



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DE ALTURA MÁXIMA Y
RELACIÓN DE ESBELTEZ RECOMENDABLE PARA EDIFICIOS DE SISTEMA DE
FORMALETA Y MUROS DE CONCRETO REFORZADO EN COMPARACIÓN CON
SISTEMAS DE MARCOS SIMPLES, APLICADOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Abraham Orozco Castellanos

Asesorado por M. Sc. Mario Estuardo Molina Marroquín

Guatemala, febrero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DE ALTURA MÁXIMA Y RELACIÓN
DE ESBELTEZ RECOMENDABLE PARA EDIFICIOS DE SISTEMA DE FORMAleta Y
MUROS DE CONCRETO REFORZADO EN COMPARACIÓN CON SISTEMAS DE MARCOS
SIMPLES, APLICADOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ABRAHAM OROZCO CASTELLANOS
ASESORADO POR M. SC. MARIO ESTUARDO MOLINA MARROQUÍN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO A.I.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz Gonzáles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DE ALTURA MÁXIMA Y RELACIÓN DE ESBELTEZ RECOMENDABLE PARA EDIFICIOS DE SISTEMA DE FORMALETA Y MUROS DE CONCRETO REFORZADO EN COMPARACIÓN CON SISTEMAS DE MARCOS SIMPLES, APLICADOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 11 de noviembre 2022.

Abraham Orozco Castellanos



EEPFI-PP-1895-2022

Guatemala, 11 de noviembre de 2022

Director
Armando Fuentes Roca
Escuela De Ingenieria Civil
Presente.

Estimado Mtro. Fuentes

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DETERMINACIÓN DE ALTURA MÁXIMA Y RELACIÓN DE ESBELTEZ RECOMENDABLE PARA EDIFICIOS DE SISTEMA DE FORMALETA Y MUROS DE CONCRETO REFORZADO EN COMPARACIÓN CON SISTEMAS DE MARCOS SIMPLES, APLICADOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Análisis y Diseño Estructural y Estructuras Complejas - Respuesta estructural**, presentado por el estudiante **Abraham Orozco Castellanos** carné número **201021216**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en CIENCIAS en Estructuras.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

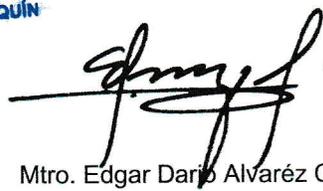


Mtro. Mario Estuardo Molina Marroquín
Asesor(a)

MARIO ESTUARDO MOLINA MARROQUÍN
MSc. Ingeniería Estructural
Ingeniero Civil
Colegiado No. 3099



Mtro. Armando Fuentes Roca
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

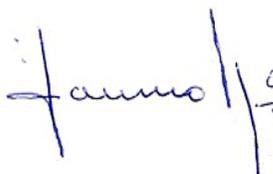




EEP.EIC.1540.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DETERMINACIÓN DE ALTURA MÁXIMA Y RELACIÓN DE ESBELTEZ RECOMENDABLE PARA EDIFICIOS DE SISTEMA DE FORMALETA Y MUROS DE CONCRETO REFORZADO EN COMPARACIÓN CON SISTEMAS DE MARCOS SIMPLES, APLICADOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Abraham Orozco Castellanos**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Mtro. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela De Ingenieria Civil

Guatemala, noviembre de 2022



LNG.DECANATO.OI.077.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DE ALTURA MÁXIMA Y RELACIÓN DE ESBELTEZ RECOMENDABLE PARA EDIFICIOS DE SISTEMA DE FORMALETA Y MUROS DE CONCRETO REFORZADO EN COMPARACIÓN CON SISTEMAS DE MARCOS SIMPLES, APLICADOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por: **Abraham Orozco Castellanos**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, febrero de 2024

JFGR/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

LUZ del mundo, su misericordia infinita me permite alcanzar tan anhelado sueño, gloria a Él por todos los siglos.

Mis padres

Por ser mi guía, por su amor y entrega en cada paso de mi vida, que el Creador los bendiga.

Mi esposa

Amada amiga y confidente, testigo de cada lucha en este camino, te amo Veraninel P. C.

Mis hermanos

compañeros y aliados en mi vida, los quiero mucho (Silvia, Eugenia, Emilia y Francisco).

Amigos y familia

Por haber creído en mí, y darme ánimos y su apoyo incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Que, sin Él, esto no hubiera sido posible.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la alma mater que me abrió las puertas y me da el honor de formar parte de su familia.
Facultad de Ingeniería	Por haberme dado las herramientas y conocimientos para ser un profesional y brindarme la oportunidad de lograrlo como ingeniero.
Mi asesor	M. Sc. Estuardo Molina, que siempre ha sido generoso con sus conocimientos y me ha apoyado en todo lo posible.
Catedráticos	Que, sin ellos, no hubiera tenido una guía profesional.
Mi familia	Por su apoyo incondicional y haberme animado a lograr esta meta.
Mis suegros	Que siempre estuvieron alentándome a seguir y no desfallecer en esta lucha.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANTECEDENTES	3
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
4 JUSTIFICACIÓN	17
5 OBJETIVOS	19
5.1 GENERAL.....	19
5.2 ESPECÍFICOS.....	19
6 ALCANCES.....	21
7 MARCO TEÓRICO	23
7.1 Sistemas estructurales.....	23
7.1.1 Marcos simples (E1).....	23
7.1.2 Sistema de Muros / Tipo cajón (E2)	24
7.2 Condiciones de sitio	25
7.2.1 Suelo	25
7.2.2 Sismicidad.....	26

7.2.3	Espectro de respuesta	27
7.3	Geometría y aspectos de forma	28
7.3.1	Altura	28
7.3.2	Relación de esbeltez.....	29
7.3.3	Densidad de muros.....	30
7.4	Análisis estructural.....	30
7.4.1	Método de elementos Finitos	30
7.5	Respuesta sísmica	31
7.5.1	Parámetros sísmicos	32
7.5.2	Periodo	33
7.5.3	Derivas.....	33
7.5.4	Esfuerzos.....	33
8	HIPÓTESIS.....	35
8.1	Definición conceptual.....	35
8.2	Definición operacional	35
9	PROPUESTA ÍNDICE.....	37
10	METODOLOGÍA	39
10.1	Fase 1: Revisión y recolección bibliográfica	39
10.1.1	Normativas para estructuras con sistema de Muros	40
10.1.2	Normativas para estructuras con Marcos Arriostrados ...	40
10.1.3	Teoría, planteamiento de autores y aspectos de respuesta sísmica	40
10.2	Fase 2: Diseño Experimental.....	41
10.2.1	Configuración arquitectónica.....	41
10.2.2	Condensación de información de proyectos	41
10.2.3	Configuración de Espectro sísmico.....	42

	10.2.4	Pre-test.....	42
	10.2.5	Experimento	42
	10.2.6	Post-test	43
	10.3	Fase 3: Análisis de resultados	43
	10.4	Fase 4: Reporte de Resultados	43
11		TÉCNICAS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	45
	11.1	Procesamiento de datos (resultados)	45
12		CRONOGRAMA.....	47
13		FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	49
14		REFERENCIAS.....	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Índice de sismicidad en Guatemala.....	27
---	----

TABLAS

I. Definición de variables	36
II. Cronograma de Investigación.....	47
III. Presupuesto de Investigación	49

LISTA DE SIMBOLOS

PGA	Aceleración máxima del suelo.
Kd	Factor de determinación de valores de diseño.
Qr	Factor de incremento de resistencia.
Cd	Factor de incremento del desplazamiento elástico.
R	Factor de modificación de respuesta sísmica.
Io	Índice de sismicidad.
ML	Magnitud de Richter (local) para $ML < 6.0$.
Ms	Magnitud de Richter (onda superficial), para $Ms > 6.0$.
Mw	Magnitud de Richter, determinada por momento.
S1r	Ordenada espectral de 1 segundo del sismo extremo, en el manto rocoso.
Scr	Ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo en el manto rocoso.
T(s)	Periodo de vibración de una estructura en segundos.

GLOSARIO

Carga Axial	Carga aplicada perpendicular al plano en estudio
Carga de sitio	Carga sísmica dinámica en función de la zona sísmica, clasificación, y espectro de respuesta.
Confinamiento	Proceso que garantiza la estabilidad de estructuras y mejora su respuesta ante cargas y sismos
Deriva	Diferencia entre el desplazamiento de un nodo del diafragma K respecto al nodo del diafragma K-1 (inferior).
Ductilidad	Propiedad de deformarse bajo una carga en un rango plástico sin colapsar ni afectar su resistencia crítica.
Esfuerzo	Relación de una carga P sobre un área específica.

Espectro sísmico	Curva que muestra la máxima respuesta de un grupo de osciladores de un grado de libertad con distintos periodos naturales de vibración, sujetos a la misma excitación sísmica.
Formaleta	Estructura de paneles metálicos para el colado de concreto en estructuras monolíticas.
In-situ	Que se realiza directamente en obra, en sitio.
Efecto P-delta	Utilizado en análisis no lineal para determinar momentos de segundo orden bajo cargas de gravedad.
Periodo	Tiempo en que una estructura finaliza un ciclo en un modo de vibración.
Rigidez	Propiedad mecánica que determina la capacidad de no deformarse bajo una carga aplicada.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas estructurales en las edificaciones permiten que, puedan establecerse parámetros de diseño para cada uno de los sistemas; los sistemas que se establecen en la normativa nacional hacen referencia a la forma, en cómo se distribuyen las cargas internamente y como cada uno de ellos, disipa su energía ante excitaciones sísmicas.

El presente estudio surge del planteamiento que involucra al sistema de marcos simples y con mayor atención, al sistema de muros con estructura tipo cajón en cuanto a la variable de altura y respuesta sísmica ante cargas de sitio específicas para la Ciudad de Guatemala. Las estructuras de muros y de marcos se subdividen en función de su capacidad de disipar la energía ante una fuerza externa, lo que implícitamente hace referencia a su ductilidad. El enfoque de estudio es el sistema conformado por muros de concreto reforzado de pared delgada (sistema industrializado, Colombia), o de baja ductilidad (AGIES NSE 7.9, 2020) como se clasifica en la normativa nacional.

Se hace referencia sustentada en un marco teórico, que involucra las variables a observar como lo es la respuesta dinámica en función de: la altura, relación de esbeltez y la zonificación sísmica en la cual se proyecte la edificación con dicho sistema. Dadas las ventajas constructivas y financieras del sistema, en los últimos años los muros portantes de pared delgada han sido extensamente aplicados en Latinoamérica y, en consecuencia, en territorio nacional para proyectos inmobiliarios de vivienda y apartamentos.

No obstante, el desempeño que se tuvo bajo los eventos de Chile, Japón y Nueva Zelanda, motivan a que se indague más sobre el desempeño de este tipo de estructuras a fin de determinar aspectos de forma, que establezcan un adecuado desempeño ante la amenaza sísmica y que puedan correlacionarse con parámetros de respuesta estructural y establecer para una determinada zonificación límites ó, recomendaciones por debajo de puntos de falla dentro de la zona elástica.

Para llevar a cabo la investigación, se hizo una revisión de la literatura y referencias representativas para entender el comportamiento estructural, y en base a ello, por medio del software SAP2000 e ETABS establecer modelos de análisis estructural y obtener resultados orientados al objeto de estudio.

2 ANTECEDENTES

El sistema de formaleta para edificios con muros y losas monolíticos es conocido técnicamente como estructuras de cajón o, muros de ductilidad baja; el mismo ha sido tendencia en los últimos años en los proyectos inmobiliarios de apartamentos y casas en serie. Para el presente estudio es necesario conocer las investigaciones realizadas respecto al sistema constructivo de formaleta; así también, respecto a estructuras con muros de baja ductilidad, muros portantes y/o de concreto reforzado realizadas previamente; se recalca la necesidad de conocer su desempeño bajo cargas sísmicas.

Haciendo referencia de Daza (2022) se tiene una alta demanda de vivienda, y esto ha implementado la construcción industrializada de edificios, nombre como se le llama en Colombia, la cual se constituye por muros de concreto reforzado colados in situ, con espesores comunes entre 80 y 150 mm (Arteta et al., 2018) (p.6). “Este sistema se basa en el uso de una formaleta metálica que permite fundir concreto de un apartamento o piso entero de forma monolítica (muros y losas de entrepiso)” (Correal, Carrillo, Reyes, Echeverry, Herran, 2017, parr. 1).

Ampliando el tema del uso de la formaleta, Silva (2018) citado por Flórez y Hernández (2019) sostiene que “las formaletas son moldes que se emplean en construcción para darle forma al concreto, influyendo ‘directamente en la apariencia y calidad de la superficie de la estructura’” (p.13). Por lo cual también es necesario tener presente que las mismas, tienen determinada función dentro del proceso constructivo, sin olvidar que “dada su importancia y utilidad, las formaletas cumplen con ciertas especificaciones técnicas y prácticas para cada

uno de los diferentes tipos de construcción como son vivienda, edificios en altura, muros de contención, etc.” (Flores y Hernández, 2019, p.14). Se puede apreciar que el sistema de formaleta tiene amplia aplicabilidad por su inherente función.

Agregado a lo anterior, este sistema se considera totalmente innovador y moderno, sin embargo, desde tiempos antiguos ya se practicó un método o sistema análogo para muros portantes; de los cuales aún se conservan elementos construidos con adobe y piedra, pegados con una pasta que tenía la función de mortero o cementante, todo esto realizado en el antiguo Egipto (Gómez y Rojas,2019, p.16). Este mismo autor comparte una técnica y/o método utilizado en Yemen anteriormente, llamada Tapial la cual “consistía en construir muros con tierra arcillosa, compactada a golpes, se empleaba un encofrado para contenerla, una vez se terminaba una hilada de tapias, se colocaba el encofrado encima, y se repetía la operación” (Gómez y Rojas,2019, p.16); con lo cual se hicieron construcciones de hasta 6 pisos.

La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica [AGIES] (2020), relacionado al sistema en su norma NSE 7.9 comenta: “edificaciones de múltiples pisos estructuradas con paredes delgadas de concreto, muchas veces con una sola malla de refuerzo, han incursionado en la práctica constructiva local bajo el incentivo de que permiten recortar costos constructivos” (p.1). Esto es uno de los motivos de la aplicación del sistema, debido a que se reducen tiempos de construcción, derivado del uso de moldes metálicos que funcionan como formaleta (previamente mencionado), por piso o planta; proceso que se repite conforme el avance en altura.

Un aspecto que se resalta es la necesidad de una construcción más eficiente no solo en reducción de costos, sino en una construcción más rápida y que tome en cuenta aspectos de índole ambiental, en ese aspecto Arapa y

Maldonado (2019) refieren: “por otro lado, está la necesidad de proteger los bosques, hizo que aparecieran en el mercado una serie de sistemas de encofrados, realizados con distintos materiales como: metal, plástico, fibra, etc” (p.18). Esto es otro factor del sistema de formaleta, el cual es un proceso que reduce el uso de madera en los proyectos, lo que a su vez lo hace más atractivo desde un enfoque ambiental y que se vuelve necesario en los tiempos actuales.

Un factor que aún está en prueba es el tiempo de empleo de este sistema en edificios, lo cual referente a su desempeño “no ha pasado aún la prueba de un sismo de gran intensidad (aceleraciones pico superiores a 0.4 g)” (AGIES, 2020, p.2). Esto es un aspecto importante para evaluar o que debe de seguirse evaluando en su aplicación regional, debido a que el sistema es tendencia y ya existen diversos proyectos habitacionales con muros portantes de concreto reforzado en toda la capital. No obstante, dentro de la misma normativa 7.9 AGIES (2020), menciona que “la posibilidad de utilizar muros de baja ductilidad dependerá del control de esfuerzos y una buena organización estructural (suficientes muros bien distribuidos)” (p.3).

Basado en lo anterior debe hacerse referencia a la sismicidad del sitio, en este caso, a la Ciudad de Guatemala, para conocer en parte las condiciones de sitio propias de la zona, esto alude a una tectónica regional y local; dentro del marco tectónico regional se hace énfasis a las placas de Norteamérica y el Caribe, las cuales delimitan una zona de cizalla o transcurrancia, cuya evidencia son las placas de: Motagua, Chixoy-Polochic y Jocotán-Chamelecón (Instituto Nacional de de Sismología, Vulcanología, Meteorología, e Hidrología [INSIVUMEH], 2016, p.9). Estas son fallas que pueden causar gran cantidad de daño por su capacidad de liberar energía.

Las tectónica local, según INSIVUMEH (2016), se refiere a zonas donde la corteza presenta fractura o fisuramiento, esto indica fallas menores llamadas secundarias como lo son las fallas de: Mixco, Jalpatagua, Santa Catarina Pinula, también se incluye el Graben de Ipala y el de Guatemala (p.9). Las fallas secundarias o locales tienen una profundidad relativamente corta, estas como bien lo explica INSIVUMEH (2016), se dan por los esfuerzos de la corteza terrestre sobre la plataforma de la placa del Caribe por el movimiento de transcurrancia y el de subducción en el pacífico del país. Dicho lo anterior, la Ciudad de Guatemala se encuentra en un punto de alta incidencia sísmica tanto regional y local; esto infiere en el uso de sistemas estructurales que contemplen esta actividad sísmica y la alta peligrosidad tectónica de la zona.

Por lo tanto, es de vital importancia que para el diseño de las edificaciones se tomen en cuenta espectros representativos que relacionen las condiciones de sitio con la tipología de la estructura a diseñar, para lo cual “el espectro de respuesta de aceleración (S_a) es uno de los parámetros utilizados con mayor frecuencia en ingeniería sísmica para el diseño sismo resistente” (Soto, Alva, Ortiz, 2018, párr.1). A lo cual AGIES (2020) en su normativa en referencia a condiciones de carga hace la anotación que “los sismos de diseño se definen por medio de espectros de respuesta sísmica simplificados para estructuras con 5 % de amortiguamiento” (p.4-3). El espectro es una respuesta (aceleración espectral) del sitio propiamente, independiente de la respuesta de la estructura.

Existe un caso de estudio en donde se evalúa la interacción suelo-estructura, para distintas alturas de edificaciones de concreto reforzado ante cargas sísmicas, donde se menciona el factor suelo y su incidencia en la estructura: “el tipo de suelo es un factor importante cuando se desea evidenciar el análisis dinámico por interacción suelo-estructura en los modelos estructurales” (Villareal, Águila, 2021, p.432). Esto refiere que la zonificación y

el estrato de suelo donde se cimentará la estructura, inciden directamente en la evaluación de cargas sísmicas y de sitio, por lo que, en una comparativa de estratos de suelo y tipo de empotramiento de la estructura al mismo, se puede tener un efecto de rigideces que afecten a la respuesta estructural:

Si se considera la rigidez del suelo en el análisis, puede traducirse en mayores deformaciones sobre el sistema estructural, teniendo como consecuencia la generación por ejemplo de momentos de segundo orden, incremento del efecto p-delta, incrementos en las derivas, etc. (Villareal y Águila, 2021, p.429)

Con lo anterior el autor hace referencia del suelo en términos de la degradación que puede sufrir el mismo ante un evento, lo cual, puede afectar a los resultados del análisis dinámico; un suelo blando o un suelo firme incide directamente en los ciclos de interacción de suelo-estructura y en las cargas que afectaran a la estructura propiamente. Derivado de lo expuesto, es de suma importancia que cada sistema estructural y/o constructivo sea experimentado, ante cargas sísmicas configuradas al sitio y a la tipología, como se mencionó anteriormente en referencia al espectro.

Por ende, la evaluación sísmica es crítica debido a que los eventos de Chile (Mw 8.8, febrero 2010), Nueva Zelanda (ML 6.3, febrero 2011) y Japón (Mw 9.0, marzo 2011), evidenciaron el mal desempeño ante cargas sísmicas del sistema, a pesar de sus avances tecnológicos en sus códigos de diseño, al no alcanzar capacidades de ductilidad y desplazamiento esperados. (Trujillo, 2018, p.1).

En su trabajo Trujillo (2018), hizo un estudio de este sistema de muros de concreto reforzado ante cargas sísmicas específicas, tomando en cuenta aspecto

de forma y la capacidad de disipación de energía del sistema, para densidades de edificaciones con distintas alturas y refuerzos en el concreto.

Según Bonnet y Blandón (2011) citados por Villegas (2019), indican que “los principales tipos de falla se dan por compresión del concreto en los bordes de los muros y el pandeo de refuerzo longitudinal, observados en muros de poco espesor con altas cargas axiales” (p.4). En su estudio se basó de curvas de fragilidad y vulnerabilidad, para analizar el riesgo y respuesta sísmica del sistema en estudio para la zona de Colombia; así también, para determinar la respuesta del sistema estructural en estudio, uso la deriva de piso como parámetro de demanda principal (Villegas, 2019, p.15). Ambos autores efectuaron análisis no lineales, tanto estáticos como dinámicos para dichos estudios realizados.

Así mismo, Palacios (2019), establece que “parte de este comportamiento se debe a la falta de confinamiento del concreto, que aumenta el riesgo de aplastamiento bajo deformaciones unitarias muy bajas” (p.15), agregando que la inestabilidad del refuerzo longitudinal (pandeo) es “por la falta de restricción por parte de los estribos y la inestabilidad lateral global del elemento luego de ser sometido a protocolos de carga cíclica” (p.15). Esto lo argumenta derivado de los espesores de los muros (entre 80 y 150 mm), y a su inestabilidad fuera del plano, lo cual plantea un parámetro a considerar: la esbeltez. Ortega, Torres, Cuesvas, Cruz, Marulanda y Thomson (2019) afirma que “altos valores de esbeltez incrementan los momentos de volcamiento y las cargas axiales dinámicas” (p. 7), lo cual incide en la respuesta ante un evento.

Puede apreciarse que este sistema carece de una buena capacidad para disipar la energía y de un desempeño óptimo en el rango inelástico, dando pauta a fallas frágiles; así lo menciona Palacios (2019):

Todos estos resultados desde el punto de vista conceptual indican que el comportamiento sísmico de este tipo de muros es desfavorable debido a que los altos niveles de carga axial y relación de esbeltez de los muros, la falta de confinamiento y detallado, limitan la capacidad del muro y por ende reducen su capacidad de disipación de energía, generando fallas frágiles. (p.28)

Estudios recientes, y evaluaciones post sismo de Chile 2010, evidenciaron parámetros que relacionan la respuesta del sistema de muros de concreto reforzado, ante una aceleración sísmica, por ejemplo: “la relación entre la altura total de una edificación y el período del primer modo traslacional (H/T)” (Ortega et al., 2019, p.8), se considera como “el mejor parámetro para medir la rigidez traslacional de un edificio (Ríos, 2006)” (Palacios, 2017, p.21). A lo cual agrega que dicha relación (H/T), es “una de las variables cuantitativas para definir el “Perfil Bio-Sísmico” de los edificios (Guendelman, Guendelman & Lindenberg, 1997)” (Palacios, 2017, p.21). Con esta relación pueden clasificarse como: muy flexible, flexible, normal, rígidos y de excesiva rigidez.

Otros parámetros determinantes son la esbeltez, la altura, porcentaje de refuerzo, relación de aspecto, densidad de muros en ambos sentidos de la planta arquitectónica, a lo cual, se recomienda que “la densidad de muros sea superior al 4 % para un comportamiento adecuado ante un sismo (González, 2010)” (Palacios, 2019, p.26). Este parámetro es para una adecuada distribución de esfuerzos y cortantes de piso, lo cual puede generar una sobre carga axial dinámica y sobre esfuerzos, en los elementos de borde. Otro caso por ejemplo lo amplia Renjifo (2021), al evaluar el factor R dentro del diseño, a lo cual refiere, que pueden definirse muros importantes que absorban la mayor parte de la carga y de la disipación de energía (p.18).

Lo anterior es debido a que no todos los muros, tanto de entre piso como del primer piso, requieren una capacidad de deformarse ampliamente (al limitar las derivas de piso); por lo tanto en su investigación encontró que, limitar el factor R a un valor pequeño, repercute en asignar mayores secciones de muro; esto requiere más concreto y acero, lo cual significa mayor peso, por lo tanto un mayor cortante basal; por ello propone colocar elementos de borde en los muros que absorban mayor energía ante una excitación sísmica y mantener una sección constante en el resto de muros (Renjifo, 2021, p.18).

Ensayos experimentales del sistema de muros de concreto reforzado, han determinado el mal desempeño de la malla electrosoldada, como refuerzo de flexión y flexo-compresión, para lo cual se hace énfasis en barras dúctiles como opción recomendada, esto debido a su comportamiento frágil, baja ductilidad y deformación unitaria; esto ha provocado que en muchas normativas, sean prohibidas como refuerzo de este sistema, por ejemplo la normativa chilena la prohíbe, salvo para muros de 10 cm de espesor y edificaciones con máximo 5 pisos de altura diseñadas con factores R equivalentes al de estructuras de mampostería. (Vélez, 2020, p.38-40).

Lo anterior no solo relaciona el tipo de refuerzo, sino a la vez, al porcentaje y cuantía de acero longitudinal.

La incidencia de la cuantía de acero puede determinar, una falla frágil en los muros, y una baja capacidad de rotación. (Vélez, 2020, p.41). Por ello, se recomienda colocar barras de acero dúctiles en los extremos de los muros para incrementar su capacidad plástica. Según lo expuesto anteriormente, se hace evidente la investigación e interés en este sistema estructural, para áreas sísmicamente activas. Se ha hablado también de una altura o cantidad de pisos máximos para Colombia, por ello; se pretende hacer continuidad a los estudios

realizados, determinando la altura máxima del sistema para la zonificación de la Ciudad de Guatemala y relación de esbeltez, para su efectiva comparación con el sistema de marcos simples.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen limitadas directrices para edificios de formaleta que correlacionen la capacidad y respuesta estructural adecuadas, respecto a cargas de sitio comparado con otros sistemas estructurales.

En la actualidad las instituciones educativas, forman parte de quienes promueven la investigación científica, para el desarrollo e implemento de nuevas tecnologías, en cada uno de los campos de la ingeniería; como referencia, el Centro de Investigaciones de Ingeniería, ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, genera el soporte para la realización de las mismas; no obstante, la investigación científica para nuevos sistemas constructivos aún es limitada, por lo tanto, se identificó que el sistema de formaleta aplicado en edificios no ha sido explorado de manera integral.

En base a lo antes mencionado, es evidente la necesidad de normativas y/o guías que establezcan parámetros y factores base, en la aplicación del sistema en función de la zonificación. En este sentido, la AGIES (Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica); tiene la responsabilidad de generar normas, para la correcta ejecución y diseño de la ingeniería estructural en el país.

Pese a las limitantes que puedan existir en la aplicación del sistema; la formaleta presenta versatilidad y una aplicación múltiple, por lo que podría generar una eficiencia en los presupuestos durante la construcción; sin embargo, la información técnica disponible (desempeño, dimensionamientos, zonas de aplicación, limitantes, entre otros) aún es limitada, generando poca bibliografía

de consulta y acceso, que permitan tener un conocimiento más eficiente para su aplicación y diseño en la zona sísmica 4.1.

Consecuente a ello, se tiene una mayor comodidad y confianza en la aplicación de los sistemas tradicionales tales como el sistema de marcos y mampostería reforzada. Esto genera que los enfoques de estudio y especialización sea hacia estos sistemas; dando pauta a que el sistema de formaleta sea privilegiado y limitado para ciertos sectores, dando lugar a que se tenga directrices limitadas, con poca evaluación experimental (de campo) y no comprobadas por múltiples entidades nacionales relacionadas al tema; para una correcta y segura aplicación del sistema en proyectos tipo edificios.

Por lo tanto, es probable que exista una deficiencia en sistemas constructivos de este nuevo milenio, que, a pesar de no ser tan nuevos, aún se manejan de manera conservadora sin, o la poca, estipulación de límites de ingeniería específicos para ellos, como es el caso de este sistema propiamente.

En base a lo anterior, se plantea la siguiente pregunta principal:

¿Cuál es la altura máxima y relación de esbeltez que puede aplicarse a los edificios con sistema de muros de concretos reforzado, al estar sometidos a cargas y condiciones de sitio del perímetro de la Ciudad de Guatemala?

Asimismo, se establecen las siguientes preguntas secundarias:

¿Qué modelo arquitectónico utilizar, para el análisis comparativo de estructuras de muros de concreto reforzado (tipo cajón) y marcos simples ante cargas sísmicas de la zona NSE 4.1.?

¿Qué parámetros de diseño correlacionan la respuesta estructural del sistema de muros de concreto reforzado con el de marcos simples?

¿Qué aspectos de forma inciden en el desempeño estructural, dimensionamiento y esbeltez de los edificios con sistema tipo cajón?

¿Bajo qué criterios confirmar la aplicabilidad y seguridad del sistema de muros de concreto reforzado para zonas sísmicamente activas y su uso en edificios para la Ciudad de Guatemala?

4 JUSTIFICACIÓN

El sistema de muros de concreto por medio de formaleta es un sistema contemporáneo, que presenta múltiples ventajas y óptimos rendimientos, en la ejecución proyectos para el sector inmobiliario y vivienda. Este sistema que se caracteriza como un sistema de muros de baja ductilidad, ha sido pionero en los proyectos de edificios en la ciudad de Guatemala para una altura limitada. Esta altura limitada está regida por muchos factores como lo son: el costo, tiempo de vida del proyecto, ductilidad, resistencia, derivas y condiciones de servicio, y vida útil, entre otros.

Debido a que es uno de los sistemas de construcción más utilizados actualmente, es necesario conocer los límites que el mismo presenta para una óptima aplicación y garantía de la construcción para los involucrados del proyecto; desde el inversionista hasta el usuario último. Por esta razón, es de suma importancia conocer la respuesta estructural del sistema, en comparación con los sistemas comúnmente utilizados en las estructuras tipo edificios, como los son: marcos de concretos resistentes a momento, mampostería reforzada y determinar estos límites correspondientes a su altura y grado de esbeltez; que en consecuencia se encuentren en un rango aceptable y dentro de tolerancias exigidas por la norma.

Por lo tanto, es necesario poder determinar cuál es la altura máxima y grado de esbeltez, que puede brindarse a los edificios con este sistema dentro de un marco específico, como lo es la Ciudad de Guatemala; que, al estar en una zona sísmicamente activa, no generen aceleraciones internas críticas (derivadas de su periodo), que comprometan la seguridad estructural y la integridad del

mismo, en conjunto con el elemento más importante: los ocupantes y/o usuarios. La creación de esta investigación ayudará a que se tenga una correlación de estos parámetros, y a la vez una comparación con los sistemas comúnmente utilizados, brindando como resultado una proporción en su geometría, que genere las mejores condiciones cuando se presente una aceleración del sitio, como lo es respectivamente, la Ciudad de Guatemala.

Esta investigación beneficiará a diseñadores, constructores, desarrolladores, patrocinadores y/o supervisores de edificios con sistema de formaleta colada in situ, debido a la evaluación del desempeño de este tipo de estructuras bajo envolventes de carga específicas para la zona sísmica NSE 4.1; posiblemente también beneficiará a estudiantes de la carrera de ingeniería civil y de la maestría en estructuras, ya que servirá de fuente de consulta técnica para el desarrollo de nuevas investigaciones relacionadas al análisis de estructuras y edificaciones con sistemas monolíticos de formaleta (estructuras tipo cajón), y su respectivo desempeño estructural derivado de su amplia aplicabilidad en la ciudad de Guatemala y potencial escala a nivel nacional.

5 OBJETIVOS

5.1 GENERAL

Determinar la altura máxima y relación de esbeltez adecuada para edificios con sistema de muros de concreto reforzado, bajo cargas y condiciones de sitio para la Ciudad de Guatemala.

5.2 ESPECÍFICOS

1. Analizar bajo un modelo arquitectónico definido, estructuras de muros de concreto reforzado (tipo cajón) y marcos simples para cargas sísmicas de la zona NSE 4.1.
2. Identificar parámetros de diseño que correlacionen la respuesta estructural para los sistemas en estudio.
3. Determinar aspectos de forma que inciden en el desempeño y dimensionamiento de los edificios con estructura tipo cajón y en su relación de esbeltez.
4. Confirmar que el sistema de muros de concreto reforzado es congruente con aspectos de seguridad estructural planteados por las normativas locales y la apropiada aplicabilidad del mismo en edificios para zonas sísmicamente activas.

6 ALCANCES

El presente trabajo se enmarca en la línea de investigación Análisis y Diseño Estructural de Estructuras Complejas, bajo la sub línea de respuesta estructural; puesto que la intención del presente trabajo es determinar datos comparativos entre dos o más sistemas de construcción, el tipo de investigación tendrá un alcance correlacional, el enfoque del mismo será de tipo descriptivo; por el tiempo en que se desarrollará será de tipo transversal; su propósito es aplicable y el diseño metodológico será experimental.

La evaluación de edificaciones con sistema de formaleta desde un enfoque estructural y servicio límite, permite la revisión de la capacidad y en su defecto, la respuesta estructural de las mismas al estar sometidas a distintos escenarios que contemplen cargas y envolventes, a las cuales pueda estar sujeta nuestra estructura, esto conlleva a determinar parámetros en su geometría que mejoren el desempeño bajo cargas específicas de sitio y aceleraciones espectrales; establecidas en códigos locales de diseño; y con ello, realizar una comparativa con otros sistemas utilizados.

El análisis estructural desde esta perspectiva permite determinar parámetros, que puedan garantizar la serviciabilidad de las edificaciones con límites adecuados y permisibles de ingeniería, establecidos en las normativas referentes al tema, dando lugar a que se restrinjan deformaciones horizontales y verticales, que generen un riesgo e incomodidad para los usuarios en situaciones extremas que afecten a la estructura; esto propiamente es inherente al sistema estructural de interés, por ello se vuelve aún más importante su revisión por el tema de ductilidad y/o disipación de energía.

Es necesario la creación oportuna de documentos especializados en el tema, que proporcionen directrices e información para factores de comparativa de desempeño; no obstante, la evaluación desde una perspectiva de servicio permite establecer relaciones de esbeltez, que contribuyan a la adecuada aplicación y limitación del sistema de formaleta, en función de la zonificación en interés, y a su adecuado desempeño al presentarse un sismo.

7 MARCO TEÓRICO

En el presente cuerpo de investigación, se buscará tener soporte teórico sobre las variables que presenta el estudio a realizar, sobre la altura y esbeltez de los edificios con sistema de muros de concreto reforzado, en una zonificación específica, así también su desempeño bajo cargas externas de sitio.

7.1 Sistemas estructurales

El sistema estructural forma parte de la tipología que se asigna a las edificaciones según su modulación, y desempeño bajo cargas. “El objetivo de un sistema estructural es resistir las acciones a las que va a estar sometido, sin recibir grandes daños que lo lleven a un colapso o mal comportamiento” (Andrade y Jaramillo, 2015, p.19).

Según AGIES (2020), la clasificación de los sistemas estructurales se realizará conforme la sección 1.6 de la normativa referente al diseño estructural de edificaciones (p.1-11). En dicha sección se hace énfasis de 6 tipos de sistemas, clasificándose desde un sistema E1 hasta sistemas E6 (AGIES, 2020, p.1.11). En el presente estudio se hará énfasis en los dos primeros sistemas, con interés en los elementos de concreto reforzado.

7.1.1 Marcos simples (E1)

De manera muy concreta y precisa AGIES (2020) los define como: “un sistema integrado con marcos de columnas y vigas que soportan toda la carga vertical y además todas las solicitaciones horizontales. Todos los marcos deben

estar unidos entre sí por diafragmas de piso” (p.1-12). Este es el sistema mayormente utilizado a nivel local, con la salvedad que los marcos pueden ser tanto de concreto reforzado, acero (con el apoyo de perfiles estructurales) y, combinado.

Referente al sistema de marcos, se sostiene que “este concepto hace énfasis en sistemas de vigas y columnas, cuyas conexiones en los nodos son los suficientemente rígidas para presentar una rigidez necesaria tomando las cargas sísmicas laterales” (Cerde, Medrano, y Membreño, 2018, p.9); no obstante, se agrega que este sistema busca disipar la energía principalmente por medio de las vigas y no por las columnas, manteniendo el criterio columna fuerte-viga débil (Cerde, Medrano, y Membreño, 2018, p.9).

7.1.2 Sistema de Muros / Tipo cajón (E2)

Este sistema es el de principal interés en el presente estudio, para lo cual se define como “un sistema sostenido por muros estructurales interconectados con losas actuando como diafragmas” (AGIES, 2020, p.1-12); en este sistema los muros son los principales elementos que resisten las cargas tanto gravitacionales como horizontales.

Este sistema es aplicable tanto para muros de mampostería reforzada como los de concreto armado; el enfoque principal de la investigación será respecto a los muros de concreto reforzado para homogenizar los materiales en el análisis estructural.

Respecto a la estructuración del sistema Monsalve (2005) sostiene que “el propósito principal en la contribución consecuente de muros en la estructuración

de un edificio es a menudo el de resistir fuerzas laterales, optimizando la resistencia sísmica” (p.3).

Técnicamente este sistema conformado por los muros de concreto reforzado, se le conoce también como sistema con muros de baja ductilidad en la normativa nacional (AGIES, 2020).

7.2 Condiciones de sitio

Para conocer las cargas, a las cuales estará sometida la estructura respecto al sitio, es fundamental conocer las condiciones propias y específicas en donde se proyecta realizar el estudio; las condiciones de sitio proveen características del suelo y/o una clasificación del mismo, así también, la sismicidad específica para el diseño del espectro de respuesta, y así conocer la interacción que tendrá la misma con el suelo ante excitaciones sísmicas.

7.2.1 Suelo

La normativa nacional especifica una clasificación de suelo referente a las condiciones de sitio, la cual es en base a las características del estrato de subsuelo, a lo cual refiere “los sitios se clasificarán en alguna de las siguientes categorías: AB, C, D, E o F. La clasificación del sitio será necesaria para configurar correctamente el espectro del sismo de diseño” (AGIES, 2020, p.4-2).

La clasificación del suelo se vuelve imprescindible debido a que la información que esta provee “permite la modelación del edificio para verificar el comportamiento estructural anómalo y para evaluar el comportamiento de la intervención ante la acción sísmica local” (Maldonado, Maldonado y Martín, s.f., p.2). En el proyecto inicialmente se usará una clasificación AB debido a que “para

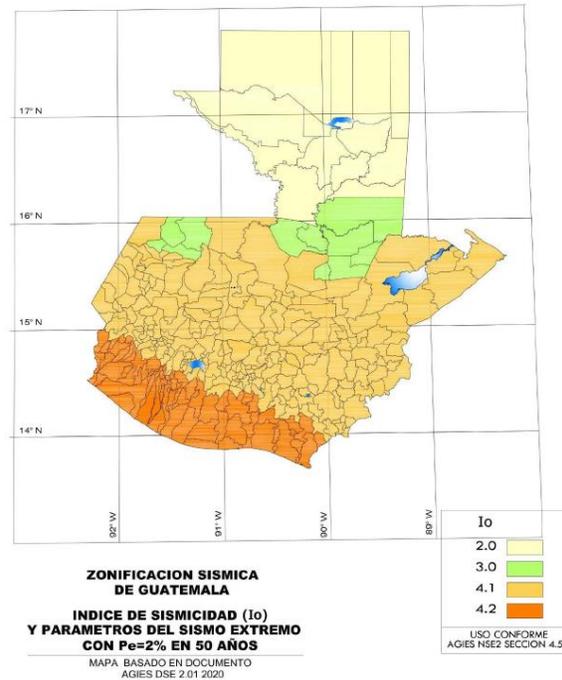
el territorio de Guatemala no se ha considerado distinguir entre perfil A y B. Se utilizan los parámetros correspondientes al perfil B” (AGIES, 2020, p. 4-2).

7.2.2 Sismicidad

La sismicidad está relacionada a la actividad sísmica del sitio, a las fallas y a la aceleración espectral que afectará a la edificación. La Ciudad de Guatemala, se encuentra delimitada por fallas tipo graben, así lo afirma Pérez (2009) cuando concluye que “bajo el valle de la ciudad de Guatemala ha sido formado como una estructura de tipo pull apart basin” (p.74); la cual según expone está “delimitado al norte por la falla del Motagua, al sur por la falla de Jalpatagua y en el centro se ha generado una la zona de distensión que formó la depresión en la que se encuentra la ciudad” (Pérez, 2009, p.74).

La normativa nacional establece y propone un índice de sismicidad, el cual es fundamental debido a que incide en el espectro de respuesta; por ello, se hace una división del territorio nacional donde “se divide en macrozonas de amenaza sísmica caracterizadas por su índice de sismicidad que varía desde $I_0 = 2$ a $I_0 = 4$ ” (AGIES, 2020, p.4-1). La Ciudad aplica en una sismicidad con índice de 4.1

Figura I. Índice de sismicidad de Guatemala



Fuente: AGIES, (2020). *NSE 2 DEMANDAS ESTRUCTURALES Y CONDICIONES DE SITIO*. Recuperado de: <https://www.agies.org/bibliotecas/>

7.2.3 Espectro de respuesta

El espectro de respuesta genera la demanda o respuesta en sí del terreno donde se proyecte la edificación, esto es inherente al sitio y al sismo de diseño, por lo que “el espectro de respuesta se puede obtener mediante el registro sísmico, el estudio de peligro sísmico y el análisis de respuesta de sitio” (Soto, Alva y Ortiz, 2018, parr.1). Para ampliar el significado del mismo, y la aceleración que contiene el espectro para determinados periodos (segundos) AGIES (2020) establece “los parámetros S_{cr} y S_{1r} son respectivamente la ordenada espectral de período corto (0.2 segundos) y la ordenada espectral con período de 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés” (p.4-4).

El espectro debe calibrarse respecto al lugar, al nivel de protección sísmica y también al factor K_d , correspondiendo a la vez, a la clasificación de la obra en estudio. Para el cálculo del espectro, se utilizará el proceso dictado en la norma correspondiente de AGIES, siguiendo la metodología de la sección 4.5 (AGIES, 2020, pp. 4-4 a 4-9).

7.3 Geometría y aspectos de forma

Los aspectos de forma y geometría inciden drásticamente en la respuesta que una edificación, al ser sometida a cargas externas y sísmicas debido a la regularidad o, irregularidad de su forma; así también, al área de muros que debe tener una edificación con el sistema de muros de concreto reforzado.

Los aspectos de forma se vuelven como un índice del daño, que puede ocurrir en la edificación ante una carga sísmica, por ejemplo, Jünemann (2015) citado por Ortega et al. (2019) relaciona “una correlación positiva entre el daño y dos parámetros globales de las edificaciones: la relación de aspecto en planta de la edificación (B_x/B_y) y la relación de esbeltez del edificio H/B_y ” (p.7). Por ello es crítica los parámetros de forma que se asignen a las edificaciones con este sistema estructural.

7.3.1 Altura

Según la tipología a sistema estructural, el nivel de la protección sísmica y la ductilidad, se limita la altura de la edificación o se hacen ciertas observaciones para que sea segura estructuralmente.

En la normativa de diseño estructural, AGIES (2020), establece una tabla para la comparativa de altura y parámetros sísmicos en función de la ductilidad

(p.1-17). No se especifica una altura límite; por ejemplo, en proyectos realizados en Colombia, dentro de evaluaciones realizadas a edificaciones de esta tipología se encontraron proyectos con alturas mayores a 40 m (Palacios, 2019, p.19).

7.3.2 Relación de esbeltez

La relación de esbeltez o también llamada relación de aspecto incide en la resistencia de un elemento muro, en una serie de ensayos con muros de mampostería reforzada se “encontró una degradación hiperbólica de la resistencia cortante normalizada con la relación de aspecto” (Pérez, Flores y Alcocer, 2013, p. 56).

La relación de esbeltez se define, haciendo referencia de Pérez, Flores, Alcocer (2013) como:

$$H/L$$

Donde H corresponde a la altura de elemento y L, a la longitud del mismo (p.55). La normativa nacional que establece lineamientos para los muros de concreto de baja ductilidad (NSE 7.9) establece que “para considerar un adecuado desempeño sismo-resistente, un ‘muro’ se define como una placa vertical, con espesor no menor al estipulado en la Sección 11.1.4” (AGIES, 2020, p.11-3) y con relación de:

$$H_w/L_w \leq 16$$

Donde la nomenclatura L_w refiere a la longitud del muro en planta, y H_w a la altura del elemento desde la base hasta su remate.

7.3.3 Densidad de muros

“Variables relacionadas con el daño durante eventos sísmicos son la densidad de muros local en cada sentido y el índice global de densidad de muros (IGDM)” (Palacios, 2017, p.14). La densidad de muros es un factor a evaluar en función de la respuesta sísmica; nuevamente haciendo referencia a Palacios (2017) se determina de la siguiente manera: “La densidad de muros local (DML) se establece dividiendo el área de muros a cortante total en cada dirección entre el área total en planta” (p.14).

7.4 Análisis estructural

El análisis estructural es imperativo en el cálculo general de las estructuras civiles; este es un proceso con el cual se determina los efectos internos que pueden generarse en una estructura (de forma global) o un elemento que conforma la misma (de forma local), bajo el efecto de una determinada carga o fuerza externa.

7.4.1 Método de elementos Finitos

El método de elementos finitos es un método que busca simplificar la masa en elementos de menor tamaño, haciéndose un mallado que contiene finitos elementos de aproximación, para ello, el método se basa en la hipótesis de discretización (Celigüeta, 2011, p.3), la cual se fundamenta en los siguientes criterios (Celigüeta, 2011, p.3):

- Los elementos finitos se unen por medio de líneas que concurren en intersecciones conocidas como nodos.

- Los desplazamientos de los nodos con las incógnitas del problema.
- Se garantiza la compatibilidad de las deformaciones.
- Para cada elemento, existen fuerzas concentradas en los nudos, que equilibran las fuerzas del entorno existentes del elemento y las fuerzas exteriores actuantes.

“Esta hipótesis de discretización es el pilar básico del MEF, por lo que se suele decir de éste, que es un método discretizante, de parámetros distribuidos” (Celigüeta, 2011, p.3). Para el análisis de los muros de concreto reforzado se aplicará el método citado, para lo cual AGIES (2020) hace la anotación siguiente: “el área de las secciones en planta de muros y secciones verticales de diafragmas no será modificada, pero se utilizarán reductores del momento de inercia en el plano del muro de 0.35 y 0.70” (p. 6-1).

7.5 Respuesta sísmica

Una estructura al ser sometida a cargas externas como por ejemplo, una excitación sísmica, genera cargas y esfuerzos internos en sus miembros como respuesta a esa fuerza externa; la respuesta sísmica está relacionada al espectro de aceleración del sitio en donde se cimenta la estructura propiamente. Para definir o cuantificar la respuesta sísmica dinámica de un sistema estructural es necesario hacer mención de factores o parámetros que inciden en su diseño; así también, en productos de esa respuesta estructural como lo son derivadas, esfuerzos, periodos de vibración estáticos y modales, entre otros.

Con relación a la respuesta sísmica, “cuando ocurre un terremoto, las ondas sísmicas se propagan desde el foco o hipocentro en todas las direcciones,

a través de lo que se denomina el medio de propagación” (Escorcía y Ochoa, 2013, p.18), esto se conoce como efecto de sitio.

Esta excitación en la base genera una respuesta por parte de la interacción suelo-estructura, por lo que, “para determinar la respuesta dinámica de una estructura de varios grados de libertad se puede utilizar el procedimiento de análisis modal” (Escorcía y Ochoa, 2013, p.36), lo cual hace referencia al espectro de respuesta como se mencionó anteriormente, por lo que en relación a ello se puede definir el “espectro como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica” (Escorcía y Ochoa, 2013, p. 38).

7.5.1 Parámetros sísmicos

Haciendo referencia nuevamente a la normativa nacional referente al diseño estructural de edificaciones, son parámetros que se emplean a fin de cumplir con los límites de desempeño (AGIES, 2020, p.1-9), cada uno es propio del sistema estructural y de la ductilidad que se le asigne a la estructura.

En la sección 1.5 de la normativa se estipula y se realiza comentarios de ampliación en referencia a cada uno de estos factores (AGIES, 2020, p.1-9). Como objeto de estudio se tomará los factores estipulados en la normativa de muros de baja ductilidad para los cuales, se hace referencia a los siguientes valores (AGIES, 2020, 4-3): $R = 4$; $\Omega_r = 2.5$; $C_d = 4$.

7.5.2 Periodo

“Generalmente se utiliza un análisis estructural lineal, con secciones no agrietadas y sin considerar el efecto de los diafragmas de entrepiso en la rigidez del sistema de resistencia sísmica” (Ortega et al., 2019, p.8). Dentro de ensayo se tomará la correlación del periodo y la altura, haciendo énfasis en la relación H/T , y tomando como referencia “la propuesta del ATC3-06, $T = 0.05.H/(B^{0.5})$ (Goel & Chopra, 1994), donde, H y B están en pies” (Ortega et al., 2019, p.8)

7.5.3 Derivas

Las derivas de piso se procederán a limitar conforme a la normativa en referencia, haciendo hincapié en los valores establecidos en la normativa referente a muros de concreto reforzado de baja ductilidad (AGIES, 2020, p.4-3).

7.5.4 Esfuerzos

Los esfuerzos en los muros, se mantener bajos de tal manera que no afecte el desempeño global de la estructura en caso de fallar alguno de ellos, así mismo, no deben excederse los límites para: esfuerzos axiales, cortantes, flexo-compresión y flexo-tracción; haciendo hincapié en los valores establecidos en la normativa referente a muros de concreto reforzado de baja ductilidad (AGIES, 2020, p. 4-3).

8 HIPÓTESIS

8.1 Definición conceptual

La altura de edificios con sistema de muros de concreto delgados debería limitarse a 30 m con una relación de esbeltez no mayor a 3 para no generar sobreesfuerzos dinámicos axiales que fallen el sistema por la poca o escasa ductilidad para zona NSE 4.1.

8.2 Definición operacional

La operacionalidad de las variables descritas en la tabla I, se realizará por medio del análisis correlacional de los modelos a analizar, tomando en cuenta su periodo modal, esfuerzos axiales (son los más críticos) y derivas en función de los distintos valores que puedan tomar la: altura, esbeltez y la zonificación sísmica de un proyecto de baja ductilidad en comparativa con el sistema de marcos simples.

Tabla I. **Definición de variables**

Variable	Definición	Definición Operacional
Altura	Dimensión en longitud desde el desplante hasta la parte superior del elemento	<p>Total: contempla la altura global del elemento</p> <p>Local: contempla la altura local o intermedia a una altura H_i.</p>
Esbeltez	Relación que existe entre altura y base menor de un elemento	<p>Longitud: Medida en planta entre dos puntos</p> <p>Altura: Dimensión vertical desde punto i a punto $i+1$</p>
Zonificación sísmica	Seudoaceleración inherente al sitio y a la amenaza sísmica establecida	<p>Índice de sismicidad: Corresponde a lo establecido en NSE 2 por sismo de diseño</p> <p>PGA: Aceleración indicada para un periodo de vibración de estructura.</p>

Fuente: Elaboración propia.

9 PROPUESTA DE ÍNDICE

A continuación, se presenta la estructura de la propuesta del índice del contenido de la investigación formulada:

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

SIMBOLOGÍA

GLOSARIO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

INTRODUCCIÓN

1. MARCO CONTEXTUAL
 - 1.1 Sistema de estructura de cajón
 - 1.1.1 Aspectos técnicos
 - 1.1.2 Normativas
 - 1.1.3 Proyectos Representativos
 - 1.2 Sistema de Marcos
 - 1.2.1 Aspectos técnicos
 - 1.2.2 Normativas
 - 1.2.3 Proyectos Representativos

2. ESTADOS LÍMITE
 - 2.1 Rango Elástico
 - 2.1.1 Coeficientes de Diseño

- 2.2 Rango Inelástico
 - 2.2.1 Coeficientes de Diseño
- 3. METODOS DE ANALISIS ESTRUCTURAL
 - 3.1 Metodos de Elementos finitos
 - 3.1.1 Modelado en SAP2000
 - 3.1.2 Modelado en ETABS
 - 3.2 Metodos Lineales
 - 3.3 Metodos No Lineales
 - 3.3.1 Push Over
- 4. ANÁLISIS DE PROTOTIPOS
- 5. EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE SERVICIO
- 6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
- 7. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS

10 METODOLOGÍA

Esta investigación busca determinar la altura máxima real, a la cual debería limitarse el sistema de muros de baja ductilidad de concreto reforzado, para el perímetro de la Ciudad de Guatemala, la investigación tendrá un enfoque descriptivo, el alcance será correlacional, bajo un diseño experimental, con una temporalidad transversal, con un propósito aplicable y que se basa en un método hipotético-deductivo, para un análisis estructural bajo la hipótesis ya establecida con el soporte de programas de cómputo como SAP2000&ETABS.

La investigación busca tener el soporte científico de conocimientos abordados sobre el planteamiento del problema, dando soporte a la hipótesis establecida de manera descriptiva. Es necesario tener información puntual de las variables a estudiar, que afectan el comportamiento y desempeño de las edificaciones, con muros de baja ductilidad en su estructura; por ello, se establecen las siguientes fases o procesos metodológicos para el presente estudio.

10.1 Fase 1: Revisión y recolección bibliográfica

Como parte inicial de la metodología se plantea una revisión exhaustiva de conocimientos que han dejado los sismos de Chile y Nueva Zelanda con respecto a las estructuras tipo cajón y, métodos complementarios de análisis estructural para los muros de baja ductilidad, bajo el criterio de aspecto sísmico; sus limitantes en condiciones de servicio, y así también, la revisión de normativas vigentes del 2010 (evento sucedido en Chile) a la fecha actual, para una

retroalimentación de conceptos y criterios para efectuar la fase experimental de manera objetiva y cuantitativa.

10.1.1 Normativas para estructuras con sistema de Muros

Se establece la revisión y comparación de las normativas de Chile y del American Concrete Institute (ACI), y de la normativa local de AGIES, referente a los temas de concreto reforzado, y muros de baja ductilidad. Se procederá a recabar en una ficha los parámetros, para configuración y rectificación de aspectos geométricos, dimensionamientos y módulos de elasticidad y rigidez, para el modelado en los programas de análisis estructural.

10.1.2 Normativas para estructuras con Marcos Arriostrados

Se procederá con el mismo procedimiento que 10.1.1., para realizar la extracción de especificaciones para el concreto reforzado, con énfasis a la parte de marcos estructurales en zonas sísmicas.

10.1.3 Teoría, planteamiento de autores y aspectos de respuesta sísmica

Se plantea hacer referencia y búsqueda de los conceptos y parámetros establecidos por Park y Paulay en estudios de Nueva Zelanda para sistemas de baja ductilidad.

10.2 Fase 2: Diseño Experimental

Para la realización de esta fase, es necesario hacer énfasis en subactividades que permitan hacer las muestras representativas de los sistemas estructurales de interés.

10.2.1 Configuración arquitectónica

Consiste en generar un modelo representativo de los edificios, que están construidos en el área de la metrópoli de la ciudad capital. Se procederá a realizar una visita a 3 proyectos de interés, para recabar la información de geometría y planificación de plantas, y poder generar el modelo en base a lineamientos reales o al menos, aproximados a los proyectos que se ejecutan con el sistema de muros de concreto reforzado de pared delgada. Dentro del proceso de configuración arquitectónica se plantea dar prioridad al sistema de muros de concreto, estableciendo lo siguiente:

- Definición de planta y número de pisos promedio para determinación de altura.
- Establecer materiales y espesores de muro representativos.
- Definición de planos y ejes.
- Establecer una función para clasificar la obra; se trabajarán apartamentos y vivienda horizontal.

10.2.2 Condensación de información de proyectos

Se procederá a generar tablas comparativas para la correlación de alturas, densidad de muros, relación de esbeltez, relación de aspecto, peso.

10.2.3 Configuración de Espectro sísmico

La localización geográfica de interés es la ciudad capital, por lo que se procederá a configurar un espectro de aceleración sísmica, para un mismo tipo de suelo y anclaje al mismo, se seleccionará un suelo tipo AB, promedio con las calibraciones que indica la AGIES en su norma NSE 2. Se establecerá un mismo factor R, como factor común para homogenizar la respuesta sísmica en los modelos.

10.2.4 Pre-test

Se procederá a aplicar el Método de Elementos Finitos para el modelado en Sap2000 y/o Etabs siguiendo los siguientes planteamientos:

- El tamaño de malla se hará máximo 2 veces el espesor de muro por temas de resistencia a corte y flexocompresión en el plano.
- El factor R se asignará al espectro de respuesta configurado en el programa de cómputo.
- Se configurará el módulo de Winkler según la teoría.
- Se asignará una altura equivalente a 9 pisos para generar una referencia de respuesta.

10.2.5 Experimento

Se procederá a evaluar cada modelo con las alturas equivalentes a 9 pisos, 12 pisos, 14 pisos, 16 pisos y 18 pisos, y se recopilará la información de periodo modal, periodo estático, corte basal estático, relación de esbeltez, ajuste de espectro dinámico; se asignará combinaciones de cargas según la normativa

vigente junto con las cargas Sh_x (sismo en eje x) y Sh_y (sismo en eje y) conforme la misma.

10.2.6 Post-test

Se establecerá una correlación de la respuesta sísmica de los modelos analizados, y se configurarán momentos de inercias con sección fisurada como indica la norma NSE 7.9 para la revisión de derivas, esfuerzos axiales, cortantes, momentos flectores, y su comparativa de los esfuerzos de cada piso base con los pisos superiores. Se determinará la corroboración de la relación H/T y la comparación del primer período modal con la relación, " $T = 0.05.H/(B^{0.5})$ " (Goel y Chopra, 1994), donde, H y B están en pies" (Ortega et al., 2019, p.8).

10.3 Fase 3: Análisis de resultados

Se procederá a generar tablas comparativas de los parámetros analizados con las respectivas normativas.

10.4 Fase 4: Reporte de Resultados

Con la información recopilada en la fase 3, se procederá a calcular sus desviaciones, promedio de resultados, resultados máximos y mínimos, determinación de tolerancias congruentes a normativas.

|

11 TÉCNICAS Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Posterior a realizar la parte experimental, para encontrar parámetros que validen las variables en estudio y correlaciones entre los mismos, se hará uso de estadística descriptiva, para poder determinar dichos factores de correlación y porcentajes respecto a datos tabulados en normativa AGIES NSE 7.9 .

11.1 Procesamiento de datos (resultados)

Por medio de Microsoft Excel, se realizará un ordenamiento de los resultados obtenidos y se generará la estadística para obtener los mínimos y máximos; así también, la media y línea de tendencia de parámetros con relación a la altura y esbeltez, la desviación estándar de los mismos, gráficas de periodo modal vrs altura total; periodo modal vrs Relación de esbeltez global; esfuerzos axiales vrs altura, y esfuerzos axiales vrs Período; así también datos que en el proceso se consideren sustanciales y de interés objetivo con la presente investigación.

12 CRONOGRAMA

El desarrollo y ejecución de la presente investigación, se estima realizarla en un lapso de x semanas, proyectando las siguientes actividades:

Tabla II. Cronograma de investigación

Actividad	Duración (semanas)	Hito
Perfil de investigación (seminario 1)		7
Definición de título	4	
Planteamiento y Objetivos	4	
Alcances	2	
Protocolo de Investigación (seminario 2)		10
Ajuste de primer encuadre (perfil)	3	
Justificación	1	
Antecedentes	2	
Marco Teórico	1	
Revisión de Plagio	1	
Hipótesis y Metodología	1	
Entregable	1	
Informe de Investigación (seminario 3)		15
Recopilación de información	2	
Revisión de proyectos y planificaciones arq.	1.5	
Configuración de modelos	2	
Modelado en sap2000 & etabs	1.5	
Análisis de los datos y experimento	1	
Revisión de resultados	1	
Aplicación de estadística para dispersión y correlación	1	
Confirmación de hipótesis y evalúo de variables	1	
Revisión con asesor	1	
Depuración de resultados	1	
Informe entregable	2	

Fuente: Elaboración propia.

13 FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La presente investigación, se realizará de forma personal con el apoyo del asesor que guiará el proceso, así como su buena ejecución. Los recursos que se establecen son de índole personal y propios para llevarla a cabo, siendo un financiamiento e inversión del autor, para gestionar recursos para las actividades y visitas a realizar. Así también, se estima un costo de transporte, de depreciación y uso de equipo de cómputo, adquisición de programas, entre otros.

Tabla III. **Presupuesto de investigación**

Item	Costo Unitario	Sub-total
Administrativos		Q 9,500.00
Impresiones	Q 1,500.00	
Equipo de cómputo	Q 5,500.00	
Visitas a realizar	Q 2,500.00	
Honorarios Asesor		Q 2,500.00
Otros		Q 13,151.00
Planos de arquitectura	Q 2,100.00	
Asesoría arquitectura	Q 850.00	
Matrícula	Q 831.00	
Defensa tesis	Q 2,100.00	
Título	Q 120.00	
Revisión plagio	Q 150.00	
Operativo	Q 4,500.00	
Anexos	Q 2,500.00	
	Total	Q 25,151.00

Fuente: Elaboración propia.

14 REFERENCIAS

1. Andrade Sojos, J., y Jaramillo Carrillo, M. (2015). *ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS ESTRUCTURALES SISMO RESISTENTES PARA EDIFICIOS UTILIZANDO SISTEMAS COMBINADOS CON PÓRTICOS, MUROS O DIAGONALES EN HORMIGÓN Y ACERO*. Tesis de grado. Recuperado el Noviembre de 2022, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21682/1/Tesis.pdf>
2. Arapa Mamani, V., y Maldonado López, F. (Febrero de 2019). *ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DEL EMPLEO DE ENCOFRADOS METÁLICOS Y MADERA EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS EN LA CIUDAD DE CUSCO - 2017*. Tesis de grado. Cusco. Recuperado el 25 de Octubre de 2022, de https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/3751/253T20190091_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
3. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES. (2018 Actualización 15/7/2020). Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 7.9. *DISEÑO DE EDIFICACIONES CON MUROS DE DUCTILIDAD BAJA*. Recuperado el 24 de Octubre de 2022, de <https://www.agies.org/bibliotecas/>
4. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES. (2018 Actualización 15/07/2020). Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 3. *DISEÑO ESTRUCTURAL DE*

EDIFICACIONES. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://www.agies.org/bibliotecas/>

5. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES. (2018 Actualización 15/7/2020). Normas de Seguridad Estructural para Guatemala NSE 2. *DEMANDAS ESTRUCTURALES Y CONDICIONES DE SITIO*. Recuperado el Octubre de 2022, de <https://www.agies.org/bibliotecas/>
6. Celigüeta Lizarza, J. (2011). *MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISIS ESTRUCTURAL*. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://hdl.handle.net/10171/19069>
7. Cerda Ortiz, L., Medrano Alvarez, N., y Membreño Pérez, R. (2018). *DISEÑO ESTRUCTURAL SISMO-RESISTENTE A BASE DE MARCOS DÚCTILES DE CONCRETO REFORZADO APLICADO EN EDIFICIO DE BAJA ALTURA UBICADO EN LA CIUDAD DE MANAGUA*. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://core.ac.uk/download/pdf/250145798.pdf>
8. Correal, J., Carrillo, J., Reyes, J., Echeverry, J., y Herran, C. (2017). *Estudio experimental del comportamiento sísmico de muros de CRF para edificaciones de baja altura*. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Universidad del Norte. Recuperado el Noviembre de 2022, de https://www.researchgate.net/profile/Julian-Carrillo-2/publication/326752306_Ensayos_pseudo-estaticos_de_muros_de_CRF_para_edificaciones_de_baja_altura/

links/5eadfb85299bf18b9590fc5f/Ensayos-pseudo-estaticos-de-muros-de-CRF-para-edificaciones-de-baja-altu

9. Daza Rodríguez, C. (2022). *Comportamiento sísmico de edificios de muros delgados de concreto reforzado, una revisión de literatura*. Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/2123/Daza%20Rodr%C3%ADguez%2C%20Cesar%20Mauricio-2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. Escorcía Murillo, K., y Ochoa Fernández, A. (2013). *Análisis de respuesta sísmica de sitio y su efecto en el comportamiento dinámico de estructuras en el área urbana de la ciudad de Managua*. Tesis de Grado, Universidad Centroamericana. Recuperado el Noviembre de 2022, de <http://repositorio.uca.edu.ni/513/1/UCANI3593.PDF>
11. Florez Estacio, E., y Hernandez Quiñones, É. (Febrero de 2019). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TECNICA Y FINANCIERA PARA LA CREACION DE UNA EMPRESA DE CONSTRUCCIÓN DEDICADA A LA COMERCIALIZACIÓN DE FORMALETA EN ALUMINIO, PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DE MUROS PORTANTES REFORZADOS EN HORMIGÓN*. Tesis de Grado. Santiago de Cali. Recuperado el 25 de Octubre de 2022, de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18599/2019e dinsonqui%C3%B1ones.pdf?sequence=1>
12. Gómez Zarate, F., y Rojas Rojas, L. (2019). *SOFTWARE PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS CON MUROS CON MUROS*

PORTANTES DE CONCRETO REFORZADO DE HASTA 6 PISOS DE ACUERDO AL NSR-10. Tesis de Grado. Bogotá. Recuperado el 24 de Octubre de 2022, de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22330>

13. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología, e Hidrología, INSIVUMEH. (2016). *Propuesta de zonificación sismogenética para la zona de subducción y el arco volcánico de Guatemala.* Recuperado el 24 de Octubre de 2022
14. Maldonado, I., Maldonado, N., y Martín, P. (s.f.). *IMPORTANCIA DEL SUELO EN LA PUESTA EN VALOR DE EDIFICIOS PATRIMONIALES EN ZONA SÍSMICA.* Universidad Tecnológica Nacional, Chile. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/f07fb4fb-cfdb-40ab-bac9-74a21ff4548a/content>
15. Monsalve Dávila, J. T. (Abril de 2005). *ANÁLISIS Y DISEÑO SÍSMICO POR DESEMPEÑO DE EDIFICIOS DE MUROS ESTRUCTURALES.* Recuperado el Octubre de 2022, de <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/34216>
16. Ortega, R., Torres, P., Cuesvas, E., Cruz, A., Marulanda, J., y Thomson, P. (2019). *Análisis Estadístico de Edificaciones de Muros Delgados de Concreto Reforzado en Zona de Amenaza Sísmica Alta: Casos Cali y Popayán.* Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Universidad del Valle. Colombia. Recuperado el Noviembre de 2022, de https://www.researchgate.net/profile/Eduar-Cuesvas/publication/353437241_Analisis_Estadistico_de_Edificaci

ones_de_Muros_Delgados_de_Concreto_Reforzado_en_Zona_de
_Amenaza_Sismica_Alta_Casos_Cali_y_Popayan_Tema_F_Muro
s_Delgados_de_Concreto_Reforzado/links/6

17. Palacios Valencia, J. (2017). *Caracterización de edificaciones construidas con el sistema de muros delgados de concreto reforzado en Santiago de Cali*. Tesis de Grado, Universidad del Valle. Colombia. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/16299/0573179.pdf?sequence=1>
18. Park, R., y Paulay, T. (1980). *Estructuras de Concreto Reforzado*. Limusa.
19. Pérez Gavilan, J., Flores, L., y Alcocer, S. (2013). *EFEECTO DE LA ESBELTEZ EN LA RESISTENCIA DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA*. Revista de Ingeniería Sísmica No. 89-55-77. Recuperado el Noviembre de 2022, de <https://www.scielo.org.mx/pdf/ris/n89/n89a3.pdf>
20. Pérez, C. (2009). *ESTRUCTURA GEOLÓGICA DEL VALLE DE LA CIUDAD DE GUATEMALA INTERPRETADA MEDIANTE UN MODELO DE CUENCA POR DISTENSIÓN*. Revista Geológica de América Central, 41: 71-78. Recuperado el Noviembre de 2022
21. Renjifo Restrepo, A. (2021). *PROPUESTA EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO Y DISEÑO DE MUROS DELGADOS DE CONCRETO REFORZADO DMO EN SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS*. Tesis de Grado, Universidad de los Andes.

Recuperado el Noviembre de 2022, de
<http://hdl.handle.net/1992/50971>

22. Soto Huamán, J., Alva Hurtado, J., y Ortiz Salas, C. (2018). *Evaluación de Espectros de Respuesta mediante el Análisis Unidimensional de la Respuesta de Sitio en la Ciudad de Lima*. Recuperado el Octubre de 2022, de <http://www.jorgealvahurtado.com/files/ARTICULOBRASIL.pdf>
23. Trujillo L., A. (2018). *MODELACIONES COMPUTACIONALES NO LINEALES DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE EDIFICACIONES DE MUROS DE CONCRETO INDUSTRIALIZADOS EN BOGOTA D.C SOMETIDAS A DIVERSAS SEÑALES SÍSMICAS*. Tesis de Grado, Universidad de los Andes. Recuperado el Octubre de 2022, de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/34726/u808407.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
24. Vélez Cadavid, J. (2020). *ESTUDIO NUMERICO Y EXPERIMENTAL SOBRE EL COMPORTAMIENTO SISMICO D EMUROS DELGADOS DE EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO*. Tesis de grado, Universidad de Antioquia. Recuperado el Noviembre de 2022, de https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/17511/4/VelezJuan_2020_ComportamientoSismicoMuros.pdf
25. Villareal Castro, G., y Aguila Gómez, C. (2021). *INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA Y SU INFLUENCIA EN LA RESPUESTA SÍSMICA EN EDIFICIOS DE CONCRETO ARMANDO*. Revista Internacional

de Ingeniería de Estructuras, 26. Recuperado el Octubre de 2022,
de
<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/riie/article/view/2336/177>
5

26. Villegas Rangel, C. (2019). *ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE EDIFICACIONES DE MUROS DE CONCRETO INDUSTRIALIZADOS CON BAJO CONFINAMIENTO*. Tesis de Grado, Universidad de los Andes. Recuperado el 3 de Noviembre, de
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/39517/u821626.pdf?sequence=1>