	-67.000	9.460	10.570	-8.380	17.870	13.100	2.170	7.890
41.070	34.820	-42.260	9.190	3.130	-16.010	20.750	-11.000	3.990	1.340
48.420	22.020	44.310	6.220	-9.350	-7.370	-13.240	-17.760	-3.720	-10.030
-16.900	-45.900	73.590	-2.600	-19.910	-3.420	-27.600	-2.960	-7.550	-2.460
-79.470	-80.350	-5.370	3.370	13.940	1.170	-10.220	12.160	3.240	5.620
-20.880	-33.900	-45.660	24.350	28.380	2.890	4.080	-8.280	1.580	2.750
72.280	20.950	-9.560	23.710	26.680	-7.980	1.200	-24.470	-1.230	-13.740
68.750	39.380	26.330	-4.870	-19.340	-20.140	-15.660	-10.730	-4.340	-9.380
15.480	29.130	22.150	-24.280	-29.770	6.610	-6.570	18.000	-2.770	15.120
-56.620	-3.940	-10.670	-17.010	2.540	36.430	3.670	8.470	-1.570	20.550
-35.990	-20.340	-17.480	26.550	20.570	11.440	1.900	-9.990	4.600	5.840
36.500	-27.470	2.790	15.250	5.140	-27.550	0.780	-16.070	9.820	-12.770
40.940	-28.730	14.230	-6.970	-6.130	-23.870	-4.290	0.340	11.110	-13.340
22.040	-12.380	14.020	-5.010	-10.850	11.600	3.230	11.440	4.940	10.610
-0.700	20.680	17.540	7.040	-8.980	17.880	-0.700	4.120	-8.910	5.680
16.380	28.910	-14.420	-3.790	-6.690	-6.390	-9.870	-7.900	-11.170	-0.570
30.220	29.950	-28.640	-15.410	-5.070	-4.180	-1.870	3.300	-0.670	-1.870
-9.930	-0.250	-30.850	-9.720	8.570	7.800	6.440	4.720	2.270	-0.130
-55.660	-7.410	-0.660	3.130	13.260	-3.610	2.800	-3.740	9.380	-0.480
-37.100	-12.730	30.610	-1.670	1.570	-6.800	-6.940	-3.580	7.420	1.720
9.480	-6.750	21.330	-9.890	-11.290	-2.360	-3.680	8.250	0.900	5.560
51.410	13.050	1.640	-9.070	-1.510	27.100	13.720	17.720	-16.350	3.480

7046	7046	7046	7046	7046	7046	7046
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
-4.460	0.330	5.690	18.380	0.610	-1.920	-0.750
-3.920	7.750	3.260	-5.410	-14.070	-6.520	-0.530
6.340	3.050	0.060	-17.190	-11.950	-1.480	0.520
11.580	0.120	-2.450	-0.810	2.580	1.580	2.140
0.080	0.870	-4.750	13.410	8.780	-1.090	-1.400
-13.890	5.060	-2.060	-0.510	-3.050	-4.570	-5.460
-2.040	4.690	5.530	-17.360	-15.500	-4.250	-2.000
12.560	-2.030	11.850	-9.530	-7.570	-4.420	4.360
1.140	7.990	2.010	13.650	3.690	-4.820	6.340
-6.200	16.640	-10.820	16.480	5.820	-0.750	-3.880
-2.260	9.040	-1.440	-4.130	-5.990	2.540	-7.640
14.210	-6.630	9.950	-10.070	-10.640	1.210	-5.190
8.990	-9.280	7.530	10.410	-0.680	-5.420	3.830
-3.270	5.290	-0.100	11.730	9.430	-4.930	1.500
-9.100	10.160	-7.840	2.020	4.630	6.530	-8.200
-5.030	-3.960	0.090	-6.930	-2.610	2.130	-8.860
0.480	-7.620	0.900	0.750	-2.450	-8.430	4.830
-2.100	2.320	-6.490	0.180	11.840	-15.150	11.440
-4.290	14.960	-8.560	-6.790	10.270	-2.950	2.900
-0.180	6.670	-1.870	-9.680	4.260	-1.610	-13.480
-0.740	-5.250	2.220	2.140	4.030	-6.310	
-5.780	-5.400	-0.300	6.920	7.950	-11.640	
-8.500	0.240	1.400	-5.530	5.860	-2.920	
3.360	5.380	5.310	-6.840	-1.610	4.850	
21.390	5.630	5.950	4.390	-3.060	4.760	
17.500	7.440	-6.550	7.090	1.760	0.300	
-1.640	-0.820	-14.300	0.150	6.160	1.940	
-8.450	-11.570	-3.140	-3.510	3.690	7.180	
6.180	-14.300	5.990	0.040	-5.000	6.920	
14.430	-9.100	4.880	-0.800	-2.500	1.110	
4.640	-0.190	-4.810	1.670	-2.530	-7.810	
0.850	0.710	-6.690	3.060	0.030	-5.810	
8.290	-1.760	2.600	9.910	-4.380	-0.120	
8.100	-5.530	-2.400	-0.920	-9.950	4.020	
0.150	-6.320	-3.750	-5.210	-5.740	-2.810	
-5.890	2.890	-2.470	4.730	7.030	-3.180	
1.010	9.290	5.050	10.480	6.060	0.460	
4.670	10.590	4.770	-4.540	4.350	8.160	
-7.210	-3.510	1.030	-9.060	-4.380	-1.600	
-13.060	-6.580	1.390	6.160	-3.280	-7.590	
-3.030	1.550	3.630	16.390	-2.860	-4.170	
4.100	0.330	-4.880	8.340	-4.810	2.790	
-0.100	0.470	-13.740	-11.520	-3.870	5.720	
-12.170	-3.750	-5.700	-2.070	7.670	3.030	
-16.940	4.760	13.270	8.980	4.630	-0.670	

Registro de aceleración usado, sismo Ancash 31/05/1970, Huaraz – Cod. 7039

7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
7.830	-5.780	-1.780	4.170	13.500	43.930	21.270	36.680	-18.470	-20.860
2.930	2.240	-2.720	-12.520	25.160	38.760	46.090	12.480	19.970	-43.960
-2.850	0.500	-0.540	-25.510	37.100	12.810	75.900	-11.710	32.690	-17.090
-7.450	8.130	14.550	-25.890	27.890	9.920	70.070	-18.360	21.070	4.680
-9.430	16.860	26.330	-9.480	-0.580	26.090	21.540	-37.510	-6.760	-16.520
-1.080	24.780	20.770	-4.800	-9.760	14.420	-0.900	-73.060	-30.630	-52.960
6.260	27.740	10.780	-25.950	17.270	-18.190	15.750	-91.950	-4.580	-69.120
-2.630	14.260	8.740	-38.050	40.300	-32.420	-19.070	-60.680	50.530	-35.080
-10.020	-3.430	8.690	-29.200	23.480	-2.720	-89.010	-38.590	42.810	6.270
-8.740	-7.660	5.940	-0.610	-8.020	20.660	-95.230	-22.840	-13.280	19.730
-5.410	-2.680	1.550	20.330	-2.560	22.030	-49.700	28.430	-25.670	42.710
2.940	-1.930	-8.250	9.490	30.080	25.410	-10.790	72.190	0.760	72.260
13.620	-8.290	-23.540	-1.070	37.860	32.810	-8.510	75.330	14.930	56.110
13.010	-22.130	-19.630	16.700	28.380	31.430	-24.940	56.000	24.480	8.020
-2.430	-27.100	-4.080	46.870	25.150	20.150	-14.760	42.610	23.830	-12.800
-11.060	-10.860	-17.730	37.200	11.230	9.360	16.660	58.360	11.380	-8.520
-6.160	4.360	-24.510	1.900	-13.630	-6.410	18.560	66.660	-2.430	-8.600
-3.020	9.490	-0.480	9.290	-41.070	-35.440	-19.390	31.760	-28.620	-24.090
-5.030	10.770	13.430	26.740	-45.500	-72.420	-58.560	7.840	-57.810	-27.850
-9.820	10.830	18.470	5.850	-8.520	-97.750	-43.030	7.630	-85.580	-3.790
-7.620	15.440	21.830	-33.310	16.190	-80.280	5.740	-7.170	-28.750	10.780
0.380	18.220	18.710	-49.830	-26.700	-38.060	12.580	-22.090	62.150	21.260
1.990	12.050	19.590	-25.720	-51.420	-5.500	-15.100	-15.400	38.430	13.150
-11.200	-6.450	23.750	5.800	-24.460	-8.110	-8.500	-11.800	-37.030	-37.670
-16.880	-25.030	12.800	4.340	-8.140	-7.350	4.610	-29.410	-35.340	-46.360
-0.090	-15.210	-7.600	-5.370	-3.090	22.420	7.620	-49.250	-25.460	1.360
10.660	5.650	-19.790	6.830	-16.670	36.990	23.030	-44.840	-50.240	11.620
-4.780	16.820	-13.510	27.570	-24.760	8.080	24.370	-35.220	1.990	-14.150
-11.690	27.690	1.580	38.080	-3.510	-24.600	-1.600	-24.180	85.060	-19.130
0.320	39.610	-3.020	37.310	2.590	-14.570	-26.110	-12.100	69.360	3.590
10.710	32.750	-22.250	31.400	-6.210	1.870	-24.360	-14.770	-6.290	32.930
8.000	12.420	-20.980	20.390	4.680	7.340	-17.980	-9.340	-60.950	60.480
7.600	-4.620	6.210	2.310	24.840	7.150	-4.530	20.140	-31.750	57.270
12.310	-13.990	6.390	9.380	18.330	10.550	9.460	35.290	30.930	27.220
4.600	-16.980	-12.340	23.170	-4.150	26.330	7.590	10.270	26.550	-1.820
-2.970	-27.980	3.620	-7.360	-15.160	47.070	11.830	3.150	17.500	-8.850
-0.970	-45.750	24.320	-43.090	-16.580	55.350	30.310	22.370	31.990	-26.000
5.320	-44.120	23.200	-45.500	-18.720	35.200	52.460	34.280	42.440	-42.360
2.910	-22.690	19.190	-41.430	-22.660	7.410	48.990	34.840	28.260	-21.520
-6.800	-15.110	18.920	-32.490	-7.790	-11.360	17.550	9.830	-1.010	13.180
-13.320	-14.010	23.650	-6.140	16.860	-24.590	-23.020	-28.510	-31.710	21.330
-9.360	0.890	24.710	-12.100	9.700	-18.140	-20.480	-46.320	-51.340	25.830
-0.980	8.190	14.840	-40.740	13.950	-5.550	18.020	-45.460	-24.290	27.500
-8.030	1.190	3.010	-36.120	34.790	2.040	22.790	-51.520	22.800	-0.280
-17.600	-5.280	4.190	-7.210	39.690	10.100	30.020	-50.080	21.490	-25.710

7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
-32.220	-4.310	14.590	8.620	36.250	-8.680	19.230	13.080	17.990	-0.650
-31.990	-2.280	-20.080	-15.750	23.220	15.790	45.130	4.960	3.020	-8.440
-1.880	-13.970	-19.530	-15.460	9.470	34.730	40.020	-11.880	-21.850	-12.110
50.870	-9.890	22.010	3.400	5.590	15.520	-7.080	-11.570	-43.150	-9.840
51.030	-6.060	34.810	10.190	18.660	-21.920	-21.980	8.730	-32.130	-16.180
-7.820	-13.930	-2.320	0.200	19.990	-31.680	0.120	37.490	-7.100	-39.050
-33.080	-21.140	-31.700	-9.390	-2.280	-28.040	1.200	49.410	-9.650	-33.110
-9.160	-15.800	14.730	-24.580	-13.970	-12.530	1.770	30.860	-11.030	18.890
-6.850	-28.530	56.730	-35.040	5.960	26.900	20.990	-0.470	16.810	54.730
11.140	-49.670	23.030	-21.690	27.190	28.190	32.490	-6.760	55.300	62.300
21.250	7.110	-20.640	-28.570	11.760	-11.020	9.160	13.890	62.190	47.690
-28.830	47.500	-35.740	-33.040	-21.610	-6.560	-22.550	8.410	22.620	12.040
-48.140	21.210	-56.700	6.830	-10.730	38.900	-16.890	-21.740	-25.520	-21.820
-1.100	23.100	-54.340	65.340	38.700	44.320	7.700	-9.410	-21.290	-28.400
19.500	37.700	-4.790	91.160	29.760	12.570	21.180	43.150	20.290	-15.320
-22.750	29.910	17.640	61.530	-39.930	1.500	9.490	72.850	26.670	-9.540
7.830	20.790	-2.400	14.340	-48.810	13.370	-7.040	40.220	1.820	-7.920
58.080	17.910	-10.360	1.080	-17.660	25.590	-4.750	-25.780	-16.550	5.100
30.920	8.990	-0.770	14.460	5.900	7.770	0.790	-45.920	-8.560	16.280
-0.750	-18.320	-0.800	-2.090	25.170	-17.060	-4.170	-21.810	-15.810	20.590
-12.060	-6.550	9.580	-46.740	8.090	-30.930	-16.330	2.010	-46.530	8.110
-11.350	10.970	42.470	-40.410	2.250	-34.620	-12.130	16.460	-33.680	-18.360
36.740	-24.200	23.770	11.570	15.920	-3.120	21.590	5.420	3.210	-22.820
55.240	-44.250	-12.050	12.970	-4.480	-2.530	29.360	-8.960	11.630	1.130
8.170	-11.980	10.960	17.680	1.740	-13.560	-17.460	8.870	14.570	16.070
-8.640	33.260	11.160	25.250	33.160	-24.910	-49.370	20.420	24.160	0.440
22.190	35.450	-14.890	8.330	-6.240	-44.630	-26.700	-5.430	12.010	-16.890
19.850	-4.280	-0.540	17.370	-58.680	-22.760	-20.810	-18.150	-26.260	-1.090
-4.190	-30.850	21.340	-4.140	-39.440	-14.810	-26.430	0.430	-43.420	11.140
-29.060	-17.140	34.490	-38.760	12.590	-5.780	-6.510	9.070	4.240	0.730
-63.360	-7.970	55.780	-15.850	33.910	59.150	24.500	-0.400	61.190	2.840
-78.530	9.560	51.410	-7.560	12.730	68.960	39.190	-31.770	48.180	11.030
-48.100	29.370	14.000	-13.870	-11.730	-8.730	19.710	-47.250	9.670	-4.120
-4.900	15.190	-26.920	-3.990	5.590	-45.740	-7.270	-27.280	-7.340	-5.620
1.350	-15.440	-69.070	-8.770	23.510	-16.350	-17.160	-17.510	-5.440	17.030
1.030	-18.530	-76.620	-11.180	16.600	-14.680	-30.950	-12.140	-5.020	26.650
14.580	-7.690	-23.540	-12.420	5.330	-35.400	-24.840	-6.930	-29.430	1.590
28.590	-15.560	23.410	-12.520	-0.840	-19.580	-4.350	-4.750	-47.720	-9.490
19.510	-7.710	-4.400	2.700	-7.430	7.590	9.700	-9.380	-38.390	7.040
-9.350	19.420	-4.460	-2.540	-15.480	-13.890	-0.520	-3.490	-16.850	-3.990
-0.160	25.550	47.710	-17.920	-13.810	-20.750	-21.580	30.440	9.960	-19.490
21.490	4.800	27.280	-13.540	-3.900	11.110	-19.060	43.940	-9.280	-8.290
3.690	-21.310	-13.320	-21.740	0.760	9.740	3.990	7.470	-32.640	10.590
-27.670	-15.750	14.450	-5.400	0.050	3.480	27.400	-11.080	-2.680	25.840
-28.190	14.530	32.540	31.880	-5.950	9.600	20.660	11.290	15.430	19.170

7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2	7039 cm/seg2
-4.030	5.630	-6.110	-10.090	13.280	-20.960	-21.030	25.460	17.920	-32.080
-27.650	9.940	8.650	12.860	8.040	-22.260	-13.750	-7.410	10.980	-26.030
-31.920	0.230	11.480	20.980	-12.170	-0.330	-8.810	-23.100	-2.330	-14.880
-14.180	-17.540	-3.860	19.230	-34.770	9.790	1.490	-22.620	-11.210	-6.170
5.390	-20.540	-4.610	-1.120	-25.680	8.750	17.700	-14.610	-3.610	4.620
-3.510	-2.330	13.240	-8.390	8.480	9.170	23.740	-6.100	15.500	17.480
-33.650	21.330	7.880	7.100	5.390	4.020	13.160	-6.670	24.940	13.500
-50.400	26.810	-16.900	14.120	-16.330	6.570	5.240	-3.550	18.790	0.880
-43.880	4.510	-17.640	15.460	-11.700	23.010	9.070	1.650	14.360	6.530
-7.800	-24.580	12.230	22.350	-1.490	37.540	15.180	1.910	19.500	25.410
31.270	-50.710	14.200	16.620	9.620	29.460	7.170	0.890	26.160	30.580
10.550	-33.630	-5.070	-6.020	28.640	4.460	-9.440	0.950	20.070	9.800
-22.380	5.820	-7.170	-20.160	35.940	-10.490	-4.150	6.290	2.240	-0.610
-2.170	15.520	12.960	-13.470	15.820	-13.040	9.070	10.270	-8.810	10.870
27.310	3.010	4.010	-11.550	-8.860	-14.760	2.550	2.730	-11.300	16.080
17.400	-15.400	-23.950	-25.920	-5.560	-18.110	0.240	-1.380	-8.990	16.490
-4.500	-31.220	-5.860	-31.330	12.770	-2.560	0.860	-5.450	-9.810	20.290
-13.680	-15.890	21.690	-19.650	13.410	4.440	-5.300	-16.440	-21.920	19.480
-5.430	23.470	0.160	-10.050	1.720	-6.340	-11.730	-18.630	-24.730	11.800
1.580	33.920	-23.540	-0.670	-6.570	-9.580	-8.710	-12.530	-8.690	7.380
4.680	13.340	-9.390	7.980	-7.350	3.370	-1.120	-2.380	3.550	13.990
14.430	5.550	6.850	5.700	2.450	21.620	1.500	4.480	10.310	12.870
25.470	12.750	5.200	8.790	2.810	20.150	2.600	1.410	15.940	-6.690
21.910	10.910	9.330	26.150	-17.530	5.560	11.110	-3.320	9.500	-25.780
9.880	-1.990	30.020	26.730	-36.730	8.630	14.150	-4.070	-4.500	-16.480
16.880	-13.310	43.020	22.300	-35.920	21.060	2.140	-1.040	-9.530	-0.590
24.060	-8.670	30.710	29.410	-25.680	16.930	3.540	4.550	-1.890	-13.360
6.580	5.440	17.450	25.990	-15.400	6.000	8.680	0.010	8.890	-21.070
-7.340	-10.670	14.550	9.020	-13.220	8.250	8.470	-7.240	20.400	-13.110
1.620	-31.330	5.370	2.880	-12.600	9.360	14.320	-3.560	22.010	-10.030
7.670	-13.040	-11.140	-3.450	-1.430	-5.780	10.330	12.170	10.130	-14.590
3.720	19.910	-18.750	-16.670	10.100	-19.420	-4.430	24.960	9.360	-3.100
3.230	24.540	-4.320	-9.590	12.520	-23.420	-9.970	16.150	-0.280	5.680
6.780	5.830	7.610	-5.230	11.390	-19.670	-10.530	-3.830	-18.150	-1.380
-0.380	3.980	6.200	-23.510	18.510	-19.130	-12.820	-8.990	-15.240	-11.570
-11.570	18.870	-3.660	-29.200	32.160	-19.750	-12.120	3.160	-2.790	-9.160
-19.700	25.080	-5.460	0.640	32.150	-5.170	-16.240	7.540	0.260	-2.330
-27.270	12.110	-5.500	-3.220	11.930	11.650	-25.920	-12.390	-12.920	-6.760
-8.810	-2.950	-20.590	-3.420	8.730	22.730	-20.980	-23.090	-14.300	-5.910
2.910	-12.520	-35.520	15.670	25.260	19.260	-4.130	-8.220	-0.100	2.610
-17.280	-21.410	-26.480	9.570	34.460	1.830	9.710	-2.950	6.760	9.380
-9.350	-15.930	-9.870	0.750	17.420	-1.430	10.790	-13.370	2.380	-3.930
26.560	-1.630	-16.220	0.710	-14.090	11.080	-0.190	-20.530	-5.670	-12.960
30.580	-5.600	-37.450	2.420	-32.270	8.360	8.480	-14.710	-14.850	3.450
8.380	-14.080	-40.570	6.120	-19.050	-13.950	33.660	5.050	-26.060	9.650

7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
6.650	3.210	0.870	-2.610	-1.450	5.290	7.120	24.290	-0.540	-8.220
7.410	14.200	-2.610	-10.540	10.610	12.690	4.730	19.640	-2.050	-2.220
0.660	2.870	-4.990	2.620	5.090	12.620	0.580	11.810	-4.070	8.230
3.440	-0.820	-2.770	-1.530	-6.730	12.190	3.420	13.170	-5.580	8.010
20.460	3.830	3.830	-14.390	-7.410	9.320	0.650	10.620	-4.930	3.740
26.150	-8.590	12.400	-1.420	0.060	8.010	-1.430	19.210	-0.060	7.070
18.330	-20.400	17.040	22.080	5.030	9.200	5.710	18.270	6.680	5.680
10.890	-10.870	12.450	26.330	2.680	12.680	12.260	-5.320	12.650	-4.380
-0.470	8.180	6.270	6.260	-2.830	6.490	15.160	-18.370	14.380	-7.680
-6.040	9.870	10.100	-0.780	-2.720	-6.490	13.250	-6.140	12.350	-1.320
-4.970	5.760	17.740	8.290	1.340	-7.160	2.840	4.590	10.310	3.130
-21.120	17.350	10.960	4.180	6.750	-4.440	-10.140	1.770	8.070	2.260
-24.210	25.700	-6.470	-4.950	9.320	-3.680	-13.230	2.030	5.070	0.470
-4.910	14.810	-9.130	-3.940	7.910	-12.550	-5.420	0.790	-1.510	3.590
-4.740	0.170	-0.770	3.760	10.380	-18.390	4.400	-7.140	-15.460	10.530
-21.990	-11.020	0.730	0.960	12.440	-2.980	9.090	-5.120	-32.390	10.440
-28.790	-13.740	0.910	-7.980	4.990	16.940	5.800	8.830	-31.190	1.580
-15.310	-0.620	8.930	-8.740	-7.000	19.600	-3.780	15.440	-9.020	-0.430
2.830	13.160	22.120	-11.610	-10.140	10.700	-10.410	11.990	1.390	-1.790
6.370	9.730	27.730	-13.850	-8.220	4.810	-5.770	4.850	-1.870	-12.980
2.460	-3.130	18.320	-12.800	-10.040	5.680	-3.790	-3.130	7.550	-14.860
6.390	-5.710	3.260	-9.190	-7.020	5.940	-8.470	-3.110	24.660	-5.040
10.410	3.780	-5.750	-1.210	1.710	3.280	-0.980	-0.380	24.720	-1.560
7.100	6.560	-4.870	4.770	9.430	3.200	6.220	-4.340	11.850	-3.250
6.320	-6.910	-4.210	3.200	16.730	5.890	3.930	-4.060	10.230	2.300
9.540	-14.170	-6.320	6.480	12.770	7.160	-2.400	-1.530	14.410	14.860
1.130	-8.140	-2.050	7.560	-2.040	5.520	-15.690	-7.710	13.080	20.190
-12.500	-4.450	6.930	2.080	-7.750	1.850	-18.480	-12.740	10.480	6.320
-11.860	-6.880	10.070	0.150	1.030	-0.390	-7.900	-11.470	2.890	-5.380
-0.560	-3.810	2.210	7.860	10.230	-5.470	-7.510	-7.060	-9.720	-2.790
-1.580	1.370	-8.850	14.610	7.900	-15.420	-19.440	-4.970	-17.870	-4.700
-9.150	1.660	-10.710	9.790	-7.300	-11.850	-14.510	-6.670	-17.020	-8.310
-12.050	5.930	-1.590	5.170	-15.200	3.670	-1.220	-9.740	-15.960	-3.490
-13.290	9.280	4.080	3.930	-14.070	15.690	3.040	-13.070	-10.450	3.550
-5.270	2.490	-3.300	-0.320	-18.260	11.680	3.120	-16.370	3.530	6.390
10.020	-4.550	-2.160	-9.480	-22.590	1.140	2.820	-10.550	13.090	5.340
12.870	-8.220	14.320	-17.550	-17.310	-1.170	3.770	9.850	3.760	6.340
0.320	-14.070	4.890	-11.190	-0.270	-3.520	5.110	15.980	-7.640	9.260
-9.940	-17.690	-15.580	3.470	9.300	-9.150	2.880	0.950	-1.050	6.340
-13.650	-14.650	-7.840	2.190	9.010	-13.080	0.470	-7.160	4.320	-0.730
-17.880	-9.550	2.440	0.000	7.410	-9.000	-1.300	-3.950	-1.710	-2.450
-22.650	-11.590	0.620	8.340	-0.870	-3.190	-6.480	-4.740	-3.630	1.870
-19.770	-15.800	6.060	9.820	-10.130	-10.220	-4.340	-3.110	-2.810	1.700
-10.620	-10.190	14.610	-0.720	-9.930	-20.560	1.480	1.590	-4.440	-1.900
-7.900	-1.000	13.080	-10.450	-5.330	-10.790	11.790	1.300	-6.490	3.700

7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039	7039
cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2	cm/seg2
7.310	11.790	0.050	11.370	-5.040	-3.580	-6.340	-10.730	3.710	-8.750
1.740	4.740	-4.830	16.360	-9.220	-7.930	-4.550	-13.020	-0.090	-5.000
-3.050	1.010	-5.530	16.870	-1.100	-5.450	-2.550	-13.980	-1.790	-5.570
-4.010	8.650	-4.680	12.340	9.830	-4.340	-3.790	-11.110	0.600	-9.840
-8.810	13.710	-4.860	10.180	8.820	-13.960	-5.360	-2.170	2.210	-11.620
-17.070	8.690	-5.140	12.540	2.690	-15.700	-3.720	7.750	-1.010	-9.860
-16.180	3.160	-8.980	8.680	-1.070	-7.730	-0.090	9.740	-4.370	-3.920
-12.540	1.950	-7.630	-0.030	-0.810	-5.160	1.590	6.830	-6.860	3.880
-13.940	2.410	-1.770	-2.800	3.620	-2.110	3.850	9.170	-9.340	4.110
-10.660	0.850	0.690	-4.050	8.660	7.930	5.990	11.030	-9.040	-2.200
-2.860	-7.450	-1.470	-10.030	7.360	11.160	4.430	4.650	-6.220	-3.990
6.800	-10.110	-5.090	-14.330	1.350	8.110	3.120	-0.190	-2.410	-5.780
17.310	-2.380	-4.400	-14.480	-2.870	2.820	6.460	2.600	-0.130	-8.480
13.110	-3.330	3.300	-14.280	-6.270	-4.750	10.790	5.120	0.250	-1.960
1.210	-13.270	3.810	-15.970	-1.540	-8.800	7.660	5.790	2.410	5.870
-7.270	-12.810	-4.390	-20.860	5.090	-3.840	-1.380	5.070	4.680	1.520
-16.720	-4.720	-8.320	-16.070	-0.250	0.490	-6.850	3.130	-0.610	-4.530
-16.240	-0.800	-5.150	-4.610	-11.530	-5.460	-3.200	-0.830	-3.820	-1.850
-1.070	-0.870	-0.220	-7.150	-14.630	-4.810	1.470	-7.430	2.700	-2.090
6.660	1.470	-1.690	-9.520	-9.110	0.710	-0.960	-11.950	7.180	-2.760
-3.520	4.510	-3.680	1.500	-3.000	0.980	-6.450	-11.020	6.340	2.330
-12.460	3.190	2.420	9.270	0.680	3.270	-5.010	-9.810	7.680	1.410
-8.520	1.950	5.560	3.100	-3.800	6.470	-3.510	-10.830	6.030	0.140
-1.670	1.320	0.060	-4.780	-13.060	7.320	-7.710	-9.730	-3.530	4.530
-2.940	2.740	-0.970	-5.430	-8.920	7.630	-5.760	-7.960	-10.530	6.840
-6.440	3.520	-1.960	-4.260	3.100	2.390	-1.410	-2.490	-2.900	6.860
1.890	-0.570	-4.890	-10.380	9.520	-3.650	0.020	5.040	5.020	6.730
17.000	-6.170	-1.580	-22.300	11.590	-0.040	1.370	8.250	0.700	7.640
14.130	-5.630	-0.860	-22.800	6.770	0.580	0.970	9.580	-1.470	3.860
-4.470	-4.270	-4.130	-12.270	-2.380	-2.860	-3.990	10.740	3.020	0.660
-9.310	-3.430	-0.270	-3.550	-1.400	-0.400	-6.850	8.670	6.640	-0.260
5.800	0.130	6.240	-3.930	11.790	1.160	2.970	4.910	6.630	-4.170
8.580	1.610	1.380	1.010	16.680	-1.700	13.650	5.220	5.070	-3.550
-3.260	-2.210	-4.900	16.150	4.680	0.110	16.840	4.760	3.600	2.230
-6.070	-7.130	-4.470	22.070	-12.140	7.260	8.110	0.920	2.140	3.880
5.010	-9.370	-0.220	14.320	-16.230	9.120	-8.060	1.260	0.560	1.210
12.050	-9.130	6.890	7.670	-4.270	2.290	-6.280	-0.170	0.020	-1.450
5.720	-5.510	14.230	7.600	2.070	2.800	0.510	-5.160	2.630	-0.760
-3.470	2.030	15.420	5.250	-2.120	14.050	-4.650	-4.630	7.370	0.130
-4.060	7.790	7.850	1.700	-1.750	11.270	-5.670	2.110	9.290	-7.030
5.050	12.590	-0.300	2.970	3.930	5.300	1.150	4.950	6.140	-15.550
5.130	19.080	4.100	6.740	13.370	4.130	1.090	0.460	1.260	-13.190
-1.280	19.950	11.310	7.160	18.390	-4.690	-6.940	5.930	-2.880	-3.270
-3.630	11.240	7.980	4.180	10.860	-8.700	-11.010	14.910	-5.980	1.400
-2.110	2.420	-1.370	2.100	4.140	-4.640	-4.560	10.920	-8.850	
5.680	1.830	1.080	1.910	1.260	-5.090	-4.130	5.620	-10.500	

