

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Evaluación de la  
Vulnerabilidad Sísmica  
Estructural Considerando el  
Efecto de Columna Corta**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Josué Sánchez Tacuba

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**

## **DEDICATORIA.**

**A mis padres por su incansable labor por vernos salir adelante, por el amor y apoyo que me han brindado en todo momento y sin el cual no habría salido adelante de todos los eventos que he tenido que surcar en esta vida llena de contrastes, de alegrías y tristezas, de amor y dolor, de paz y miedo.**

**Gracias Martha y Mateo por todo lo que me han dado.**

**A mi abuelo Telésforo por todo el cariño que me ha dado y los momentos que hemos compartido, por esa mirada ya cansada pero que emana tanto trabajo y sacrificio que has hecho por toda tu familia. Por ser una de las personas que más admiro en este mundo.**

**A ti padrino Miguel (RIP) por ser una persona que me enseñó tanto en esta vida, por el cariño que sé tenías hacia mi persona y el cual fue, es y será correspondido por siempre. Por ser el amigo al cual podía contarle todo lo que aquejaba mi mente y mostrarme que la mayoría de nuestros problemas no son tan grandes como usualmente creemos y sobre todo por hacerme ver lo afortunados que somos, lo afortunado que fui al conocerte y que formarás parte de mi vida.**

**“Debemos de ser agradecidos con Dios por lo afortunados que somos” M.A.R.A.**

## **AGRADECIMIENTOS.**

**Antes que nada, gracias Dios por permitirme la vida, el poder estar aquí, por darme la familia que tengo. Gracias por esta vida tan rica en emociones y sentimientos, por el camino que me ha tocado recorrer y que seguramente volvería a transitar esquivando algunos baches en los que me ha tocado caer pero que han marcado en mí una gran huella de aprendizaje y reflexión.**

**Gracias a todos los amigos que me han acompañado durante todos estos años, por compartir momento de alegría y llenar mi mente de grandes recuerdos.**

**Gracias Mauro por todo el apoyo que me has brindado, por ser una persona que ha estado ahí en todo momento impulsándome a salir adelante y cumplir mis metas.**

**Gracias a los que estuvieron y ya no están, siempre formarán parte de mi vida y serán recordados con gran cariño.**

**Gracias por poder mirar hacia atrás y saber que he vivido una hermosa vida.**

## ÍNDICE

<b>Introducción.....</b>	<b>4</b>
<b>1) Estado de arte .....</b>	<b>6</b>
<b>2) Efecto de columna corta.....</b>	<b>18</b>
<b>3) Casos de estudio.....</b>	<b>37</b>
<b>4) Vulnerabilidad estructural.....</b>	<b>46</b>
<b>5) Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>76</b>

## **INTRODUCCIÓN.**

El efecto de columna corta es un fenómeno que puede afectar a la gran mayoría de las edificaciones existentes hoy en día, consiste en la aparición de fuerzas cortantes mucho mayores a las consideradas en el diseño estructural y que pueden provocar un daño considerable a la estructura y sus ocupantes, esto como consecuencia de cambios posteriores en la distribución arquitectónica o bien, omisiones en la fase de diseño. Siendo uno de los principales detonantes el colocar muros a alturas parciales entre los marcos estructurales.

Debido a la tipología de la mayoría de viviendas construidas en México la cual consiste en marcos rígidos de concreto reforzado con muros a alturas parciales (necesarios para la iluminación), conocer el impacto de este fenómeno en las edificaciones es sumamente importante para poder tomar las medidas necesarias y proteger a la población.

El presente trabajo aborda el estudio y análisis del efecto de columna corta en estructuras reticulares de concreto reforzado, construidas bajo los lineamientos del RCDF-2004.

México está situado en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, su costa colindante con el océano Pacífico se ubica dentro de la zona conocida como el Cinturón del Pacífico, que es donde se concentra la mayor actividad sísmica del mundo por la interacción de las placas Norteamericana, de Cocos y la del Pacífico.

Debido a esto, las estructuras se encuentran expuestas a una gran cantidad de eventos sísmicos, por lo que es de suma importancia evaluar todos los posibles efectos perjudiciales que estos producen sobre las edificaciones, a fin de salvaguardar la vida humana y disminuir las pérdidas (humanas y económicas).

No podemos cambiar las condiciones sísmicas de nuestro país entonces para disminuir el riesgo al que está expuesta la población es necesario atacar directamente el punto conocido como vulnerabilidad estructural, que se define como las características propias de una edificación que la hacen susceptible a sufrir algún tipo de daño y mediante este trabajo se podrá conocer el impacto de una de estas características sobre la vulnerabilidad estructural y así poder emitir recomendaciones para atenuarla.

El proceso para conocer el impacto del efecto de columna corta en la vulnerabilidad de las edificaciones se poya en el uso de Análisis Incrementales Dinámicos (Vamvatsikos & Cornell, 2002) IDA, por sus siglas en inglés, que es aplicado en dos estructuras de concreto reforzado, de uno y dos niveles, usando un set de registros sísmicos ocurridos en México y registrados en sitios de suelo blando . Con este método, se obtiene la respuesta estructural media (desplazamiento, cortante, distorsión) asociada a cada nivel de intensidad.

El primer caso de estudio consiste en una estructura de un nivel con una altura de 3.00 m, 5 crujías a cada 2.50 m, vigas de 0.30 m x 0.40 m y columnas de 0.30 mx 0.30 m.

El segundo caso de estudio corresponde a una estructura de dos niveles con alturas de entrepiso de 3.10 m, 7 crujías a cada 3.50 m, vigas de 0.30 m x 0.50 m en ambos niveles y columnas de 0.45 mx 0.60 m.

Las condiciones de estudio para cada estructura presentada en este trabajo serán cuatro, donde la variante será la altura de los muros que restringen el desplazamiento lateral de las columnas partiendo desde una altura cero, 1.20 m, 2.00 m y finalmente una altura de muros de 2.40 m para una altura de entrepiso de 3.00 m (para estructura de un nivel) y 3.10 m (para estructura de dos niveles).

La cuantificación del daño como consecuencia del efecto de columna corta es uno de los puntos clave de este trabajo y para llevarla a cabo se ha empleado el índice de Terán y Jirsa (2005). Realizando una comparación del nivel de daño recibido para cada condición de estudio se puede finalmente tener datos precisos sobre la inferencia del efecto de columna corta en la vulnerabilidad estructural.

En el primer capítulo se hará una breve descripción de las metodologías existentes para la evaluación de la vulnerabilidad estructural.

El segundo capítulo muestra un panorama más amplio de qué es el efecto de columna corta, las situaciones en las que se origina, una breve descripción del comportamiento estructural y de los elementos mecánicos actuantes sobre la estructura, así como una recopilación de daños provocados por dicho fenómeno.

El tercer capítulo hace una descripción detallada de la arquitectura, armados de elementos estructurales y propiedades de los materiales empleados en ambos casos de estudio.

El capítulo 4 denominado vulnerabilidad estructural es el concentrado que da vida a este trabajo. Se describe el proceso de modelación que logró representar el efecto de columna corta, el proceso de análisis empleando la metodología IDA, la recopilación y procesamiento de información obtenida de dichos análisis para la obtención de la respuesta estructural media en términos de desplazamiento, distorsión de entrepiso y cortante y la conversión de dicha respuesta a daño empleando el índice de daño de Terán y Jirsa (2005).

En el último capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos y se emiten algunas recomendaciones que podría ser de mucha ayuda para disminuir la vulnerabilidad de las estructuras que ocupamos día con día.

# ***1.-ESTADO DEL ARTE***

## **1.1- VULNERABILIDAD SISMICA ESTRUCTURAL.**

La vulnerabilidad sísmica de una estructura se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico y está asociada directamente con sus características físicas y estructurales de diseño (*Barbat, 1998*).

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de las estructuras, una característica de su propio comportamiento ante la acción de un sismo descrito a través de una ley causa – efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño (*Sandi, 1986*).

El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable en estudios sobre riesgo sísmico. Se entiende por riesgo sísmico, el grado de pérdidas esperadas que sufrirán las estructuras durante un lapso de tiempo establecido.

La mitigación de los desastres, en el área de la ingeniería, corresponde al conjunto de medidas y/o acciones que tienen como objetivo mejorar la respuesta de las estructuras ante acciones sísmicas, a fin de reducir los costos de los daños esperados durante un evento sísmico (*Barbat, 1998*). Por lo tanto, es evidente que para mitigar el riesgo sísmico de una zona, es necesario disminuir dichas acciones, la vulnerabilidad o el costo de reparación de las estructuras afectadas. El conocimiento adecuado de la amenaza sísmica existente, permite definir tanto la acción que debe considerarse en el diseño de las nuevas estructuras como el lugar donde pueden ser construidas de tal forma que las condiciones de sitio sean óptimas.

Poco se puede hacer para reducir la amenaza a la que están expuestas las estructuras existentes, entonces, se requiere intervenir directamente sobre la vulnerabilidad. Conocer el comportamiento de las estructuras ante acciones sísmicas permite definir los mecanismos y acciones de refuerzo para reducir los efectos provocados por los eventos sísmicos. Para el caso de construcciones nuevas, pueden plantearse nuevas acciones de diseño o bien, nuevos sistemas constructivos y/o métodos de diseño más rigurosos que garanticen el buen desempeño de cada uno de los elementos expuestos.

Para realizar un estudio de vulnerabilidad se debe definir su naturaleza y alcance, lo cual está condicionado por varios factores, tales como: el tipo de daño que se pretende evaluar, el nivel de amenaza existente en la zona, la información disponible sobre las estructuras y los datos relacionados con daños observados sobre la zona de interés. Una vez definidos estos factores es posible evaluar la vulnerabilidad mediante una definición adecuada de la acción sísmica y la capacidad de la estructura.

El daño depende de la acción sísmica y de la capacidad sismo-resistente de las estructuras, entonces, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica está fuertemente ligada a la forma en la que se define la acción sísmica (causa) y el daño sísmico (efecto).

## 1.2-EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SISMICA

Existen diversas metodologías para llevar a cabo la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, estas técnicas dependen principalmente de los siguientes factores:

- Naturaleza y objetivo del estudio.
- Información disponible.
- Características de las estructuras que serán sometidas al estudio.
- Tipo de resultado.

Dos de los principales criterios se mencionan a continuación. El primero fue propuesto por *Corsanego y Petrini (1990)*, donde los tipos de estudios están divididos en clases, de acuerdo al tipo de resultados obtenidos. El segundo criterio fue propuesto por *Dolcet et al. (1995)*, quienes establecen una clasificación que permite examinar, de forma independiente, los tres elementos básicos (los datos de entrada, la metodología y los resultados) involucrados en un análisis de vulnerabilidad. Entonces, es posible la evaluación de cada uno de estos elementos, considerando su consistencia y/o haciendo énfasis en alguno de ellos.

La clasificación de acuerdo al tipo de resultados propuesta por *Corsanego y Petrini (1990)* es una de las más reconocidas y completas que se han hecho hasta la fecha. Las técnicas para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica se agrupan en 4 grandes grupos: técnicas directas, indirectas, convencionales e híbridas.

### 1.2.1-Clasificación de metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica propuesta por Corsanego y Petrini (1990).

#### Técnicas directas.

Estas técnicas predicen, con un solo paso, el daño causado por un sismo a una estructura, a partir de dos tipos de métodos: los tipológicos y los mecánicos.

- **Métodos tipológicos:**  
Consideran las estructuras como elementos de clases, las cuales están definidas por los materiales, las técnicas y otros factores que pueden afectar la respuesta sísmica. La vulnerabilidad se define como la probabilidad de que una estructura sufra un cierto tipo de daño para una cierta intensidad sísmica. La evaluación de la probabilidad de daño se basa en los daños observados en sismos pasados.  
Estas técnicas requieren una investigación de campo bastante simple pero los resultados obtenidos son válidos únicamente en el entorno estadístico y las definiciones de las relaciones entre daño e intensidad sísmica sólo es válida para una región con construcciones de características muy similares.  
La principal limitante de estas metodologías es que no permiten tomar en cuenta las modificaciones que una estructura sufre durante su vida útil, como por ejemplo reparaciones y/o remodelaciones.

Una de las primeras aplicaciones de esta metodología fue el trabajo realizado por *Whitman et al. (1974)*. Usando los datos obtenidos de un levantamiento de daños provocados por el sismo de San Fernando, California, el 9 de febrero de 1971, abarcando alrededor de 1600 edificaciones de 5 o más niveles, generando matrices de probabilidad de daño para cada tipo de construcción. La forma de estas matrices se muestra en la tabla 1.1, donde cada número de la matriz expresa la probabilidad de que una construcción con determinadas características (cierta clase), experimente un nivel de daño por causa de una intensidad sísmica dada. La relación de daño se define como la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición. Este formato ha llegado a ser uno de los más utilizados para definir la distribución más probable del daño.

Tabla 1.01. Formato de la matriz de probabilidad de daño para una tipología dada, *Whitman et al (1974)*.

Estado de daño	Daño estructural	Daño no estructural	Relación de daño	Intensidad del sismo				
				V	VI	VII	VIII	IX
0	NINGUNO	NINGUNO	0-0.05		.....	.....	.....	.....
1	NINGUNO	MENOR	0.05-0.3		....	.....	.....	.....
2	NINGUNO	PUNTUALES	0.3-1.25		....	.....	.....	.....
3	NO APRECIABLE	DISTRIBUIDOS	1.25-3.5		.....	.....	.....	.....
4	MENOR	SUBSTANCIALES	3.5-4.5		.....	.....	.....	.....
5	SUBSTANCIAL	SEVERO	7.5-20		.....	.....	.....	.....
6	MAYOR	CASI TOTAL	20-65		.....	.....	.....	.....
7	CONSTRUCCION EN RUINAS		100		.....	.....	.....	.....
8	COLAPSO		100		.....	.....	.....	.....

*Giovinazzi y Lagomarsino (2001,2004)* propusieron un método de evaluación sísmica basado en funciones de probabilidad de daño, correspondientes a la escala macrosísmica EMS-98 (*Gruntal, 1998*) dicha escala usa términos cualitativos para describir el daño tales como “mucho, poco y demasiado” para 5 grados de daño correspondientes a los niveles de intensidad que van desde V hasta XII para 6 diferentes clases de vulnerabilidad ( desde la A hasta la F) en orden decreciente. Las matrices de daño contienen una descripción cualitativa de los edificios pertenecientes a cada clase de vulnerabilidad y de los diferentes niveles de daño manejados en estas.

Tabla 1.02. Ejemplo de un modelo de daño para una vulnerabilidad clase C, presentada en el EMS-98.

NIVEL DE INTENSIDAD	NIVEL DE DAÑO				
	1	2	3	4	5
V					
VI	poco				
VII					
VIII		poco			
IX		mucho	poco		
X			mucho	poco	
XI				mucho	poco
XII					mucho

Uno de los principales problemas del uso de esta metodología está relacionado con la incompletitud de las matrices, es decir, la falta de información para todos los grados

de daño correspondientes a un determinado nivel de intensidad, así como la falta de claridad de las matrices debido a que están descritas cualitativamente y por lo tanto pueden estar sujetas a diferentes interpretaciones; esta situación ha sido abordada por *Giovinazzi y Lagomarsino (2004)* asumiendo una distribución beta de daño y mediante la aplicación de la teoría de conjuntos difusos, respectivamente. Las matrices de probabilidad de daño que se obtienen para cada clase de vulnerabilidad se relacionan con las edificaciones existentes mediante el uso de un índice de vulnerabilidad empírico, el cual depende de la tipología de los edificios, las características de los edificios existentes (por ejemplo, número de pisos, irregularidades, etc.) y las prácticas regionales de construcción (*Calvi et al., 2006*). Este método macrosísmico ya se ha aplicado en la evaluación de riesgo para ciudades como Lisboa (*Oliveira et al., 2005*) y Barcelona (*Lantada et al., 2004*).

- **Métodos mecánicos:** estos métodos predicen el efecto sísmico por medio de modelos mecánicos que representan a las construcciones. Se distinguen dos grupos que se relacionan con el tipo de modelo utilizado para representar la estructura.

*Métodos analíticos basados en modelos simples:* estos métodos tienen la capacidad de analizar un gran número de construcciones en un corto tiempo por lo cual, involucran modelos simples, que sólo requieren unos pocos parámetros de entrada (características de la edificación) mediante los cuales, es posible evaluar la respuesta sísmica de las construcciones.

Un método con estas características se desarrolló para la estimación de pérdidas en estructuras de mampostería, para los centros históricos de grandes ciudades europeas y fue aplicado en el distrito de Alfama, Lisboa (*D'Ayala et al., 1971*).

La metodología se basa en la identificación de mecanismos de colapso que permiten determinar la capacidad equivalente de cortante, expresada como aceleración crítica y causada por el correspondiente mecanismo de colapso. Para calcular la aceleración crítica, sólo se requiere la geometría y las condiciones de frontera obtenidas a partir de estimaciones visuales. Se supone, además, que el plano más vulnerable corresponde a la fachada. El método considera los mecanismos de colapso fuera y dentro del plano. Cada uno de estos mecanismos se asocia a un grado de daño de acuerdo con la EMS-98. Entonces, al calcular el cortante equivalente del edificio, es decir, la aceleración crítica que inicia el mecanismo de colapso, se obtiene el grado de daño esperado.

Otro método analítico para modelos simples fue desarrollado por *Calvi (1990)* y aplicado en la ciudad de Catania (*Calvi, 1999*). El modelo utiliza muy pocos parámetros: el periodo de vibrar de la edificación, el número de niveles y el tipo de material. Se consideran 4 estados de daño (Tabla 1.3).

Tabla 1.03. Tabla desarrollada para representar la metodología de evaluación propuesta por Calvi (1990).

Estado de daño	Daño estructural	Daño no estructural
LS1	Nulo	
LS2	Leve	Moderado
LS3	Significativo	Severo
LS4	Colapso	

Métodos de análisis detallados: estos métodos sólo son aplicables a las construcciones que se pueden representar por modelos mecánicos (también mediante el uso de software) y generalmente, se utilizan para la evaluación de una sola estructura, debido a que involucran un análisis detallado y se requieren una gran cantidad de datos.

Los dos procedimientos de análisis más utilizados en este tipo de métodos son:

- (1) Análisis lineal (estático y dinámico)
- (2) Análisis no lineal (estático y dinámico).

### **Técnicas indirectas.**

Estas técnicas determinan un índice de vulnerabilidad y establecen una relación entre el daño y la intensidad sísmica mediante estudios post-sismo, así como estudios estadísticos. Originalmente, estos métodos son útiles únicamente para evaluaciones sísmicas de gran escala. Dentro de estos, El método del índice de vulnerabilidad representa un claro ejemplo de esta técnica, el cual comenzó a desarrollarse en Italia desde 1976, a partir de estudios post-sismo realizados en dicho país. El método consiste en hacer una clasificación de los edificios mediante observaciones de sus características físicas, con base en cálculos estructurales simplificados que identifican los parámetros más relevantes que controlan el daño estructural. El método se apoya en los bancos de datos de los daños observados en edificios después de un sismo (Yepez, 1996).

A partir del modelo implícitamente contenido en la escala EMS-98, la universidad de Génova desarrolló una metodología para la evaluación global de la vulnerabilidad sísmica en grandes áreas urbanas, la cual utiliza la teoría de conjuntos difusos para superar la falta de información de daño específico. Este método define un índice de vulnerabilidad convencional,  $V_I$ , el cual representa la pertenencia de una estructura a una clase de vulnerabilidad determinada. Los valores numéricos de  $V_I$  son arbitrarios, debido a que sólo se utilizan como indicadores para cuantificar de una forma convencional el comportamiento de una estructura.

## **Técnicas convencionales.**

Introducen un índice de vulnerabilidad independiente de la predicción del daño, y comparan diferentes construcciones de una misma tipología ubicadas en una determinada región, de acuerdo con algunos factores cuya contribución a la resistencia sísmica se calibra con base en el criterio de expertos. Los índices dan medidas relativas de la vulnerabilidad, pero los resultados obtenidos no son comparables debido a la diferencia de los factores que conforman dichos índices. Existen dos tipos de métodos; los primeros se basan en calificar de manera empírica las características físico-estructurales; el otro tipo se basa en criterios utilizados comúnmente en las normas de diseño sísmico, donde se evalúa la relación capacidad/demanda de los edificios de una forma muy simple.

El ATC-13 (*ATC, 1985*) es uno de los primeros trabajos que se han realizado utilizando esta técnica. En este informe y a partir del juicio de expertos se obtuvieron las matrices de probabilidad de daño para 78 clases de estructuras diferentes, 40 de las cuales se refieren a edificios. La estimación del porcentaje esperado de daño que podría sufrir una determinada estructura se obtuvo a partir del análisis de las respuestas contenidas en los cuestionarios que se entregaron a un grupo de expertos. Debido a esto, los resultados que se obtienen usando esta técnica son de carácter subjetivo, por lo cual, debe considerarse junto con la incertidumbre relacionada al desempeño estructural, la incertidumbre relacionada con el juicio del grupo de expertos que definen los factores a emplear para la elaboración de los índices de daño.

Otra de las metodologías más utilizadas para la evaluación de la vulnerabilidad estructural es la propuesta por *HAZUS (Whitman et al., 1997; FEMA, 1999, 2003)*, la cual utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de la intensidad sísmica. *HAZUS* estima el daño de 36 tipologías estructurales. Para cada modelo se describen 4 estados de daño: leve, moderado, severo y colapso. La metodología considera 4 niveles de diseño: alto, moderado, bajo y sin diseño sísmico. Para cada estado de daños se proporcionan los parámetros que permiten definir la capacidad de la estructura, las derivas máximas de entrepiso y por último los desplazamientos espectrales en los límites de los diferentes estados de daño considerados (*Calvi et al, 2006*).

## **Técnicas híbridas**

Combinan elementos de los métodos descritos anteriormente. Una de estas técnicas es la metodología de evaluación propuesta por *Ordaz, Miranda, Reinoso & Pérez-Rocha (2000)* la cual consiste en un modelo de estimación de pérdidas para la Ciudad de México. Es un modelo que combina la aplicación de técnicas probabilísticas y mecánicas ya que requiere la entrada de datos representativos de la dinámica estructural y localización de la misma.

Esta metodología toma en cuenta las particularidades del suelo de la Ciudad de México para definir la demanda sísmica según las condiciones del sitio, partiendo de espectros de respuesta en un sitio firme para calcular los espectros en sitios blandos.

Utiliza funciones de vulnerabilidad basadas en el desplazamiento, representado por la distorsión máxima de entrepiso para la cuantificación del daño estructural. La estimación de la pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable para una estructura se obtiene mediante una función de densidad de probabilidad, una función Beta.

Este método es de amplio interés para el sector asegurador para la estimación de las primas de aseguramiento y los montos de pérdidas máximas totales de su cartera de clientes (*Ordaz et al,2000*).

Los aspectos más relevantes de esta metodología son:

- La obtención de nuevos mapas de riesgo que toman en cuenta la reciente información sobre tectónica de placas y sismología de México.
- Considera relaciones de atenuación específicas del sitio.
- Desarrollo de un procedimiento para la caracterización de las estructurales de los edificios (periodo dominante, tipo estructural, etc.).
- Nuevo enfoque para la caracterización o definición de la demanda sísmica.
- Curvas de intensidad-daño en las que el daño es una función.

Todo esto fue empleado en el desarrollo de un sistema informático que resulta ser una gran herramienta para el sector asegurador.

### 1.2.2- Clasificación de metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica propuesta por Dolce et al (1995).

Tabla 1.04. clasificación de las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica propuesta por Dolce et al (1995).

Clasificación de las metodologías de evaluación de vulnerabilidad sísmica (Dolce et al,1995)	Métodos estadísticos	Son métodos basados en análisis estadísticos de las construcciones, los datos de entrada provienen de levantamientos posteriores a eventos sísmicos.
	Métodos mecánicos	Hacen uso de los parámetros dinámicos y estructurales de una edificación (periodo, ductilidad, distorsión de entrepiso, etc.)
	Métodos basados en juicios de expertos	La evaluación de los factores que gobiernan la respuesta estructural es cualitativa y cuantitativa.

## **1.3-DAÑO SÍSMICO.**

El daño es el grado de destrucción o afectación causado por un fenómeno sobre las personas, los bienes y los sistemas de prestación de servicios. Desde el punto de vista estructural, generalmente se relaciona con deformaciones irreversibles (inelásticas), por lo tanto, cualquier variable de daño debe ser, de preferencia, referida a una cierta cantidad de deformación. La evaluación y la interpretación del daño causado por los sismos surge de la necesidad de cuantificar y explicar los efectos de este fenómeno sobre los diferentes tipos de estructuras existentes (Corsanego,1995).

El daño representa el deterioro físico de los diferentes elementos que conforman una edificación o bien el impacto económico asociado. En este contexto es común hacer referencia al daño físico y el daño económico (*Yepes, 1996*).

En los últimos años, se han tomado en cuenta las características no lineales de los materiales en el análisis y diseño sismorresistente. Se ha hecho uso de información acerca de fenómenos que se producen cuando se sobrepasa el rango elástico de los materiales, obtenida de un sin número de experimentos; con dicha información es posible evaluar paso a paso el comportamiento de un material. Mediante el procedimiento adecuado, esta información debe extrapolarse a todo el sistema estructural en evaluación para representar su comportamiento. Para lograrlos se hace uso de índices de daño que permiten cuantificar el daño local y global de la estructura, pero el principal problema y a pesar de todos los avances, está en la evaluación cuantitativa del daño, ya que es un tema sumamente complejo tanto para la definición de los modelos analíticos, como para la descripción del propio daño, esto se debe a la gran variedad de sistemas estructurales y a las características de las acciones aplicadas.

### **1.3.1-Elementos propensos al daño.**

Para cuantificar el daño es importante identificar precisamente los sistemas que se encuentran expuestos dentro de una estructura, éstos se pueden agrupar en 4 grandes clases de elementos;

- 1) Elementos estructurales: son los elementos que componen los sistemas resistentes a cargas verticales y cargas laterales.
- 2) Elementos arquitectónicos: elementos empleados para la distribución de espacios en las construcciones y aspectos relacionados con la estética.
- 3) Instalaciones: se trata de elementos que suministran servicios (agua, luz, gas, calefacción).
- 4) Contenidos: son elementos que están dentro del edificio pero que no hacen parte de la estructura, tales como: maquinarias, equipos, mobiliario, artículos de decoración, etc.

### 1.3.2-Representación del daño.

Dentro de las distintas formas para representar el daño se encuentran las representaciones físicas, representaciones orientadas a pérdidas, representaciones orientadas a reglas de deducción y las representaciones mecánicas.

- **Representaciones mecánicas:** implican la definición de un modelo teórico que permite describir el comportamiento del mecanismo estructural a través de “índices de daño”. Usualmente estos índices se expresan como función de ciertos parámetros  $Q_i$ , esto es:

$$(1.01) \quad I_D = I_D(Q_i)$$

Los parámetros de daño pueden dividirse en dos clases principales: (a) parámetros basados en el nivel alcanzado por la demanda de un cierto recurso (deformación, resistencia, disipación de energía, etc.) y (b) parámetros basados en la degradación experimentada por ciertas variables (rigidez, frecuencia fundamental, etc.)

Una de las funciones más empleadas de este tipo de representaciones del daño, en estructuras de concreto armado, corresponde al índice propuesto por *Park y Ang (1985)*. Este índice expresa el daño en función de la ductilidad de deformación y de la energía inelástica disipada.

- **Representaciones físicas:** son representaciones directas que no necesitan modelos analíticos pre-establecidos. Se basa en los estados discretos de daño, los cuales son descripciones cualitativas por medio de palabras que dan una idea del daño sufrido (menor, sustancial, moderado, etc.).  
Los estados discretos de daño representan una condición límite o tolerable establecida de función de tres aspectos fundamentales: 1) daño físico sobre los elementos estructurales y no estructurales, 2) el riesgo al que se encuentra expuestos los ocupantes de la edificación y 3) la funcionalidad de la edificación posterior al sismo (*SEAOC, 1995*).
- **Representaciones orientadas a pérdidas:** son representaciones que expresan el daño en función de un costo de reparación o bien de reposición (representación del daño físico en términos económicos). Su aplicación interesa fundamentalmente a instituciones gubernamentales y al sector asegurador.

### 1.3.3-Indicadores de daño.

Un punto fundamental en el análisis de vulnerabilidad, es la selección de una función apropiada que permita cuantificar la respuesta calculada a partir del análisis del modelo mecánico para un grupo de registros sísmicos, la cual representa el grado de daño sufrido por un miembro y/o toda la estructura. Estas funciones son denominadas comúnmente “índices o indicadores de daño y pueden involucrar una o más variables, tales como deformaciones unitarias, curvatura, rotaciones, desplazamientos, distorsiones de entrepiso, fuerzas, energía absorbida y energía disipada, entre otras.

La elección de las variables a utilizar está relacionada con el tipo de daño que se desea analizar (local, intermedio o global).

Para definir los índices de daño es necesario desarrollar un modelo que represente la tipología, características y propiedades de los materiales empleados, así como las acciones aplicadas y el tipo de falla que presenta la estructura.

- **Índices de daño local:** determinan el daño en un elemento y pueden ser o no acumulativos. Para cuantificar el daño se aplican cargas monotónicas crecientes que permiten encontrar las relaciones fuerza- deformación, momento-curvatura o momento-rotación de los extremos del elemento (vigas, columnas y muros). Estos índices pueden ser acumulativos o no acumulativos, dependiendo si se consideran cargas cíclicas o no.
- **Índices no acumulativos:** corresponden a los primeros modelos de daño desarrollados a partir del concepto de ductilidad. Su principal limitación es no son capaces de representar el daño acumulado en los elementos sujetos a cargas cíclicas.

-Relaciones demanda-capacidad de deformación.

-Relaciones demanda-capacidad de resistencia.

-Degradación estructural.

- **Índices acumulativos:** para modelar la acumulación del daño que ocurre cuando una estructura se ve afectada por una carga cíclica, generalmente se utiliza una función de fatiga de ciclos bajos, en la cual el daño se considera como una función de la deformación plástica acumulada o incorporando un término relacionado con la energía histerética absorbida durante el sismo.
- **Índices basados en la deformación,** tales como los propuestos por Banot *et al.* (1981), Stephens y Yao (1987), Wang y Shah (1987), Jeong e Iwan (1988) y Chug *et al.* (1987,1988).
- **Índices basados en la energía;** Gosain *et al.* (1977) y Kratzig *et al.* (1989)

- **Índices mixto;** Banon y Veneziano (1982), Krawinkler y Zoheri (1983), Hwang y Scribner (1984), Park y Ang (1985) cuyo índice es el más utilizado dentro de esta categoría, éste consiste en una combinación de la deformación normalizada y la energía de absorción, esto es

$$(1.02) \quad I_{mixto} = \left( \frac{d_u}{d_m} \right) + \beta \cdot \frac{E \cdot \int d \cdot f}{F_y \cdot d_m}$$

Donde  $d_u$  y  $d_m$  son las deformaciones últimas y la correspondiente al punto de capacidad máxima,  $\beta$  es un parámetro que representa la pérdida de resistencia,  $E$  es la energía disipada y  $F_y$  es la fuerza de fluencia.

### 1.3.4-Índices de daño global.

En general existen tres formas de evaluar el índice de daño global en las estructuras de concreto armado: la primera corresponde a la obtención del índice de daño local y, mediante factores de ponderación o coeficientes de importancia se obtiene el índice de daño global (Park *et al.*, 1985; Chung *et al.*, 1989, 1990; Kunnath *et al.*, 1992). En la segunda forma, el índice de daño global se obtiene directamente en base a características estructurales globales (usualmente los parámetros modales) (Roufaiel y Meyer, 1987; Di Pasquale y Cakmak, 1987, 1988; Mork, 1992) y finalmente la tercer forma toma información de la curva de capacidad de una estructura (Roufaiel y Meyer (1987); Hasselman *et al.*, 1980).

Terán y Jirsa (2005) han propuesto un modelo simple para evaluar la ocurrencia de fatiga de bajo ciclos representado por la ecuación 1.03. “Este modelo representa una simplificación de la teoría de acumulación lineal de daño” (Borjórquez y Terán, 2009).

$$(1.01) \quad E_H = \frac{1.5}{(2 - b)} \cdot (\mu - 1) \cdot f_y \cdot \delta y$$

Donde  $b$  es el parámetro estructural que caracteriza la estabilidad del ciclo histerético. El valor de  $E_H$  estimado, establece la demanda de energía plástica que puede acomodar la estructura antes de fallar por fatiga de bajo número de ciclos.

Terán y Jirsa (2005) recomiendan usar para estructuras de concreto y hacer con un detallado sísmico adecuado,  $b$  con un valor igual a 0.15.

# **2.-EFECTO DE COLUMNA CORTA**

## **2.1- ¿QUÉ ES EL EFECTO DE COLUMNA CORTA?**

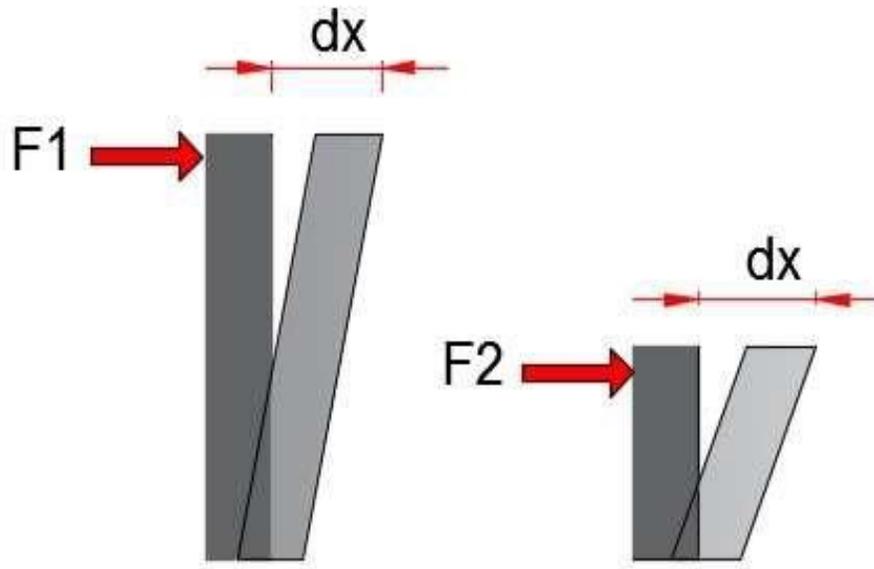
La ingeniería civil a través de sus múltiples áreas se ha encargado de satisfacer las necesidades del ser humano para que éste pueda llevar a cabo todas las actividades necesarias para su desarrollo. Proveer la infraestructura necesaria es una de las tareas más importantes, específicamente edificaciones dentro de las cuales se desarrollan diversas actividades (vivienda, educación, recreación, comercio, etc.).

Las características estructurales de una edificación dependen directamente del uso al que está destinada y, debido a sus características estructurales y arquitectónicas, existe un gran número de edificaciones expuestas a sufrir daños ante la ocurrencia de un fenómeno sísmico denominado efecto de columna corta (ECC). Dicho fenómeno puede afectar en mayor o menor medida a las construcciones, provocando desde daños muy leves hasta el colapso de la estructura, poniendo en riesgo a sus ocupantes.

Particularmente y debido a su tipología (muros a alturas parciales entre las columnas de los marcos para permitir una iluminación adecuada), las estructuras destinadas al uso de casa habitación y aulas escolares están expuestas a sufrir daños a causa de dicho fenómeno.

El sismo del 19 de septiembre del 2017 puso a prueba la resistencia de un gran número de edificaciones, fue un sismo de características un tanto peculiares, empezando por la localización de su epicentro, aproximadamente a unos 120 km de la Ciudad de México, con una magnitud de 7.1 grados en la escala de Richter. Debido a la cercanía del epicentro, las edificaciones más afectadas fueron aquella con un periodo de vibrar pequeño, y esto corresponde mayormente estructuras con uso habitacional y educativo (construcciones que van de uno hasta cinco niveles). A causa de su tipología, estas estructuras se vieron expuestas a presentar daños por efecto de columna corta aunado a que las aceleraciones máximas de diseño fueron superadas debido a las condiciones de origen del sismo. El hecho de que muchas edificaciones no cumplieran con los requerimientos mínimos de diseño hace mucho más probable que el efecto de columna corta tuviera una gran influencia en el daño que estas presentaron.

El efecto de columna corta (ECC), es un fenómeno que se presenta como consecuencia de un aumento en la rigidez de las columnas que ante los desplazamientos producidos por la acción sísmica inducen fuerzas cortantes mucho mayores a las que el elemento puede resistir adecuadamente.



*Ilustración 2.01. Para provocar el mismo desplazamiento en ambas columnas se requieren distintas fuerzas ( $F_1$  Y  $F_2$ ) dónde la fuerza  $F_2$  es más grande que  $F_1$  debido a que el elemento más corto posee una rigidez mucho mayor que la que posee la columna larga.  $F_1$  y  $F_2$  representan el cortante que actúa sobre los elementos de un marco estructural sometido a acciones sísmicas.*

Los cambios de rigidez en los elementos columnas pueden presentarse por varias razones, pero el problema no radica en tener un elemento con mayor o menor rigidez dentro del mismo sistema estructural, la principal agravante consiste en no considerar las características de éstos en el proceso de diseño.

“El inadecuado comportamiento de la columna corta es debido al hecho que durante el sismo, una columna larga y una columna corta del mismo marco al estar unidas por un elemento tan rígido como lo es una losa sufren el mismo desplazamiento horizontal. Como resultado de la mayor rigidez de la columna corta, se presentan en ésta, fuerzas mucho mayores para provocar el mismo desplazamiento en ambos elementos” (Guevara, 2004).

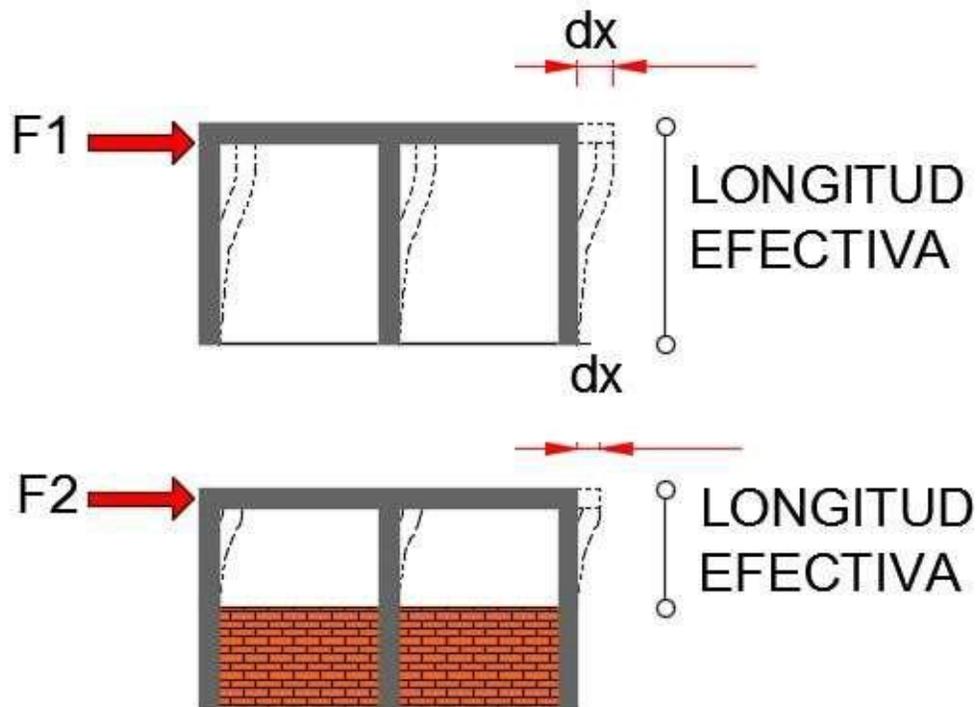
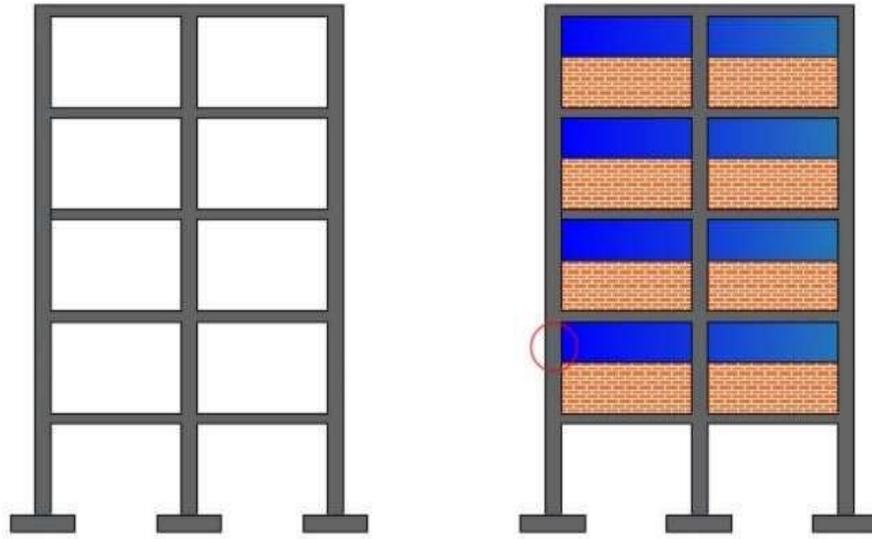


Ilustración 2.02. Muestra la restricción que los muros ejercen en la deformación del elemento columna debido a la reducción de la longitud efectiva, dicha reducción produce un incremento en la rigidez del elemento.

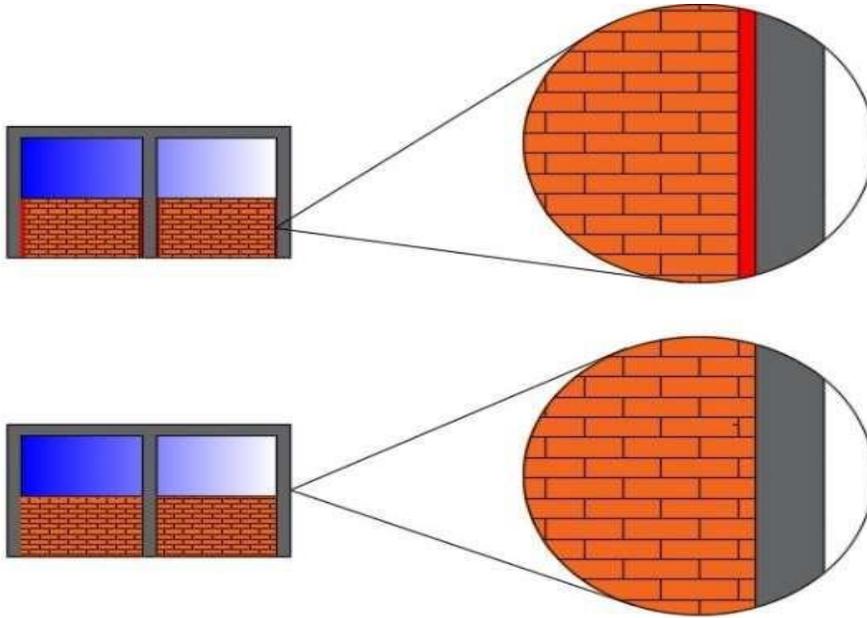
La solución al problema aparentemente es muy sencilla ya que bastaría con agregar el refuerzo de acero necesario para hacer frente a las acciones (sólo en construcciones nuevas) pero en la mayoría de los casos, incluso en construcciones nuevas, aparecerán columnas cortas las cuales no tendrán la resistencia suficiente y terminarán fallando. Esto se debe principalmente a las siguientes situaciones:

- **Omisiones en el diseño:** en muchas ocasiones, durante el proceso de diseño, al modelar la edificación se toman en cuenta únicamente los elementos estructurales (vigas y columnas) despreciando la interacción de éstos con los elementos no estructurales (muros divisorios, rampas de escalera, etc.) diseñando dichos elementos para resistir acciones mucho menores a las que verdaderamente estarán sometidos, ilustración 2.03.



*Ilustración 2.03. Omisión en la fase de modelado de una estructura. Generalmente solo se toman en cuenta los elementos columna y viga sin considerar las aportaciones al comportamiento estructural que tienen los muros de mampostería.*

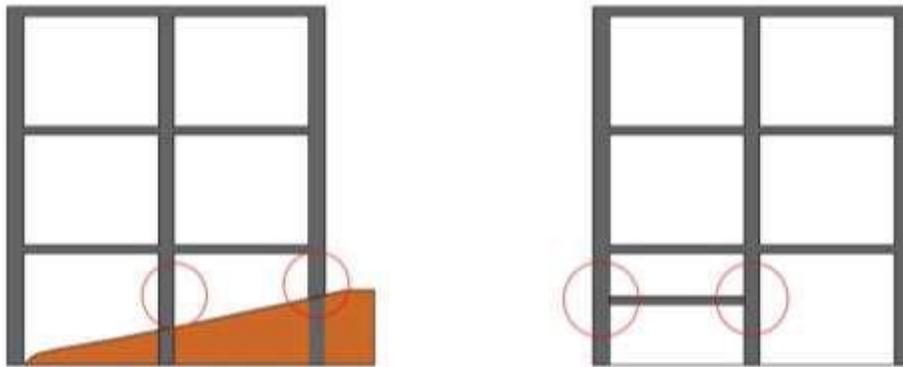
- **Modificaciones arquitectónicas posteriores:** es sumamente común que durante la construcción de un proyecto y con el diseño de los elementos correspondiente a una cierta configuración arquitectónica, se hagan modificaciones tales como agregar un nuevo muro entre columnas o bien modificar la altura de éstos, colocar cadenas intermedias o una rampa de descanso de escalera.
- **Omisiones en el proceso constructivo:** al momento de ejecutar una obra es muy frecuente no hacer caso plenamente a las especificaciones del proyecto lo cual es un grave error ya que se altera el entorno del que son parte los elementos estructurales y las acciones ejercidas sobre ellos



*Ilustración 2.04. Las omisiones en los procesos constructivos pueden tener severas consecuencias. Se muestra la omisión de separadores de neopreno en la junta muro-columna. Las columnas no son diseñadas para trabajar en conjunto con los muros divisorios y por lo tanto quedan expuestas a acciones de mayor magnitud.*

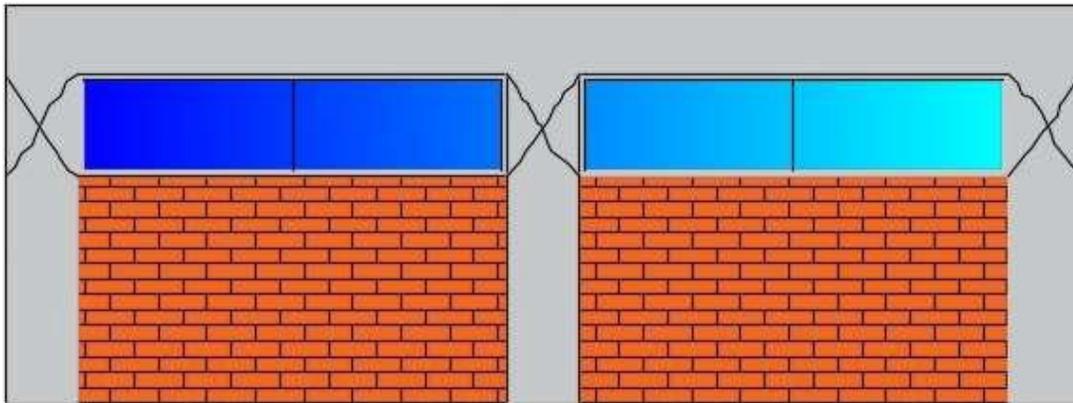
## 2.2- CAUSAS DEL EFECTO DE COLUMNA CORTA

- a) Cuando un edificio está situado sobre una pendiente, durante un sismo, al desplazarse todas las columnas horizontalmente y la misma cantidad junto con la losa en un nivel particular (acción de diafragma rígido).  
Las columnas cortas y largas existen en el mismo nivel, entonces las columnas cortas atraen fuerzas sísmicas varias veces mayores en comparación con las columnas largas.
- b) El efecto de columna corta también ocurre en columnas que soportan una losa intermedia o losa de descanso de escaleras agregada entre niveles regulares.



*Ilustración 2.05. Muestra algunas de las situaciones en las que se produce el efecto de columna corta. Una de ellas cuando la edificación se encuentra sobre una pendiente y la otra cuando se añade una restricción horizontal a una altura parcial de entrepiso.*

- c) Existe una situación muy especial en los edificios donde ocurre el efecto de columna corta. Considere un muro (concreto reforzado o mampostería) de altura parcial para construir una ventana sobre él. Las columnas adyacentes se comportan como columnas cortas debido a la presencia de ese muro.



*Ilustración 2.06. Muestra la representación típica de daño por cortante en un marco rígido de concreto reforzado.*

En muchos casos, otras columnas en el mismo nivel son de altura regular, no hay muros contiguos a ellas. Entonces la losa de piso mueve horizontalmente durante un sismo los extremos superiores de esas columnas están bajo el mismo desplazamiento. Sin embargo los muros rígidos restringen el movimiento horizontal de la parte inferior de una columna y se deforman toda la cantidad sobre la altura libre de la columna. Por otra parte las columnas regulares son deformadas sobre su altura total,

dado que la altura efectiva sobre la cual una columna corta puede doblarse es menor, esta ofrece mayor resistencia al desplazamiento horizontal y de este modo, atrae fuerzas mucho mayores que las columnas regulares. Como consecuencia, la columna corta sufre más daño.

- d) Diferencias en niveles: cuando la altura de entre-piso varían en mismo nivel se presenta el efecto de columna corta para aquellas columnas con una menor longitud.

### 2.2.1-Comportamiento estructural asociado.

Para adquirir una idea sobre el efecto de columna corta desde un punto de vista estructural, podemos dividir el efecto sobre el marco y sobre sus columnas, en los efectos causados por carga gravitatoria y por fuerzas laterales, la deformación de los elementos del marco varia en forma y magnitud, como se muestra en la ilustración 2.07.

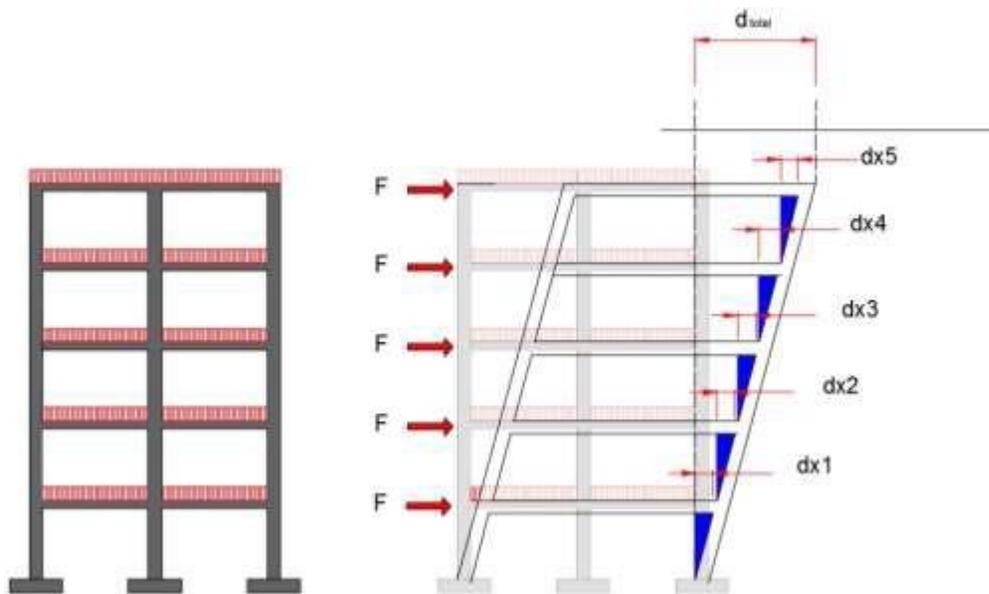


Ilustración 2.07

Los extremos de las columnas de un marco sujeto solo a carga por gravedad permanecen básicamente fijos, a menos que el marco sea extremadamente irregular. En el caso de carga lateral, el extremo superior de la columna se desplaza horizontalmente con respecto al extremo inferior una distancia denominada “distorsión de entre-piso”.

La magnitud de las deformaciones laterales de las columnas es significativamente menor para cargas gravitatorias que para cargas laterales.

En la ilustración 2.07 se muestra la deformación  $\xi$  respecto a la posición original no deformada de la columna, las fuerzas internas de los elementos, momento flexionante  $M$ , fuerza axial  $P$ , y fuerza cortante  $V$  y los diagramas de momentos para ambos casos de carga gravitatoria y carga lateral.

En la columna que es parte de un marco sujeto a carga gravitatoria, la deformación lateral de la columna depende únicamente de la magnitud de los momentos aplicados y de la rigidez o resistencia a flexión de la columna ( $\xi_T = \xi_e$ ).

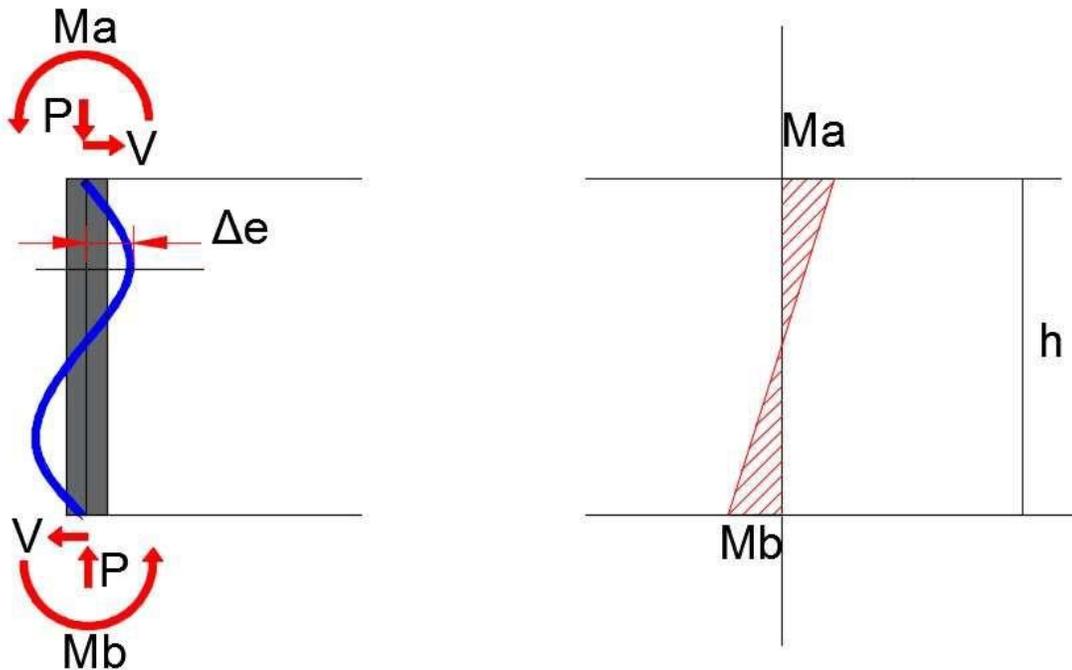


Ilustración 2.08

Para una columna perteneciente a un marco sujeto a fuerzas laterales, la deformación lateral de la columna depende de la suma de dos factores ( $\delta_T = \delta_e + \delta_d$ ).

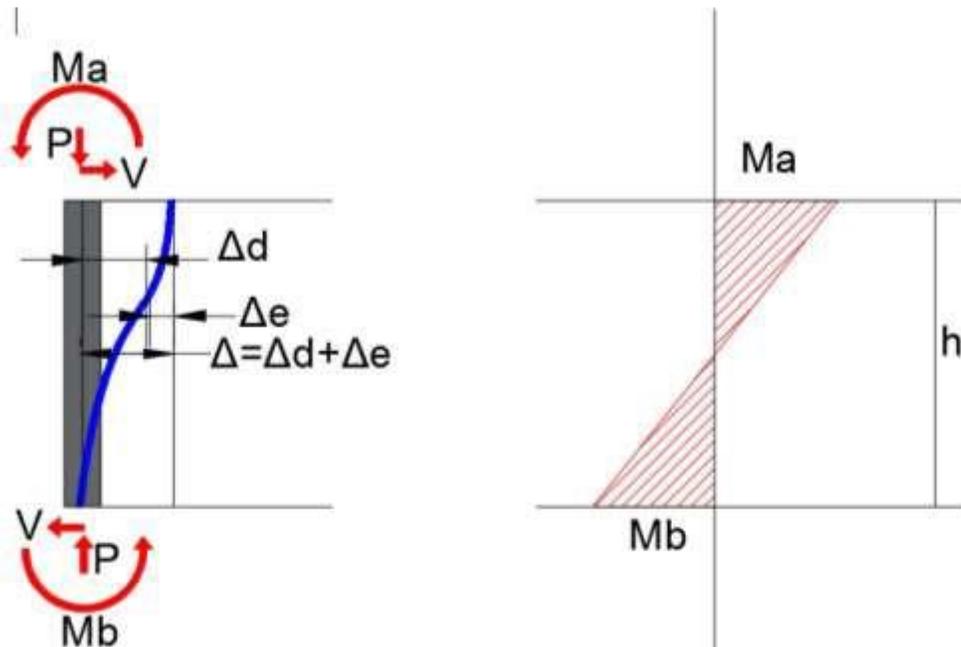


Ilustración 2.09

El primero ( $\delta_e$ ) relacionado con el momento flexionante y la rigidez de la columna, mientras que el segundo ( $\delta_d$ ) depende directamente de la distorsión de entre-piso.

La distorsión de entre-piso está en función de la rigidez de la estructura, geometría del marco, masa de la estructura y del movimiento sísmico. La rigidez contra flexión de cada columna juega un papel importante en la magnitud de los desplazamientos por nivel. La relación entre el momento flexionante interno de la columna que actúa en los extremos y la fuerza cortante asociada a ellos puede fácilmente ser obtenido mediante la aplicación del principio de equilibrio y sin tener en cuenta el efecto P-delta que sólo es significativo para grandes deformaciones laterales (Guevara,2004).

$$(2.01) \quad V = \frac{M_a + M_b}{h}$$

Por lo tanto, la fuerza cortante V corresponde a la suma algebraica de los momentos en los extremos de la columna ( $M_a + M_b$ ) dividida entre la altura “h”. En la condición de columna corta, al verse disminuida la longitud efectiva, la fuerza cortante se incrementa de forma inversamente proporcional.

Para tener una idea del orden de magnitud implicado, para una altura libre típica de 2.5 m, la presencia de un muro no estructural de 2 (m) de altura generando una abertura de 0.5 (m) en

la parte superior formará una restricción lateral que incrementará 5 veces  $((0.5/2.5)=5)$  la fuerza cortante que ha de resistir en comparación con la fuerza calculada para la columna sin restricción (Guevara,2004).

Desde otro punto de vista, se puede explicar el aumento de la fuerza cortante sobre el elemento columna como una consecuencia del cambio en la rigidez de dicho elemento. Si bien los sistemas estructurales están compuestos por elementos que deben trabajar en conjunto, esto no quiere decir que todos los elementos tienen las mismas características (geometría o resistencia) más sin embargo la mayoría de los sistemas estructurales predisponen a todos sus componentes a presentar una misma respuesta. Para el caso de las columnas esto se logra al estar unidas a un diafragma o losa que al presentarse una excitación sísmica provoca un desplazamiento igual en todas las columnas del sistema.

Como es bien sabido, la rigidez de un elemento representa la capacidad de oponerse al movimiento o deformación. Para una columna, dependiendo de las condiciones de apoyo la rigidez está dada por:

$$(2.02) \quad K_i = \frac{N E I}{L^3}$$

$K_i$ , es la rigidez del elemento.

$N$ , es el factor de forma (dependiendo de las condiciones de apoyo).

$E$ , es el módulo de elasticidad.

$I$ , es el momento de inercia de la sección.

$L$ , es la longitud de la columna.

Se tiene un sistema estructural como el mostrado en la siguiente figura (ilustración 2.10)



Ilustración 2.10. Diafragma conectado a dos columnas de igual longitud y sección transversal.

Cuando el sistema se ve sometido a fuerzas laterales, éste sufre un desplazamiento en la misma dirección que las fuerzas aplicadas. Las columnas al estar unidas de manera monolítica a la losa, sufren el mismo desplazamiento.

La fuerza aplicada a cualquiera de las columnas del sistema estructural es

$$(2.03) \quad F = \Delta * a$$

$$(2.04) \quad \Delta = \frac{F}{K}$$

$$(2.05) \quad \Delta = \frac{F * L^3}{E * I}$$

$$(2.06) \quad \Delta = \frac{F * L^3}{E * I}$$

La fuerza F, el módulo de elasticidad E y la inercia I son constantes y por lo tanto el desplazamiento está directamente relacionado con la longitud de la columna.

Si el mismo sistema estructural mostrado anteriormente se encuentra sobre un terreno irregular (ilustración 2.11) y debido a esto una de las columnas que lo soporta queda enterrada, tal y como se muestra en la siguiente figura, la rigidez de la columna enterrada aumentará.

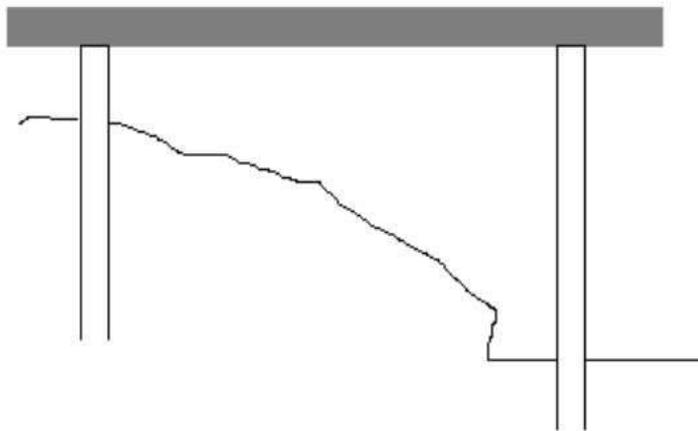


Ilustración 2.11. Diafragma conectado a dos columnas que por condiciones topográficas no poseen la misma longitud.

La columna está enterrada  $\frac{3}{4}$  partes de su longitud original, solamente  $\frac{1}{4}$  parte de la longitud tendrá la libertad de desplazarse, el cambio en su rigidez se representa de la siguiente manera empleando la ecuación 2.02.

$$k = \frac{EI}{0.25L^3} = \left( \frac{64EI}{L^3} \right)$$

La rigidez aumenta 64 veces para la misma sección de columna al reducir  $\frac{3}{4}$  su longitud libre. Hasta ahora se ha demostrado como la variación en la longitud de un elemento afecta la rigidez del mismo, pero lo más importante es comprender la relación de los cambios de rigidez con los desplazamientos y las fuerzas actuantes en ellos.

Para un sistema estructural similar a los mostrados pero en el cual las secciones de las columnas son diferentes ( $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$  y  $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ) se observará claramente como varían las fuerzas que actúan sobre cada una de las columnas, siendo mayor la que actúa sobre el elemento más rígido. Esto se debe a que ambas columnas por acción de la losa, están sometidas al mismo desplazamiento. El elemento más rígido requiere una fuerza mayor que la necesaria para provocar un desplazamiento similar en el de menor rigidez.

El momento de inercia de una sección está dado por la ecuación 2.07.

$$(2.07) \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

Inercia de la primera columna:

$$I = \frac{1 * 1^3}{12} = 0.0833 \text{ m}^4$$

Inercia de la segunda columna:

$$I = \frac{0.5 * 0.5^3}{12} = 0.0052 \text{ m}^4$$

La inercia de la sección más grande es 16 veces mayor que la columna de menores dimensiones, una relación muchas veces mayor a la relación 2:1 en cuanto a las dimensiones de las columnas.

Recordando que (Ecuación 2.03):

$$F = k * \Delta * a$$

La fuerza necesaria para provocar un desplazamiento es directamente proporcional a la rigidez del elemento, entonces, al provocar el mismo desplazamiento a dos elementos con distinta rigidez, la fuerza presente en el elemento más rígido será mucho mayor que la presente en el elemento con rigidez menor.

## 2.3.-DAÑOS POR EFECTO DE COLUMNA CORTA

A lo largo de las últimas décadas es muy difícil no encontrar en los reportes de daños tras terremotos un gran número de casos en los cuales el principal causante de daño en las estructuras es el efecto de columna corta. Se ha observado que las estructuras más susceptibles a este tipo de daños son las destinadas a casa habitación (construcciones pequeñas y grandes unidades habitacionales) así como todas aquellas que presenten una tipología similar.



*Imagen 2.01. En esta imagen se muestran los daños causados por el efecto de columna corta tras un sismo. Se puede observar la configuración típica (columnas con muros intermedios).*

Como ya se ha mencionado, existen diversas razones por las cuales las estructuras son susceptibles de sufrir daños por este fenómeno. En muchos países la falta de rigor y/o actualización en los reglamentos constructivos ha arrojado un gran número de estructuras dañadas tras la ocurrencia de algún sismo de magnitud considerable. Tal es el caso de lo sucedido en la región del eje cafetero, Colombia 1999. Un sismo con una magnitud de 6.2 grados Richter y posteriores réplicas de 5.8 grados Richter azotaron un área estimada de 1360 km<sup>2</sup> con consecuencias realmente devastadoras dejando más de 1185 pérdidas humanas en los 28 municipios afectados (*El Terremoto de enero de 1999 en Colombia, Programa de las naciones Unidad para el Desarrollo-Colombia/ CEPAL*).

Un dato sumamente interesante es el número de edificios de uso escolar dañados, siendo un total 3917 aulas afectadas pertenecientes a 521 escuelas de las cuales 143 quedaron inutilizables, 294 con daños mayores y 84 presentaron daños menores. Esto representó un costo aproximado de 106,431 millones de pesos colombianos (*El Terremoto de enero de 1999 en Colombia, Programa de las naciones Unidad para el Desarrollo-Colombia/ CEPAL*).



*Imagen 2.02. Edificación dañada por efecto de columna corta, (Popayan, Colombia,1983)*



*Imagen 2.03. Falla de una columna corta en el Hotel Korali, durante el sismo de Montenegro ,1979.*

El sismo más devastador en la historia de México ocurrió el 19 de septiembre de 1985, con una magnitud de 8.1 grados Richter (Instituto de Geofísica de la UNAM) y con una duración de casi cuatro minutos, de los cuales 30 segundos corresponden a la etapa de mayor movimiento. Cientos de estructuras de todo tipo resultaron parcial o totalmente dañadas. A pesar del hermetismo con que se manejó la situación se tiene un aproximado de 20 mil víctimas fatales, 2831 inmuebles afectados y una pérdida calculada en los 5 mil millones de dólares. La descomunal magnitud del sismo aunado a las múltiples irregularidades constructivas provocó de este desafortunado evento un parteaguas en las normas de construcción para la ciudad de México. Sin lugar a duda la tipología de los grandes edificios habitacionales, así como de otras estructuras indujo a que el efecto de columna corta fuera un agente generador de daño muy importante durante el sismo.

Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural Sísmica por Efecto de Columna Corta.  
Josué Sánchez Tacuba



Imagen 2.04. Sismo del 19 de septiembre de 1985, ciudad de México. Edificio de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.



Imagen 2.05. Sismo del 19 de septiembre de 1985, ciudad de México. Edificio de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Localidades cercanas a la zona de alta sismicidad en el Pacífico (Guerrero, Oaxaca y Michoacán) han sufrido a lo largo de la historia una gran cantidad de daños. La mayoría de las construcciones están hechas de manera casi empírica, con materiales de poca calidad e implementando técnicas constructivas deficientes y sin tomar en cuenta los requisitos mínimos de seguridad que los reglamentos exigen, entonces se presentan dos problemas:

1) La presencia de fenómenos de origen sísmicos a causa de las características estructurales y 2) el incumplimiento de los requisitos mínimos que exigen los reglamentos hace aún más vulnerables a las estructuras todo esto sumado a que México es un país con una alta sismicidad.



*Imagen 2.06. Escuela dañada por sismo de 1996, Perú. Presenta daños en las columnas cortas.*



*Imagen 2.07. Edificio habitacional con daños en las columnas cortas durante el sismo de 1996 en Chile. Se observa claramente la configuración estructural que predispone a la edificación a presentar este tipo de daño*



*Imagen 2.08. Edificio habitacional con daños en las columnas cortas durante el sismo de 1996 en Chile. Se observa claramente la configuración estructural que predispone a la edificación a presentar este tipo de daño.*



*Imagen 2.09. Daños en edificio escolar (Liceo Raimundo Martínez Centeno) durante el sismo de 1997 en Venezuela. Murieron 33 personas a causa de la falla de este edificio.*

Como respuesta al gran número de edificaciones afectadas por el ECC se han llevado a cabo un gran número de estudios tales como los realizados por la Universidad de Texas en Austin por la década de los 80's diseñados para establecer los parámetros que controlan el comportamiento estructural de las columnas cortas (Guevara,2004). Los resultados y conclusiones de esta serie de experimentos son descritos por Mayurama et al. (1984), Umehara and Jirsa (1984) y Woodward and Jirsa (1984).

Colombia al ser uno de los países fuertemente azotados por grandes sismos en la década de los 80's realizó en la Universidad de los Andes en Bogotá y dirigidos por J.C. Pineda (1994) una serie de experimentos en los cuales se intentó reproducir fallas de columnas cortas utilizando modelos a escala (J.C. Pineda, 1994).

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural por efecto de columna corta es una acción muy importante y útil ya que nos ayudará a conocer con mayor precisión la contribución de este fenómeno al daño que las estructuras sufren durante un sismo y

Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural Sísmica por Efecto de Columna Corta.  
Josué Sánchez Tacuba

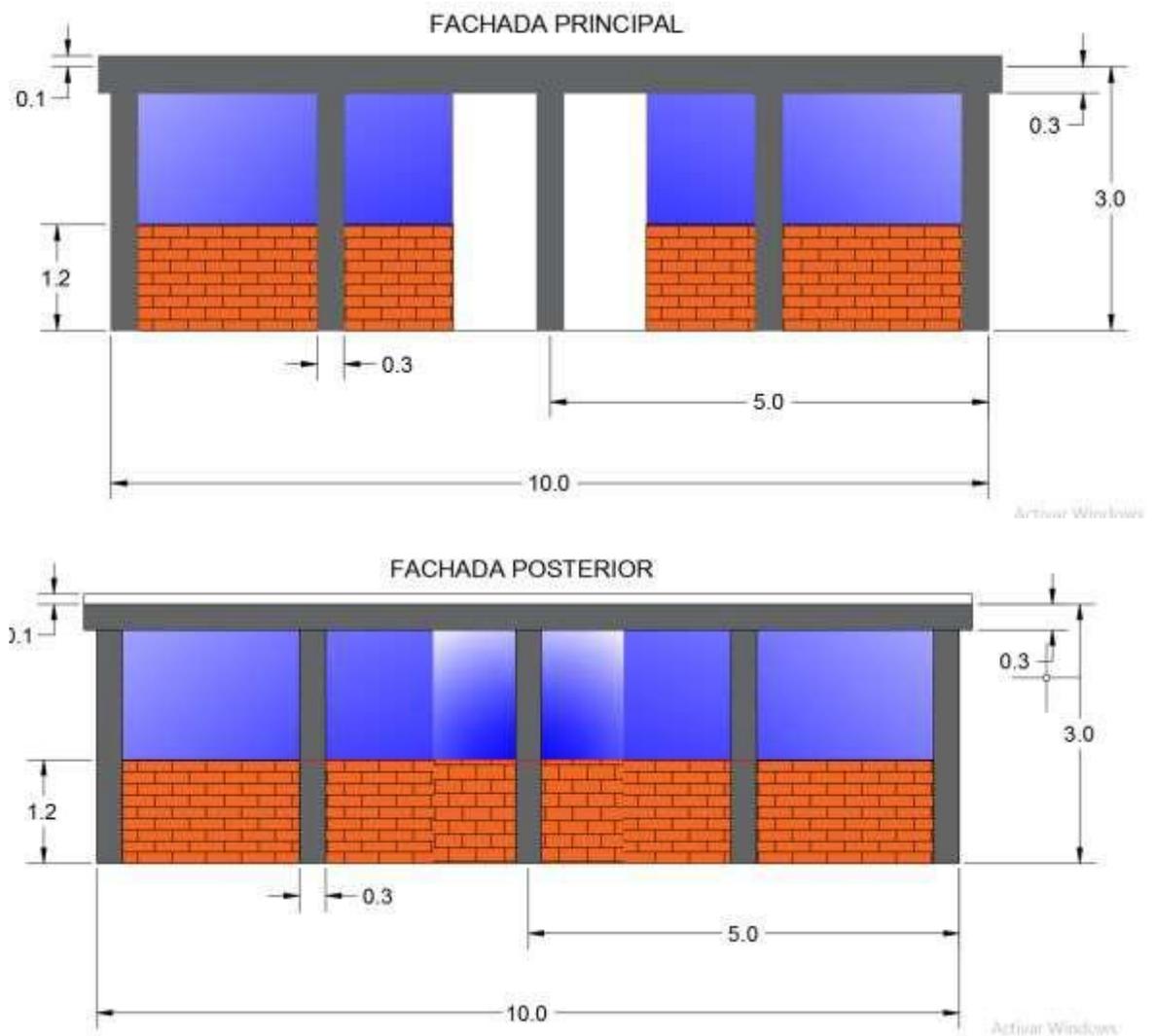
entonces, tomar las medidas pertinentes para mitigar los efectos nocivos sobre ellas (construcciones existentes y por construir).

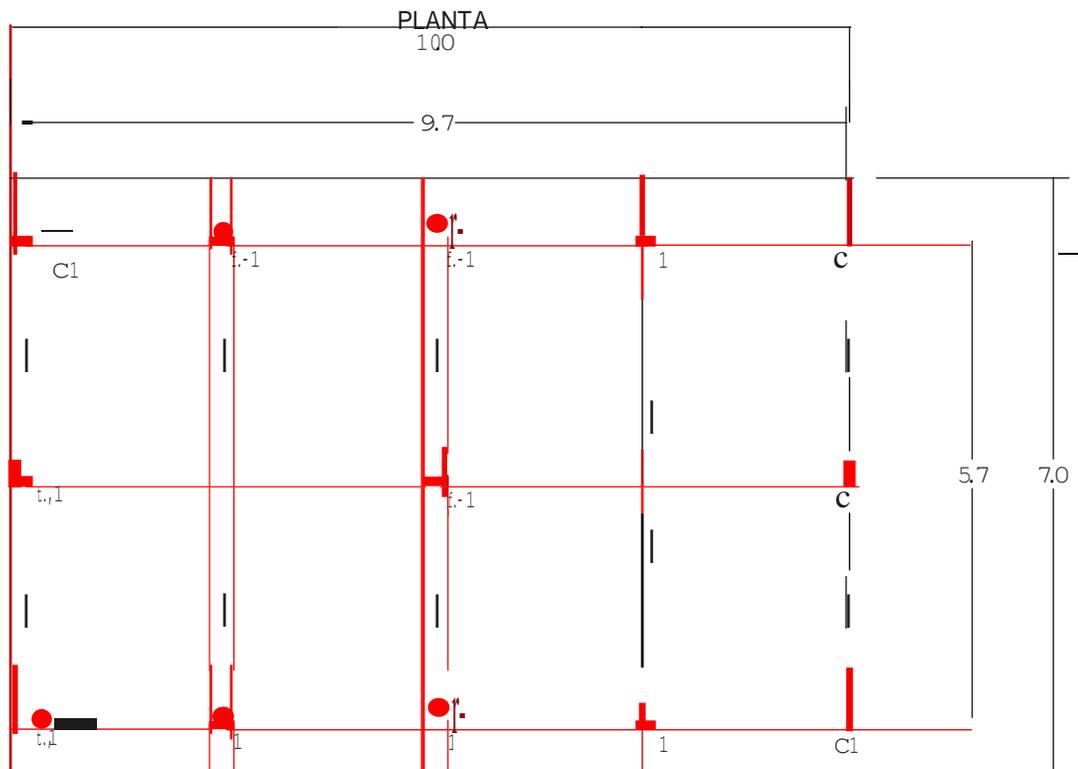
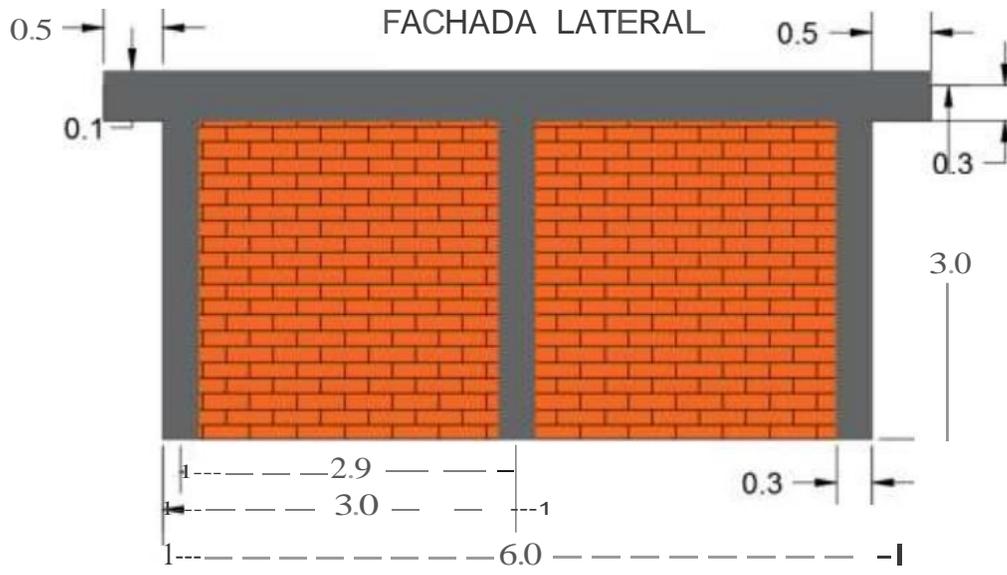
# **3.CASOS DE ESTUDIO**

### 3.1-DESCRIPCIÓN Y DISTRIBUCIÓN ARQUITECTÓNICA.

En el presente trabajo se evaluarán 2 estructuras destinadas a aulas escolares, dos de ellas localizadas en la zona centro del estado de Guerrero (uno y dos niveles). Los elementos estructurales de las escuelas localizadas en Guerrero fueron diseñados “supuestamente” bajo el Reglamento de Construcción del Distrito Federal del 2004 (RCDF-2004) y para la demanda sísmica se empleó el Manual de Diseño Sísmico de la Comisión Federal de Electricidad del 1998.

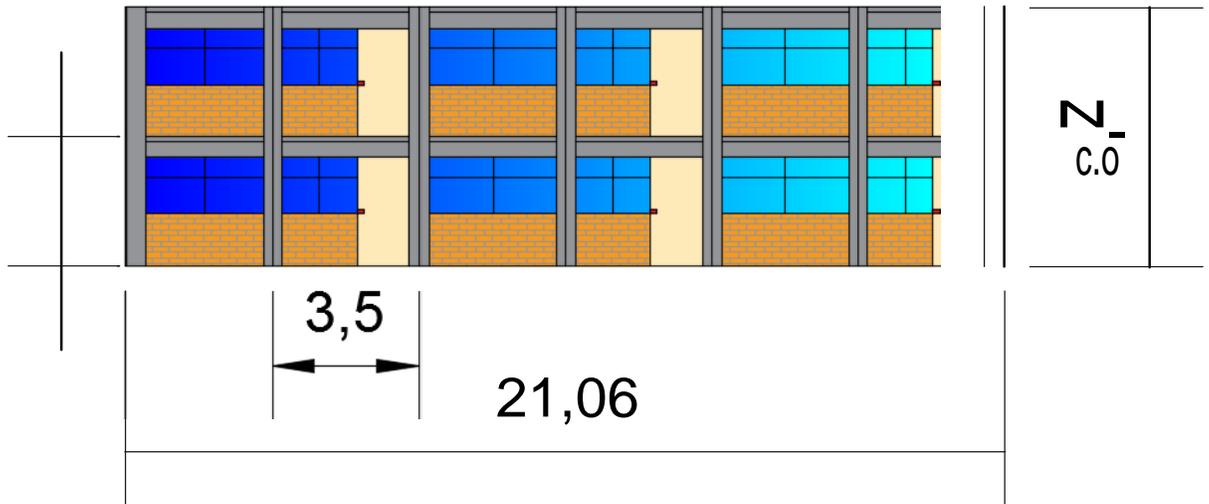
#### Estructura de un nivel.



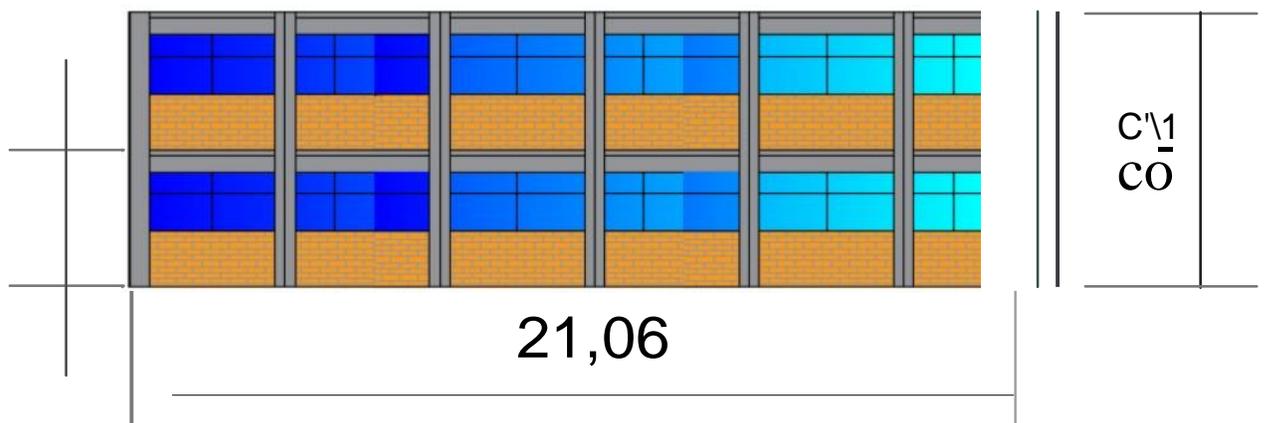


Estructura de dos niveles.

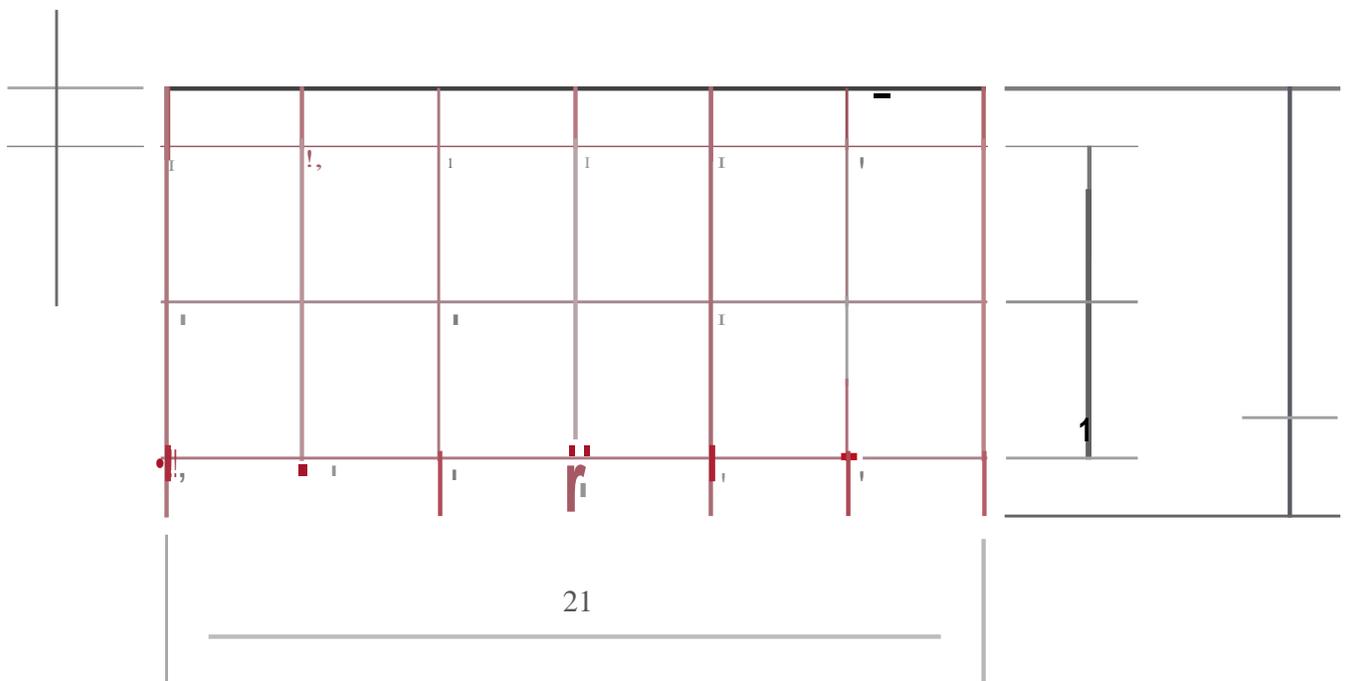
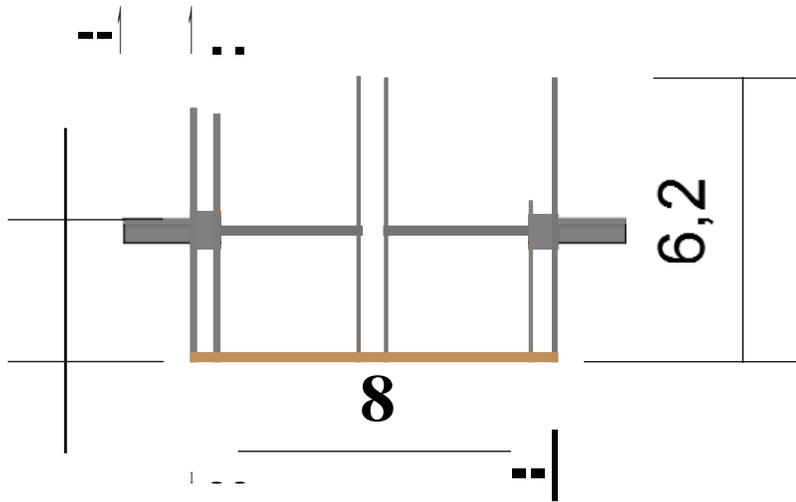
### FACHADA PRINCIPAL



### FACHADA POTERIOR



## FACHADA LATERAL 1,5



tivar Window

## CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LAS EDIFICACIONES.

Tabla 3.01 Muestra los periodos correspondientes a cada condición de estudio para la estructura de un nivel.

<b>ESTRUCTURA DE UN NIVEL</b>	
<b>H muros (m)</b>	<b>T (s)</b>
<b>0.000</b>	<b>0.156</b>
<b>1.200</b>	<b>1.320</b>
<b>2.000</b>	<b>0.091</b>
<b>2.400</b>	<b>0.078</b>

Tabla 3.02. Muestra los periodos correspondientes a cada condición de estudio para la estructura de dos niveles.

<b>ESTRUCTURA DE DOS NIVELES</b>	
<b>H muros (m)</b>	<b>T1 (s)</b>
<b>0.000</b>	<b>0.226</b>
<b>1.200</b>	<b>0.189</b>
<b>2.000</b>	<b>0.149</b>
<b>2.400</b>	<b>0.134</b>

Los periodos se obtuvieron empleando el programa DRAIN2DX y muestran consistencia ya que a medida que la altura del muro se incrementa, la rigidez que éste aporta a la estructura es mayor y como consecuencia de esto, los periodos disminuyen. Más adelante se detallará cómo obtener las propiedades mecánicas de los muros para lo cual se empleó el método de la diagonal equivalente propuesto por Bazán (1990).

### 3.2-DEMANDA SÍSMICA DE DISEÑO.

Obtenidos mediante el Manual de Diseño Sísmico de la Comisión Federal de Electricidad de 1998 y utilizando un factor de comportamiento sísmico  $Q=1.5$ . Cabe mencionar que la demanda sísmica establecida por este manual fue accionada sobre modelos en los cuales no se consideró la interacción de éstos con la estructura a fin de representar una de las situaciones que ocurre con mayor frecuencia en el ámbito constructivo.

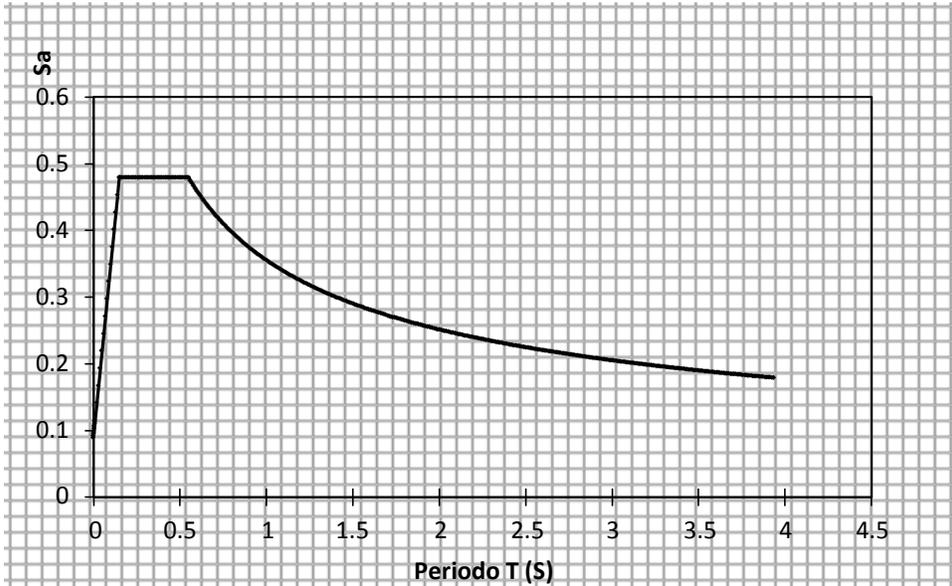


Ilustración 3.01. Espectro de diseño, Manual CFE-1998, zona D, tipo de suelo I.

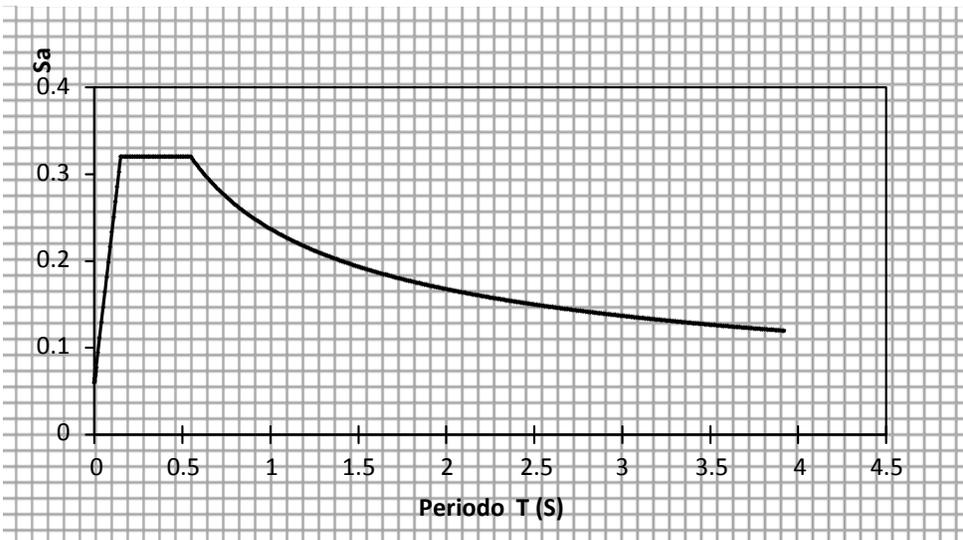
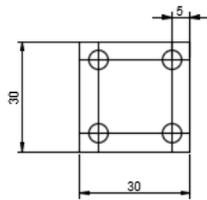


Ilustración 3.02. Espectro reducido de diseño sísmico,  $Q=1.5$ , manual CFE-1998. Zona D, tipo de suelo 1.

### 3.3-ARMADO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

- Estructura de un nivel



**Armado de columna de 30x 30 cm**

**Armado longitudinal:  
4#4**

**Armado transversal:  
e#3@12.5 cm**

**Concreto de  $f_c=250$  kg/cm<sup>2</sup>  
Recubrimiento de 5 cm**

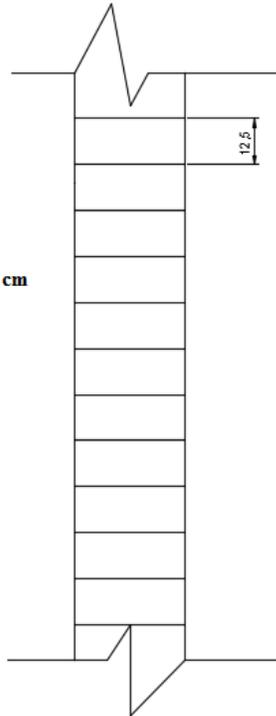
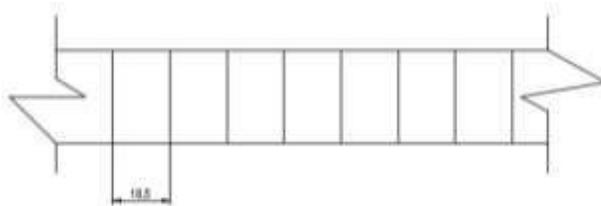


Ilustración 3.03. Armado de columnas correspondientes a la estructura de un nivel.



**Armado de vigas de 30 x 40 (cm)**

**Armado longitudinal:  
2#4/1#3 (arriba)**

**Armado transversal:  
e#3@18.5cm**

**Concreto con un  $f_c=250$  kg/cm<sup>2</sup>  
Recubrimiento de 5 (cm)**

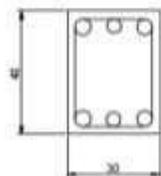


Ilustración 3.04. Armado de vigas correspondientes a la estructura de un nivel.

- Estructura de dos niveles

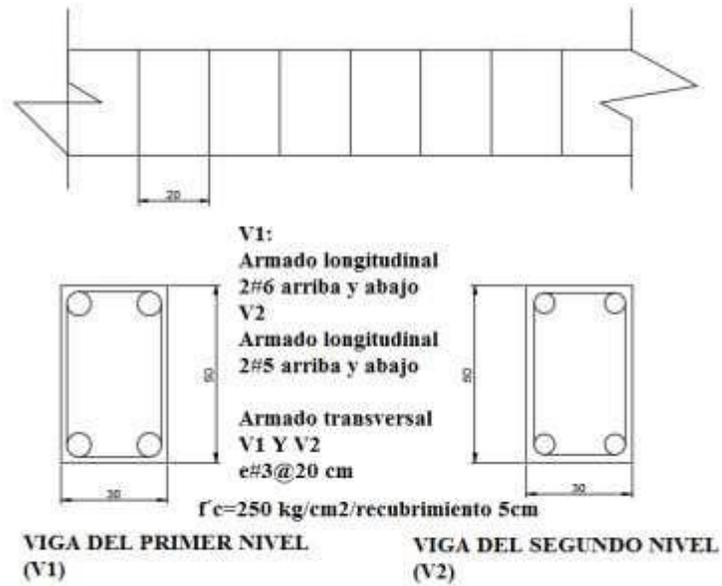


Ilustración 3.05. Armado de columnas correspondientes a estructura de dos niveles.

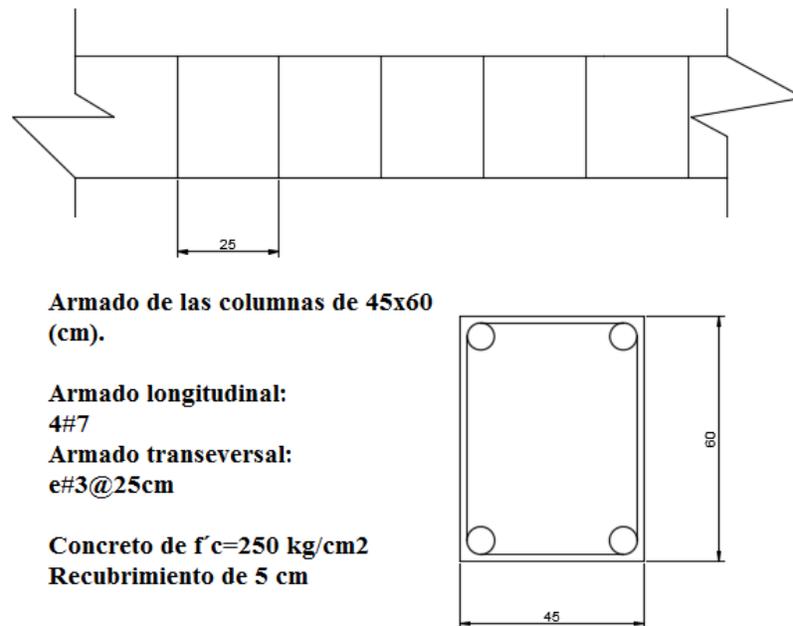


Ilustración 3.06. Armado de Vigas correspondientes a la estructura de dos niveles.

# **4.- VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL**

## 4.1.0-MODELACIÓN

### 4.1.1-Método de la diagonal equivalente

Los muros de mampostería son representados mediante contraventeos, los cuales fueron modelados empleando el método de la diagonal equivalente que trabaja a compresión (Bazán, 1980). Con base en estudios analíticos con elementos finitos se ha propuesto una diagonal equivalente que tenga el mismo espesor  $t$  del muro y el módulo de elasticidad  $E_m$  del muro, con un ancho  $\omega$  determinado por la siguiente ecuación:

$$(4.01) \quad \omega = (0.35 + 0.22 \lambda) h$$

Donde:

$$(4.02) \quad \lambda = (E_c * A_c) / (G_m * A_m)$$

$\omega$  = Ancho de la diagonal equivalente ( $m^2$ )

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto ( $Ton/m^2$ )

$A_c$  = Área de las columnas que conforman el marco ( $m^2$ ).

$G_m$  = Módulo de resistencia al corte de la mampostería, se entiende como  $0.4 E_m$

$A_m$  = área del muro ( $m^2$ ).

El método se aplica a marcos planos que contienen muros de mampostería entre los elementos columna y los cuales están sujetos a cargas laterales, consiste en obtener una sección diagonal que aporta la misma capacidad estructural que el muro de mampostería

#### 4.1.2-Propiedades de la mampostería

En la tabla 1.0 se muestran los datos de las propiedades mecánicas de los elementos que conforman el marco de concreto.

Tabla 4.01. Propiedades mecánicas de los elementos que conforman el marco en la dirección x.

<b>Datos</b>	
<b>Columna</b>	
b (m)	0.45
h (m)	0.45
Ac (m <sup>2</sup> )	0.2025
Ec (Ton/m <sup>2</sup> )	2213594
<b>Muro</b>	
t (m)	0.15
Em (Ton/m <sup>2</sup> )	61430
L (m)	3
Gm (Ton/m <sup>2</sup> )	24572

Para poder obtener las rigideces de las diagonales equivalentes se tomaron en cuenta las siguientes propiedades de la mampostería obtenidas en un estudio realizado hace algunos años (V. Flores y S. Sánchez-Tizapa, 2013)

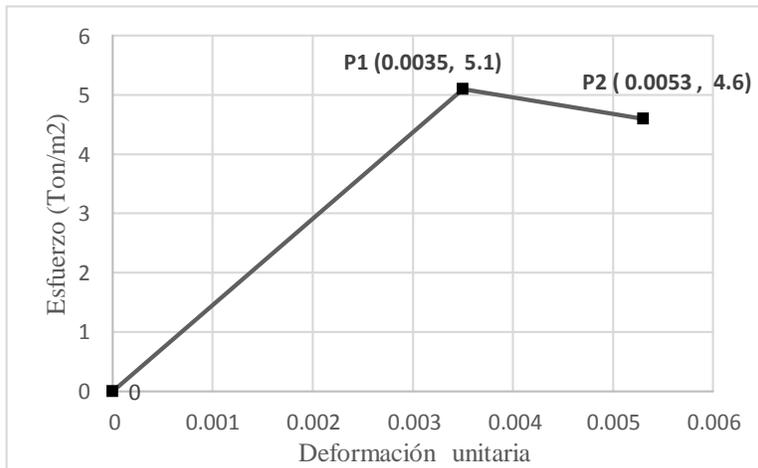
$U_1=0.0035$  (deformación de agrietamiento)

$U_2=0.0053$  (deformación de falla)

$F_1= 5.1 \text{ Ton/m}^2$  (Carga máxima a compresión/ asociada a la deformación de agrietamiento)

$F_2= 4.6 \text{ Ton/m}^2$  (Carga última a compresión/ asociada a la deformación de falla)

Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural Sísmica por Efecto de Columna Corta.  
 Josué Sánchez Tacuba



Gráfica 4.01. Gráfica esfuerzo-Deformación de la mampostería (V. Flores y S. Sánchez-Tizapa, 2013) la cual muestra los puntos P1 (carga máxima, deformación asociada) y P2 (Carga de falla, deformación asociada)

Las siguientes tablas muestran las propiedades de las diagonales equivalentes para los tres casos de estudio (1,2 y 3 niveles).

Tabla 4.02. Propiedades de las diagonales equivalentes para la estructura de un nivel.

h muro (m)	L. Claro (m)	Landa	W	A Diag (m <sup>2</sup> )	L diag. (m)	K1 (Ton/m)	K2 (Ton/m)
1.20	2.10	9.65	2.97	0.45	2.42	11307.83	5212.24
2.00	2.10	5.79	3.25	0.49	2.90	10320.71	4757.23
2.40	2.10	4.45	3.46	0.52	3.19	9992.06	4605.74

Tabla 4.03. Propiedades de las diagonales equivalentes para la estructura de dos niveles.

h muro (m)	L. Claro (m)	Landa	W	A Diag (m <sup>2</sup> )	L diag. (m)	K1 (Ton/m)	K2 (Ton/m)
1.20	3.00	6.76	2.20	0.33	3.23	6284.56	2896.81
2.00	3.00	4.05	2.48	0.37	3.61	6347.46	2925.80
2.40	3.00	3.12	2.69	0.40	3.84	6460.68	2977.99

Las tablas 4.02 y 4.03 muestran los resultados de aplicar el método de la diagonal equivalente a los muros que conforman el marco en dirección X (Bazán, 1990).

## 4.2-DEMANDA SÍSMICA

La respuesta estructural se obtuvo a través del método IDA (Vamvatsikos D y Cornell C.A.,2002) que fue empleado sobre un conjunto de registros sísmicos previamente seleccionados (base de registros sísmicos empleados por Ruiz-Garcia y Miranda.2003 y 2004) y por medio de análisis no lineales paso a paso se obtuvieron los datos necesarios para llevar a cabo el estudio de vulnerabilidad.

Las siguientes imágenes muestran el manejo de datos para un registro sísmico el cual ha sido escalado a diferentes intensidades. Como se mencionó anteriormente, cada punto de una curva IDA representa el valor máximo del parámetro evaluado (desplazamiento, distorsión, cortante) para cada nivel de intensidad al que ha sido escalado un registro.

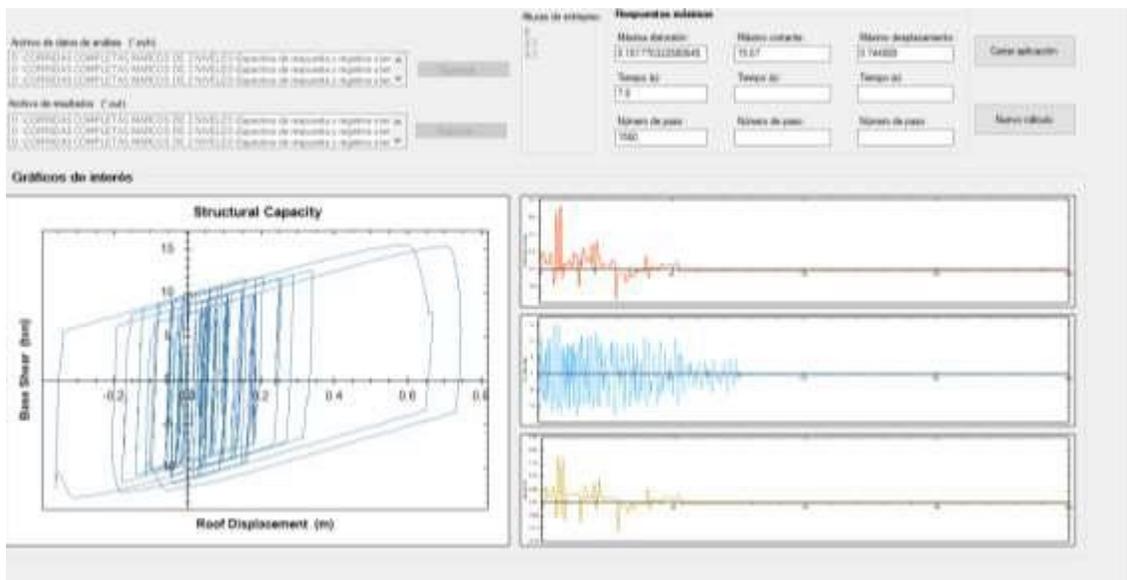


Imagen 4.01. Ciclo histerético que muestra el comportamiento estructural ante ciclos de carga y descarga.

Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural Sísmica por Efecto de Columna Corta.  
 Josué Sánchez Tacuba

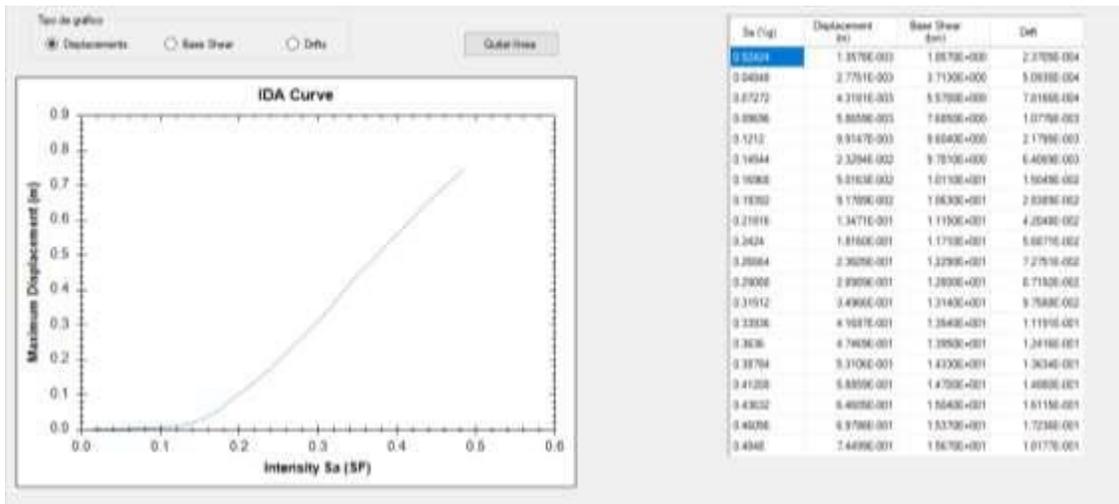


Imagen 4.02. Procesamiento de máximos desplazamientos para la obtención de la curva IDA.

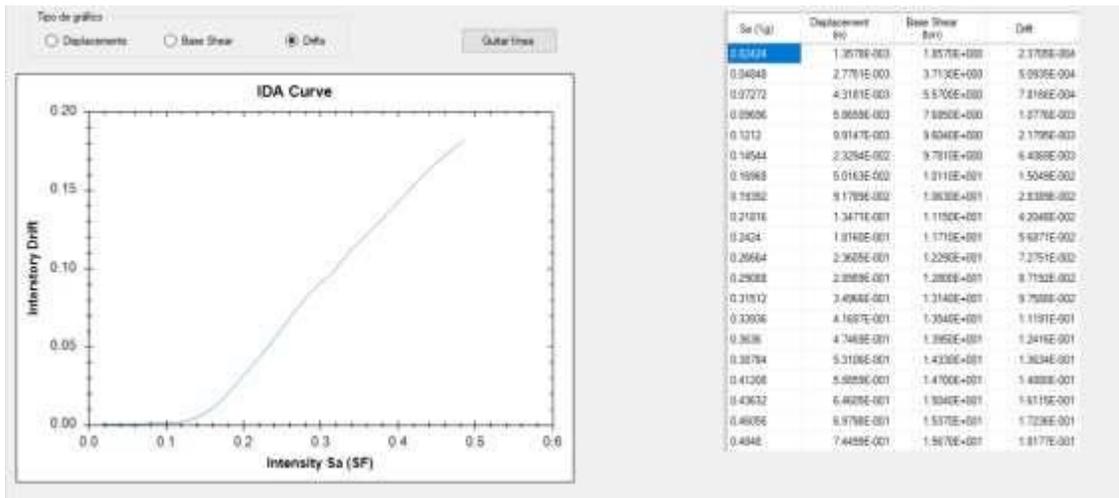


Imagen 4.03. Procesamiento de máximas distorsiones de entrepiso para la obtención de la curva IDA

Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural Sísmica por Efecto de Columna Corta.  
 Josué Sánchez Tacuba

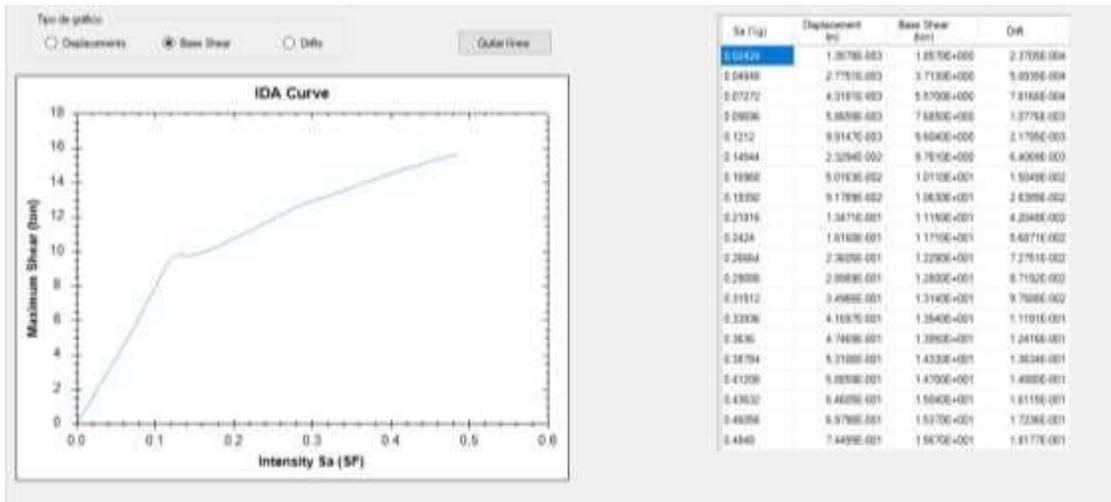


Imagen 4.04. Procesamiento de máximos valores de cortante para la obtención de la curva IDA.

De esta forma se van obteniendo las curvas IDA para cada uno de los acelerogramas que conforman el set de registros sísmicos y se procede a obtener la respuesta media. Estas respuestas están conformadas por el valor máximo promedio asociado a cada intensidad para los diversos parámetros de interés (desplazamiento, cortante y distorsión de entrepiso).

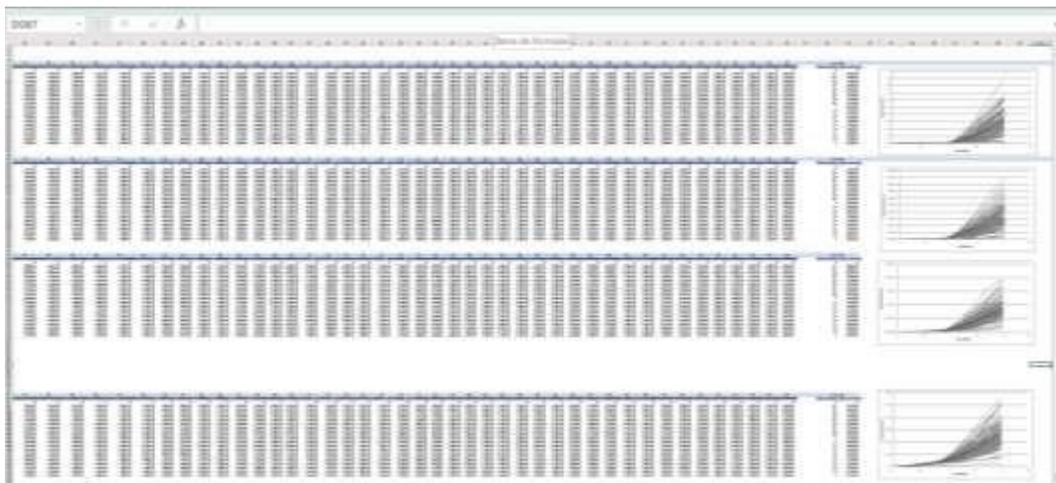


Imagen 4.05. En esta imagen se muestra el procesamiento de datos para obtener la respuesta estructural promedio en términos de Intensidad Vs Desplazamiento.

Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural Sísmica por Efecto de Columna Corta.  
Josué Sánchez Tacuba

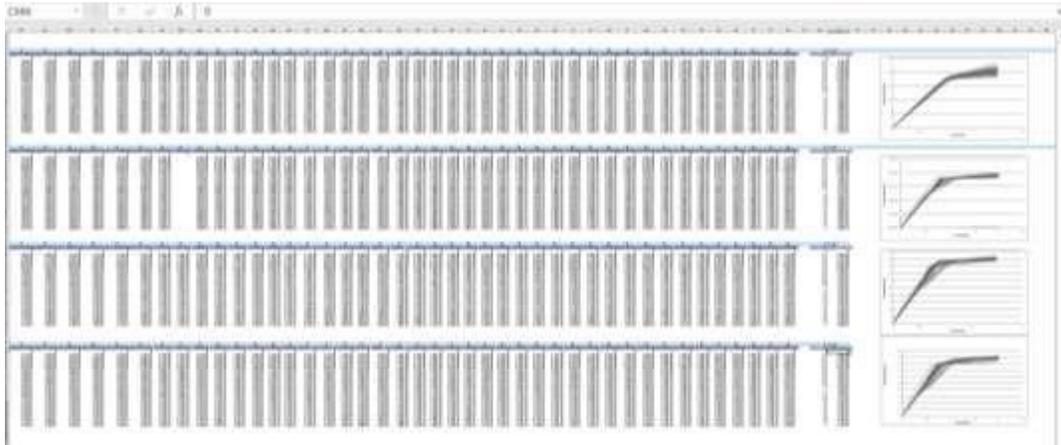


Imagen 4.06. Procesamiento de datos para obtener la respuesta estructural promedio en términos de Intensidad Vs Cortante.

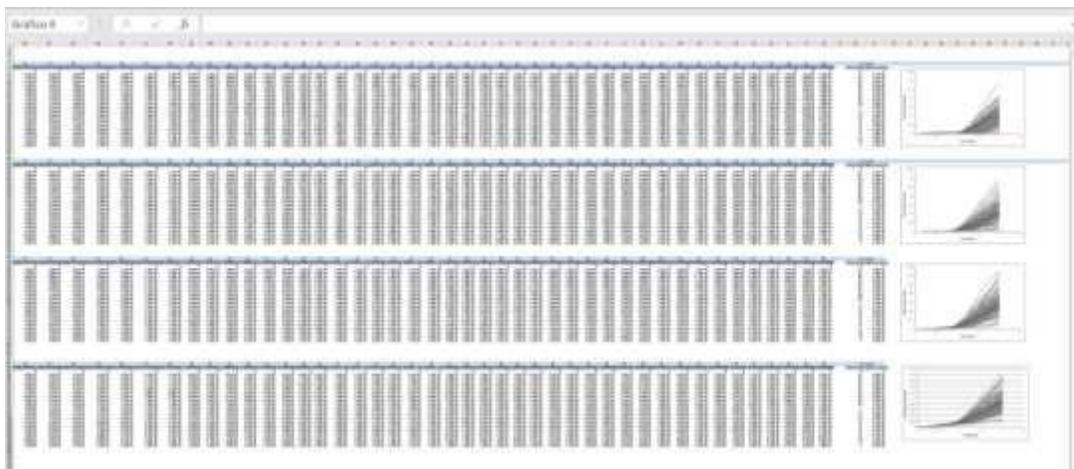
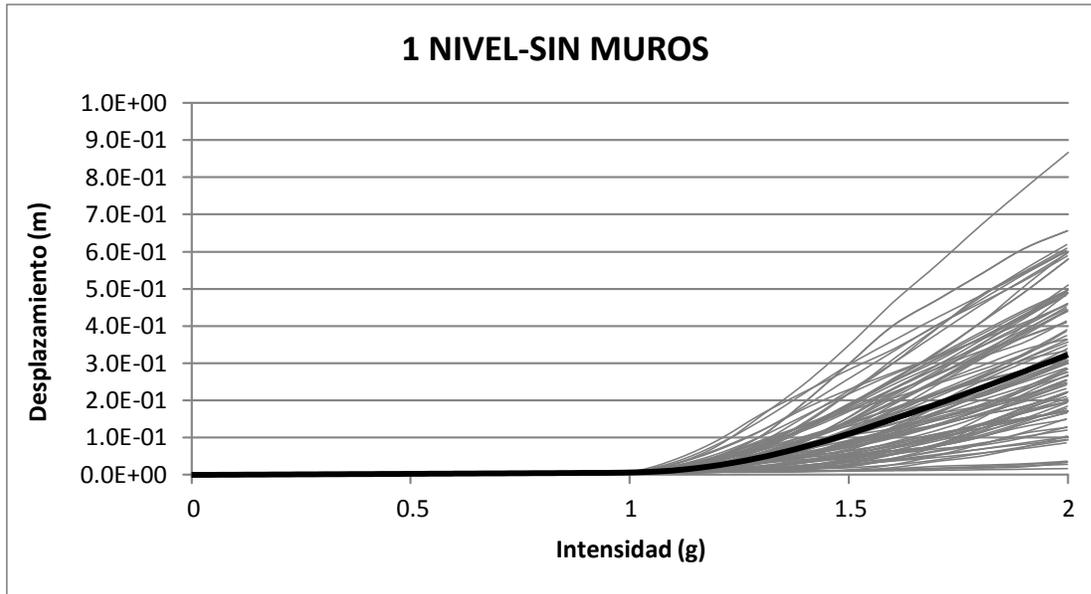


Imagen 4.07. Procesamiento de datos para obtener la respuesta estructural promedio en términos de la Intensidad Vs Distorsión de entrepiso.

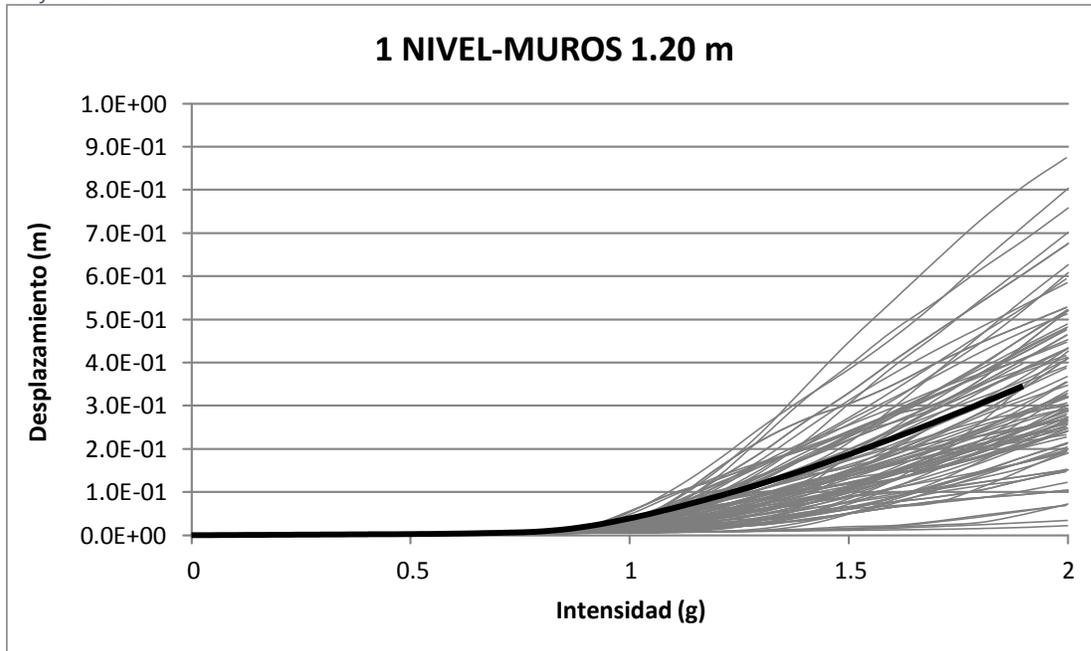
### 4.3-CURVAS IDA

#### Desplazamiento vs intensidad

Las siguientes gráficas muestran la respuesta estructural para todo el set de registros sísmicos, así como la respuesta promedio.

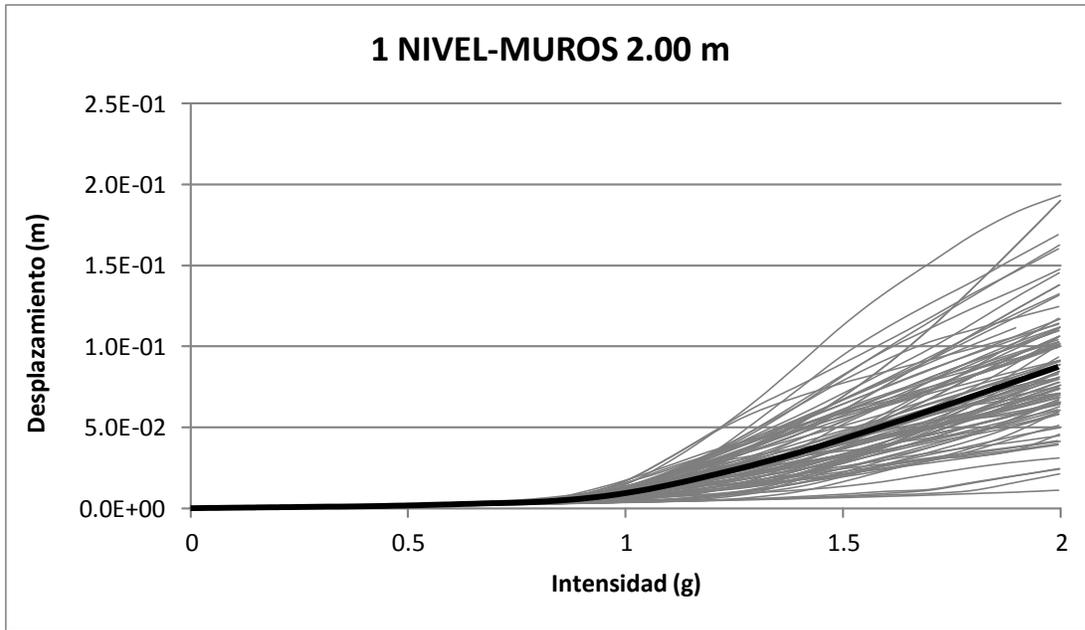


Gráfica 4.02

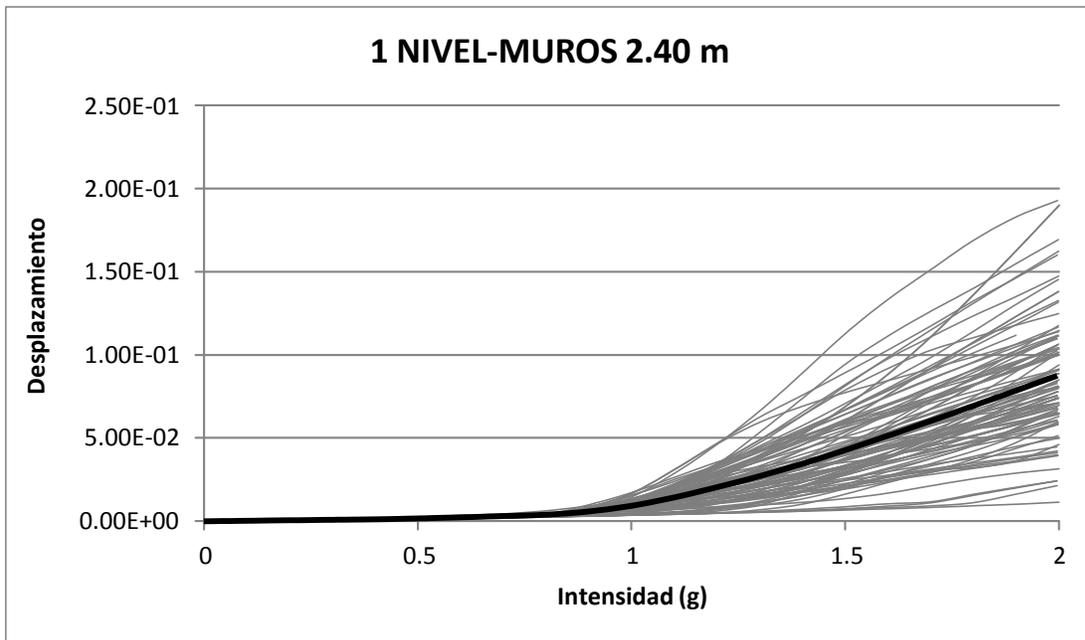


Gráfica 4.03

Intensidad Vs Desplazamiento. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel sin muros (Gráfica 4.02) y con muros a una altura de 1.20 m (Gráfica 4.03).



Gráfica 4.04

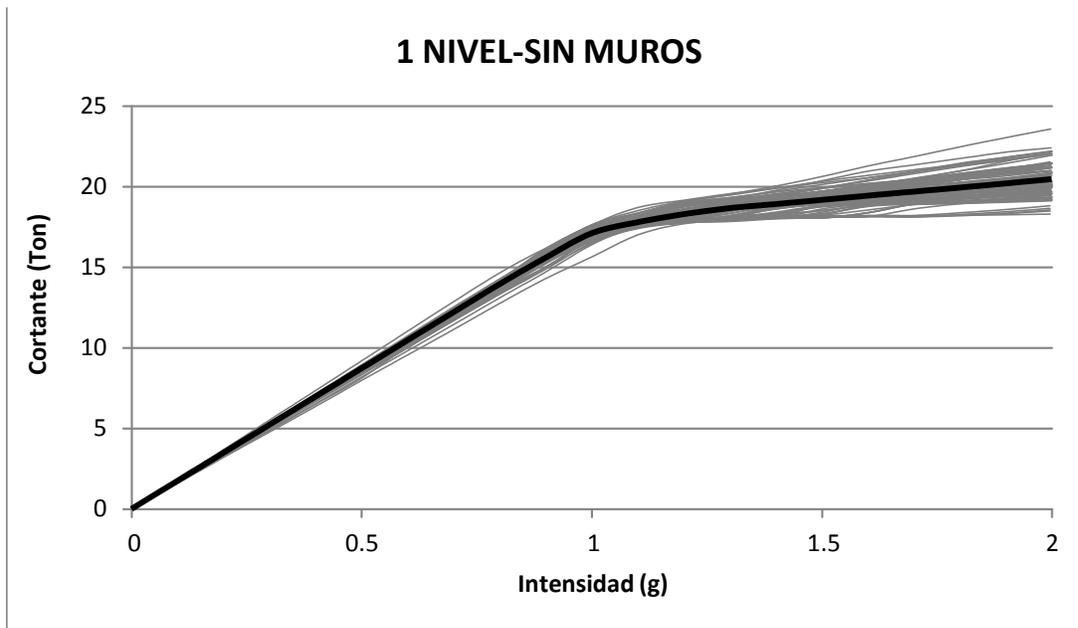


Gráfica 4.05

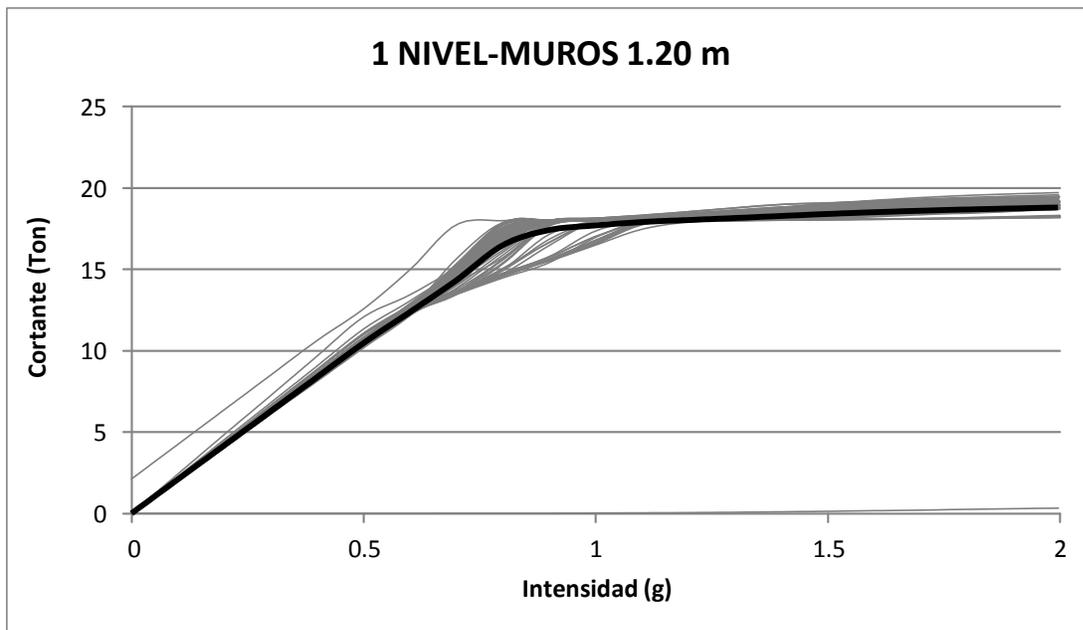
Intensidad Vs Desplazamiento. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel con muros a 2.00 m (Gráfica 4.04) y muros a 2.40 m (Gráfica 4.05).

## Intensidad vs cortante

Los resultados de los IDA para el cortante basal se pueden ver en las siguientes gráficas.

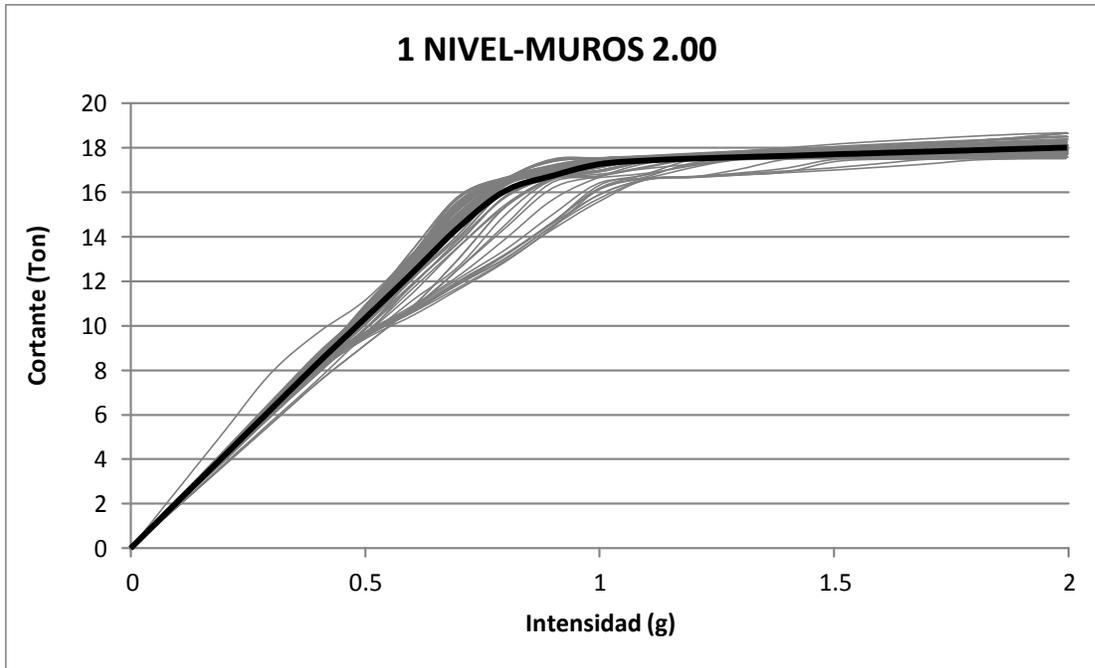


Gráfica 4.06

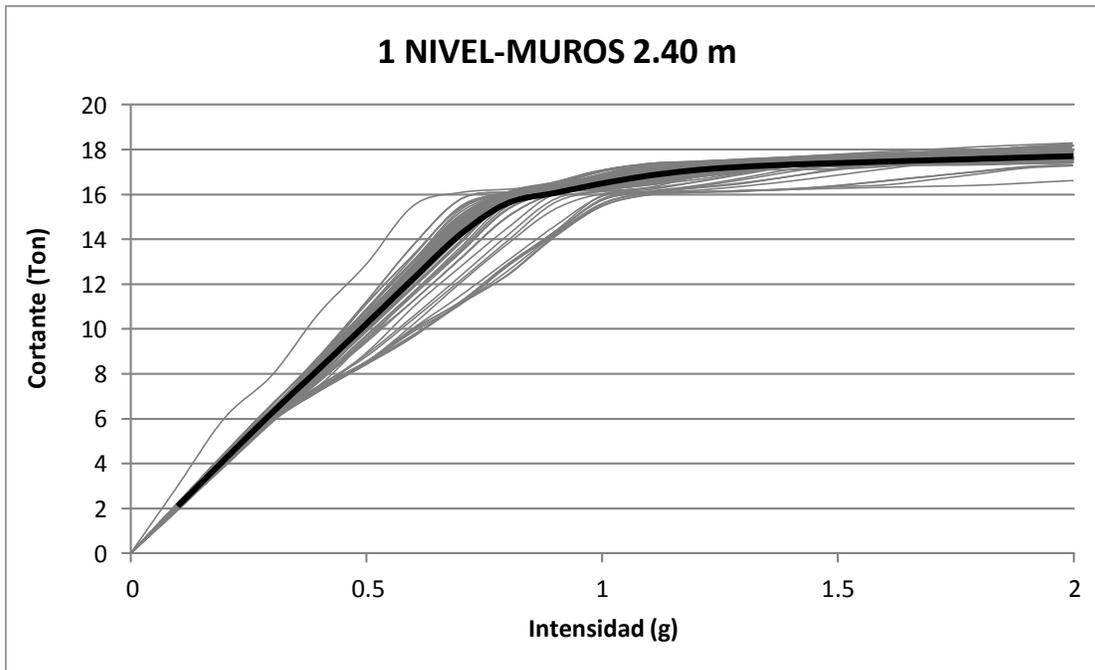


Gráfica 4.07

Intensidad Vs Cortante Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel sin muro (Gráfica 4.06) y muros a 1.20 m (Gráfica 4.07).



Gráfica 4.08

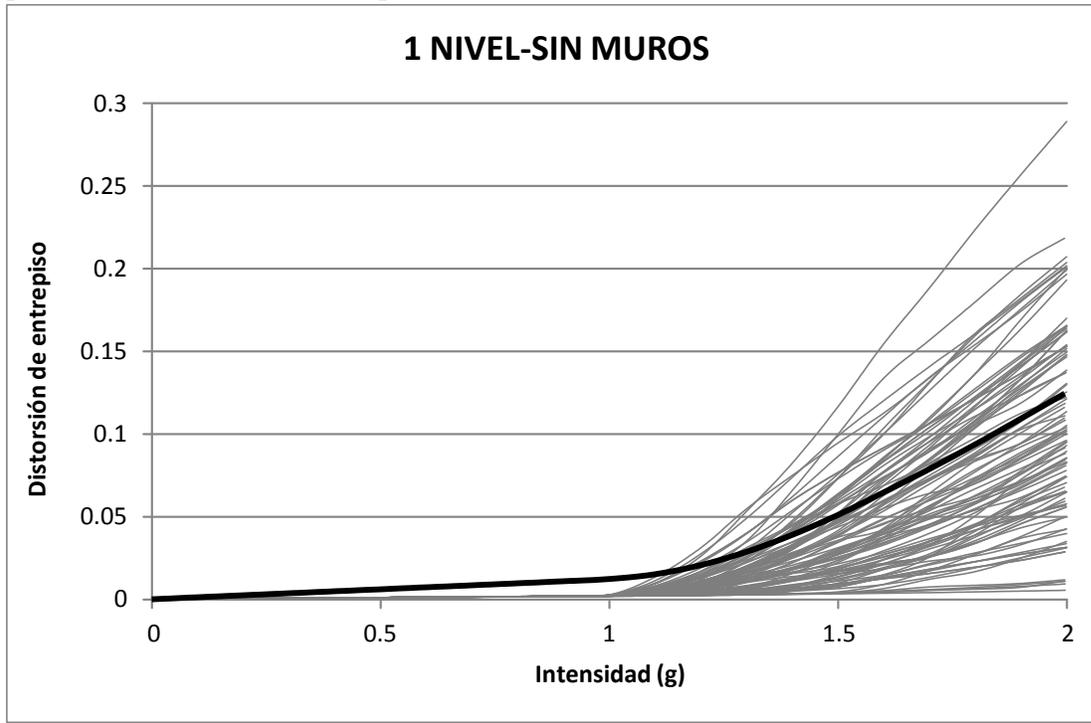


Gráfica 4.09

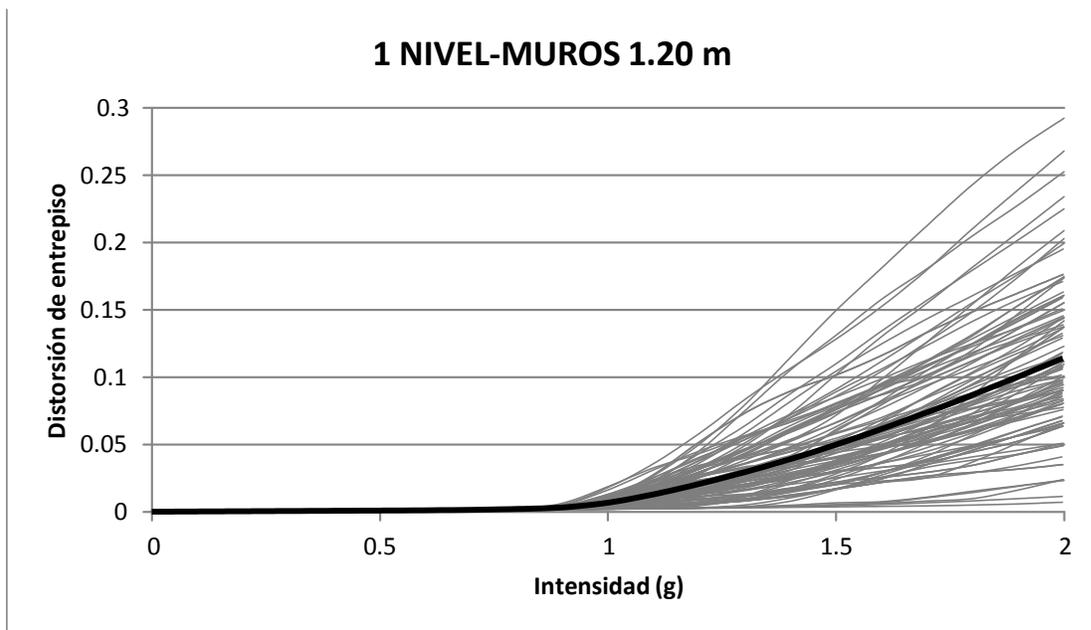
Intensidad Vs Cortante. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel con muros a 2.00 m (Gráfica 4.08) y muros a 2.40 m (Gráfica 4.09).

## Intensidad vs distorsión de entrepiso

Las gráficas presentadas a continuación muestran la respuesta estructural en función del parámetro distorsión de entrepiso.

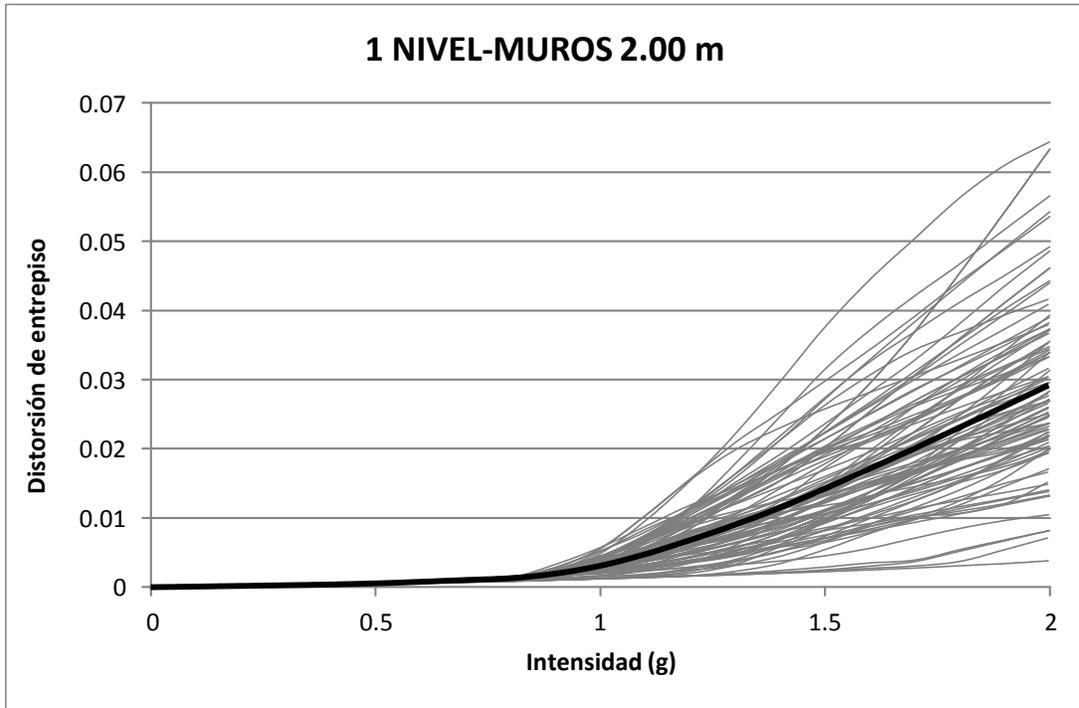


Gráfica 4.10

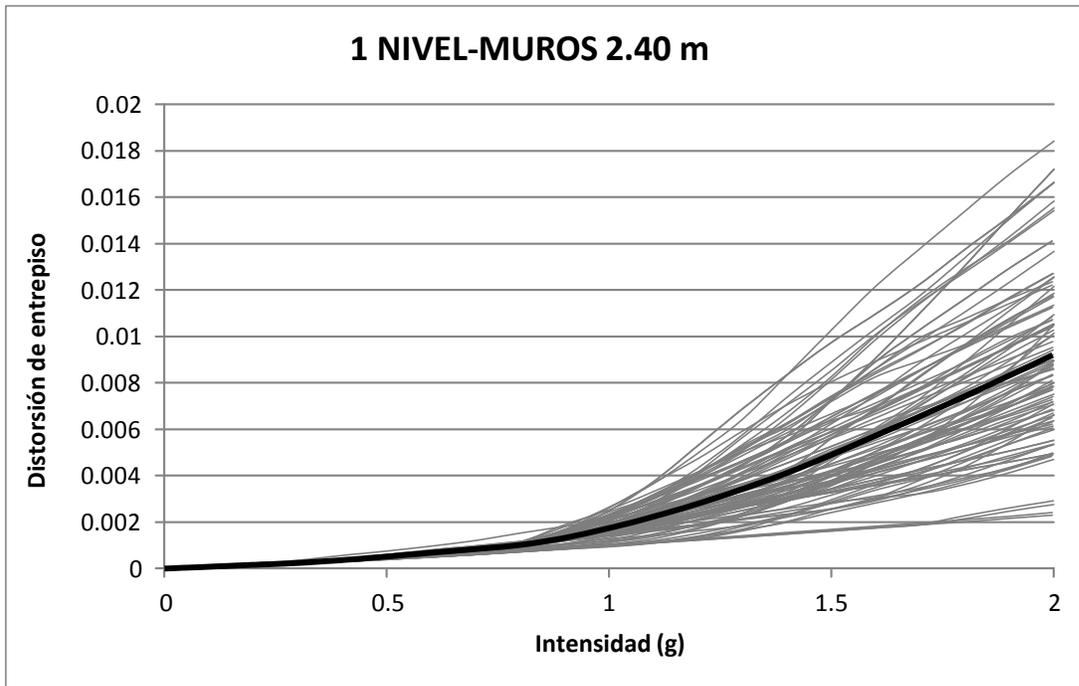


Gráfica 4.11

Intensidad Vs Cortante. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel con muros a 2.00 m (Gráfica 4.10) y muros a 2.40 m (Gráfica 4.11).



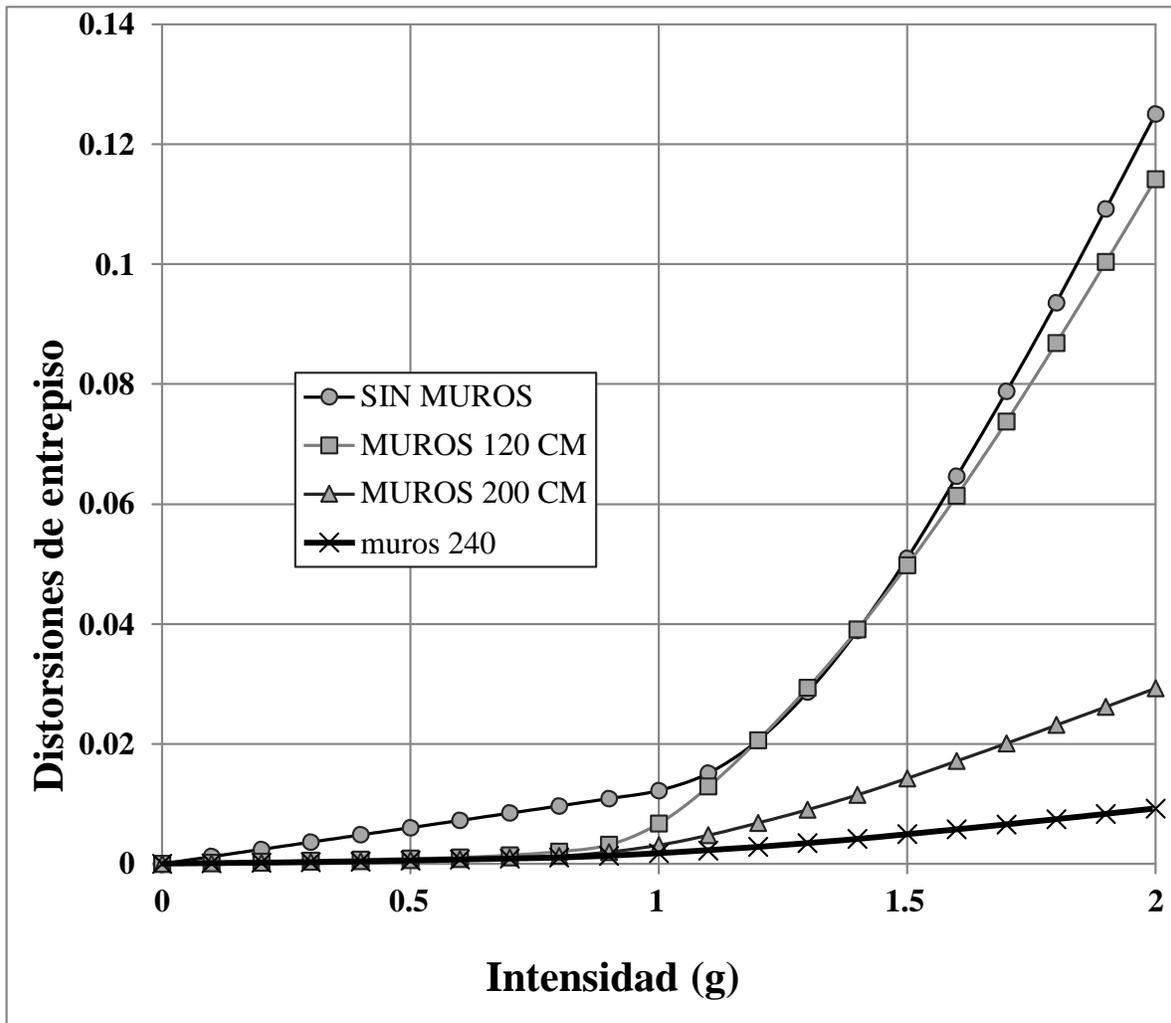
Gráfica 4.12



Gráfica 4.13

Intensidad Vs Cortante. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel con muros a 2.00 m (Gráfica 4.12) y muros a 2.40 m (Gráfica 4.13).

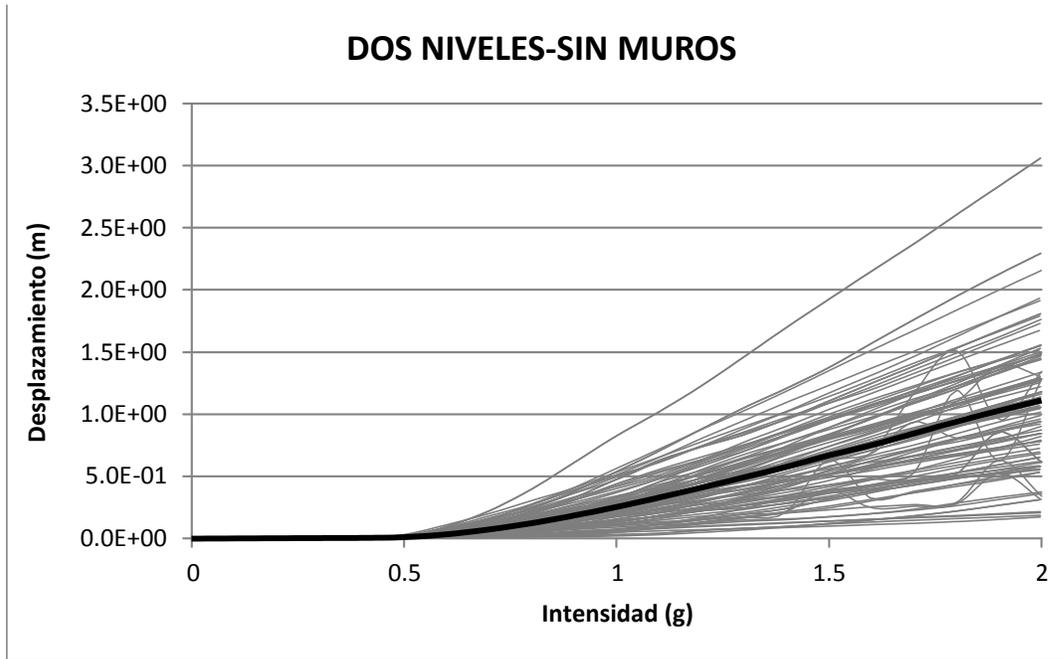
El gráfico mostrado a continuación ilustra la respuesta estructural de las cuatro condiciones de estudio para la edificación de un nivel (Intensidad Vs Distorsión de entrepiso).



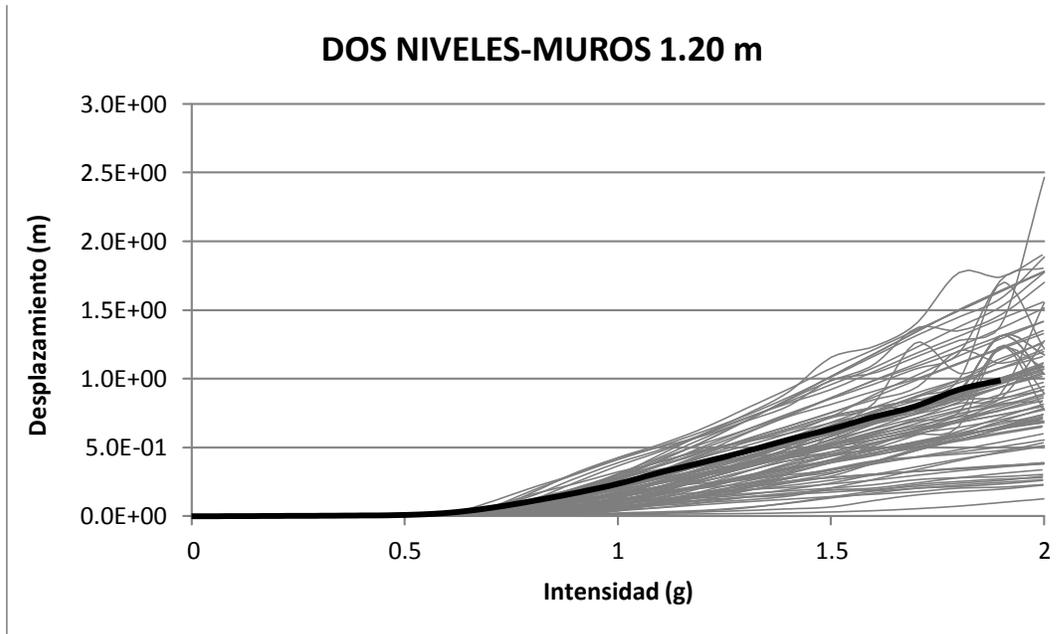
Gráfica 4.14. Muestra los valores máximos de distorsión de entrepiso correspondientes a cada nivel de intensidad para cada condición de estudio de la estructura de un nivel.

## Respuesta estructural/ edificación de dos niveles

### -Intensidad vs desplazamiento

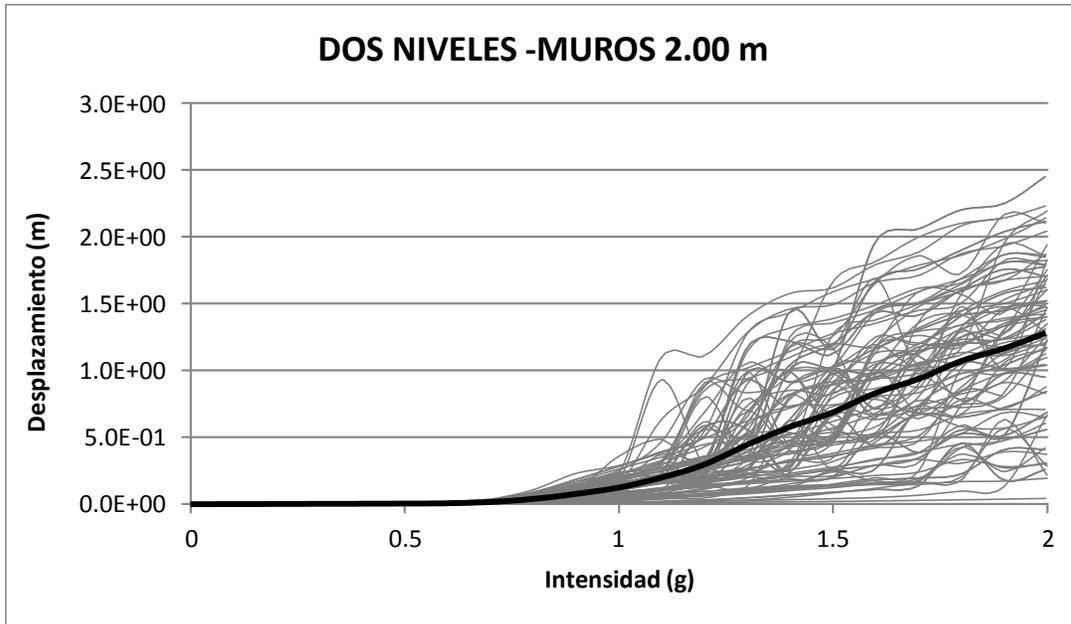


Gráfica 4.15

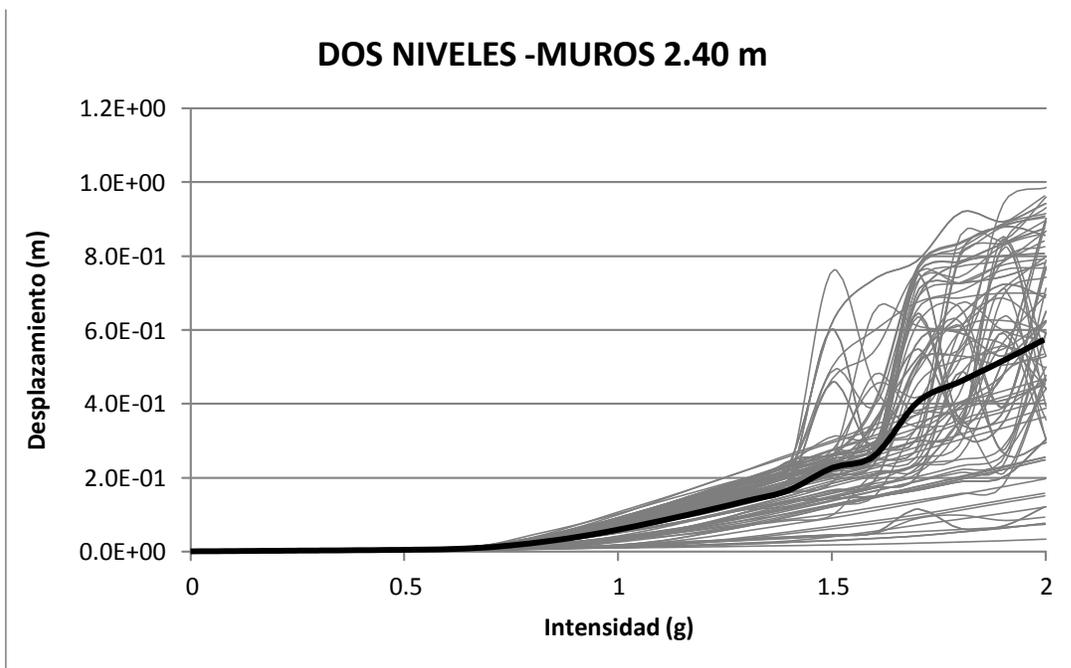


Gráfica 4.16

Intensidad Vs Desplazamiento. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel sin muros (Gráfica 4.15) y muros a 1.20 m (Gráfica 4.16).



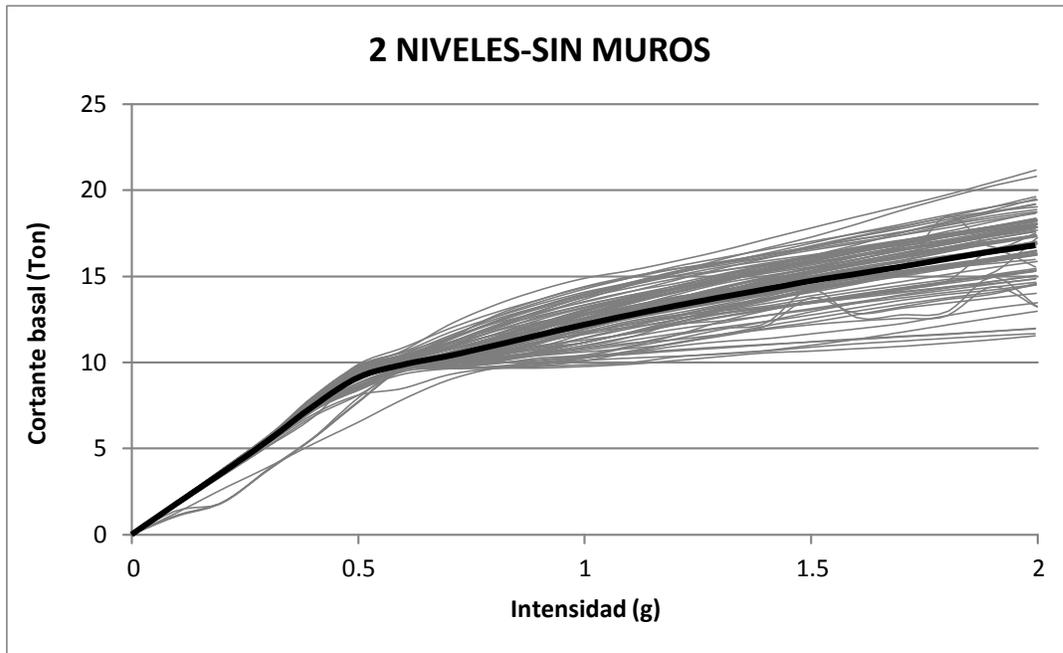
Gráfica 4.17



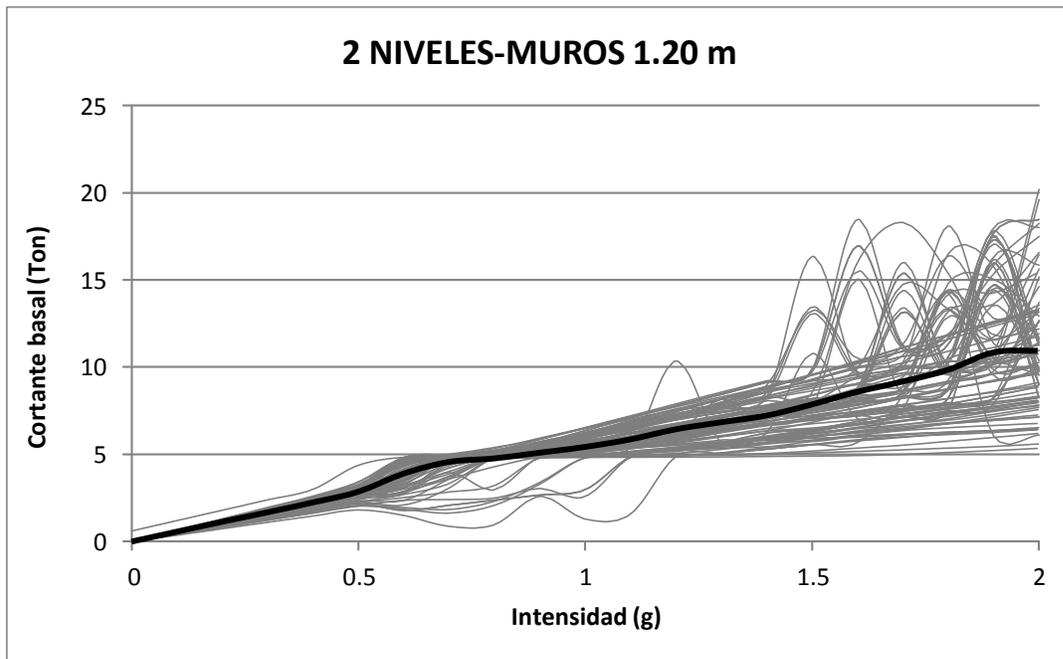
Gráfica 4.18

Intensidad Vs Desplazamiento. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel con muros a 2.00 m (Gráfica 4.17) y muros a 2.40 m (Gráfica 4.18).

### -Intensidad vs cortante

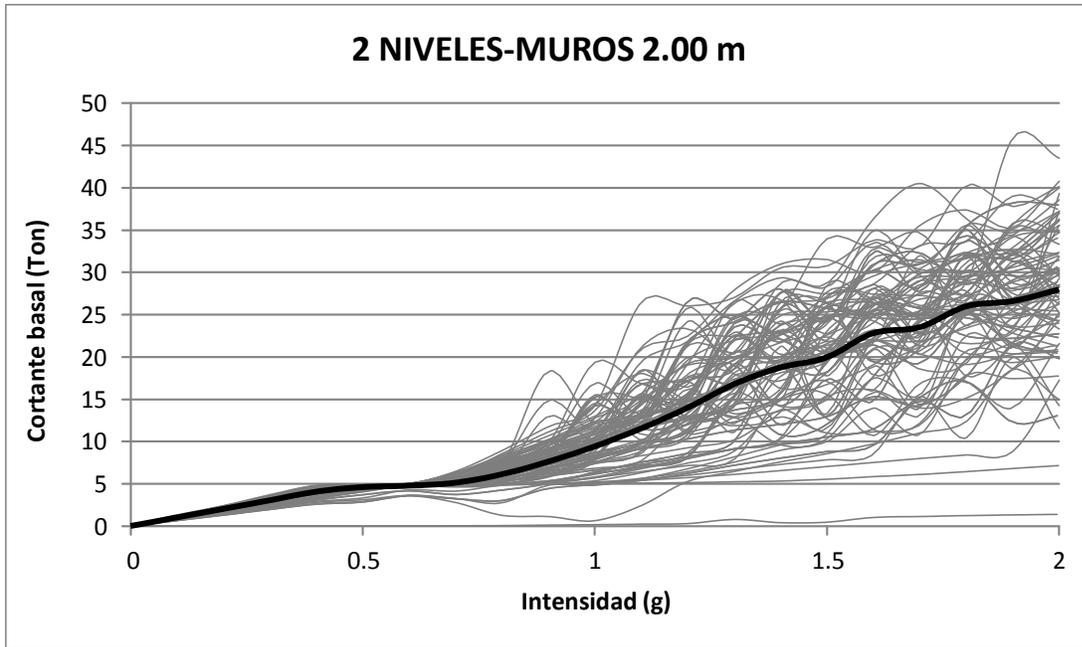


Gráfica 4.19

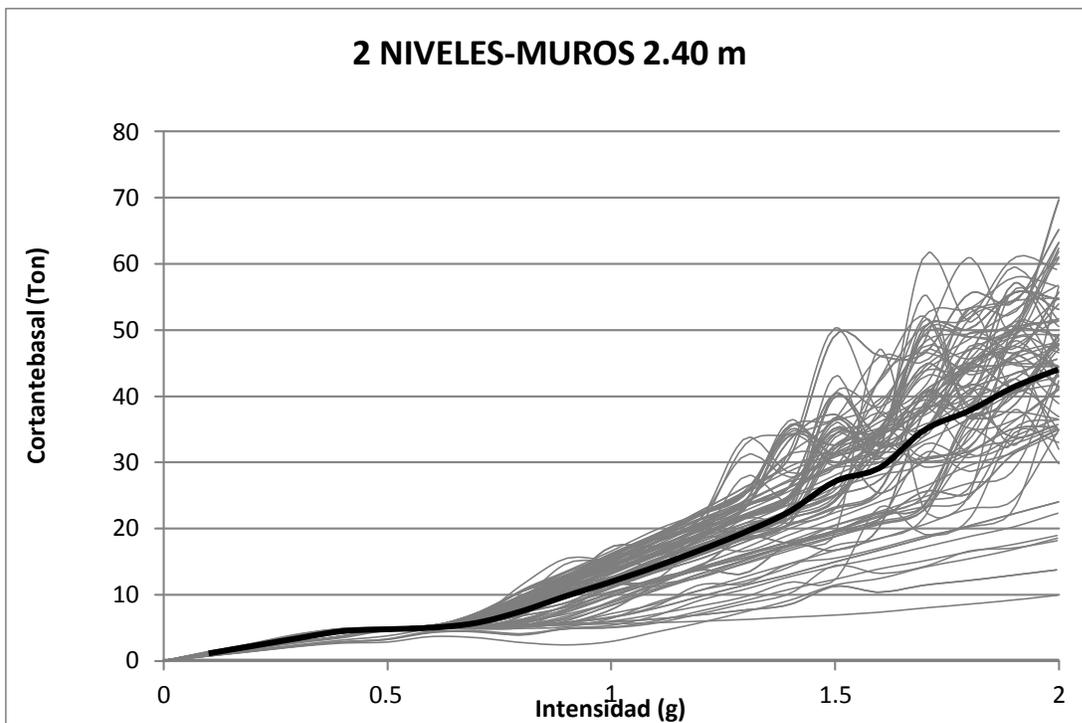


Gráfica 4.20

Intensidad Vs Cortante. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel sin muros (Gráfica 4.19) y muros a 1.20 (Gráfica 4.20).



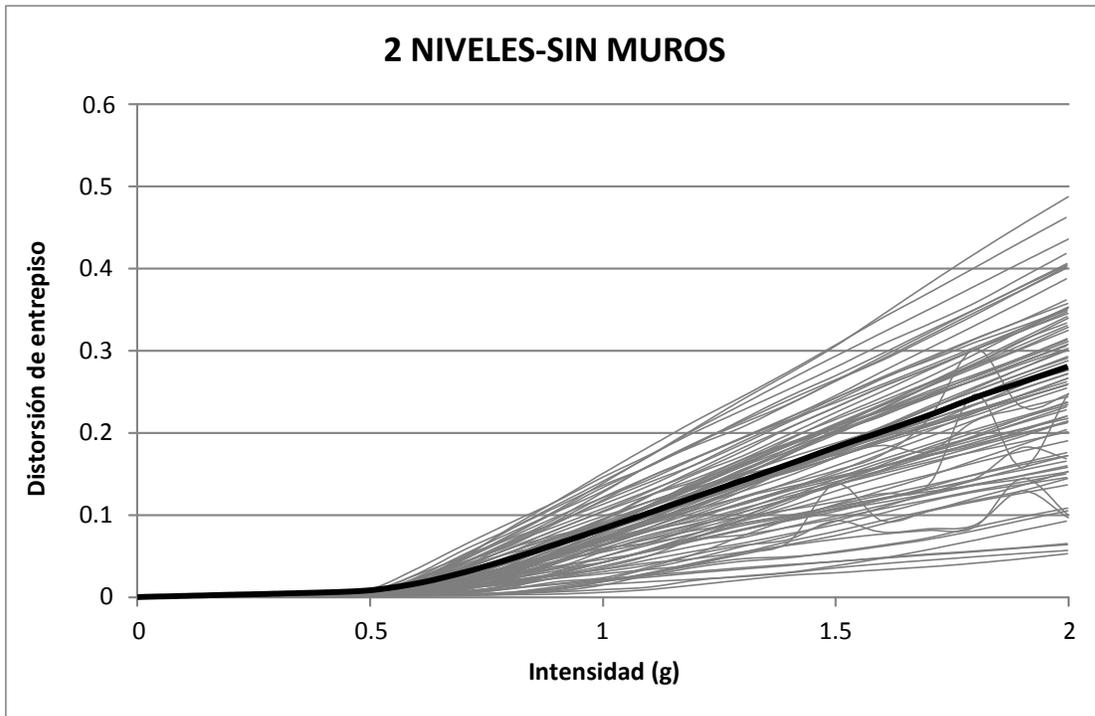
Gráfica 4.21



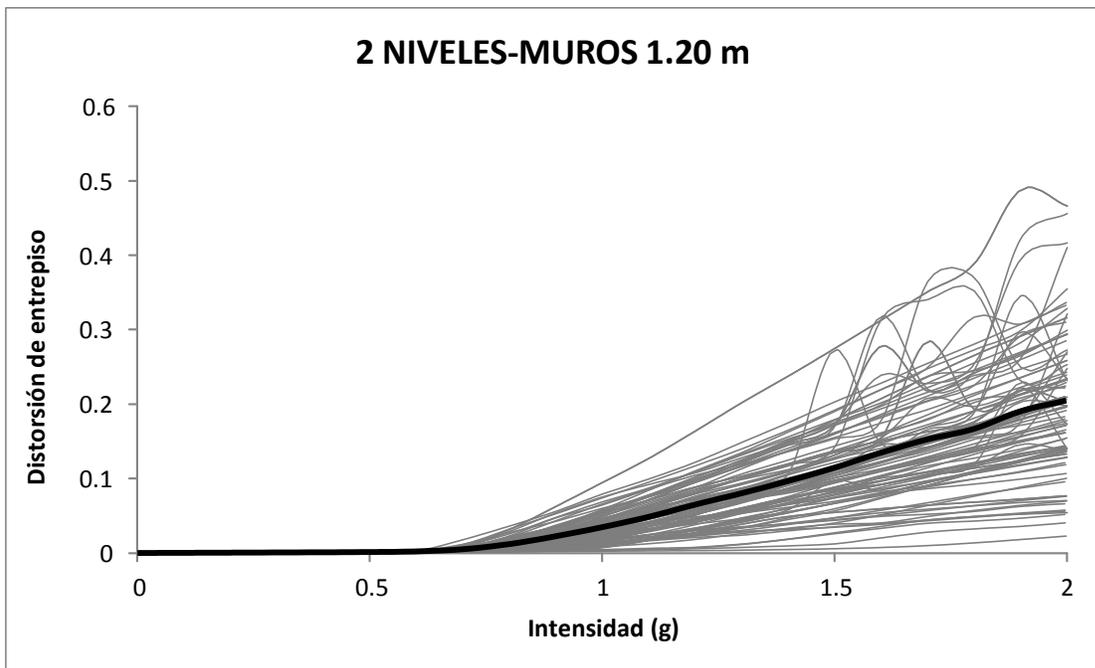
Gráfica 4.22

Intensidad Vs Cortante. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel con muros a 2.00 m (Gráfica 4.21) y muros a 2.40 m (Gráfica 4.22).

### -Intensidad vs distorsión de entrepiso

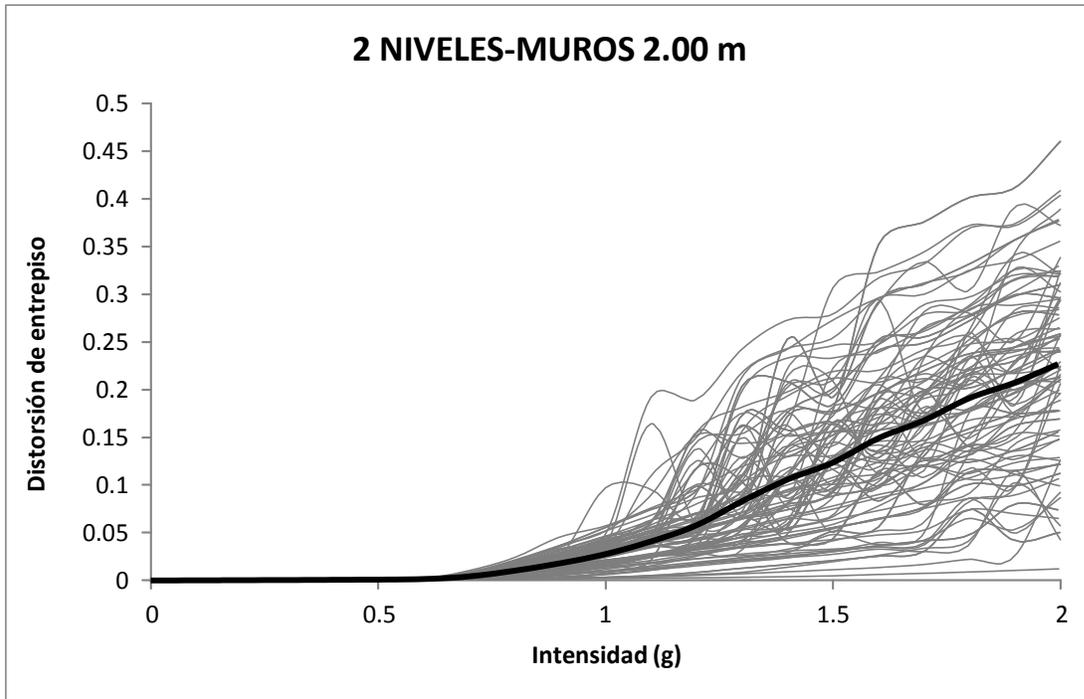


Gráfica 4.23

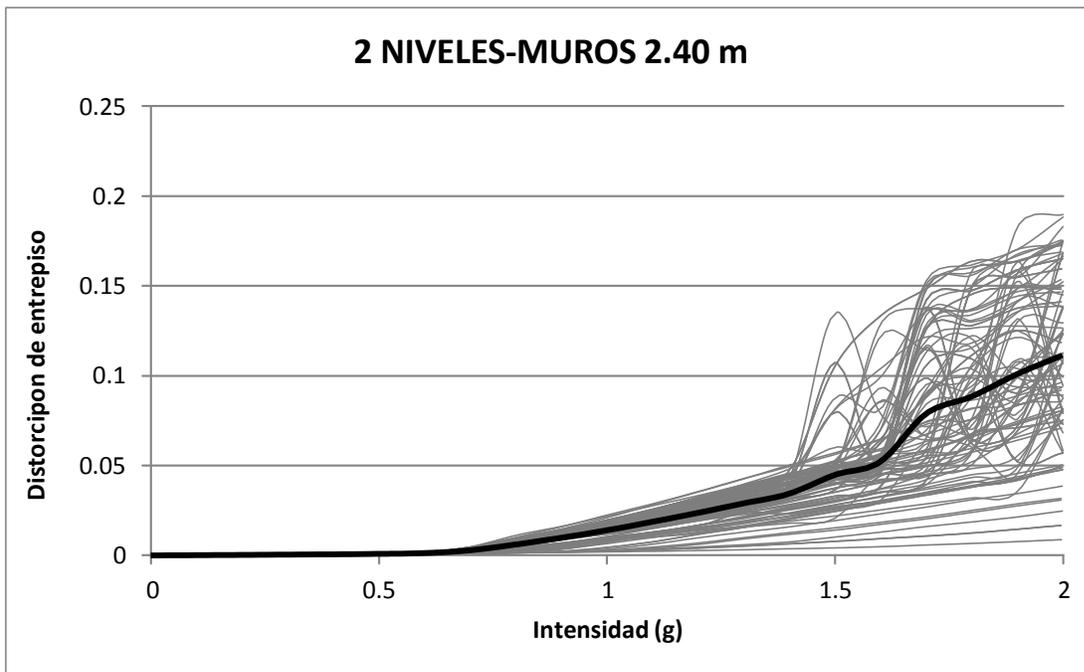


Gráfica 4.24

Intensidad Vs Distorsión de entrepiso. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel sin muros (Gráfica 4.23) y muros a 1.20 m (Gráfica 4.24).



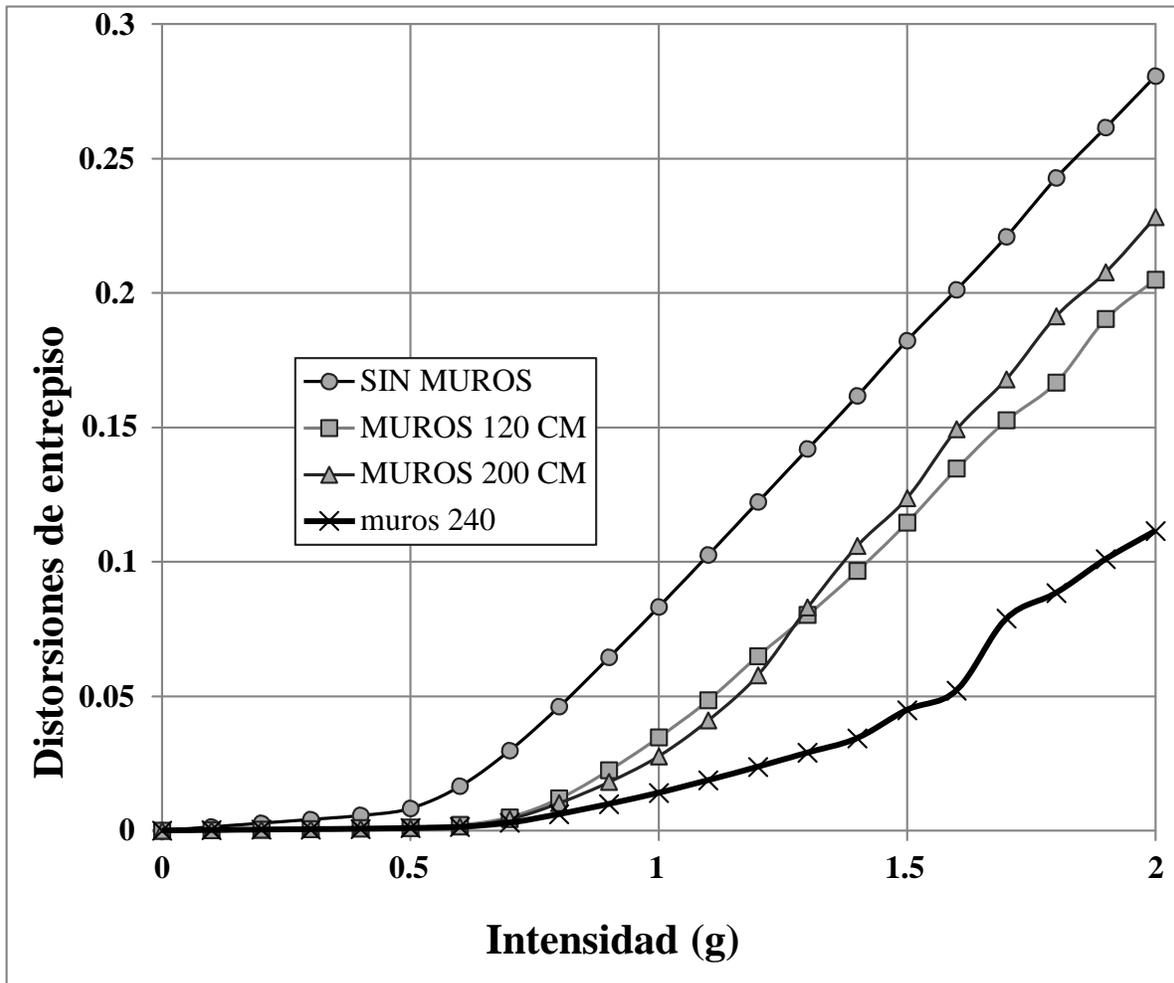
Gráfica 4.25



Gráfica 4.26

Intensidad Vs Distorsión de entrepiso. Respuesta estructural correspondiente a la edificación de un nivel con muros a 2.00 m (Gráfica 4.25) y muros a 2.40 m (Gráfica 4.26).

En la siguiente gráfica se hace una comparativa de la respuesta estructural de los tres casos de estudio para la estructura de dos niveles.



Gráfica 4.27. Muestra los valores máximos de distorsión de entrepiso correspondientes a cada nivel de intensidad para cada condición de estudio de la estructura de dos niveles.

## 4.4-RESPUESTA ESTRUCTURAL VS DAÑO

Con la respuesta estructural media procesada obtenemos algunos otros parámetros importantes asociados al comportamiento estructural como la rigidez elástica y la inelástica, así como una relación entre estas dos. Estos datos son necesarios para representar la estructura como un oscilador de un grado de libertad el cual será sometido a una serie de acelerogramas y se obtendrá de igual manera su respuesta en términos de distorsión de entrepiso, la cual será convertida a daño al emplear el índice de daño de Terán y Jirsa (2005) el cual ocupa como valor representativo el desplazamiento máximo y las demandas acumuladas de deformación posfluencia (energía histerética).

Recordando la ecuación 1.03 que define el índice de daño propuesto por Terán y Jirsa (2005):

$$ID_{TJ} = \frac{NE_{H\mu}(2-b)}{\mu_{uc} - 1}$$

$NE_{H\mu}$  cuantifica la gravedad del movimiento que experimenta el suelo;  $b$  y  $\mu_{uc}$  definen a las capacidades últimas de deformaciones acumuladas de la estructura

Las series de puntos (Distorsión Vs ID) son sometidas a un ajuste empleando la función Log Normal CDF mediante el programa *CURVE XPERT PROFESSIONAL*. Una vez finalizado el ajuste y obtenidos los valores característicos de la función (para cada condición de estudio) se aplican a la respuesta estructural obtenida de los IDA (Intensidad Vs Distorsión).

Las series de puntos (Distorsión Vs ID) es sometida a un ajuste empleando la función Log Normal CDF mediante el programa *CURVE XPERT PROFESSIONAL*. Una vez finalizado el ajuste y obtenidos los valores característicos de la función (para cada condición de estudio) se aplican a la respuesta estructural obtenida de los IDA (Intensidad Vs Distorsión).

Finalmente se obtienen los valores del ID en función de la distorsión máxima asociada a cada nivel de intensidad (escalado) de todos los acelerogramas que conforman el set de registros sísmicos y se representan en un gráfico que asocia los niveles de intensidad contra el ID, este gráfico es denominado **curva de daño**.

Es importante mencionar que los resultados de este estudio representan la respuesta media estructural ante el set de registros sísmicos que pueden considerarse como la amenaza sísmica más representativa y probable a la que pueden estar sometidas las edificaciones tanto por el escalado al que son sometidos como por la variabilidad de dichos registros (duración, magnitud, rangos máximos de aceleración, localización del epicentro y ocurrencia en el tiempo).

El índice de Terán y Jirsa (2005) presenta algunos inconvenientes en sus extremos ya que puede arrojar valores superiores a uno o menores a cero lo cual no tiene sentido alguno por lo que en el procesamiento de resultados se han restringido dichos valores.

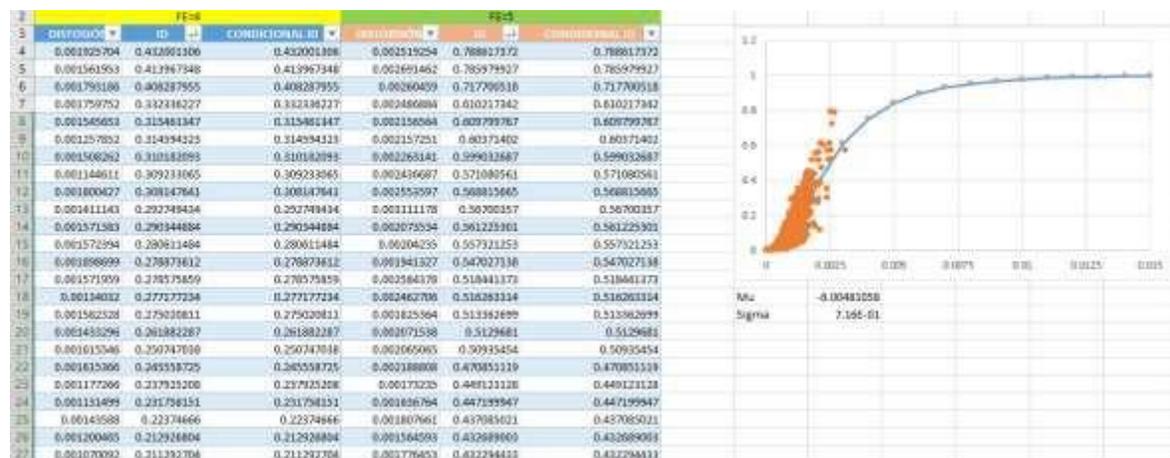
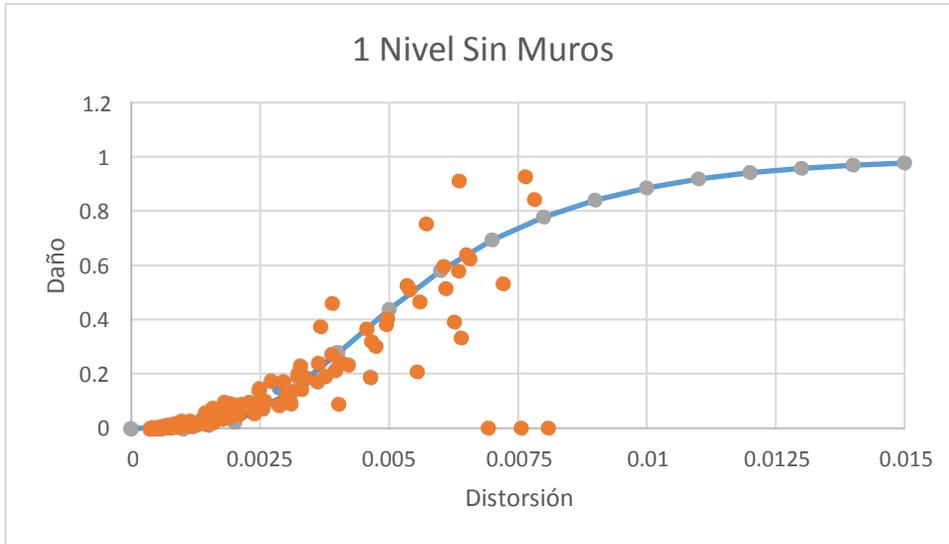
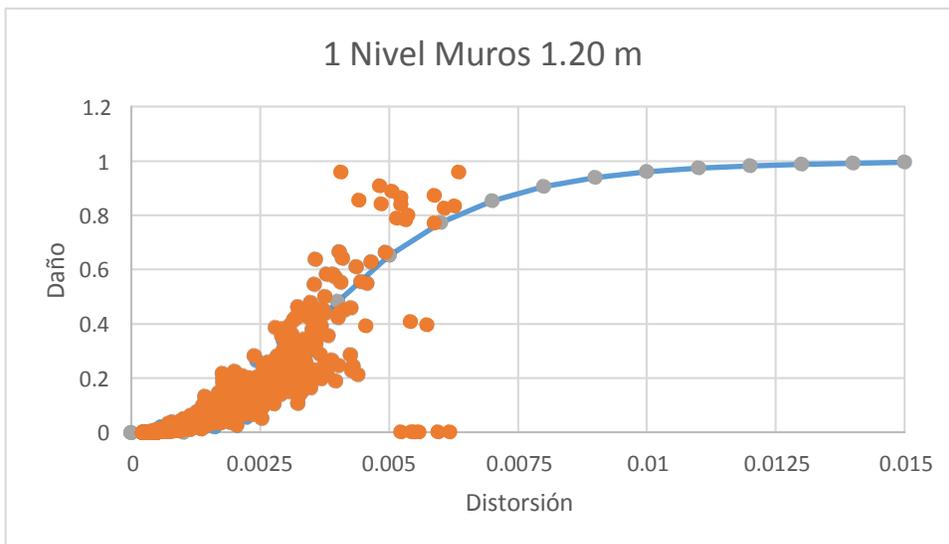


Imagen 4.08. Muestra parte del procesamiento de datos para obtener la curva de ajuste que relaciona la distorsión de entrepiso con el índice de daño de Terán Y Jirsa (2005).

En las siguientes gráficas se muestra el nivel de daño asociado a cada nivel de intensidad para las dos estructuras evaluadas en este trabajo, en sus diferentes condiciones de estudio. Los puntos dispersos representan la conversión de la distorsión de entrepiso a daño tras aplicarse el índice de daño de Terán y Jirsa (2005) y la línea continua representa la función de ajuste Log Normal CDF.

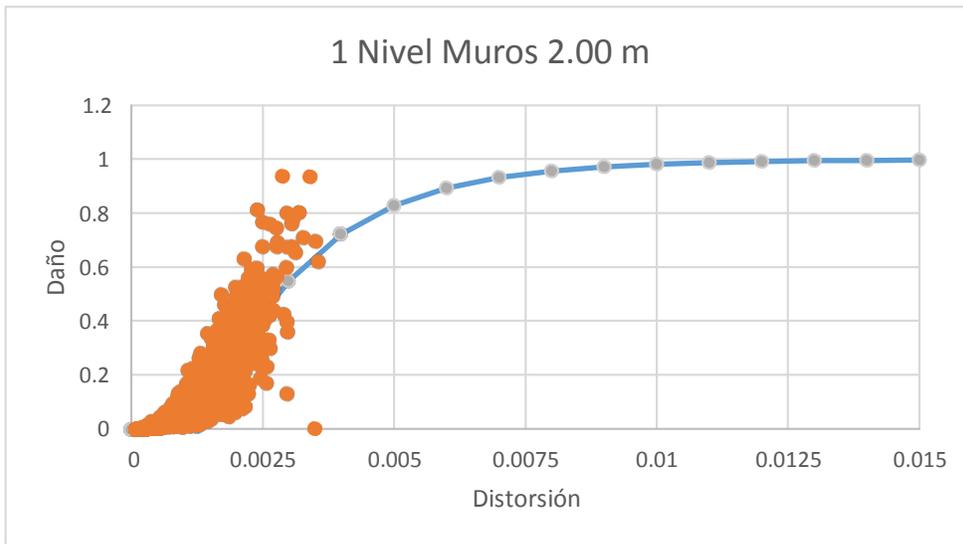


Gráfica 4.28

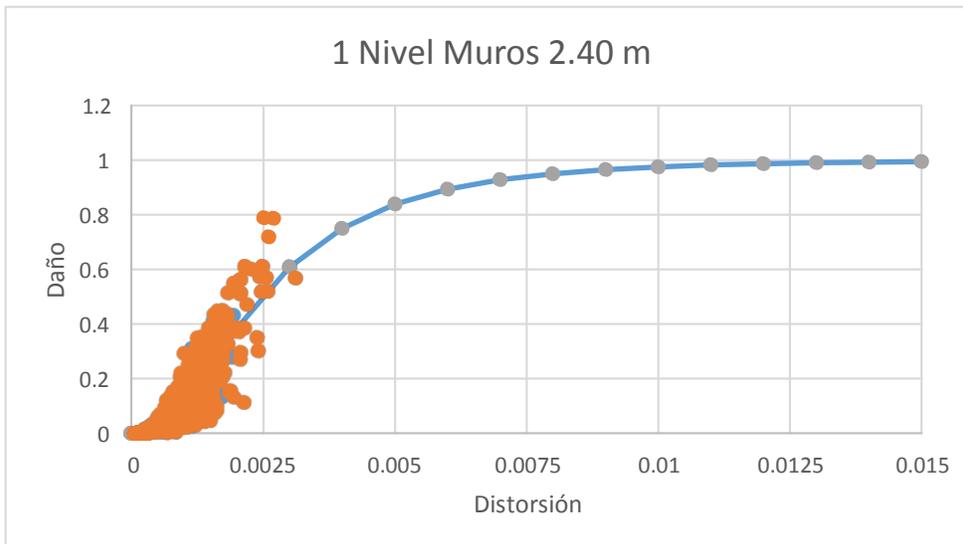


Gráfica 4.29

Curvas de daño (Intensidad Vs ID) correspondientes a la estructura de un nivel sin muros (Gráfica 4.28) y muros de 1.20 m (Gráfica 4.29).

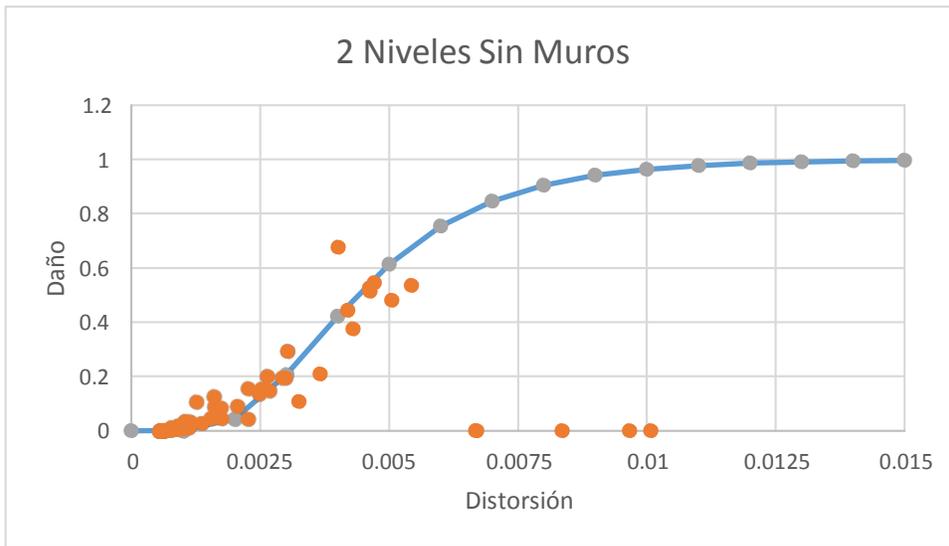


Gráfica 4.30

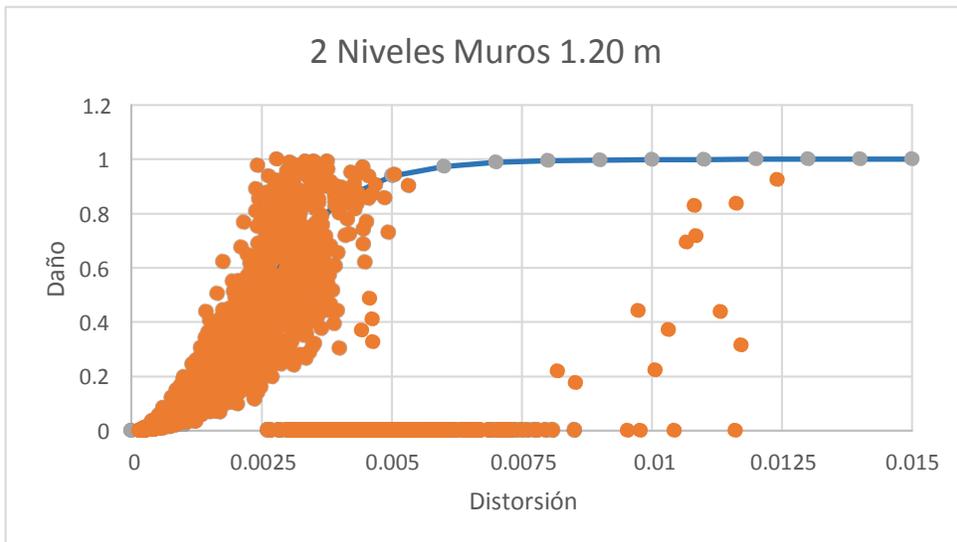


Gráfica 4.31

Curvas de daño (Intensidad Vs ID) correspondientes a la estructura de un nivel con muros de 2.00 m (Gráfica 4.30) y 2.40 m (Gráfica 4.31).

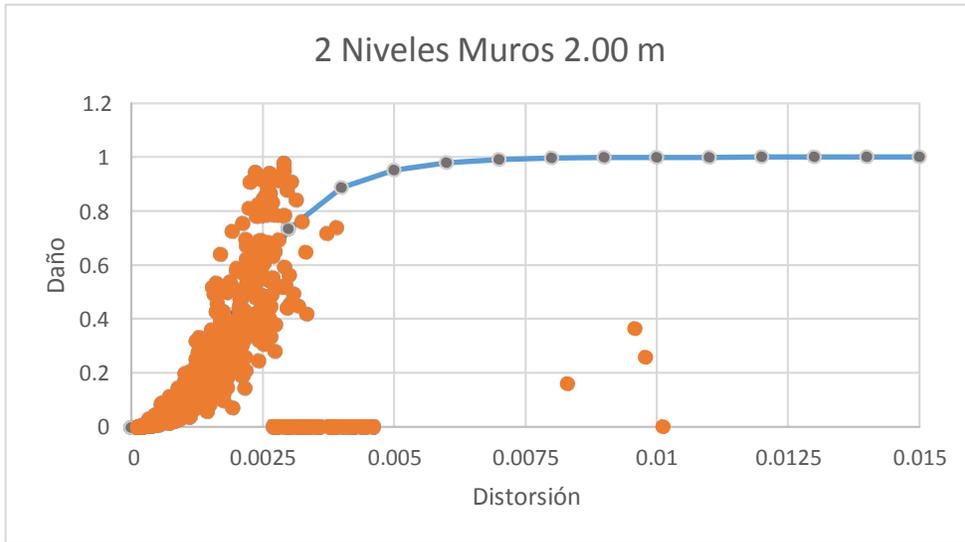


Gráfica 4.32

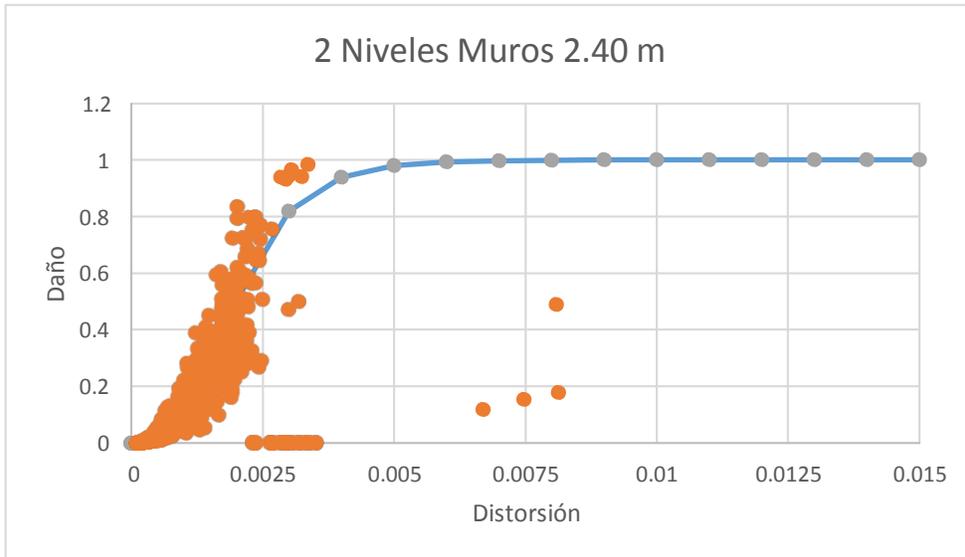


Gráfica 4.33

Curvas de daño (Intensidad Vs ID) correspondientes a la estructura de dos niveles (Gráfica 4.32) y muros de 1.20 m (Gráfica 4.33).



Gráfica 4.34



Gráfica 4.35

Curvas de daño (Intensidad Vs ID) correspondientes a la estructura de dos niveles con muros de 2.00 m (Gráfica 4.34) y 2.40 m (Gráfica 4.35).

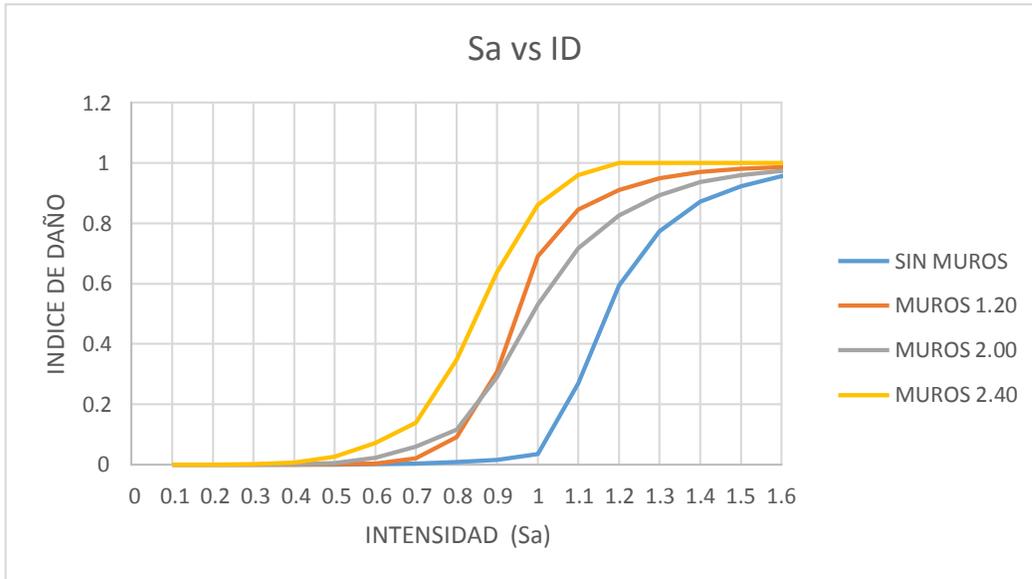
## 4.5-CURVAS DE VULNERABILIDAD

La siguiente imagen muestra parte del proceso para la obtención de las curvas de vulnerabilidad empleando el índice de Terán y Jirsa (2005) sobre las curvas de Intensidad Vs Distorsión obtenidas por el método IDA.

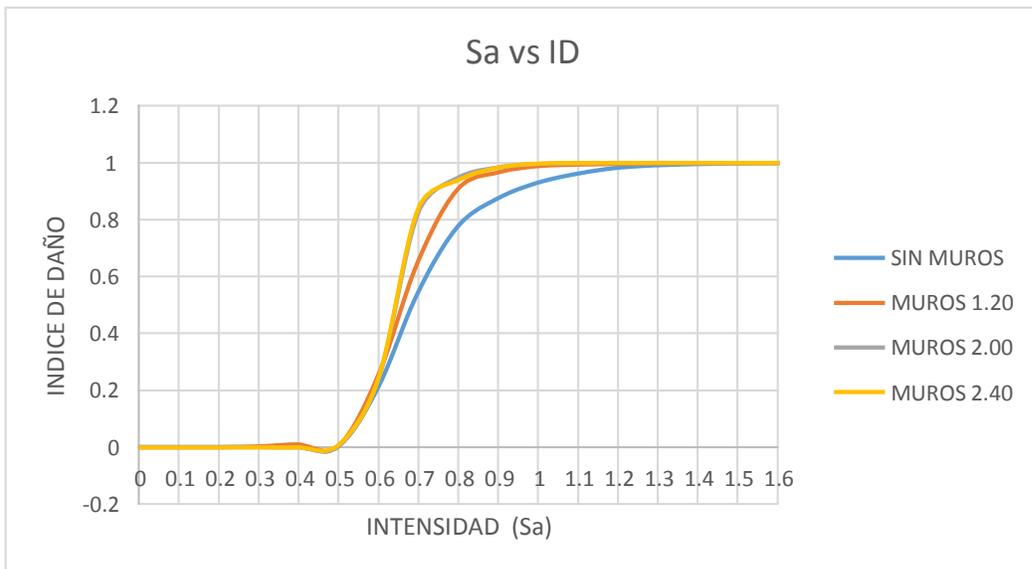
En este trabajo se asume que el daño es igual a la pérdida y por lo tanto las curvas de daño son una representación de las curvas de vulnerabilidad.



Imagen 4.09. Muestra la conversión de la respuesta estructural (representada por el parámetro distorsión de entrepiso) a daño, mediante la aplicación de las funciones de ajuste obtenidas previamente.



Gráfica 4.35. Curva de vulnerabilidad (Intensidad Vs Daño) correspondiente a la estructura de un nivel.



Gráfica 4.36. Curva de vulnerabilidad (Intensidad Vs Daño) correspondiente a la estructura de dos niveles.

# **5.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

El efecto de columna corta tiene una contribución muy importante en la cantidad de daño que una estructura puede llegar a sufrir tras la ocurrencia de algún sismo. Después de la serie de análisis realizados se puede observar que tal y como se planteó desde el principio, los cambios en la rigidez (no previstos) exponen en gran medida a las estructuras a sufrir daños considerables. Es decir, el efecto de los muros sobre el nivel de daño que puede experimentar una estructura es inminente.

Con base en las curvas de vulnerabilidad obtenidas, se observa que para ambas estructuras el efecto de los muros sobre el nivel de daño es mayor a medida que los cambios en la rigidez son mayores (en cierto rango de intensidades), esto está directamente relacionado con la altura de los muros, los cuales “generan” elementos columna con propiedades mecánicas diferentes a las consideradas en el diseño original.

Analizando los resultados de las curvas de vulnerabilidad obtenidas para la estructura de un nivel podemos observar que para la condición “sin muros” se presenta el menor nivel de daño, y en el rango que va de cero hasta los niveles de intensidad en los que la estructura fluye (0.7g, 0.8g, 0.9g) se tiene que a mayor altura de los muros se obtiene un mayor daño. Esto quiere decir que mientras la estructura permanezca dentro de su rango elástico, el efecto de los muros sobre el daño es directamente proporcional a la altura de estos. Una vez sobrepasado, la curva de daño correspondiente a la condición con muros de 1.20 m muestra un comportamiento irregular, superando el nivel de daño de la curva que representa la condición con muros de 2.00 m pero ambas siempre siendo superiores a la curva que corresponde a la condición sin muros.

Para una misma intensidad cercana al primer punto de fluencia de alguna de las curvas (0.6 g) se tiene un daño de 0, 0.02, 0.05 y 0.13 para muros de 0.0 m, 1.2 m, 2.0 m y 2.4 m respectivamente. Para zonas de las curvas correspondientes a una intensidad mayor y cercana a la intensidad donde se alcanza el daño total (1.4 g -1.6g) se tienen valores de daño de 0.87, 0.98, 0.93 y 1.0 para muros de 0.0 m, 1.2 m, 2.0 m y 2.4 m respectivamente, el incremento en cuanto al mayor nivel de daño está entre un 13-14% para ambas zonas analizadas. Pero no se debe dejar de largo la zona intermedia (0.7 g-1.2 g) en la cual los niveles de daño que sufre la estructura para cada condición de estudio con muros son mayores a los porcentajes mencionados anteriormente, para algunos niveles de intensidad supera el 50% de daño con respecto a la condición sin muro.

Analizando las curvas de vulnerabilidad correspondientes a la estructura de dos niveles se puede observar a manera general, el mismo comportamiento que presenta la estructura de un nivel, esto es que la altura de los muros tiene un efecto directo sobre el incremento del daño que recibe la estructura.

Esta estructura tiene la particularidad de ser sumamente rígida, no presenta daño hasta que prácticamente alcanza el punto de fluencia que para todas las condiciones de estudio ocurre a una intensidad de 0.5 g. a partir de este punto, las curvas de daño se desempeñan del

modo esperado, siempre presentando mayor daño las curvas correspondientes a muros de mayor altura, pero siendo las curvas de 2.00m y 2.4m casi una copia de la otra.

Analizando los niveles de daño correspondientes a intensidades mayores a 0.5 g, exactamente 0.7 g, se tienen valores de 0.54, 0.65, 0.84 y 0,85 para alturas de muro nulas, 1.2 m, 2.0 m y 2.4 m respectivamente

Para una intensidad de 0.8 g los niveles de daño son de 0.77, 0.93, 0.94 y 0.945. el nivel de daño en promedio para este punto es un 20% mayor que en la estructura sin muros.

A medida que aumenta la intensidad el comportamiento de los marcos con muros va siendo muy similar, pero presentando mayor daño que el marco sin muros.

Saber cuántos edificios están diseñados considerando el efecto de los muros sobre la estructura es algo sumamente difícil así también, cuántos edificios sufrieron modificaciones en su arquitectura posteriores a su construcción.

La mayoría de las edificaciones elaboradas bajo la “autoconstrucción” carecen de todo tipo de consideraciones mínimas para su buen desempeño estructural y como consecuencia están mucho más expuestas a sufrir un gran daño que las que están diseñadas bajo los reglamentos de construcción. Basta ver que las estructuras construidas acorde a la reglamentación presentan un daño considerable ante el efecto de columna corta. Las autoridades deben de aplicar una política rigurosa e inquebrantable en contra de las malas prácticas en la construcción (ya sea en la auto construcción como en la práctica profesional) pero la clave radica en las decisiones tomadas por cada elemento participe del entorno, desde los futuros ocupantes, en contratar personal capacitado y certificado para el diseño y construcción de sus proyectos así como en las autoridades competentes en la autorización, emisión de permisos constructivos, en la supervisión efectiva y continua de todas las obras en proceso.

Si bien el efecto de columna corta estará presente en cualquier estructura en la que no se considere la interacción muro-columna, las construidas con reglamentos que no consideren la demanda plástica sufrirán daños mucho mayores a las construidas con reglamentos que si toman en cuenta este hecho.

Una buena recomendación sería suponer en el diseño que las columnas siempre van estar actuando con muros a diferentes alturas y de esta forma las estructuras siempre estarían protegidas ante cualquier futuro cambio en la configuración de la construcción, sobre todo en el diseño por cortante, inicialmente vendría a nuestra mente que hacer esa consideración repercutiría enormemente en los costos pero análisis de costos indican que el incrementar el refuerzo transversal de los elementos de concreto para alcanzar un 200% de resistencia con respecto a la demanda de diseño implica un incremento del 5% en el costo total de la obra. Si comparamos el incremento en costos por brindar el doble de capacidad resistente al cortante de la estructura con el costo de los daños por efecto de columna corta se vería reflejado inmediatamente el beneficio económico de adicionar más resistencia al cortante ya que la perdida estimada en este trabajo solo toma en cuenta el daño sufrido a la

construcción y no contempla las pérdidas de contenidos y los costos que surgirían por daños a los ocupantes.

Una estructura tipo de concreto reforzado tiene un costo promedio de \$5000.00/m<sup>2</sup> (para una vivienda de nivel medio) y los daños esperados para intensidades menores a 1.0 g presentan un daño máximo de 50% en la estructura, lo que representaría un costo de \$2500.00/m<sup>2</sup> que es mucho mayor al 5% que generaría el incremento en la resistencia de cortante, entonces he aquí la gran y difícil decisión de implementar o no ese refuerzo contra cortante que además de evitar grandes daños, proveerá las condiciones para que el concreto tenga un mejor comportamiento (debido al confinamiento) y alargar la vida útil de la estructura evitará daños que pueden ser mortales para sus ocupantes cuyo valor desde mi particular punto de vista es incosteable y su integridad debe protegerse a toda costa.

Si bien, estos resultados son para edificaciones con ciertas características estructurales; masa, rigidez, resistencia y el más importante el periodo natural de vibración, tienen un rasgo en común con muchas de las edificaciones que estarán en uso un buen tiempo, están diseñadas bajo las disposiciones de un reglamento de construcción que exige el mismo desempeño ante las diversas acciones de diseño de sus elementos estructurales y que ciertamente hace poco dejó de estar en uso, pero es el reglamento bajo el cual se han construido un gran número de edificaciones en los últimos 13 años, dichas viviendas estarán en uso por al menos otros 40 años más.

Las acciones a tomar para las construcciones existentes consisten primeramente evaluarlas mediante la recopilación de toda la información de diseño (sí existiera) y de este modo determinar si es necesario un reacondicionamiento en la junta muro-columna.

Debido a las malas prácticas constructivas difícilmente se encontrarán edificaciones de uso habitacional que cuenten con toda la información necesaria para determinar la condición de interacción muro-columna y muchas de ellas estarán construidas por debajo de los requerimientos mínimos que exige la reglamentación por lo cual sería interesante realizar un muestreo de estas edificaciones empleando el equipo adecuado para determinar los armados de sus elementos estructurales (principalmente la distribución del refuerzo transversal). Sí las edificaciones no cumplen con los requerimientos mínimos, una acción prudente a realizar es el reacondicionamiento de manera obligatoria para disminuir el daño que estas pudieran sufrir ante eventos sísmicos. Es evidente que el daño que sufrirían las estructuras construidas fuera de la reglamentación sería mucho mayor a las evaluadas en este trabajo y por lo tanto implementar las recomendaciones mencionadas es altamente considerable.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- Bard, Pierre-Yves, “SESAME: Site EffectS assessment using ambient excitations”. European Commission, (2004).
- Bazurro P. y Cornell C. (1999), “Disaggregation of seismic hazard”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 89, No.2, pp. 501-520.
- Bertero V., Kajima K. (1991), Design guidelines for ductility and drift limits: review of state-of-the-practice and state-of-the-art in ductility and drift-based earthquake-resistant design of buildings, Reporte Técnico no. UCB/EERC-91/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Borcherdt, R. D. (1994) “Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)”, *Earthquake Spectra*, **10**.
- Chapman M. (1995), “A probabilistic approach to ground-motion selection for engineering design”, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 3, pp. 937-942.
- Chopra A K (1995), Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1995.
- Clough R W y Penzien J (1975), Dynamics of Structures, McGraw-Hill, 1975.
- Cornell C. (1968), Engineering seismic risk analysis, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606.
- DDF, Departamento del Distrito Federal (1976) Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Departamento Distrito Federal.
- DDF, Departamento del Distrito Federal (1977), Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.
- Dobry R y Gazetas G (1988), Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups, *Geotechnique*, Vol. 38, 1988.
- Esteva, L. (1970), “Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería”, *Series del Instituto de Ingeniería*, No. 246.
- Flores V.y S. Sánchez-Tizapan (2013),”Propiedades mecánicas de la mampostería de tabique rojo recocido utilizada en Chilpancingo, Gro (México)” Informes de la construcción, Vol. 65, 531, pp.387-395
- Guevara T. (2005), “The captive and short column effects”, *Earthquake Spectra*, Volume 21, No. 1, pages 141–160, Earthquake Engineering Research Institute.
- Naciones Unidas y CEPAL (1999) “El terremoto de 1999 en Colombia: Impacto socioeconómico del desastre de la zona del eje cafetero”

Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural Sísmica por Efecto de Columna Corta.  
Josué Sánchez Tacuba

Pineda J.C. (1994) “Ensayos experimentales sobre el control de columnas cortas”  
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Vamvatsikos y Cornell C.A. (2002) “Incremental Dynamic analysis” Earthquake  
Engineering and Structural Dynamics Vol 31, No 3, pp 491-514.

Bojorquez y Terán (2009) “Consideración explícita del daño acumulado en el diseño  
sísmico de estructuras a través de factores de reducción de Resistencia por ductilidad” pp  
31-40.

Williams & Sexsmith (1995) “Seismic damage indices for concrete structures: a state –of –  
the art-review”.

Teran & Jirsa (2005) “ A damage model for practical seismic desing that accounts for low  
cycle fatigue”.

<http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico->

