

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

SISTEMA ESTRUCTURAL “TUBO EN TUBO” PARA EDIFICIOS ALTOS

**Trabajo de Investigación para obtener el grado académico de BACHILLERA EN CIENCIAS
CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

AUTORAS:

Pucuhuaranga Llancari, Valeria Liseth
Segovia Ramírez, Lenibet Pelagia del Pilar

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

AUTORES:

Andrade Martínez, Kevin Enrique
Alcántara Aniceto, Daniel Santiago
García Núñez, Patrick Ghandy
Rojas Palomino, Paolo Giovanni

ASESOR:

Villagómez Molero, Diego

Lima, julio de 2021

RESUMEN

El presente trabajo muestra el estudio del comportamiento del sistema estructural Tubo en Tubo y la comparación de este esquema respecto de otros sistemas estructurales para edificios altos. La justificación de la investigación se presentó dada la alta demanda por desarrollar edificaciones verticales con mayores alturas en base a sistemas tubulares capaces de resistir mejor las fuerzas que ejercen el viento y los sismos.

Para comprender mejor el funcionamiento de este sistema estructural se analizan casos de estudios teóricos diseñados con códigos sísmicos y de viento de la India. En todos los casos se reconocen los sistemas estructurales empleados y se idealizan tomando en cuenta las principales características, requerimientos y propiedades constructivas y estructurales.

Posteriormente, todos los casos se evalúan con una serie de acciones de cargas laterales similares que permiten que los resultados se puedan comparar. La evaluación de estos casos nos permite analizar la eficiencia de cada esquema por medio de los desplazamientos máximos, deformaciones, fuerzas cortantes y estados de daño obtenidos en los análisis.

Índice

1. Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Justificación o motivación	2
1.3. Alcance	2
1.4. Hipótesis	2
1.5. Objetivos	2
1.6. Metodología	3
1.6.1. Descripción de los principales sistemas estructurales para edificios altos	3
1.6.2. Análisis de casos que emplean el sistema tubo en tubo	3
1.6.3. Análisis de casos que emplean otros sistemas estructurales para edificios altos	4
1.6.4. Análisis comparativo entre los diferentes sistemas desarrollados.....	4
2. Revisión de la literatura	5
2.1. Antecedentes	5
2.1.1. Historia de los edificios altos	5
2.2. Sistemas estructurales para edificios altos	6
2.2.1. Sistema estructural aporticado.....	6
2.2.2. Sistemas estructurales a base de placas	7
2.2.3. Sistema estructural con núcleo central	8
2.2.4. Celosías espaciales	9
2.2.5. Sistemas estructurales tubulares.....	10
2.3. Sistema tubo en tubo	13
2.3.1. Descripción del sistema estructural tubo en tubo para edificios altos	13
2.3.2. Características estructurales	13
2.3.3. Características constructivas	15
2.3.4. Funcionamiento del sistema	15
3. Desarrollo de la investigación	17
3.1. Análisis de casos de edificaciones con sistema estructural tubo en tubo	17
3.1.1. Caso – Tubo en tubo cuadrado	18
3.1.2. Caso – Tubo en tubo hexagonal	19
3.1.3. Caso - tubo en tubo cuadrado con tubo interior rectangular.....	20
3.1.4. Caso – Tubo en tubo circular	21
3.2. Análisis de casos de edificaciones con diferente sistema estructural	22
3.2.1. Caso – Sistema tubo enmarcado.....	22

3.2.2. Caso – Sistema tubo arriostrado + tubo en tubo.....	23
3.2.3. Caso – Sistema tubo empaquetado	24
3.3. Comparación de resultados	25
3.3.1. Resumen de los casos analizados	25
3.3.2. Comparación entre los sistemas analizados tubo en tubo.....	26
3.3.3. Comparación entre los sistemas analizados con diferente sistema estructural.....	27
3.3.4. Comparación entre el sistema tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado	29
3.3.5. Comparación entre el sistema tubo en tubo cuadrado y el sistema tubo en tubo cuadrado arriostrado.....	31
3.4. Análisis de la factibilidad de edificios altos en el Perú.....	32
3.4.1. De los requisitos para edificios altos en el Perú	32
3.4.2. De la tecnología actual en el Perú para la construcción de edificios altos	33
4. Conclusiones y recomendaciones.....	34
5. Bibliografía	35

Lista de Figuras

Figura 1: Deformaciones de estructuras a base pórticos sometidas a diferentes acciones laterales; a) vigas de rigidez despreciable, b) vigas de rigidez normal, c) vigas muy rígidas (Astiz, 2014).....	7
Figura 2: Edificación con muro de corte intermedio (Jothijayakumar, 2015).....	8
Figura 3: Sistema con núcleo central; a) núcleo en suspensión, b) núcleo en compresión, c) núcleo combinado (Schueller, 1977).	9
Figura 4: Esquema de una celosía espacial (Astiz, 2014).	9
Figura 5: Esquema del sistema tubo en tubo (Astiz 2014).....	11
Figura 6: Esquema de un sistema tubular enmarcado rectangular, (Bhaskarbai Patel, 2016).....	11
Figura 7: Esquema del sistema tubular arriostrado (Astiz, 2014).	12
Figura 8: Esquema del sistema tubular empaquetado (Bhaskarbai Patel, 2016).....	13
Figura 9: Planta y elevación del sistema tubo en tubo (Ramasubramani, Pennarasi, y Sivakamasundari, 2019).....	14
Figura 10: Distribución de esfuerzos con y sin efectos de corte acumulado. (Hummelen, 2015).	16
Figura 11: Planta y elevación del caso 1	18
Figura 12: Planta y elevación del caso 2	19
Figura 13: Planta del caso 3	20
Figura 14: Planta y elevación del caso 4	21
Figura 15: Planta y elevación del caso tubo enmarcado.....	22
Figura 16: Planta y elevación del sistema tubular arriostrado.....	23
Figura 17: Planta del sistema tubular empaquetado	24

Lista de Tablas

Tabla 1: Resultados del análisis de casos con el sistema tubo en tubo.	25
Tabla 2: Resultados del análisis de casos con diferente sistema estructural	25

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Desplazamientos máximos de los casos con sistema tubo en tubo	26
Gráfico 2: Cortante basal de los casos con sistema tubo en tubo	26
Gráfico 3: Derivas de los casos con sistema tubo en tubo	27
Gráfico 4: Desplazamientos máximos de los casos con diferente sistema estructural	28
Gráfico 5: Cortante basal de los casos con diferente sistema estructural	28
Gráfico 6: Derivas de los casos con diferente sistema estructural	28
Gráfico 7: Desplazamientos máximos de los casos tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado.....	30
Gráfico 8: Cortante basal de los casos tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado.....	30
Gráfico 9: Derivas de los casos tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado.....	30
Gráfico 10: Derivas máximas del sistema tubo en tubo cuadrado y sistema tubo en tubo cuadrado arriostrado.....	32

1. Generalidades

1.1. Introducción

En la antigüedad, los métodos clásicos y convencionales para el diseño de edificios se centraban en el análisis de las cargas de gravedad y en la comprobación de la resistencia frente a cargas laterales que no permitían que la elevación sobrepase los 7 u 8 niveles debido al riesgo que presentaban. Sin embargo, en las últimas décadas, el incremento de la población mundial y la industrialización han exigido a la ingeniería el descubrimiento de nuevos sistemas estructurales que permiten el aumento en la verticalidad de los edificios de manera segura, para este fin han surgido diferentes esquemas estructurales que brindan soluciones innovadoras a los problemas característicos de edificaciones de gran elevación como los desplazamientos horizontales, resistencia lateral a fuerzas eólicas y sísmicas, asentamientos excesivos y el confort de los ocupantes.

De entre todos los sistemas innovadores desarrollados, los sistemas tubulares son considerados los sistemas más eficientes para lograr mayor verticalidad con menor gasto en materiales estructurales. Estos sistemas tubulares engloban otros sistemas específicos como: estructuras de tubo reforzado, estructuras de tubo en tubo y estructuras de tubos agrupados; los cuales pueden resistir cargas laterales más eficientemente por medio de un diseño como voladizo hueco perpendicular al suelo.

Específicamente, el sistema tubo en tubo posee mayor confiabilidad en comparación con los otros sistemas tubulares debido a que sufre menor cizallamiento y desplazamiento de piso ante acciones sísmicas y de viento.

1.2. Justificación o motivación

La competencia actual en lograr mayor verticalidad en los edificios altos ha mostrado que los sistemas tubulares se vuelven cada vez más dominantes en el medio por su gran desempeño ante cargas laterales, es por ello que en términos ingenieriles es necesario conocer su funcionamiento y compararlos con otros sistemas de edificios altos para evaluar el grado de confianza que brindan a la sociedad.

1.3. Alcance

Describir el comportamiento del sistema estructural Tubo en Tubo y compararlo con otros sistemas estructurales para edificios altos.

1.4. Hipótesis

Los edificios altos con el sistema tubo en tubo logran un desempeño a cargas laterales superior a otros edificios con diferente esquema estructural.

1.5. Objetivos

Objetivo principal

Analizar el funcionamiento del sistema estructural tubo en tubo mediante casos de estudio teóricos.

Objetivos secundarios

- Describir el sistema tubo en tubo y sus propiedades mecánicas
- Explicar el funcionamiento del sistema tubo en tubo ante cargas verticales y cargas horizontales.
- Analizar diferentes casos existentes del sistema estructural tubo en tubo y sus principales características estructurales y constructivas.
- Comparar las características ingenieriles del sistema tubo en tubo con otros sistemas estructurales para edificios altos.

1.6. Metodología

Para el presente trabajo de investigación se realizó una recopilación de información de diversos casos de estudio con diferentes sistemas estructurales para edificios altos. El trabajo se enfocó en una investigación transversal ya que se centró en el análisis comparativo del comportamiento estructural de los casos estudiados. De acuerdo a los datos encontrados, el procedimiento empleado de investigación fue exclusivamente de análisis teórico y cuantitativo ya que los parámetros obtenidos para el análisis de cada caso correspondieron a una investigación bibliográfica.

La metodología para el desarrollo de la investigación fue la siguiente:

1.6.1. Descripción de los principales sistemas estructurales para edificios altos

Con el fin de presentar los diferentes sistemas estructurales se seleccionaron los sistemas más utilizados en el mundo y se describieron sus principales características estructurales y sus respuestas ante cargas de gravedad, pero más importante, su respuesta ante cargas laterales originadas por acciones sísmicas o eólicas.

- Entre los sistemas descritos se tienen:
- Sistemas resistentes a momentos
- Sistemas tubulares
- Sistemas híbridos

1.6.2. Análisis de casos que emplean el sistema tubo en tubo

Se revisaron 4 casos de estudio teóricos propuestos en 2 diferentes artículos científicos. Los criterios que se tomaron para la elección de los casos fueron los siguientes:

- Planimetría y concepción de los edificios
- Similitud en el modelo estructural
- Acciones sísmicas y eólicas acorde a un mismo código de diseño.

1.6.3. Análisis de casos que emplean otros sistemas estructurales para edificios altos

Para el análisis de otros sistemas para edificios altos se tomaron 3 ejemplos teóricos propuestos en 3 artículos de revistas de estudios comparativos realizados en la India.

1.6.4. Análisis comparativo entre los diferentes sistemas desarrollados

Para el análisis general, primero se realizó una evaluación de las principales características estructurales y del funcionamiento frente a las cargas verticales y horizontales de cada sistema.

Para el análisis comparativo se analizaron las respuestas de los casos estudiados tomando en cuenta los siguientes criterios:

- El diseño de los edificios se realizó con ETABS
- El análisis realizado fue dinámico de tiempo – historia
- Las respuestas en análisis fueron el desplazamiento de entrepiso, las derivas máximas y la fuerza cortante en cada piso

2. Revisión de la literatura

2.1. Antecedentes

2.1.1. Historia de los edificios altos

Las edificaciones de altura han sido proyectadas desde la antigüedad como un símbolo de poder y riqueza tal como se constata en las construcciones de pirámides en Egipto y de templos y torres realizadas en la civilización de los mayas que reflejan el apogeo de esas culturas en cierto periodo de tiempo (Henocho, 2007).

Inicialmente, los edificios tenían un sistema estructural básico construidos a base de ladrillos y piedras, los cuales brindaban la rigidez necesaria a la edificación para lograr estabilidad, pero no lograban alturas considerables, la inclusión de materiales como el hierro y acero en el diseño permitieron que las edificaciones logren mayor verticalidad debido a los diferentes comportamientos estructurales que ofrecían estos nuevos materiales. Así, en 1885, en Chicago se edificó el primer rascacielos de diez pisos con una altura de 42 metros denominado *Home Insurance Building*, cuyo sistema estructural empleó elementos de acero que apoyaban a las estructuras de concreto (Fernández y Fernández-Ordoñez, 2014).

A comienzos del siglo XIX, la construcción de edificios altos se impuso como tendencia de modernización ya que se disponían de técnicas y procesos constructivos más innovadoras que lograban un mejor desempeño de los sistemas estructurales. Estos nuevos proyectos empezaron a resolver ciertos problemas sociales como la expansión demográfica, la necesidad habitacional de disponer de los servicios cerca y la planificación urbana (Gómez, 2014).

Paralelamente, como parte del desarrollo de la industria, en Francia e Inglaterra se comenzó a utilizar el concreto armado para la construcción de edificaciones de gran altura, este material compuesto por concreto y barras de acero supuso un increíble avance para la ingeniería ya que caracterizó las propiedades mecánicas de los elementos en función de su comportamiento estructural y no estructural (SINC, 2011).

A finales del siglo XIX, el concreto armado empezó a ser mejorado, incrementando su nivel de resistencia en edificios de dimensiones elevadas, gracias a esto, se edificaron los primeros proyectos de edificios con concreto armado de alta resistencia como el

Pacific First Center en Seattle en el año 1989; y el *John Hancock Center* en Chicago en 1969, este último edificio consta de 100 plantas con una altura de 459 metros.

En la actualidad, los ingenieros concuerdan en que la esencia de un edificio de altura radica en la importancia de las cargas que resiste, así como en el perfeccionamiento del espacio dentro del edificio que configura su forma y carácter (Astiz, 2014). Entonces, para determinar cuándo un edificio es de altura o no, es necesario analizar el trabajo de las fuerzas gravitacionales con las fuerzas laterales dadas por el viento o sismo conjuntamente con sus cargas internas como peso propio, cargas muertas y vivas. Este análisis, sumado a la proyección de la altura vertical y la disposición estética del espacio determina si una estructura puede ser considerada como edificio alto (Chew, 2014).

2.2. Sistemas estructurales para edificios altos

2.2.1. Sistema estructural aporticado

También es conocido como sistema aporticado resistente a momentos, este sistema está compuesto por elementos verticales y horizontales conectados rígidamente en mallas coplanares que resisten las cargas laterales usualmente por la rigidez flexural de sus elementos (Jothijayakumar, 2015).

Este sistema es normalmente empleado en edificaciones comunes, cuyas columnas verticales se encuentran empotradas a las losas limitando las alturas a plantas entre 10 a 20 pisos. Dada la presencia de estas conexiones, estos edificios trabajan adecuadamente ante fuerzas que imponen flexión en los elementos, pero tienen dificultades estructurales ante fuerzas cortantes y axiales; la capacidad de estos edificios está vinculada a la altura y separación entre sus elementos estructurales, por lo que es necesario diseñar las secciones transversales y longitudinales de las vigas y columnas para determinar la altura máxima que pueden lograr (Basset, 2013).

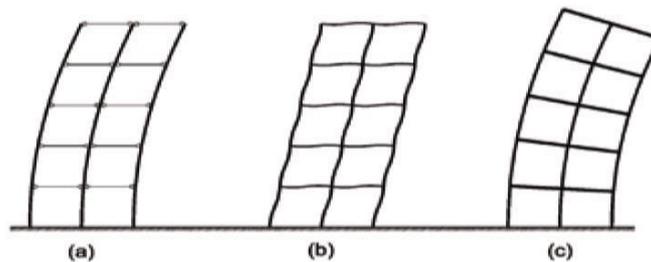


Figura 1: Deformaciones de estructuras a base pórtico sometidas a diferentes acciones laterales; a) vigas de rigidez despreciable, b) vigas de rigidez normal, c) vigas muy rígidas (Astiz, 2014).

2.2.2. Sistemas estructurales a base de placas

También es conocido como sistema a base de muros de corte (denominación en el Perú como placas), este sistema estructural presenta variables de sismorresistencia elevadas de rigidez y ductilidad que permiten resistir eficientemente las cargas laterales ejercidas por las fuerzas de viento y de sismo, gracias a estas características se reducen los efectos de desplazamientos laterales y se mejora la capacidad de disipación de energía de la estructura completa.

Los sistemas constructivos de estos sistemas siguen normas que regulan las dimensiones en la geometría de sus secciones transversales. Asimismo, las normas tienen en cuenta los ejes en los cuales los muros se disponen, ya que la recomendación es que se tenga una distribución simétrica dentro de la planta para evitar efectos de torsión (Briseño y Carreras, 2013).

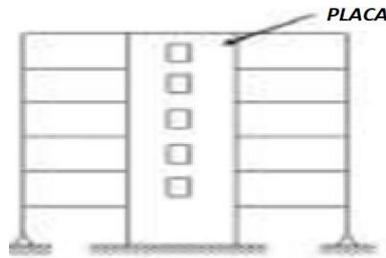


Figura 2: Edificación con muro de corte intermedio (Jothijayakumar, 2015).

2.2.3. Sistema estructural con núcleo central

Este sistema se basa en un núcleo rígido de concreto reforzado como único elemento resistente en la edificación capaz de transmitir las cargas laterales hacia las cimentaciones. Este núcleo se diseña a partir de los espacios que se requieren para las escaleras y ascensores, su capacidad y resistencia limita la altura del edificio según las plantas que el edificio disponga.

Con este sistema se pueden construir edificaciones de aproximadamente 40 plantas dependiendo de la forma de los núcleos que puede ser muy diversa, desde circulares, rectangulares, curvos, entre otros. La forma del núcleo modifica la capacidad estructural del edificio y dependiendo de las solicitaciones de las partes elevadas se puede lograr mayor verticalidad de manera estable (Manterola, 1985).

Cabe recalcar que, para el correcto funcionamiento de este sistema, se requiere que los elementos perimetrales conecten con la cimentación ya que todo el trabajo por flexión recaerá en las columnas y los esfuerzos cortantes por cargas laterales son transmitidos y soportados por el núcleo central. Asimismo, en este sistema las vigas cumplen un rol de suma importancia ya que establecen una conexión entre las columnas y el núcleo central, por lo que se requiere que sean bastante rígidas y resistentes (Astiz, 2014).

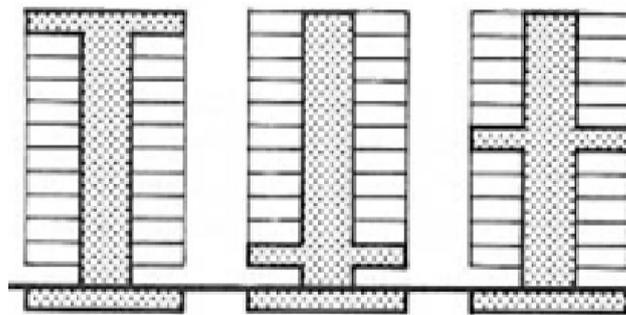


Figura 3: Sistema con núcleo central; a) núcleo en suspensión, b) núcleo en compresión, c) núcleo combinado (Schueller, 1977).

2.2.4. Celosías espaciales

Este sistema es conocido también como sistema estructural reticulado espacial ya que permite la interconexión de sus elementos estructurales a través de una disposición discreta que forma una celosía estructural. Esta disposición de sus elementos permite la transmisión de cargas horizontales y verticales de un elemento hacia los nudos de manera sencilla y estructuralmente práctica ya que el recorrido de los esfuerzos es eficiente hasta llegar a los apoyos del terreno.

Debido a su concepción poco ortodoxa, para este sistema se requieren columnas con dimensiones mayores en sus secciones transversales, así como cálculos complejos para el diseño de las secciones diagonales que permitan transmitir eficientemente las fuerzas que se ejercen sobre la edificación (Berlana, 2020).

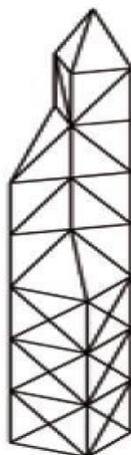


Figura 4: Esquema de una celosía espacial (Astiz, 2014).

2.2.5. Sistemas estructurales tubulares

Las estructuras tubulares fueron descritas por primera vez por el ingeniero Fazlur Khan en 1963, quien fue autor del primer edificio tubular de gran altura: *DeWittChestnut* en la ciudad de Chicago en 1963. La característica principal de este sistema es su comportamiento como tubo hueco en 3 dimensiones (Jothijayakumar, 2015).

Los edificios con este sistema superan con facilidad los 40 niveles debido su estabilidad lateral y pueden ser construidos con concreto armado o elementos prefabricados. La estructura perimetral está compuesta por una serie de columnas cercanamente espaciadas que maximiza el desempeño frente a cargas laterales y transfiere adecuadamente las cargas de gravedad a los cimientos (Feng, 2019).

A continuación, se muestran las principales variaciones de este sistema que se diferencian por las conexiones entre elementos, la distribución en planta del tubo, el número de tubos empleados, etc.

Sistema tubo en tubo

Este tipo de sistema está compuesto por 2 tubos, uno interno y otro externo que trabajan conjuntamente para resistir las cargas laterales y de gravedad. Cada tubo está compuesto por una serie de columnas o placas espaciadas mínimamente que logran la rigidez suficiente para poder trabajar como tubos y no como muros aislados. Este sistema es conocido también como el sistema casco – núcleo y es considerado como uno de los sistemas más eficientes en el comportamiento estructural.

El tema de la presente tesis es explicar las características y comportamiento de este sistema, en ese sentido en el capítulo 2.3 se describirá más detalladamente acerca de este sistema.

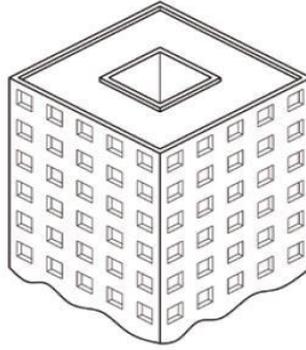


Figura 5: Esquema del sistema tubo en tubo (Astiz 2014).

Sistema tubo enmarcado

Este sistema tubular consiste en un diseño de marco exterior completo con columnas cercanas distribuidas en todo el perímetro externo de la edificación. Este sistema, de entre todos los sistemas tubulares, es el que más incrementa la resistencia lateral y la rigidez de la estructura ya que la profundidad de los elementos estructurales reduce los espacios libres entre columnas.

Adicionalmente, este sistema brinda una solución práctica para el diseño de interiores para los arquitectos debido a que brinda muchas opciones para el espacio libre dentro de la edificación.

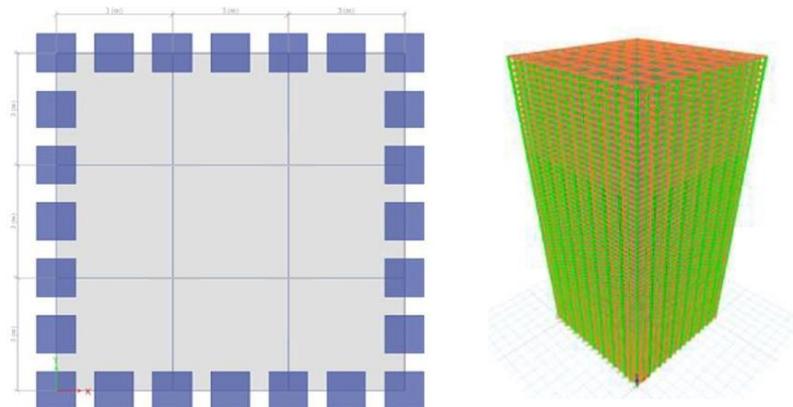


Figura 6: Esquema de un sistema tubular enmarcado rectangular, (Bhaskarbai Patel, 2016).

Sistema tubo atado o arriostrado

El sistema tubular arriostrado conecta rígidamente las caras del tubo exterior por medio de elementos diagonales, esta alternativa reduce la flexión en los pórticos ya que los elementos diagonales soportan la mayoría de las cargas verticales. Asimismo, la disposición de los arriostres logra que la cara exterior soporte enteramente todas las cargas laterales, liberando las columnas interiores que soportan solo una parte de las cargas de gravedad (Jothijayakumar, 2015).

Este sistema permite un mayor espaciamiento entre columnas ya que rigidiza los planos exteriores del tubo, de esta manera, se pueden colocar elementos arquitectónicos en las ventanas sin que interfieran con los elementos diagonales.

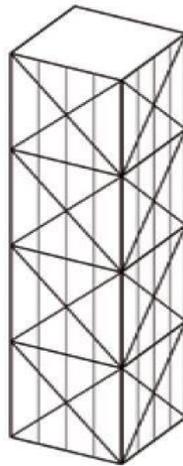


Figura 7: Esquema del sistema tubular arriostrado (Astiz, 2014).

Sistema tubo empaquetado

Este sistema consiste en una serie de tubos de diferentes tamaños unidos para soportar las cargas laterales. Esta disposición distribuye de manera más eficiente que los otros sistemas las fuerzas cortantes a la base del edificio y permite mayor elevación debido a una reducción progresiva del alma, pero al mismo tiempo exige mayor área en planta para su diseño y planificación. (Bhaskarbai Patel, 2016).

Constructivamente este sistema es eficiente ya que dispone de mayor espacio y versatilidad para desarrollar trenes de trabajo. Estructuralmente, el desempeño es óptimo frente a cargas laterales ya que cada tubo recoge una parte de los esfuerzos cortantes, lo que permite que los espaciamientos entre columnas sean mayores.

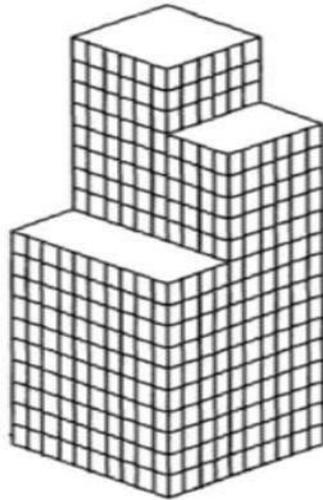


Figura 8: Esquema del sistema tubular empaquetado (Bhaskarbhai Patel, 2016).

2.3. Sistema tubo en tubo

2.3.1. Descripción del sistema estructural tubo en tubo para edificios altos

El sistema tubo en tubo o sistema “*hull and core*” es un tipo de sistema estructural que consiste en un marco resistente (fachada) que simula un tubo exterior unido a un núcleo rígido hueco que representa al tubo interno. Ambas estructuras tubulares están diseñadas para que trabajen conjuntamente por medio de un sistema de vigas y losas que otorgan una mayor adaptabilidad al edificio para lograr variaciones en la altura.

2.3.2. Características estructurales

La fachada exterior (*hull*) está compuesta por 4 paredes estructurales a base de columnas, elementos de acero o muros de concreto reforzado que se vinculan rígidamente entre sí mediante vigas, aristas y entrepisos; gracias a estos vínculos, las paredes exteriores trabajan como un tubo sólido de espesor considerable que otorga una rigidez mayor que si se considerarían 4 paredes por separado.

El tubo interno (*core*) está compuesto por un conjunto de columnas con separación reducida o por muros de concreto armado, habitualmente este se localiza en el centro del edificio y funciona como el núcleo de las escaleras y los ascensores (Astiz, 2014).

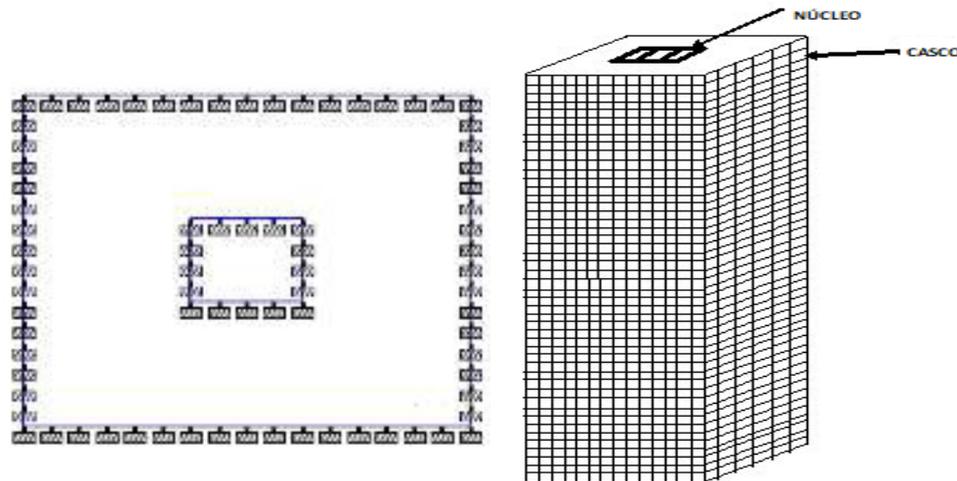


Figura 9: Planta y elevación del sistema tubo en tubo (Ramasubramani, Pennarasi, y Sivakamasundari, 2019)

El anillo externo posee usualmente mayor espesor que el anillo interno, es por eso que soporta casi en su totalidad los momentos flexurales producto de las cargas laterales. Así mismo, el tubo exterior incrementa la rigidez lateral del edificio y permite lograr una mayor altura, esbeltez y un mejor desempeño ante cargas horizontales. Por otro lado, el tubo interno incrementa también la resistencia del sistema ya que provee de rigidez lateral al sistema; sin embargo, su función principal es la de recibir casi en su totalidad la fuerza cortante producida por las cargas laterales (Jothijayakumar, 2015).

Este sistema es propenso a recibir grandes esfuerzos cortantes debido a su semejanza estructural a una viga en voladizo. En ese sentido, es importante en el diseño predecir la deformación de la estructura ante cargas laterales para poder lograr un correcto desempeño ante el efecto de corte acumulado y así evitar fallas no deseadas.

2.3.3. Características constructivas

Los sistemas estructurales para edificios altos requieren una secuencia constructiva escalonada, eficiente y funcional en tiempo y costo. Para ello, se han desarrollado diferentes sistemas constructivos específicos para estos sistemas. El sistema más utilizado es el sistema compuesto (*SOM-Composite System*) que aprovecha la rapidez del trabajo en concreto y la resistencia del acero reforzado. Este sistema propone utilizar concreto reforzado para los tubos del sistema y los marcos de acero para los pisos y sistemas de unión (Ellis y Billington, 2003).

El sistema *SOM* consigue utilizar al concreto como una capa de aislamiento que protege a los elementos internos de fuerzas producto de la variación de temperatura; así mismo, este sistema resulta económicamente eficiente debido a que utiliza la mitad de material estructural por metro cuadrado de piso construido que otros sistemas para edificios altos (Schueller, 1977).

2.3.4. Funcionamiento del sistema

Desempeño ante cargas de gravedad

En este tipo de sistemas la carga vertical muerta se encuentra concentrada en los pesos propios de los tubos y corresponde al 75-80% de la carga vertical total. Es por ello que el soporte de las cargas verticales se da principalmente por acción individual de cada tubo que direcciona las cargas de gravedad hacia las cimentaciones.

Ambos tubos trabajan conjuntamente para soportar la carga vertical viva del sistema; sin embargo, la mayor parte de la carga vertical viva la soporta el núcleo central debido a que la disposición de los tubos en la edificación concentra el peso en la parte central del edificio.

Desempeño ante cargas laterales

Ante la acción de cargas laterales, el tubo exterior, debido a su mayor espesor, anchura y rigidez lateral, soporta los momentos flectores y las deformaciones laterales. Por otro lado, el tubo interno, aporta cierta rigidez lateral, pero su función principal es soportar las fuerzas cortantes basales. Esta distribución de efectos logra un eficiente comportamiento a cargas laterales que provienen de fenómenos sísmicos y de viento.

Otro efecto importante producido por las cargas laterales que los edificios altos tienen especial cuidado es la acumulación de cortante en la base conocida como “*shear flag*”. Para lograr un comportamiento eficaz frente a este efecto, los edificios altos transmiten gradualmente los esfuerzos cortantes y flexurales de cada piso hacia los cimientos. Esta transmisión de efectos se logra por medio de un conjunto de pantallas y vigas intermedias que redistribuyen los esfuerzos y momentos volcantes de cada piso hacia los niveles inferiores y, progresivamente, dirigirlos hacia los cimientos (Astiz, 2014).

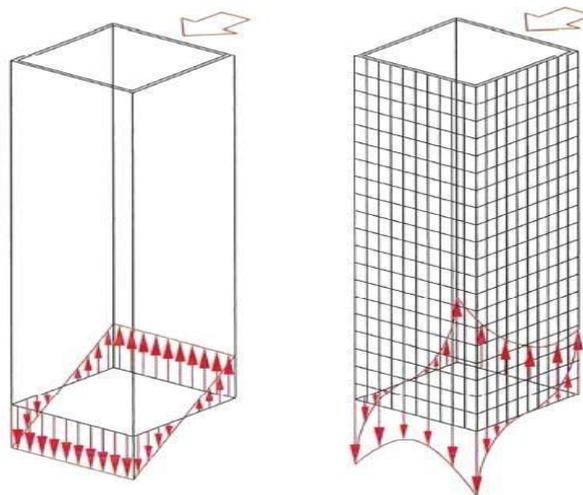


Figura 10: Distribución de esfuerzos con y sin efectos de corte acumulado. (Hummelen, 2015).

3. Desarrollo de la investigación

3.1. Análisis de casos de edificaciones con sistema estructural tubo en tubo

Para el presente trabajo se extrajeron diferentes casos de estudio de diversos artículos e investigaciones que simulan casos teóricos que fueron sometidos a cargas laterales según un espectro de análisis definido.

Criterios tomados para la evaluación de los casos:

- Para la idealización, se asumió que las vigas y columnas son uniformes en toda la altura de la edificación y de espesor entre 0.2 – 0.3m.
- Las losas de cada piso se asumieron como diafragmas rígidos con desplazamientos relativos restringidos
- Los casos de aplicación de fuerza sísmica y de viento se rigen según el código sísmico de la India (*The Indian Seismic Code – IS*) cuya primera parte fue lanzada en el 2002 y contiene los estándares y parámetros para la evaluación de amenaza sísmica aplicables a ciertos edificios y estructuras que cumplan con ciertas características (Bureau of Indian Standars, 2002).
- Los casos de análisis son simétricos y los resultados obtenidos (desplazamientos, derivas y fuerzas cortantes en la base) corresponden a los valores en la dirección más crítica de análisis, que en este estudio coinciden en el mismo eje para todos los casos, es así que las comparaciones entre los casos en estudio se asumieron como válidas.

3.1.1. Caso – Tubo en tubo cuadrado

El caso ejemplo fue tomado del artículo “*Comparative Study On Tube In Tube And Tubed Mega Frames On Different Building Geometry Using ETABS*” propuesto por Shilpa Balakrishnan y Rona Maria James.

Características geométricas y estructurales

- Sistema tubo en tubo **cuadrado** de dimensiones en planta de 40m x 40m.
- Altura:120m - Número de pisos: 39
- Carga viva- 4kN/m^2 (408 kg/m^2)
- Carga muerta - 16kN/m^2 (1632 kg/cm^2)
- Datos de entrada del sismo: IS 1893(part I):2002
- Tipo de suelo- S2; Factor de importancia 1; Factor de reducción sísmica 5

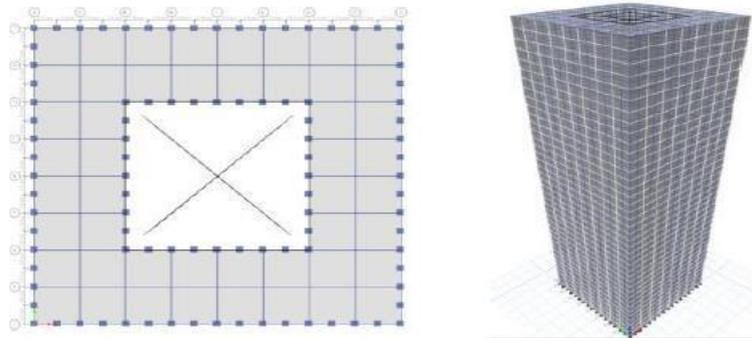


Figura 11: Planta y elevación del caso 1

Análisis

- Desplazamiento máximo: 512 mm
- Deriva máxima: 6.9 ‰
- Fuerza cortante basal: 54 123 KN (5 521 ton.f)

3.1.2. Caso – Tubo en tubo hexagonal

Este caso de ejemplo es tomado del artículo “*Comparative Study On Tube In Tube And Tubed Mega Frames On Different Building Geometry Using ETABS*”.

Características geométricas

- Sistema tubo en tubo **Hexagonal** de 40x40 metros de planta.
- Altura: 120m - Número de pisos: 39
- Carga viva- 4kN/m² (408 kg/m²)
- Carga muerta - 16kN/m² (1632 kg/cm²)
- Datos de entrada del sismo: IS 1893(part I):2002
- Tipo de suelo- S2; Factor de importancia 1; Factor de reducción sísmica 5

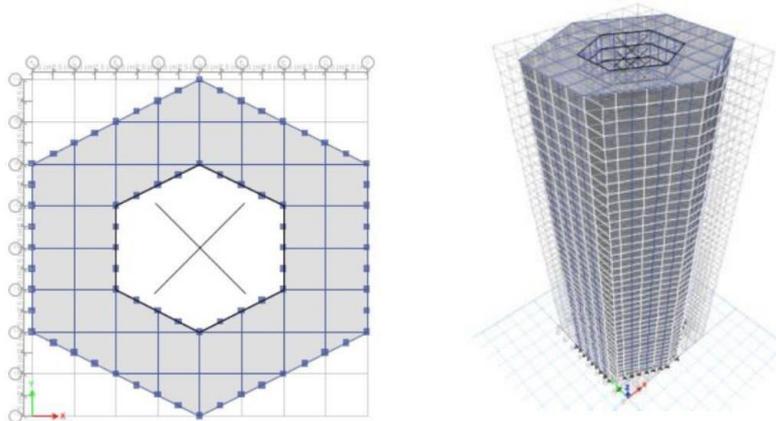


Figura 12: Planta y elevación del caso 2

Análisis

- Desplazamiento máximo: 2 177 mm
- Deriva máxima: 23.1%
- Fuerza cortante basal: 43 573 KN (4444 ton.f)

3.1.3. Caso - tubo en tubo cuadrado con tubo interior rectangular

El caso ejemplo fue tomado del artículo de conferencia “*Comparative Study on Tube in Tube Structures and Tubed Mega Frames*” propuesto por Archana J. y Reshmi P R. Alumna y docente del *Sreenarayana Gurukulam College of Engineering*.

Características geométricas

- Sistema tubo en tubo **cuadrado** - superficie en planta 23x34.45m ➤ Altura: 48.3m
 - Número de pisos: 16 - Tubo interior rectangular.
- Carga Viva - 3kN/m^2 (306 kg/m²)
- Carga muerta - 14kN/m^2 (1428 kg/m²)
- Datos de entrada del sismo IS: 456 – 2000 and IS 1893 (Part 1): 2002.
- Tipo de suelo- S2; Factor de importancia 1; Factor de reducción sísmica 5

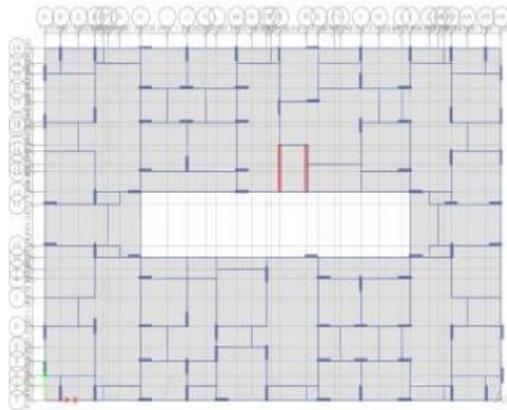


Figura 13: Planta del caso 3

Análisis

- Desplazamiento máximo: 2.5 mm
- Deriva máxima: 0.114 ‰
- Fuerza cortante basal: 1 012 KN (103 ton.f)

3.1.4. Caso – Tubo en tubo circular

El caso ejemplo fue tomado del artículo de conferencia “*Comparative Study On Tube In Tube And Tubed Mega Frames On Different Building Geometry Using ETABS*” propuesto por Shilpa Balakrishnan y Rona Maria James.

Características geométricas

- Sistema tubo en tubo **circular** de radio 40m.
- Altura: 120m - Número de pisos: 39
- Carga viva- 4kN/m² (408 kg/m²)
- Carga muerta - 16kN/m² (1632 kg/cm²)
- Datos de entrada del sismo: IS 1893(part I):2002
- Tipo de suelo- S2; Factor de importancia 1; Factor de reducción sísmica 5

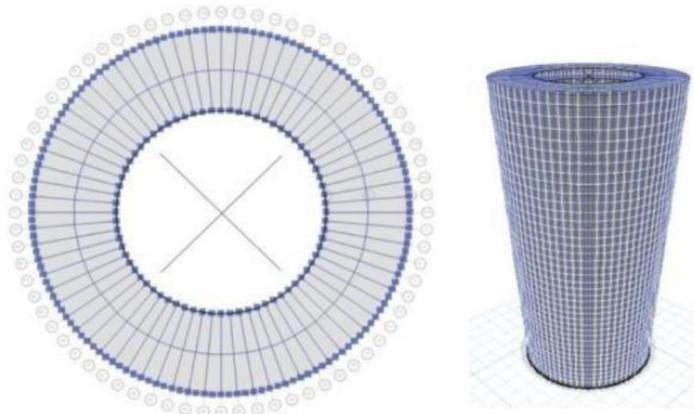


Figura 14: Planta y elevación del caso 4

Análisis

- Desplazamiento máximo: 461 mm
- Deriva máxima: 2.57 ‰
- Fuerza cortante basal: 19 612 KN (2000 ton.f)

3.2. Análisis de casos de edificaciones con diferente sistema estructural

3.2.1. Caso – Sistema tubo enmarcado

El caso ejemplo fue tomado del artículo “*Comparative Study On Tube In Tube And Tubed Mega Frames On Different Building Geometry Using ETABS*” propuesto por Shilpa Balakrishnan y Rona Maria James.

Características geométricas y estructurales

- Sistema tubo enmarcado **cuadrado** de dimensiones en planta de 40m x 40m.
- Altura: 120m - Número de pisos: 39
- Carga viva- 4kN/m² (408 kg/m²)
- Carga muerta - 16kN/m² (1632 kg/cm²)
- Datos de entrada del sismo: IS 1893(part I):2002
- Tipo de suelo- S2; Factor de importancia 1; Factor de reducción sísmica 5

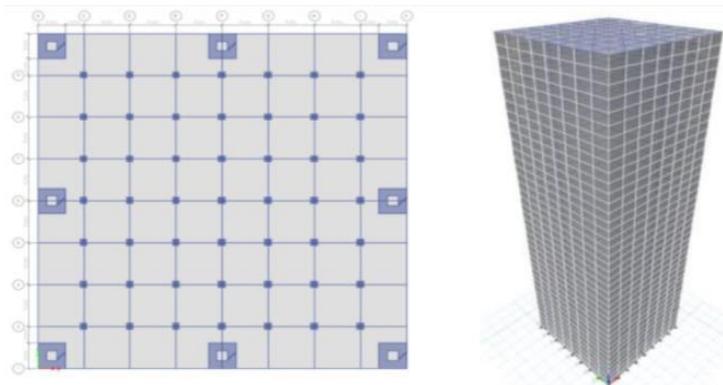


Figura 15: Planta y elevación del caso tubo enmarcado

Análisis

- Desplazamiento máximo: 3 267 mm
- Deriva máxima: 37.4 ‰
- Fuerza cortante basal: 87 230 KN (8 897 ton.f)

3.2.2. Caso – Sistema tubo arriostrado + tubo en tubo

El caso ejemplo fue tomado del artículo “*Comparative Analysis between Tube in Tube Structure and Conventional Moment Resisting Frame*” propuesto por Bipin H. Nahik y Suresh Chandra.

Características geométricas y estructurales

- Sistema tubo enmarcado **cuadrado** de dimensiones en planta de 48m x 48m.
- Altura: 150m - Número de pisos: 50 – Sistema tubo en tubo integrado
- Carga viva- 3kN/m² (306 kg/m²)
- Carga muerta - 20kN/m² (2039 kg/m²)
- Datos de entrada del sismo: IS 1893(part I):2016
- Tipo de suelo- S2; Factor de importancia 1; Factor de reducción sísmica 5

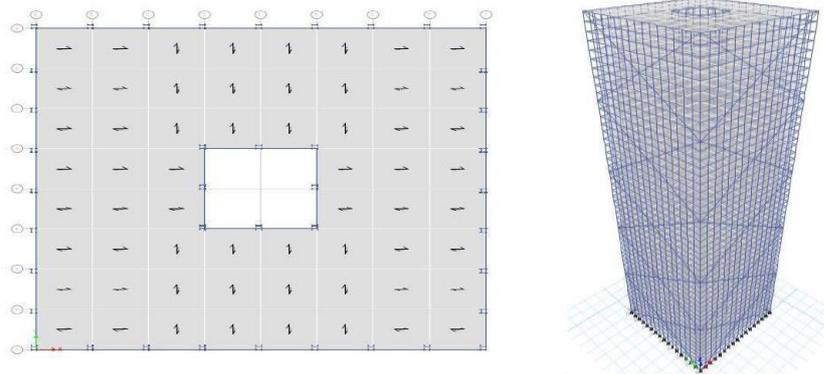


Figura 16: Planta y elevación del sistema tubular arriostrado

Análisis

- Desplazamiento máximo: 125 mm
- Deriva máxima: 0.83 %
- Fuerza cortante basal: 27 227 KN (2777 ton.f)

3.2.3. Caso – Sistema tubo empaquetado

El caso ejemplo fue tomado del artículo “*Comparison of Different Types of Tubular Systems*” propuesto por Shaival J. Patel y Vishal B. Patel.

Características geométricas y estructurales

- Sistema tubo empaquetado de dimensiones en planta de 80x80m con una reducción a 40x40m
- Altura:192m - Número de pisos: 64
- Carga viva - 2.5kN/m² (255 kg/m²)
- Carga muerta - 1.5kN/m² (153 kg/m²)
- Datos de entrada del sismo: IS: 1893 (Part 1) – 2002
- Tipo de suelo-S2; Factor de importancia 1.5; Factor de reducción sísmica 5

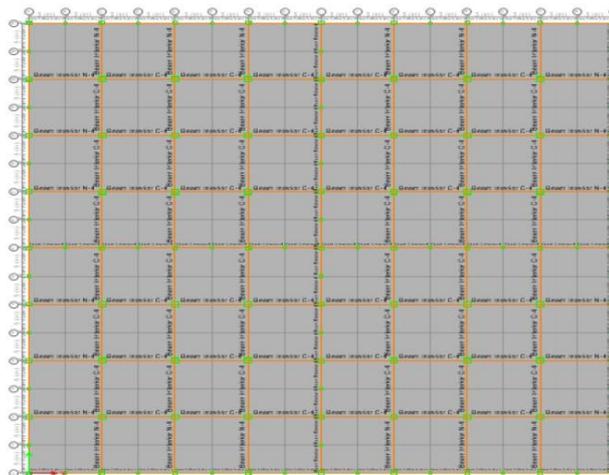


Figura 17: Planta del sistema tubular empaquetado

Análisis

- Desplazamiento máximo: 263 mm
- Deriva máxima: 1.37 %
- Fuerza cortante basal: 73 372 KN (7484 ton.f)

3.3. Comparación de resultados

3.3.1. Resumen de los casos analizados

Las siguientes tablas muestran el conjunto de resultados de los 2 grupos de casos analizados: casos con sistemas tubo en tubo y los casos con sistemas tubulares diferentes.

Tabla 1: Resultados del análisis de casos con el sistema tubo en tubo.

Sistema tubo en tubo	dimensión en planta	Altura (m)	Desplazamiento de entrepiso (mm)	Deriva máxima (%)	Cortante basal (kN)	Cortante basal (ton.f)
Cuadrado	40x40	120	511,79	6,9	54123	5521
Hexagonal	Radio 40m	120	2177	23	43573	4444
Cuadrado con tubo interior rectangular	23x43,5	48,3	2,5	0,11	1012	103
Circular	Radio 40m	120	461	2,57	19612	2000

Tabla 2: Resultados del análisis de casos con diferente sistema estructural

Sistema tubular	Dimensión en planta	Altura (m)	Desplazamiento de entrepiso (mm)	Deriva máxima (%)	Cortante basal (kN)	Cortante basal (ton.f)
Tubo enmarcado	40x40	120	3267	37,4	87230	8897
Tubo arriostrado + tubo en tubo	48x48	150	125	0,83	27227	2777
Tubo empaquetado	80x80	192	263	1,37	73372	7484

De la tabla 1 se aprecia que la altura es un factor determinante en el desempeño de los edificios altos, las derivas se incrementan en edificios con altura elevada en comparación con los de altura moderada, los edificios de más de 100 metros de altura (casos del sistema tubo en tubo cuadrado, hexagonal y circular) poseen desplazamiento del orden de 500 mm, mientras que el edificio con la altura de 48.3 m de alto solo presenta un desplazamiento máximo de 2.5 mm.

3.3.2. Comparación entre los sistemas analizados tubo en tubo

Se elaboraron las siguientes figuras para comparar los casos cuadrado, hexagonal y circular del sistema tubo en tubo. En esta comparación se descartó el sistema tubo en tubo cuadrado con tubo interior rectangular debido a su poca altura. Sin embargo, este sistema sí será incluido dentro del análisis de acuerdo a los resultados obtenidos en el acápite 3.1 de los análisis de casos. La comparación de los sistemas tubo en tubo se realizaron con el fin de observar la eficiencia y desempeño de las diferentes disposiciones que puede desarrollar este sistema.

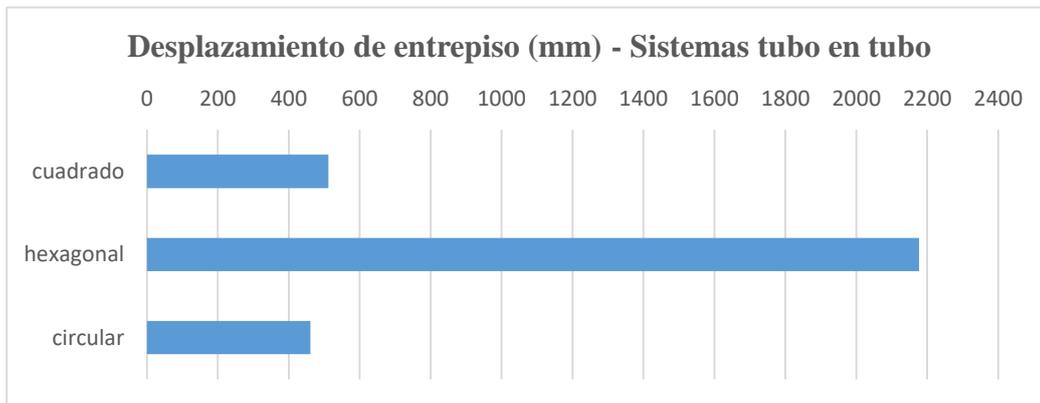


Gráfico 1: Desplazamientos máximos de los casos con sistema tubo en tubo

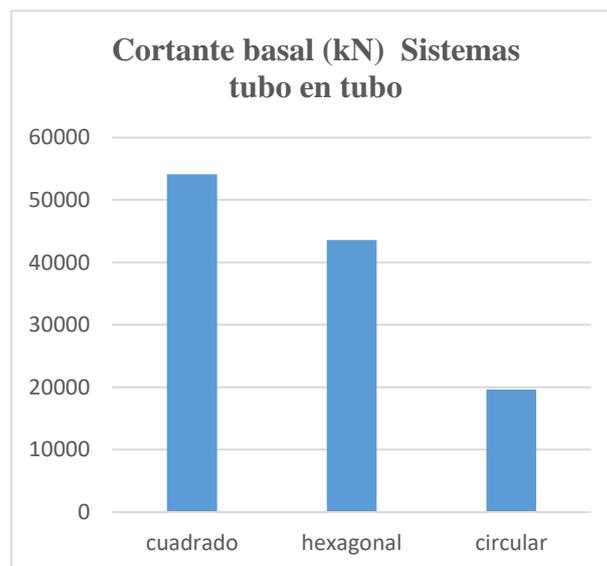


Gráfico 2: Cortante basal de los casos con sistema tubo en tubo

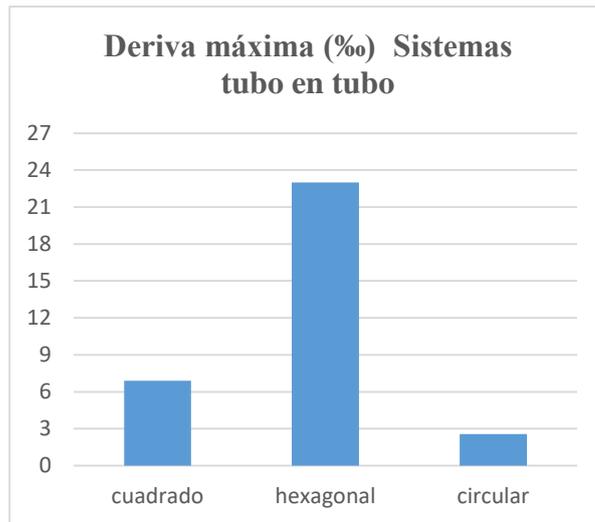


Gráfico 3: Derivas de los casos con sistema tubo en tubo

En los gráficos se visualiza que el sistema circular es el más eficiente de todos ya que presenta 10% y 80% menos desplazamiento que los sistemas cuadrado y hexagonal respectivamente; 60% y 90% menos en derivas y 65% y 55% menos cortantes basales que ambos sistemas respectivamente. Además, se aprecia también que el sistema hexagonal ofrece un pobre desempeño en todos los rubros siendo el más desfavorable de los sistemas tubo en tubo con valores muy elevados de desplazamiento y deriva.

Por otro lado, de estas comparaciones se aprecia que el sistema de tubo en tubo cuadrado controla adecuadamente los desplazamientos y derivas máximas; sin embargo, muestra un pobre comportamiento en la contención de fuerzas sísmicas ya que acorde a los gráficos anteriores ofrece pocos desplazamiento y derivas, pero posee la mayor magnitud de fuerza cortante en su base.

3.3.3. Comparación entre los sistemas analizados con diferente sistema estructural

Se elaboraron las siguientes figuras para comparar los sistemas diferentes al esquema tubo en tubo, los cuales son el sistema tubo enmarcado, tubo en tubo arriostrado y tubo empaquetado. La comparación se realizó con el fin de observar la eficiencia y comportamiento que pueden desarrollar estos sistemas.

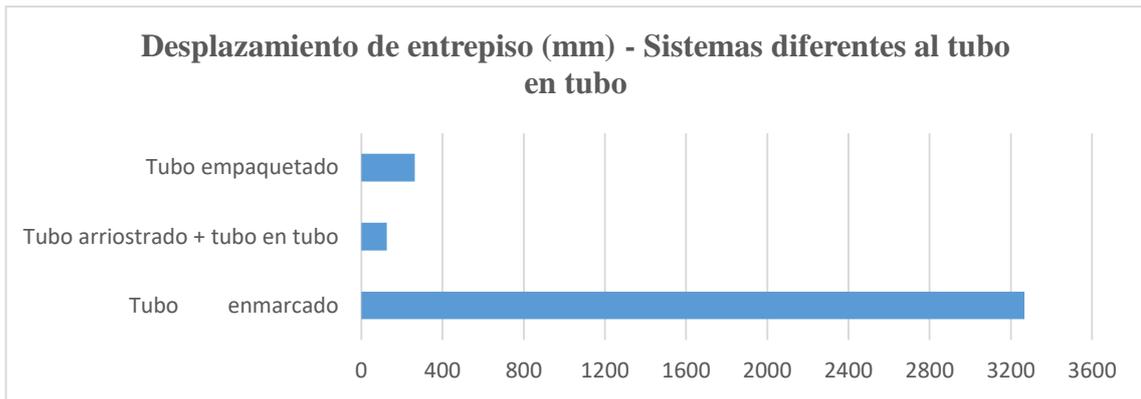


Gráfico 4: Desplazamientos máximos de los casos con diferente sistema estructural

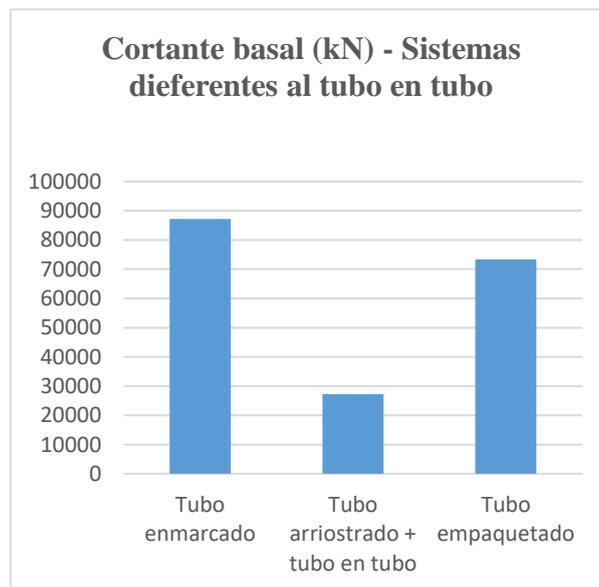


Gráfico 5: Cortante basal de los casos con diferente sistema estructural

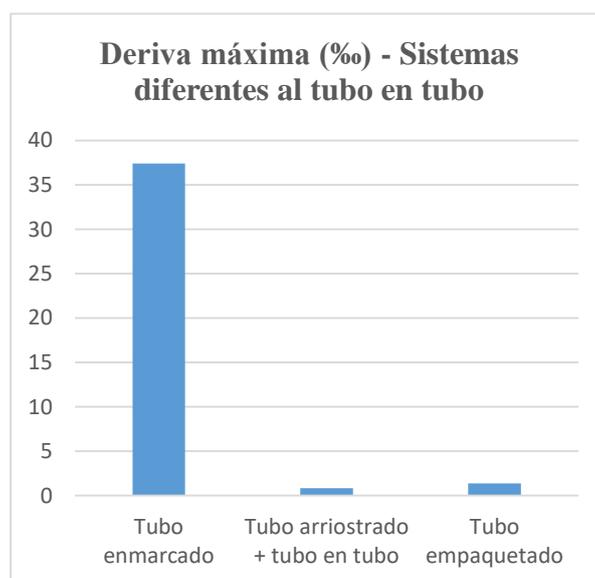


Gráfico 6: Derivas de los casos con diferente sistema estructural

En los gráficos anteriores se muestran 2 esquemas diferentes al sistema tubo en tubo (enmarcado y empaquetado) y un sistema mixto (arriostrado + tubo en tubo). De acuerdo a esto, se aprecia que entre los sistemas estructurales que no presentan el sistema tubo en tubo, el sistema de tubo empaquetado se muestra como la solución más efectiva para controlar los desplazamientos con una diferencia del 92% con el sistema enmarcado y una diferencia de 96% en el control de derivas con este mismo sistema. Sin embargo, el esquema enmarcado esfuerza más los elementos internos ya que presenta un 15% más de cortante basal que el sistema empaquetado.

Por otro lado, el arriostramiento de un sistema tubular muestra el incremento significativo del desempeño a cargas laterales ya que acorde a los gráficos controla mejor los desplazamientos con una diferencia del 97% con el sistema enmarcado y 52% con el sistema empaquetado, además tiene un 98% mejor control de derivas que el sistema enmarcado y un 40.5% mejor que el empaquetado. Así mismo, tiene una diferencia de cortante basal del 70% con el sistema enmarcado y 63% con el sistema empaquetado.

3.3.4. Comparación entre el sistema tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado

Esta comparación es posible debido a que todos estos casos de análisis fueron tomados del mismo artículo de revista y poseen las mismas condiciones de diseño sísmico y de viento. Para realizar la comparación entre estos sistemas se elaboraron las siguientes figuras:

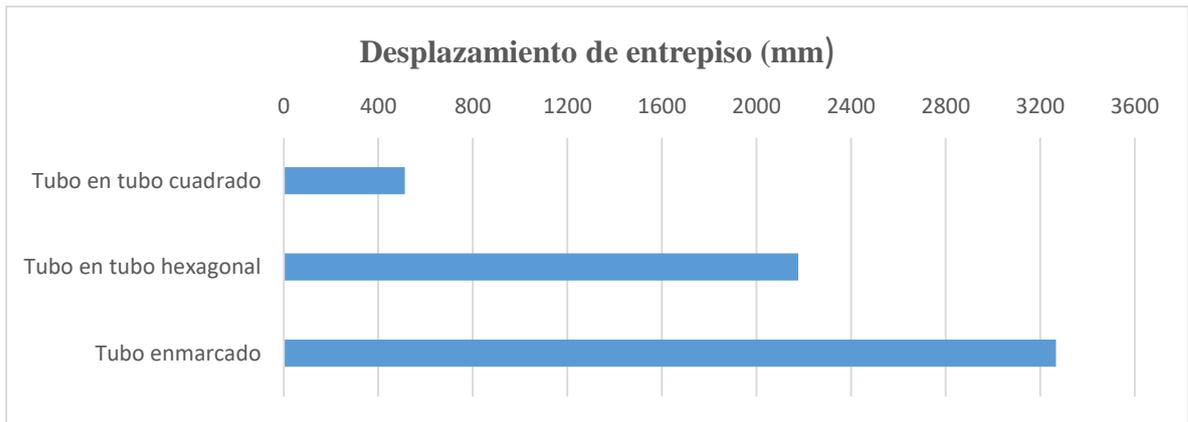


Gráfico 7: Desplazamientos máximos de los casos tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado

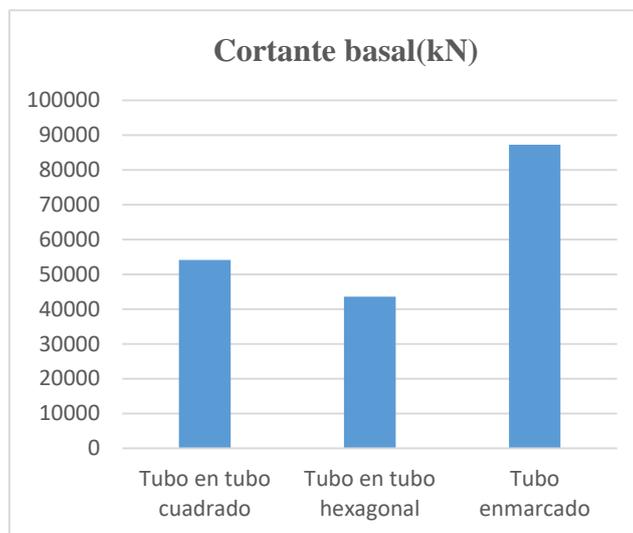


Gráfico 8: Cortante basal de los casos tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado

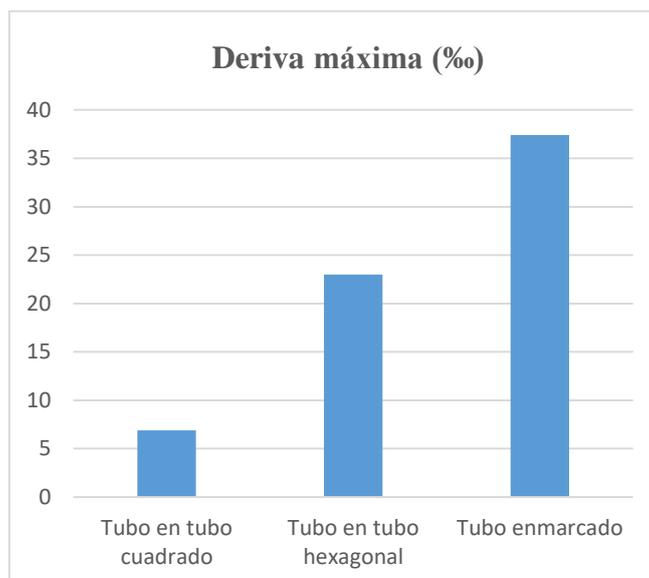


Gráfico 9: Derivas de los casos tubo en tubo cuadrado, tubo en tubo hexagonal y el sistema tubular cuadrado enmarcado

De las comparaciones se nota que entre los sistemas con geometría en planta cuadrada (tubo en tubo y enmarcado), el sistema tubo en tubo cuadrado es más eficiente que el tubo enmarcado cuadrado, esto se basa en que el caso del sistema tubo enmarcado cuadrado tiene un 84% de aumento en la deriva de entrepiso en comparación con el sistema tubular tubo en tubo cuadrado. Además, el sistema tubo en tubo cuadrado tiene 85% menos desplazamientos y un 38% menos cortante basal. Así mismo, se aprecia que el sistema tubo en tubo hexagonal tiene valores menores que el sistema enmarcado pero mayores que el sistema tubo en tubo cuadrado por lo que sigue siendo más eficiente que el sistema enmarcado, pero el más desfavorable entre los sistemas tubo en tubo. Cabe resaltar que esta comparación fue posible debido a que todos los sistemas poseen las mismas condiciones de diseño.

Por otro lado, de acuerdo a los gráficos de esta comparación y a los 4,5 y 6 de la anterior se deduce que el sistema enmarcado muestra un desempeño inferior entre todos los sistemas analizados, ya que no dispone de la suficiente rigidez para controlar los desplazamientos, derivas ni cortantes basales. Esto nos muestra que este sistema es el más vulnerable frente a cargas sísmicas y de viento entre todos los sistemas tubulares para edificios altos.

3.3.5. Comparación entre el sistema tubo en tubo cuadrado y el sistema tubo en tubo cuadrado arriostrado.

Esta comparación se realiza debido a que ambos sistemas presentan el mismo sistema estructural base (sistema tubo en tubo cuadrado); sin embargo, el segundo presenta un sistema mixto al incorporar también el sistema arriostrado. Para realizar esta comparación se elaboró una figura analizando solo la deriva máxima de entrepiso ya que es un parámetro adimensional relacionado a la altura de los edificios.

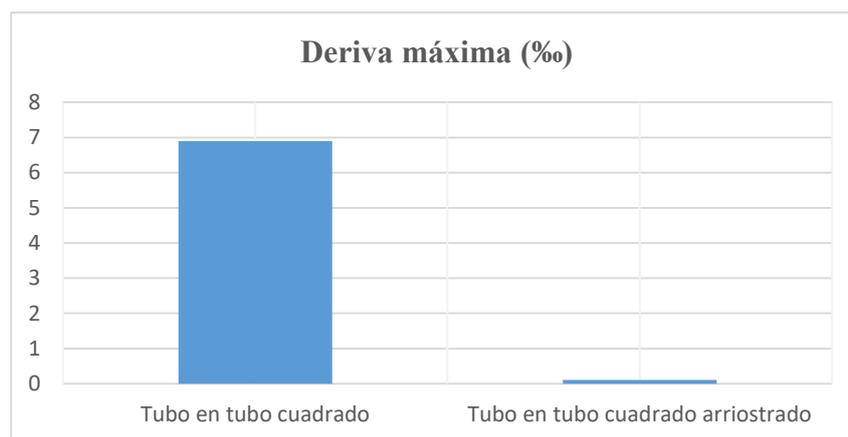


Gráfico 10: Derivas máximas del sistema tubo en tubo cuadrado y sistema tubo en tubo cuadrado arriostrado

Del gráfico anterior se observa que el arriostramiento en los sistemas tubo en tubo incrementan significativamente el desempeño a cargas laterales, esto se observa en la reducción de la deriva que presenta el edificio tubo en tubo arriostrado frente al edificio tubo en tubo no arriostrado, el cual es 7 veces menor.

3.4. Análisis de la factibilidad de edificios altos en el Perú

3.4.1. De los requisitos para edificios altos en el Perú

La regulación normativa en el Perú para desarrollar proyectos de edificios altos está contenida en el Reglamento Nacional de Edificaciones del 2006; de acuerdo a este reglamento, la altura de los edificios debe ser 1.5 veces la longitud de la vía y debe estar restringida por la zonificación del municipio correspondiente (SENCICO, 2006). Por otro lado, los municipios disponen que los edificios deben tener de 1,2 o 3 estacionamientos por cada departamento, oficina u aforo según el uso del edificio.

Estas restricciones responden a un punto de vista técnico aplicables a todo el territorio nacional; sin embargo, si bien es necesario definir reglas globales, es importante también establecer criterios específicos que permitan el desarrollo de proyectos que tengan un mayor impacto social en ciertas zonas estratégicas.

Requerimientos como la cantidad de estacionamientos solo eleva el costo de los edificios innecesariamente y aleja la inversión nacional e internacional en el Perú que busca mayores facilidades para el desarrollo de proyectos.

La diferencia técnica y social de la reglamentación peruana es tan notoria con la de otros países más desarrollados que a modo de ejemplo se comparó la torre Tapei 101 de 508 metros ubicada en Taiwán, la cual fue la torre más alta del mundo hasta el 2010, con la Torre Begonias en Lima de 120 metros. La primera, dispuso en su diseño solo 5 sótanos, mientras que la segunda necesitó 8 sótanos para poder cumplir con la reglamentación.

3.4.2. De la tecnología actual en el Perú para la construcción de edificios altos

Actualmente en el Perú los edificios “altos” construidos en el Perú tienen un sistema de placas de corte con núcleos centrales (Banco de la Nación, 2015). La tecnología para la construcción de este tipo de sistemas es la más sofisticada en el territorio nacional (sistemas NEVI, mesas VR, encofrados trepantes y autotrepantes, etc.) y empresas como COSAPI, ULMA y GYM ya los están empleando masivamente.

Si bien en el Perú y en otros países latinos se disponen soluciones innovadoras para este tipo de sistemas estructurales, aún existe una brecha importante tecnológica en comparación con otros países más desarrollados. Los sistemas para edificios altos en Latinoamérica se limitan a esquemas enmarcados, con núcleo central y unos pocos arriostrados; la falta de tecnología de vanguardia para los nuevos sistemas estructurales (tubulares, celosías, empaquetados, etc.) no permite un crecimiento vertical que brinde soluciones urbanas más eficientes para ciudades con una alta concentración demográfica como las ciudades latinoamericanas.

4. Conclusiones y recomendaciones

La investigación realizada muestra que los sistemas tubo en tubo son una opción eficiente y competente para edificios altos en comparación con los demás sistemas analizados (enmarcado, empaquetado y arriostrado), los sistemas tubo en tubo presentan menores valores de desplazamiento de piso, deriva máxima y cortante basal frente a un sismo de diseño lo que hace prever un buen comportamiento ante un posible evento sísmico y eólico. Adicionalmente, entre los sistemas tubo en tubo es mejor considerar estructuras regulares en planta como la circular ya que las estructuras con muchas aristas esfuerzan significativamente los elementos interiores y logran un desplazamiento elevado que no controla adecuadamente las derivas.

Por otro lado, cabe resaltar que las normas de diseño sísmico empleadas en el trabajo (normativa india) no consideran la vibración dentro de sus parámetros de análisis, es decir, los códigos no representan completamente la acción real de las cargas laterales de sismo y de viento. Sin embargo, aun así, esta normatividad se muestra como una aproximación muy cercana a las acciones reales de los sismos y de viento.

Adicionalmente, según el punto de vista arquitectónico se entiende que las alternativas de tubo empaquetado, tubo enmarcado y tubo arriostrado ofrecen mayor espacio para proponer alternativas estéticas en el interior de los edificios en comparación con los sistemas tubo en tubo, ya que este último utiliza columnas con espaciamiento reducido y concentradas en el centro de la edificación lo que disminuye las opciones de diseño en el interior de la edificación.

Por último, de acuerdo al análisis de factibilidad de edificios altos en el Perú se recomienda la posibilidad de una actualización de la normatividad acorde a un estudio técnico que tenga en cuenta los requisitos específicos de cada localidad; así mismo, se pretende animar a los estudiantes a aplicar los conceptos modernos de edificios altos en el territorio nacional para poder aportar al desarrollo social desde el campo de la ingeniería.

5. Bibliografía

- Alonso, U. (1986). Recomendação para Realização de Provas de Carga Horizontal em Estavas de Concreto Armado. *VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações.*, (págs. 261-276). Porto Alegre.
- Alonso, U. (1998). Prova de Carga Horizontal em Estaca Hélice Contínua. (págs. 51-57). Sao Paulo, Brasil: Solos e Rochas.
- Alonso, U. R. (1989). Dimensionamento de Fundações Profundas. Sao Paulo, Brasil: Edgard Blucher.
- Astiz, M. Á. (2014). Los esquemas estructurales de los edificios altos. *ROP*, 77-84.
- Balakrishnan, S., & Maria James, R. (2019). Comparative Study On Tube In Tube And Tubed Mega Frames On. *International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562*, 14(12), 149-153. Obtenido de <http://www.ripublication.com>
- Banco de la Nación. (2015). Proyecto Banco de la Nacion: encarte especial 2015 . *Editora Perú*.
- Basset, L. (2013). Edificios en Altura. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. *Universitat Politècnica de Valencia*. Obtenido de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104800/henoch_r.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Berlana, J. (2020). Estudio de edificios altos rigidizados por fachada tubular con o sin núcleo central resistente. [Tesis de Máster]. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: Obtenido de http://oa.upm.es/59080/1/TFM_JORGE_BERLANA_MONTES.pdf
- Bhaskarbai Patel, V. (abril de 2016). *Comparison of Different Types of Tubular Systems* . Obtenido de ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/342550253>
- Briseño, A., & Carreras, N. (2013). Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011. Universidad Católica Andrés Bello. Obtenido de https://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u11/ci38_38236_teg_muros_estructurales_segun_chile_2010_y_nz_2011.pdf
- Bureau of Indian Standars. (2002). Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures. *IS 1893(Part 1): 2016*. Nueva Delhi, India.
- Chew Yit Lin, M. (2014). Construction Technology for Tall Buildings. *World Scientific, 4ta edición*.

- Ellis, R. A., & Billington, D. P. (2003). Construction history of the composite framed tube. *First International Congress on Construction History* (págs. 800-810). Madrid: S. Huerta.
- Feng, F. (02 de Noviembre de 2019). *Tube System in Tall Building*. Recuperado el 28 de mayo de 2021, de ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/323622482>
- Fernández, J., & Fernandez-Ordóñez, D. (2014). Los materiales estructurales en los edificios de gran altura. *Revista de Obras Públicas*. 71-76. Obtenido de http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2014/2014_marzo_3552_09.pdf
- Henoch, R. (2007). Calificación Sísmica de Edificios Altos. [Tesis de Título]. (U. d. Chile, Ed.) Chile. Obtenido de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104800/henoch_r.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Hummelen, J. (Junio de 2015). Precast Concrete in Framed Tube High-Rise Structures. *Challenges and possibilities of prefabricated concrete in tube-in-tube structures of approximately 200m high*. Delft, Holanda.
- Jothijayakumar, V. (2015). Concept of tubular design in high rise structures. En G. Varghese (Ed.), *Third Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering - ACSM 2015* (pág. 5). Kerala: Institute of Research Engineers and Doctors.
- Lavanya, T., & Sathyanarayana, S. (2017). DYNAMIC ANALYSIS OF TUBE-IN-TUBE TALL BUILDINGS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2357-2362.
- Manterola, J. (1985). La Estructura resistente de los edificios altos. Obtenido de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1815>
- Naik, B., & Chandra, S. (Octubre de 2017). Comparative Analysis between Tube in Tube Structure and Conventional Moment Resisting Frame. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, IV, 807-812.
- Patel, S., & Patel, V. (Abril de 2016). Comparison of Different Types of Tubular Systems. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science &*, 3, 282-289.

Ramasubramani, R., Pennarasi, G., & Sivakamasundari, S. (Noviembre de 2019). Differential Settlement in Various Tubular Structural Systems. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8100-8106.

Schueller, W. (1977). *high-rise Building Structures*. Nueva York: A Wiley-Interscience publication.

SENCICO. (2006). Reglamento nacional de edificaciones. Lima, Perú.

SINC. (27 de abril de 2011). La historia del hormigón armado en el siglo XX, recopilada en una tesis. Obtenido de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/La-historia-del-hormigon-armado-en-el-siglo-XX-recopilada-en-una-tesis>