

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**COMPARACIÓN ENTRE ANÁLISIS DINÁMICO TIEMPO-HISTORIA EN
SISMOS FRECUENTES Y ANÁLISIS ESPECTRAL PARA UN EDIFICIO DE
VIVIENDA DE 14 PISOS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTOR:

PEDRO JESUS QUISPE CARTOLIN

ASESOR:

JUAN ALEJANDRO MUÑOZ PELÁEZ

Lima, Febrero, 2021

Resumen

El siguiente proyecto de investigación tiene como fin evaluar el comportamiento de un edificio de muros estructurales ubicado en la costa peruana diseñado con el reglamento nacional de edificaciones vigente hasta el año 2019 frente a solicitaciones sísmicas correspondientes a sismos frecuentes (sismos en condiciones de servicio). Y con ello, se extrapolará los resultados hacia los edificios, en general, diseñados con el RNE actual.

Las hipótesis de este proyecto plantean que el RNE peruano garantiza un desempeño eficiente de la estructura en sismos frecuentes.

Para evaluar el fenómeno se recurre a la bibliografía actual de diseño sismorresistente de estructuras de concreto armado, tomando en cuenta la normativa vigente y los estudios recientes sobre el comportamiento dinámico de las estructuras.

Consecuentemente, se presenta los resultados del análisis dinámico espectral y tiempo-historia del edificio. Se presenta los coeficientes de las solicitaciones vs la resistencia ofrecida para todos los análisis realizados, teniendo en cuenta una sobrerresistencia de la estructura igual a 2.

Posteriormente, se elabora comentarios sobre la interpretación de los resultados. Y finalmente se concluye lo siguiente:

La demanda estructural de un sismo frecuente es 2.41 aproximadamente veces mayor a la demanda de diseño obtenida del análisis espectral. Por tanto, la demanda espectral es menor a la demanda del análisis tiempo historia para sismos frecuentes.

Si se considera que la resistencia sísmica de la estructura está determinada por una sobrerresistencia probable equivalente a 2 veces la demanda de diseño, entonces el edificio responde con incursiones inelásticas significativas en todos sus elementos estructurales frente a sismos frecuentes.

Las restricciones de la norma peruana para el diseño de edificaciones sismorresistentes no garantizan el buen desempeño de la estructura frente a sismos frecuentes.

Índice

Capítulo I: Generalidades

1. Introducción	1
2. Objetivos	1
3. Problema de investigación	2
4. Hipótesis	2
5. Justificación	2
6. Alcance	2

Capítulo II: Marco Teórico y metodología de investigación

1. Marco Teórico	3
1.1 Definiciones generales	3
1.2 Niveles de desempeño	4
1.3 Normas de diseño y detalles del diseño estructural	5
1.4 Propiedades de los materiales	5
1.5 Movimientos Sísmicos	6
1.6 Análisis y respuesta estructural	7
1.7 Demanda y capacidad estructural	8
2. Metodología de investigación	8
2.1 Fases de la investigación	8

Capítulo III: Análisis y resultados

1. Análisis estructural	9
1.1 Análisis espectral	16
1.2 Análisis tiempo-historia	17
2. Resultados	19

Capítulo IV: Discusión de resultados y conclusiones

1. Discusión de resultados	29
2. Conclusiones	31

Referencias bibliográficas

32

Imágenes

Imagen 1:	Niveles de desempeño en la curva de capacidad.	4
Imagen 2:	Ondas Sísmicas.	6
Imagen 3:	Acelerograma del terremoto de Lima 1974.	7
Imagen 4:	Elevación frontal del edificio.	9
Imagen 5:	Encofrado de planta típica.	10
Imagen 6:	Planta típica.	10
Imagen 7:	VT-26. Segundo piso.	12
Imagen 8:	VT-26. Séptimo piso.	12
Imagen 9:	VT-60. Doceavo piso.	12
Imagen 10:	VT-21. Segundo piso.	13
Imagen 11:	VT-21. Séptimo piso.	13
Imagen 12:	VT-56. Doceavo piso.	13
Imagen 13:	VT-29. Segundo piso.	13
Imagen 14:	VT-29. Séptimo piso.	13
Imagen 15:	VT-61. Doceavo piso.	14
Imagen 16:	VT-34. Segundo piso.	14
Imagen 17:	VT-34. Séptimo piso.	14
Imagen 18:	VT-63. Doceavo piso.	14
Imagen 19:	PL7.	15
Imagen 20:	PL9.	15
Imagen 21:	PL10.	16
Imagen 22:	Espectro conformado por los parámetros Z,U,S, y R.	16
Imagen 23:	Modelo estructural en Etabs.	17
Imagen 24:	Acelerogramas EO(primera) y NS(segunda) de Lima 66.	17
Imagen 25:	Acelerogramas EO(primera) y NS(segunda) de Lima 70.	18
Imagen 26:	Acelerogramas EO(primera) y NS(segunda) de Lima 74.	18

Tablas:

Tabla 1:	Niveles de desempeño vs tipo de edificación.	5
Tabla 2:	Períodos y modos de vibración, con ratios de masa participativa.	11
Tabla 3:	Parámetros sísmicos de la edificación.	16
Tabla 4:	Factores de escala de las señales seleccionadas.	19
Tabla 5:	Resultados del análisis sísmico espectral y tiempo-historia.	19
Tabla 6:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en el edificio.	20
Tabla 7:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en el edificio.	20
Tabla 8:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-26.	21
Tabla 9:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-26.	21
Tabla 10 :	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-26.	21
Tabla 11:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-26.	21
Tabla 12:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-26.	21
Tabla 13:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-21.	22
Tabla 14:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-21.	22
Tabla 15:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-21.	22
Tabla 16:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-34.	22
Tabla 17:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-34.	22
Tabla 18:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-34.	23
Tabla 19:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-34.	23
Tabla 20:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-29.	23
Tabla 21:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-29.	23
Tabla 22:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-29.	23

Tabla 23:	Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-29.	24
Tabla 24:	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la placa PL7 (trabaja en XX e YY)	24
Tabla 25:	Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la placa PL7 (en XX e YY)	25
Tabla 26 :	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la placa PL7 (en XX e YY)	25
Tabla 27:	Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la placa PL7 (en XX e YY)	25
Tabla 28 :	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la placa PL9 (en YY)	26
Tabla 29:	Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la placa PL9 (en YY)	26
Tabla 30 :	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la placa PL9 (en YY).	26
Tabla 31:	Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la placa PL9 (trabaja YY).	27
Tabla 32 :	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la placa PL10 (en XX).	27
Tabla 33:	Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la placa PL10 (trabaja XX)	28
Tabla 34 :	Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la placa PL10 (en XX)	28
Tabla 35:	Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la placa PL10 (enXX)	28
Tabla 36:	Cocientes estimados característicos de la estructura.	29
Tabla 37:	Cocientes estimados característicos de las vigas.	30
Tabla 38:	Cocientes estimados característicos de las placas.	30

Capítulo I: Generalidades

1. Introducción

El diseño sismorresistente en concreto armado de los edificios peruanos está regido por el reglamento nacional de edificaciones. Basado principalmente en filosofías de diseño, el RNE enfatiza en la funcionalidad del edificio. Todo ello converge en proporcionar un ambiente seguro para las personas y sus bienes materiales en condiciones de servicio, así como evitar el colapso de la estructura en condiciones últimas.

En efecto, la filosofía de diseño sismorresistente establece que se busca prevenir daños no estructurales para movimientos sísmicos frecuentes y evitar a toda costa el colapso de la estructura para movimientos sísmicos de alta intensidad.

Sin embargo, las observaciones del comportamiento de las estructuras frente a fenómenos sísmicos en las últimas décadas dejan en evidencia que las metodologías de diseño normado no logran reflejar en su totalidad la filosofía a la cual hacen referencia. A causa de ello, se hace notoria la necesidad de analizar y observar el comportamiento de los edificios peruanos, a fin de proporcionar información sobre la efectividad de los procedimientos de diseño establecidos en el reglamento.

Por tanto, el siguiente proyecto, estará dirigido a verificar la suficiencia de los reglamentos frente a su filosofía de diseño, comparando los resultados del análisis sísmico modal-espectral, con los resultados del análisis tiempo-historia para sismos frecuentes en un edificio de concreto armado ubicado en la costa peruana.

En primer lugar, se definirá los objetivos y el problema de investigación. Posteriormente se detallará el estado del arte y el marco teórico a partir del cual se realizará la verificación. A continuación, se realizará el análisis sísmico espectral y el análisis tiempo historia. Finalmente, se presentará las conclusiones.

2. Objetivos

Objetivo general

Comparar los resultados del análisis espectral con los resultados del análisis tiempo historia y verificar si la norma garantiza el buen desempeño de los edificios en sismos frecuentes.

Objetivos específicos

- Realizar el análisis modal espectral y el análisis tiempo – historia en un edificio diseñado con la normativa peruana vigente.
- Evaluar los resultados obtenidos de ambos casos de análisis.
- Determinar qué método de análisis proporciona resultados más desfavorables.
- Identificar las características de buen desempeño de una edificación y contrastar con los resultados obtenidos.

3. Problema de investigación

El reglamento nacional de edificaciones provee de metodologías de diseño sismorresistente en condiciones últimas, sin embargo, se hace necesario analizar y observar el comportamiento de los edificios bajo eventos sísmicos frecuentes, a fin de proporcionar información sobre la efectividad de los procedimientos de diseño establecidos en el reglamento para condiciones de servicio.

4. Hipótesis de trabajo

- El procedimiento de diseño normado garantiza el buen desempeño de la estructura en sismos frecuentes.
- El análisis espectral genera solicitaciones mayores a las obtenidas por el análisis tiempo – historia.
- Los cocientes de comparación entre los resultados del análisis tiempo – historia y la sobrerresistencia probable son menores a 1.

5. Justificación

La investigación se realiza a fin de verificar si ante un sismo frecuente, las edificaciones diseñadas bajo la normativa vigente poseen un nivel de desempeño bueno; es decir, que el edificio se mantenga completamente operativo.

6. Alcance

El análisis se realizará en un edificio de 14 pisos diseñado de acuerdo con el RNE del año 2019. El edificio está ubicado en la ciudad de Lima, en el distrito de Breña. El suelo de cimentación es grava pobremente graduada con una capacidad portante de 50 ton/m².

Capítulo II: Marco Teórico y metodología de investigación

1. Marco teórico

1.1 Definiciones generales

Edificaciones

Una edificación es una construcción de uso humano. Las edificaciones, están conformadas por una estructura, una arquitectura, y un sistema de instalaciones esenciales para el uso humano del edificio, todos entrelazados con el fin de conformar una pieza de arte funcional para albergar actividades humanas. Se clasifican de acuerdo al uso, a su sistema estructural, al grado de importancia sísmica, etc.

La norma peruana de diseño sismorresistente clasifica a las edificaciones en categorías según su importancia, para asignar a cada caso un factor U (factor de uso) usado en el análisis espectral.

Esta investigación se centrará en las edificaciones de categoría C, edificaciones comunes tales como viviendas, oficinas, hoteles, etc.

Evento sísmico

Un evento sísmico se define como el evento que abarca desde la generación y liberación de energía para posteriormente propagarse en forma de ondas a través de la tierra hasta la percepción final por la población y por las estructuras (IGP,2020).

Período de retorno (Tr)

El período de retorno es una representación estadística empleada para presentar la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado en un período determinado. Este se presenta como la cantidad de tiempo para la cual la probabilidad de ocurrencia de un evento se distribuye uniformemente en los períodos que componen dicha cantidad de tiempo.

Momentos de servicio (Ms)

Los momentos de servicio son los momentos flectores formados a lo largo del elemento estructural los cuales corresponden a las condiciones de carga en servicio. Estas condiciones son, de acuerdo con la norma E.060, la incidencia de las cargas muertas y vivas sin ser amplificadas.

Deflexiones (δ)

Las deflexiones son desplazamientos verticales en la parte media de un elemento sometido a flexión. La norma contempla el análisis de deflexiones para casos de cargas permanentes, en condiciones de servicio (cargas muertas y vivas).

Histéresis

La energía sísmica es almacenada y disipada por las estructuras por vías elásticas e inelásticas. La histéresis es la propiedad de la estructura para disipar la energía sísmica mediante el daño estructural durante las incursiones inelásticas.

1.2 Niveles de desempeño

El nivel de desempeño es una cualidad de la edificación, definida por el nivel de daño en el cual esta incurre ante un evento sísmico. Está directamente relacionado con la curva de capacidad del edificio; en función a la cortante basal. Se definen 4 niveles de desempeño, los cuales son:

- Funcional: El edificio únicamente incurre en deformaciones elásticas. Pueden presentarse fisuras poco profundas, pero el edificio se encuentra completamente operativo.
- Daño controlado: El edificio incurre en deformaciones inelásticas leves, causadas por la rotulación plástica de algunos de sus elementos estructurales. Sin embargo, el edificio aún posee capacidad para mantenerse operativo.
- Prevención del derrumbe: El edificio ha incurrido en deformaciones inelásticas regulares a severas, causadas por la rotulación plástica de varios de sus elementos estructurales. Debido a ello, el edificio queda en condiciones de resguardo de vida.
- Colapso: La edificación llega a su máxima capacidad, y colapsa.

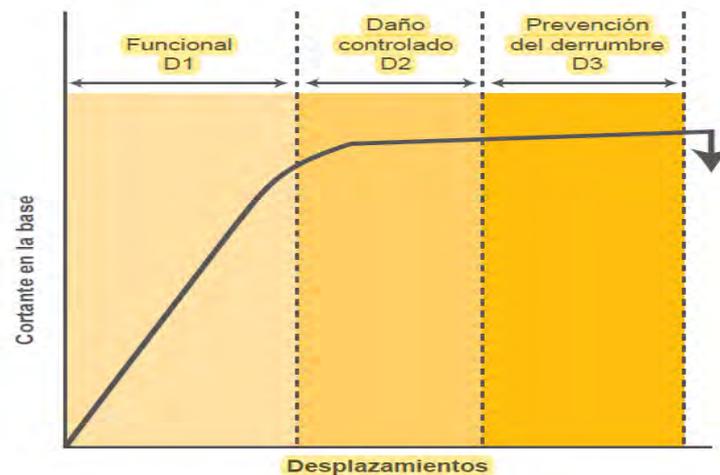


Imagen 1: Niveles de desempeño en la curva de capacidad. Fuente: López, 2014

Mediante esta característica del edificio, se puede determinar si el diseño ha resultado bueno, regular o malo. Ello se determina a partir del tipo de edificación que se desea analizar. La norma, en concordancia con la filosofía de diseño sismorresistente, adopta este concepto como pilar del diseño orientado al desempeño; el cual formula que para cada nivel de amenaza, se requieren estrategias de diseño específicas.

En este caso, para una edificación de uso común (destinada a vivienda), se requiere que el edificio se mantenga completamente operativo (funcional) frente a un evento sísmico

frecuente ($T_r=45$ años); que se mantenga operativo (con daño controlado) frente a un evento sísmico ocasional ($T_r=75$ años); y que permita el resguardo de la vida frente a un evento sísmico raro ($T_r=475$ años).

En efecto, se estima que para un evento sísmico muy raro ($T_r=970$ años) el edificio estará cerca al colapso.

Tabla 1: Niveles de desempeño vs tipo de edificación. Fuente: Propia.

Sismo de diseño	Tr (años)	Nivel de desempeño			
		Completamente operativo	Operativo	Resguardo de vida	Cerca al colapso
Sismo frecuente	45	Común			
Sismo ocasional	75	Esencial	Común		
Sismo raro	475	Seguridad crítica	Esencial	Común	
Sismo muy raro	970	Seguridad crítica	Seguridad crítica	Esencial	Común

1.3 Normas de diseño y detalles del diseño estructural

Las normas o códigos de diseño son documentos legales de cada país en el cual se establecen los requisitos mínimos de diseño que deben cumplir las edificaciones. La función principal de las normas es garantizar la seguridad del público usuario. En Perú, el diseño de edificaciones se encuentra regulado por el Reglamento Nacional de Edificaciones. Estas intentan asegurar que los niveles de seguridad sean uniformes. Es decir, que varias estructuras similares diseñadas por distintos ingenieros con un mismo código, deberían tener niveles mínimos de seguridad similares. (Ottazzi, 2018)

Las normas que se utilizarán en esta investigación serán las normas peruanas de Diseño Estructural;

- E020 Cargas
- E030 Diseño Sismorresistente
- E060 Diseño en Concreto Armado

1.4 Propiedades de los materiales

En el medio peruano, los materiales comúnmente usados para el diseño y construcción de las estructuras de edificaciones de concreto armado son:

- Concreto f^c desde 175 kg/cm² a 350 kg/cm²

El concreto es un material frágil, con gran aporte de resistencia a compresión. La resistencia de diseño del concreto (f^c) es un valor estadístico determinado a partir de ensayos de laboratorio de rotura de probetas a compresión. “En teoría, las probetas miden el potencial resistente al cual representan.” (Ottazzi, 2018)

La norma permite ignorar la resistencia a tracción del concreto en el análisis debido a que es muy pequeña comparada con la resistencia a compresión.

- Acero grado 60 ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$)

El acero Grado 60 es un material dúctil que ayuda al concreto a soportar esfuerzos de flexotracción y conduce, en conjunto con el concreto, a un comportamiento satisfactorio. El esfuerzo de diseño del acero (f_y) se limita al esfuerzo en el cual el material entra en la meseta de fluencia. En el medio peruano se utiliza el acero normado ASTM 615.

El refuerzo de acero se distribuye normalmente en barras o varillas de sección circular, con resaltes o corrugaciones en la superficie. (Ottazzi, 2018)

1.5 Movimientos sísmicos

De acuerdo con la teoría de tectónica de placas la tierra consta de una capa sólida exterior denominada litósfera; cuya superficie exterior corresponde al fondo marino y a la superficie de los continentes. Ésta descansa sobre una capa denominada astenosfera, que se encuentra en estado de semifusión por las altas temperaturas. (Muñoz, 2018)

La litósfera está conformada por placas, las cuales son arrastradas por la corriente que surge en la astenosfera. La teoría tectónica sostiene que los sismos son el resultado de la interacción entre placas a causa del movimiento relativo.

Durante un sismo, se irradia la energía liberada por la ruptura en el plano de falla hacia la superficie en forma de ondas. Las ondas liberadas se denominan ondas sísmicas. Se clasifican en ondas de cuerpo; las cuales se dividen en ondas primarias y ondas secundarias; y ondas de superficie; las cuales se dividen en ondas Love y ondas Rayleigh.

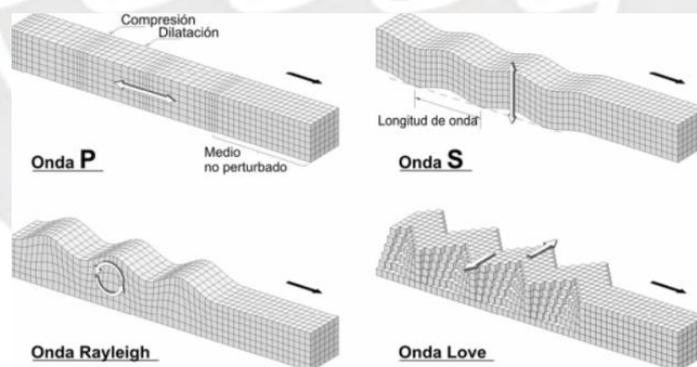


Imagen 2: Ondas Sísmicas. Fuente: Muñoz,2018

El registro de estos movimientos oscilatorios se realiza mediante el sismómetro o el acelerómetro. Estos instrumentos registran el movimiento en términos de aceleración vs tiempo o desplazamiento vs tiempo. Los registros de los cuales parten los métodos de análisis de la norma son los acelerogramas.

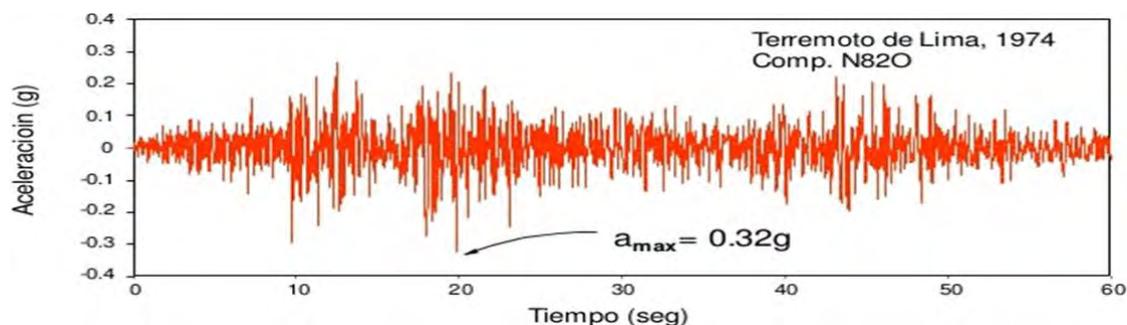


Imagen 3: Acelerograma del terremoto de Lima 1974. Fuente: CISMID

1.6 Análisis y respuesta estructural

El RNE permite el análisis estructural de las edificaciones con métodos de análisis estáticos y dinámicos. Entre los métodos dinámicos se encuentran el análisis espectral y el análisis tiempo-historia.

El análisis espectral se realiza en base a la aplicación dinámica de una fuerza cortante en la base del edificio. Esta fuerza es la resultante del producto del peso sísmico del edificio con la aceleración espectral correspondiente al período del edificio.

La norma define al espectro de aceleraciones como el producto de los siguientes factores:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} \cdot g$$

- Factor de zona (Z), corresponde a la zona sísmica en la cual se encuentra el edificio. Permite conocer la máxima aceleración del suelo en el estrato firme.
- Factor de uso (U), corresponde al uso de la edificación, clasificado según la importancia de protección sísmica que necesite.
- Factor de suelo (S), corresponde a la amplificación de las solicitaciones sísmicas en el estrato de cimentación.
- Factor de amplificación sísmica (C), corresponde a la amplificación sísmica generada al pasar del suelo a la estructura. Depende del período de la estructura.

Finalmente, todo el espectro se reduce por un coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas (R), el cual representa la capacidad estructural de la edificación correspondiente a su sistema estructural.

El análisis tiempo historia se realiza en base a registros sísmicos representativos del lugar en el cual se ubicará el edificio. Estos registros deben ser espectro-compatibles. Es decir, que el espectro formado por cada registro sea compatible con el espectro de diseño propuesto por la norma.

El análisis se realiza sometiendo al edificio al registro sísmico. Se escalará el sismo, para expresar los resultados del análisis en el caso de sismos frecuentes (el análisis tiempo-historia de la norma no contempla a sismos frecuentes sino solo a sismos raros – $T_r=500$ años). Por ello, se estimará como sismo frecuente a los sismos con aceleración del suelo de entre 0.20g a 0.25g. En este proyecto, se utilizará el valor de 0.25g debido a que es el más crítico. Por tanto, el factor de escala para los acelerogramas será de 0.25/0.45 ($F.Esc \approx 0.556$).

1.7 Demanda y capacidad estructural

Cuando se somete una estructura a una aceleración en la base, el trabajo que realizan las fuerzas de inercia en el edificio se almacena y disipa como energía de deformación. La demanda estructural corresponde entonces a la demanda energética que una fuerza dinámica provoca en el edificio.

El edificio almacena y disipa energía mediante deformación elástica (energía almacenada) y deformación plástica (energía disipada). La capacidad estructural corresponde a la cantidad energética que puede almacenar. Está directamente relacionado con el comportamiento elastoplástico de la estructura.

2. Metodología de investigación

2.1 Fases de investigación

La investigación será desarrollada en 3 fases:

Fase 1: Revisión bibliográfica; para obtener información sobre los métodos de análisis dinámico de edificaciones y delimitar los parámetros de comparación sobre los cuales se evaluará los resultados. Los temas abordados serán los siguientes: Análisis espectral de estructuras, análisis tiempo-historia.

Fase 2: Análisis estructural; para el edificio objetivo presentar sus características, definir elementos que se someterán a revisión realizar el análisis de acuerdo con los métodos de análisis dinámico adoptados, de tal manera que se obtengan los resultados necesarios para realizar la comparación.

Fase 3: Comparación de resultados; discusión de resultados, contraste con el marco teórico y formulación de las conclusiones.

Capítulo III: Análisis estructural y resultados

1. Análisis estructural

Previamente al análisis, es necesario presentar la edificación que será objeto de estudio de esta investigación. El sistema estructural del edificio es de muros estructurales.

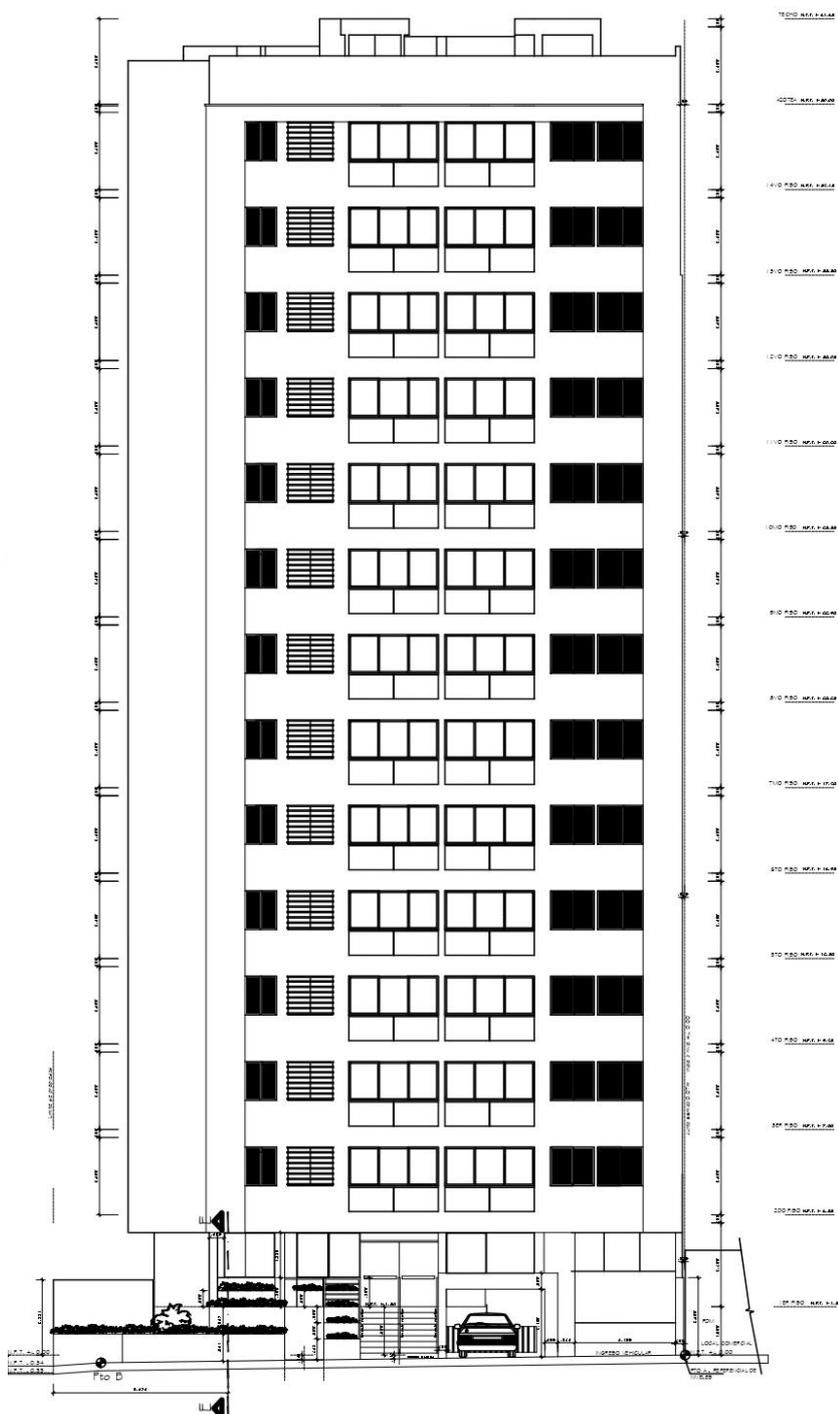


Imagen 4: Elevación frontal del edificio. Fuente: R2HLE

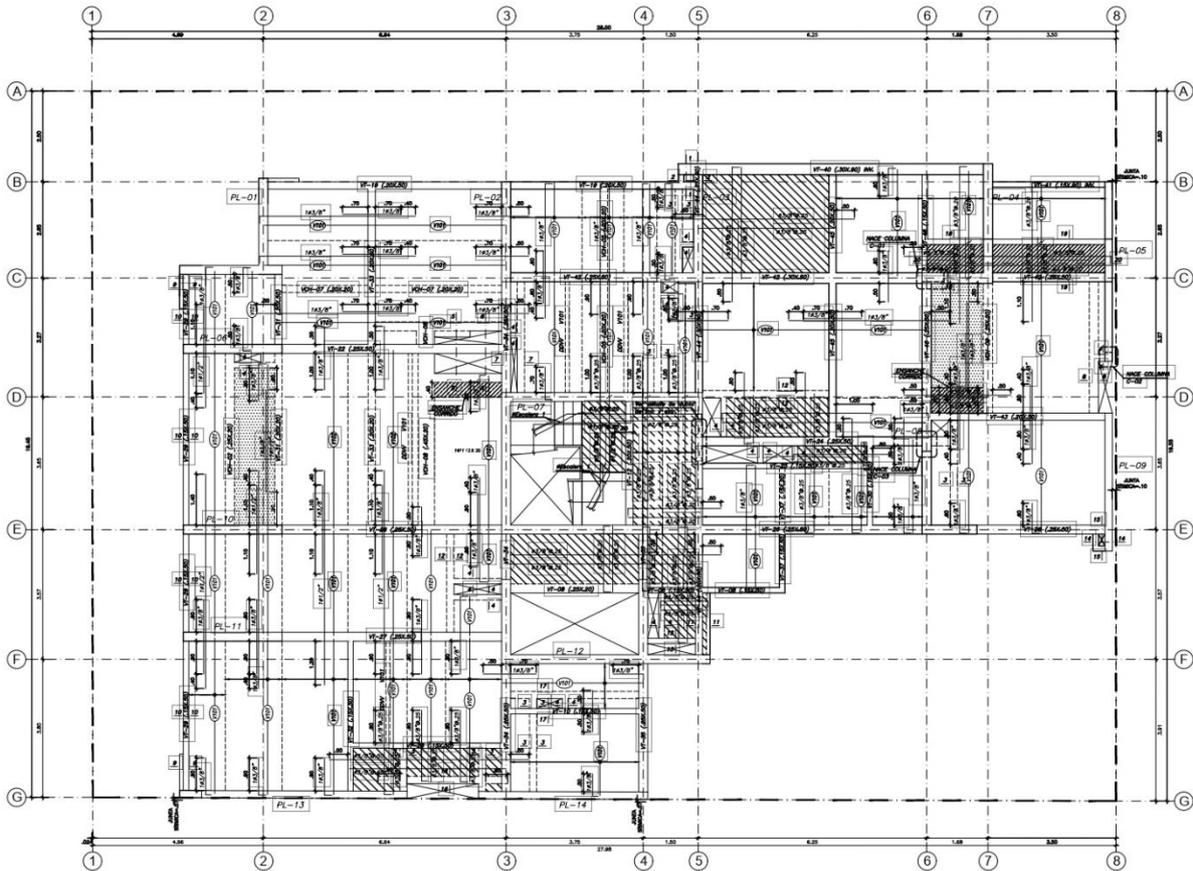


Imagen 5: Encofrado de planta típica. Fuente: R2HLE

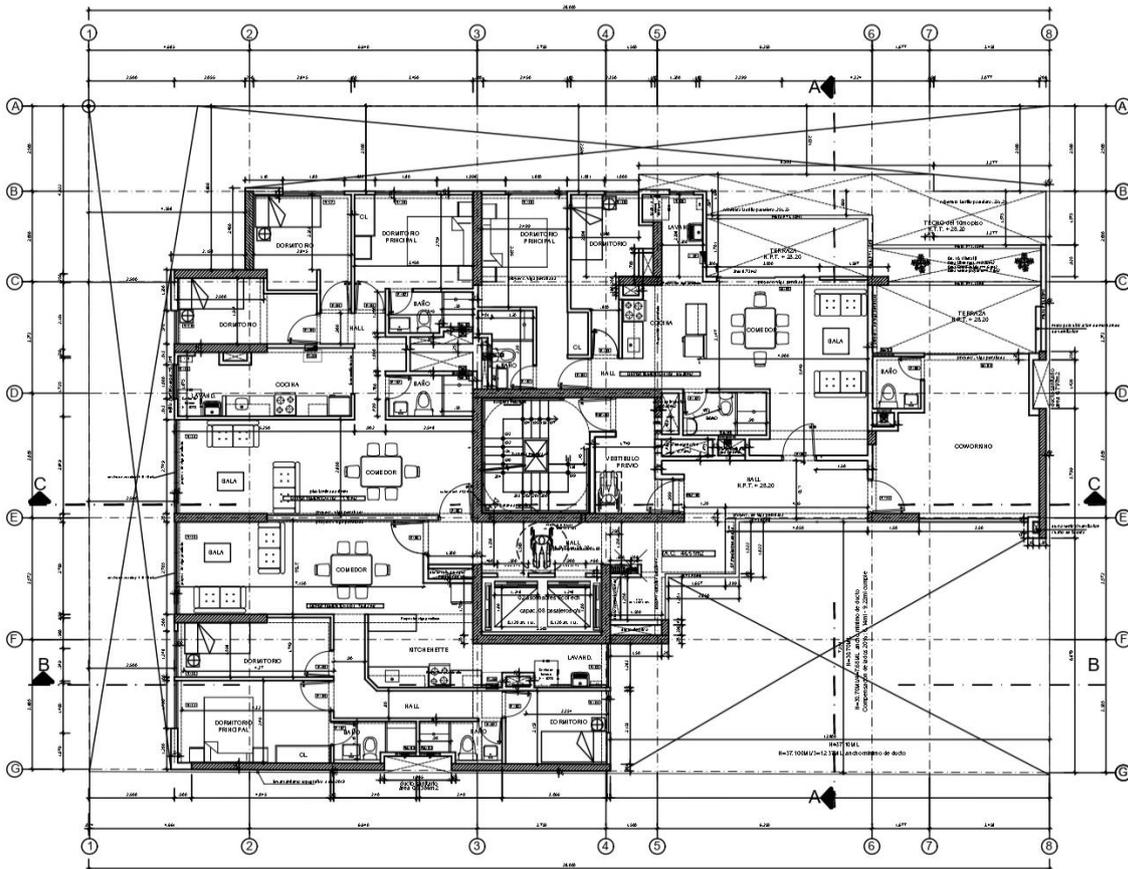


Imagen 6: Planta típica. Fuente: R2HLE

Es un edificio de 14 pisos diseñado de acuerdo con el RNE del año 2019. Está ubicado en la ciudad de Lima, en el distrito de Breña. El suelo de cimentación es grava pobremente graduada con una capacidad portante de 50 ton/m². Así también, se presentan los datos obtenidos del análisis modal del edificio.

Tabla 2: Períodos y modos de vibración, con ratios de masa participativa.
Fuente: Propia

Mode	Period sec	UX	UY
1	1.244	0.4698	0.0323
2	1.175	0.0868	0.498
3	1.014	0.0639	0.1279
4	0.294	0.0239	0.0875
5	0.26	0.0978	0.0524
6	0.211	0.0626	0.0096
7	0.134	0.0028	0.0434
8	0.12	0.021	0.0132
9	0.091	0.0312	0.0002
10	0.089	0.0173	0.0048
11	0.079	0.0000	0.0284
12	0.069	0.0086	0.0077
13	0.056	0.0051	0.0207
14	0.052	0.029	0.0013
15	0.047	0.0022	0.0055
16	0.042	0.0008	0.0191
17	0.038	0.0228	0.0014
18	0.034	0.0025	0.0043
19	0.034	0.0004	0.0134
20	0.03	0.0137	0.0014
21	0.028	0.0039	0.0035
22	0.028	0.0051	0.0095
23	0.025	0.0022	0.0011
24	0.024	0.0035	0.0051
25	0.023	0.0074	0.0012
26	0.022	0.0016	0.001
27	0.021	0.002	0.0027
28	0.02	0.0042	0.0001
29	0.019	0.0011	0.0002
30	0.019	0.0002	0.0015
31	0.018	0.0034	0.0002
32	0.017	0.0001	0.0001
33	0.017	0.0006	0.0005
34	0.016	0.0000	0.0001
35	0.015	0.0006	0.0003
36	0.015	0.0000	0.0000
37	0.015	0.0007	0.0000
38	0.015	0.0000	0.0000
39	0.014	0.0003	0.0000
40	0.014	0.0001	0.0002

Así también, se presentará los coeficientes correspondientes a los resultados de las siguientes vigas:

Eje XX

VT – 26 y 60

VT – 26 (2do piso)

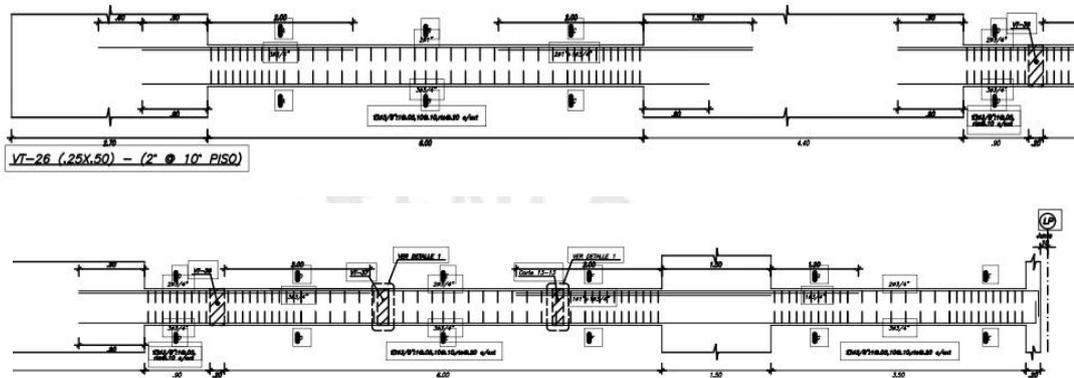


Imagen 7: VT-26. Segundo piso. Fuente: R2HLE

VT – 26 (7mo piso)

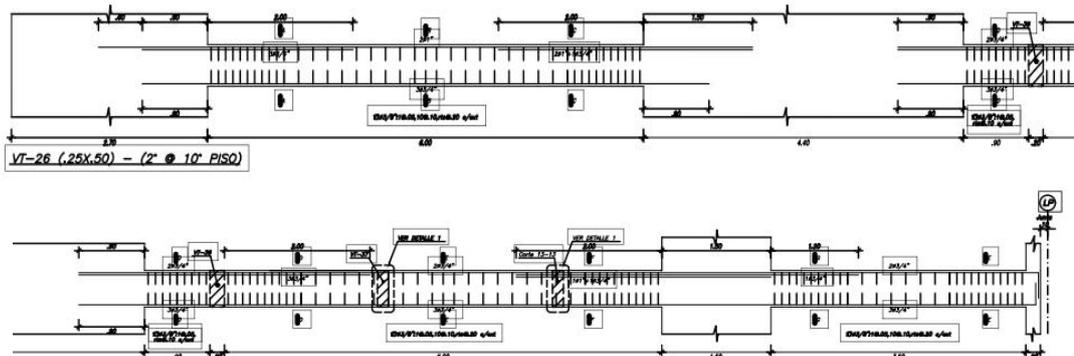


Imagen 8: VT-26. Séptimo piso. Fuente: R2HLE

VT – 60 (12vo piso)

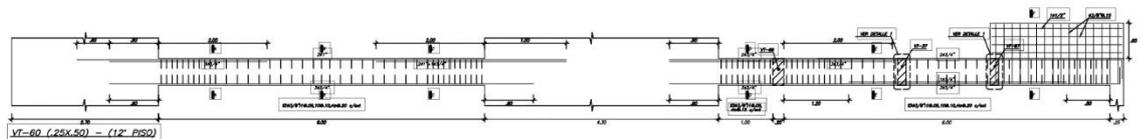


Imagen 9: VT-60. Doceavo piso. Fuente: R2HLE

VT – 21 y 56

VT – 21 (2do piso)

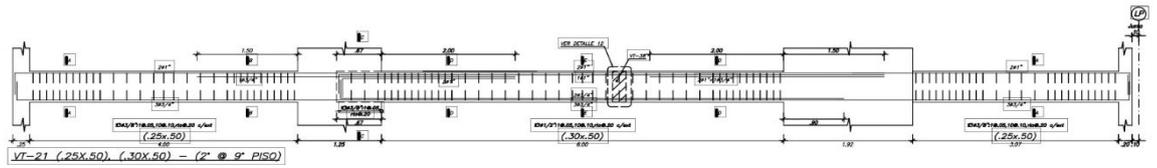


Imagen 10: VT-21. Segundo piso. Fuente: R2HLE

VT – 21 (7mo piso)

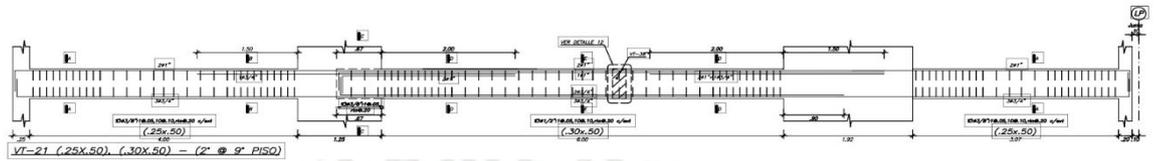


Imagen 11: VT-21. Séptimo piso. Fuente: R2HLE

VT – 56 (12vo piso)

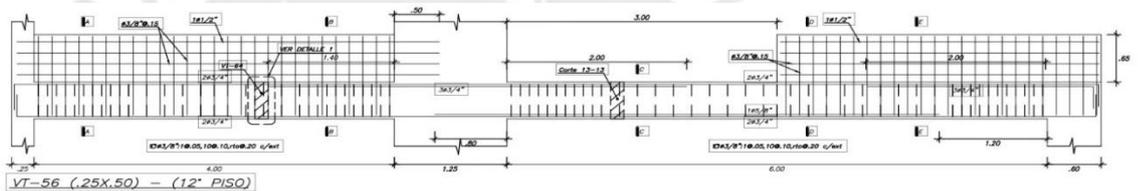


Imagen 12: VT-56. Doceavo piso. Fuente: R2HLE

Eje YY

VT – 29 y 61

VT – 29 (2do piso)

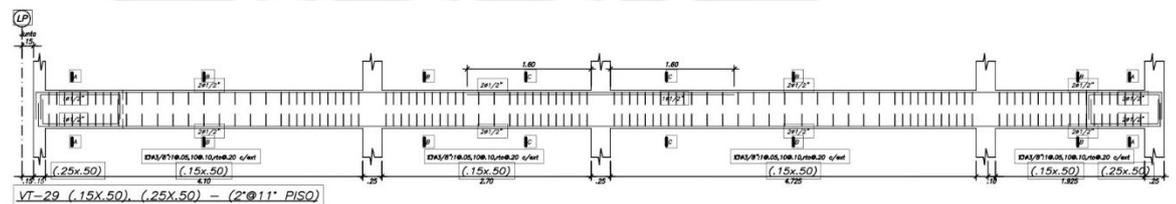


Imagen 13: VT-29. Segundo piso. Fuente: R2HLE

VT – 29 (7mo piso)

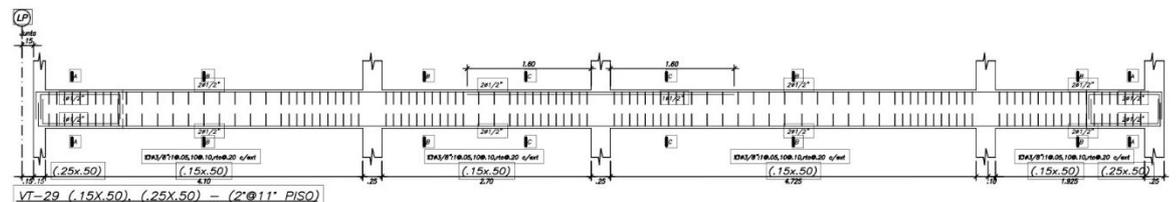


Imagen 14: VT-29. Séptimo piso. Fuente: R2HLE

VT – 61 (12vo piso)

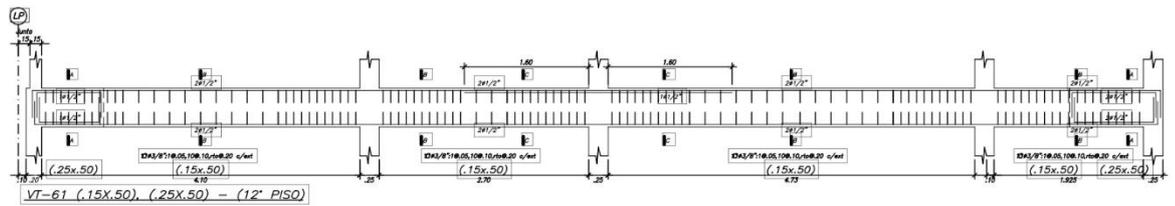


Imagen 15: VT-61. Doceavo piso. Fuente: R2HLE

VT – 34 y 63

VT – 34 (2do piso)

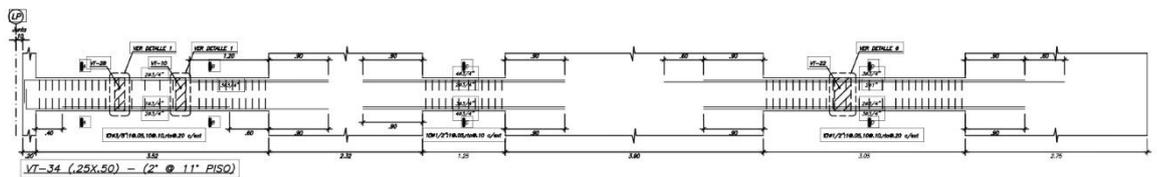


Imagen 16: VT-34. Segundo piso. Fuente: R2HLE

VT – 34 (7mo piso)

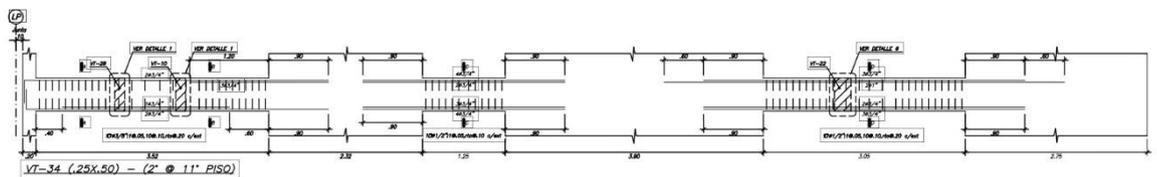


Imagen 17: VT-34. Séptimo piso. Fuente: R2HLE

VT – 63 (12vo piso)

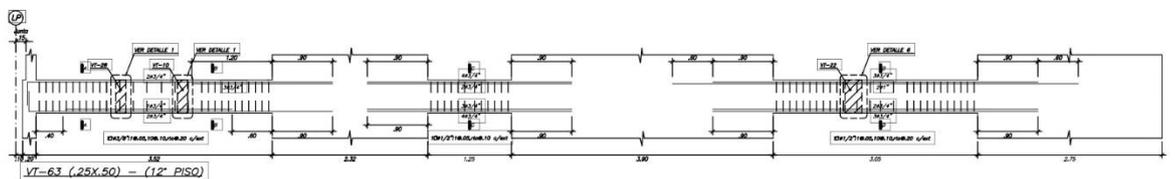


Imagen 18: VT-63. Doceavo piso. Fuente: R2HLE

Y finalmente, se presentará los coeficientes correspondientes a los resultados obtenidos de las siguientes placas.

PL 10

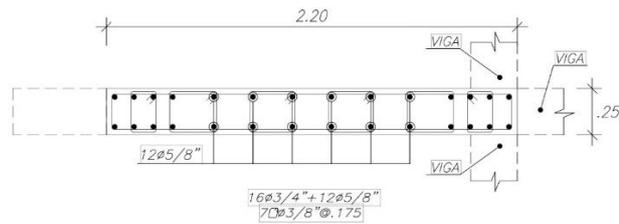


Imagen 21: PL10. Fuente: R2HLE

1.1 Análisis espectral

Para el análisis espectral se definen los siguientes parámetros:

Tabla 3: Parámetros sísmicos de la edificación. Fuente: Propia.

Zona sísmica = Z4	Z = 0.45
Uso: Viviendas	U = 1
Suelo: S1	S = 1
Cxx = 0.80386 ; Cyy = 0.85106 ; Tp = 0.4 s y Tl = 2.5 s	
R = 5.1 (Irregular)	

Con estos datos se conforma el siguiente espectro de aceleraciones espectrales.



Imagen 22: Espectro conformado por los parámetros Z,U,S, y R. Fuente: Propia.

Con ese espectro se realizará el análisis estructural del edificio. Como los cálculos matriciales son complejos, se recurrirá a utilizar el programa ETABS, el cual es un software de análisis estructural.

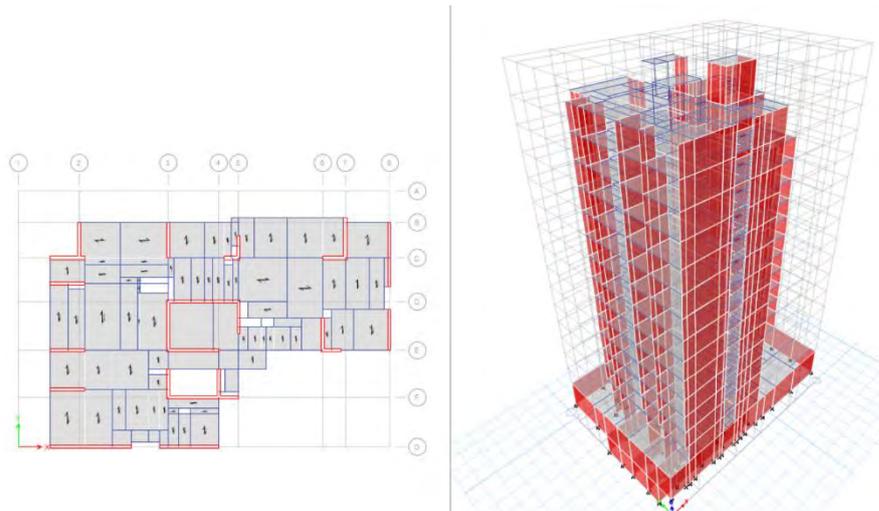


Imagen 23: Modelo estructural en Etabs. Fuente: Propia.

1.2 Análisis tiempo-historia

De acuerdo con la norma, el análisis se debe realizar con 3 pares de acelerogramas, los cuales deben ser espectro-compatibles. Se seleccionan los acelerogramas correspondientes a los eventos sísmicos más representativos de los últimos 50 años de la zona (Lima). Los acelerogramas a utilizar son los siguientes:

LIMA 66

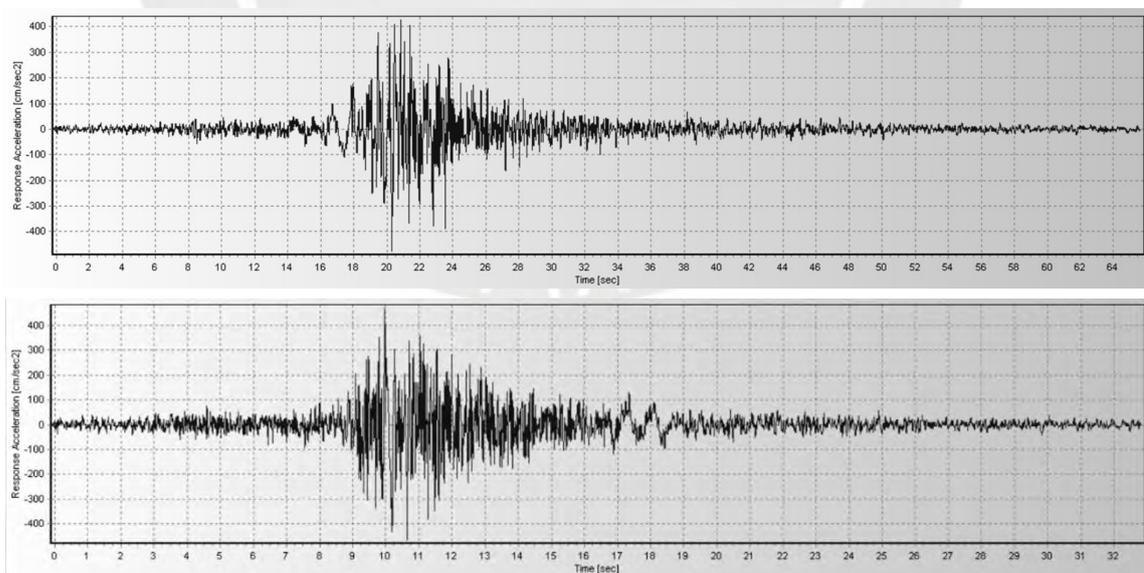


Imagen 24: Acelerogramas EO(primera) y NS(segunda) de Lima 66.
Fuente: Propia

LIMA 70

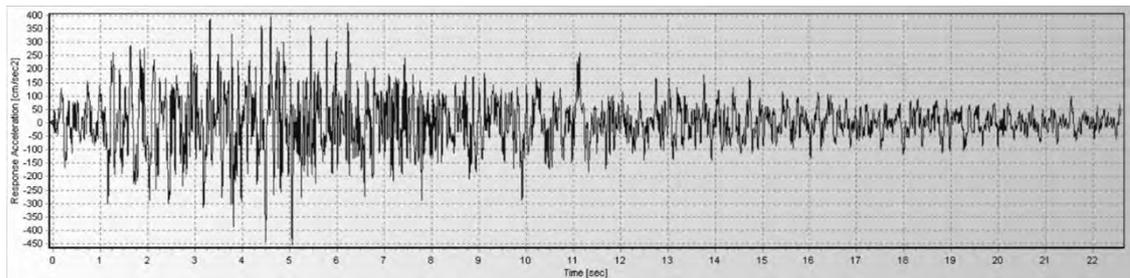
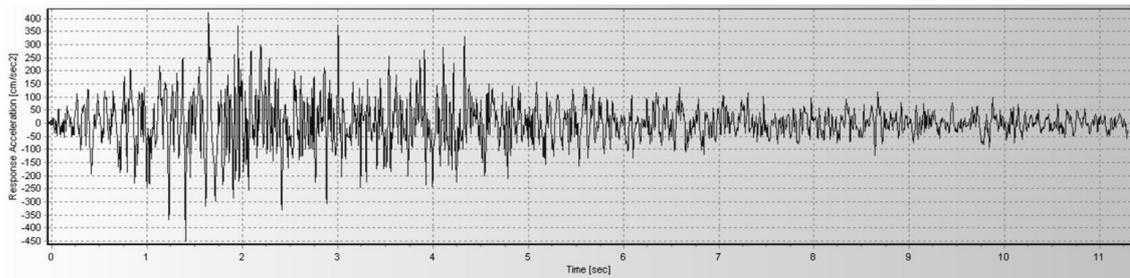


Imagen 25: Acelerogramas EO(primera) y NS(segunda) de Lima 70.

Fuente: Propia

LIMA 74

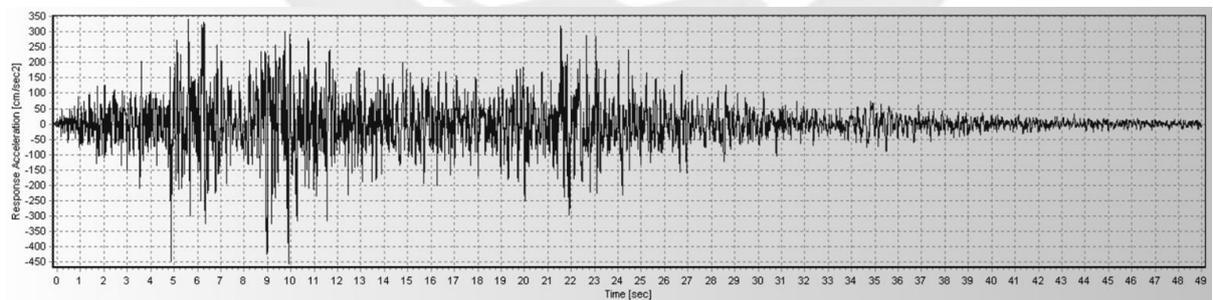
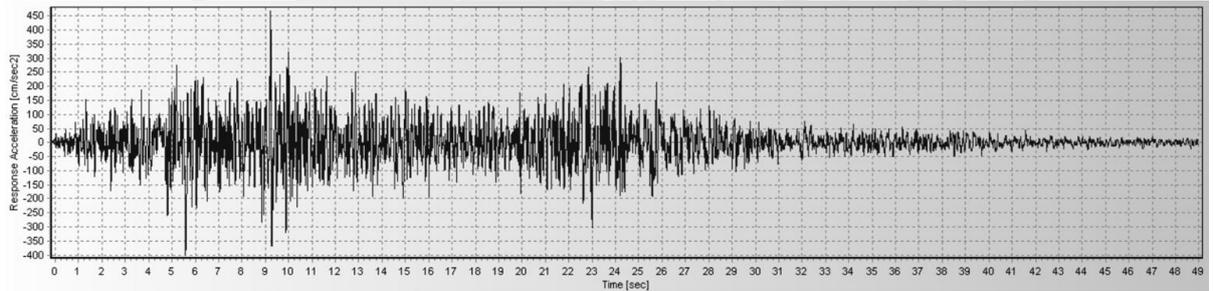


Imagen 26: Acelerogramas EO(primera) y NS(segunda) de Lima 74.

Fuente: Propia

Para el análisis, se utilizó los siguientes factores de escala para que el espectro del promedio SRSS de las señales espectro – compatibles sea cuanto menos igual al espectro de la norma.

Tabla 4: Factores de escala de las señales seleccionadas. Fuente: Propia.

Señal	Factores XX		Factor YY	
	E – O	N – S	E – O	N – S
Lima 66	0.90	0.40	0.44	0.90
Lima 70	0.90	0.40	0.40	0.90
Lima 74	0.90	0.44	0.40	0.90

Posteriormente, se tiene que reescalar cada señal de manera que la aceleración del suelo provocada por dicha señal corresponda a la aceleración de un sismo frecuente. Tomando conservadoramente la aceleración de 0.25g para sismos frecuentes, el factor de escala que se usará para cada señal es de $F_e=0.25/0.45=0.555$.

Finalmente, para manejar los resultados del análisis tiempo – historia, por el hecho de haber utilizado tres señales diferentes, se recurre a obtener los valores promedios y máximos con los cuales comparar los resultados.

En resumen, el análisis del edificio se realiza para cada dirección ortogonal. Para ambos casos, es decir, para el análisis espectral y el análisis tiempo – historia, se verificará las fuerzas basales en cada dirección, así como las fuerzas internas y deformaciones de vigas y placas. No se verificará la cimentación.

2. Resultados

Previamente a la presentación de resultados, habrá que fijar algunas consideraciones para la evaluación de los resultados.

En primer lugar, el análisis espectral normado se realiza con un espectro con una aceleración del suelo de aproximadamente $ZS/R=0.088$ g. Por otro lado, la aceleración del suelo en los análisis tiempo – historia es de 0.25 g. Por tanto, el análisis tiempo historia sería aproximadamente 2.83 veces la magnitud del análisis espectral. En consecuencia, el cociente TH/Espectral esperado será de 2.83 sin considerar la sobrerresistencia y de 1.42 considerando una sobrerresistencia $\Omega =2$.

A continuación se presentan los resultados del comportamiento sísmico de la edificación, en términos de las fuerzas en la base, desplazamientos máximos y derivas. Como se observa en las siguientes tablas, los resultados del análisis espectral son menores en por lo menos 1.8 veces a los resultados del análisis tiempo-historia.

Tabla 5: Resultados del análisis sísmico espectral y tiempo-historia. Fuente: Propia.

	Análisis espectral		Análisis Tiempo-Historia					
			Lima 74		Lima 66		Lima 70	
	XX	YY	XX	YY	XX	YY	XX	YY
Fuerza cortante basal (ton)	299	317	761	801	1128	731	679	965
Momento volcante (ton.m)	5980	6627	10516	12703	17619	11319	14027	11714
Desplazamiento máximo (cm)	23.3	22.0	10.0	9.7	14.15	9.39	8.35	12.97
Deriva máxima (m/m)	0.0070	0.0067	0.0087	0.0100	0.0047	0.0039	0.0073	0.0106

A partir de estos resultados, se pueden obtener cocientes de comparación entre los resultados promedio y máximo del análisis tiempo – historia y los resultados del análisis espectral, tal como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 6: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en el edificio. Fuente: Propia.

	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	XX	YY	XX	YY
Fuerza cortante basal	2.86	2.63	1.43	1.31
Momento volcante	2.35	1.80	1.18	0.90

Tabla 7: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en el edificio. Fuente: Propia.

	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	XX	YY	XX	YY
Fuerza cortante basal	3.77	3.05	1.88	1.52
Momento volcante	2.95	1.92	1.47	0.96

De ahí se obtiene que el cociente T-H promedio/Espectral se encuentra entre 2.86 y 1.80, siendo el valor medio 2.41. Así también, al considerar sobrerresistencia, el coeficiente se encuentra entre 1.43 y 0.90; siendo el valor medio 1.21. En adición, el cociente T-H máximo/Espectral se encuentra entre 3.77 y 1.92, siendo el valor medio 2.92. Así también, al considerar sobrerresistencia, el coeficiente se encuentra entre 1.88 y 0.96; siendo el valor medio 1.46.

Así también, se presenta los resultados obtenidos en las fuerzas internas de las vigas mencionadas.

Estas tablas muestran los coeficientes entre los resultados del análisis tiempo-historia promedio y tiempo historia máximos y los resultados del análisis espectral, en función de los momentos flectores positivos (debajo) y negativos (encima) obtenidos a 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, y el total de la luz libre de cada tramo de la viga. Cabe resaltar que debido a la gran variación de los valores de coeficientes en la mitad de cada tramo, no se consideró a estos en la estimación de coeficientes promedio por tramo.

Como se observará en las siguientes tablas, el valor del coeficiente T-H Promedio/Espectral y T-H Máximo/Espectral fluctúa entre 1.8 y 3.1, al igual que los valores de los promedios por cada tramo. Sin embargo sigue obedeciendo al orden de magnitud estimado.

Viga VT-26, sentido XX

Tabla 8: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-26. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	2.18	2.17	2.12	2.31	2.31	1.93	2.04	2.05	2.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.31	2.31	2.26	2.18	2.18	1.79	2.01	2.02	2.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	2.12	2.12	2.14	2.20	2.20	1.92	2.00	2.18	2.17	2.08	2.09	2.09	2.09	2.09	0.00
	2.20	2.20	2.15	2.12	2.12	1.88	1.94	2.13	2.12	2.02	2.12	2.12	2.12	2.12	0.00
2	2.01	2.01	2.07	2.32	2.32	2.02	1.97	1.99	2.30	2.19	1.98	1.98	1.98	1.98	0.00
	2.32	2.32	2.25	2.01	2.01	1.91	1.97	1.91	2.06	1.99	2.26	2.26	2.26	2.26	0.00

Tabla 9: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-26. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
PROM	2.19	1.85	2.11
MAX	2.32	2.30	2.26

Tabla 10 : Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-26. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	2.89	2.88	2.72	2.70	2.70	2.32	2.66	2.67	2.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.70	2.70	2.63	2.89	2.89	2.06	2.36	2.37	2.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	2.73	2.73	2.77	2.54	2.54	2.14	2.61	2.61	2.57	2.46	2.70	2.70	2.70	2.70	0.00
	2.54	2.54	2.60	2.72	2.72	2.13	2.35	2.75	2.73	2.58	2.46	2.46	2.46	2.46	0.00
2	2.37	2.38	2.70	2.92	2.93	2.27	2.57	2.66	2.93	2.80	2.46	2.46	2.46	2.46	0.00
	2.93	2.93	2.99	2.35	2.36	2.16	2.46	2.46	2.54	2.46	2.80	2.80	2.80	2.80	0.00

Tabla 11: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-26. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
PROM	2.69	2.26	2.61
MAX	2.93	2.93	2.80

Viga VT-21, Sentido XX

Tabla 12: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-2. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	0.00	2.27	2.27	2.08	2.12	2.02	2.02	10.19	2.11	2.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	2.29	2.29	2.05	2.02	2.11	2.11	11.47	2.02	2.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	1.98	1.98	1.98	1.98	2.01	2.00	3.01	2.01	2.08	2.02	2.02	2.02	2.02	0.00
	0.00	2.02	2.02	2.02	2.01	2.01	2.03	2.59	2.01	1.99	1.97	1.97	1.97	1.97	0.00
2	0.00	2.18	2.18	2.18	2.18	1.96	1.96	2.92	2.17	2.21	1.95	1.95	1.95	1.95	0.00
	0.00	1.94	1.94	1.94	1.94	2.16	2.18	2.71	1.96	1.96	2.13	2.13	2.13	2.13	0.00

Tabla 13: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-21. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
PROM	2.06	2.05	2.02
MAX	2.29	2.21	2.13

Tabla 14: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-21. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	0.00	2.62	2.62	2.39	2.37	2.62	2.62	18.09	2.39	2.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	2.81	2.81	2.69	2.62	1.58	1.58	1.61	1.53	1.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	2.37	2.37	2.36	2.34	2.59	2.56	3.53	2.35	2.36	2.62	2.62	2.62	2.62	0.00
	0.00	2.60	2.60	2.60	2.59	1.50	1.56	2.14	1.56	1.53	2.40	2.40	2.40	2.40	0.00
2	0.00	2.76	2.76	2.76	2.76	2.47	2.43	3.35	2.76	2.77	2.51	2.51	2.51	2.51	0.00
	0.00	2.45	2.45	2.45	2.43	1.59	1.61	2.31	1.64	1.66	2.73	2.73	2.73	2.73	0.00

Tabla 15: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-21. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 2
PROM	2.55	2.05	2.57
MAX	2.81	2.77	2.73

Viga VT-34, Sentido YY

Tabla 16: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-34. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	0.00	2.06	2.06	2.06	2.06	2.12	2.13	2.02	1.90	1.91	2.51	2.49	2.29	2.28	2.30
	0.00	2.14	2.14	2.14	2.14	1.91	1.92	2.01	2.10	2.11	2.30	2.29	2.54	2.50	2.52
7	0.00	1.91	1.91	1.91	1.91	1.85	1.85	1.79	1.72	1.72	2.14	2.13	2.10	2.09	2.09
	0.00	1.94	1.94	1.94	1.94	1.73	1.73	1.78	1.84	1.84	2.11	2.10	2.15	2.13	2.12
2	0.00	1.75	1.75	1.75	1.75	1.93	1.94	0.00	1.84	1.85	2.14	2.13	1.91	1.91	1.91
	0.00	1.97	1.97	1.97	1.97	1.86	1.87	0.00	1.91	1.92	1.94	1.93	2.16	2.13	2.13

Tabla 17: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-34. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
PROM	1.96	1.90	2.18
MAX	2.14	2.13	2.52

Tabla 18: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-34. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	0.00	2.56	2.56	2.57	2.57	2.66	2.67	2.54	2.41	2.41	3.11	3.09	2.74	2.72	2.73
	0.00	2.66	2.66	2.66	2.66	2.41	2.41	2.54	2.66	2.66	2.73	2.72	3.13	3.09	3.11
7	0.00	2.45	2.45	2.45	2.45	2.49	2.49	2.39	2.28	2.28	2.68	2.67	2.65	2.63	2.63
	0.00	2.52	2.52	2.52	2.52	2.28	2.28	2.38	2.49	2.49	2.65	2.64	2.69	2.67	2.67
2	0.00	2.07	2.07	2.07	2.07	2.58	2.59	0.00	2.22	2.23	2.65	2.64	2.31	2.28	2.28
	0.00	2.56	2.56	2.56	2.56	2.24	2.25	0.00	2.57	2.57	2.29	2.27	2.70	2.67	2.66

Tabla 19: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-34. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
PROM	2.47	2.44	2.68
MAX	2.66	2.67	3.11

Viga VT-29, Sentido YY

Tabla 20: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-29. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	0.00	2.23	1.99	1.86	1.86	2.31	2.30	2.24	2.21	2.16	2.38	2.38	2.38	2.37	0.00
	0.00	1.98	1.89	2.12	1.99	2.19	2.19	2.35	2.32	2.27	2.25	2.25	1.44	2.25	0.00
7	0.00	2.50	1.66	1.77	2.12	1.98	1.99	1.99	2.00	2.00	2.16	2.15	2.12	2.02	0.00
	0.00	2.36	1.62	1.97	2.31	2.00	2.00	1.95	1.97	1.98	2.06	2.04	2.01	1.96	0.00
2	0.00	2.43	1.38	1.82	2.17	2.11	2.10	24.48	1.52	1.85	2.16	2.14	2.10	2.08	0.00
	0.00	2.24	1.30	1.81	2.35	1.86	1.87	69.48	2.12	2.11	1.91	1.88	1.83	1.82	0.00

Tabla 21: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la viga VT-29. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
PROM	2.10	2.06	2.13
MAX	2.50	2.32	2.38

Tabla 22: Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la viga VT-29. Fuente: Propia.

PISO	TRAMO 1					TRAMO 2					TRAMO 3				
	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L	0L	0.25L	0.5L	0.75L	1L
12	0.00	2.53	2.32	2.16	1.99	2.64	2.64	2.54	2.48	2.35	2.64	2.64	2.64	2.64	0.00
	0.00	2.25	2.15	2.46	2.28	2.45	2.43	2.66	2.65	2.61	2.54	2.54	2.54	2.54	0.00
7	0.00	3.01	2.16	1.93	2.59	2.30	2.30	2.35	2.35	2.36	2.42	2.43	2.44	2.45	0.00
	0.00	2.88	2.13	2.20	2.73	2.36	2.36	2.27	2.28	2.29	2.12	2.09	2.05	2.07	0.00
2	0.00	3.11	1.81	2.09	2.70	2.50	2.50	68.87	2.15	2.15	2.26	2.22	2.19	2.24	0.00
	0.00	2.66	1.77	2.31	2.98	2.16	2.17	122.74	2.50	2.50	2.01	1.96	1.86	2.04	0.00

Tabla 23: Cocientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la viga VT-29. Fuente: Propia.

	TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
PROM	2.49	2.40	2.33
MAX	3.11	2.65	2.64

Finalmente, se presenta los resultados obtenidos en las fuerzas internas de las placas mencionadas.

Estas tablas muestran los coeficientes entre los resultados del análisis tiempo-historia promedio y tiempo historia máximos y los resultados del análisis espectral, en función de los momentos flectores del sentido primario (M3) y del sentido secundario (M2) obtenidos en cada piso.

PL7

Tabla 24: : Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la placa PL7 (trabaja en XX e YY) Fuente: Propia.

PL7	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (sin sobrerresistencia)				Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)			
	XX		YY		XX		YY	
	M2	M3	M2	M3	M2	M3	M2	M3
AZOTEA	3.20	3.51	2.27	2.03	1.60	1.76	1.13	1.02
PISO 14	3.65	3.14	1.83	2.57	1.83	1.57	0.91	1.29
PISO 13	3.76	3.11	1.94	2.67	1.88	1.55	0.97	1.34
PISO 12	3.95	2.96	2.02	2.73	1.97	1.48	1.01	1.36
PISO 11	3.94	2.89	2.11	2.83	1.97	1.45	1.05	1.42
PISO 10	4.06	3.02	2.22	2.93	2.03	1.51	1.11	1.46
PISO 9	4.01	3.01	2.31	2.97	2.00	1.50	1.15	1.48
PISO 8	3.95	2.90	2.28	2.99	1.98	1.45	1.14	1.49
PISO 7	3.82	2.77	2.13	3.03	1.91	1.38	1.06	1.52
PISO 6	3.56	2.61	1.91	3.16	1.78	1.30	0.95	1.58
PISO 5	3.15	2.51	1.71	3.31	1.57	1.25	0.86	1.66
PISO 4	2.91	2.36	1.53	3.68	1.45	1.18	0.76	1.84
PISO 3	2.87	2.21	1.40	3.75	1.43	1.10	0.70	1.87
PISO 2	3.06	2.22	1.37	3.85	1.53	1.11	0.69	1.93
PISO 1	3.44	2.26	1.47	3.81	1.72	1.13	0.73	1.91
SOTANO	3.29	2.27	1.48	3.66	1.65	1.13	0.74	1.83
CISTERNA	2.44	2.28	1.47	2.92	1.22	1.14	0.74	1.46

Para la estimación de coeficientes máximos de esta placa, se ha tomado en cuenta los coeficientes de los momentos primarios y secundarios. Ambos son relevantes debido a que la placa trabaja en 2 direcciones.

Tabla 25: Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la placa PL7 (en XX e YY)
Fuente: Propia.

	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	XX	YY	XX	YY
Max	4.06	3.85	2.03	1.93
Prom	3.09	2.48	1.54	1.24

Tabla 26 : Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la placa PL7 (en XX e YY)
Fuente: Propia.

PL7	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (sin sobrerresistencia)				Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)			
	XX		YY		XX		YY	
	M2	M3	M2	M3	M2	M3	M2	M3
AZOTEA	3.78	3.93	3.55	2.97	1.89	1.96	1.77	1.48
PISO 14	4.12	3.79	2.35	3.73	2.06	1.89	1.18	1.86
PISO 13	4.46	3.82	2.72	4.07	2.23	1.91	1.36	2.03
PISO 12	4.65	3.66	2.91	4.16	2.32	1.83	1.46	2.08
PISO 11	4.63	3.58	2.94	4.13	2.32	1.79	1.47	2.06
PISO 10	4.84	3.51	3.11	4.09	2.42	1.75	1.56	2.05
PISO 9	4.96	3.27	3.13	3.99	2.48	1.64	1.56	2.00
PISO 8	4.97	2.94	2.92	4.11	2.48	1.47	1.46	2.05
PISO 7	4.76	2.90	2.86	4.41	2.38	1.45	1.43	2.20
PISO 6	4.27	2.98	2.63	5.06	2.13	1.49	1.32	2.53
PISO 5	3.51	2.92	2.26	5.76	1.76	1.46	1.13	2.88
PISO 4	3.18	2.74	2.03	6.26	1.59	1.37	1.02	3.13
PISO 3	3.19	2.52	1.88	6.00	1.59	1.26	0.94	3.00
PISO 2	3.35	2.64	1.85	6.08	1.68	1.32	0.93	3.04
PISO 1	3.82	2.80	1.92	6.09	1.91	1.40	0.96	3.04
SOTANO	3.57	2.86	2.02	5.80	1.78	1.43	1.01	2.90
CISTERNA	2.75	2.81	2.09	4.14	1.37	1.40	1.05	2.07

Tabla 27: Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la placa PL7 (en XX e YY)
Fuente: Propia.

	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	XX	YY	XX	YY
Max	4.97	6.26	2.48	3.13
Prom	3.60	3.65	1.80	1.82

PL9

En este caso, para la estimación de valores máximos y promedio de coeficientes de comparación, sólo se tendrá en consideración los momentos principales (M3) debido a que la placa sólo trabaja en una dirección.

Tabla 28 : Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la placa PL9 (en YY)
Fuente: Propia.

PL9	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	YY		YY	
	M2	M3	M2	M3
AZOTEA	---	---	---	---
PISO 14	---	---	---	---
PISO 13	---	---	---	---
PISO 12	---	---	---	---
PISO 11	3.13	2.50	1.57	1.25
PISO 10	3.37	2.28	1.69	1.14
PISO 9	3.56	2.11	1.78	1.06
PISO 8	3.63	2.17	1.82	1.08
PISO 7	3.70	2.23	1.85	1.11
PISO 6	3.78	2.28	1.89	1.14
PISO 5	3.76	2.36	1.88	1.18
PISO 4	3.52	2.40	1.76	1.20
PISO 3	3.44	2.37	1.72	1.18
PISO 2	3.75	2.27	1.88	1.14
PISO 1	4.53	2.29	2.26	1.14
SOTANO	2.38	2.27	1.19	1.13

Tabla 29: Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la placa PL9 (en YY)
Fuente: Propia.

	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (sin sobrerresistencia)	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)
	YY	YY
Max	2.50	1.25
Prom	2.29	1.15

Tabla 30 : Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la placa PL9 (en YY).
Fuente: Propia.

PL9	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	YY		YY	
	M2	M3	M2	M3
AZOTEA	---	---	---	---
PISO 14	---	---	---	---
PISO 13	---	---	---	---

PISO 12	---	---	---	---
PISO 11	4.04	2.95	2.02	1.48
PISO 10	4.09	2.64	2.05	1.32
PISO 9	4.32	2.23	2.16	1.11
PISO 8	4.16	2.22	2.08	1.11
PISO 7	4.02	2.46	2.01	1.23
PISO 6	4.53	2.56	2.27	1.28
PISO 5	5.01	2.53	2.51	1.27
PISO 4	5.13	2.55	2.56	1.27
PISO 3	4.90	2.60	2.45	1.30
PISO 2	5.18	2.53	2.59	1.26
PISO 1	6.08	2.54	3.04	1.27
SOTANO	2.56	2.53	1.28	1.27

Tabla 31: Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la placa PL9 (trabaja YY).
Fuente: Propia.

	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (sin sobrerresistencia)	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)
	YY	YY
Max	2.95	1.48
Prom	2.53	1.26

PL10

Tambien en este caso, para la estimación de valores máximos y promedio de coeficientes de comparación, sólo se tendrá en consideración los momentos principales (M3) debido a que la placa sólo trabaja en una dirección.

Tabla 32 : Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia promedio y los resultados del análisis Espectral en la placa PL10 (en XX).
Fuente: Propia.

PL10	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	XX		XX	
	M2	M3	M2	M3
AZOTEA	---	---	---	---
PISO 14	2.15	2.49	1.07	1.24
PISO 13	2.19	2.81	1.10	1.41
PISO 12	2.22	2.91	1.11	1.46
PISO 11	2.23	2.92	1.12	1.46
PISO 10	2.21	2.90	1.10	1.45
PISO 9	2.19	2.90	1.10	1.45
PISO 8	2.14	2.87	1.07	1.43
PISO 7	2.05	2.79	1.03	1.40
PISO 6	2.02	2.74	1.01	1.37
PISO 5	2.07	2.60	1.04	1.30
PISO 4	2.12	2.49	1.06	1.25

PISO 3	2.11	2.36	1.06	1.18
PISO 2	2.33	2.33	1.16	1.16
PISO 1	2.54	2.38	1.27	1.19
SOTANO	2.09	2.50	1.04	1.25
CISTERNA	2.10	2.52	1.05	1.26

Tabla 33: Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia promedio y el análisis Espectral en la placa PL10 (trabaja XX)

	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (sin sobrerresistencia)	Cociente T-H PROMEDIO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)
	XX	XX
Max	2.92	1.46
Prom	2.66	1.33

Tabla 34 : Cocientes de comparación entre los resultados del análisis Tiempo-Historia máximo y los resultados del análisis Espectral en la placa PL10 (en XX)

PL10	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (sin sobrerresistencia)		Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)	
	XX		XX	
	M2	M3	M2	M3
AZOTEA	---	---	---	---
PISO 14	2.24	3.07	1.12	1.53
PISO 13	2.25	3.26	1.12	1.63
PISO 12	2.26	3.44	1.13	1.72
PISO 11	2.31	3.41	1.15	1.70
PISO 10	2.22	3.38	1.11	1.69
PISO 9	2.24	3.27	1.12	1.64
PISO 8	2.22	3.08	1.11	1.54
PISO 7	2.15	2.84	1.08	1.42
PISO 6	2.16	3.04	1.08	1.52
PISO 5	2.26	3.11	1.13	1.56
PISO 4	2.34	3.03	1.17	1.51
PISO 3	2.27	2.82	1.14	1.41
PISO 2	2.48	2.88	1.24	1.44
PISO 1	2.77	3.09	1.39	1.54
SOTANO	2.42	2.90	1.21	1.45
CISTERNA	2.44	2.92	1.22	1.46

Tabla 35: Coeficientes máximos y promedio de la comparación entre el análisis Tiempo-Historia máximo y el análisis Espectral en la placa PL10 (enXX)

	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (sin sobrerresistencia)	Cociente T-H MÁXIMO/Espectral (con sobrerresistencia $\Omega =2$)
	XX	XX
Max	3.44	1.72
Prom	3.10	1.55

Capítulo IV: Discusión de resultados y conclusiones

1. Discusión de resultados

1.1 Comportamiento sísmico del edificio

Como se observa en las tablas de resultados, los cocientes no corresponden a un valor determinado, sino que varían conforme a las características del edificio. En efecto, debido a que el edificio es irregular y presenta alta tendencia a la torsión (lo cual se puede verificar en el porcentaje de masa participativa de los modos de vibración torsional), tanto para el eje X y el eje Y, la no uniformidad de resultados causa que los valores promedio sean menores al valor estimado en el acápite anterior (coeficientes menores a 2.83). Sin embargo, se observa que los valores máximos son mayores al coeficiente estimado (mayores a 2.83).

Cabe resaltar que estos valores intentan reflejar el comportamiento general del edificio, y que probablemente sean los más cercanos a proporcionar información adecuada sobre el comportamiento de la estructura frente a sismos frecuentes. Así mismo, es relevante adelantar que estos representan aproximadamente a la gran infinidad de cocientes obtenidos en los diversos elementos estructurales. Por tanto, es válido estimar que los valores de cocientes de comparación de la estructura sean:

Tabla 36: Cocientes estimados característicos de la estructura. Fuente: Propia.

Cociente T-H PROMEDIO / Espectral (sin sobrerresistencia)	2.41
Cociente T-H MÁXIMO / Espectral (sin sobrerresistencia)	2.92
Cociente T-H PROMEDIO / Espectral (con sobrerresistencia $\Omega = 2$)	1.21
Cociente T-H MÁXIMO / Espectral (con sobrerresistencia $\Omega = 2$)	1.46

Finalmente, es necesario observar que los cocientes obtenidos de la sobrerresistencia probable son mayores a 1, lo cual significa que el edificio incursiona en deformaciones inelásticas para asumir la demanda de los sismos frecuentes.

En otras palabras, presenta un comportamiento histerético para asumir la cantidad energética inducida por un sismo frecuente.

1.2 Vigas

En este caso, como se observa en las tablas de resultados, es posible obtener una gran variedad de cocientes característicos de cada sección de las vigas. De hecho, es posible estimar valores promedio y máximos afrontando el hecho de que las condiciones de análisis determina que ciertas secciones no formen momentos flectores (apoyos simples, que tienen poca capacidad de absorber momentos positivos o negativos). Este hecho le atribuye cierta incertidumbre a los valores obtenidos, los cuales sin embargo siguen teniendo cierta representatividad

estructural ya que se asemejan bastante bien con los cocientes obtenidos a partir del comportamiento sísmico del edificio.

Sin embargo, no es posible determinar un valor promedio o máximo determinado para las vigas en general. Por el contrario, se puede estimar un cociente a cargo de considerar que no necesariamente representa el comportamiento real de cada sección a partir de una tabulación de valores promedio y valores máximos.

Tabla 37: Cocientes estimados característicos de las vigas. Fuente: Propia.

Cociente T-H PROMEDIO / Espectral (sin sobrerresistencia)	2.17
Cociente T-H MÁXIMO / Espectral (sin sobrerresistencia)	2.64
Cociente T-H PROMEDIO / Espectral (con sobrerresistencia $\Omega = 2$)	1.09
Cociente T-H MÁXIMO / Espectral (con sobrerresistencia $\Omega = 2$)	1.32

Cabe resaltar que en función a la sobrerresistencia habría un comportamiento ligeramente diferente en contraste con los cocientes obtenidos del análisis realizados debido a que las secciones presentan una resistencia característica uniforme distribuida a lo largo de la sección (también conocida como diagrama de resistencias) la cual obedece a un patrón de armado de la viga en la cual habrá secciones que presenten una resistencia mayor (o mucho mayor) a la demanda).

Finalmente, tal como se observó en la sección anterior, los cocientes obtenidos de la sobrerresistencia probable son mayores a 1, lo cual significa que las vigas incursionan en deformaciones inelásticas para asumir la demanda de los sismos frecuentes.

1.3 Placas

Para el caso de las placas, se puede verificar que, así como las vigas, cada sección puede presentar un coeficiente característico, causando que exista problemas de incertidumbre al estimar un cociente significativo para la sección. Y así como en las vigas, se puede estimar un cociente a cargo de considerar que no necesariamente representa el comportamiento real de cada sección a partir de una tabulación de valores promedio y valores máximos.

Tabla 38: Cocientes estimados característicos de las placas. Fuente: Propia.

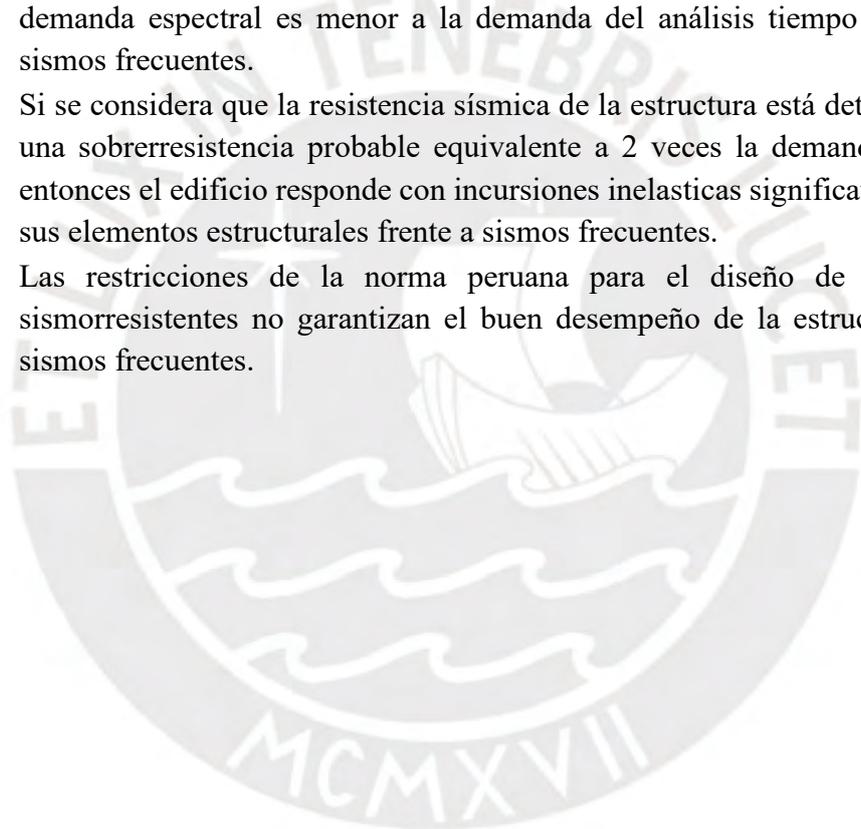
Cociente T-H PROMEDIO / Espectral (sin sobrerresistencia)	2.83
Cociente T-H MÁXIMO / Espectral (sin sobrerresistencia)	3.56
Cociente T-H PROMEDIO / Espectral (con sobrerresistencia $\Omega = 2$)	1.42
Cociente T-H MÁXIMO / Espectral (con sobrerresistencia $\Omega = 2$)	1.78

Se observa que los coeficientes con valores estimados más desfavorables corresponden a las placas. Ello es debido a que son los elementos estructurales que interactúan directamente con el sismo.

De la misma manera que para las secciones anteriores, se observa que los cocientes obtenidos de la sobrerresistencia probable son mayores a 1, lo cual significa que las placas incursionan en deformaciones inelásticas para asumir la demanda de los sismos frecuentes.

2. Conclusiones

- La demanda estructural de un sismo frecuente es 2.41 aproximadamente veces mayor a la demanda de diseño obtenida del análisis espectral. Por tanto, la demanda espectral es menor a la demanda del análisis tiempo historia para sismos frecuentes.
- Si se considera que la resistencia sísmica de la estructura está determinada por una sobrerresistencia probable equivalente a 2 veces la demanda de diseño, entonces el edificio responde con incursiones inelásticas significativas en todos sus elementos estructurales frente a sismos frecuentes.
- Las restricciones de la norma peruana para el diseño de edificaciones sismorresistentes no garantizan el buen desempeño de la estructura frente a sismos frecuentes.



Bibliografía

1. Carlos G. García Garino, Aníbal E. Mirasso, Mario A. Storti, Miguel E. Tornello. Mecánica Computacional Vol XXXII. Comportamiento del hormigón bajo cargas dinámicas (2013), págs. 3341-3365
2. Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la vivienda (Perú) (2018). Concreto Armado: Norma técnica de edificación E.060
3. Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la vivienda (Perú) (2018). Diseño Sismorresistente: Norma técnica de edificación E.030
4. Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la vivienda (Perú) (2018). Cargas: Norma técnica de edificación E.020
5. San Bartolomé, A. & Pontificia Universidad Católica del Perú. (1998). Análisis de edificios. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú Fondo Editorial.
6. Ottazzi P. G. A., & Pontificia Universidad Católica del Perú. (2017). Apuntes del curso: Concreto Armado 1. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú Fondo Editorial.
7. Ottazzi P. G. A., & Pontificia Universidad Católica del Perú. (2017). Apuntes del curso: Análisis estructural 1. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú Fondo Editorial.
8. Blanco, B. A. & Colegio de Ingenieros del Perú. (1990). Estructuración y diseño de edificaciones de concreto armado.
9. INDECI. Compendio estadístico de prevención y atención de desastres. Sismos ocurridos en el Perú a través del tiempo. (2006)
10. V. Bertero, Vitelmo. Comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado. (1995)
11. López, Oscar. Banco de desarrollo de América Latina. Guía para la evaluación de edificaciones existentes con fines de adecuación sísmica. (2014)
12. Gallego, Mauricio. El concreto y los terremotos. (2013)
13. American Concrete Institute. (2019). ACI 318-19 “Building Code requirements for reinforced concrete”.
14. Giovambattista, A. “HORMIGÓN, materiales, vida útil y criterios de conformidad y su consideración en el reglamento CIRSOC 201-2005”.