

Comportamiento sísmico de edificaciones con sótanos en la selva peruana, región Loreto

Seismic behavior of buildings with basements in the peruvian jungle, Loreto region

Recibido: 16 de septiembre de 2022 | Revisado: 03 de noviembre de 2022 | Aceptado: 10 de noviembre de 2022

Amador Pinedo García¹
Duber Enrique Soto Vasquez²

Abstract

The aim of this investigation was to determine if the buildings with basements, affect the seismic behavior, in buildings located in the Peruvian jungle of the Loreto Region, with emphasis on the variation of efforts in the main frames, and the seismic response. buildings were analyzed five(5) stories high with no basements, and with three different levels of basements, 1, 2 and 3, located in the Loreto Region, and its Provinces. according to their seismic and geotechnical conditions of its territorial area. The buildings were modeled in the ETABS V2016 computer program. The results referred to the seismic response showed that the floor shear distribution in buildings with basements were lower on average 32.94% than the buildings that did not present basements, the moments of floor turning in buildings with basements they were lower on average of 23.77% that the buildings that presented basements and mezzanine drifts in buildings with basements were lower on average by 6.85% than those buildings that presented basements. Regarding the main efforts, the basements decreased the efforts in the buildings, in 43.97% and 43.66% in the shear stresses and bending moments respectively. The strengths in the structural elements, the incorporation of basement structures decreases forces. In buildings with five floors and three levels of basements, seismic force increases.

Keywords: Basement structure, seismic behavior, vibration periods, internal forces, shear force.

Resumen

El objetivo de esta investigación fue determinar si las edificaciones con sótanos, afectan al comportamiento sísmico, en edificaciones ubicadas en la Selva Peruana de la Región Loreto, con énfasis en la variación de esfuerzos en los pórticos principales, y la respuesta sísmica. Se analizó edificios de cinco (5) pisos de altura sin sótanos, y con tres distintos niveles de sótanos, 1, 2 y 3, ubicados en la Región Loreto, y sus Provincias. De acuerdo a sus condiciones sísmicas y geotécnicas de su área territorial. Los edificios fueron modelados en el programa computacional ETABS V2016. Los resultados referidos a la respuesta sísmica mostraron que la distribución de corte de piso en las edificaciones con sótanos fueron menores en promedio del 32.94% que las edificaciones que no presentaron sótanos, los momentos de volteo de piso en las edificaciones con sótanos fueron menores en promedio del 23.77% que las edificaciones que presentaron sótanos y las derivas de entrepiso en las edificaciones con sótanos fueron menores en promedio del 6.85% que las edificaciones que presentaron sótanos. Respecto a los esfuerzos principales, los sótanos disminuyeron los esfuerzos en las edificaciones, en 43.97% y 43.66% en los esfuerzos de corte y momentos flectores respectivamente. Las fuerzas en los elementos estructurales, la incorporación de las estructuras de sótanos disminuye las fuerzas. En los edificios de cinco pisos y tres niveles de sótanos, se incrementa la fuerza sísmica.

Palabras Clave: Estructura de sótanos, edificio aporticado, fuerza sísmica, periodos de vibración.

Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International



¹ Escuela Universitaria de Posgrado – UNFV. Lima, Perú
Correo: amadorpigar@hotmail.com

² Escuela Universitaria de Posgrado – UNFV. Lima, Perú
Correo: dsoto@unfv.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0001-5855-7045>

<https://doi.org/10.24039/rcvp2022121641>

Introducción

Uno de los temas actuales más discutidos en la ingeniería sísmica es respecto sobre el análisis, diseño y comportamiento sísmico de edificaciones con sótanos, donde surge la controversia de incorporar o no estos sótanos en los respectivos análisis y diseños sísmicos, para poder analizar correctamente los efectos de estos sótanos en la respuesta sísmica de las estructuras. Esto ha conllevado en la última década a generar diversas investigaciones para determinar la incidencia de estos sótanos en los análisis y diseños sísmicos de edificaciones y viviendas.

La Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud (OMS), La Organización Panamericana de la Salud – OPS (2021), en sus documentos estratégicos de la OPS/OMS menciona:

Un terremoto puede ser definido como un temblor en la tierra causado por ondas moviéndose causando: fallas de la superficie, temblores vibratorios, licuefacción, derrumbes, temblores y/o tsunamis. A nivel mundial, más un millón de sismos ocurren mundialmente, resultando en un promedio de dos sismos por minuto. Un terremoto de gran magnitud en una zona urbana es uno de los peores desastres naturales que pueden ocurrir. Durante las últimas cuatro décadas (1970-2017), los terremotos han causado más de un millón de fatalidades a nivel mundial en Armenia, China, Ecuador, Guatemala, Haití, Irán, India, Indonesia, Japón, México, Pakistán, Perú y Turquía. La desmesurada urbanización en diversas partes sísmicamente activas del mundo, da resultado a mega ciudades con densidades poblacionales de 20 000 a 60 000 hab/km². Dichas ciudades son altamente vulnerables a los efectos negativos de los terremotos, tales como la alta tasa de letalidad causada por trauma, asfixia, hipotermia e insuficiencia respiratoria aguda, además de las lesiones y/o fracturas por destrucción de infraestructura. (Sección Terremotos)

En comunicado de prensa, el Perú refuerza su capacidad de respuesta ante los desastres naturales con apoyo del BID (2013):

Debido a su ubicación geográfica y a diversos factores sociales, económicos y demográficos, el Perú se halla sumamente expuesto a numerosas amenazas de desastres naturales, como terremotos con alto potencial de daños. De hecho, el Perú ha sido calificado como uno de los países más vulnerable del hemisferio frente a las múltiples amenazas naturales y ocupa el vigésimo lugar

entre los países económicamente más activos del mundo en lo atinente a la vulnerabilidad frente a tres o más sucesos naturales adversos.

El Secretario General Adjunto de la OEA, Méndez (2021), manifestó:

Ayer tuvimos la oportunidad de recibir la disertación del Presidente Ejecutivo del Instituto Geofísico del Perú, Doctor Hernando Tavera, para dar sustento científico al escenario planteado en este ejercicio, que es un sismo de gran magnitud. Se habló de la potencialidad sísmica de la Costa Oeste de las Américas, es decir que este supuesto escenario para el ejercicio no solo sería para Perú, sino que puede suceder en cualquier país que se encuentra en esta parte de la Costa Oeste de las Américas, para lo cual debemos estar preparados. Las Américas es una región especialmente expuesta a terremotos por su ubicación cercana a placas tectónicas en movimiento y ha sufrido el efecto de grandes sismos a lo largo de su historia. Tenemos el terremoto de mayor magnitud registrado en el mundo que tuvo lugar en la ciudad de Valdivia en Chile en 1960, dejando a más de 2 000 muertos y dos millones de personas damnificadas. También recordamos con mucha tristeza el sismo que sacudió a Haití en enero del 2010, que dejó más de 300 000 muertos. (párr. 13)

Acedo (2012) realizó un análisis y diseño sísmico estructural de un edificio destinado a oficinas de 07 pisos y 02 sótanos ubicado en el distrito de Miraflores el cual encontró sobre un terreno de perfil tipo S1. El sistema de techos estuvo conformado por losas macizas en dos direcciones para los sótanos. Se obtuvieron las siguientes conclusiones: Las columnas que reciben más carga axial se acortan más en comparación a las que reciben menos carga. Durante el proceso constructivo el acortamiento diferencial se va corrigiendo en cada operación de vaciado de techo. Para simular esta corrección producto del proceso constructivo fue necesario emplear un factor de área para las columnas con el fin de hacerlas más rígidas axialmente. Para iniciar el análisis sísmico se debió asumir un valor de factor de reducción $R=6$, por tener una edificación en cuyo sistema estructural predominan los muros de corte en ambas direcciones; además de considerarla regular. Luego de realizar el análisis correspondiente se corroboraron ambas suposiciones, el edificio posee una configuración estructural regular tanto en planta como en altura y los muros de corte tomaron más del 80% de la fuerza lateral de sismo. Se utilizó el proveniente del análisis dinámico, pero se escalaron sus valores para lograr el 90 % del cortante estático. En cuanto al diseño por corte de las vigas, en la mayoría de los casos, el espaciamiento de los estribos está gobernado por las reglas de confinamiento para vigas sismo resistente.

Tafur (2012) realizó un estudio acerca del análisis sísmico de una edificación de seis pisos y un sótano, para comprobar que el sistema sismo resistente del edificio cumpla con los requisitos especificados en la Norma E.030 del RNE. El sistema estructural del edificio estuvo conformado por placas (muros de corte), columnas y vigas. Para los techos se usaron losas aligeradas armadas en un sentido y losas macizas armadas en dos sentidos, las cuales además funcionan como diafragmas rígidos en cada piso del edificio. Dicho estudio llegó a las siguientes conclusiones: es importante verificar que el valor asumido para el coeficiente de reducción "R", sea consecuente con los porcentajes de fuerza cortante que se llevan los muros de corte. Es importante señalar que el empuje del suelo en el diseño de muros de sótano y calzaduras debe ser estimado con mucho criterio, ya que este parámetro es muy variable, y la teoría de Rankine estudiada en este trabajo es aplicable sólo a suelo granulares y secos. Además, el aporte de la cohesión aparente del suelo también deberá ser tomado con cuidado, ya que su valor depende mucho de las condiciones reales del suelo. Por ello, es importante que en obra se tome las medidas del caso ante cualquier hecho imprevisto. En los últimos años, en la ciudad de Lima se ha visto muchos casos donde este tipo de accidentes han cobrado gran cantidad de vidas humanas.

Singh y Mala (2016) realizaron una investigación acerca del efecto de los sótanos en la respuesta sísmica de un edificio considerando el efecto de la interacción suelo estructura. Para realizar el estudio se analizó un edificio de 9 pisos, fue modelado en SAP2000 V14 con dos condiciones de base diferentes, es decir, modelo de base fija convencional y modelo de base flexible considerando la interacción suelo-estructura. El edificio de base fija se consideró a nivel del suelo, mientras que la construcción de base flexible estaba conformada por múltiples sótanos. En la investigación se concluyó que tanto para el suelo de arena bien gradada (SW) como para el suelo arenoso con grava (ML), el cortante en planta disminuye en el piso superior y medio, y aumenta en los pisos de fondo. Con el aumento del número de sótanos, el desplazamiento de los pisos aumentó en cada nivel comparado con el de la construcción sin sótanos. El período natural de vibración aumentó al considerar la flexibilidad del suelo lo que resulta en un aumento de la flexibilidad del edificio. Se incrementó la deriva entre pisos en el edificio de base flexible en cada piso comparado con el edificio de base fija. Los desplazamientos del techo también aumentaron al considerar la interacción de la estructura del suelo que a veces causa un efecto adverso sobre la estructura en términos de un gran desplazamiento de los pisos superiores que causa molestias a los ocupantes.

Navya y Karuna (2016) manifestaron que la respuesta sísmica de un edificio con sótanos que incluye la interacción de la estructura del suelo. La estructura

fue modelada con diferentes tipos de suelo. Para el propósito del análisis, se adoptó el método del espectro de respuesta. El software utilizado para el estudio fue SAP2000. Los diferentes modelos considerados son modelo de base fija, Winkler y modelo FEM. En el modelo FEM, el suelo se supuso como continuo elástico lineal, con una profundidad igual a 1,5 veces la base del edificio. Estos autores concluyeron que la fuerza de cizallamiento o corte y el momento de flexión son máximos para el edificio que descansa sobre el suelo blando y mínimo para el edificio que descansa sobre el suelo duro. Cuando se considera los parámetros de desplazamiento y la deriva entrepisos, se observa que el desplazamiento y la deriva entrepisos son máximos para el suelo blando y mínimos para el suelo duro. La magnitud del cizallamiento o cortante de la base se encuentra como mínimo para el modelo FEM y como máximo para el edificio que descansa sobre suelos blandos. Se observó que el periodo de tiempo es máximo para el modelo FEM y máximo para el edificio que descansa en suelo blando.

Parekh et al. (2016) realizaron un análisis a diversas investigaciones enfocadas en el estudio del comportamiento sísmico de edificios con sótanos bajo carga sísmica, concluyendo que se observa la variación de las propiedades dinámicas tales como el período de tiempo natural, el coeficiente de aceleración sísmica, el cizallamiento o cortante de la base y el momento de flexión. La cizalladura o cortante de la base de la estructura aumenta debido al efecto de la interacción suelo estructura. Para suelos blandos el efecto es más en comparación con el suelo duro. Las variaciones porcentuales son menores para el edificio de baja altura y aumenta con el aumento de la altura de los sótanos. El aumento en la flexibilidad del suelo y la altura de los sótanos amplifica el aumento de la cizalla o corte en la tasa más alta. A medida que aumenta el número de pisos en el edificio, la cizalladura o cortante de la base y el desplazamiento aumentan. El método FEM es útil para estudiar el efecto de la estructura del suelo interacción.

KatarmalyShah(2016) investigaron la respuesta sísmica de edificios irregular con sótanos considerando la interacción suelo-estructura. Los edificios son modelados en SAP2000, se utilizan tres tipos de suelo, es decir, suelo duro, medio duro y blando. El suelo es modelado como modelo de resorte o continuo Elástico (FEM) y el modelo de Winkler (modelo de resorte), el análisis se ha realizado para dos casos diferentes uno con base fija sin considerar la interacción suelo-estructura y otro con base flexible considerando la interacción suelo-estructura. Estos autores concluyeron que durante el análisis de la estructura en la base fija en la fundación se sustituye por el resorte o si se modela el suelo como un FEM la respuesta de los cambios de estructura en el caso de suelos blandos la cizalladura o cortante de la base aumenta aprox. 9-30% comparado con el modelo Winkler y FEM. En el caso de suelos blandos, el efecto

del suelo es predominante, por lo que se debe considerar la interacción de la estructura del suelo en caso de suelos blandos en las zonas de terremotos. Se observó que el porcentaje de desplazamiento en la dirección X e Y se incrementa con el aumento de la flexibilidad del suelo. A partir del estudio, se observó que el porcentaje de desplazamiento en la dirección X e Y para FEM es más comparado con los modelos de base fija. A medida que aumenta el número de pisos en el edificio, la cortante de la base y el desplazamiento aumentan. En el caso de suelos blandos, se ha recomendado la interacción de la estructura del suelo a medida que aumenta la altura del edificio. El método FEM es un método útil para estudiar el efecto de la interacción de la estructura del suelo.

La Sismología, es una rama de la geofísica que se encarga del estudio de terremotos y la propagación de las ondas elásticas (sísmicas) que se generan en el interior y la superficie de la Tierra, asimismo que de las placas tectónicas. Estudiar la propagación de las ondas sísmicas incluye la determinación del hipocentro (o foco), la localización del sismo y el tiempo que este haya durado. Un fenómeno que también es de interés es el proceso de ruptura de rocas, ya que este es causante de la liberación de ondas sísmicas.

La sismología incluye, entre otros fenómenos, el estudio de maremotos y marejadas asociadas (tsunamis) y vibraciones previas a erupciones volcánicas. En general los terremotos se originan en los límites de placas tectónicas y son producto de la acumulación de tensiones por interacciones entre dos o más placas. Las placas tectónicas (placas litosféricas) son una unidad estructural rígida, con un espesor de 100 km aproximadamente, que constituye la capa esférica superficial de la tierra, según la teoría de la tectónica de placas (esta teoría explica la particularísima distribución, en zonas alargadas y estrechas, de terremotos, volcanes y cordilleras; así mismo, la causa de la deriva continental).

Los sismos, terremotos o temblores de tierra, son vibraciones de la corteza terrestre, generadas por distintos fenómenos, como la actividad volcánica, la caída de techos de cavernas subterráneas y hasta por explosiones. Sin embargo, los sismos más severos y los más importantes desde el punto de vista de la ingeniería, son los de origen tectónico, que se deben a desplazamientos bruscos de las grandes placas en que está subdividida dicha corteza. Esta vibración de la corteza terrestre la que pone en peligro las edificaciones que sobre ella se desplantan, al ser éstas solicitadas por el movimiento de su base. Por los movimientos vibratorios de las masas de los edificios, se generan fuerzas de inercia que inducen esfuerzos importantes en los elementos de la estructura y que pueden conducirla a las principales características del movimiento de placas y generación de sismos. Mecanismos de subducción. El sismo se genera por el corrimiento de cierta área de contacto entre placas. Se identifica un punto, generalmente subterráneo, que

se denomina foco o hipocentro, donde se considera se inició el movimiento; a su proyección sobre la superficie de la tierra se le llama epicentro (Bazán y Meli, 2005).

Resulta importante verificar el cumplimiento de los principios, teorías y paradigmas fundamentales en el buen comportamiento sísmico de las edificaciones con sótanos en la Selva Peruana, de la Región Loreto, del Perú. Pues ante el mal desempeño sísmico de estructuras sismo resistentes modernas durante eventos sísmicos recientes ha puesto en evidencia que la confiabilidad del análisis y diseño sísmico presenta grandes inconsistencias en estas estructuras que presentan este sistema estructural, lo cual ha enfatizado la necesidad de replantear las metodologías actuales de análisis y diseño sísmico, es por ello que se trató de solucionar estas inconsistencias realizando esta investigación para obtener resultados confiables y aproximados a la realidad, para lograr diseños que no sólo cumplan con las disposiciones mínimas reglamentarias, sino que adicionalmente satisfagan las demandas del cliente en cuanto a tiempo de elaboración del proyecto estructural con suficiente claridad y cantidad de detalles, costo de obra dentro de las expectativas presupuestarias del inversionista, facilidad constructiva para el contratista general, etc.

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de los sótanos en el comportamiento sísmico de los edificios aporticados para vivienda y edificaciones en la Selva Peruana de la Región Loreto, con énfasis en la variación de esfuerzos en los pórticos principales, y la respuesta sísmica, debido a la carencia de especificaciones o recomendaciones en la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E.030 – 2019, sobre cómo se debe considerar la inclusión de los sótanos en el análisis sísmico, del sistema estructural aporticado, para obtener un análisis más preciso acerca del comportamiento sísmico de edificaciones con sótanos.

Materiales y métodos

Se analizó edificios de cinco (5) pisos de altura sin sótanos, y con tres distintos niveles de sótanos, 1, 2 y 3, ubicados en la Región Loreto, y sus Provincias. De acuerdo a sus condiciones sísmicas y geotécnicas de su área territorial. Los edificios fueron modelados en el programa computacional ETABS V2016.

Para el cálculo del comportamiento sísmico se usó el sistema convencional empleando el método analítico teórico fundamentado en diversas teorías, teoremas y leyes de cálculo estructural. Se usó el método automatizado que se expresa en unas hojas de resultados obtenidas del programa computacional ETABS V2016.

Características del edificio: Es una edificación destinada a uso de tiendas comerciales. Se han desarrollado 48 modelos estructurales, en

concordancia con la muestra del estudio, en la que se consideró la zonificación, el tipo de suelo, la altura de la superestructura, y los niveles de la estructura de sótanos. La superestructura de la edificación tuvo una altura de entre piso de 300 metros y un área de 324 m². La estructura del sótano, tuvo una altura de entrepiso de 3.5 metros y un área de 626 m².

a. Materiales utilizados

Las características y propiedades mecánicas de los materiales que se utilizaron se detallan a continuación:

a.1. Concreto Armado

Resistencia a la Compresión Simple: $F'_c = 280$ kg/cm²

Deformación Unitaria Máxima: $\epsilon_{cu} = 0.003$

Módulo de Elasticidad: $E = 250998.01$ kg/cm²

Módulo de Poisson: $\nu = 0.20$

Módulo de Corte: $G = E / (2(1+\nu))$

a.2. Acero de Refuerzo Grado 60

Esfuerzo de Fluencia $F_y = 4200$ kg/cm²

Módulo de Elasticidad $E_s = 2 \times 10^6$ kg/cm

Deformación Unitaria de Fluencia = 0.002

b. Estructuración del edificio

La estructuración consiste en distribuir los elementos estructurales siguiendo una serie de criterios y tomando como base los planos de arquitectura. Es el primer paso que se sigue para diseñar un edificio y uno de los más importantes, ya que de la estructuración dependerá la variabilidad de los resultados del análisis estructural respecto de las fuerzas reales, y también si la predicción del comportamiento de la estructura durante un sismo se acerca a la realidad, por lo que es importante tener una estructuración tan simple como sea posible. Al encontrarnos en un país sísmico, la estructuración de un edificio debe satisfacer dos solicitaciones importantes: las cargas de gravedad y las fuerzas de sismo. Esta debe garantizar la seguridad de las personas que se encuentren dentro de la misma permitiendo un adecuado desempeño durante toda su vida útil.

b.1. Criterios de estructuración y diseño

Mientras más compleja sea la estructura, es más difícil predecir su comportamiento sísmico; por esta razón, es recomendable que la estructura sea lo más simple posible de manera que el análisis sísmico que se realice sea lo más cercano a la realidad (Blasco 1994).

Blanco (1994), señala los principales criterios a tener en cuenta para estructurar un edificio, a continuación, se muestran los más importantes:

Simplicidad y simetría

Se buscó que la edificación sea simple y simetría en su estructuración porque esto ayuda a que tenga un buen desempeño sísmico. Esto es debido a dos motivos principales:

- Los modelos realizados para obtener las solicitaciones en los elementos de un edificio son más precisos en estructuras simples. Cuando se analizan estructuras complejas nos veremos obligados a hacer simplificaciones que nos pueden llevar a resultados que no se adecuan con la realidad.
- La predicción del comportamiento sísmico de una estructura es mucho más cercana a la realidad en edificios simples y simétricos. Un edificio no simétrico generalmente presenta problemas de torsión debido a la excentricidad entre sus centros de masa y rigidez, los cuales son difíciles de cuantificar y pueden aumentar considerablemente los esfuerzos durante un sismo.

Resistencia y Ductilidad

Se verificó que el sistema de resistencia sísmica en por lo menos dos direcciones ortogonales de la estructura, a fin de garantizar su estabilidad.

Uniformidad y Continuidad

Se consideró evitar cambios bruscos en las rigideces de los elementos, tanto en planta como en elevación. Generalmente un cambio en la continuidad genera un comportamiento no deseado, los esfuerzos se concentran en las zonas cuyas dimensiones se reducen causando daños en la estructura.

Rigidez Lateral

Se consideró proveer al edificio de elementos estructurales que aporten rigidez lateral en sus direcciones principales, ya que éstos ayudan a controlar los desplazamientos durante un sismo, y así evitar los daños a las estructuras y elementos no estructurales.

Existencia de diafragmas rígidos

Se consideró la existencia de una losa rígida en su plano, de tal manera que permita considerar a la estructura como una unidad con desplazamientos compatibles entre sí. Como consecuencia de esto se puede distribuir las fuerzas horizontales aplicadas entre los pórticos y placas de acuerdo a su rigidez lateral.

b.2. Estructuración

La estructuración del edificio estuvo compuesta por los elementos estructurales: losas macizas, losas aligeradas, vigas, columnas y muros de concreto armado para la estructura de los sótanos. Así mismo, se consideró dos direcciones principales: una dirección longitudinal X (ejes numéricos) y la otra perpendicular denominada dirección transversal Y (ejes alfabéticos).

Losas

De acuerdo a la longitud de cada paño se optó por el sistema de losa maciza en los pisos de la estructura del sótano; y por una losa aligerada unidireccional en los pisos de la superestructura, al tratarse de un sistema comúnmente usado en el país por presentar menor peso que otro tipo de sistema de losa y además de facilitar las instalaciones eléctricas y sanitarias.

Las losas aligeradas se armaron en la dirección longitudinal "X", teniendo en consideración el sentido de menor longitud del ambiente y tratando de darle continuidad a las mismas. Se utilizó un peralte de 20 cm de acuerdo con la siguiente expresión:

$$h_{losa} = \frac{L}{25} = \frac{500 \text{ cm}}{25} = 20 \text{ cm}$$

Vigas

Son elementos que reciben la carga de las losas, y las transmiten hacia otras vigas o directamente hacia las columnas o muros. Junto a las columnas forman lo que se denominan los pórticos. Las vigas se ubicaron de tal manera que unan las columnas entre sí formando pórticos. Debido a que la planta de los pisos típicos y subterráneos es de forma cuadrada se tiene un comportamiento sísmico igual en ambas direcciones de análisis. Se consideró que las vigas peraltadas tengan las mismas dimensiones en las dos direcciones "X" y "Y" para mantener el diseño arquitectónico del edificio y proporcionar una mayor resistencia al corte y rigidez lateral en ambas direcciones del edificio. El peralte de las vigas de la edificación es de 50 cm y se determinó en función de la luz libre de apoyo utilizando la siguiente expresión:

$$h_{viga} = \frac{L}{10} = \frac{500 \text{ cm}}{10} = 50 \text{ cm}$$

Columnas

Las columnas forman junto con las vigas peraltadas forman pórticos que proporcionan rigidez lateral al edificio. Las columnas están ubicadas y distanciadas de tal manera de formar pórticos y respetando el requerimiento arquitectónico del edificio. Se consideró columnas cuadradas, ya que la simetría de la edificación lo requiere. Se consideró que las columnas de la sub estructura y de la súper estructura tengan la misma dimensión logrando así la continuidad requerida.

Las columnas tuvieron un ancho de 60 cm y un peralte de 60 cm.

Muros de concreto armado en sótanos

Son paredes de concreto armado que, dada su mayor dimensión en una dirección, muy superior a su ancho, proporcionan mayor rigidez lateral y resistencia en esa dirección (Blasco, 1994). Las placas perimetrales distribuidas para los pisos de los sótanos son de 0.25 m de espesor para contrarrestar así las cargas laterales transversales a su plano proveniente del empuje del terreno, cabe recordar que en el análisis sísmico a realizar no se considerara el efecto de la interacción suelo-estructura, por lo que estas placas estas destinadas a soportar cargas gravitacionales y de sismo en ambas direcciones.

Pre dimensionamiento de vigas

Las vigas peraltadas tienen una altura mayor al de la losa. La viga peraltada sirve de apoyo a las losas y transmiten las cargas de estas. En caso de sismo, las vigas peraltadas al formar pórticos colaboran en absorber los esfuerzos inducidos por el movimiento telúrico.

a) Vigas peraltadas

Para pre dimensionar estas vigas, por lo general, se considera como regla práctica usar un del orden de 1/10 ó 1/12 de la luz libre entre apoyos, el cual incluye el espesor de la losa. Para el ancho o base de la viga se debe considerar una longitud mayor que 0,3 del peralte, sin que llegue a ser menor de 25 cm. Teniendo en consideración los criterios anteriores se obtuvo el siguiente pre dimensionamiento de vigas peraltadas, El pre dimensionamiento se realizó en función del tramo de mayor longitud libre de las vigas, según la estructuración propuesta, en las direcciones "X" y "Y", tanto en la sub estructura y súper estructura.

Finalmente, uniformizando las dimensiones de las vigas peraltadas en ambas direcciones se optó por utilizar vigas de 0,30 m x 0,60 m para toda la edificación.

Pre dimensionamiento de Columnas

Las columnas al estar sometidas a carga axial y momento flector, tienen que ser dimensionadas para resistir ambos efectos simultáneamente. Para el pre dimensionamiento se utilizó las siguientes expresiones: Las expresiones anteriores según el autor tienen validez para columnas cargadas con más de 200 ton, en el caso de no cumplir dicho requisito las áreas de las columnas deben fluctuar entre 1 000 y 2 000 cm².

Modelamiento de los edificios

Se realizó el modelamiento de cuarenta y ocho

(48) casos de edificios para realizar el análisis modal espectral según la normativa peruana. Los modelos computacionales de los edificios fueron realizados en el Software ETABS Versión 2016. Las columnas, vigas y losas aligeradas se modelaron con elementos rectangulares tipo Shell y las vigas y columnas con elementos tipo Frame. En los modelos se asumió que todos los elementos presentan un comportamiento lineal elástico.

Resultados

Periodo Fundamental de Vibración

Se muestra a continuación los periodos de vibración de los edificios de tres y cinco niveles. Se presentan los doce periodos de vibración. En relación al edificio de tres niveles los resultados muestran que la incorporación de la estructura de sótanos en la edificación de tres niveles disminuye el periodo de vibración. La estructura de tres niveles sin estructura de sótanos tiene un periodo de 0,330 segundos, mientras que las estructuras con un sótano, dos sótanos y tres sótanos, tienen periodos de 0,297, 0,299 y 0,302 segundos, los cuales representan el 90%, 91% y 92% del periodo del edificio de tres niveles sin estructura de sótanos,

respectivamente. Se observa también que al incrementar la cantidad de sótanos en el modelo estructural el periodo fundamental se va incrementando ligeramente, pero sigue siendo menor al periodo fundamental de la estructura sin sótanos.

En relación al edificio de cinco niveles los resultados muestran que la incorporación de la estructura de sótanos en la edificación de tres niveles disminuye el periodo de vibración. La estructura de cinco niveles sin estructura de sótanos tiene un periodo de 0,546 segundos, mientras que las estructuras con un sótano, dos sótanos y tres sótanos, tienen periodos de 0,514, 0,517 y 0,522 segundos, los cuales representan el 94%, 95% y 96% del periodo del edificio de cinco sin estructura de sótanos, respectivamente.

Fuerza Sísmica

En relación a la respuesta de la fuerza sísmica, se determinó la fuerza cortante según la norma de diseño sismo resistente E.030. La Tabla 1 y Tabla 2 muestran los resultados de la determinación de la fuerza sísmica (fuerza de corte basal o fuerza cortante) para cada modelo computacional. Los resultados son mostrados.

Tabla 1

Fuerza cortante en la base para los modelos computacionales del edificio de tres niveles

Modelo Computacional		Fuerza Sísmica		
		V_{BASAL} (Ton)	R_{Base} (Ton)	$R_{\text{Base}}/V_{\text{BASAL}}$
Modelo 1	Z1 S2 ST0 3N	47.87	43.78	91.46%
Modelo 2	Z1 S3 ST0 3N	59.84	54.73	91.46%
Modelo 3	Z2 S2 ST0 3N	89.76	82.14	91.51%
Modelo 4	Z2 S3 ST0 3N	104.72	95.80	91.48%
Modelo 5	Z3 S2 ST0 3N	120.43	110.16	91.47%
Modelo 6	Z3 S3 ST0 3N	125.66	114.97	91.50%
Modelo 7	Z1 S2 ST1 3N	123.78	113.04	91.32%
Modelo 8	Z1 S3 ST1 3N	154.72	141.17	91.24%
Modelo 9	Z2 S2 ST1 3N	232.08	211.84	91.28%
Modelo 10	Z2 S3 ST1 3N	270.76	247.09	91.26%
Modelo 11	Z3 S2 ST1 3N	311.38	284.21	91.27%
Modelo 12	Z3 S3 ST1 3N	324.92	296.58	91.28%
Modelo 13	Z1 S2 ST2 3N	189.18	175.67	92.86%
Modelo 14	Z1 S3 ST2 3N	236.48	219.39	92.78%
Modelo 15	Z2 S2 ST2 3N	354.71	329.22	92.81%
Modelo 16	Z2 S3 ST2 3N	413.83	384.00	92.79%
Modelo 17	Z3 S2 ST2 3N	475.91	441.68	92.81%
Modelo 18	Z3 S3 ST2 3N	496.60	460.91	92.81%
Modelo 19	Z1 S2 ST3 3N	254.82	235.75	92.52%
Modelo 20	Z1 S3 ST3 3N	318.52	294.43	92.44%
Modelo 21	Z2 S2 ST3 3N	477.78	441.82	92.47%
Modelo 22	Z2 S3 ST3 3N	557.41	515.34	92.45%
Modelo 23	Z3 S2 ST3 3N	641.02	592.74	92.47%
Modelo 24	Z3 S3 ST3 3N	668.89	618.55	92.47%

Nota. Resultados de las fuerzas sísmicas del edificio de tres niveles.

Tabla 2

Fuerza cortante en la base para los modelos computacionales del edificio de cinco niveles

Modelo Computacional		Fuerza Sísmica		
		V _{BASAL} (Ton)	R _{Base} (Ton)	R _{Base} /V _{BASAL}
Modelo 25	Z1 S2 ST0 5N	82.70	72.80	88.03%
Modelo 26	Z1 S3 ST0 5N	103.38	91.00	88.03%
Modelo 27	Z2 S2 ST0 5N	155.06	136.57	88.07%
Modelo 28	Z2 S3 ST0 5N	180.91	159.28	88.05%
Modelo 29	Z3 S2 ST0 5N	208.04	183.16	88.04%
Modelo 30	Z3 S3 ST0 5N	217.09	191.17	88.06%
Modelo 31	Z1 S2 ST1 5N	170.22	153.60	90.24%
Modelo 32	Z1 S3 ST1 5N	212.77	191.83	90.16%
Modelo 33	Z2 S2 ST1 5N	319.16	287.86	90.19%
Modelo 34	Z2 S3 ST1 5N	372.35	335.76	90.17%
Modelo 35	Z3 S2 ST1 5N	428.20	386.20	90.19%
Modelo 36	Z3 S3 ST1 5N	446.82	403.01	90.19%
Modelo 37	Z1 S2 ST2 5N	195.52	180.81	92.48%
Modelo 38	Z1 S3 ST2 5N	244.40	225.81	92.40%
Modelo 39	Z2 S2 ST2 5N	366.59	338.85	92.43%
Modelo 40	Z2 S3 ST2 5N	427.69	395.24	92.41%
Modelo 41	Z3 S2 ST2 5N	491.84	454.61	92.43%
Modelo 42	Z3 S3 ST2 5N	513.23	474.39	92.43%
Modelo 43	Z1 S2 ST3 5N	301.26	276.14	91.66%
Modelo 44	Z1 S3 ST3 5N	376.57	344.86	91.58%
Modelo 45	Z2 S2 ST3 5N	564.86	517.50	91.62%
Modelo 46	Z2 S3 ST3 5N	659.00	603.61	91.60%
Modelo 47	Z3 S2 ST3 5N	757.85	694.28	91.61%
Modelo 48	Z3 S3 ST3 5N	790.80	724.50	91.62%

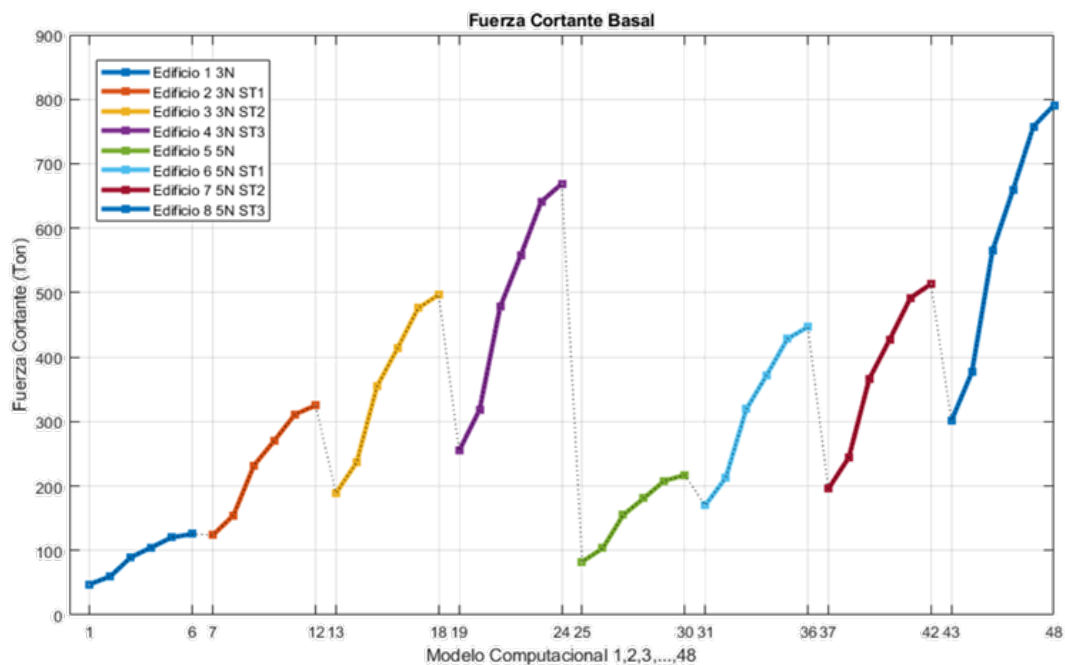
Nota. Resultados de las fuerzas sísmicas del edificio de cinco niveles.

El desempeño sísmico insatisfactorio de algunas estructuras diseñadas conforme a reglamentos modernos ha preocupado al medio de la ingeniería estructural. Esto ha cobrado importancia a partir de las grandes pérdidas materiales y económicas consecuencia de eventos sísmicos recientes. Cada edificio que

se construye debe satisfacer múltiples y complejas necesidades socioeconómicas; lo que implica que el daño en sus elementos estructurales y no estructurales, así como en sus contenidos, debe ser cuidadosamente controlado.

Figura 1

Fuerza cortante en la base para los modelos computacionales del edificio de cinco niveles



Nota. Resultados de la determinación de la fuerza sísmica, para cada modelo computacional, los resultados de la fuerza de corte basal van incrementando según los parámetros sísmicos.

Discusión

1. Respetto a la Fuerza Sísmica

La incorporación de las estructuras de sótano genera un incremento de las fuerzas sísmicas de cortante en las edificaciones. Dichas fuerzas sísmicas son asumidas por las estructuras de sótano. Las estructuras de sótanos incrementan considerablemente el peso de la edificación, generando que las fuerzas sísmicas en cada piso se incrementen, a esto se suma que el tipo de suelo y la peligrosidad sísmica establecida en la norma E.030 también influyen en la magnitud de la fuerza sísmica, es decir, las fuerzas sísmicas se incrementan con la disminución de la calidad del suelo y se incrementan en lugares con mayor riesgo sísmico (Bazán y Meli, 2005).

En la investigación, los resultados muestran que la fuerza de corte basal va incrementando según los parámetros sísmicos.

2. Periodos de Vibración de la incorporación de las estructuras

La incorporación de las estructuras de sótano genera la disminución de los periodos de vibración de los edificios de tres y cinco niveles con respecto al edificio sin sótanos. Sin embargo, es preciso indicar que, si bien los periodos de las estructuras con sótanos son menores a las estructuras sin sótanos, el periodo de la estructura con un sótano es ligeramente menor que el periodo de

la estructura con 2 niveles de sótano y este a la vez es también ligeramente menor al periodo de la estructura con tres sótanos. Esta flexibilidad que se observa es debido al incremento de la altura de la edificación conforme se incrementa los niveles de sótanos en la edificación (Becerra, 2014).

3. Fuerzas en los elementos estructurales

Con respecto a los elementos estructurales tipo columna, la incorporación de las estructuras de sótanos incrementa las fuerzas axiales en los edificios de tres y cinco niveles. Respecto a las fuerzas de corte, se observó incrementos de las fuerzas con la incorporación de los niveles de los sótanos, esto último debido al incremento de la fuerza sísmica que se distribuye en todos los elementos resistentes a la carga sísmica. Con respecto a los momentos flectores se observa que la incorporación de las estructuras de sótanos incrementa los momentos flectores en los elementos estructurales tipo columna. Los incrementos de la respuesta de las fuerzas axiales, de corte y momento flector, se asocian al incremento de la carga sísmica a la que está sometida la edificación (Borda y Pastor, 2007).

Con respecto a los elementos estructurales tipo viga, la incorporación de estructuras de sótanos en los edificios de tres y cinco niveles, incrementa los momentos flectores en las vigas. Este efecto está relacionado con el incremento de la fuerza sísmica aplicada a la edificación (Molero, 2016).

En la investigación, la incorporación de las estructuras de sótanos incrementa las fuerzas de corte y los momentos flectores en las columnas. Con respecto a las fuerzas en las vigas, la incorporación de las estructuras de sótanos disminuye los momentos flectores.

4. Desplazamientos del piso

Con respecto a los desplazamientos de piso, la incorporación de las estructuras de sótano en los edificios de tres y cinco niveles disminuye los desplazamientos de piso y por ende los desplazamientos de entre piso. La estructura de sótano presenta elementos altamente rígidos como son los muros de concreto que rigidizan el edificio, restringiendo así los desplazamientos. Por otro lado, si bien se ha incrementado la fuerza sísmica los muros de concreto de los sótanos permiten controlar los desplazamientos de los niveles de la superestructura.

En la investigación, las estructuras de sótano proporcionan mayor rigidez disminuyendo la respuesta de desplazamiento de piso y de entre piso.

Conclusiones

En la investigación se analizó el comportamiento sísmico de edificaciones de tres y cinco niveles, con la incorporación de estructuras de sótanos de uno, dos y tres niveles, ubicadas en la Región Loreto de la Selva Peruana. En tal sentido se tienen las siguientes conclusiones:

1. La incorporación de estructuras de sótanos en los edificios de tres y cinco niveles incrementa la fuerza sísmica. El incremento del peso de las edificaciones con la incorporación de estructuras de sótanos, genera el incremento del peso sísmico de las edificaciones y por ende se observa el incremento de las fuerzas sísmicas aplicadas al edificio. A mayor número de estructuras de sótanos el peso sísmico se ve incrementado.
2. La incorporación de estructuras de sótanos en los edificios de tres y cinco niveles disminuye los periodos de vibración de las edificaciones. Las edificaciones con estructuras de sótanos de uno, dos y tres niveles presentan periodos de vibración menores a la estructura sin incorporación de sótanos.
3. Con respecto a las fuerzas en los elementos estructurales, la incorporación de las estructuras de sótanos disminuye las fuerzas axiales en las columnas de la superestructura, sin embargo, incrementa las fuerzas axiales en las estructuras de sótanos debido al incremento del peso sísmico. Por otro lado, la incorporación de las estructuras de sótanos incrementa las fuerzas de corte y los momentos flectores en las columnas. Con respecto a las fuerzas en las vigas, la incorporación de las

estructuras de sótanos disminuye los momentos flectores.

4. La incorporación de estructuras de sótanos en los edificios de tres y cinco niveles disminuye los desplazamientos de piso y desplazamientos de entre de los edificios. Las estructuras de sótano proporcionan mayor rigidez disminuyendo la respuesta de desplazamiento de piso y de entre piso.
5. En la Resolución Ministerial N° 043-2019-Vivienda, del 11 de febrero del 2019. La Norma Técnica Peruana E.030 - Diseño Sismorresistente, no incluye el análisis, del comportamiento sísmico de edificaciones con sótanos en la Selva Peruana de la Región Loreto y no especifica los tipos de suelos que existen en la toda la Región Loreto, por lo que esta investigación puede contribuir como una referencia para futuras investigaciones.
6. En la investigación se consideró estructuras de sótanos que se encuentran por debajo del nivel del terreno natural, sin embargo, no se ha considerado el efecto de interacción suelo-estructura explícitamente en la modelación estructural.

Recomendaciones

1. La presencia de niveles freáticos elevados genera disminución de la capacidad portante del suelo, por lo que sería recomendable estudiar tipologías de cimentación para edificios con estructuras de sótanos y evaluar la cantidad de niveles de sótano máximos a considerar en los proyectos de ingeniería.
2. Estudiar los posibles cambios en las secciones de los elementos estructurales con las incorporaciones de las estructuras de sótano para así disminuir el peso sísmico.
3. Con respecto a las fuerzas en los elementos estructurales, la incorporación de las estructuras de sótanos disminuye las fuerzas axiales en las columnas de la superestructura, sin embargo, incrementa las fuerzas axiales en las estructuras de sótanos debido al incremento del peso sísmico. Por otro lado, la incorporación de las estructuras de sótanos incrementa las fuerzas de corte y los momentos flectores en las columnas. Con respecto a las fuerzas en las vigas, la incorporación de las estructuras de sótanos disminuye los momentos flectores.
4. La incorporación de estructuras de sótanos en los edificios de tres y cinco niveles disminuye los desplazamientos de piso y desplazamientos de entre de los edificios. Las estructuras de sótano proporcionan mayor rigidez disminuyendo la respuesta de desplazamiento de piso y de entre piso

5. Establecer parámetros de diseño para los suelos excepcionales que se puedan encontrar en el territorio de la Selva Peruana y así estudiar el comportamiento de las estructuras en estos tipos de suelos
6. Evaluar las edificaciones incorporando interacción suelo – estructura para considerar tipos de suelos excepcionales presentes en la Selva Peruana.

Referencias

- Aguilar, R. (2008). *Análisis sísmico de edificios*. Centro de Investigaciones Científicas. <https://www.udocz.com/apuntes/17049/an-lisis-s-smico-de-edificios---dr--roberto-aguilar-falcon--pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2013). Comunicado de Prensa: El Perú refuerza su capacidad de respuesta ante los desastres naturales con apoyo del BID. <https://www.iadb.org/es/noticias/comunicados-de-prensa/2013-12-19/capacidad-de-respuesta-desastres-naturales-en-peru%2C10709.html>
- Bazán, E., & Meli, R. (2005). *Diseño sísmico de edificios*. Limusa Noriega. https://www.academia.edu/36401028/Diseno_Sismico_de_Edificios_Bazan_y_Meli
- Becerra, J. (2014). *La epistemología en la ingeniería civil*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/276698215/epistemologia-en-ingenieria-civil>
- Chaitanya, P., & Noopur, S. (2016). Building with Underground Storey with Variations in Soil Subgrade Modulus. *IJEDR*, 4(2), 1 – 3. <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1602136.pdf>
- Katarmal, N., & Shah, H. (2016). Seismic Response of RC Irregular Frame with Soil-Structure Interaction. *IJS DR*, 1(4), 1 – 5. <https://www.jetir.org/papers/JETIR2003024.pdf>
- Méndez, N. (2021). *Ejercicio de simulación de desastres en la junta interamericana de defensa, el secretario general adjunto de la OEA*. Organización de los Estados Americanos. https://www.oas.org/es/acerca/discurso_secretario_general_adjunto.asp?sCodigo=21-0038
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2021). *Documentos Estratégicos de la OPS/OMS*. <https://www.paho.org/es/emergencias-salud/terremotos>
- Parekh, A., Chandiwala, A., & Bhagat, U. (2016). Seismic analysis of RC building having underground stories with vertical Irregularities. *IJAERD*, 3(12), 1 – 5. https://www.academia.edu/43486451/Seismic_analysis_of_RC_building_having_underground_stories_with_vertical_Irregularities
- Navya, N., & Karuna, S. (2016). Seismic Analysis of RC Building with Underground Stories Considering Soil Structure Interaction. *IJESC*, 6(6), 1 – 6. https://issuu.com/editorijaerd/docs/seismic_analysis_of_rc_building_hav
- Resolución Ministerial N° 043-2019-VIVIENDA. Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente (11 de febrero del 2019). https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856_opt.pdf?v=1553120958
- Rojas, O., Mavila, D., & Cortez, A. (2013). Teoría de Popper y los riesgos en la ingeniería. *UNMSM*, 16(1), 58-69. <https://www.redalyc.org/pdf/816/81629469007.pdf>
- Saad, G., Saddik, F., & Najjar, S. (2012). Impact of Soil Structure Interaction on the Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings with Underground Stories. *WCEE*, 1 – 8. https://www.researchgate.net/publication/304367386_Effect_on_Seis-mic_Response_of_Building_with_Underground_Storey_Considering_Soil_Structure_Interaction
- Singh, V., & Mala, K. (2016). Effect on Seis-mic Response of Building with Underground Storey Considering Soil Structure Interaction. *IJERT*, 5(6), 1 – 5. https://www.researchgate.net/publication/304367386_Effect_on_Seis-mic_Response_of_Building_with_Underground_Storey_Considering_Soil_Structure_Interaction