

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Influencia del ángulo de incidencia sísmica en la
respuesta de estructuras de concreto armado
con irregularidad de esquina entrante en la
ciudad de Lima**

Leonardo Wilson Cano Llacua

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Huancayo, 2023



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

Thesis

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	1 %
3	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	1 %
4	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	1 %
5	Valdes Gonzalez Jesus. "Analisis de efectos sismicos ortogonales horizontales en terreno blando de la Ciudad de Mexico", TESIUNAM, 2004 Publicación	1 %
6	archive.org Fuente de Internet	<1 %
7	dspace.esepoch.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
8	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

9	repositorio.unheval.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	1library.co Fuente de Internet	<1 %
11	"Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación", Omnia Publisher SL, 2014 Publicación	<1 %
12	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	Submitted to University of Sheffield Trabajo del estudiante	<1 %
14	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
15	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
16	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	repositoriodemo.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
19	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

20	cicy.repositoryinstitucional.mx	<1 %
21	dokumen.tips	<1 %
22	ikee.lib.auth.gr	<1 %
23	repositorio.upagu.edu.pe	<1 %
24	repositorio.uss.edu.pe	<1 %
25	upcommons.upc.edu	<1 %
26	Submitted to Universidad Militar Nueva Granada	<1 %
	Trabajo del estudiante	
27	repositorio.inta.gob.ar	<1 %
28	repositorio.ucm.edu.co	<1 %
29	digital.csic.es	<1 %
30	repositorio.uap.edu.pe	<1 %
31	scholar.archive.org	<1 %

		<1 %
32	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
33	distancia.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
34	go.gale.com Fuente de Internet	<1 %
35	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	repositorio.unu.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
38	Miranda Tello Alberto. "El licenciado en administración y la mejora de programas educativos en una institucion de educacion media superior tecnica en Veracruz, Ver.", TESIUNAM, 2001 Publicación	<1 %
39	Rivera Galvan Fernando, Granillo Rivero Sergio Andrés de Jesus. "Revision estructural de una edificacion danada por el sismo del 23 de noviembre de 1987 en Mexicali, B.C.", TESIUNAM, 1992 Publicación	<1 %

40	creativecommons.org Fuente de Internet	<1 %
41	dspace.utb.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
42	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
43	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
44	repositorio.ute.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
45	www.scielo.org.ve Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas
Excluir bibliografía

Activo
Activo

Excluir coincidencias Apagado

ASESOR
Mg. ÁNGEL NARCIZO AQUINO FERNÁNDEZ

DEDICATORIA

A todos los ingenieros civiles del Perú, que con su ejercicio profesional e investigación contribuyen con el desarrollo y perfeccionamiento de la ingeniería sísmica.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	vii
Índice de figuras.....	viii
Resumen.....	x
Abstract.....	xi
Introducción	xii
CAPÍTULO I.....	14
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	14
1.1. Planteamiento y formulación del problema	14
1.1.1. Problema general	17
1.1.1.1. Problemas específicos	17
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo general.....	17
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Justificación e importancia.....	18
1.4. Delimitación del proyecto	18
1.5. Hipótesis.....	19
1.5.1. Hipótesis general.....	19
1.5.2. Hipótesis específicas	19
1.6. Variables	19
1.6.1. Variable independiente	19
1.6.2. Variable dependiente	19
1.7. Definición teórica y operacionalización de variables.....	20
CAPÍTULO II	21
MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes de la investigación	21
2.1.1. A nivel internacional.....	21
2.1.2. A nivel nacional	22
2.2. Bases teóricas	24
2.2.1. Ángulo de incidencia crítica	24
2.2.2. Registros sísmicos.....	25
2.2.3. Correcciones de acelerogramas.....	26
2.2.3.1. Corrección de la línea de base.....	26

2.2.3.2. Corrección por filtrado de señales.....	27
CAPÍTULO III.....	29
METODOLOGÍA	29
3.1. Población de estudio	29
3.2. Muestra de estudio	30
3.3. Nivel y tipo de estudio	30
3.3.1. Nivel de investigación.....	30
3.3.2. Tipo de investigación.....	31
3.4. Diseño de investigación	31
3.5. Métodos, técnicas e instrumentos.....	31
3.5.1. Métodos de investigación	31
3.5.2. Técnica de recolección de datos	31
3.5.3. Instrumentos de recolección de datos	32
3.6. Procedimiento	32
3.6.1. Primera parte del estudio – Edificaciones aporticadas con plantas en forma de L	32
3.6.2. Segunda parte del estudio – Edificaciones aporticadas con plantas en forma de T.....	33
3.6.3. Modelos estructurales	33
3.6.3.1. Primera parte del estudio – Edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L»	34
3.6.3.2. Segunda parte del estudio – Edificaciones aporticadas con plantas en forma de «T».....	35
3.7. Selección de los registros sísmicos	36
CAPÍTULO IV	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1. Primera parte del estudio – Edificaciones aporticadas con plantas en forma de L	37
4.1.1. Primer modelo – L1	37
4.1.1.1. Resultados de los parámetros globales.....	40
4.1.1.2. Comparación de resultados	43
4.1.2. Segundo modelo – L2	44
4.1.2.1. Resultados de los parámetros globales.....	48
4.1.2.2. Comparación de resultados	51
4.1.3. Tercer modelo – L3.....	52
4.1.3.1. Resultados de los parámetros globales.....	55
4.1.3.2. Comparación de resultados	58
4.1.4. Estudio del ángulo crítico	58
4.1.5. Cálculo del factor de amplificación debido a la bidireccionalidad	60

4.2. Segunda parte del estudio – Edificaciones aporticadas con plantas en forma de T	61
4.2.1. Primer modelo – T1	61
4.2.1.1. Resultados de los parámetros globales.....	64
4.2.1.2. Comparación de resultados	67
4.2.2. Segundo modelo – T2	68
4.2.2.1. Resultados de los parámetros globales.....	71
4.2.2.2. Comparación de resultados	74
4.2.3. Tercer modelo – T3.....	75
4.2.3.1. Resultados de los parámetros globales.....	79
4.2.3.2. Comparación de resultados	82
4.2.4. Estudio del ángulo crítico	83
4.2.5. Cálculo del factor de amplificación debido a la bidireccionalidad	84
4.3. Comparación de resultados luego del estudio de ambas formas de planta.....	85
4.4. Discusión de resultados.....	86
Conclusiones	88
Recomendaciones.....	89
Lista de referencias	90
Anexos	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	20
Tabla 2. Registros sísmicos para el ATHL	36
Tabla 3. Periodos de vibración para el primer modelo L1	38
Tabla 4. Resultados del análisis modal espectral para el modelo L1	38
Tabla 5. AME con reglas de combinación direccional para L1	43
Tabla 6. Periodos de vibración para el segundo modelo L2	45
Tabla 7. Resultados del análisis modal espectral para el modelo L2	46
Tabla 8. AME con reglas de combinación direccional para L2	51
Tabla 9. Periodos de vibración para el tercer modelo L3	53
Tabla 10. Resultados del análisis modal espectral para el modelo L3	53
Tabla 11. AME con reglas de combinación direccional para L3	57
Tabla 12. Estructura L1 y sus ángulos críticos	59
Tabla 13. Estructura L2 y sus ángulos críticos	59
Tabla 14. Estructura L3 y sus ángulos críticos	59
Tabla 15. Periodos de vibración para el tercer modelo T1	62
Tabla 16. Resultados del análisis modal espectral para el modelo T1	62
Tabla 17. AME con reglas de combinación direccional para T1	67
Tabla 18. Periodos de vibración para el segundo modelo T2	69
Tabla 19. Resultados del análisis modal espectral para el modelo T2	69
Tabla 20. AME con reglas de combinación direccional para T2	74
Tabla 21. Periodos de vibración para el tercer modelo T3	76
Tabla 22. Resultados del análisis modal espectral para el modelo T3	77
Tabla 23. AME con reglas de combinación direccional para T3	82
Tabla 24. Estructura T1 y sus ángulos críticos	83
Tabla 25. Estructura T2 y sus ángulos críticos	84
Tabla 26. Estructura T3 y sus ángulos críticos	84
Tabla 27. Factor de amplificación para las plantas con esquina entrante	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Edificación con planta en forma de «L» en la ciudad de Lima	16
Figura 2. Representación del modelo tridimensional de un edificio sometido al	25
Figura 3. Página web del Cismid donde se encuentran los registros sísmicos del país	26
Figura 4. Red Acelerométrica Nacional – Instituto Geofísico del Perú.....	26
Figura 5. Error de ceros o línea base del acelerograma (12).....	27
Figura 6. Efectos causados por los ruidos teniendo en cuenta sus frecuencias.....	28
Figura 7. Edificación con planta en forma de L en la ciudad de Lima	29
Figura 8. Edificación con planta en forma de T en la ciudad de Lima	30
Figura 9. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 16,67 %	34
Figura 10. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 33,33 %	34
Figura 11. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 50 %	35
Figura 12. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 16,67 %	35
Figura 13. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 33,33 %	35
Figura 14. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 50 %	36
Figura 15. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 16,67 %	38
Figura 16. Desplazamiento en X cada intervalo de 10° para el modelo L1	39
Figura 17. Desplazamiento en Y cada intervalo de 10° para el modelo L1	39
Figura 18. Distorsiones para el modelo L1	40
Figura 19. Cortante en X cada intervalo de 10° para el modelo L1	41
Figura 20. Cortante en Y cada intervalo de 10° para el modelo L1	41
Figura 21. Momento en X cada intervalo de 10° para el modelo L1	42
Figura 22. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L1	42
Figura 23. Relación entre el modal espectral y el tiempo-historia para L1	44
Figura 24. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 33,33 %	45
Figura 25. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L2	46
Figura 26. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L2	47
Figura 27. Distorsiones para el modelo L2	48
Figura 28. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo L2	49
Figura 29. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L2	49
Figura 30. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L2	50
Figura 31. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L2	50
Figura 32. Relación entre el modal espectral y el tiempo-historia para L2	51
Figura 33. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 50 %	52
Figura 34. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L3	53
Figura 35. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L3	54

Figura 36. Distorsiones para el modelo L3	55
Figura 37. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo L3	56
Figura 38. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L3	56
Figura 39. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L3	56
Figura 40. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L3	57
Figura 41. Relación entre el modal espectral y el tiempo historia para L3	58
Figura 42. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 16,67 %	61
Figura 43. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T1	63
Figura 44. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T1	63
Figura 45. Distorsiones para el modelo T1	64
Figura 46. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo T1	65
Figura 47. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T1	65
Figura 48. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T1	66
Figura 49. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T1	66
Figura 50. Relación entre el modal espectral y el tiempo historia para T1	68
Figura 51. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 33,33 %	69
Figura 52. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T2	70
Figura 53. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T2	70
Figura 54. Distorsiones para el modelo T2	71
Figura 55. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo T2	72
Figura 56. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T2	72
Figura 57. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T2	73
Figura 58. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T2	73
Figura 59. Relación entre el modal espectral y el tiempo-historia para T2	75
Figura 60. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 50 %	76
Figura 61. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T3	77
Figura 62. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T3	78
Figura 63. Distorsiones para el modelo T3	79
Figura 64. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo T3	80
Figura 65. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T3	80
Figura 66. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T3	81
Figura 67. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T3	81
Figura 68. Relación entre el modal espectral y el tiempo historia para T3	83
Figura 69. Comparación de factores de amplificación para plantas en «L» y en «T»	86

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo analizar las respuestas estructurales de edificaciones de concreto armado de sistema aporticado y con irregularidad de esquina entrante ante los distintos ángulos de incidencia de sismo. La investigación que se desarrolló es de tipo aplicada, de un nivel explicativo y con un diseño no experimental-correlacional, tomando como población de estudio a las edificaciones de concreto armado con plantas en forma de «L» y «T». El método de investigación utilizado fue el científico inductivo y como instrumentos para la recolección de datos se usó los softwares *Seismo signal* y *Seismo match*, a fin de recoger datos sísmicos, corregirlos y escalarlos. Se obtuvieron las respuestas de estructuras con irregularidad de esquina entrante ante el efecto de la bidireccionalidad y el ángulo de incidencia de sismo, para los casos de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T», encontrando que el factor de amplificación bidireccional de sismo para las estructuras con plantas en forma de «L» es de $k = 1,4$, mientras que para las estructuras con plantas en forma de «T» es de $k = 1,5$, por lo que no existe un « k » único para estructuras aporticadas con irregularidad de esquina entrante.

Palabras claves: ángulo crítico, bidireccionalidad sísmica, combinación direccional

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze the structural responses of reinforced concrete buildings with a frame system and with an irregular incoming corner to the different angles of seismic incidence. The research that was developed is of an applied type, of an explanatory level and with a non-experimental-correlational design, taking as a study population the reinforced concrete buildings with «L» and «T» shaped floors. The research method used was the inductive scientist and as instruments for data collection, the Seismo signal and Seismo match software were used, to collect seismic data, correct and scale them. The responses of structures with incoming corner irregularity to the effect of bidirectionality and the angle of incidence of the earthquake were obtained for the cases of framed buildings with «L» and «T» shaped floors, finding that the amplification factor Bidirectional earthquake for structures with «L» shaped floors is $k = 1.4$, while for structures with «T» shaped floors it is $k = 1.5$, so there is no « k » unique for framed structures with irregularity in the entering corner.

Keywords: critical angle, directional combination, seismic bidirectionality

INTRODUCCIÓN

Perú es altamente símico y Lima está dentro de esta problemática, y más aun teniendo en cuenta que en la capital se tienen estructuras con arquitecturas caprichosas, lo cual se ve reflejado en edificaciones con plantas en forma irregular. Además, al realizar el análisis sísmico por lo general se realiza un análisis unidireccional sin tener en cuenta la simultaneidad de ambos componentes de sismo, y sin tener en cuenta el ángulo con el cual incide un sismo.

Se tiene registro de un edificio en México cuyo colapso se debe al efecto de la bidireccionalidad sísmica, es así como en varios países de Latinoamérica se empezó a investigar el fenómeno antes mencionado, sin embargo, aún no se cuentan con normativas sísmicas bien definidas en los diversos países latinos sobre el fenómeno antes descrito, aunque sí se aprecian orientaciones básicamente sobre las combinaciones direccionales, tal es el caso por ejemplo de Colombia, Bolivia, etc.

Sin embargo, en Perú, la norma nacional no especifica nada al respecto, y el problema se acrecienta cuando se tienen que diseñar edificios con irregularidades o arquitecturas caprichosas, como por ejemplo las edificaciones con arquitecturas variadas existentes en la ciudad de Lima. A este inconveniente se le añade el hecho de tener que hacer el análisis sísmico para edificaciones que presentan irregularidad de esquina entrante, edificaciones presentes en la capital y motivo para el desarrollo del presente estudio. Es así como surge la interrogante de cómo varía la respuesta de las estructuras aporticadas con plantas en forma de «L» y «T», al modificar el ángulo de incidencia sísmica.

La presente investigación contribuirá con el desarrollo de la norma E030 y permitirá corroborar la hipótesis de si existe influencia de la variación angular de incidencia de sismo en la respuesta de estructuras aporticadas con plantas en forma de «L» y «T». Este hecho será de gran ayuda para el avance y desarrollo de la ingeniería sísmica peruana, la norma E030 y para los ingenieros civiles que diseñan estructuras con presencia de excentricidad y edificios de regular y gran altura, ya que como se sabe, Lima cada vez presenta edificaciones con plantas en forma irregular, por su propia arquitectura y se observa que los edificios van cobrando una notoria altitud.

Esta investigación se estructura por capítulos correctamente organizados, los cuales se exponen a continuación:

En el capítulo I se aborda la problemática a investigar, así como el objetivo, la hipótesis y las delimitaciones de la investigación haciendo referencia al sistema estructural, la forma de planta y el tipo de irregularidad presente y, finalmente, se abordan las variables.

En el capítulo II se exponen los antecedentes de la investigación tanto internacionales como nacionales, asimismo, se revisan las bases teórico-científicas que sirven de base para el desarrollo de la presente investigación.

En el capítulo III se aborda la metodología de investigación, donde se revisan los diversos registros sísmicos utilizados, que fueron debidamente filtrados y escalados y se describieron los modelos estructurales. Asimismo, se abordan el tipo, nivel, diseño, población y muestra de la investigación.

En el capítulo IV se muestran los resultados de los análisis sísmicos para los seis modelos estructurales propuestos y la discusión de los resultados.

Finalmente, se indican las conclusiones, las recomendaciones, la lista de referencias y los anexos.

El autor

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Los sismos fuertes han ocurrido y siguen ocurriendo en diversos países, produciendo enormes daños materiales, llevándose la vida de muchas personas. Existen análisis sísmicos tradicionales que se vienen realizando, en este proceso se consideran los componentes sísmicos de forma separada, y que luego sus efectos se combinan de diferente manera. Esta práctica se ha ido implementando en diversos países, en donde los procedimientos más comunes a usar lo constituyen la regla del 100-30 % y la regla de la raíz cuadrada, más conocida como SRSS. Lamentablemente, los códigos aún no establecen de manera explícita la usabilidad y aplicabilidad de las reglas antes mencionadas, asimismo, no explican las formas de cómo seleccionar la orientación crítica para los componentes ortogonales del sismo, tampoco el tipo de estructura que se tendría que considerar (1).

Dentro de las normas internacionales tenemos a las Normas Técnicas para el Diseño por Sismo de México, en donde consideran emplear la regla del porcentaje para la combinación direccional, específicamente la regla del porcentaje del 100-30 %, donde va el 100 % de los efectos de aquel componente y el 30 % del otro componente perpendicular al primero.

Cabe mencionar a Colombia y su reglamento de Construcción Sismorresistente, donde hacen hincapié en la regla de combinación de los porcentajes, específicamente la del 100-30 %. Asimismo, este país menciona la famosa regla de la raíz cuadrada, más conocida como SRSS.

Ahora, la Norma E030, dice que para el diseño sísmico de edificios, se considera un análisis unidireccional, y asimismo, no menciona o no toma en cuenta el ángulo con el cual incide el sismo ni sobre la simultaneidad de los componentes.

Sobrado et al. (2), luego de realizar un estudio con diversas edificaciones que presentaban irregularidad en planta y altura, demostraron que se deben considerar como ejes críticos a los ejes X e Y, luego de realizar un análisis unidireccional tal como lo señala la Norma E.030, no muestra el resultado correcto, ya que las respuestas máximas son obtenidas para ángulos de incidencia de sismo que no se sitúan sobre las coordenadas tradicionales X e Y.

La Norma E. 030, aún no contempla los lineamientos sobre cómo trabajar tomando en cuenta la bidireccionalidad. Tampoco menciona sobre el ángulo con el cual incide el sismo y cómo se tendría que trabajar al momento de diseñar edificios (3).

De lo mencionado anteriormente se puede observar que al realizar un análisis unidireccional a las estructuras en conformidad a la norma peruana, no se obtienen los resultados reales, más bien son resultados subestimados.

Las irregularidades en planta de los edificios en forma de C y L son más vulnerables a los sismos que los edificios en forma regular (4). Los edificios de planta irregular son más vulnerables a los efectos sísmicos, por lo que necesariamente para su diseño deberían pasar por un análisis bidireccional, sin embargo, la norma peruana E. 030 no lo señala.

Además, según un estudio sobre la respuesta estructural de edificios ante el efecto bidireccional, los edificios de planta regular y las plantas C y L muestran diferentes grados de vulnerabilidad (4).

Asimismo, Pinzón (5), luego de estudiar el colapso de un edificio en México, concluyó que la causa de dicho colapso fue el efecto de la bidireccionalidad de sismo.



Figura 1. Edificación con planta en forma de «L» en la ciudad de Lima

Por lo expuesto, se puede notar que los daños que recibe una estructura que presenta irregularidad en planta ante el efecto de un sismo son severos. Hecho que se puede calcular con mayor exactitud mediante un análisis bidireccional, mas no mediante un simple análisis unidireccional, ya que este último arroja valores subestimados de la respuesta estructural, en comparación a un análisis bidireccional. Este problema de no considerar y realizar un análisis bidireccional trae como efecto una subestimación en las respuestas estructurales de las edificaciones y, por ende, posteriores fallas en la estructura. Originando luego de hacer un cálculo estructural, menores valores en el desplazamiento de niveles, momentos de volteo y cortantes basales; esto al realizar un análisis global de la estructura. Asimismo, este hecho origina la determinación de menores valores en la cortante y momento de vigas y columnas, luego de un análisis local de la estructura.

El problema mencionado tiene como causas de origen en Perú, el hecho de aún no contar con los lineamientos que especifican el análisis bidireccional sísmico dentro de la actual Norma sismorresistente. A esto se añade el hecho de tener muy pocas investigaciones en Perú que aborden el tema en mención, lo cual hace un tema poco explorado para la ingeniería peruana. También cabe mencionar la alta complejidad al momento de abordar el fenómeno de la bidireccionalidad, así como el tiempo y el alto requerimiento en cómputo que demanda.

Todos los hechos mencionados aún no permiten tener un conocimiento claro sobre el efecto de la bidireccionalidad del sismo, así como su manejo y dominio al momento de diseñar edificios dentro del territorio nacional.

1.1.1. Problema general

Como respuesta a la problemática planteada y que por cierto para este caso peruano es un fenómeno poco explorado y aún no bien comprendido, se presenta esta investigación que analizó las respuestas estructurales de diferentes edificaciones con planta en forma de «L» y «T». Asimismo, las reglas usuales de combinación direccional son un tema aún no muy bien estudiado, y aún no se sabe bien cuál es la regla que mejor estima las respuestas estructurales.

La problemática descrita anteriormente es formulada mediante la siguiente interrogante: ¿Cómo varía la respuesta de las estructuras aporticadas de concreto armado que presentan irregularidad de esquina entrante ante la variación del ángulo de incidencia sísmica?

1.1.1.1. Problemas específicos

- ¿Cómo influye la variación del ángulo de incidencia sísmica en la respuesta estructural de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T» en la ciudad de Lima?
- ¿Cómo influye la bidireccionalidad sísmica en la respuesta estructural crítica de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T»?
- ¿Existirá una regla de combinación direccional que logre estimar de mejor manera la respuesta crítica de edificaciones de sistema aporticado con plantas en forma de «L» y «T», ante un efecto sísmico para el caso peruano?
- ¿Existirá un determinado valor de un factor de amplificación bidireccional sísmica para el caso de estructuras aporticadas de concreto armado con plantas en forma de «L» y «T»?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar los efectos de los distintos ángulos de incidencia de sismo en la respuesta estructural de edificaciones de concreto armado de sistema aporticado con irregularidad de esquina entrante.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la variación de la respuesta estructural de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T», ante la variación del ángulo de incidencia de sismo.
- Comparar la respuesta estructural obtenida del AME con la respuesta crítica obtenida del ATHL ante los diferentes ángulos de incidencia de sismo.
- Identificar la regla de combinación direccional que logre una mejor estimación de la respuesta estructural crítica ante un sismo para el caso de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T», considerando la bidireccionalidad y el ángulo de incidencia de sismo.
- Determinar el valor del factor de amplificación bidireccional sísmico para el caso de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T».

1.3. Justificación e importancia

El resultado obtenido luego de varios análisis sísmicos contribuye con el desarrollo y mejoramiento de la norma E. 030, en la parte de la estimación de la respuesta estructural crítica ante el efecto de la bidireccionalidad del sismo. Este fenómeno es tratado por normativas internacionales, pero en el caso peruano poco se toca este fenómeno, por lo que esta investigación contribuye en este aspecto tan importante y que permite obtener respuestas más reales en las edificaciones (plantas en forma de «L» y «T»). Además, mediante la presente investigación se encontró las diferencias en los factores de amplificación bidireccional para plantas en forma de «L» y «T», en base a su respuesta estructural ante diversas variaciones del ángulo de incidencia de sismo. Con esta clasificación se pudo saber cuáles son las edificaciones más susceptibles para sufrir daño estructural ante un sismo. Asimismo, la presente investigación informa sobre qué tipo de edificaciones se pueden diseñar sin la necesidad de hacer un análisis bidireccional de sismo (solo análisis unidireccional) y qué edificaciones necesariamente tienen que pasar por un análisis bidireccional para su diseño y su proceso de volverse rígido. Con la presente investigación se contribuyó a la ingeniería civil en la profundización del estudio sobre el efecto bidireccional y el ángulo de incidencia sísmica para edificaciones con plantas en forma de L y T (irregularidad de esquina entrante).

1.4. Delimitación del proyecto

Esta investigación, para lo referente a los análisis sísmicos y la consecuente obtención de las respuestas críticas, se limita solamente al empleo del ATHL. Asimismo, el presente

trabajo solo aborda un estudio con parámetros sísmicos aplicados para la ciudad de Lima, por ser la ciudad donde se encuentra gran variedad de edificaciones con diversidad de formas arquitectónicas y asimismo ser una ciudad con amenaza sísmica. Solo se investigó estructuras con sistema aporticado, sin tocar estructuras con placas. Solamente se trabajó con resultados globales al realizar los análisis sísmicos y para estructuras de tres plantas que solo presentan irregularidad de esquina entrante, donde las otras irregularidades fueron controladas.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Existe influencia de la variación angular de incidencia de sismo en la respuesta estructural de edificaciones aporticadas de concreto armado con plantas en forma de «L» y «T».

1.5.2. Hipótesis específicas

- Existe relación entre la respuesta estructural de edificaciones aporticadas que presentan irregularidad de esquina entrante y la variación del ángulo de incidencia de sismo.
- Existen respuestas estructurales críticas mayores ante un efecto bidireccional en comparación a un efecto direccional de sismo, para el caso de estructuras con irregularidad de esquina entrante.
- Existe una regla de combinación direccional que logre una mejor estimación de la respuesta estructural crítica de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T», ante un efecto sísmico.
- Existe un determinado factor de amplificación bidireccional sísmico para el caso de estructuras aporticadas de concreto armado con plantas en forma de «L» y «T».

1.6. Variables

1.6.1. Variable independiente

Variación del ángulo de incidencia de sismo

1.6.2. Variable dependiente

La respuesta estructural en edificaciones aporticadas de concreto armado con irregularidad de esquina entrante (plantas en forma de «L» y «T»).

1.7. Definición teórica y operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente Ángulo de incidencia de sismo	Ángulo con el que incide el sismo sobre una estructura en base a las coordenadas globales	La variable será variada y medida dentro del intervalo de 0 a 360 grados sexagesimales	Ángulo de incidencia de sismo	Variación del ángulo de incidencia de sismo Desplazamiento Derivadas Cortante basal	Intervalo
Variable dependiente Respuesta estructural de Edificaciones de concreto armado con plantas de forma irregular	Respuesta de una estructura ante los efectos sísmicos, mostrando vulnerabilidades y daños estructurales	La variable se medirá por métodos matemáticos mediante el empleo de software especializado en base a la Norma E 030	Análisis direccional Análisis bidireccional	Momento de volteo Desplazamiento Desplazamiento Derivadas Cortante basal Momento de volteo	Razón

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. A nivel internacional

Existen investigaciones internacionales que han considerado el ángulo con el cual incide el sismo, así como la bidireccionalidad como investigaciones importantes dentro del campo de conocimiento de la ingeniería sísmica.

Díaz et al. (6), en su estudio científico «*An alternative approach to consider the effect of seismic directionality*», investigaron el efecto de la direccionalidad sísmica y el desempeño de edificios ante efectos sísmicos, teniendo como objetivo la influencia del efecto de la bidireccionalidad sísmica en edificaciones y su consiguiente respuesta estructural, mediante una metodología experimental cuantitativa, encontrando que el desempeño de los edificios está en función de la orientación que el edificio posea con respecto a las acciones sísmicas aplicadas, lo cual mejora la evaluación del daño sísmico que vaya a recibir, sugiriendo que el efecto de la direccionalidad sísmica sea tratada por los códigos estructurales.

Vargas et al. (7), en su estudio científico «*Probabilistic seismic damage assessment of reinforced concrete buildings considering directionality effects*», investigó el comportamiento de edificios bajo diversos ángulos de incidencia de sismo, con el objetivo de observar todos los efectos causados por los diversos ángulos de incidencia de sismo en las respuestas de estructuras, mediante una metodología experimental cuantitativa, encontrando que edificios de la misma tipología estructural

al ser sometidos a un efecto sísmico con diferentes ángulos de incidencia, provocan diferentes respuestas estructurales en las edificaciones, por lo que concluyeron que las edificaciones muestran diferentes respuestas, conforme va variando el ángulo de sismo y que la respuesta crítica o máxima se obtiene para determinados ángulos que son denominados como ángulos críticos.

Kanya (4), en su estudio «*Influence of earthquake incidence angle on seismic response of irregular RC buildings*» investigó el efecto de la bidireccionalidad sísmica sobre edificios regulares y edificios irregulares en forma de C y L, teniendo como propósito principal explicar el efecto de la modificación del ángulo de incidencia de sismo y su repercusión en las estructuras irregulares con distintas formas de planta como L y C, mediante una metodología experimental, tomando como población de estudio a edificaciones con plantas en forma de C. Concluyendo que los edificios en forma de C y L son los más vulnerables ante un efecto sísmico. Luego de realizar un análisis bidireccional encontró que la fuerza máxima sobre las columnas para un edificio regular se incrementó en un 54 %, mientras que para edificios irregulares en forma de C, el incremento se dio en un 32 % y para edificios en forma de L, este incremento fue del 40 %.

Valenzuela (1), en su estudio «*Rules for combining the effects of the three earthquake components and critical response*», investigó la precisión de estimación de la respuesta estructural por parte de las reglas de combinación direccional más usuales aplicados a sistemas de varios grados de libertad, con el objetivo de estudiar las diversas reglas de combinación direccional mediante técnicas probabilísticas complejas, encontrando que en las edificaciones, la respuesta máxima ocurre para un determinado ángulo, que no se encuentra sobre los ejes globales y que además el valor de dicho ángulo varía en función al registro sísmico y que es diferente para cada elemento estructural.

2.1.2. A nivel nacional

Moscoso (3), en su tesis «Efecto de la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en la respuesta de estructuras de concreto armado», investigó el fenómeno de la bidireccionalidad sísmica y el ángulo bajo el cual actúan las fuerzas símicas en estructuras de concreto armado, con el objetivo de explorar las respuestas de estructuras de concreto armado luego de la bidireccionalidad del sismo y la variación del ángulo de incidencia sísmica, mediante una metodología experimental computacional donde encontró que las reglas de combinación direccional más conocidas son la regla de los

porcentajes 100-30 %, la regla CQC3 y SRSSS, que subestiman en general los resultados producto del análisis de tiempo e historia lineal y no lineal bidireccional. Asimismo, el investigador sostiene que la norma peruana actual no contempla una metodología detallada sobre el fenómeno de la bidireccionalidad y su forma de trabajarla en el diseño de edificios.

Sobrado et al. (2), en su tesis «Análisis de la bidireccionalidad sísmica en la respuesta de estructuras de concreto armado con irregularidad de esquina entrante y de piso blando en la ciudad de Lima», investigaron las respuestas estructurales de edificaciones que presentan irregularidad de esquina entrante y de piso blando ante el efecto de la variación del ángulo de incidencia sísmica cada diez grados y la bidireccionalidad sísmica, con el objetivo de analizar el efecto de la bidireccionalidad y compararlo con el análisis unidireccional, mediante una metodología experimental cuantitativa, tomando como muestra las edificaciones ubicadas en el distrito de Miraflores, donde encontraron que las respuestas calculadas de las estructuras ante los efectos sísmicos, luego de realizar un análisis unidireccional independiente, subestiman las respuestas reales que posee una estructura, y que además dicha respuesta crítica aumenta conforme se va incrementando la irregularidad dentro de la estructura. Asimismo, determinaron el factor de amplificación bidireccional para estructuras que presentan irregularidad de esquina entrante, el cual es un $k = 1,5$.

Bermudo (8), en su tesis «Evaluación comparativa de la bidireccionalidad sísmica según el análisis modal espectral y análisis lineal tiempo-historia, en edificaciones escalonadas de concreto armado», desarrollaron una investigación sobre edificaciones escalonadas con presencia de irregularidad en altura ante el efecto de la bidireccionalidad y la variación del ángulo de incidencia de sismo, con el propósito de explorar y registrar los efectos de la bidireccionalidad sísmica sobre estructuras escalonadas en Lima, mediante la comparación experimental entre un AME (análisis modal espectral) y un ATHL (análisis de tiempo-historia lineal), encontrando que las respuestas globales luego de realizar un ATHL son mayores al tradicional análisis unidireccional en un rango comprendido entre el 10 a 40 %, y que además, luego de trabajar con 4 modelos estructurales, en los dos primeros modelos se aprecia un incremento en los *drifts*, los cuales exceden las recomendaciones de la norma nacional peruana, ya que sobrepasan el valor permitido del 0,007, tanto para AME como el ATHL, ambos ante el efecto bidireccional.

Bravo (9), en su tesis «Evaluación de las reglas de combinación direccional en el cálculo de la respuesta estructural en edificios de concreto armado», realizó una investigación sobre las diferentes reglas de combinación direccional, muchas usuales y conocidas, y otras reglas tomadas de investigaciones, tal es el caso de la regla propuesta por Moscoso (3) y que fue estudiada por Bravo (9), teniendo como propósito fundamental encontrar la regla que logre una mejor estimación de las respuestas y, asimismo, proponer una nueva regla que estime mejor, mediante el estudio matemático computacional, de diversos modelos estructurales con irregularidades sometidas a los parámetros sísmicos para un sismo de Lima y el empleo de 11 registros sísmicos, encontrando que las respuestas obtenidas para los modelos estructurales estudiados mediante el AME unidireccional, vale decir, sin el empleo de regla de combinación direccional alguna, ofrece valores subestimados del valor real que debería tener una estructura, ya que estos valores varían en un rango comprendido del 65 % al 87 % con respecto al resultado patrón de comparación mediante el ATHL. Asimismo, dentro de todas las reglas estudiadas, como son la regla del porcentaje, la regla CQC3, la regla 1 y 2, la regla 8, y demás reglas, no existe una regla que logre una mejor estimación para las edificaciones y sus irregularidades en planta y altura.

2.2. **Bases teóricas**

2.2.1. **Ángulo de incidencia crítica**

La excitación de una estructura se da por medio de dos componentes ortogonales de aceleración de sismo, las cuales poseen intensidades diferentes y que pueden atacar a la estructura bajo cualquier ángulo, y por ende provocando respuestas críticas (10).

Las respuestas críticas en las edificaciones se dan en una edificación ante la acción de un determinado ángulo de incidencia de sismo, el cual recibe el nombre de ángulo crítico (10). La importancia de este ángulo radica en el hecho de que permite encontrar la dirección bajo la cual la excitación sísmica llega a producir en las edificaciones la respuesta crítica.

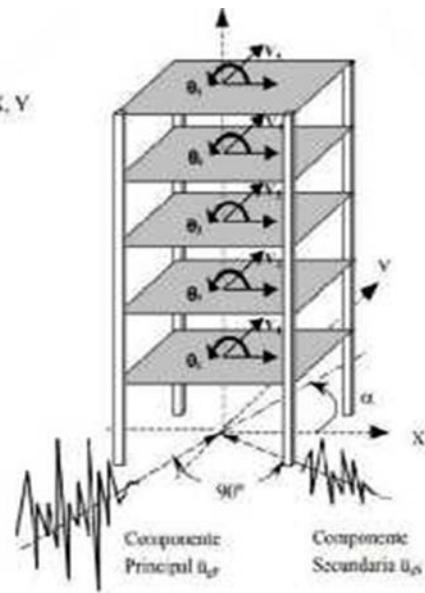


Figura 2. Representación del modelo tridimensional de un edificio sometido al movimiento bidireccional

2.2.2. Registros sísmicos

Durante los eventos sísmicos, toda la historia que se va registrando del movimiento de los suelos, es lo que se conoce como registros sísmicos y son muy útiles para un análisis sísmico más exhaustivo (11).

Al observar los registros sísmicos, se pueden encontrar las diversas aceleraciones obtenidas para cada instante de tiempo (duración del sismo). A todo este conjunto de aceleraciones se denomina acelerograma (9). Actualmente, todo este conjunto de registros sísmicos se puede descargar desde la página del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres – UNI. Dicho centro cuenta con toda una red de acelerógrafos distribuidos por todo el territorio peruano, instalados en las principales ciudades con el objetivo de ir captando las señales sísmicas las 24 horas (3).

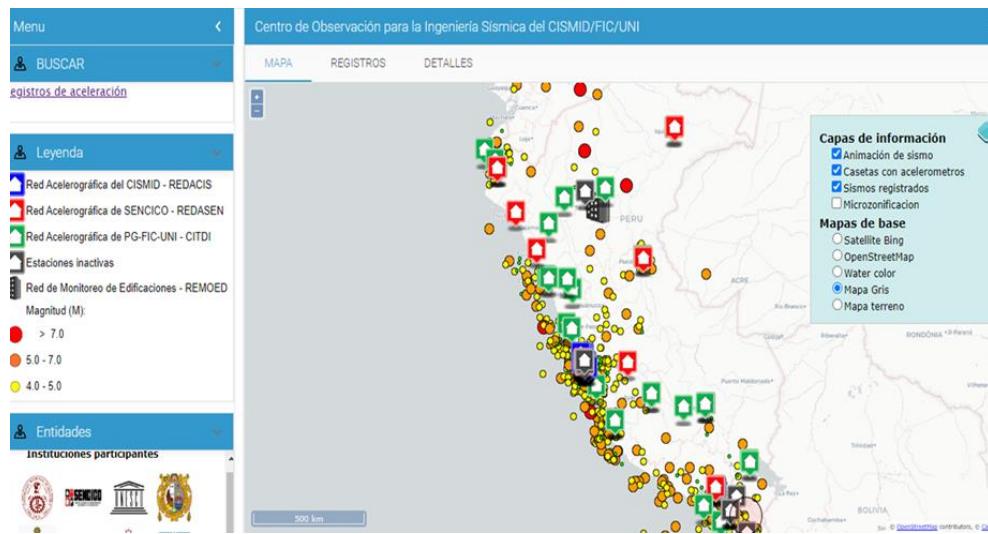


Figura 3. Página web del Cismid donde se encuentran los registros sísmicos del país

Asimismo, está el Instituto Geofísico del Perú, que también cuenta con una red nacional de acelerógrafos distribuidos por el territorio nacional peruano con el fin de proporcionar la descarga gratuita de los diferentes registros sísmicos. Los cuales son muy útiles para el avance de la ingeniería sísmica en Perú.



Figura 4. Red Acelerométrica Nacional – Instituto Geofísico del Perú

2.2.3. Correcciones de acelerogramas

2.2.3.1. Corrección de la línea de base

Podría ser que el acelerómetro no se encuentre perfectamente nivelado en su emplazamiento, lo cual podría traer como consecuencia el hecho de que el acelerograma esté desplazado de alguna manera con respecto a la línea cero de aceleración, lo cual conllevaría a una corrección mediante el uso de softwares especializados, tal como el *Seismo signal*, por ejemplo.

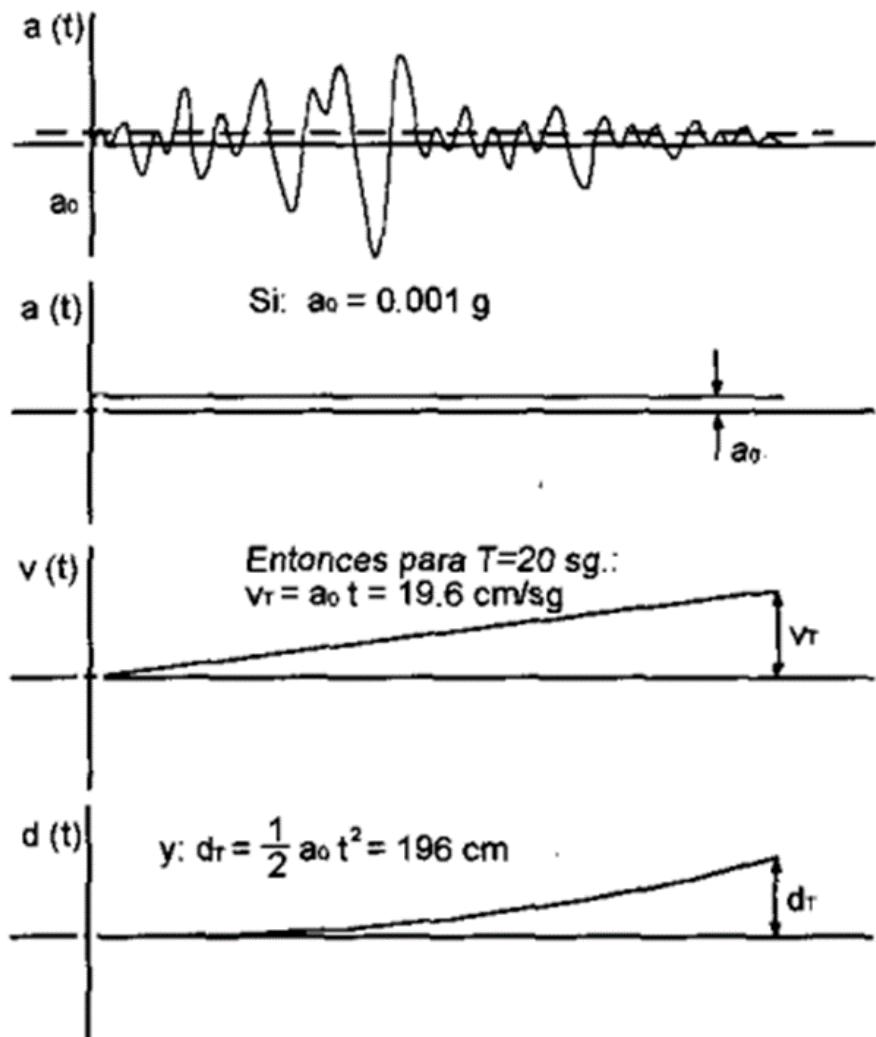


Figura 5. Error de ceros o línea base del acelerograma (12)

2.2.3.2. Corrección por filtrado de señales

Ya una vez se haya logrado corregir las señales símicas, el siguiente paso es verificar la presencia de ruido, ya sea por causas naturales o producto del propio tratamiento de los datos.

De lo manifestado, se observa que un acelerograma se compone de dos elementos que sumados dan el acelerograma. Estos dos componentes son la señal sísmica y el ruido, por lo que se tiene que corregir este último.

$$a(t) = s(t) + r(t)$$

Donde

$a(t)$: es el acelerograma sin pasar por una corrección

$s(t)$: constituye la señal sísmica a obtener

$r(t)$: constituye el ruido a eliminar

Cabe resaltar que al ruido presente se le puede clasificar dentro de dos tipos, dependiendo de su frecuencia, tal es así que se tienen ruidos de alta frecuencia y ruidos de una baja frecuencia. Esta clasificación se observa en las figuras siguientes.

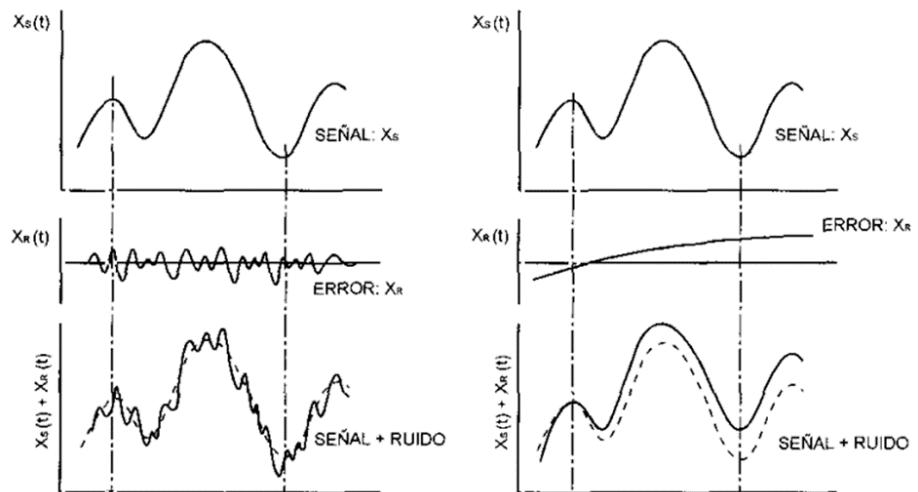


Figura 6. Efectos causados por los ruidos teniendo en cuenta sus frecuencias

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Población de estudio

La población de estudio viene constituida por un conjunto finito de elementos, los cuales comparten características comunes, y para quienes serán aplicables las conclusiones obtenidas luego de la experimentación (13).

En esta investigación se determinó como población de estudio a las edificaciones de concreto armado del sistema aporticado con plantas en forma de L y T, comprendidas dentro de la capital Lima.



Figura 7. Edificación con planta en forma de L en la ciudad de Lima



Figura 8. Edificación con planta en forma de T en la ciudad de Lima

3.2. Muestra de estudio

Una muestra adquiere representatividad cuando adquiere características similares a las del conjunto. Este hecho permite realizar inferencias válidas, así como generalizaciones para toda la población, tomando un error con un margen que tiene que ser lo mínimo posible (13).

En esta investigación, como muestra se tuvo al conjunto de edificaciones con sistema aporticado con plantas en forma de «L» y «T», ubicadas en los distritos de Miraflores, Jesús María, San Isidro y Surco.

3.3. Nivel y tipo de estudio

3.3.1. Nivel de investigación

La investigación es de nivel explicativo siempre en cuando busca explicar el comportamiento de una determinada variable en función de otra variable independiente. En esta investigación se buscó explicar y por ende dar a conocer los factores que causan el comportamiento y manifestación del fenómeno en estudio (14).

Esta investigación es de nivel explicativo, debido a que se busca brindar una explicación a los efectos causados por las modificaciones del ángulo de incidencia de sismo en las respuestas estructurales de las edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T».

3.3.2. Tipo de investigación

Una investigación es aplicada cuando busca la generación de más conocimiento, que serán correctamente aplicados en la solución de diversos problemas de diferente naturaleza (15).

La investigación que se desarrolló es de tipo aplicada, debido a la búsqueda de la solución referida a la problemática de los daños estructurales que van recibiendo las edificaciones con plantas en forma de «L» y «T» a razón de la variación del ángulo de incidencia de sismo. Se genera un conocimiento referido al ángulo crítico, el cual provee de información sobre la dirección desfavorable de una estructura.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de una investigación es un plan o una guía que va permitiendo llevar el problema de manera eficiente y con sentido lógico. De esta manera, se va estableciendo la estructura de la investigación (13).

Esta investigación es de un diseño no experimental-correlacional, ya que se midió la variable dependiente (mediante el empleo de métodos matemáticos computacionales) consistente en la respuesta estructural de edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L» y «T», ante la variación y modificación de la variable independiente consistente en la variación del ángulo de incidencia sísmica.

3.5. Métodos, técnicas e instrumentos

3.5.1. Métodos de investigación

Un método es inductivo cuando a partir de los estudios realizados a los casos particulares, se logra generar nuevo conocimiento mediante la obtención de leyes generales que explican fenómenos generales (14). En este sentido, en esta investigación se utilizó el método científico inductivo, ya que se estudió el fenómeno desde casos particulares a fin de arribar a un conocimiento generalizado. Como casos particulares se tiene cada uno de los modelos estructurales estudiados, tanto para plantas en forma de «L» y «T»; y que una vez calculadas las respuestas para cada modelo en específico, se procedió a generalizar para el caso de todas las edificaciones de esquina entrante.

3.5.2. Técnica de recolección de datos

Las técnicas de investigación lo constituyen los diferentes métodos, así como procedimientos estructurados que permiten ir recolectando información sistematizada con el propósito de acercarse a los fenómenos y comprenderlos (14). Esta información

o conjunto de datos deben ser recogidos, analizados y sistematizados. Y como técnica, para el presente estudio se utilizó la observación. Dado que se observaron las diferentes configuraciones en planta existentes en Lima, poniendo especial énfasis en las plantas en forma de «L» y «T», por ser motivo de estudio.

También se utilizó la técnica de la revisión documentaria, ya que se ingresó a la base de datos del Instituto Geofísico de Perú y se extrajo información sobre diversos sismos ocurridos en Perú.

3.5.3. Instrumentos de recolección de datos

El instrumento de investigación lo constituye aquel recurso o herramienta utilizada por el sujeto que se encuentra haciendo la investigación, con el fin de comprender y tener un acercamiento al fenómeno en estudio y, de esta manera, poder extraer las informaciones y los datos necesarios que permitan ejecutar la investigación, donde estos instrumentos variarán de acuerdo con el tipo de datos (14).

Con el propósito de obtener datos y desarrollar los cálculos matemáticos computacionales, se usó softwares como instrumentos:

- *Seismo Signal*: se usa para poder corregir los registros sísmicos.
- *Seismo Match*: permite efectuar un *matching* (escalamiento) de la señal sísmica.

Una vez recogido los datos mediante los softwares antes señalados se pasó a la fase de experimentación.

3.6. Procedimiento

La metodología que se empleó fue la generación de modelos estructurales con plantas en forma de «L» y «T».

3.6.1. Primera parte del estudio – Edificaciones aporticadas con plantas en forma de L

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de L con saliente 16,67 %
- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de L con saliente 33,33 %
- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de L con saliente 50 %

Estos modelos fueron trabajados mediante el ATHL para diferentes ángulos de incidencia, haciendo variar los ángulos cada 10° . También se realizó un AME unidireccional para las estructuras con plantas en forma de «L». En seguida se realizó la comparación entre el AME y el ATHL bidireccional, donde se buscaron las respuestas críticas en concordancia con sus respectivos ángulos críticos. Asimismo, se emplearon los resultados del AME y su comparación con los resultados luego de aplicar las reglas de combinación direccional (las más usuales), y todos estos resultados finalmente fueron comparados con el patrón de comparación del ATHL.

3.6.2. Segunda parte del estudio – edificaciones aporticadas con plantas en forma de T

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de T con saliente 16,67 %
- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de T con saliente 33,33 %
- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de T con saliente 50 %

Se trabajó con los modelos antes expuestos (modelos con planta en forma de «L»), lo mismo se tuvo que hacer para los tres modelos con plantas en forma de «T». Es así como estos modelos con plantas en forma de «T» fueron trabajados mediante el ATHL para diferentes ángulos de incidencia, haciendo variar los ángulos cada 10° . También se realizó un AME unidireccional para las estructuras con plantas en forma de «T». En seguida se realizó la comparación entre el AME y el ATHL bidireccional, donde se buscaron las respuestas críticas en concordancia con sus respectivos ángulos críticos. Asimismo, se emplearon los resultados del AME y su comparación con los resultados luego de aplicar las reglas de combinación direccional (las más usuales), y todos estos resultados finalmente fueron comparados con el patrón de comparación del ATHL.

3.6.3. Modelos estructurales

En este estudio se trabajaron con estructuras de sistema aporticado. Específicamente, se trabajó para el caso de irregularidades de esquina entrante, siendo esta la única irregularidad presente en todas las estructuras mostradas, ya que las otras irregularidades, tanto en planta como en altura, fueron debidamente controladas en conformidad con la norma peruana. Asimismo, los modelos corresponden a edificaciones comunes para un tipo de suelo S1, ubicadas en la capital.

Dentro de estructuras con presencia de irregularidad de esquina entrante, en la capital se observó dos configuraciones en planta muy bien conocidas, que son las plantas en forma de «L» y las plantas en forma de «T». es por lo que en el presente estudio se trabajó con tres modelos en «L» y con tres modelos en «T», sumando en total seis modelos. Para lo cual se generaron los siguientes seis modelos estructurales.

3.6.3.1. Primera parte del estudio – edificaciones aporticadas con plantas en forma de «L»

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de L con saliente 16,67 %

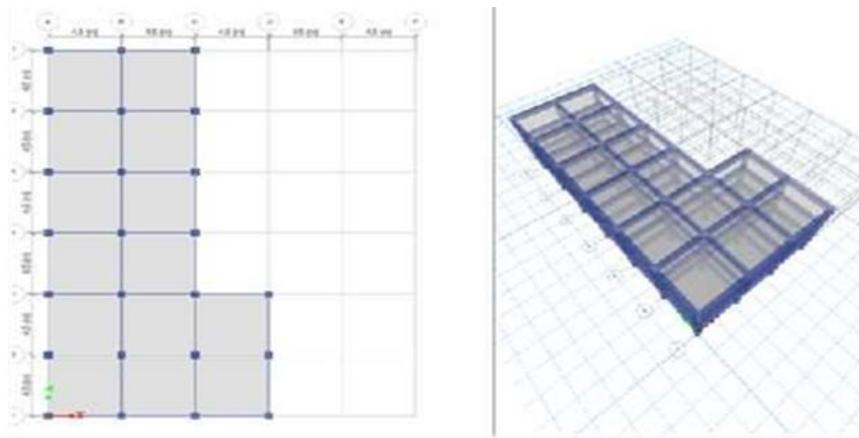


Figura 9. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 16,67 %

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de L con saliente 33,33 %

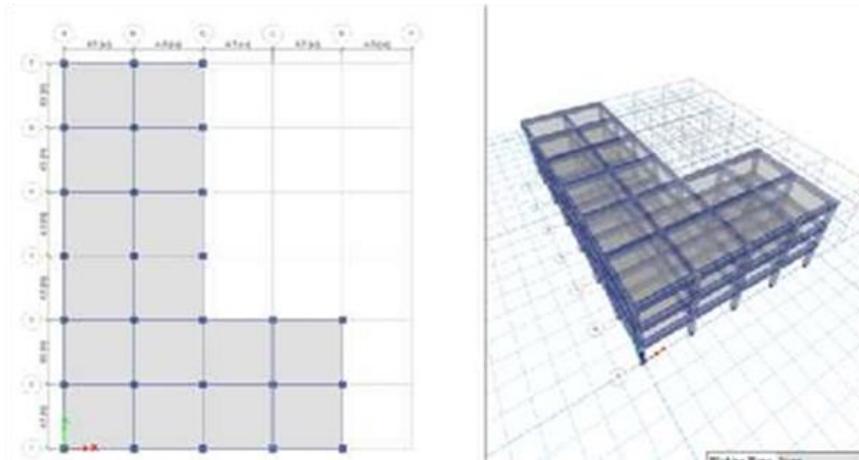


Figura 10. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 33,33 %

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de L con saliente 50 %

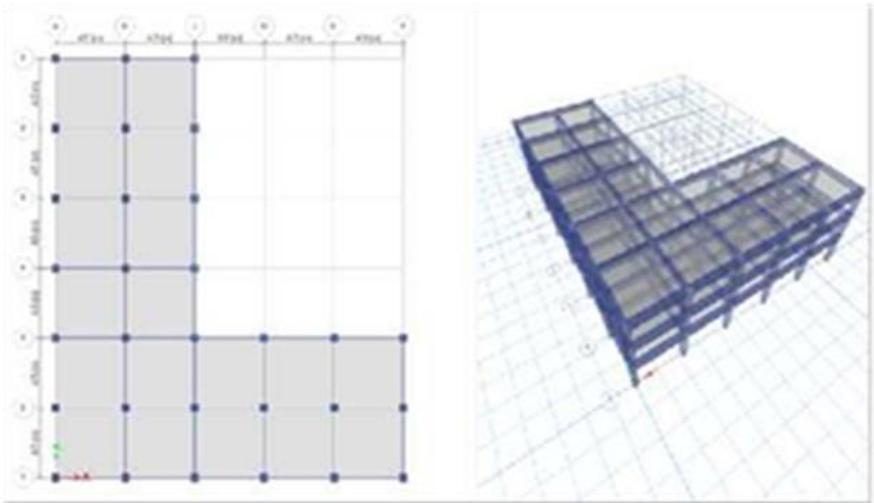


Figura 11. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 50 %

3.6.3.2. Segunda parte del estudio – edificaciones aporticadas con plantas en forma de «T»

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de T con saliente 16,67 %

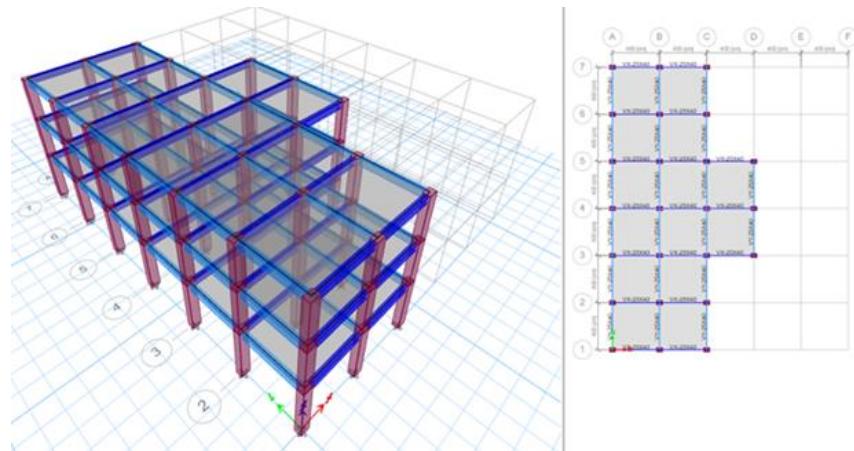


Figura 12. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 16,67 %

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de T con saliente 33,33 %

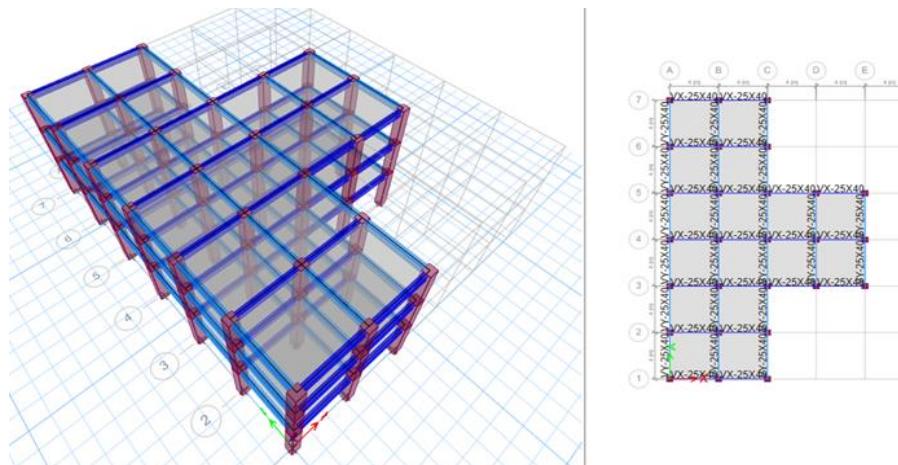


Figura 13. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 33,33 %

- ✓ Un modelo estructural con planta en forma de T con saliente 50 %

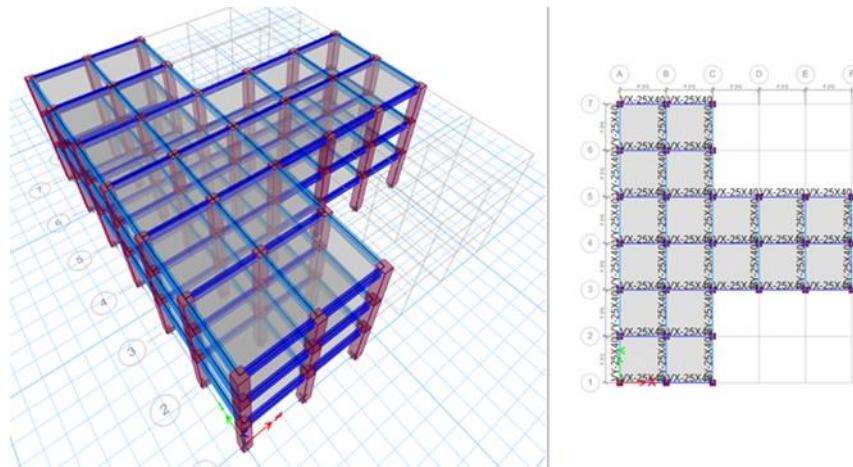


Figura 14. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 50 %

3.7. Selección de los registros sísmicos

Para el presente estudio se consideraron registros con aceleraciones máximas que encajan dentro de la clasificación de sismos moderados y severos.

Tabla 2. *Registros sísmicos para el ATHL*

Código de sismo	Sismo	Estación	Año	PGA EW	PGA NS	Mecanismo de falla
SS1	Lima	Parque de la Reserva	1966	-175.42	-267.85	Subducción
SS2	Ancash	Parque de la Reserva	1970	-104.28	-99.51	Subducción
SS3	Lima	Parque de la Reserva	1974	-190.36	169.37	Subducción
SS4	Moquegua	César Vizcarra	2001	-288.59	230.6	Subducción
SS5	Pisco	Única	2007	-291.97	364.51	Subducción

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de las estructuras con presencia de irregularidad por esquina entrante, se tiene dos configuraciones en planta bien conocidas que son las edificaciones con planta en forma de «L» y las edificaciones con planta en forma de «T», por lo que ambas formas de planta fueron estudiadas y separadas en un estudio de dos partes, que a continuación se detalla.

4.1. Primera parte del estudio – edificaciones aporticadas con plantas en forma de L

4.1.1. Primer modelo – L1

Como primer modelo se consideró una estructura de 3 plantas. Este modelo contó con un entrepiso de 3 metros de altitud. La estructura presenta una planta en forma de «L» con una saliente de 16,67 %. El módulo de elasticidad para el concreto es de $217370.65 \text{ kg/cm}^2$ ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$). En cuanto a las dimensiones de los elementos estructurales, la columna posee una dimensión de 55 x 50 cm, mientras la viga presenta una sección de 25 x 40 cm. La estructura presenta espaciamientos de 4 metros. La estructura solo presenta irregularidad por esquina entrante, ya que las otras irregularidades en planta y altura fueron controladas.

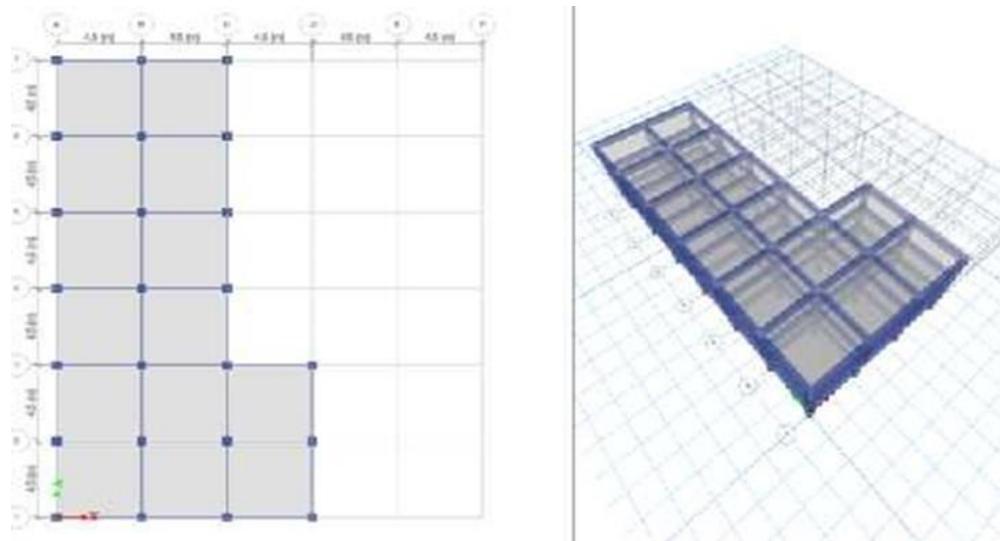


Figura 15. *Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 16,67 %*

Para esta estructura estudiada se encontró que su periodo fundamental es el translacional. Para este AME fueron considerados tres grados de libertad, en donde cada modo de vibración posee su periodo de vibración, los cuales son mostrados en la tabla resumen.

Tabla 3. *Periodos de vibración para el primer modelo L1*

Mode	Periodo (s)	UX	UY	Suma UX	Suma UY	RZ	Suma RZ
1	0.34	0.8489	5.58E-06	0.8489	5.58E-06	0.0085	0.0085
2	0.338	0	0.8707	0.8489	0.8708	0.0005	0.009
3	0.31	0.0089	0.0006	0.8579	0.8713	0.8534	0.8624
4	0.098	4.5E-06	0.1072	0.8579	0.9785	2.24E-06	0.8624
5	0.096	0.1176	3.52E-06	0.9754	0.9785	0.0005	0.8629
6	0.089	0.0004	0	0.9758	0.9785	0.1136	0.9765
7	0.049	0	0.0214	0.9758	1	7.33E-06	0.9765
8	0.046	0.0242	0	1	1	7.96E-06	0.9765
9	0.043	3.02E-05	1.50E-05	1	1	0.0235	1

Las respuestas del análisis dinámico modal son mostradas a continuación, donde se pueden apreciar los desplazamientos, derivas, cortante basal y momento de volteo de la estructura 1.

Tabla 4. *Resultados del análisis modalpectral para el modelo L1*

Respuestas máximas	Análisis dinámico modal
Cortante XX(t) – piso 1	75.622
Cortante YY(t) – piso 1	85.771
Momento de volteo XX (t-m) – piso 1	592.138
Momento de volteo YY (t-m) – piso 2	525.153
Desplazamiento XX (mm) – piso 3	53.25
Desplazamiento YY (mm) – piso 3	40.15
Deriva XX – piso 2	0.00685
Deriva YY – piso 2	0.00515

Los resultados del análisis tiempo-historia para los diferentes ángulos de incidencia de sismo son mostrados en los siguientes gráficos.

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en X son:

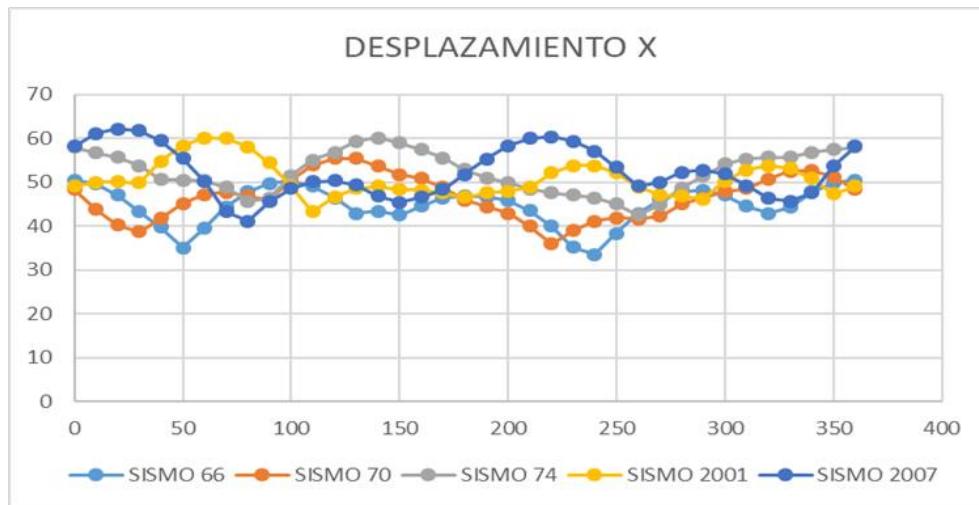


Figura 16. Desplazamiento en X cada intervalo de 10° para el modelo L1

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en Y son:

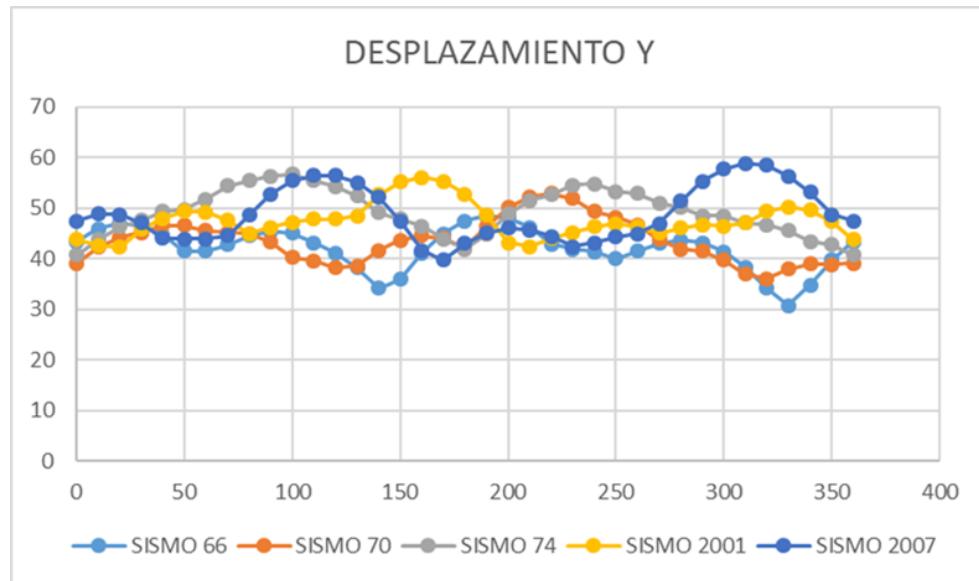


Figura 17. Desplazamiento en Y cada intervalo de 10° para el modelo L1

Asimismo, luego de trabajar con los cinco sismos antes mencionados se obtuvo las distorsiones luego de un ATHL bidireccionales, las cuales son mostradas.

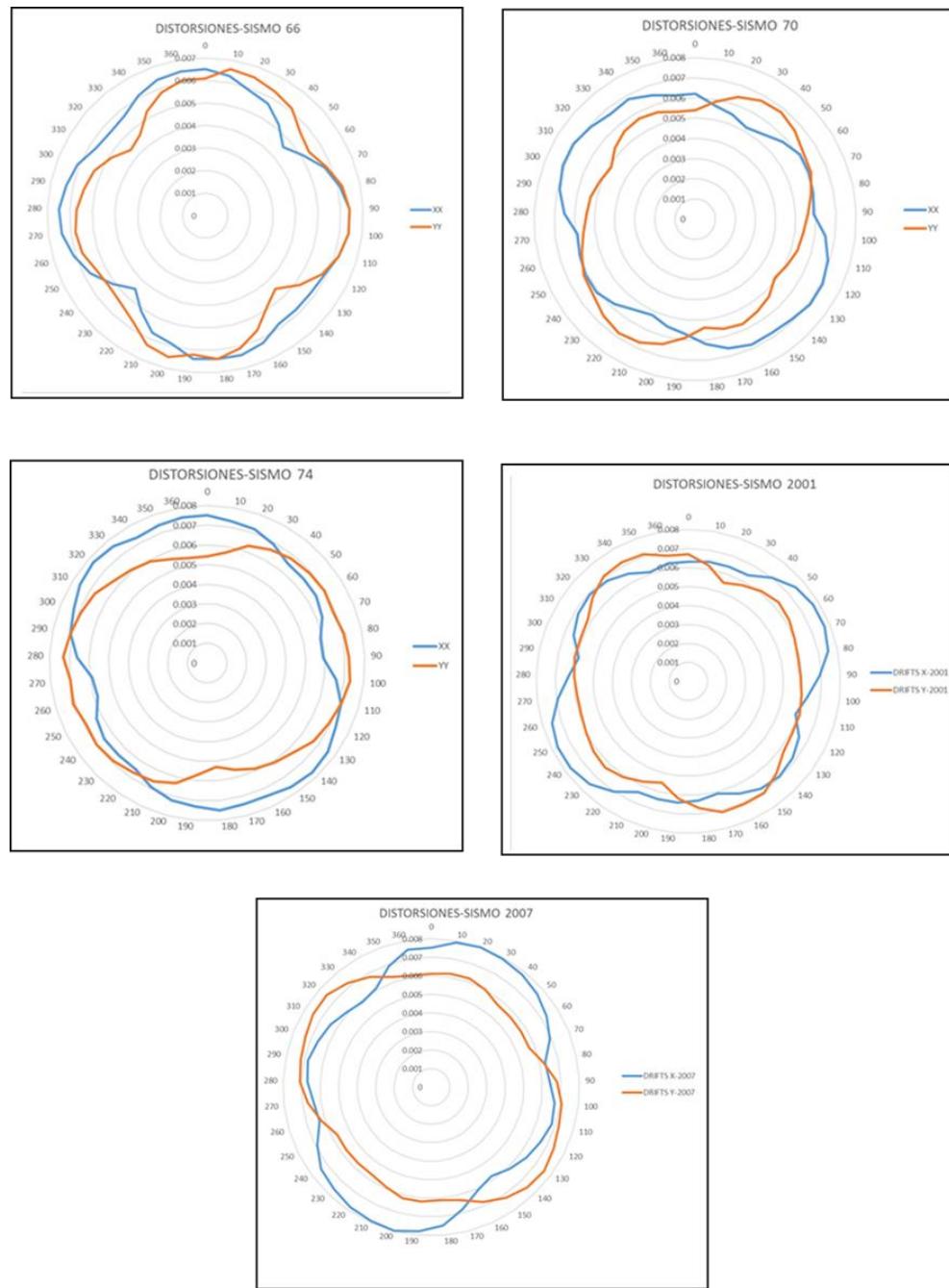


Figura 18. Distorsiones para el modelo L1

4.1.1.1. Resultados de los parámetros globales

Luego de aplicar un ATHL para el modelo L1 con planta en forma de «L» con saliente de 16,67 % y el empleo de los cinco registros sísmicos (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007). Los resultados para la cortante y el momento de vuelco en la base, tanto en eje X e Y, son:

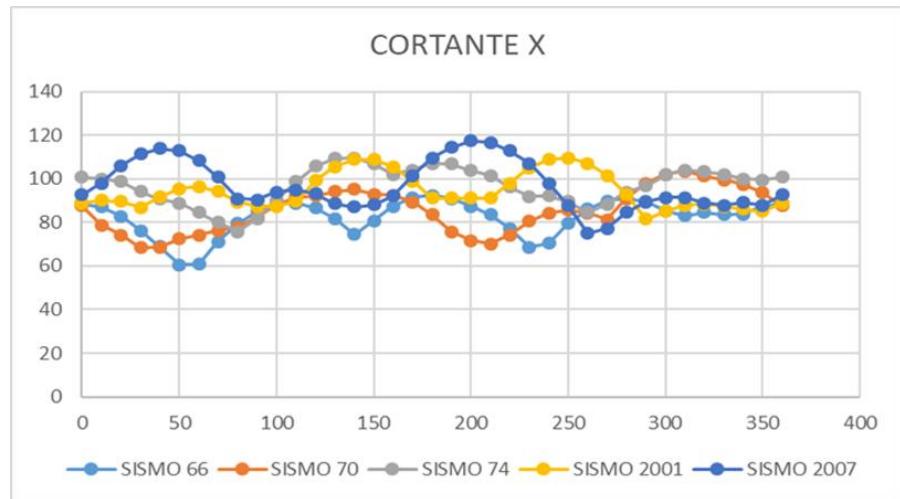


Figura 19. Cortante en X cada intervalo de 10° para el modelo L1

Los resultados obtenidos para la cortante en Y en el modelo L1, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

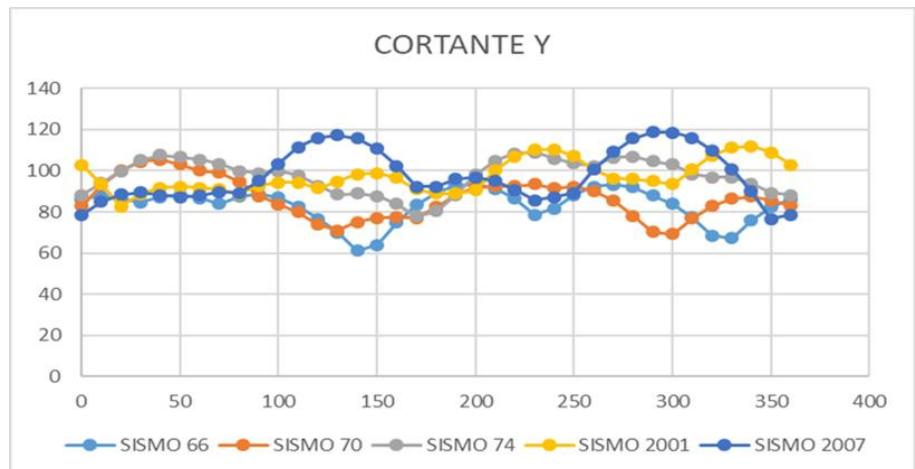


Figura 20. Cortante en Y cada intervalo de 10° para el modelo L1

Los resultados obtenidos para el momento de vuelco en X en el modelo L1, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

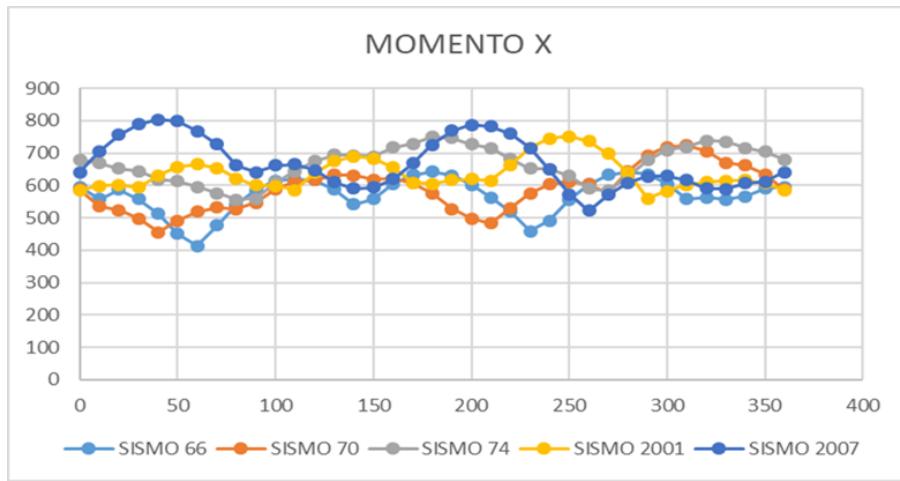


Figura 21. Momento en X cada intervalo de 10° para el modelo L1

Los resultados obtenidos para el momento en Y en el modelo L1, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

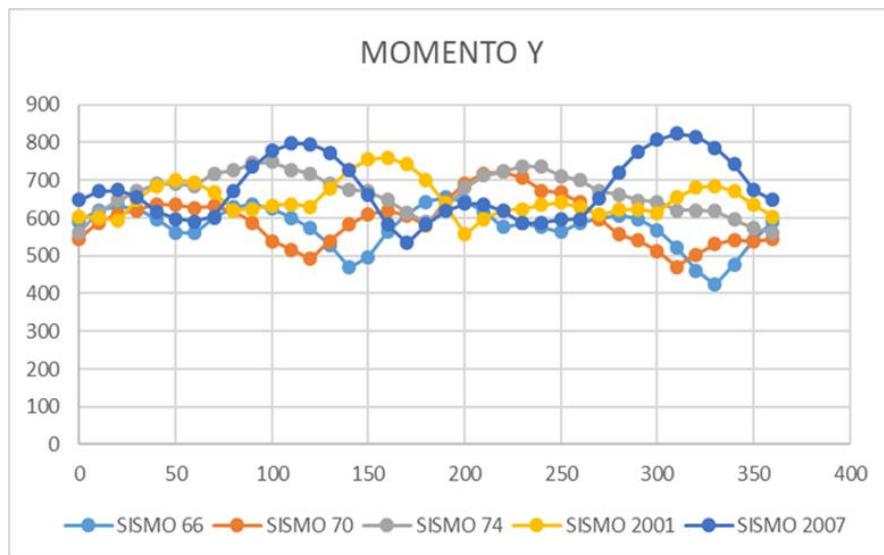


Figura 22. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L1

Observando los gráficos mostrados se puede apreciar que se obtienen resultados correspondientes a la respuesta crítica, para el sismo del 2007, donde se evidencia que dichos resultados son mayores al obtenido por el AME unidireccional. Este hecho demuestra que los resultados referidos a los parámetros globales son subestimados solamente al realizar un AME.

Luego de realizar el AME unidireccional para el modelo L1 (tabla 4) se compararon con los resultados luego de emplear las diversas reglas de combinación direccional (porcentajes, SRSS, CQC3). En este trabajo se

emplearon las reglas más conocidas y sus valores son mostrados a continuación.

Tabla 5. AME con reglas de combinación direccional para L1

Caso	Cortante basal en X (t f)	Cortante basal en Y (t f)	Momento de vuelco en X (t f - m)	Momento de vuelco en Y (t f - m)
AME	75.622	85.771	592.138	525.153
100-30	76.033	86.182	594.995	528.025
100-40	76.171	86.320	595.955	528.990
SRSS	75.633	85.779	592.192	525.231
CQC3	75.631	85.779	592.192	525.220

De la tabla, se puede apreciar que los resultados de mayor valor son obtenidos luego de emplear las reglas de los porcentajes que son, la del 100-40 % y la del 100-30 %, en donde la primera obtiene resultados ligeramente mayores que la segunda regla.

Mientras que mediante las reglas del SRSS y CQC3 se obtuvieron respuestas muy parecidos entre ellos y similares al AME.

4.1.1.2. Comparación de resultados

Para realizar la comparación de resultados se usó como patrón de comparación el promedio, luego de realizar el ATHL mediante el empleo de cinco registros sísmicos (en conformidad con la E030). Este resultado funcionó como patrón de comparación, con los resultados obtenidos luego de aplicar las reglas de los porcentajes (100-30 % y 100-40 %), la regla SRSS y la regla CQC3.

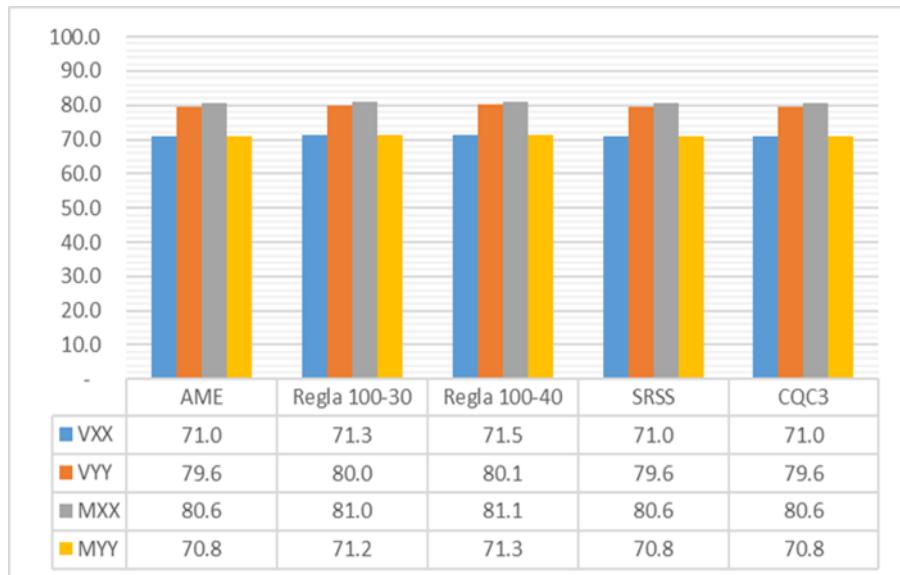


Figura 23. Relación entre el modal espectral y el tiempo-historia para L1

Del gráfico mostrado se puede notar que las reglas SRSS y CQC3 muestran una misma variabilidad que el AME con respecto al patrón de comparación. Mientras que los resultados obtenidos mediante las reglas de los porcentajes (100-40 % y 100-30 %), valores que son muy similares entre sí, producen resultados mayores que las reglas anteriores, y son los que más se acercan al patrón con el cual se está realizando la comparación, por lo que estiman en mayor medida en comparación a las reglas anteriores; sin embargo, este resultado dista regularmente del patrón.

4.1.2. Segundo modelo – L2

Como segundo modelo con planta en «L» se consideró una estructura de 3 plantas. Este modelo contó con un entrepiso de 3 metros de altitud. La estructura presenta una planta en forma de «L» con una saliente de 33,33 %. El módulo de elasticidad para el concreto es de $217370.65 \text{ kg/cm}^2$ ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$). En cuanto a las dimensiones de los elementos estructurales, la columna posee una dimensión de 55 x 50 cm, mientras la viga presenta una sección de 25 x 40 cm. La estructura presenta espaciamientos de 4 metros. La estructura solo presenta irregularidad por esquina entrante, ya que las otras irregularidades en planta y altura fueron controladas.

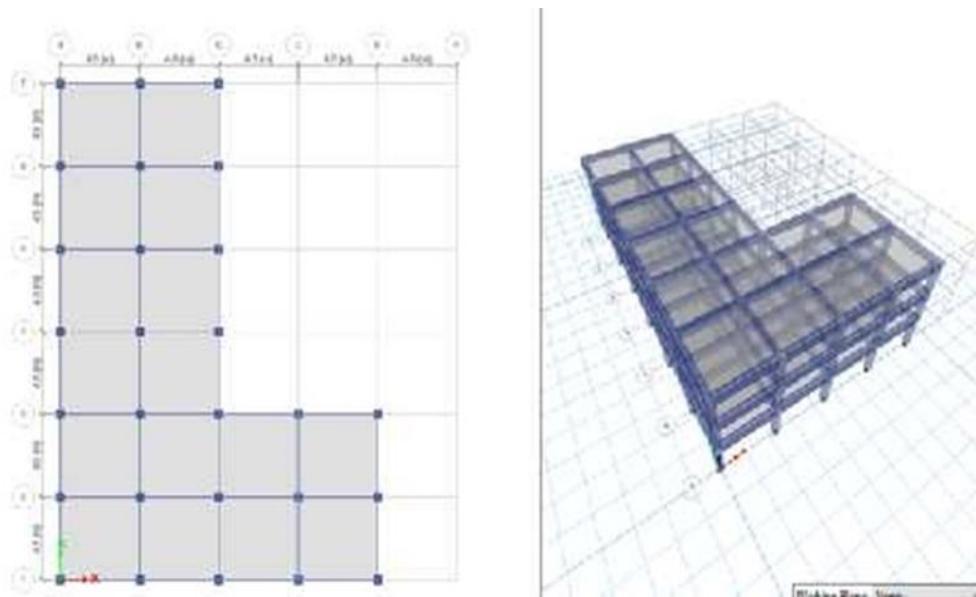


Figura 24. *Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 33,33 %*

Para esta estructura estudiada se encontró que su periodo fundamental es el translacional. Para este AME fueron considerados tres grados de libertad, en donde cada modo de vibración posee su periodo de vibración, los cuales son mostrados en la tabla resumen.

Tabla 6. Periodos de vibración para el segundo modelo L2

Mode	Periodo (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	0.342	0.0024	0.8625	0.0024	0.8625	0.0049	0.0049
2	0.337	0.8297	0.0038	0.8321	0.8662	0.0254	0.0303
3	0.313	0.0278	0.004	0.8599	0.8702	0.833	0.8633
4	0.099	0	0.108	0.8599	0.9783	0.0001	0.8634
5	0.095	0.11151	1.43E-06	0.975	0.9783	0.0017	0.8651
6	0.09	0.0012	3.11E-05	0.9762	0.9783	0.1116	0.9767
7	0.049	0	0.0217	0.9762	1	8.55E-06	0.9767
8	0.046	0.0237	0	0.9999	1	3.27E-05	0.9768
9	0.044	0.0001	2.88E-05	1	1	0.0232	1

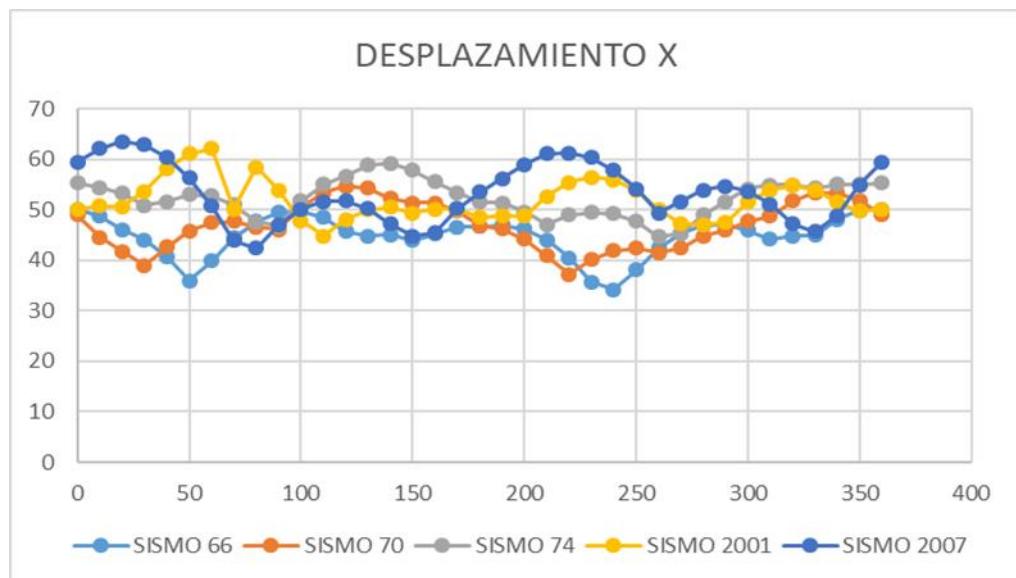
Las respuestas del análisis dinámico modal son mostradas a continuación, donde se pueden apreciar los desplazamientos, derivas, cortante basal y momento de volteo de la estructura 2.

Tabla 7. Resultados del análisis modal espectral para el modelo L2

Respuestas máximas	Ánálisis dinámico modal
Cortante XX(t) – piso 1	86.395
Cortante YY (t) – piso 1	91.898
Momento de volteo XX (t-m) – piso 1	634.9
Momento de volteo YY (t-m) – piso 2	599.662
Desplazamiento XX (mm) – piso 3	52.77
Desplazamiento YY (mm) – piso 3	44.95
Deriva XX – piso 2	0.00679
Deriva YY – piso 2	0.00577

Los resultados del análisis tiempo-historia para los diferentes ángulos de incidencia de sismo son mostrados en los siguientes gráficos.

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en X son:

**Figura 25. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L2**

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en Y son:

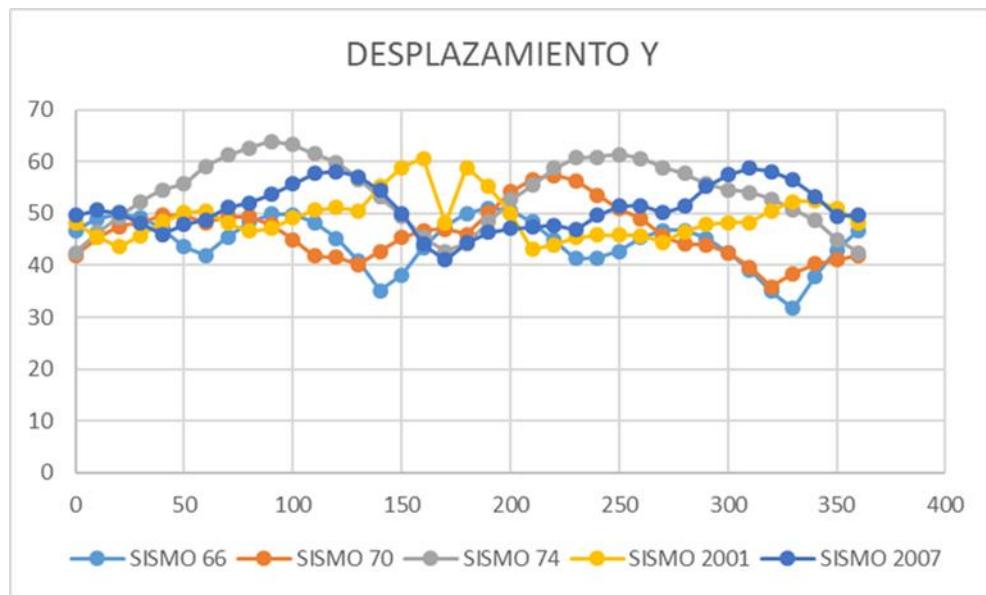


Figura 26. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L2

Asimismo, luego de trabajar con los cinco sismos antes mencionados se obtuvo las distorsiones luego de un ATHL bidireccionales, las cuales son mostradas a continuación.

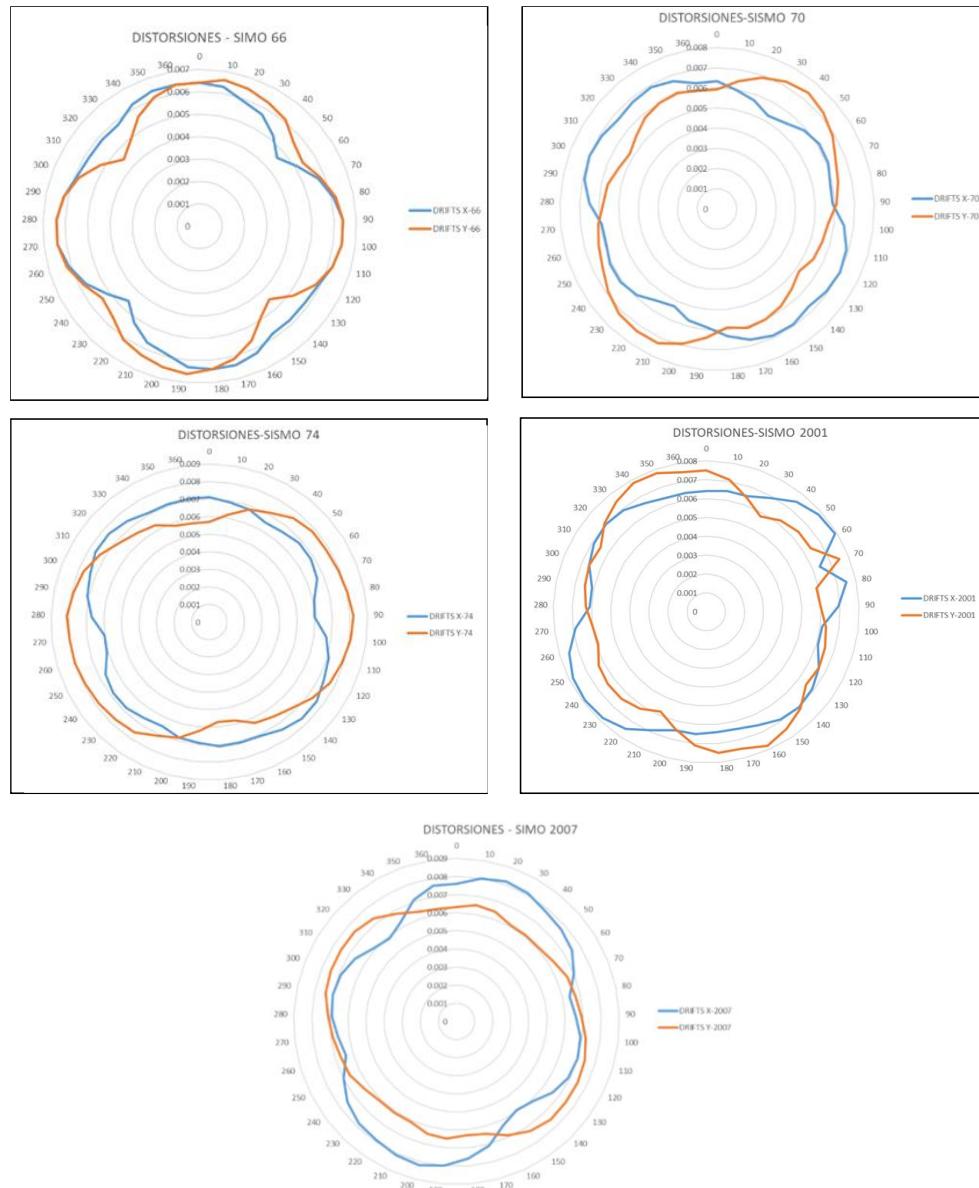


Figura 27. Distorsiones para el modelo L2

4.1.2.1. Resultados de los parámetros globales

Luego de aplicar un ATHL para el modelo L2 con planta en forma de «L» con saliente de 33,33 % y el empleo de los cinco registros sísmicos (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007). Los resultados para la cortante y el momento de vuelco en la base, tanto en eje X e Y, son:

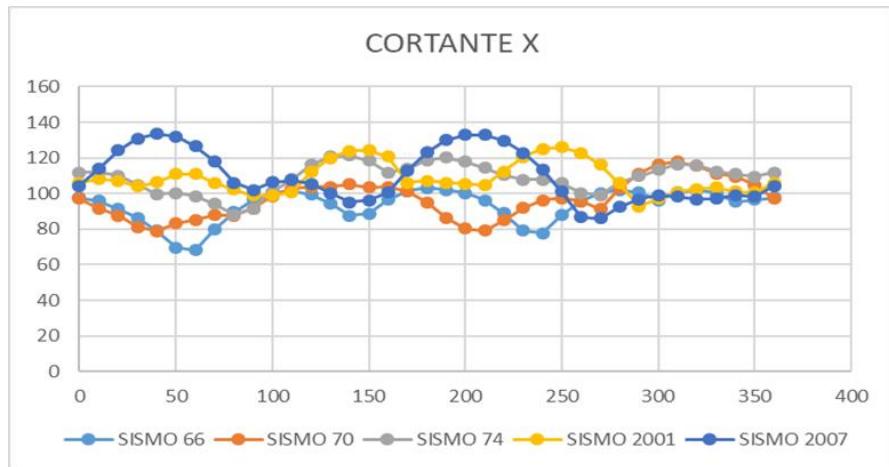


Figura 28. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo L2

Los resultados obtenidos para la cortante en Y en el modelo L2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

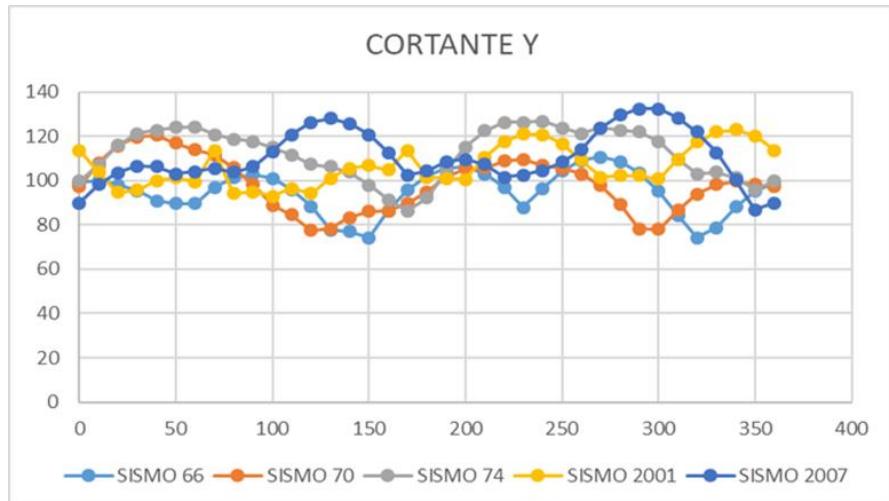


Figura 29. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L2

Los resultados obtenidos para el momento en X en el modelo L2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

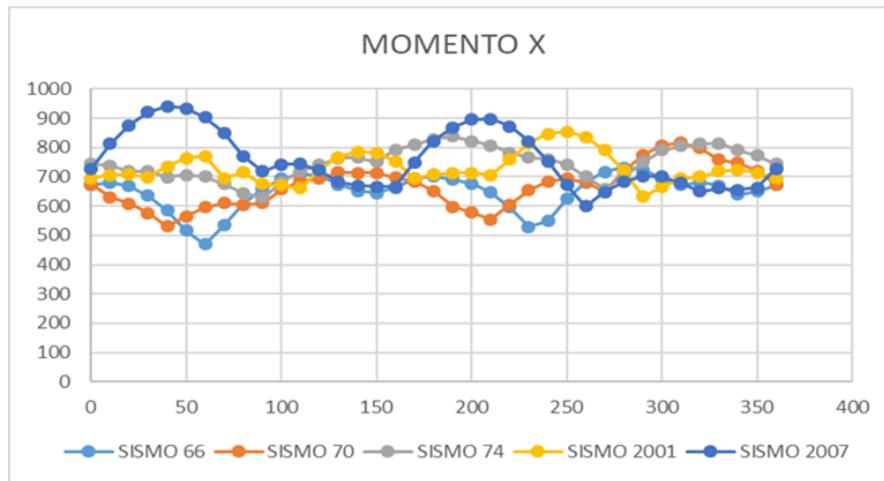


Figura 30. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L2

Los resultados obtenidos para el momento en Y en el modelo L2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

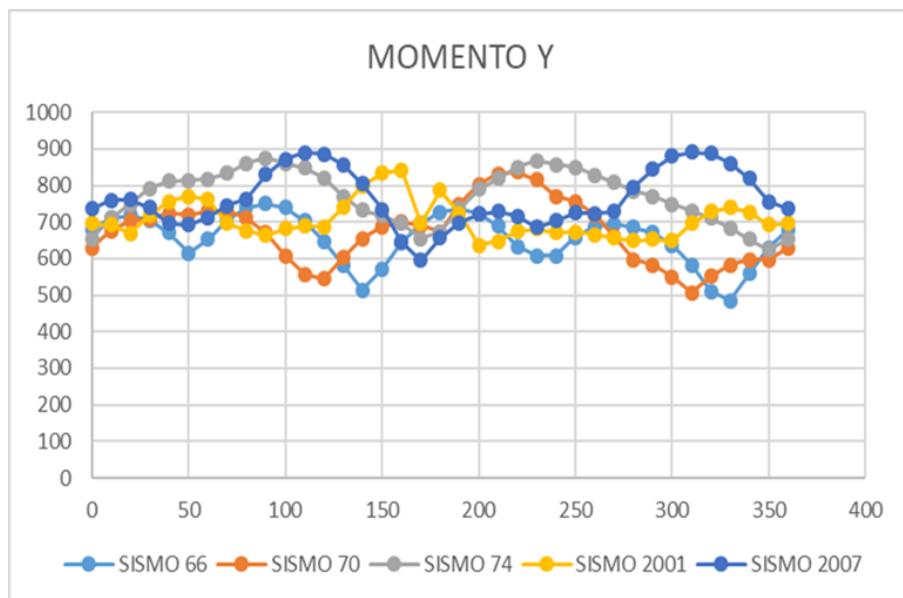


Figura 31. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L2

Observando los gráficos mostrados se puede apreciar que se obtienen resultados correspondientes a la respuesta crítica, para el sismo del 2007, donde se evidencia que dichos resultados son mayores al obtenido por el AME unidireccional. Este hecho demuestra que los resultados referidos a los parámetros globales son subestimados solamente al realizar un AME.

Luego de realizar el AME unidireccional para el modelo L1 (tabla 7) se compararon con los resultados luego de emplear las diversas reglas de combinación direccional (porcentajes, SRSS, CQC3). En este trabajo se

emplearon las reglas más conocidas y sus valores son mostrados a continuación.

Tabla 8. AME con reglas de combinación direccional para L2

Caso	Cortante basal en X (t f)	Cortante basal en Y (t f)	Momento de vuelco en X (t f · m)	Momento de vuelco en Y (t f · m)
AME	86.395	91.898	634.900	599.662
100-30	87.593	93.868	648.583	608.042
100-40	90.387	94.526	653.152	627.570
SRSS	86.483	92.130	636.517	600.288
CQC3	86.487	92.130	636.517	600.312

De la tabla, se puede apreciar que los resultados de mayor valor son obtenidos luego de emplear las reglas de los porcentajes que son, la del 100-40 % y la del 100-30 %, en donde la primera obtiene resultados ligeramente mayores que la segunda regla.

Mientras que mediante las reglas del SRSS y CQC3 se obtuvieron respuestas muy parecidas entre ellas y similares al AME.

4.1.2.2. Comparación de resultados

Para realizar la comparación de resultados se usó como patrón de comparación el promedio, luego de realizar el ATHL mediante el empleo de cinco registros sísmicos (en conformidad con la E030). Este resultado funcionó como patrón de comparación, con los resultados obtenidos luego de aplicar las reglas de los porcentajes (100-30 % y 100-40 %), la regla SRSS y la regla CQC3.

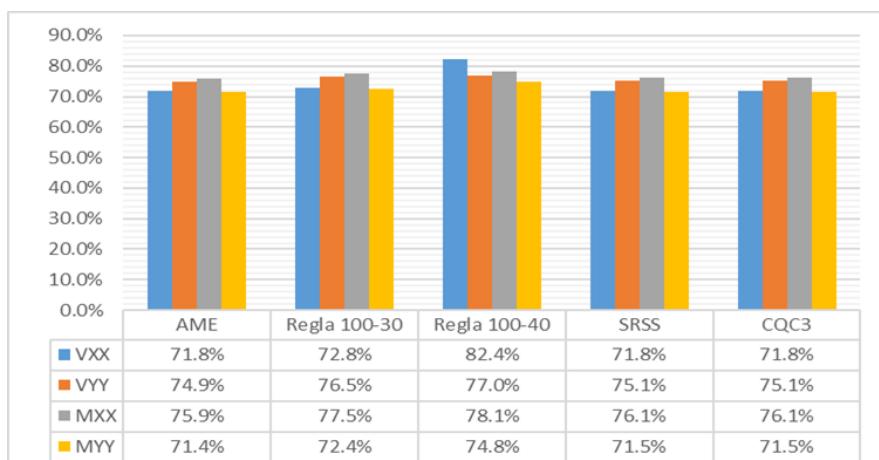


Figura 32. Relación entre el modal espectral y el tiempo-historia para L2

Del gráfico mostrado se puede notar que las reglas SRSS y CQC3 muestran una misma variabilidad que el AME con respecto al patrón de comparación. Mientras que los resultados obtenidos mediante las reglas de los porcentajes (100-40 % y 100-30 %), valores que son muy similares entre sí, producen resultados mayores que las reglas anteriores, y son los que más se acercan al patrón con el cual se está realizando la comparación, por lo que estiman en mayor medida en comparación a las reglas anteriores; sin embargo, este resultado dista regularmente del patrón.

4.1.3. Tercer modelo – L3

Como tercer modelo con planta en «L» se consideró una estructura de 3 plantas. Este modelo contó con un entrepiso de 3 metros de altitud. La estructura presenta una planta en forma de «L» con una saliente del 50 %. El módulo de elasticidad para el concreto es de $217370.65 \text{ kg/cm}^2$ ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$). En cuanto a las dimensiones de los elementos estructurales, la columna posee una dimensión de 55 x 50 cm, mientras la viga presenta una sección de 25 x 40 cm. La estructura presenta espaciamientos de 4 metros. La estructura solo presenta irregularidad por esquina entrante, ya que las otras irregularidades en planta y altura fueron controladas.

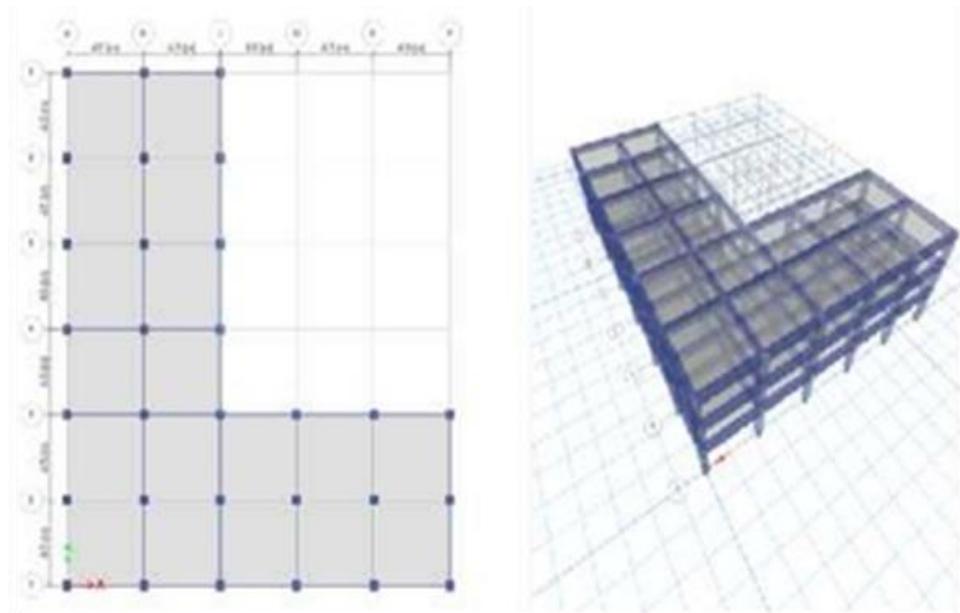


Figura 33. Modelo estructural con planta en forma de «L» con saliente de 50 %

Para esta estructura estudiada, se encontró que su periodo fundamental es el translacional. Para este AME fueron considerados tres grados de libertad, en donde cada modo de vibración posee su periodo de vibración, los cuales son mostrados en la tabla resumen.

Tabla 9. Periodos de vibración para el tercer modelo L3

Mode	Periodo (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	0.331	0.8013	0.0165	0.8013	0.0165	0.038	
2	0.326	0.0251	0.8171	0.8264	0.8336	0.0165	0.0545
3	0.307	0.0311	0.026	0.8575	0.8595	0.8034	0.8579
4	0.093	0.1167	0.0003	0.9742	0.8598	0.0018	0.8597
5	0.092	0.0004	0.1156	0.9746	0.9755	0.0009	0.8605
6	0.087	0.0011	0.0006	0.9757	0.9761	0.1151	0.9756
7	0.045	0.0242	4.47E-05	0.9999	0.9761	2.34E-05	0.9757
8	0.045	0.0001	0.0238	0.9999	0.9999	0.0001	0.9757
9	0.042	0.0001	0.0001	1	1	0.0243	1

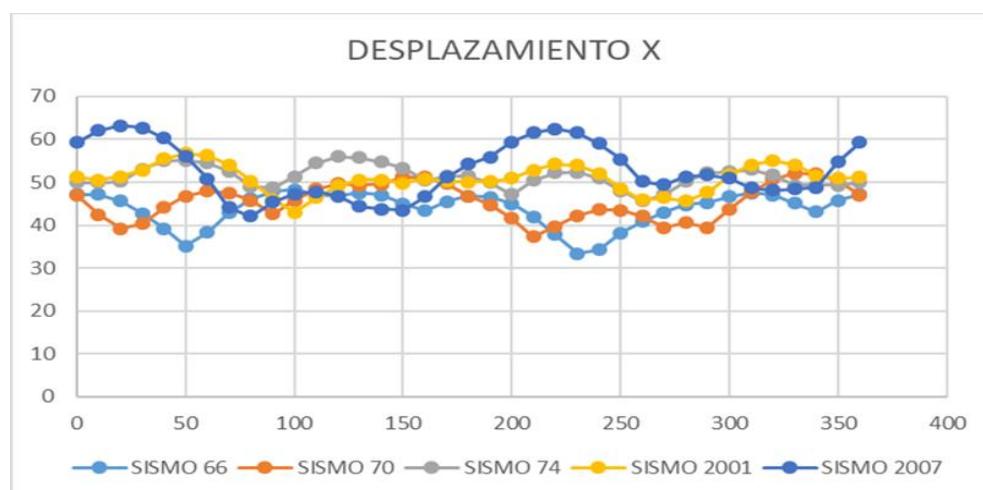
Las respuestas del análisis dinámico modal son mostradas a continuación, donde se pueden apreciar los desplazamientos, derivas, cortante basal y momento de volteo de la estructura 3.

Tabla 10. Resultados del análisis modal espectral para el modelo L3

Respuestas máximas	Análisis dinámico modal
Cortante XX(t) – piso 1	99.828
Cortante YY (t) – piso 1	100.837
Momento de volteo XX (t-m) – piso 1	699.657
Momento de volteo YY (t-m) – piso 2	693.23
Desplazamiento XX (mm) – piso 3	50.2
Desplazamiento YY (mm) – piso 3	44.13
Deriva XX – piso 2	0.00646
Deriva YY – piso 2	0.00568

Los resultados del análisis tiempo historia para los diferentes ángulos de incidencia de sismo son mostrados en los siguientes gráficos.

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en X son:

**Figura 34. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L3**

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en Y son:

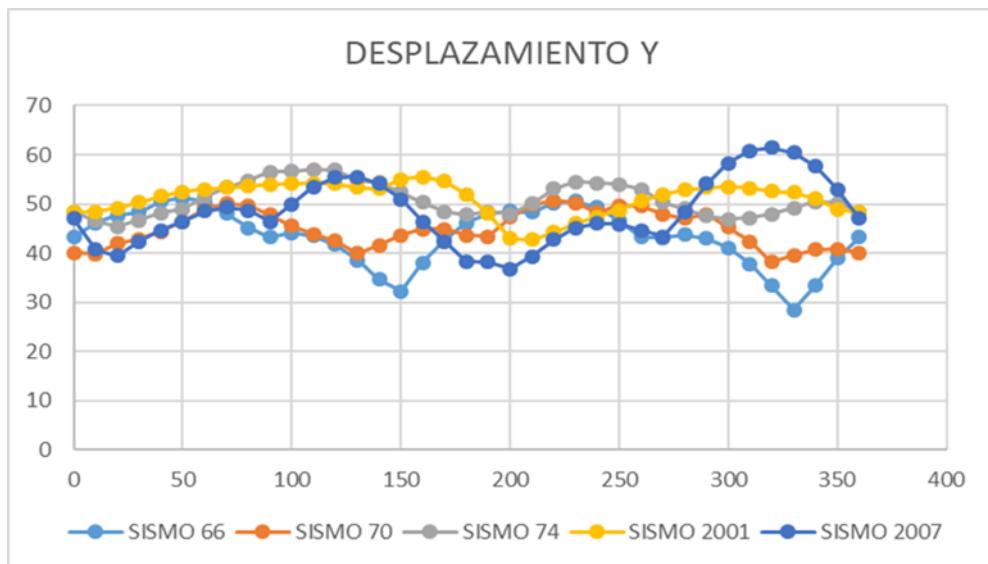


Figura 35. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L3

Asimismo, luego de trabajar con los cinco sismos antes mencionados se obtuvo las distorsiones luego de un ATHL bidireccionales, las cuales son mostradas a continuación.

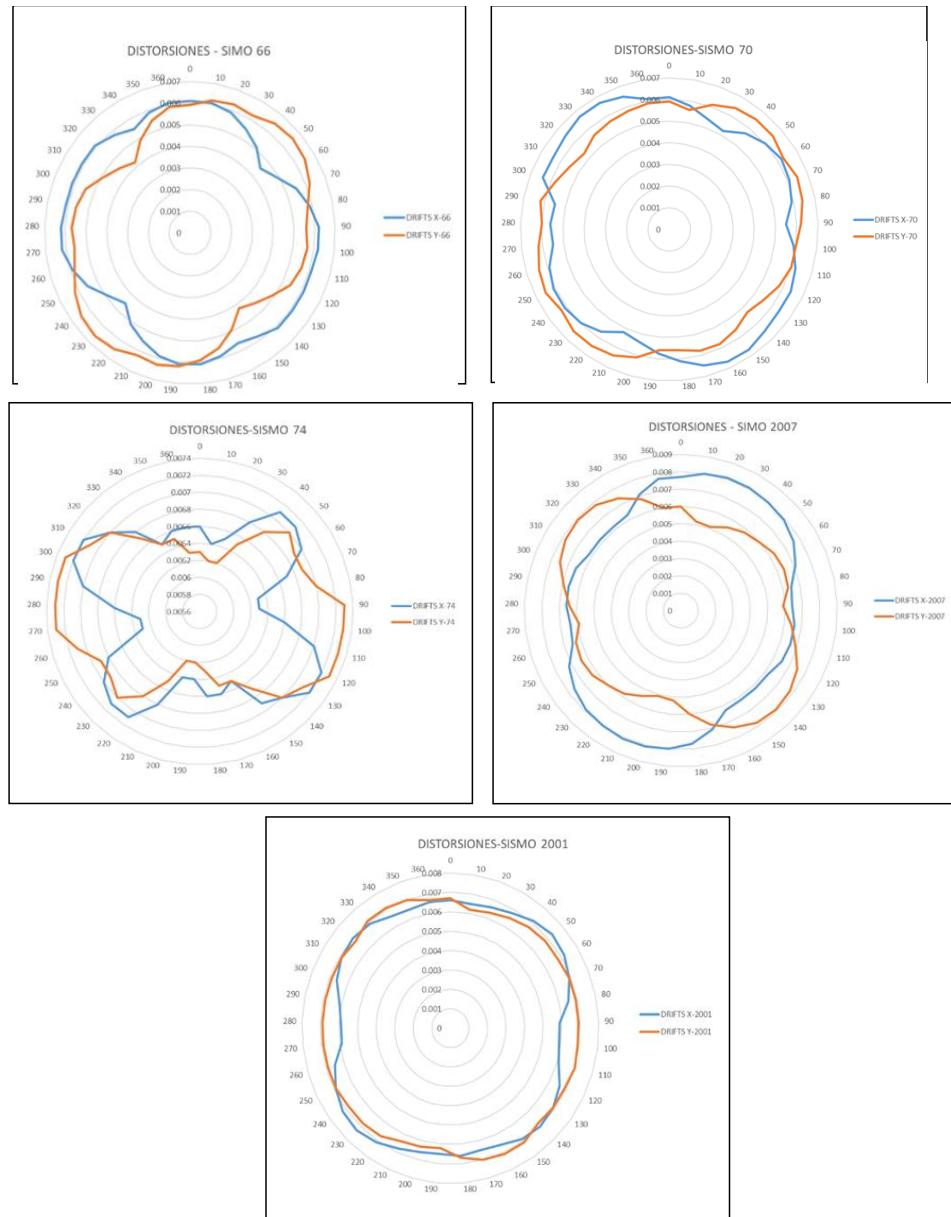


Figura 36. Distorsiones para el modelo L3

4.1.3.1. Resultados de los parámetros globales

Luego de aplicar un ATHL para el modelo L3 con planta en forma de «L» con saliente de 50 % y el empleo de los cinco registros sísmicos (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007). Los resultados para la cortante y el momento de vuelco en la base, tanto en eje X e Y, son:

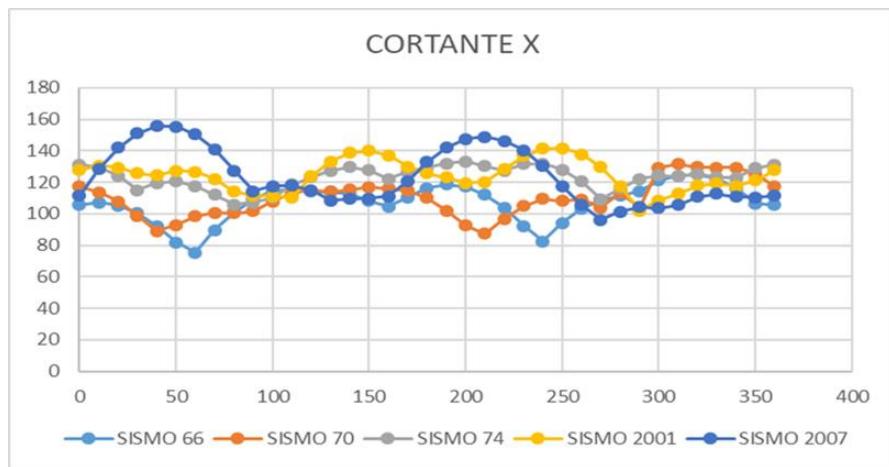


Figura 37. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo L3

Los resultados obtenidos para la cortante en Y en el modelo L2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

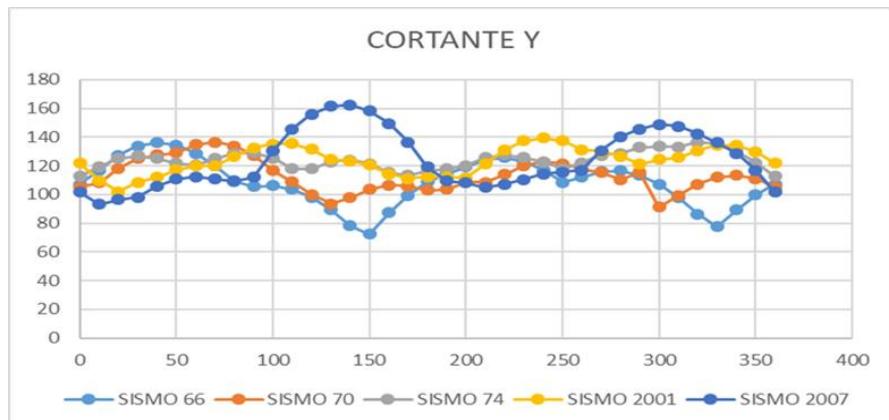


Figura 38. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L3

Los resultados obtenidos para el momento en X en el modelo L3, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

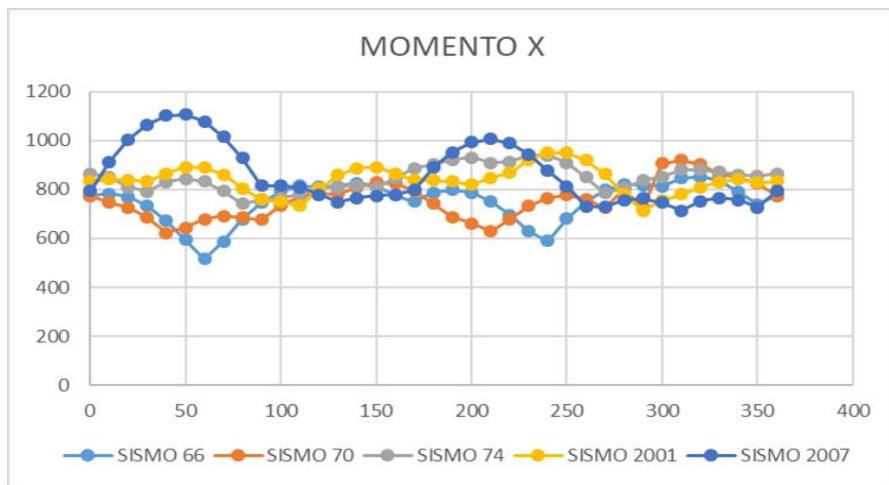


Figura 39. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo L3

Los resultados obtenidos para el momento en Y en el modelo L2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

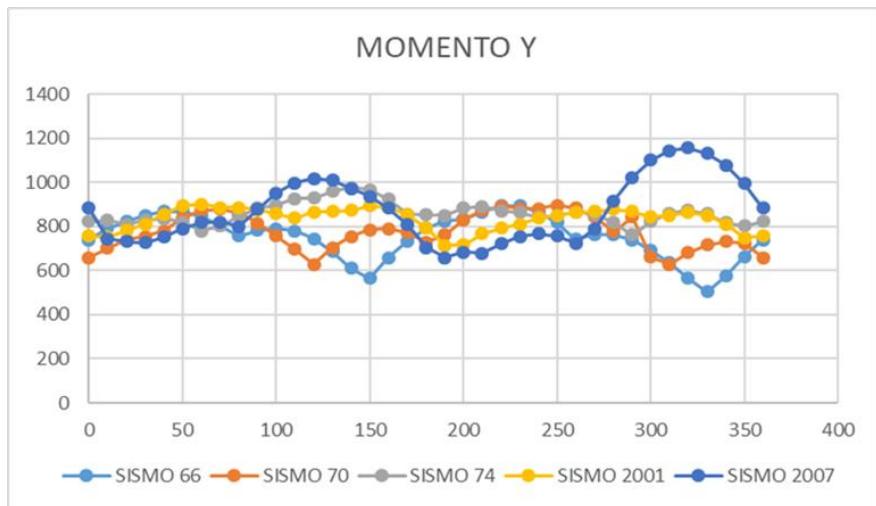


Figura 40. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo L3

Observando los gráficos mostrados se puede apreciar que se obtienen resultados correspondientes a la respuesta crítica, para el sismo del 2007, donde se evidencia que dichos resultados son mayores al obtenido por el AME unidireccional. Este hecho demuestra que los resultados referidos a los parámetros globales son subestimados solamente al realizar un AME.

Luego de realizar el AME unidireccional para el modelo L1 (tabla 10) se compararon con los resultados luego de emplear las diversas reglas de combinación direccional (porcentajes, SRSS, CQC3). En este trabajo se emplearon las reglas más conocidas y sus valores son mostrados.

Tabla 11. AME con reglas de combinación direccional para L3

Caso	Cortante basal en X (t f)	Cortante basal en Y (t f)	Momento de vuelco en X (t f - m)	Momento de vuelco en Y (t f - m)
AME	99.828	100.837	699.657	693.230
100-30	102.085	103.676	719.486	709.011
100-40	102.838	104.624	726.105	714.281
SRSS	100.108	101.277	702.753	695.202
CQC3	100.112	101.281	702.781	695.230

De la tabla, se puede apreciar que los resultados de mayor valor son obtenidos luego de emplear las reglas de los porcentajes que son, la del 100-40 % y la del 100-30 %, en donde la primera obtiene resultados ligeramente mayores que la segunda regla.

Mientras que mediante las reglas del SRSS y CQC3 se obtuvo respuestas muy parecidas entre ellas y similares al AME.

4.1.3.2. Comparación de resultados

Para realizar la comparación de resultados se usó como patrón de comparación el promedio, luego de realizar el ATHL mediante el empleo de cinco registros sísmicos (en conformidad con la E030). Este resultado funcionó como patrón de comparación, con los resultados obtenidos luego de aplicar las reglas de los porcentajes (100-30 % y 100-40 %), la regla SRSS y la regla CQC3.

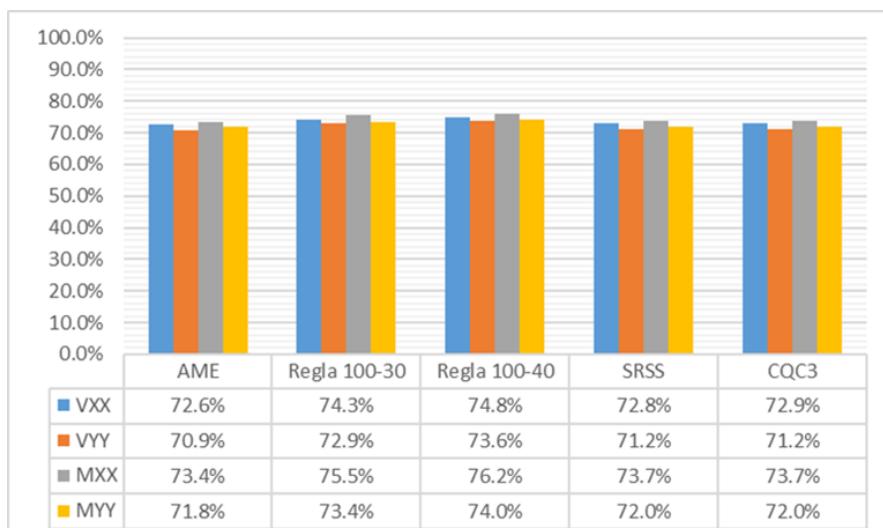


Figura 41. Relación entre el modal espectral y el tiempo historia para L3

Del gráfico mostrado se puede notar que las reglas SRSS y CQC3 muestran una misma variabilidad que el AME con respecto al patrón de comparación. Mientras que los resultados obtenidos mediante las reglas de los porcentajes (100-40 % y 100-30 %), valores que son muy similares entre sí, producen resultados mayores que las reglas anteriores, y son los que más se acercan al patrón con el cual se está realizando la comparación, por lo que estiman en mayor medida en comparación a las reglas anteriores; sin embargo, este resultado dista regularmente del patrón.

4.1.4. Estudio del ángulo crítico

Como síntesis, luego de haber realizado bastantes ATHL bidireccionales, se muestran las tablas resumen de los ángulos críticos para las tres estructuras estudiadas que son L1, L2 y L3.

Se puede notar que los valores de los ángulos críticos son muy dispersos, además, para un determinado registro sísmico, el ángulo varía y es diferente.

Eso se nota al observar el valor de los ángulos para los registros de 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007.

Tabla 12. Estructura L1 y sus ángulos críticos

Respuestas globales	Ángulos críticos				
	1966	1970	1974	2001	2007
UX	0	120	140	60	20
UY	190	220	100	160	310
VX	180	310	140	250	200
VY	200	40	230	340	290
MX	280	310	180	250	40
MY	190	220	100	160	310

Tabla 13. Estructura L2 y sus ángulos críticos

Respuestas globales	Ángulos críticos				
	1966	1970	1974	2001	2007
UX	0	120	140	60	20
UY	190	220	90	160	310
VX	180	310	140	250	40
VY	270	40	240	340	290
MX	280	310	190	250	40
MY	90	220	90	160	310

Tabla 14. Estructura L3 y sus ángulos críticos

Respuestas globales	Ángulos críticos				
	1966	1970	1974	2001	2007
UX	100	330	120	50	20
UY	50	220	110	160	320
VX	320	310	200	250	40
VY	40	70	320	240	140
MX	320	310	230	240	50
MY	230	250	140	60	320

Un fenómeno muy interesante para tener en cuenta es el hecho que para los modelos 1 y 2, los valores de los ángulos son muy similares (tabla 12 y tabla 13). Es más, para el desplazamiento en X, los valores angulares críticos son los mismos para los tres registros sísmicos. El mismo fenómeno se repite para la cortante en X.

Mientras que para los demás parámetros en estudio, se puede notar que los valores angulares son muy similares.

Este fenómeno se da, debido a que ambas estructuras tienen una saliente menor al 50 %. Y si se observamos la tabla 14, correspondiente al modelo 3, se nota que los

valores angulares son muy dispersos y diferentes a los valores angulares de los modelos 1 y 2. Este fenómeno se da, debido a que la estructura 3, presenta una saliente del 50 %.

De las tablas anteriormente mostradas se nota que, mientras que las salientes de las estructuras con planta en forma de «L» son menores al 50 %, los valores angulares críticos son muy similares y guardan relación; mientras que si la saliente es mayor o igual al 50 % los valores de los ángulos críticos se empiezan a dispersar y son muy diferentes para valores de estructuras con salientes menores al 50 %.

4.1.5. Cálculo del factor de amplificación debido a la bidireccionalidad

Una estructura podría llegar al colapso debido a causas o por efecto de la bidireccionalidad, por lo que este fenómeno debería ser tenido en cuenta dentro de este análisis (5). A continuación, se muestra una ecuación cuya finalidad es proporcionar el factor de amplificación para estructuras aporticadas asimétricas con plantas en forma de «L».

Para tal efecto se trabajaron con las respuestas globales de las tres estructuras (estructuras 1, 2 y 3).

$$R_f = KR_0$$

Donde, el objetivo es determinar el valor del factor de amplificación «k», y que para el caso de estructuras con plantas en forma de «L», se tuvo que analizar los factores para cada modelo, es decir para L1, luego L2 y finalmente L3.

En base a todos los cálculos realizados se tiene que para la estructura 1, el valor del factor de amplificación es 1,4. Es decir para el modelo 1, $k = 1,4$.

Asimismo, luego de todos los cálculos realizados, se consiguió que para la estructura 2, el valor de la amplificación es de 1,4. Vale decir que para el modelo 2, $k = 1,4$.

De igual manera, luego de realizar los cálculos para la estructura 3, se encontró que el factor de amplificación «k», es igual a 1,4.

En resumen:

Para la estructura L1 se tiene $k = 1,4$

Para la estructura L2 se tiene $k = 1,4$

Para la estructura L3 se tiene $k = 1,4$

Por lo tanto, se concluye que para estructuras con plantas en forma de «L», su factor de amplificación bidireccional es 1,4.

4.2. Segunda parte del estudio – edificaciones aporticadas con plantas en forma de T

4.2.1. Primer modelo – T1

Como primer modelo con planta en forma de «T» se consideró una estructura de 3 plantas. Este modelo contó con un entrepiso de 3 metros de altitud. La estructura presenta una planta en forma de «T» con una saliente del 16,67 %. El módulo de elasticidad para el concreto es de $217370.65 \text{ kg/cm}^2$ ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$). En cuanto a las dimensiones de los elementos estructurales, la columna posee una dimensión de $55 \times 50 \text{ cm}$, mientras la viga presenta una sección de $25 \times 40 \text{ cm}$. La estructura presenta espaciamientos de 4 metros. La estructura solo presenta irregularidad por esquina entrante, ya que las otras irregularidades en planta y altura fueron controladas.

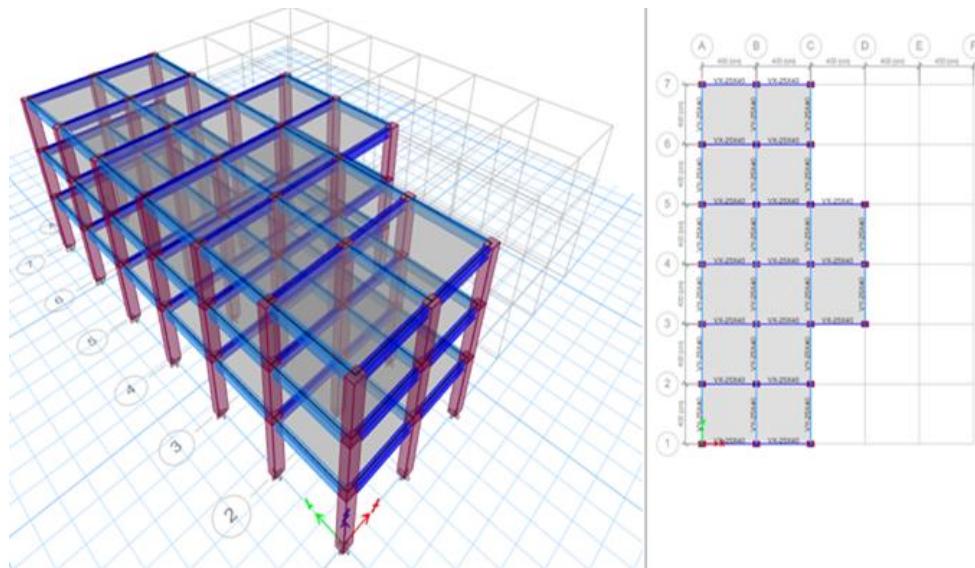


Figura 42. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 16,67 %

Para esta estructura estudiada se encontró que su periodo fundamental es el traslacional. Para este AME fueron considerados tres grados de libertad, en donde cada modo de vibración posee su periodo de vibración, los cuales son mostrados en la tabla resumen.

Tabla 15. Periodos de vibración para el tercer modelo T1

Mode	Periodo (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	0.39	0	0.8933	0	0.8933	3.50E-05	3.50E-05
2	0.349	0.8669	0	0.8669	0.8933	0	3.50E-05
3	0.326	0	0.0001	0.8669	0.8934	0.8717	0.8718
4	0.118	0	0.0903	0.8669	0.9837	7.06E-07	0.8718
5	0.1	0.1108	0	0.9777	0.9837	0	0.8718
6	0.095	0	7.24E-07	0.9777	0.9837	0.1068	0.9785
7	0.063	0	0.0163	0.9777	1	0	0.9785
8	0.05	0.0223	0	1	1	0	0.9785
9	0.048	0	2.55E-06	1	1	0.0215	1

Las respuestas del análisis dinámico modal son mostradas a continuación, donde se pueden apreciar los desplazamientos, derivas, cortante basal y momento de volteo de la estructura 1.

Tabla 16. Resultados del análisis modal espectral para el modelo T1

Respuestas máximas	Análisis dinámico modal
Cortante XX(t) – piso 1	69.847
Cortante YY (t) – piso 1	84.483
Momento de volteo XX (t-m) – piso 1	577.981
Momento de volteo YY (t-m) – piso 2	483.971
Desplazamiento XX (mm) – piso 3	54.418
Desplazamiento YY (mm) – piso 3	52.324
Deriva XX – piso 2	0.00697
Deriva YY – piso 2	0.00657

Los resultados del análisis tiempo-historia para los diferentes ángulos de incidencia de sismo son mostrados en los siguientes gráficos.

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en X son:

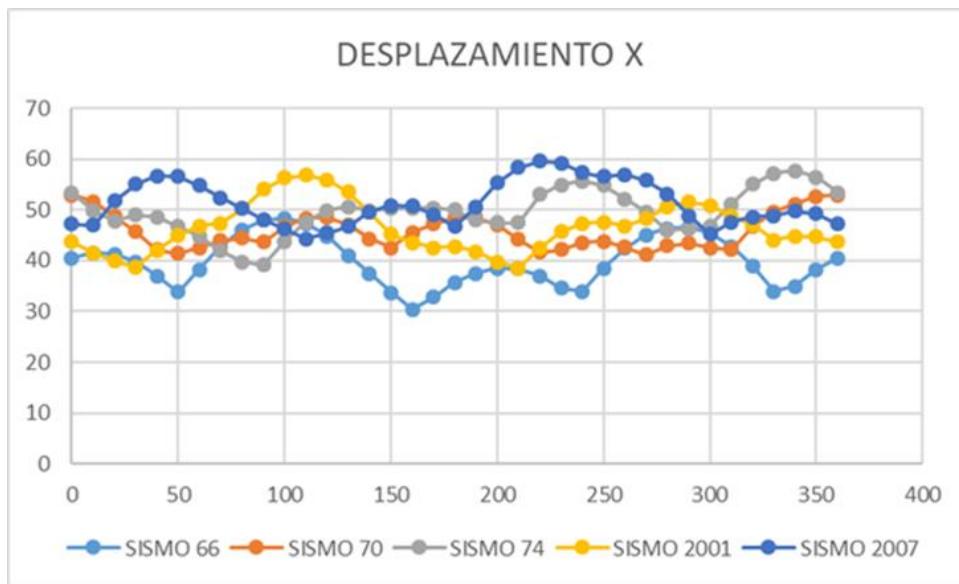


Figura 43. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T1

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en Y son:

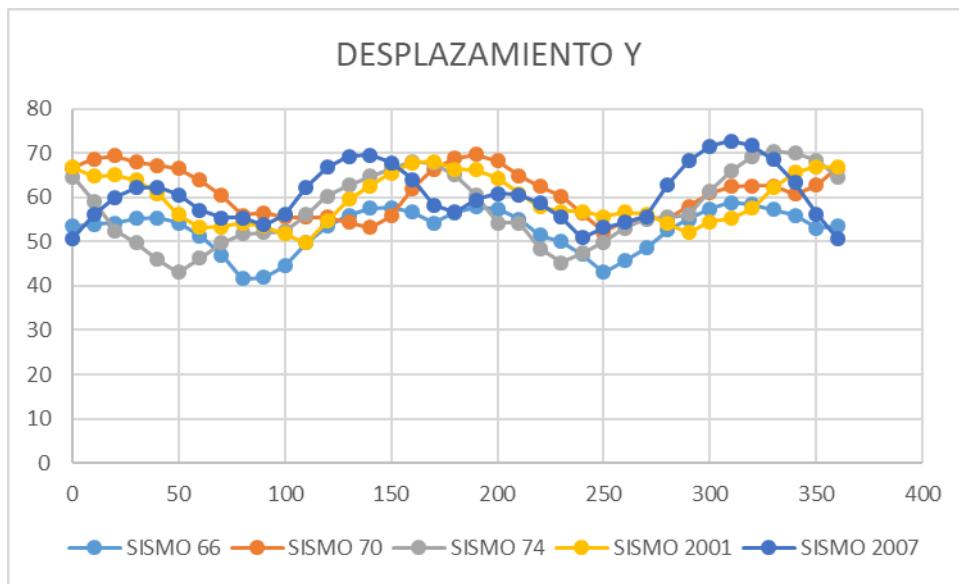


Figura 44. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T1

Asimismo, luego de trabajar con los cinco sismos antes mencionados (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) se obtuvo las distorsiones luego de un ATHL bidireccionales, las cuales son mostradas a continuación.

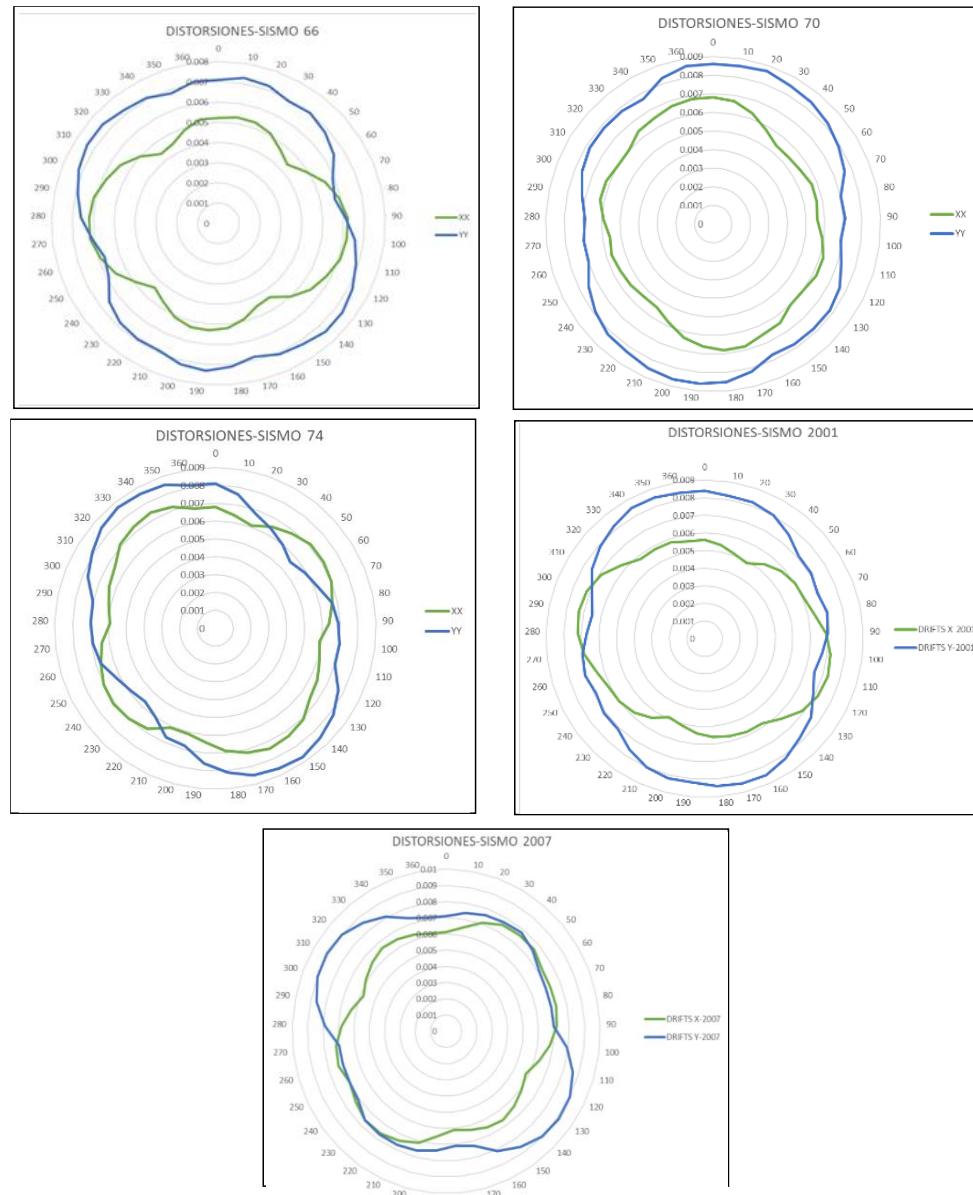


Figura 45. Distorsiones para el modelo T1

4.2.1.1. Resultados de los parámetros globales

Luego de aplicar un ATHL para el modelo T1 con planta en forma de «T» con saliente de 16,67 % y el empleo de los cinco registros sísmicos (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007). Los resultados para la cortante y el momento de vuelco en la base, tanto en eje X e Y, son:

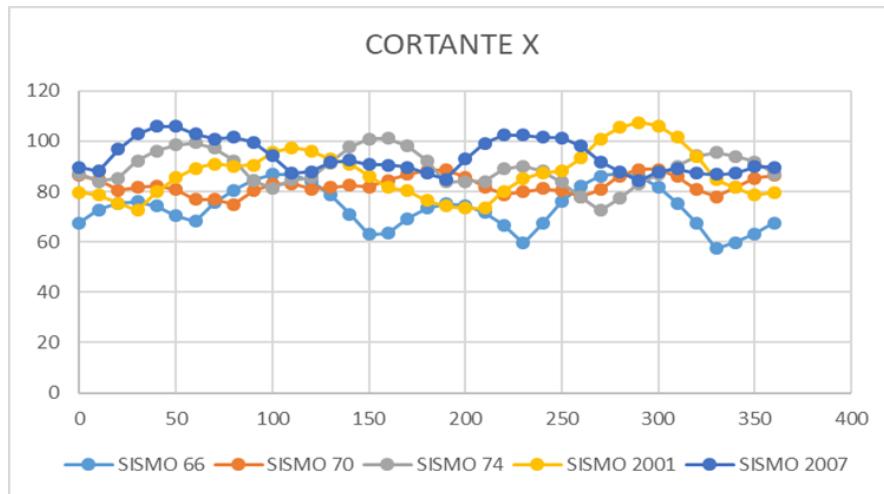


Figura 46. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo T1

Los resultados obtenidos para la cortante en Y en el modelo T1, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

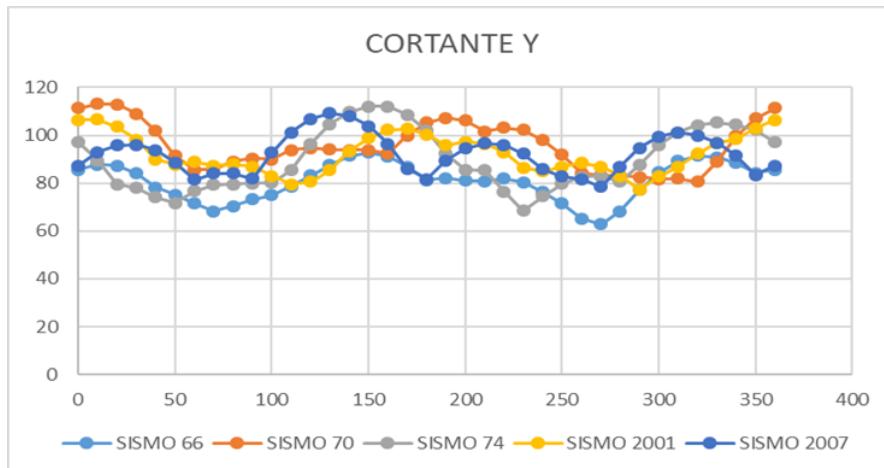


Figura 47. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T1

Los resultados obtenidos para el momento en X en el modelo T1, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

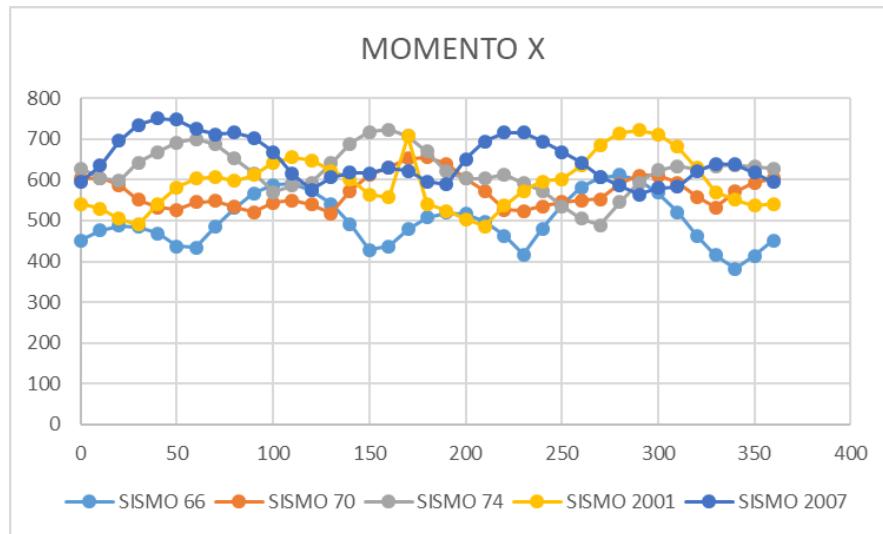


Figura 48. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T1

Los resultados obtenidos para el momento en Y en el modelo T1, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

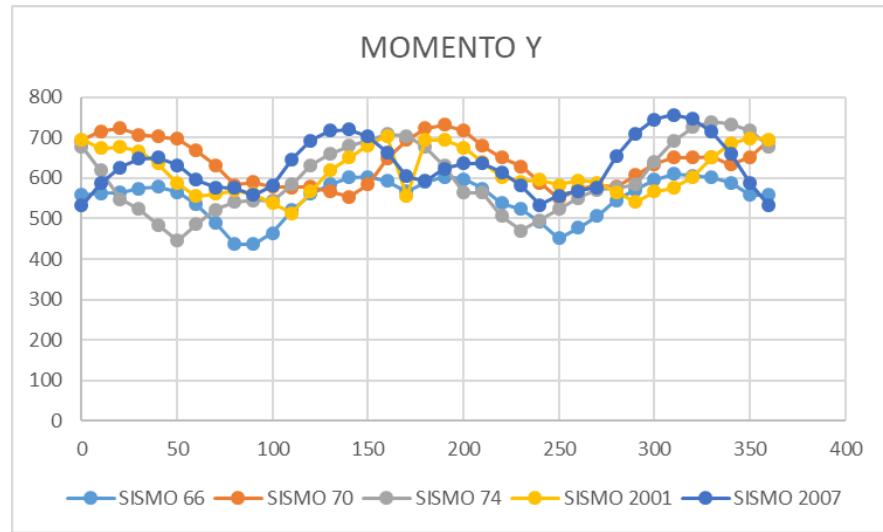


Figura 49. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T1

Observando los gráficos mostrados se puede apreciar que se obtienen resultados correspondientes a la respuesta crítica, para el sismo del 2007, donde se evidencia que dichos resultados son mayores al obtenido por el AME unidireccional. Este hecho demuestra que los resultados referidos a los parámetros globales son subestimados solamente al realizar un AME.

Luego de realizar el AME unidireccional para el modelo T1 (tabla 16) se compararon con los resultados luego de emplear las diversas reglas de

combinación direccional (porcentajes, SRSS, CQC3). En este trabajo se emplearon las reglas más conocidas y sus valores son mostrados.

Tabla 17. AME con reglas de combinación direccional para T1

Caso	Cortante basal en X (t f)	Cortante basal en Y (t f)	Momento de vuelco en X (t f - m)	Momento de vuelco en Y (t f - m)
AME	69.8	84.5	578.0	484.0
100-30	70.0	84.7	579.2	485.2
100-40	70.1	84.7	579.6	485.6
SRSS	69.9	84.5	578.0	484.0
CQC3	69.9	84.5	578.0	484.0

De la tabla, se puede apreciar que los resultados de mayor valor son obtenidos luego de emplear las reglas de los porcentajes que son, la del 100-40 % y la del 100-30 %, en donde la primera obtiene resultados ligeramente mayores que la segunda regla.

Mientras que mediante las reglas del SRSS y CQC3 se obtuvo respuestas muy parecidas entre ellas y similares al AME.

4.2.1.2. Comparación de resultados

Para realizar la comparación de resultados se usó como patrón de comparación el promedio, luego de realizar el ATHL mediante el empleo de cinco registros sísmicos (en conformidad con la E030). Este resultado funcionó como patrón de comparación, con los resultados obtenidos luego de aplicar las reglas de los porcentajes (100-30 % y 100-40 %), la regla SRSS y la regla CQC3.

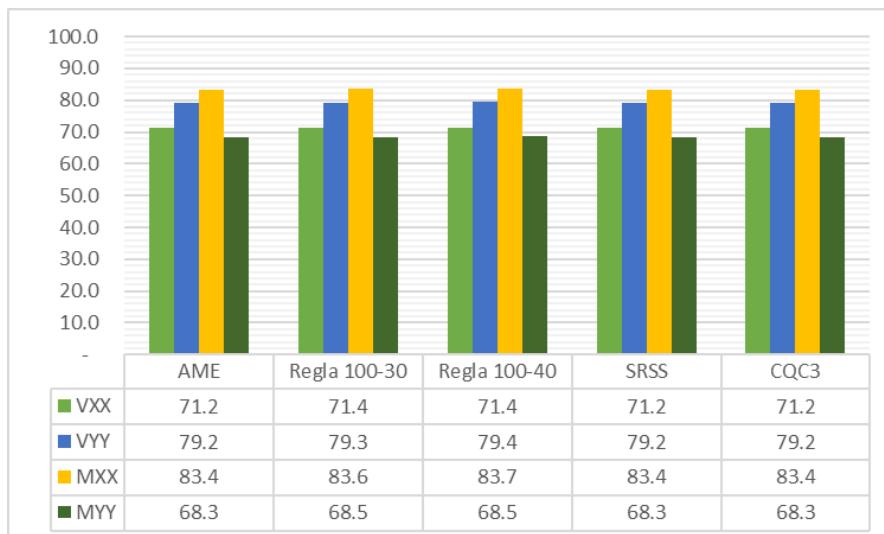


Figura 50. Relación entre el modal espectral y el tiempo historia para T1

Del gráfico mostrado se puede notar que las reglas SRSS y CQC3 muestran una misma variabilidad que el AME con respecto al patrón de comparación. Mientras que los resultados obtenidos mediante las reglas de los porcentajes (100-40 % y 100-30 %), valores que son muy similares entre sí, producen resultados mayores que las reglas anteriores, y son los que más se acercan al patrón con el cual se está realizando la comparación, por lo que estiman en mayor medida en comparación a las reglas anteriores; sin embargo, este resultado dista regularmente del patrón.

4.2.2. Segundo modelo – T2

Como segundo modelo con planta en forma de «T» se consideró una estructura de 3 plantas. Este modelo contó con un entrepiso de 3 metros de altitud. La estructura presenta una planta en forma de «T» con una saliente del 33,33 %. El módulo de elasticidad para el concreto es de $217370.65 \text{ kg/cm}^2$ ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$). En cuanto a las dimensiones de los elementos estructurales, la columna posee una dimensión de 55 x 50 cm, mientras la viga presenta una sección de 25 x 40 cm. La estructura presenta espaciamientos de 4 metros. La estructura solo presenta irregularidad por esquina entrante, ya que las otras irregularidades en planta y altura fueron controladas.

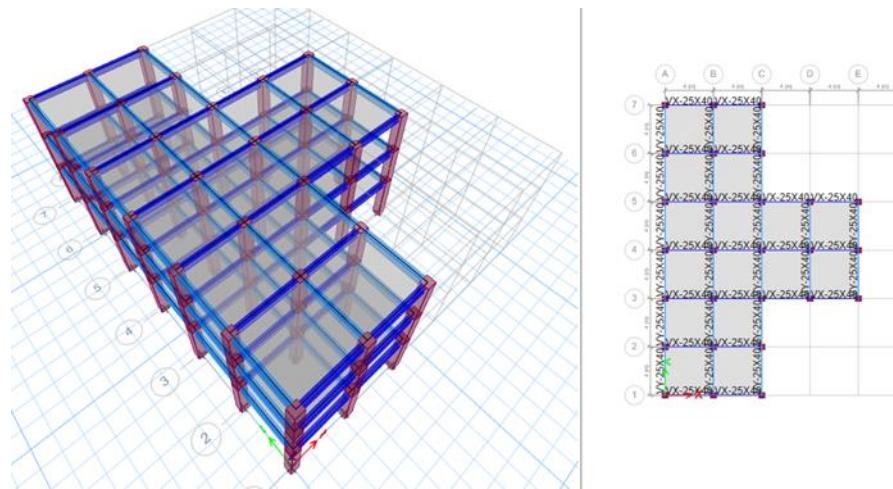


Figura 51. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 33,33 %

Para esta estructura estudiada se encontró que su periodo fundamental es el traslacional. Para este AME fueron considerados tres grados de libertad, en donde cada modo de vibración posee su periodo de vibración, los cuales son mostrados en la tabla resumen.

Tabla 18. Periodos de vibración para el segundo modelo T2

Mode	Periodo (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	0.343	0	0.8657	0	0.8657	0.0043	0.0043
2	0.336	0.8601	0	0.8601	0.8657	0	0.0043
3	0.312	0	0.0047	0.8601	0.8704	0.8582	0.8625
4	0.099	0	0.1078	0.8601	0.9782	0.0001	0.8626
5	0.095	0.116	0	0.9761	0.9782	0	0.8626
6	0.089	0	3.24E-05	0.9761	0.9783	0.1139	0.9765
7	0.049	0	0.0217	0.9761	1	4.57E-06	0.9765
8	0.046	0.0239	0	1	1	0	0.9765
9	0.044	0	2.46E-06	1	1	0.0235	1

Las respuestas del análisis dinámico modal son mostradas a continuación, donde se pueden apreciar los desplazamientos, derivas, cortante basal y momento de voldeo de la estructura 2.

Tabla 19. Resultados del análisis modal espectral para el modelo T2

Respuestas máximas	Ánalisis dinámico modal
Cortante XX(t) – piso 1	82.94
Cortante YY (t) – piso 1	97.27
Momento de volteo XX (t-m) – piso 1	672.04
Momento de volteo YY (t-m) – piso 2	575.57
Desplazamiento XX (mm) – piso 3	49.83
Desplazamiento YY (mm) – piso 3	46.69
Deriva XX – piso 2	0.00641
Deriva YY – piso 2	0.00599

Los resultados del análisis tiempo-historia para los diferentes ángulos de incidencia de sismo son mostrados en los siguientes gráficos.

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en X son:

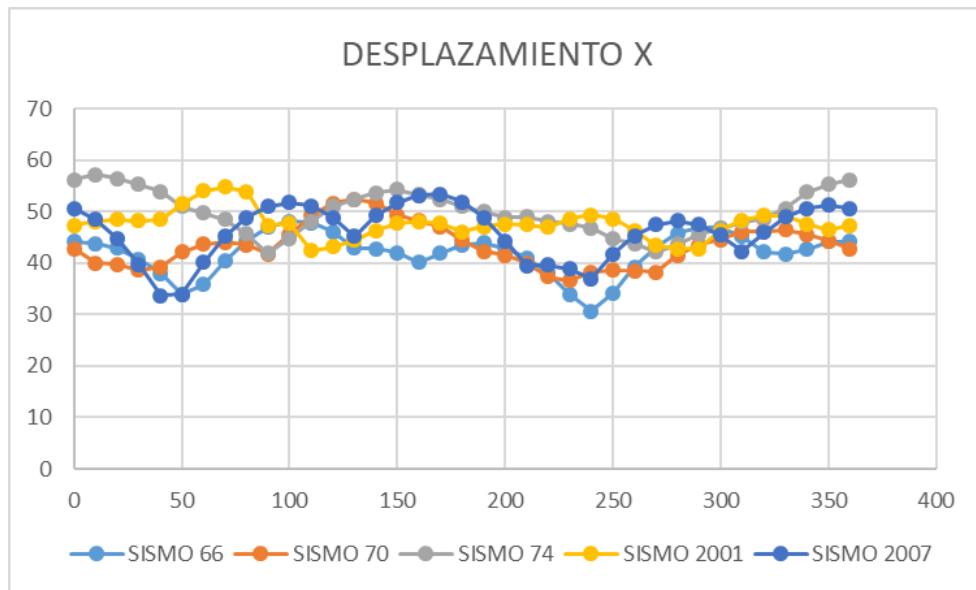


Figura 52. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T2

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en Y son:

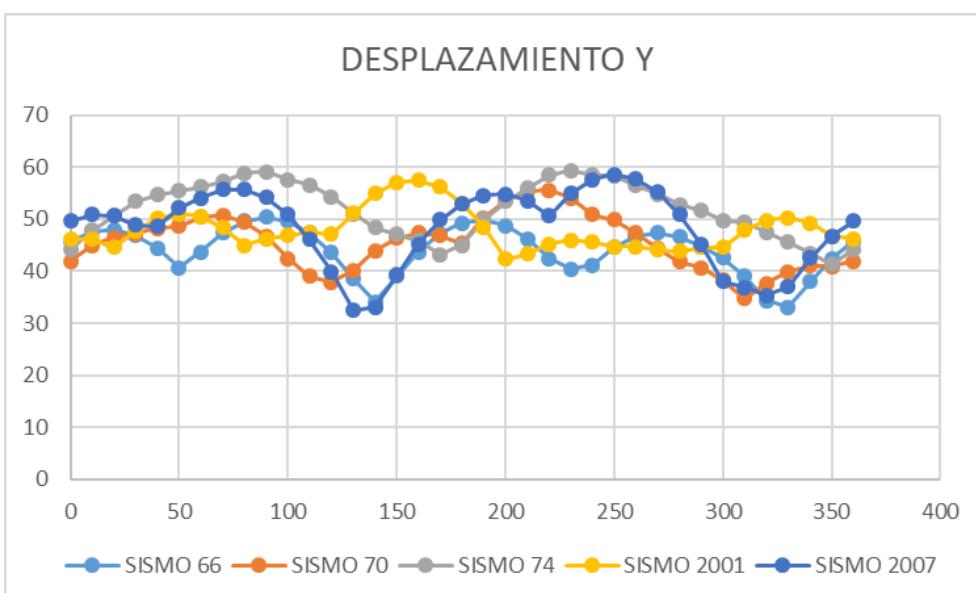


Figura 53. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T2

Asimismo, luego de trabajar con los cinco sismos antes mencionados (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) se obtuvo las distorsiones luego de un ATHL bidireccionales, las cuales son mostradas a continuación.

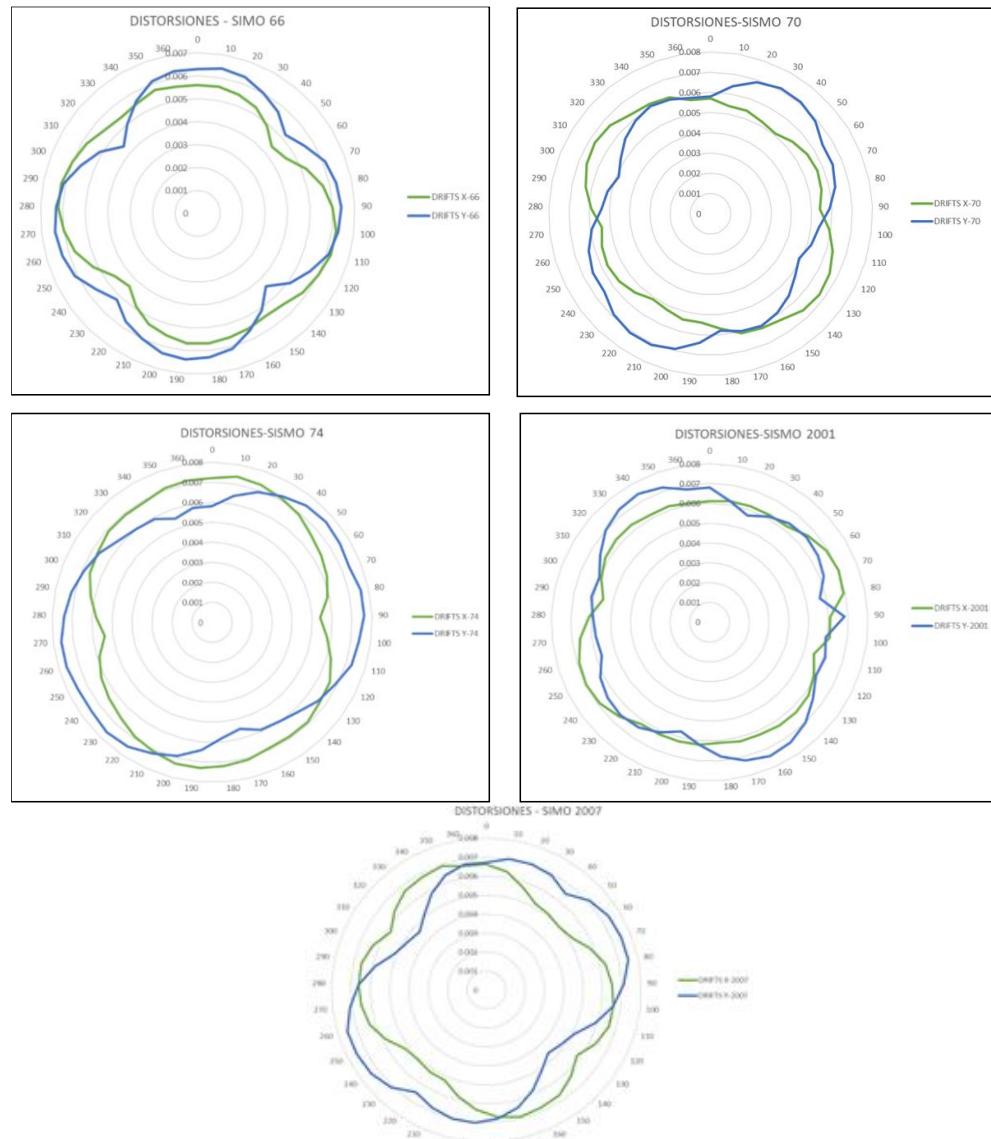


Figura 54. Distorsiones para el modelo T2

4.2.2.1. Resultados de los parámetros globales

Luego de aplicar un ATHL para el modelo T2 con planta en forma de «T» con saliente de 33,33 % y el empleo de los cinco registros sísmicos (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007). Los resultados para la cortante y el momento de vuelco en la base, tanto en eje X e Y, son:

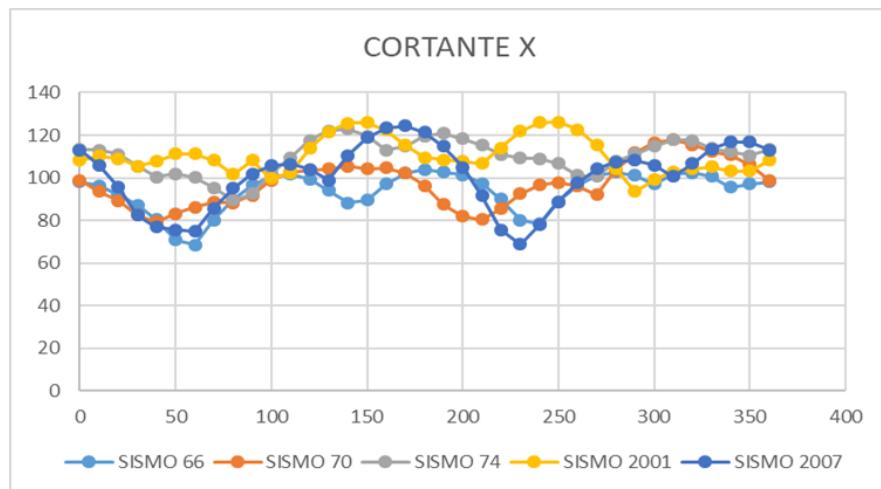


Figura 55. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo T2

Los resultados obtenidos para la cortante en Y en el modelo T2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

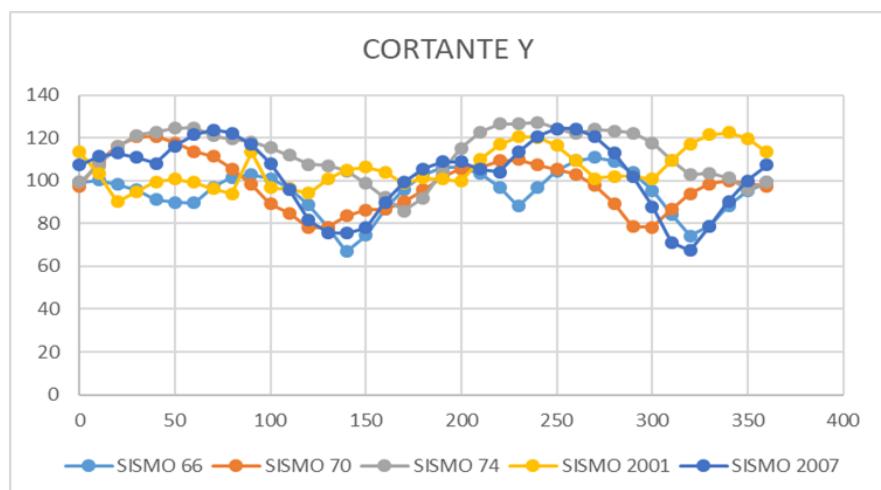


Figura 56. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T2

Los resultados obtenidos para el momento en X en el modelo T2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

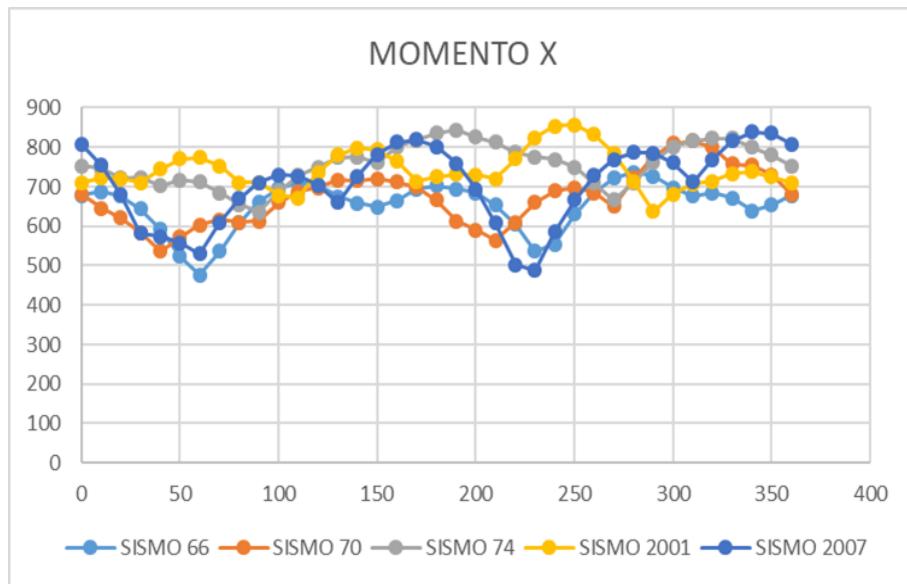


Figura 57. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T2

Los resultados obtenidos para el momento en Y en el modelo T2, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

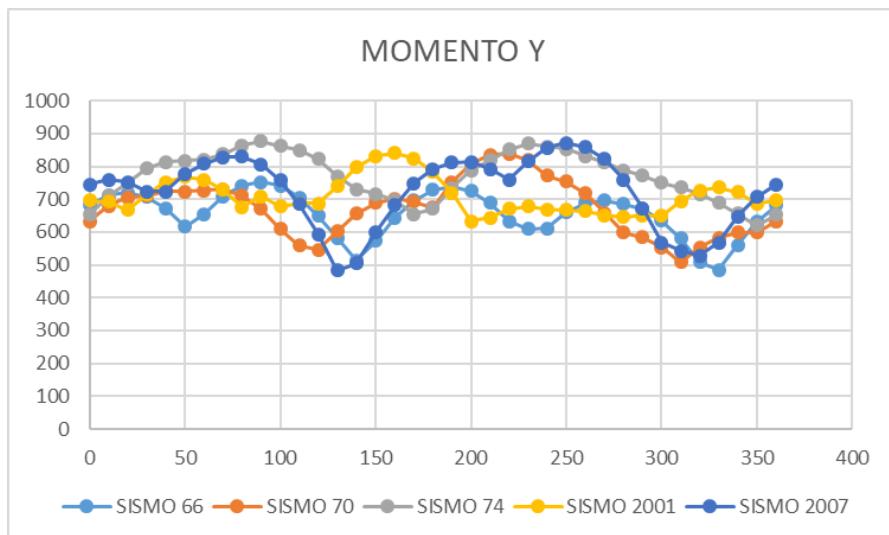


Figura 58. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T2

Observando los gráficos mostrados se puede apreciar que se obtienen resultados correspondientes a la respuesta crítica, para el sismo del 2007, donde se evidencia que dichos resultados son mayores al obtenido por el AME unidireccional. Este hecho demuestra que los resultados referidos a los parámetros globales son subestimados solamente al realizar un AME.

Luego de realizar el AME unidireccional para el modelo T2 (tabla 19) se compararon con los resultados luego de emplear las diversas reglas de combinación direccional (porcentajes, SRSS, CQC3). En este trabajo se emplearon las reglas más conocidas y sus valores son mostrados.

Tabla 20. AME con reglas de combinación direccional para T2

Caso	Cortante basal en X (t f)	Cortante basal en Y (t f)	Momento de vuelco en X (t f - m)	Momento de vuelco en Y (t f - m)
AME	82.940	97.270	672.040	575.570
100-30	84.369	98.699	681.970	585.565
100-40	84.846	99.177	685.290	588.904
SRSS	83.074	97.384	672.830	576.520
CQC3	83.074	97.384	672.829	576.520

De la tabla, se puede apreciar que los resultados de mayor valor son obtenidos luego de emplear las reglas de los porcentajes que son, la del 100-40 % y la del 100-30 %, en donde la primera obtiene resultados ligeramente mayores que la segunda regla.

Mientras que mediante las reglas del SRSS y CQC3 se obtuvo respuestas muy parecidas entre ellas y similares al AME.

4.2.2.2. Comparación de resultados

Para realizar la comparación de resultados se usó como patrón de comparación el promedio, luego de realizar el ATHL mediante el empleo de cinco registros sísmicos (en conformidad con la E030). Este resultado funcionó como patrón de comparación, con los resultados obtenidos luego de aplicar las reglas de los porcentajes (100-30 % y 100-40 %), la regla SRSS y la regla CQC3.

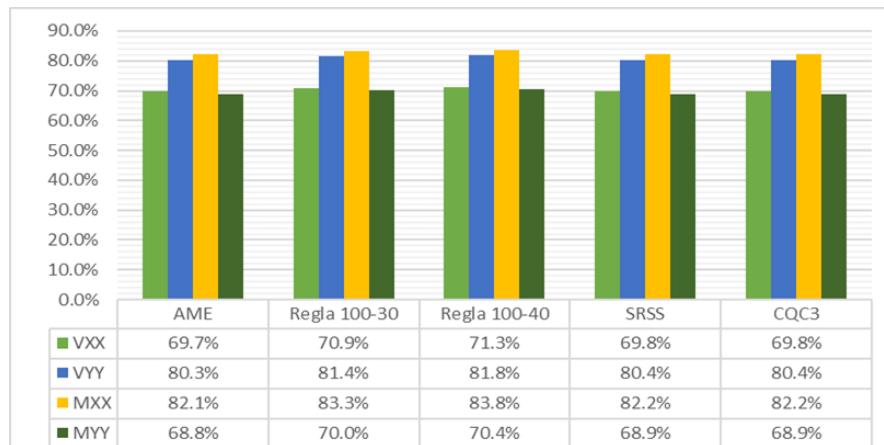


Figura 59. Relación entre el modal espectral y el tiempo-historia para T2

Del gráfico mostrado se puede notar que las reglas SRSS y CQC3 muestran una misma variabilidad que el AME con respecto al patrón de comparación. Mientras que los resultados obtenidos mediante las reglas de los porcentajes (100-40 % y 100-30 %), valores que son muy similares entre sí, producen resultados mayores que las reglas anteriores, y son los que más se acercan al patrón con el cual se está realizando la comparación, por lo que estiman en mayor medida en comparación a las reglas anteriores; sin embargo, este resultado dista regularmente del patrón.

4.2.3. Tercer modelo – T3

Como tercer modelo con planta en forma de «T» se consideró una estructura de 3 plantas. Este modelo contó con un entrepiso de 3 metros de altitud. La estructura presenta una planta en forma de «T» con una saliente del 50 %. El módulo de elasticidad para el concreto es de $217370.65 \text{ kg/cm}^2$ ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$). En cuanto a las dimensiones de los elementos estructurales, la columna posee una dimensión de 55 x 50 cm, mientras la viga presenta una sección de 25 x 40 cm. La estructura presenta espaciamientos de 4 metros. La estructura solo presenta irregularidad por esquina entrante, ya que las otras irregularidades en planta y altura fueron controladas.

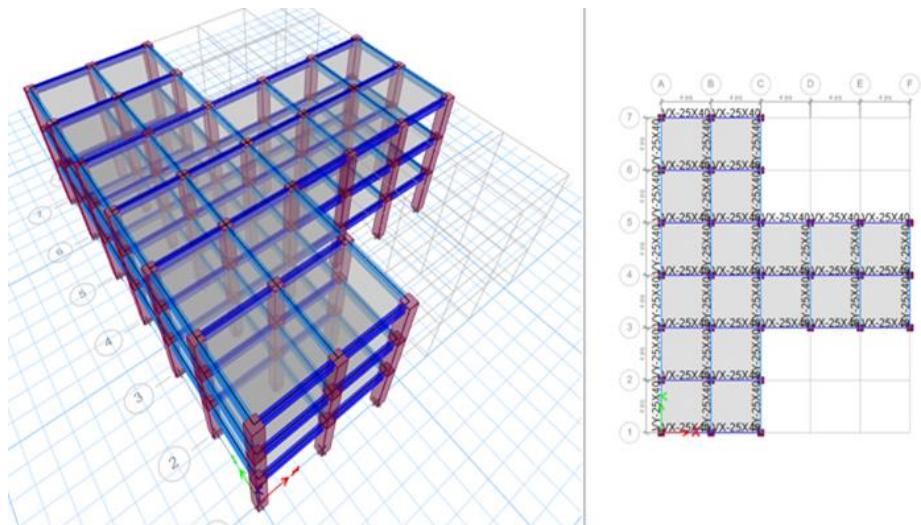


Figura 60. Modelo estructural con planta en forma de «T» con saliente de 50 %

Para esta estructura estudiada, se encontró que su periodo fundamental es el traslacional. Para este AME fueron considerados tres grados de libertad, en donde cada modo de vibración posee su periodo de vibración, los cuales son mostrados en la tabla resumen.

Tabla 21. Periodos de vibración para el tercer modelo T3

Mode	Periodo (s)	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	0.331	0.8579	0	0.8579	0	0	0
2	0.327	0	0.8305	0.8579	0.8305	0.0281	0.0281
3	0.305	0	0.0294	0.8579	0.8599	0.8291	0.8572
4	0.093	0.1177	0	0.9756	0.8599	0	0.8572
5	0.092	0	0.1155	0.9756	0.9754	0.0009	0.8581
6	0.086	0	0.0006	0.9756	0.976	0.1172	0.9754
7	0.045	0.0244	0	1	0.976	0	0.9754
8	0.045	0	0.0239	1	0.9999	1.75E-05	0.9754
9	0.042	0	0.0001	1	1	0.0246	1

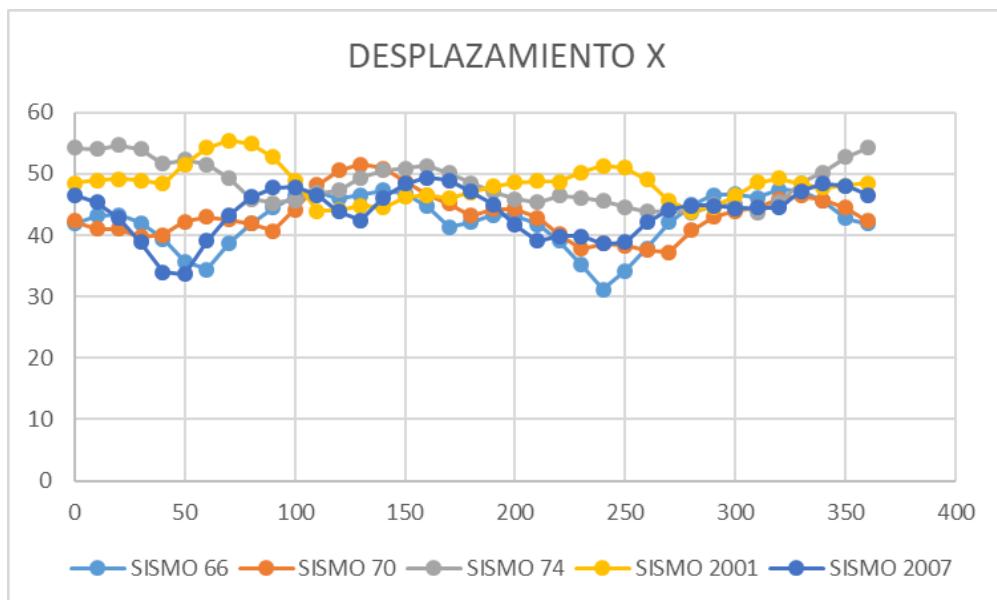
Las respuestas del análisis dinámico modal son mostradas a continuación, donde se pueden apreciar los desplazamientos, derivas, cortante basal y momento de volteo de la estructura 3.

Tabla 22. Resultados del análisis modal espectral para el modelo T3

Respuestas máximas	Análisis dinámico modal
Cortante XX(t) – piso 1	95.498
Cortante YY (t) – piso 1	109.176
Momento de volteo XX (t-m) – piso 1	757.32
Momento de volteo YY (t-m) – piso 2	662.923
Desplazamiento XX (mm) – piso 3	46.44
Desplazamiento YY (mm) – piso 3	46.87
Deriva XX – piso 2	0.00598
Deriva YY – piso 2	0.00604

Los resultados del análisis tiempo-historia para los diferentes ángulos de incidencia de sismo son mostrados en los siguientes gráficos.

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en X son:

**Figura 61. Desplazamiento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T3**

Luego de realizar un ATHL bidireccional y tomando los registros sísmicos de los años 1966, 1970, 1974, 2001 y 2007, los resultados obtenidos para el desplazamiento en Y son:

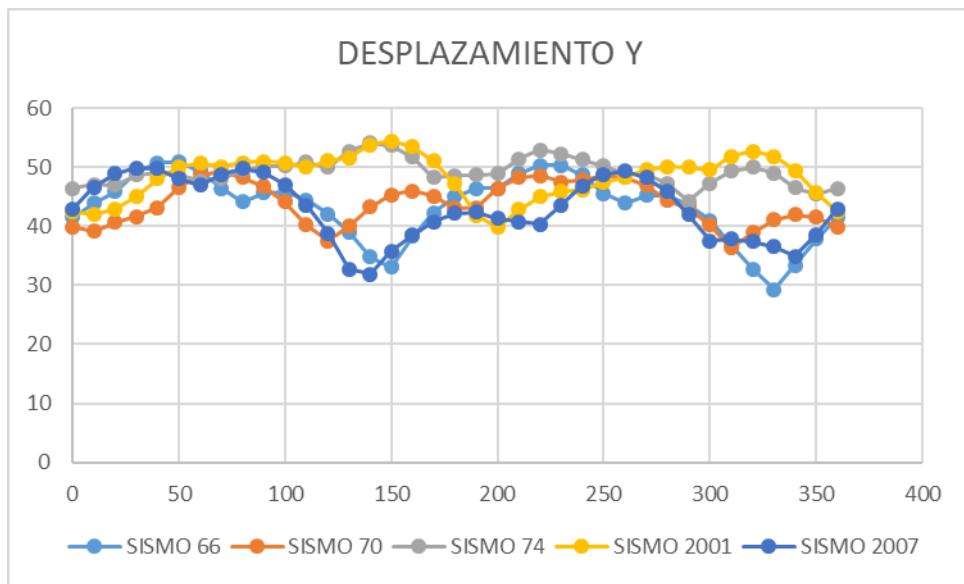


Figura 62. Desplazamiento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T3

Asimismo, luego de trabajar con los cinco sismos antes mencionados se obtuvo las distorsiones luego de un ATHL bidireccionales, las cuales son mostradas a continuación.

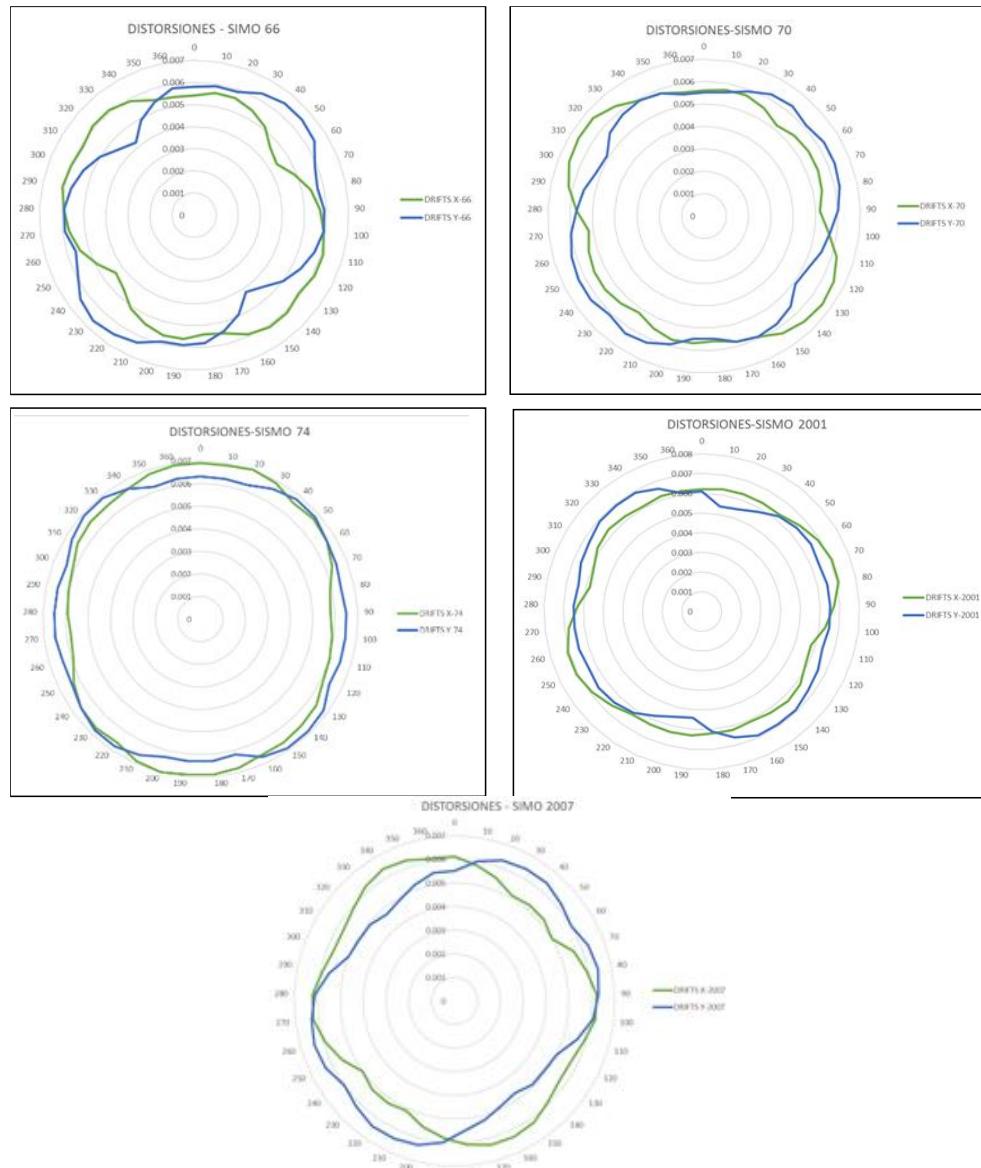


Figura 63. Distorsiones para el modelo T3

4.2.3.1. Resultados de los parámetros globales

Luego de aplicar un ATHL para el modelo T3 con planta en forma de «T» con saliente de 50 % y el empleo de los cinco registros sísmicos (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007). Los resultados para la cortante y el momento de vuelco en la base, tanto en eje X e Y, son:

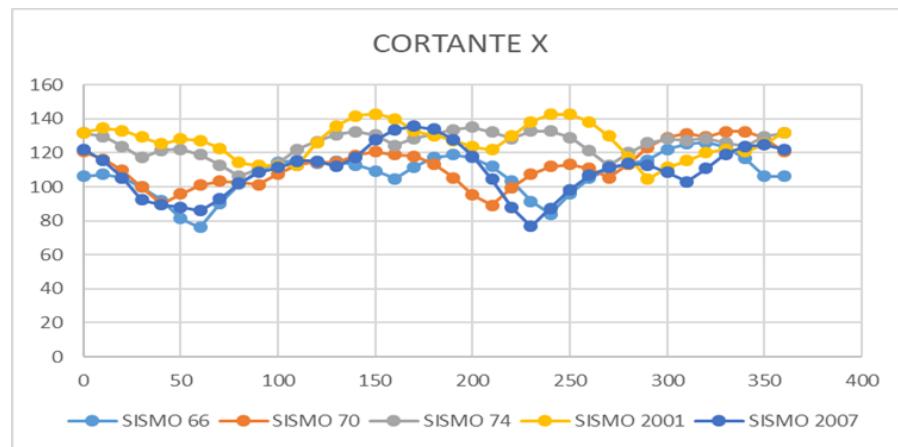


Figura 64. Cortante en X con cada intervalo de 10° para el modelo T3

Los resultados obtenidos para la cortante en Y en el modelo T3, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

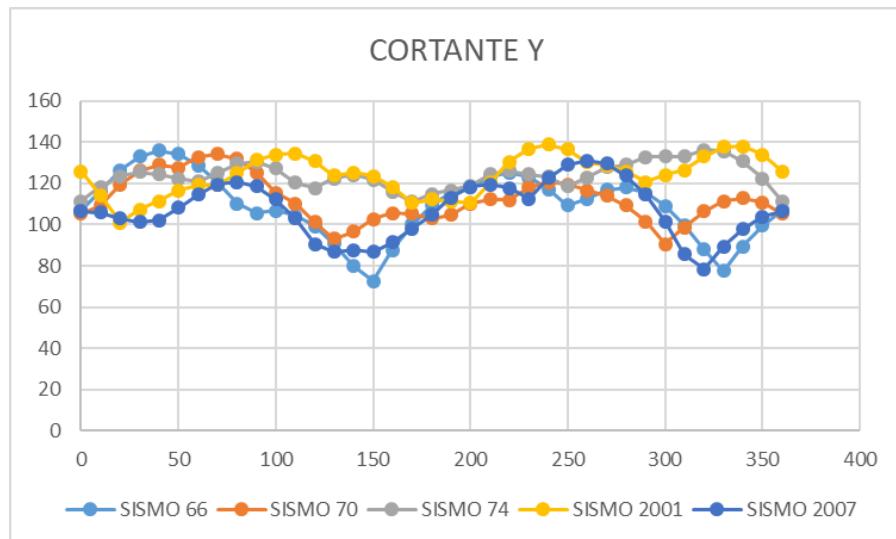


Figura 65. Cortante en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T3

Los resultados obtenidos para el momento en X en el modelo T3, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

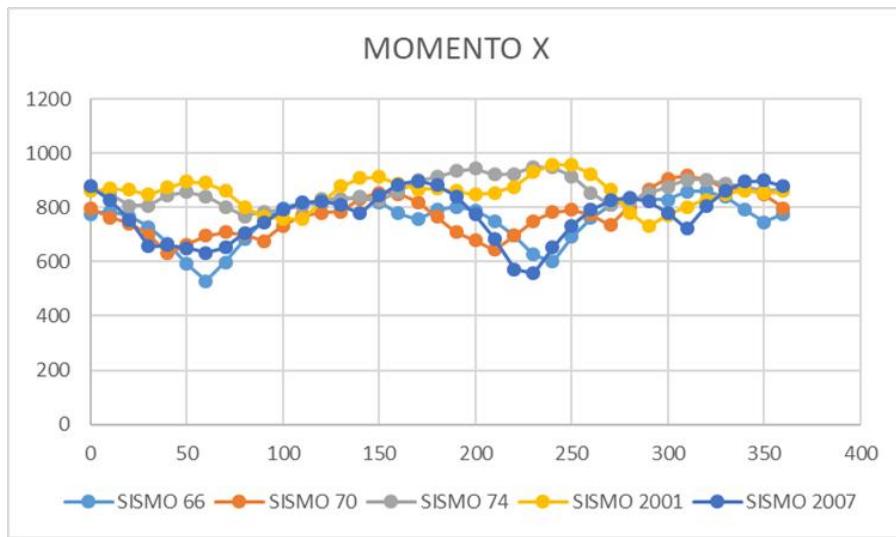


Figura 66. Momento en X con cada intervalo de 10° para el modelo T3

Los resultados obtenidos para el momento en Y en el modelo T3, luego de usar los cinco registros (1966, 1970, 1974, 2001 y 2007) son:

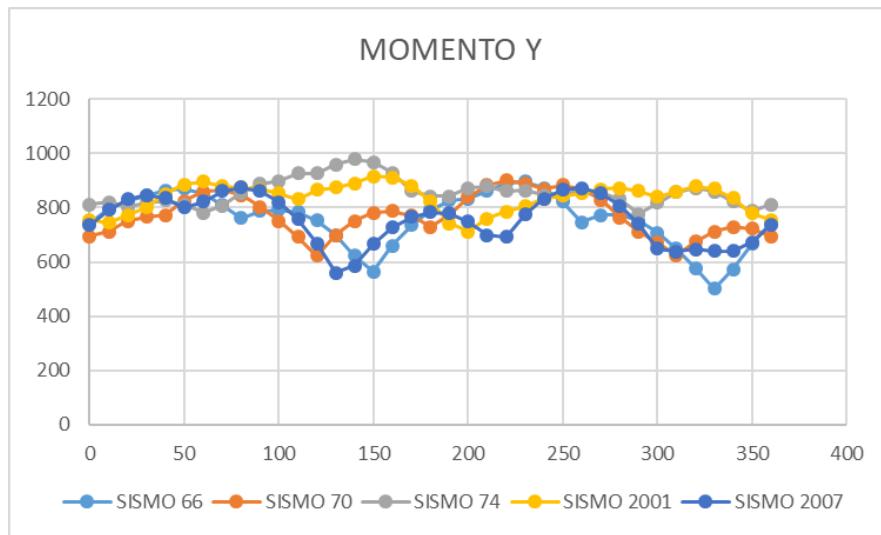


Figura 67. Momento en Y con cada intervalo de 10° para el modelo T3

Observando los gráficos mostrados se puede apreciar que se obtienen resultados correspondientes a la respuesta crítica, para el sismo del 2007, donde se evidencia que dichos resultados son mayores al obtenido por el AME unidireccional. Este hecho demuestra que los resultados referidos a los parámetros globales son subestimados solamente al realizar un AME.

Luego de realizar el AME unidireccional para el modelo T3 (tabla 23) se compararon con los resultados luego de emplear las diversas reglas de combinación direccional (porcentajes, SRSS, CQC3). En este trabajo se emplearon las reglas más conocidas y sus valores son mostrados a continuación.

Tabla 23. AME con reglas de combinación direccional para T3

Caso	Cortante basal en X (t f)	Cortante basal en Y (t f)	Momento de vuelco en X (t f - m)	Momento de vuelco en Y (t f - m)
AME	95.498	109.176	757.320	662.923
100-30	98.340	112.020	777.200	682.810
100-40	99.289	112.968	783.840	689.440
SRSS	95.960	109.584	760.190	666.210
CQC3	95.964	109.584	760.190	666.210

De la tabla, se puede apreciar que los resultados de mayor valor son obtenidos luego de emplear las reglas de los porcentajes que son, la del 100-40 % y la del 100-30 %, en donde la primera obtiene resultados ligeramente mayores que la segunda regla.

Mientras que mediante las reglas del SRSS y CQC3 se obtuvo respuestas muy parecidas entre ellas y similares al AME.

4.2.3.2. Comparación de resultados

Para realizar la comparación de resultados se usó como patrón de comparación el promedio, luego de realizar el ATHL mediante el empleo de cinco registros sísmicos (en conformidad con la E030). Este resultado funcionó como patrón de comparación, con los resultados obtenidos luego de aplicar las reglas de los porcentajes (100-30 % y 100-40 %), la regla SRSS y la regla CQC3.

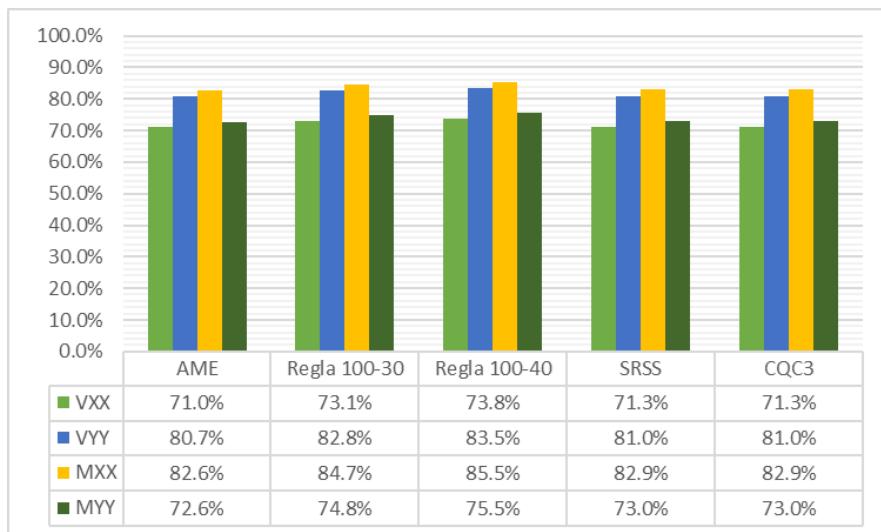


Figura 68. Relación entre el modal espectral y el tiempo historia para T3

Del gráfico mostrado se puede notar que las reglas SRSS y CQC3 muestran una misma variabilidad que el AME con respecto al patrón de comparación. Mientras que los resultados obtenidos mediante las reglas de los porcentajes (100-40 % y 100-30 %), valores que son muy similares entre sí, producen resultados mayores que las reglas anteriores, y son los que más se acercan al patrón con el cual se está realizando la comparación, por lo que estiman en mayor medida en comparación a las reglas anteriores; sin embargo, este resultado dista regularmente del patrón.

4.2.4. Estudio del ángulo crítico

Como síntesis, luego de haber realizado varios ATHL bidireccionales, se muestran las tablas resumen de los ángulos críticos para las tres estructuras estudiadas que son T1, T2 y T3.

Se puede notar que los valores de los ángulos críticos son muy dispersos, además, que para un determinado registro sísmico, el ángulo varía y es diferente.

Eso se puede notar al observar el valor de los ángulos para los registros de 1966, 1970 y 1974.

Tabla 24. Estructura T1 y sus ángulos críticos

Respuestas globales	Ángulos críticos				
	1966	1970	1974	2001	2007
UX	100	0	340	110	220
UY	310	190	330	170	310
VX	280	290	160	290	40
VY	150	10	150	10	130
MX	280	180	160	290	40
MY	310	190	330	160	310

Tabla 25. Estructura T2 y sus ángulos críticos

Respuestas globales	Ángulos críticos				
	1966	1970	1974	2001	2007
UX	100	130	10	70	170
UY	90	220	230	160	250
VX	180	310	140	250	170
VY	270	40	240	340	250
MX	280	310	190	250	340
MY	90	220	90	160	250

Tabla 26. Estructura T3 y sus ángulos críticos

Respuestas globales	Ángulos críticos				
	1966	1970	1974	2001	2007
UX	320	130	20	70	160
UY	50	70	140	150	30
VX	320	330	200	150	170
VY	40	70	320	240	260
MX	320	310	230	240	350
MY	230	220	140	150	80

De las tablas anteriormente mostradas se puede notar que no existe un patrón de repetición en el valor de los ángulos críticos, a diferencia de los ángulos críticos para estructuras con planta en forma de «L», en donde sí se pudo observar un patrón de similitud entre las estructuras 1 y 2; pero para estructuras con planta en «T» este fenómeno no se evidencia. Lo que se observa son valores de ángulos críticos muy dispersos entre sí, sin encontrar un patrón de relación, a diferencia de las estructuras con planta en forma de «T».

4.2.5. Cálculo del factor de amplificación debido a la bidireccionalidad

A continuación, se muestra una ecuación cuya finalidad es proporcionar el factor de amplificación para estructuras aporticadas con plantas en forma de «T». Para tal efecto se trabajaron con las respuestas globales de las tres estructuras (estructuras 1, 2 y 3).

$$R_f = KR_0$$

Donde, el objetivo es determinar el valor del factor de amplificación «k», y que para el caso de estructuras con plantas en forma de «T», se tuvo que analizar los factores para cada modelo, es decir para T1, luego T2 y finalmente T3.

Tomando como base todo el cálculo realizado, se tiene que para la estructura 1, el valor del factor de amplificación es 1,5. Es decir para el modelo 1, $k = 1,5$.

Asimismo, luego de todos los cálculos realizados, se consiguió que para la estructura 2, el valor de la amplificación es de 1,5. Vale decir que para el modelo 2, $k = 1,5$.

De igual manera, luego de realizar los cálculos para la estructura 3, se encontró que el factor de amplificación « k », es igual a 1,5.

En resumen:

Para la estructura T1 se tiene $k = 1,5$

Para la estructura T2 se tiene $k = 1,5$

Para la estructura T3 se tiene $k = 1,5$

Por lo tanto, se concluye que para estructuras con plantas en forma de «L», su factor de amplificación bidireccional es 1,5.

4.3. Comparación de resultados luego del estudio de ambas formas de planta

Luego de estudiar las plantas en forma de L y T, se procedió a comparar dichos resultados, que a continuación son mostrados.

Luego de realizar la evaluación de las reglas de combinación, tanto para las edificaciones con plantas en forma de «L» y «T», se encontró que ambas formas de planta comparten un hecho en común, el cual consiste en que ambas logran una mejor estimación de sus respuestas por parte de la regla del 100-40 %. En segundo lugar, se encuentra la regla del 100-30 %, por lo que se afirma que las reglas de los porcentajes ofrecen una mejor estimación para estructuras con plantas en forma de «L» y «T» (esquina entrante). En síntesis, las estructuras con presencia de la irregularidad antes mencionada, sus respuestas son mejor estimadas por las reglas de los porcentajes. Cabe aclarar que estas estimaciones marcan una distancia regular respecto al patrón de comparación (ATHL).

Asimismo, luego de realizar todos los análisis tanto para las estructuras con plantas en forma de L y de T, se determinó el factor de amplificación debido a la bidireccionalidad, que es mostrado en la tabla. Cabe resaltar el hecho de que, para cada forma de planta en particular, se encontró un determinado valor de « k ».

Tabla 27. Factor de amplificación para las plantas con esquina entrante

Forma de planta con irregularidad de esquina entrante	Planta en forma de «L»	Planta en forma de «T»
Factor de amplificación	1,4	1,5

Del cuadro mostrado anteriormente, se puede notar que las estructuras con esquina entrante con plantas en forma de «T2», presentan un mayor factor de amplificación en comparación a estructuras de esquina entrante con plantas en forma de «L».

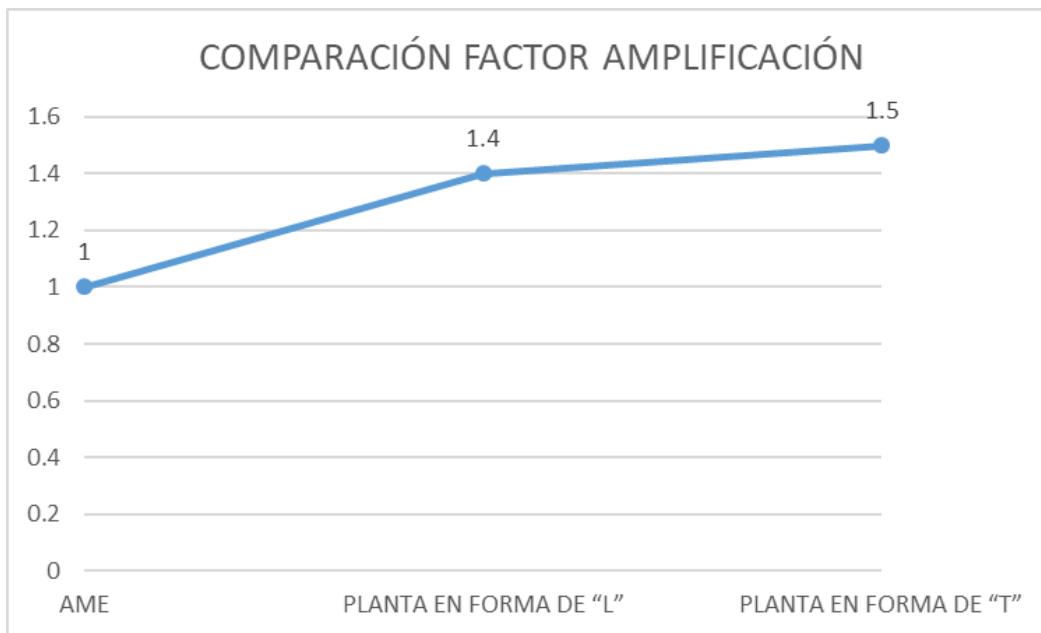


Figura 69. Comparación de factores de amplificación para plantas en «L» y en «T» con respecto al AME

4.4. Discusión de resultados

Luego de realizar los diversos cálculos matemático-computacionales, se obtuvo resultados concordantes con los obtenidos por Moscoso (3) quien señala que la respuesta crítica de una estructura se encuentra en función del ángulo con el que incide el sismo. Resultado que es corroborado y respaldado con la presente investigación, ya que se pudo determinar que las respuestas máximas en las estructuras ocurren para determinados ángulos de incidencia de sismo. Asimismo, se concuerda con la afirmación hecha por Moscoso (3) donde señala que la norma nacional E030 no muestra los lineamientos sobre la simultaneidad de las componentes de sismo, así como el ángulo bajo el que atacan las fuerzas del sismo.

Asimismo, luego de ejecutar múltiples ATHL bidireccionales para un rango de ángulos que van desde los 0° hasta los 360° , se obtuvo resultados coincidentes con los de Sobrado et al. (2), quienes señalan que el análisis sísmico unidireccional subestima el valor de las respuestas en una estructura, siendo estos no reales y que para obtener respuestas reales es necesario someter a la estructura a solicitudes simultáneas de sismo en sus dos direcciones de manera sincrónica. Este hecho es concordante con las respuestas obtenidas en esta investigación luego de los múltiples ATHL bidireccional, ya que mediante el análisis unidireccional se obtuvo menores valores para las diversas formas de planta. Sin embargo,

existe una discrepancia con el resultado de Sobrado et al. (2) quienes mencionan que el factor de amplificación bidireccional para estructuras con esquina entrante es de 1,5; resultado que no es del todo cierto, ya que mediante la presente investigación se demuestra que una estructura con irregularidad de esquina entrante no presenta un factor único definido de factor de amplificación bidireccional, ya que este factor depende del tipo de planta de la estructura, siendo las más conocidas las plantas en forma de «T» ($k = 1,5$) y «L» ($k = 1,4$).

También, los resultados obtenidos luego de todas las corridas computacionales son compatibles con los resultados obtenidos por Bermudo (8), quien concluye que para encontrar la respuesta estructural no es suficiente un análisis unidireccional, ya que este subestima valores, y que los *drifts* obtenidos luego de la simultaneidad de componentes tanto para el AME como para el ATHL son mayores al permitido por la norma peruana, vale decir que exceden al 0,07. Este fenómeno es similar al encontrado en esta investigación, ya que luego de los múltiples análisis realizados se encontraron en muchas ocasiones valores de *drifts* mayores al 7×1000 . Asimismo, el investigador sostiene que las respuestas globales son mayores en un rango del 10 al 40 % ante un análisis considerando la simultaneidad de componentes de sismo, frente al tradicional análisis unidireccional. Hecho que es concordante con los cálculos y respuestas encontradas en esta investigación.

De igual manera, los resultados encontrados por Bravo (9) guardan compatibilidad con los encontrados en esta investigación, dado que Bravo (9) señala que los resultados, luego del ATH para diferentes ángulos de incidencia, no muestran un patrón identificable, y que las respuestas obtenidas luego del AME sin regla de combinación obtienen valores que están comprendidos dentro del rango del 65 % al 87 % con respecto al patrón de comparación (ATH). Todos estos resultados mencionados por Bravo (9), son compatibles con lo encontrado en el presente estudio, ya que al realizar múltiples ATHL bidireccionales para las tres estructuras con plantas en forma de «L», se encontró la no existencia de un patrón identificable, y lo mismo sucedió para el caso de las estructuras con plantas en forma de «T», donde tampoco se pudo definir un patrón identificable de secuencialidad. Además, Bravo (9) señala un aspecto concordante con el presente estudio en lo referido a las reglas de combinación, en donde señala que no existe una determinada regla de combinación que estime de mejor manera. Hecho corroborado en el desarrollo de este estudio en donde se encontró que hay una distancia regular con respecto al patrón de comparación, por lo que urge la necesidad de proponer una regla a futuro.

CONCLUSIONES

1. Las respuestas estructurales obtenidas del análisis tiempo-historia para cada ángulo de incidencia sísmica, no muestran un patrón de regularidad y son diferentes para cada registro sísmico determinado, tanto para estructuras con planta en «L» y en «T», donde las respuestas críticas son mucho mayores a las obtenidas por el AME unidireccional.
2. La respuesta calculada con el AME sin regla de combinación direccional alguna, subestima la respuesta crítica calculada con el análisis tiempo-historia lineal, ya que se obtienen variaciones comprendidas desde el 70,8 % hasta el 75,9 % para estructuras con planta en forma de «L» y un rango de 68,3 % a 83,4 % para estructuras con planta en forma de «T».
3. No existe una regla de combinación direccional, de las usualmente conocidas, que estime mejor la respuesta en comparación al patrón del ATH, aunque las reglas de combinación direccional de porcentajes del 100-30 % y 100-40 % obtienen ligeramente resultados mayores en comparación al SRSS y CQC3, ya que estiman en un mayor porcentaje las respuestas para el caso de estructuras aporticadas de concreto armado con presencia de irregularidad por esquina entrante, siendo la regla del 100-40 % la que mejor estima para estructuras con planta en forma de «L» en un rango de 71,3 % a 82,4 % y en un rango de 70,4 % a 85,5 % para estructuras con plantas en forma de «T».
4. Existe un «k» que corresponde al valor del factor de amplificación bidireccional de sismo, cuyo valor es 1,4 para el caso de estructuras de sistema aporticado de concreto armado con plantas en forma de «L», y un $k = 1,5$ para estructuras con planta en forma de «T», donde el factor para plantas en forma de T es mayor que para plantas en forma de «L», por lo que una edificación con irregularidad de esquina entrante no presenta un factor único de amplificación bidireccional.

RECOMENDACIONES

Luego de realizar múltiples cálculos matemático-computacionales, se encontraron los factores de amplificación para estructuras con irregularidad de esquina entrante. Debido a lo manifestado anteriormente se formulan las siguientes recomendaciones que serán de mucha utilidad a la ingeniería sísmica peruana.

1. Realizar más estudios que conlleven a la obtención de una ecuación única que permita obtener el factor de amplificación bidireccional, tanto para plantas en forma de «T» y «L» en base a un determinado parámetro común para ambas formas de planta.
2. Realizar más estudios considerando variaciones en la altura y para un sistema estructural mixto.
3. Realizar un ATH considerando registros sintéticos.
4. Realizar más investigaciones considerando el ATNL, y el estudio de propiedades no lineales.

LISTA DE REFERENCIAS

1. VALENZUELA, F.; REYES, A.; DE LEÓN, D.; BOJÓRQUEZ, E. *Rules for combining the effects of the three earthquake components and critical response*. *Journal of seismic engineering*. [en línea]. 2015. N.º 92.
2. SOBRADO, V. H.; YARANGA, R.; ORIHUELA, J. D. *Análisis de la bidireccionalidad sísmica en la respuesta de estructuras de concreto armado con irregularidad de esquina entrante y de piso blando en la ciudad de Lima*. (Tesis). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. 2020. [Consultado: 12/12/2022] Recuperado de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/h>.
3. MOSCOSO, E. *Efecto de la bidireccionalidad y ángulo de incidencia del sismo en la respuesta de estructuras de concreto armado*. (Tesis). Universidad Nacional de Ingeniería. 2018. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/16380>.
4. KANYA, M. *Influence of earthquake incidence angle on seismic response of irregular RC buildings*. *I-manager's Journal on Structural Engineering*. [En línea]. 2016. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de <https://doi.org/10.26634/jste.4.4.4851>.
5. PINZÓN, L. A.; PUJADES, L. G.; DÍAZ, S. A.; ALVA, R. E. *Do directionality effects influence expected damage? A case study of the 2017 central México earthquake*. *Bulletin of the Seismological Society of América*. [En línea]. 2018. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de <https://doi.org/10.1785/0120180049>.
6. DÍAZ, S.; PUJADES, L.; PINZÓN, L.; VARGAS, Y. *An alternative approach to consider the effect of seismic directionality*. *Revista Ingeniería de Construcción*. [En línea]. 2018. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de www.ricuc.cl.
7. VARGAS-ALZATE Y. F.; PUJADES L. G.; BARBAT A. H.; HURTADO J. E.; DIAZ S. A.; HIDALGO-LEIVA D. A. *Probabilistic seismic damage assessment of reinforced concrete buildings considering directionality effects*. *Struct. Infrastruct. Eng.* [En línea]. 2017. 24(79): pp. 1-13. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.138508>.
8. BERMUDO, H. *Evaluación comparativa de la bidireccionalidad sísmica según el análisis modal espectral y análisis lineal tiempo historia, en edificaciones escalonadas de concreto armado*. (Tesis). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. 2021. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/>.
9. BRAVO, R. *Evaluación de las reglas de combinación direccional en el cálculo de la respuesta estructural en edificios de concreto armado*. (Tesis). Pontificia Universidad Católica del Perú. 2020. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio>.

10. **MARINILLI, A.; LÓPEZ, O.** *Evaluación de respuestas y ángulos de incidencia críticos obtenidos por métodos espetrales.* (Tesis). Universidad Central de Venezuela. 2010. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de SciELO.org.
11. **PUMA, E.** *Efectos de la interacción suelo-estructura en la cimentación compartida por bloques independizados con junta sísmica, verificado mediante ensayos a escala con simulador sísmico y modelos de elementos finitos.* (Tesis). Universidad Nacional Federico Villareal. 2017. [Consultado: 12/12/2022]. Recuperado de <http://repositorio.unfv.edu.pe/>.
12. **HUDSON D.** *Reading and interpreting strong motion accelerograms, Earthquake Enginnering Research Institute.* [En línea]. 1979. [Consultado: 12/12/2022].
13. **ARIAS, F.** *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica.* Editorial Epistemes. 2012.
14. **SUPO, José.** *Cómo empezar una tesis.* Bioestadístico EIRL, 2015.
15. **LOZADA, José.** *Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria.* CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica. 2014, 3(1), p. 47-50.

ANEXOS

Anexo 1

Respuestas estructurales obtenidas mediante reglas de combinación usuales ordenadas de mayor a menor

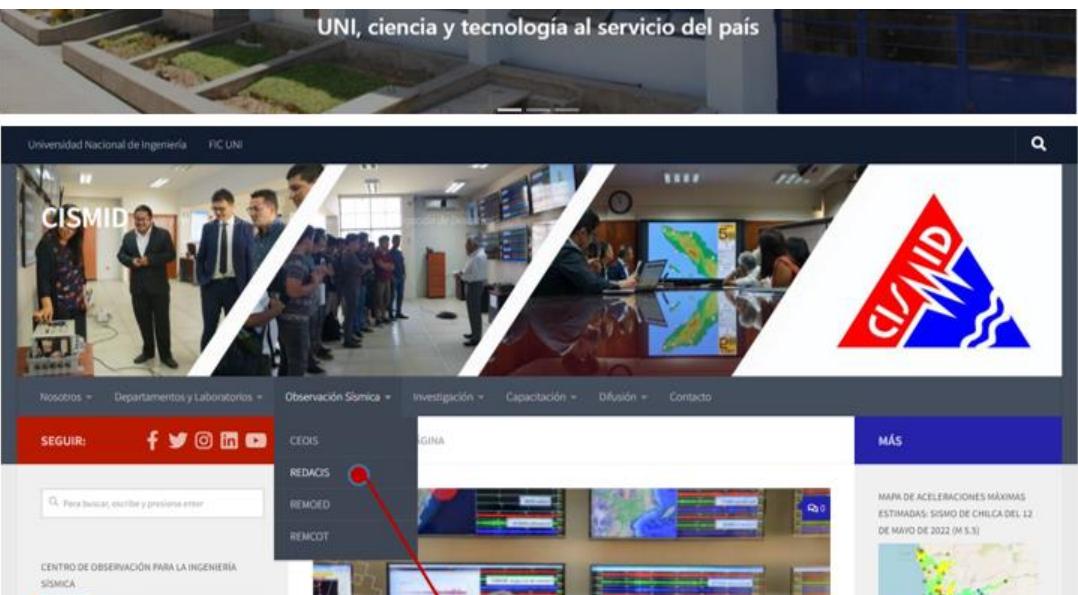
FORMA DE PLANTA	ESTRUCTURA	100-40%	100-30%	SRSS	CQC3	AME
PLANTAS EN "L"	L-1	81.1%	81.0%	80.6%	80.6%	80.6%
		80.1%	80.0%	79.6%	79.6%	79.6%
		71.5%	71.3%	71.0%	71.0%	71.0%
		71.3%	71.2%	70.8%	70.8%	70.8%
	L-2	82.4%	77.5%	76.1%	76.1%	75.9%
		78.1%	76.5%	75.1%	75.1%	74.9%
		77.0%	72.8%	71.8%	71.8%	71.8%
		74.8%	72.4%	71.5%	71.5%	71.4%
	L-3	76.2%	75.5%	73.7%	73.7%	73.4%
		74.8%	74.3%	72.8%	72.9%	72.6%
		74.0%	73.4%	72.0%	72.0%	71.8%
		73.6%	72.9%	71.2%	71.2%	70.9%
PLANTAS EN "T"	T-1	83.7%	83.6%	83.4%	83.4%	83.4%
		79.4%	79.3%	79.2%	79.2%	79.2%
		71.4%	71.4%	71.2%	71.2%	71.2%
		68.5%	68.5%	68.3%	68.3%	68.3%
	T-2	83.8%	83.3%	82.2%	82.2%	82.1%
		81.8%	81.4%	80.4%	80.4%	80.3%
		71.3%	70.9%	69.8%	69.8%	69.7%
		70.4%	70.0%	68.9%	68.9%	68.8%
	T-3	85.5%	84.7%	82.9%	82.9%	82.6%
		83.5%	82.8%	81.0%	81.0%	80.7%
		75.5%	74.8%	73.0%	73.0%	72.6%
		73.8%	73.1%	71.3%	71.3%	71.0%

Anexo 2

Página web del Cismid – Universidad Nacional de Ingeniería



The screenshot shows the homepage of the CISMID website. At the top, there is a navigation bar with links to 'Acerca de la carrera', 'Información para estudiantes', 'Institutos, centros y laboratorios', 'Instituto de Investigación FIC', 'IMEFEN', 'Centro de Cómputo FIC', 'Biblioteca FIC', 'CISMID' (highlighted with a red circle and a red arrow), 'Centro de Educación Continua FIC', 'Acreditación FIC', 'Posgrado FIC', 'Lab. de Diseño y Construcción Virtu', 'Lab. de Ensayo de Materiales', 'Lab. de Mecánica de Suelos', and 'Lab. de Química'. The main content area features a large image of the university building with the text 'Universidad Nacional de Ingeniería' and 'UNI, ciencia y tecnología al servicio del país'.



The screenshot shows the 'REDACIS' section of the CISMID website. It features a red button labeled 'SEGUIR:' with social media icons (Facebook, Twitter, LinkedIn, YouTube) and a search bar. The menu includes 'Nosotros', 'Departamentos y Laboratorios', 'Observación Sísmica', 'Investigación', 'Capacitación', 'Difusión', and 'Contacto'. The 'REDACIS' menu item is highlighted with a red circle and a red arrow. The main content area displays a map of seismic activity and several screens showing seismic data. The CISMID logo is in the top right corner.

REDACIS-DESCARGA DE REGISTROS SÍSMICOS