



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

FACULTAD DE INGENIERÍA
CAMPUS I

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

***"DESARROLLO DE UN SISTEMA ÓPTIMO DE DIAFRAGMA
HORIZONTAL SUPERIOR SEMIRRÍGIDO, LIGERO, DE ACERO
PREFABRICABLE, PARA EL INCREMENTO DE LA
SISMORRESISTENCIA DE VIVIENDA DE TIPO POPULAR
CONSTRUIDA CON MUROS DE MAMPOSTERÍA SIMPLE Y
CUBIERTA LIGERA"***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON FORMACIÓN EN
CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA

JUAN AMADO RUEDA IBARRA

DIRECTOR DE TESIS

DR. JUAN JOSÉ CRUZ SOLÍS



TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, 02 DE MARZO DE 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA C-1



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
02 de marzo del 2020
Oficio F.I. 01.138/2020

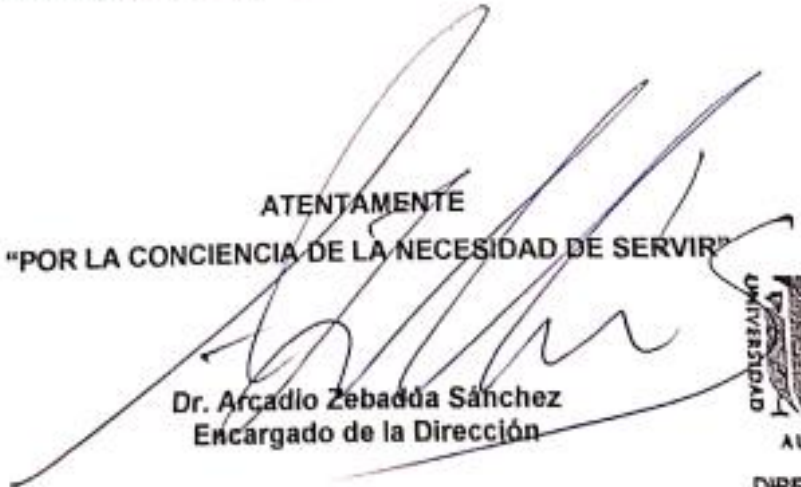
Ing. Juan Amado Rueda Ibarra
Alumno de la Maestría en Ingeniería con
Formación en Construcción
Universidad Autónoma de Chiapas
P R E S E N T E:

Por este medio comunico a usted, que se autoriza la impresión de su trabajo de tesis denominado: **"Desarrollo de un sistema óptimo de diafragma horizontal superior semirrígido, ligero, de acero prefabricable, para el incremento de la sismorresistencia de vivienda de tipo popular construida con muros de mampostería simples y cubierta ligera"** para que pueda continuar con los trámites de titulación para la obtención del grado.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR"


Dr. Arcadio Zebadúa Sánchez
Encargado de la Dirección



**DIRECCIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

C.c.p. Dra. Daisy Escobar Castillejos, Coordinadora de Investigación y Posgrado
C.c.p. M.I. Fredy Humberto Caballero Rodríguez, Coordinador de la Maestría en Ingeniería.
C.c.p. Archivo/Minutario
AZS/DEC/lamj

Tels. (961) 617-60-00 ext. 1562 (961) 615-03-22. www.ingenieria.unach.mx

Boulevard Belisario Domínguez, Km 1081, Sin Número. Terán Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México. C.P. 29050. www.unach.mx

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a 06 de diciembre de 2019

Dr. Arcadio Zebadúa Sánchez

Encargado de la dirección

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Chiapas

En nuestra calidad de sinodales del examen de grado de Maestría en Ingeniería con formación en Construcción del **C. Juan Amado Rueda Ibarra**, nos permitimos manifestarle la aceptación del trabajo de tesis titulado *Desarrollo de un sistema óptimo de diafragma horizontal superior semirrígido, ligero, de acero prefabricable, para el incremento de la sismorresistencia de vivienda de tipo popular construida con muros de mampostería simple y cubierta ligera.*

Quedamos enterados de que formaremos parte del jurado del examen de grado, en la fecha y hora que se nos comunicará posteriormente

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

Atentamente



Dr. Juan José Cruz Solis

Director de tesis



Dr. Alexander López Morales

Asesor de tesis



M.I. Gabriel Sánchez Rodríguez

Asesor de tesis

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a 06 de diciembre de 2019

Dr. Arcadio Zebadúa Sánchez

Encargado de la dirección

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Chiapas

Por este medio me permito informar a usted, que he concluido con la dirección de tesis titulada: *Desarrollo de un sistema óptimo de diafragma horizontal superior semirrígido, ligero, de acero prefabricable, para el incremento de la sismorresistencia de vivienda de tipo popular construida con muros de mampostería simple y cubierta ligera*, que, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con formación en Construcción, ha desarrollado el **C. Juan Amado Rueda Ibarra**, por lo que doy mi voto aprobatorio para que pueda seguir con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

Atentamente

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan José Cruz Solís', is written over a horizontal line.

Dr. Juan José Cruz Solís

Director de tesis

DEDICATORIAS

A mi madre, María de Jesús Ibarra Flores †20/06/2019 QEPD.

Quien es el origen, esencia de mi ser y gran impulsora e inspiradora de mis esfuerzos. Siempre estas presentas en mi día a día y en mi corazón. Se que estás muy satisfecha y orgullosa de los logros alcanzados.

A mi esposa Yovanna, e hijos Juan Gustavo, Yovanna María y Carlos Antonio.

Les dedico de forma muy especial este trabajo por el esfuerzo, comprensión y apoyo que siempre aportaron en su realización. Ustedes son mi trascendencia, la razón de ser de mis propósitos, proyectos y esfuerzos realizados y por realizar.

A mi Tía María Antonia.

Por su amor, apoyo y la bendición de contar con su acompañamiento y representación de todos mis tíos†.

A la familia ampliada Escobedo López:

Les dedico la realización de este trabajo profesional y les agradezco su apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS

Al director de la tesis Dr. Juan José Cruz Solís:

Agradezco su entusiasmo, consejos, asesoría y apoyo en la realización de este trabajo profesional. Gracias por haber hecho posible su culminación.

A los asesores de tesis Dr. Alexander López Morales y M.I. Gabriel Sánchez Rodríguez:

Agradezco su colaboración y apoyo en la realización de este trabajo profesional.

A los profesores de la maestría:

Agradezco su apoyo, asesoría y colaboración durante el proceso académico en las diferentes materias cursadas en la maestría.

A los directivos del Instituto Tecnológico de Tapachula:

Agradezco su colaboración y apoyo en la realización de este trabajo profesional.

A mis compañeros de trabajo, compañeros de maestría y amigos:

Agradezco sus consejos, solidaridad y apoyo.

Resumen

En el estado de Chiapas, al igual que en muchas regiones de México y Latinoamérica, existe un alto riesgo sísmico, debido a su ubicación geográfica y a la existencia en zonas rurales y urbanas de un porcentaje muy elevado de viviendas populares altamente vulnerables al sismo. La alta vulnerabilidad sísmica de dichas viviendas se debe a que están construidas con cubiertas ligeras flexibles de teja, lámina o materiales similares y muros de mampostería simple, sin sistemas de confinamientos o refuerzo.

La forma de mitigar el riesgo sísmico es mediante la disminución de la vulnerabilidad sísmica de este tipo de viviendas. En este sentido, en el presente trabajo se aporta una alternativa para disminuir la vulnerabilidad ante la acción sísmica de este tipo de vivienda popular.

Se desarrolló un sistema de reforzamiento de bajo costo, que sin intentar lograr que este tipo de edificaciones cumplan con las normas de construcción, si logra disminuir su vulnerabilidad sísmica triplicando la sismorresistencia que actualmente poseen.

El sistema de refuerzo desarrollado consiste en un diafragma horizontal semirrígido de acero, de bajo peso, que se puede fabricar en taller y colocar en las zonas superiores de los muros de forma rápida y práctica mediante conexiones atornilladas.

Como sistema de refuerzo, este diafragma horizontal semirrígido proporciona restricción al desplazamiento lateral de los muros, con esto, se reducen a menos del 30% los esfuerzos de

tensión en las caras laterales de los mismos, provocados por la flexión fuera de plano y que constituyen el principal sistema de falla ante las solicitaciones sísmicas.

En el desarrollo del estudio se definió un prototipo de vivienda con las características siguientes: Muros de mampostería de tabiques de barro rojo recocido de 15 cm de espesor, sin confinamientos ni refuerzos; cubierta superior ligera y flexible; dimensiones de las áreas habitables en medidas máximas de 6.00m x 6.00m en planta, y altura máxima de 5 m.

Se estableció la hipótesis que sustenta el incremento de la sismorresistencia con la incorporación del diafragma horizontal superior; se modeló el prototipo con elementos finitos; se analizó el prototipo para verificar la hipótesis planteada; se determinó la forma y tipo de diafragma superior semirrígido óptimo; se diseñó el Sistema Óptimo de Diafragma Horizontal Superior Semirrígido, Ligero, de Acero Prefabricable (SODHSSLAP); y se evaluó analíticamente su desempeño como sistema de reforzamiento en el prototipo de vivienda.

Los resultados obtenidos, indican que el SODHSSLAP, permite al menos triplicar la sismorresistencia del tipo de vivienda objeto del estudio de forma económica y práctica.

A su vez se concluye que el SODHSSLAP es viable y de alto impacto social, por sus características de ser un sistema prefabricable, de bajo costo y rápida instalación, además de aportar ductilidad a la estructura mejorando su comportamiento sísmico.

Abstract

In the state of Chiapas, as in many regions of Mexico and Latin America, there is a high seismic risk, due to its geographical location and the existence in rural and urban areas of a very high percentage of popular housing highly vulnerable to the earthquake. The high seismic vulnerability of these homes is due to the availability of these homes because they are built with flexible lightweight roofs of tile, foil or similar materials and simple masonry walls, without confinement or reinforcement systems.

The way to mitigate seismic risk is by reducing the seismic vulnerability of this type of housing. In this sense, the present work provides an alternative to reduce the vulnerability to the seismic action of this type of popular housing.

A low-cost reinforcement system was developed, without trying to ensure that these buildings comply with building standards, if it succeeds in reducing their seismic vulnerability by tripling the earthquake resistance they currently possess.

The developed reinforcement system consists of a low-weight, semi-rigid steel horizontal diaphragm that can be manufactured in a workshop and placed in the upper areas of the walls quickly and conveniently by means of bolted connections.

As a reinforcement system, this semi-rigid horizontal diaphragm provides restriction to the lateral displacement of the walls, thereby reducing to less than 30% the stress stresses on the side faces of the walls, caused by the lateral bending out of plane and which constitute the main system of failure in the face of seismic requests.

In the development of the study he defined a housing prototype with the following characteristics: Masonry walls of 15 cm thick of mud brick, without confines or reinforcements; Lightweight and flexible top cover; dimensions of the living areas in maximum measurements of 6.00m x 6.00m in plant, and maximum height of 5 m.

The hypothesis that underpins the increase in earthquake resistance was established with the incorporation of the upper horizontal diaphragm; the prototype was modeled with finite elements; the prototype was analyzed to verify the hypothesis raised; the optimal semi-rigid upper diaphragm shape and type was determined; the Optimum Semi-rigid, Lightweight, Pre-Standard Steel Top Horizontal Diaphragm System (SODHSSLAP) was designed; and its performance as a strengthening system in the housing prototype was analytically evaluated.

The results obtained indicate that SODHSSLAP at least triples the earthquake resistance of the type of housing subject to the study in an economical and practical way.

In turn it is concluded that SODHSSLAP is viable and of high social impact, for its characteristics of being a pre-manufacturing system, low cost and fast installation, in addition to bringing ductility to the structure improving its seismic behavior.

Índice General

1. Introducción	1
2. Antecedentes	9
2.1.- Antecedentes de estudios previos.....	9
2.2.- Antecedentes teóricos.....	14
3. Justificación.....	21
4. Objetivo general y específicos.	22
4.1.- Objetivo general.	22
4.2.- Objetivos específicos.	22
5. Hipótesis.....	23
6. Metodología	24
6.1.- Planteamiento del problema	24
6.2.- Definición del prototipo de vivienda objeto del estudio.	25
6.3.- Procedimiento y métodos a utilizar.....	27
7. Desarrollo	28
7.1.- Modelado con elementos finitos del prototipo de estudio.	28
7.2.- Acciones y criterios de diseño.....	30
7.3.- Propiedades constitutivas de los materiales de elementos estructurales.....	33
7.4.- Análisis de esfuerzos críticos que rigen la falla en el Prototipo con los muros libres en extremos superiores.	35

7.5.- Análisis de esfuerzos críticos que rigen la falla del sistema en el prototipo con diafragma teórico horizontal superior infinitamente rígido en su plano.	38
7.6.-Determinación del coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base con el que se alcanza un esfuerzo máximo igual al módulo de rotura por tensión paralela a las juntas de la mampostería en prototipo con los muros libres en extremos superiores.....	40
7.7.- Determinación del coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base con el que se alcanza un esfuerzo máximo igual al módulo de rotura por tensión paralela a las juntas de la mampostería en prototipo con diafragma horizontal teórico infinitamente rígido.	40
7.8.- Verificación de la hipótesis.....	41
7.9.- Determinación del tipo de Sistema Óptimo de Diafragma Horizontal Semirrígido Ligero de Acero Prefabricable (SODHSSLAP).	45
7.10.- Diseño del Sistema Óptimo de Diafragma Horizontal Superior Semirrígido Ligero de Acero Prefabricable (SODHSSLAP).....	53
7.11.- Evaluación del desempeño del SODHSSLAP al reforzar la vivienda prototipo objeto de este estudio.....	60
Conclusiones.....	67
Trabajo a futuro	69
Referencias bibliográficas	70

Índice de fotografías

Fotografía 1.1.- Recuperado de http://www.elancasti.com.ar/nacionales/2015/10/18/muerto-decenas-heridos-fuerte-sismo-salta-276447.html	3
Fotografía 1.2.- Recuperado de http://www.emol.com/noticias/internacional/2015/03/11/707407/fuerte-sismo-en-colombia-dano-unas-200-viviendas-afectadas-y-en-tres-Aeropuertos.html	3
Fotografía 1.3.- Recuperado de http://www.teleprensa.com/guatemala/sismo-de-64-grados-en-guatemala.html	4
Fotografía 1.4.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9_grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html	4
Fotografía 1.5.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9_grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html	5
Fotografía 1.6.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9_grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html	5
Fotografía 1.7.- Recuperado de http://ferriz.com.mx/informacion-2/pais/seduvi-evalua-danos-en-municipios-de-chiapas-afectados-por-sismo-de-6-9-richter/	6
Fotografía 1.8.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9_grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html	6
Fotografía 1.9.- Recuperado de http://www.diariodecolima.com/2014/04/21/detectan-casi-mil-viviendas-dañadas-por-sismo	7
Fotografía 1.10.- Recuperado de http://www.escaparatepolitico.com/galeria.php?id=19...	7
Fotografía 1.11.- Recuperado de http://www.radiolalider.com/2015/07/gobierno-federal-sigue-sin-construir.html	8

Índice de figuras

Fig. 2-1.— Modo de falla documentada por Melli (2005) para el tipo de vivienda de mampostería simple con cubierta ligera sin diafragma rígido superior asociadas a las fuerzas sísmicas.	10
Fig. 2-2.— Modo de falla documentada por Yamín, Phillips, Reyes, & Ruiz (2007) para el tipo de vivienda de mampostería simple con cubierta ligera sin diafragma rígido superior asociadas a las fuerzas sísmicas.....	11
Fig. 2-3.— Figura 3 de la norma E.080 de Diseño y Construcción con Tierra Reforzada. Perú	12
Fig. 2-4.— Módulo de rotura	15
Fig. 2-5.— Sistema de ejes locales en elementos finitos de muros.....	15
Fig. 2-6.— Flexión en el plano de muros	16
Fig. 2-7.— Flexión fuera de plano del muro	16
Fig. 2-8.— Esfuerzos en muros en el sistema de ejes locales. S_{11} es el esfuerzo de tensión por flexión fuera de plano.....	17
Fig. 6-1- Prototipo de vivienda objeto de estudio	26
Fig. 7-1- Modelado de prototipo de vivienda objeto de estudio (Vista 1).....	28
Fig. 7-2- Modelado de prototipo de vivienda objeto de estudio (Vista 2).....	29
Fig. 7-3- Modelado de prototipo de vivienda objeto de estudio (Vista 3).....	29
Fig. 7-4.- Espectro base de respuesta sísmica de aceleraciones para la zona II de la ciudad de Tapachula, Chiapas.	31
Fig. 7-5.- Deformada y esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros en el prototipo original con muros no restringidos en la parte superior.	35
Fig. 7-6.- Comparativo de las zonas de esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en los muros del prototipo de estudio en sus condiciones originales y las	

zonas donde se presentan las fallas en la mampostería ante la acción de las fuerzas sísmicas.	37
Fig. 7-7.- Diafragma horizontal teórico infinitamente rígido en su plano en la parte superior de los muros del prototipo de estudio que genera un desplazamiento horizontal en bloque de todos los puntos incluidos en el diafragma	38
Fig. 7-8.- Deformada y esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros en el prototipo con muros restringidos en la parte superior con un diafragma horizontal infinitamente rígido.	39
Fig. 7-9.-Prototipo de evaluación formado por cuatro muros de mampostería de 15 cm de espesor con dimensiones de 6 m de longitud y 5 m de alto formando en planta un cuadro de 6 m x 6 m. Todos los muros empotrados en su base y extremos superiores libres.	45
Fig. 7-10.-Cuatro tipos de diafragma semirrígido a evaluar. Todos propuestos a base del perfil de acero estructural comercial en tubo rectangular OR51x2.8 (4.00 kg/m) de acero A-36.....	46
Fig. 7-11.-Definición del índice de deformación de diafragma horizontal semirrígido (ID)	47
Fig. 7-12.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior teórico infinitamente rígido.....	49
Fig. 7-13.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 1.	50
Fig. 7-14.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 2.	50
Fig. 7-15.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 3.	51
Fig. 7-16.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 4.	51
Fig. 7-17.-Sistema Óptimo de Diafragma Horizontal Superior Semirrígido Ligero de Acero Prefabricable (SODHSSLAP)	54

- Fig. 7-18.-Pieza central del SODHSSLAP: Pieza de 300 cm de longitud compuesta por dos placas de apoyo, una placa T de apoyo y perfil estructural OR51x2.8. Se coloca en la zona central superior de los muros conectada a éstos a través de las dos placas de apoyo y la placa T de apoyo utilizando tornillos de espárrago calidad estructural de 10 mm de diámetro. 56
- Fig. 7-19.-Pieza esquina falsa del SODHSSLAP: Pieza compuesta de dos partes iguales unidas con un tornillo de 13mm permitiendo formar ángulos de magnitudes variables, cercanos a los 90° en las esquinas de los muros. Esta característica le permitirá adaptarse a las irregularidades de las edificaciones que no presenten esquinas en ángulos exactos de 90°. Cada una de las piezas es de 82 cm de largo y está compuesta por el perfil estructural OR51x2.8, placa de 8mm y una placa de apoyo..... 56
- Fig. 7-20.-Pieza diagonal del SODHSSLAP: Pieza de 88 cm de longitud compuesta por perfil estructural OR51x2.8 y placa de 8mm que permite conectar las diagonales del sistema a la pieza central y a la barra unión. 57
- Fig. 7-21.-Pieza Barra unión del SODHSSLAP: Pieza simple de perfil estructural OR51x2.8 de longitud variable que, al unirse a las piezas diagonal, central y de esquina falsa forma las barras diagonales y marco perimetral del sistema 57
- Fig. 7-22.-Pieza Conector del SODHSSLAP: Pieza de 10 cm de longitud construida con el perfil estructural OR64x4.8, con orificios y tuercas soldadas para unir piezas del sistema mediante tornillos de 13 mm. 58
- Fig. 7-23.-Placa de apoyo del SODHSSLAP: Pieza de placa de 8 mm x 250 mm x 450 mm de acero A-36 con 6 orificios para tornillo esparrago calidad estructural de 10 mm 58
- Fig. 7-24.-T de apoyo del SODHSSLAP: Conformada por dos placas de 8 mm con dimensiones de 150 mm x 300 mm y 250 mm x 450 mm, esta última con 6 orificios para tornillo esparrago calidad estructural de 10 mm 59
- Fig. 7-25.- Deformada y esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros en el prototipo original con muros no restringidos en la parte superior. Condición a). 62

Fig. 7-26.-Esfuerzos máximos de tensión por flexión fuera de plano en muros del prototipo reforzado con el SODHSSLAP. Condición b)	63
--	----

Índice de tablas

Tabla 7-1.-Determinación del tipo de diafragma semirrígido óptimo.....	33
Tabla 7-2 Determinación del tipo de diafragma semirrígido óptimo	52
Tabla 7-3 Revisión de resistencia a flexión y relación de esbeltez de las barras en los tipos de diafragmas semirrígidos evaluados	52

1. Introducción

En las ciudades y poblaciones rurales de nuestro país, un porcentaje muy importante de las viviendas populares existentes son de un nivel y están construidas por muros de carga de mampostería simple de ladrillo de barro rojo recocido, bloques de cemento-arena e incluso adobe, con cubiertas ligeras flexibles de teja, lámina u otros materiales regionales como la palma.

Dichas viviendas no cumplen con las normas de construcción actuales y poseen baja resistencia sísmica debido a que sus muros no cuentan con restricciones al desplazamiento superior en dirección transversal a su plano por la falta de un diafragma superior horizontal rígido, como lo sería una cubierta con losa de concreto reforzado, y a pesar del bajo peso de las cubiertas que poseen, este tipo de viviendas construidas en zonas de sísmicas son altamente vulnerables.

En el estado de Chiapas, al igual que en toda la costa pacífico del país, el peligro sísmico es elevado y se debe principalmente a la tectónica de placas por la subducción de la placa de cocos bajo la placa de Norteamérica, ubicándonos dentro de la franja de sismicidad más importante del planeta conocida como Cinturón de Fuego del Pacífico. Adicionalmente la región sur sureste del estado de Chiapas se encuentra cercana a la falla motagua – Polochic de corrimiento lateral entre las placas norteamericana y del Caribe, siendo el corrimiento entre estas placas el origen del terremoto catastrófico ocurrido en Guatemala en 1976.

En este tipo de vivienda a pesar del bajo peso de sus cubiertas, los muros de mampostería son pesados y al no poseer cadenas y castillos de concreto reforzado y un diafragma rígido horizontal en su parte superior que uniformice sus desplazamientos y les proporcione

arriostramiento lateral ante la acción sísmica, fallan de manera local con agrietamientos en las caras laterales de los muros en sus zonas superiores centrales, así como por aberturas y desprendimientos en sus esquinas y el volteo debido a las fuerzas dinámicas perpendiculares a su plano.

Debido a las condiciones de pobreza y marginación característica de las poblaciones y zonas rurales del país y en particular de nuestro estado, abunda este tipo de edificaciones con alta vulnerabilidad sísmica, la cual se agrava por la baja calidad de los materiales empleados en su construcción, así como el mal estado físico por falta de trabajos de mantenimiento o rehabilitación.

La conjugación del alto peligro sísmico en la región, la elevada vulnerabilidad sísmica de estas edificaciones con la existencia de población en condiciones de alta marginación y pobreza hace que exista un **alto riesgo sísmico**, lo que implica la elevada probabilidad de pérdida de vidas humanas y gran cantidad de daños materiales y económicos ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud con epicentros cercanos.

A continuación, se presenta un compendio de imágenes que muestran los daños por sismo típicos en este tipo de vivienda popular:

Sismo del 17 de octubre de 2015 de magnitud 5.9 con epicentro en la provincia de Salta Argentina:



Fotografía 1.1.- Recuperado de <http://www.elancasti.com.ar/nacionales/2015/10/18/muerto-decenas-heridos-fuerte-sismo-salta-276447.html>

Sismo del 11 de marzo de 2015, de 6.9 grados de magnitud con epicentro en la localidad de Mesa de los Santos (Santander) Colombia:



Fotografía 1.2.- Recuperado de <http://www.emol.com/noticias/internacional/2015/03/11/707407/fuerte-sismo-en-colombia-dano-unas-200-viviendas-afectadas-y-en-tres-Aeropuertos.html>

Sismo del 7 de julio de 2014, de magnitud 6.4 con epicentro a 50 kilómetros Oeste Sur Oeste de San Marcos, Guatemala:



Fotografía 1.3.- Recuperado de <http://www.teleprensa.com/guatemala/sismo-de-64-grados-en-guatemala.html>



Fotografía 1.4.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9-grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html



Fotografía 1.5.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9_grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html



Fotografía 1.6.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9_grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html



Fotografía 1.7.- Recuperado de <http://ferriz.com.mx/informacion-2/pais/seduvi-evalua-danos-en-municipios-de-chiapas-afectados-por-sismo-de-6-9-richter/>

Sismo del 21 de mayo 2014, de 5.8 grados con epicentro 27 km al norte de Matías Romero, Oaxaca



Fotografía 1.8.- Recuperado de http://www.milenio.com/estados/sismo_Tapachula-sismo_6-9_grados_Richter-sismo_Guatemala_Chiapas_5_331216878.html

Sismo de del 18 de abril de 2014, de 7.2 grados en escala de Richter con epicentro 40 km al sur de Petatlán Guerrero



Fotografía 1.9.- Recuperado de <http://www.diariodecolima.com/2014/04/21/detectan-casi-mil-viviendas-dañadas-por-sismo>.

Sismo del 20 de marzo de 2012 de 7.4 grados de magnitud con epicentro 29 km al SUR de OMETEPEC, GRO



Fotografía 1.10.- Recuperado de <http://www.escaparatepolitico.com/galeria.php?id=19>



Fotografía 1.11.- Recuperado de <http://www.radiolalider.com/2015/07/gobierno-federal-sigue-sin-construir.html>

2. Antecedentes

2.1.- Antecedentes de estudios previos

Las edificaciones de mampostería simple que tienen cubiertas ligeras y flexibles presentan daño ante sismo principalmente por esfuerzos axiales por flexión alrededor de su eje vertical en el borde superior de los muros en la zona central de sus longitudes y en las esquinas.

Aunque el prototipo de estudio en este trabajo corresponde al de las viviendas con muros de mampostería de tabiques de barro rojo recocido sin ningún tipo de confinamiento y cubierta ligera muy flexible, la mayor parte de la información que se presenta es sobre estudios previos de viviendas con muros de adobe en los que el mecanismo principal de falla también corresponde a la falla por flexión fuera de plano de los muros. Esto se debe a que en muchos países las normas no permiten la construcción de estructuras a base de muros simples no confinados. No obstante, en la realidad existen en nuestros países latinoamericanos un alto porcentaje de construcción con muros de mampostería simple de tabiques de barro rojo recocido que poseen una alta vulnerabilidad sísmica y a los que se debe reforzar para incrementar su sismorresistencia y disminuir el elevado riesgo sísmico.

Con relación a este tipo de falla, [Melli \(2005\)](#) documenta que:

“El sistema de techo, o piso cuando lo hay, no restringe el movimiento de los extremos superiores de los muros. Todo esto hace que el comportamiento esté regido por la flexión de los muros en dirección normal a su plano- Esta produce momentos flexionantes críticos en las esquinas superiores de los muro (Fig. 2.1 a); éstos se agrietan progresivamente

hacia abajo, de manera que el muro frontal comienza a vibrar como una pared en voladizo, o sea como una barda, y se presenta el volteo cuando la altura agrietada es suficientemente grande como para que la resultante caiga fuera del espesor de la sección del muro.”

“El volteo ocurre casi siempre hacia fuera por la menor restricción del techo en ese sentido, y a veces por el efecto adicional del coceo de la techumbre. La consecuencia más grave de este modo de falla suele ser la caída del techo que afecta a los que se quedan en el interior. Sólo cuando existen muchos muros divisorios que reducen la longitud de los muros que se puede flexionar, o cuando el techo restringe la flexión de los muros, la falla llega a ocurrir por el efecto de fuerzas cortantes que generan el característico agrietamiento diagonal de las paredes. Este modo de falla es propiciado en gran medida por las aberturas de puertas y ventanas que debilitan los muros- Se han presentado con cierta frecuencia fallas en las esquinas de la vivienda que provocan la caída parcial del lecho o por deslizamientos de los elementos de techo cuando están fijados en forma precaria (Fig.2.1 b).”

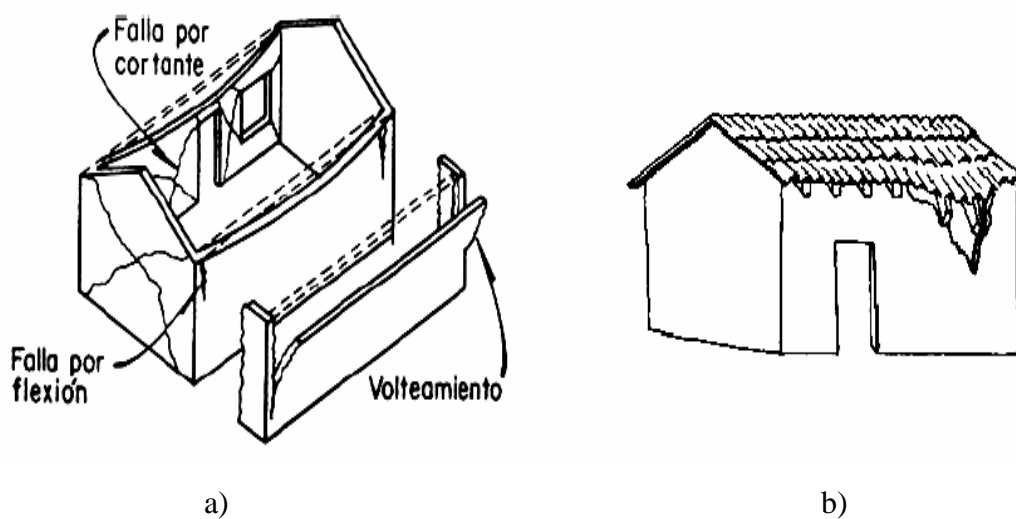


Fig. 2-1.— Modo de falla documentada por Melli (2005) para el tipo de vivienda de mampostería simple con cubierta ligera sin diafragma rígido superior asociadas a las fuerzas sísmicas.

A su vez [Yamín, Phillips, Reyes, & Ruiz \(2007\)](#) documenta diferentes modos de falla en este tipo de estructuras asociadas con fuerzas sísmicas, mismos que se muestran en la Fig.- 2.2.

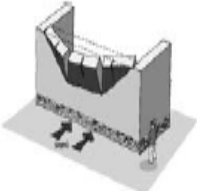

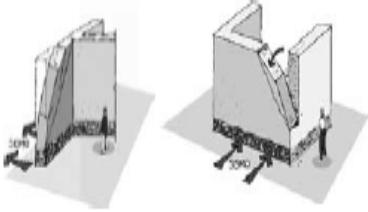
TIPO DE FALLA	ESQUEMA
Flexión perpendicular al plano del muro. Agrietamiento horizontal en la base o a una altura intermedia y agrietamientos verticales adicionales. Esto se presenta frecuentemente en muros largos.	
Falla por flexión perpendicular al plano del muro con agrietamiento vertical en la zona central. Agrietamiento diagonal que constituye el mecanismo de falla y fisuración en la parte superior.	
Falla por flexión perpendicular al plano en las esquinas no confinadas de muros sueltos, o en esquinas no conectadas efectivamente con los muros transversales.	

Tabla 1:
Tipos de falla y agrietamientos asociados con fuerzas sísmicas.

Fig. 2-2.– Modo de falla documentada por Yamín, Phillips, Reyes, & Ruiz (2007) para el tipo de vivienda de mampostería simple con cubierta ligera sin diafragma rígido superior asociadas a las fuerzas sísmicas.

En la norma E.080 de Diseño y Construcción con Tierra Resforzada ([MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO DE PERÚ, 2017](#)), como parte de su artículo 6, “6.- Criterios de configuración de las edificaciones de tierra reforzada”, especifica, “6.7. Tener como mínimo una viga collar en la parte superior de cada muro fijada entre si, así como a los refuerzos, y construidos con un material compatible con la tierra reforzada (madera, caña u otros)”, e incluye el esquema que se replica en la Fig. 2.3 en la que ejemplifica este tipo de viga o collar.

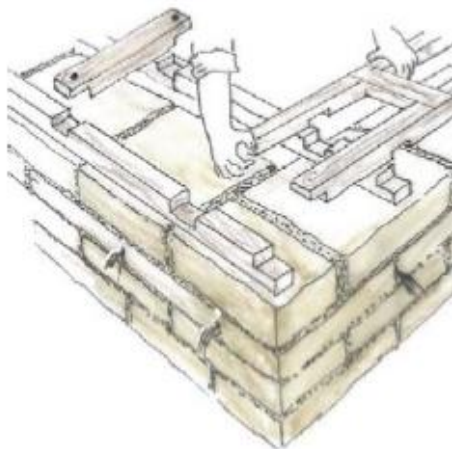


Fig. 2-3.– Figura 3 de la norma E.080 de Diseño y Construcción con Tierra Reforzada. Perú

Este tipo de refuerzo superior en los muros les proporciona un cierto grado de restricción lateral y forma un diafragma superior semirrígido que disminuye la flexión fuera de plano de los muros de mampostería de adobe.

La Pontificia Universidad Católica de Perú tiene una amplia trayectoria en la realización de investigaciones dirigidas a investigar el tipo de fallas de las viviendas construidas con adobe así como en el estudio y ensayo de diferentes sistemas de refuerzo para alcanzar niveles aceptables de sismorresistencia. Parte de esta experiencia se presenta en el artículo ([M. Blondet, 2011](#)). En este artículo se presenta información de los daños causados por el terremoto magnitud 8.0 que ocurrió en pisco Perú el 15 de agosto de 2007 en donde perdieron la vidas cerca de 600 personas, más de 50,000 viviendas colapsaron y más de 45,000 viviendas fueron afectadas, de las cuales, la gran mayoría eran viviendas de adobe.

A su vez menciona que entre los diferentes estudios e investigaciones que han realizado, se estudiaron módulos reforzados con varas verticales de caña colocadas a cada 0.45 m y bandas de caña chancada horizontal a cada cuatro hiladas, además de una viga soleta superior de madera.

De estos estudios llegaron a la siguiente conclusión principal “La principal conclusión fue que ante un sismo severo las construcciones no reforzadas colapsan luego de la separación de los muros en las esquinas. El refuerzo interior de caña horizontal y vertical, combinado con una viga de coronación de madera, impide la separación de los muros y mantiene la integridad ante repetidos sismos severos unidireccionales”.

De estos resultados se puede proponer que la viga de coronación de madera, proporciona un diafragma superior semirrígido que da restricción a los muros en su extremo superior.

En el proyecto de investigación “Mecanismos de transmisión de cargas perpendiculares al plano del muro en muros de mampostería no reforzada” ([Jaramillo, 2002](#)) estudia los mecanismos de resistencia sísmica de mampostería no reforzada, en especial la transmisión de carga inercial perpendicular al plano del muro cuando las estructuras se someten a la acción de sismos intensos.

Los estudios los realiza con modelos analíticos y los contrasta con ensayos experimentales de muros de escala natural instrumentados con sensores extensométricos, acelerómetros y medidores de desplazamiento en mesa vibratoria. Derivado de los resultados que se alcanzaron en esta investigación determinaron que mediante los modelos propuestos se pueden explicar algunos de los daños en edificaciones de mampostería no reforzada en sismos intensos, y se propone evitar un conjunto de prácticas constructivas pero para el presente trabajo lo relevante es que propone fomentar las práctica siguientes:

“

- Conexión de los bordes superiores de los muros. Las aceleraciones resistentes de los muros se disminuyen aproximadamente a la mitad por efecto del borde superior libre.
- Transmisión de cargas axiales a todos los muros de la edificación. El habilitar dos mecanismos de transmisión de cargas inerciales perpendiculares al plano del muro aumenta la capacidad resistente del muro.

- Cuidado especial del mortero de pega vertical que tradicionalmente se ha despreciado. Cerca del 60% de la aceleración resistente de los muros se debe al mecanismo de compresión del mortero de pega vertical.

“

De lo anterior se resalta la primera de las prácticas recomendadas antes citadas ya que fortalece la hipótesis propuesta en el presente trabajo.

En el trabajo de pregrado “Evaluación sísmica de casas de mampostería de tierra vulnerables a modos de falla fuera del plano” ([Romero Niveló, 2017](#)), se establece que la premisa que comunmente se establece en la evaluación sísmica de edificios de mampostería es que el modo de falla global que gobierna es el de falla en el plano de los muros, pero esto no es realista en edificaciones tradicionales (cubierta ligera) de adobe o de ladrillo sin confinar en las que los estudios de daño posteriores a eventos sísmicos indican que el modo de falla global en este tipo de edificaciones está regido principalmente por mecanismos de falla fuera de plano de los muros.

2.2.- Antecedentes teóricos

En los análisis y estudios aquí realizados, se utilizan como base algunos conceptos y términos de la mecánica de materiales, análisis estructural e ingeniería sísmica, de los cuales a continuación se mencionan los fundamentalmente relacionados con el presente trabajo.

Módulo de rotura (f_r).

El módulo de rotura se define como el esfuerzo de tensión máxima en las fibras extremas debido a la flexión que un espécimen de prueba rectangular puede soportar en una prueba de flexión de 3 puntos hasta que se rompe. Se expresa en kg/cm^2 , Mpa, etc.

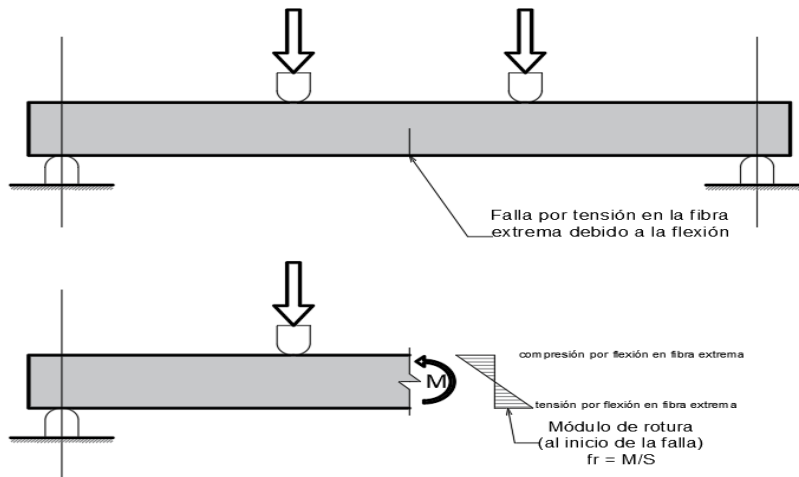
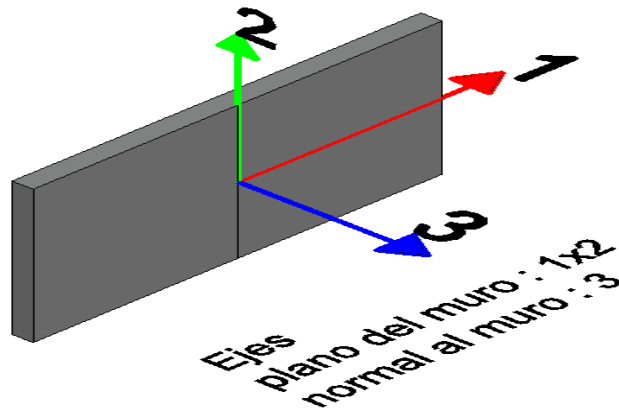


Fig. 2-4.- Módulo de rotura

Ejes locales en elemento finito de muros.



Los ejes locales 1 y 2 en los elementos finitos de los muros definen el plano del muro y el eje 3 es normal al plano del muro.

Fig. 2-5.- Sistema de ejes locales en elementos finitos de muros

Flexión en el plano de un muro.

La flexión en el plano del muro corresponde a la flexión alrededor del eje 3

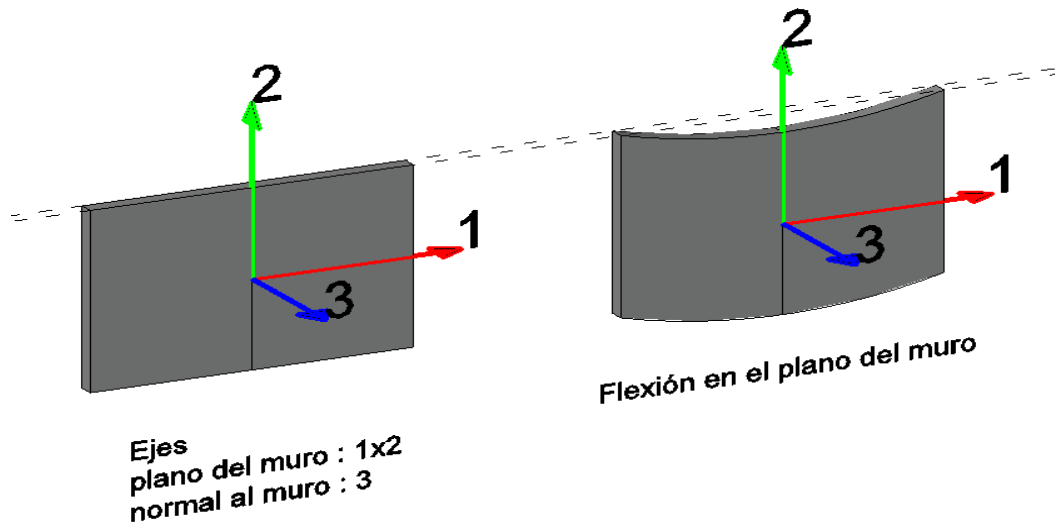


Fig. 2-6.— Flexión en el plano de muros

Flexión fuera de plano de un muro.

La flexión fuera de plano del muro corresponde a la flexión alrededor del eje 2 en el plano 1x3 perpendicular al plano del muro 1x2.

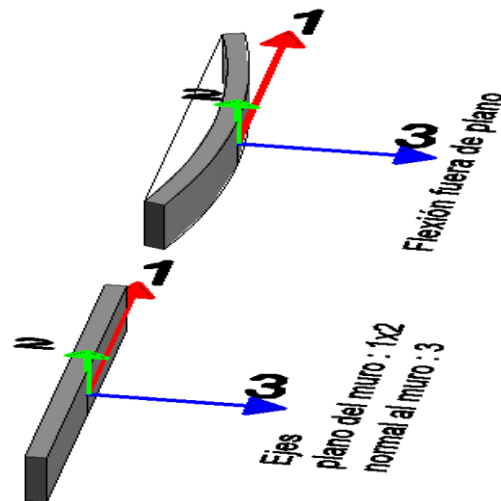


Fig. 2-7.— Flexión fuera de plano del muro

Esfuerzos en muros en el sistema de ejes locales.

Los esfuerzos axiales y cortantes en los muros en el sistema de ejes locales se define en la siguiente figura.

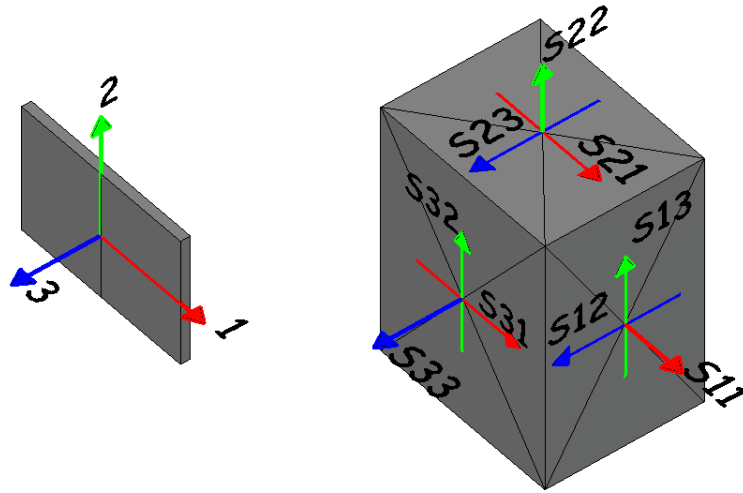


Fig. 2-8.– Esfuerzos en muros en el sistema de ejes locales. S_{11} es el esfuerzo de tensión por flexión fuera de plano

Rigidez.

Es la propiedad de una estructura o elementos estructural de oponerse a las deformaciones, por lo que representa la fuerza que es necesario aplicar en la dirección de algún grado de libertad del elemento o estructura para generar un desplazamiento unitario en dicho grado de libertad, así como rigideces o fuerzas debidas a esta acción en las direcciones de los otros grados de libertad del mismo elemento. De esta forma, por ejemplo, los marcos rígidos poseen rigidez lateral en Ton/cm que representa la fuerza lateral en toneladas que se requiere aplicar a la estructura para generar un desplazamiento lateral relativo de un centímetro.

Ductilidad en los materiales.

La ductilidad es una propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas u otros materiales, los cuales, bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse conservando su resistencia.

A los materiales que presentan esta propiedad se les denomina dúctiles. Los materiales no dúctiles se califican como frágiles. Aunque los materiales dúctiles también pueden llegar a romperse bajo el esfuerzo adecuado, esta rotura sólo sucede tras producirse grandes deformaciones.

Ductilidad en las estructuras.

Ductilidad es la habilidad en una estructura, de sus componentes o de sus materiales de sostener, sin fallar, deformaciones que excedan el límite elástico, o que excedan el punto a partir del cual las relaciones esfuerzo – deformación ya no son lineales.

Para una estructura es muy importante que cuando exceda el límite elástico tenga un recorrido importante en rango inelástico sin reducir su resistencia.

Espectro de respuesta.

Un espectro de respuesta es un valor utilizado en los cálculos de ingeniería sísmica, que mide la reacción de una estructura ante la vibración del suelo que la soporta.

Existen diferentes tipos de espectros de respuesta según la reacción que se quiera comparar:

- Espectro de respuesta de aceleración.
- Espectro de respuesta de velocidad.
- Espectro de respuesta de deformación.

El más habitual en cálculos sísmicos es el espectro elástico de respuesta, que relaciona la aceleración.

Peligro sísmico.

El peligro sísmico depende del lugar donde nos ubiquemos y representa la probabilidad de que se produzcan sismos, las intensidades o aceleraciones que probablemente se lleguen a generar, así como los tiempos de retorno en los cuales se vuelvan a presentar.

El hombre con toda su tecnología no tiene la capacidad de modificar el peligro sísmico de ningún sitio en el planeta.

Las localidades más cercanas a fuentes sísmicas están más expuestas a la acción de los sismos y por ende poseen un mayor peligro sísmico.

Vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

Es la predisposición de una estructura para sufrir daños físicos directos por la acción de las fuerzas accidentales de sismo.

La vulnerabilidad es inversamente proporcional a la sismorresistencia y a su vez ésta depende del diseño de la estructura, sus características de regularidad, la calidad de su construcción, su ductilidad, ligereza, etc.

La vulnerabilidad de una estructura si depende en totalmente del hombre. De esta forma se pueden construir estructuras con diferentes grados de vulnerabilidad, y lo deseable es construir estructuras no vulnerables.

Riesgo sísmico.

El riesgo sísmico son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por la acción sísmica, como resultado de la falla de las estructuras cuya capacidad resistente fue excedida.

El riesgo sísmico representa los daños potenciales tanto materiales como en pérdida de vidas humanas ante la ocurrencia de los terremotos.

El peligro sísmico depende del peligro sísmico y de la vulnerabilidad sísmica por lo que para disminuir el riesgo sísmico el hombre de las dos variables solo puede manejar en la vulnerabilidad sísmica.

Así, por ejemplo, si se construyen estructuras de alta vulnerabilidad sísmica en regiones de peligro sísmico alto, el resultado será un riesgo sísmico muy elevado.

Por el contrario, si se construyen estructuras de muy baja vulnerabilidad sísmica en regiones de peligro sísmico alto, el resultado será un riesgo sísmico muy bajo.

3. Justificación.

Reforzar las edificaciones objeto de este estudio con sistemas convencionales que impliquen la construcción de confinamientos en los muros a base de cadenas y castillos de concreto reforzado, así como el reforzamiento en caras de muros con mallas de acero y mortero cemento – arena; sin duda alguna incrementaría su capacidad sísmo resistente, no obstante, esto implicaría un alto costo económico para la población y/o el gobierno considerando las difíciles condiciones económicas y elevados niveles de marginación y pobreza.

Con el presente trabajo de investigación se pretende obtener una alternativa factible, viable, de bajo costo y alto impacto social para incrementar la sismorresistencia de este tipo de viviendas en regiones sísmicas con condiciones de marginación y pobreza. Con la alternativa de reforzamiento que aquí se desarrolla se puede disminuir de manera importante el riesgo sísmico, es decir, disminuir los probables daños y pérdida de vidas humanas ante la acción sísmica.

Los usuarios beneficiados lo integrarían un amplio sector de la población que en general es de bajos recursos económicos con alta marginación y pobreza.

4. Objetivo general y específicos.

4.1.- Objetivo general.

Desarrollar un sistema de diafragma horizontal superior que sea semirrígido, ligero, de acero, prefabricable y de bajo costo para reforzar el tipo de vivienda popular objeto de este estudio y con ello triplicar al menos su sismorresistencia proporcionándole a su vez ductilidad.

4.2.- Objetivos específicos.

- Definir el prototipo de vivienda popular objeto de este estudio mediante la determinación de sus características estructurales y geométricas.
- Evaluar los esfuerzos críticos y la capacidad sísmica del prototipo.
- Evaluar los esfuerzos críticos y la capacidad sísmica del prototipo dotándolo de un diafragma teórico superior horizontal infinitamente rígido.
- Verificar y evaluar las hipótesis planteadas
- Desarrollar un sistema óptimo de diafragma horizontal superior que sea semirrígido, ligero, de acero, prefabricable y de bajo costo, con el desempeño más cercano al diafragma teórico infinitamente rígido al menor costo. (SODHSSLAP)

5. Hipótesis

Como base teórica que permita desarrollar el sistema de refuerzo con un diafragma horizontal rígido en la parte superior de los muros de este tipo de edificaciones se plantea la siguiente hipótesis:

“Ante la acción accidental de sismo, los esfuerzos críticos que provocan la falla de tensión por flexión fuera de plano de la mampostería simple de la edificación objeto de este estudio, se pueden disminuir al menos al 30% y triplicar su capacidad sismorresistente, si a los muros se les construye en sus bordes superiores un diafragma horizontal rígido”.

6. Metodología

6.1.- Planteamiento del problema

En zonas con actividad sísmica, la vivienda popular objeto de estudio posee una alta vulnerabilidad y elevado riesgo sísmico debido al peso propio de los muros de mampostería simple y a la falta de un diafragma superior rígido que proporcione restricciones al desplazamiento lateral de los extremos superiores de los muros. Lo anterior provoca la falla por flexión fuera de plano en los muros, debido a que se excede la resistencia a la rotura de la mampostería simple, con la generación de agrietamientos en la parte superior de las zonas centrales y esquinas de los muros, presentándose incluso desprendimientos, separaciones, volteos y colapso parcial o total de las viviendas. A su vez, este tipo de viviendas poseen una ductilidad prácticamente nula debido a la naturaleza frágil de la falla y a la no existencia de materiales que les aporten capacidades de deformación importantes sin la pérdida súbita de resistencia que impidan el colapso.

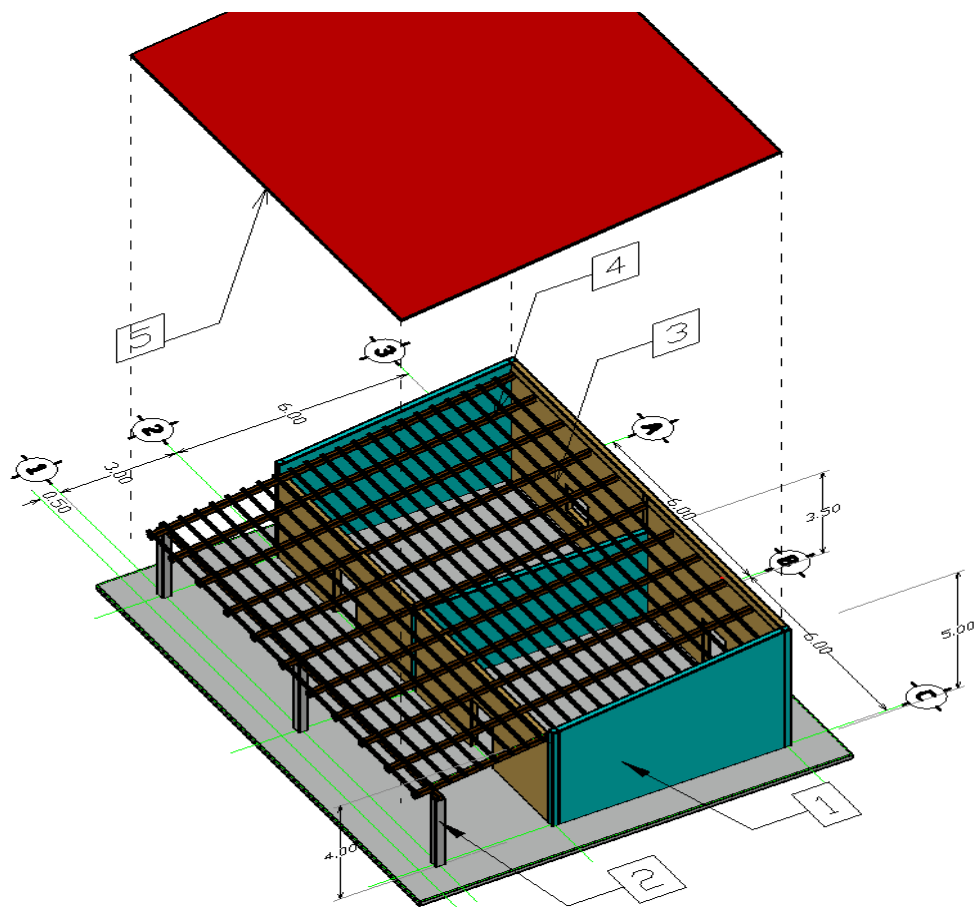
Se plantea desarrollar un **sistema óptimo de diafragma horizontal superior** que sea: semirrígido, ligero, de acero prefabricable y de bajo costo al que se denominará SODHSSLAP, con el cual sea posible reforzar el extremo superior de los muros de este tipo de viviendas de forma práctica, económica y rápida, multiplicando con ello varias veces su resistencia sísmica y ductilidad a la vez de disminuir significativamente su vulnerabilidad y elevado riesgo sísmico.

6.2.- Definición del prototipo de vivienda objeto del estudio.

Los estudios de la investigación se realizarán sobre un prototipo de vivienda típica que existe en la región sur de Chiapas en particular en el Soconusco que poseen las siguientes características:

- Viviendas de un nivel con cubierta ligera y flexible de madera, teja y/o lámina
- Muros de carga de mampostería simple de barro rojo recocido de baja calidad de 15 cm de espesor.
- Dimensión máxima en planta de área habitable de 6 m.
- Altura máxima de muros de 5 m.
- Aberturas en muros debido a puertas y ventanas pequeñas.

En la fig. 6.1 se muestran en un esquema las características geométricas del prototipo de vivienda objeto de este estudio.



Unidades: m

- 1: Muro de tabique de barro rojo recocido de 15 cm de espesor
- 2: Pilar de tabique de barro rojo recocido de 28 cm x28 cm.
- 3: Regla de madera de pino de 1"x2" soportar teja de barro
- 4: Viga de madera de pino de 4" x 6"
- 5: Cubierta de teja de barro

Fig. 6-1- Prototipo de vivienda objeto de estudio

6.3.- Procedimiento y métodos a utilizar.

El proceso de realización de los estudios estructurales hasta llegar al desarrollo del sistema óptimo de diafragma horizontal superior semirrígido ligero de acero prefabricable fue el siguiente:

- Modelado con elementos finitos del prototipo de estudio.
- Establecimientos de las acciones y criterios de diseño.
- Establecimiento de las propiedades mecánicas constitutivas de los materiales.
- Análisis de esfuerzos críticos que rigen la falla en el prototipo con los muros libres en extremos superiores.
- Análisis de esfuerzos críticos que rigen la falla en el prototipo con diafragma teórico horizontal superior infinitamente rígido en su plano.
- Revisión de la hipótesis
- Determinación del tipo de diafragma horizontal semi rígido óptimo
- Diseño del sistema óptimo de diafragma horizontal superior semirrígido ligero de acero prefabricable (SODHSSLAP).
- Evaluación de los esfuerzos críticos en muros e incremento de la sismorresistencia del prototipo de estudio rigidizado con el SODHSSLAP

El análisis de esfuerzos se realizó utilizando el método de elementos finitos mediante el programa SAP 2000 versión de prueba.

7. Desarrollo

7.1.- Modelado con elementos finitos del prototipo de estudio.

Los muros de mampostería del prototipo se modelaron con elemento finito y con elementos barra la estructura de la cubierta ligera de madera. Sobre el modelo de estudio definido se determinaron los esfuerzos críticos que generan la falla ante la aceleración inercial de sus masas generada por la acción sísmica.

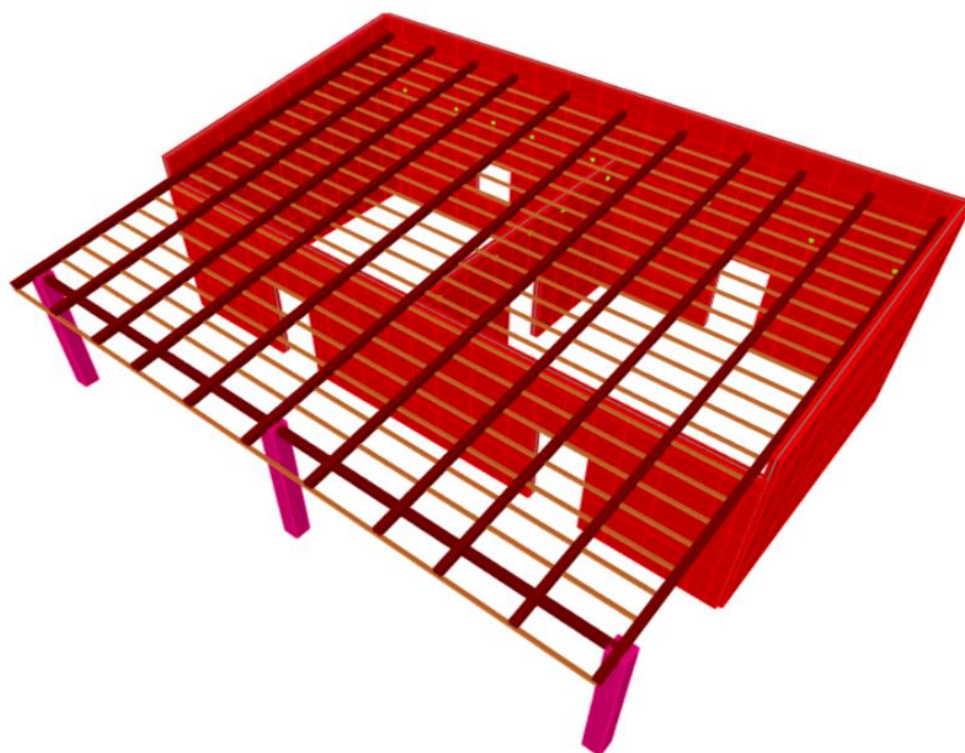


Fig. 7-1- Modelado de prototipo de vivienda objeto de estudio (Vista 1)

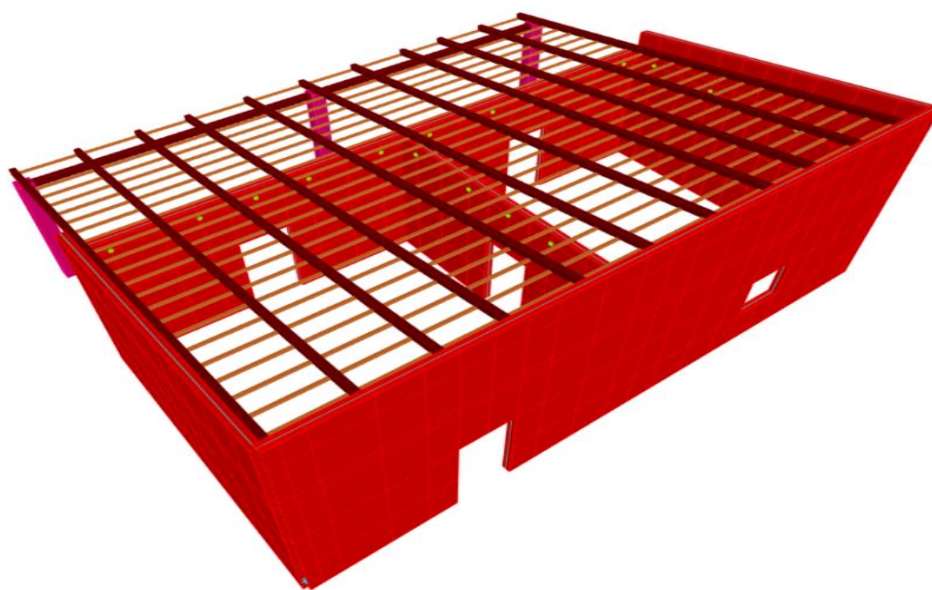


Fig. 7-2- Modelado de prototipo de vivienda objeto de estudio (Vista 2).

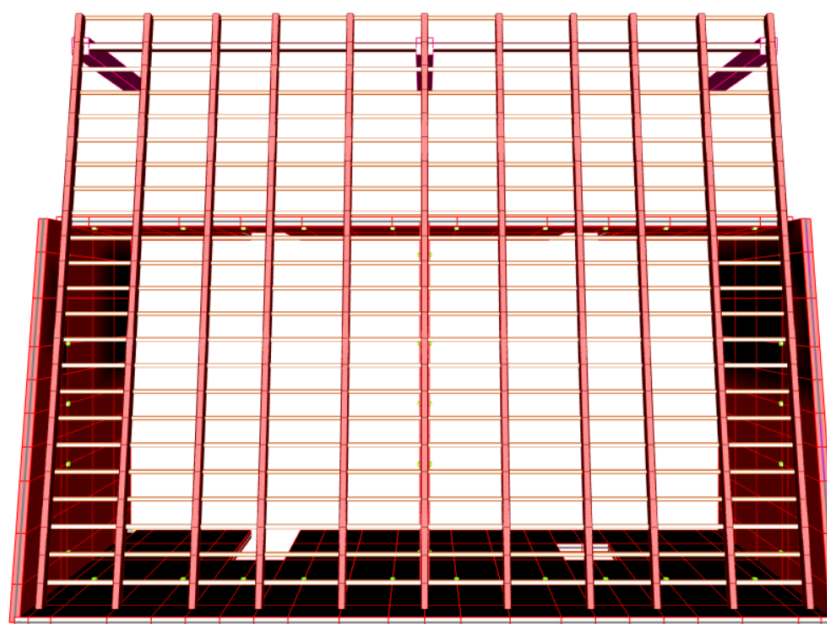


Fig. 7-3- Modelado de prototipo de vivienda objeto de estudio (Vista 3)

7.2.- Acciones y criterios de diseño.

Las acciones y criterios de diseño se establecieron con base a la NTC criterios y acciones de diseño_CDMX2017.

En el estudio se consideró el efecto combinado de las acciones que tengan una probabilidad no despreciable de ocurrir en forma simultánea. Se consideraron las acciones permanentes, variables y accidentales; siendo estas: carga muerta (CM), carga viva instantánea (CVinst) y sismo respectivamente.

Cargas permanentes y variables (CM, CVinst):

Carga muerta $CM = 25 \text{ kg/ m}^2$ + peso propio de los elementos estructurales

Carga viva instantánea $CVinst = 20 \text{ kg/m}^2$ (cubierta con pendiente > 5%)

Carga accidental de sismo.

El análisis por carga accidental de sismo se realizó aplicando la propuesta de las NORMAS TÉCNICAS DE DISEÑO POR SISMO Y MAMPOSTERÍA DE TAPACHULA, González, Mora, Aguirre, & Rueda (2012)

Con base a lo anterior, las características del espectro base de respuesta sísmica de aceleraciones para la zona II de la ciudad de Tapachula utilizado en este estudio se presentan en la Fig. 7.4.

Estructura grupo:	B
Zona Sísmica:	II
Coeficiente Sísmico C:	0.86
a_0 :	0.86
T_a :	0
T_b :	1.20
r :	0.67
Q_x :	1 (mampostería simple)
Q_y :	1 (mampostería simple)

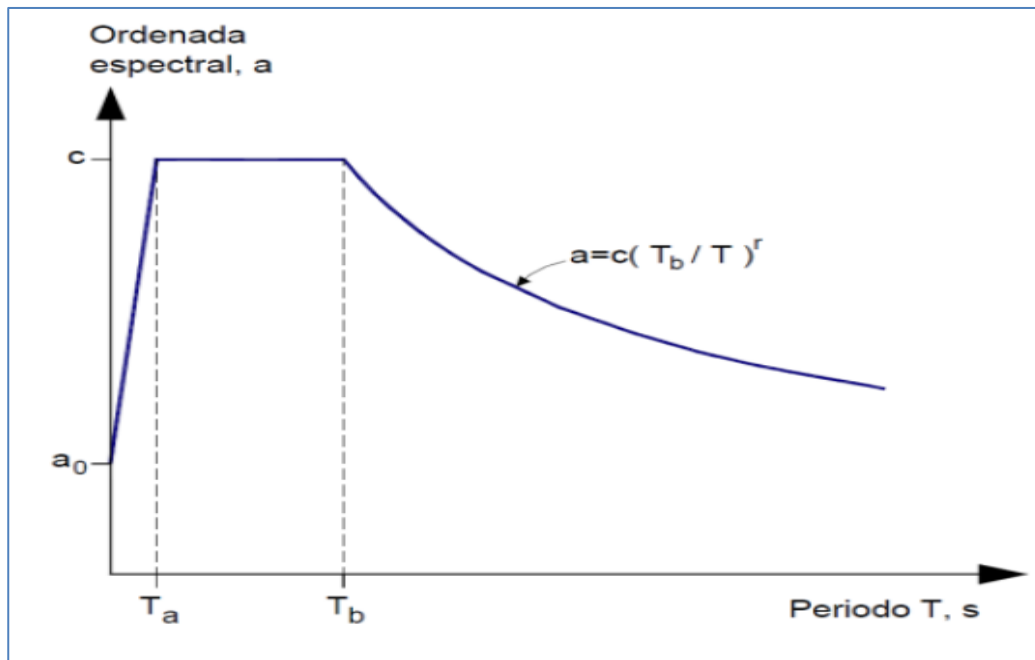


Fig. 7-4.- Espectro base de respuesta sísmica de aceleraciones para la zona II de la ciudad de Tapachula, Chiapas.

Combinaciones de acciones.

Los esfuerzos de diseño en la estructura se determinaron para la categoría de combinación que considera las acciones permanentes más las acciones variables más una acción accidental. La acción accidental considerada fue la de sismo y de acuerdo con la norma el factor de carga considerado fue $FC=1.1$.

Conforme a lo anterior las acciones consideradas fueron:

Acción permanente	: CM	:Carga muerta
Acción variable	: CVinst	:Carga viva en su intensidad instantánea
Acción accidental	: SISMO	:Sismo

Combinación : $(CM + CVinst + SISMO)1.1$

- En la acción de SISMO se consideraron las dos direcciones ortogonales X e Y, de forma simultánea en las siguientes proporciones:
 - Sismo dominante X + Sismo no dominante Y = $100\% \text{ SISMO X} + 30\% \text{ SISMO Y}$
 - Sismo no dominante X + Sismo dominante Y = $30\% \text{ SISMO X} + 100\% \text{ SISMO Y}$
- Combinaciones definidas
 - 1) $(CM + CVinst \pm SISMO X \pm 0.30 \text{ SISMO Y})1.1$
 - 2) $(CM + CVinst \pm 0.30 \text{ SISMO X} \pm SISMO Y)1.1$
 - 3) ENVOLVENTE de las combinaciones 1) y 2)

7.3.- Propiedades constitutivas de los materiales de elementos estructurales.

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizadas en el modelado del prototipo de vivienda objeto del estudio en el que los muros se modelaron como elementos área con elementos finitos y las vigas como elemento barra , se presentan en la tabla 7.1.

Tabla 7-1.-Determinación del tipo de diafragma semirrígido óptimo

MATERIAL	Propiedades constitutivas	ELEMENTOS
Mampostería de tabique artesanal de barro rojo recocido simple con mortero tipo II.	<p><u>NTC para diseño y construcción de estructuras de mampostería CDMX 2017:</u></p> <p> $f'm = 15 \text{ kg/cm}^2$ $v'm = 2 \text{ kg/cm}^2$ $E_m = 600 f'm$ (para cargas de corta duración). $G_m = 0.4 E_m$ $FR = 0.3$ (muros no confinados sujetos a fuerza cortante) $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 0.25$ </p> <p><u>Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería, julio 2017(Reglamento cirsoc501)</u></p> <p> $fr2 = 5.10 \text{ kg/cm}^2$ (Módulo de rotura con tensión normal a las juntas) $fr1 = 10.20 \text{ kg/cm}^2$ (Módulo de rotura con tensión paralela a las juntas) </p>	Muros y Pilares de mampostería de tabique de barro rojo recocido
Madera de conífera clase B	<p><u>NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera CDMX 2017.</u></p> <p> $E_{0.50} = 80000 \text{ kg/cm}^2$ $G_{0.50} = 29630 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma = 800 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 0.35$ </p>	Vigas y reglas de madera

Los módulo de elasticidad y cortante de la mampostería de tabique de barro simple utilizados se tomaron de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería CDMX 2017: ([Gobierno de la Ciudad de México, 2017](#)) y los valores de módulos de rotura se obtuvieron del Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería ([Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2017](#))

Se hace la observación que en la NTC para diseño y construcción de estructuras de mampostería de la Ciudad de México 2017 no se encontró información relacionada al módulo de rotura de la mampostería y se tomaron como referencia los módulos de rotura especificados en el reglamento argentino de estructuras de mampostería.

De cualquier forma, el valor de módulo de rotura tomado de referencia es un parámetro estimado ya que en la realidad la calidad de la mampostería con la que están construidas esta clase de viviendas es muy variable.

7.4.- Análisis de esfuerzos críticos que rigen la falla en el Prototipo con los muros libres en extremos superiores.

Se analizó el prototipo en su condición original, es decir, con cubierta flexible ligera que no posee la rigidez para funcionar como diafragma horizontal. Bajo esta condición los esfuerzos críticos encontrados se muestran en la Fig. 7.5:

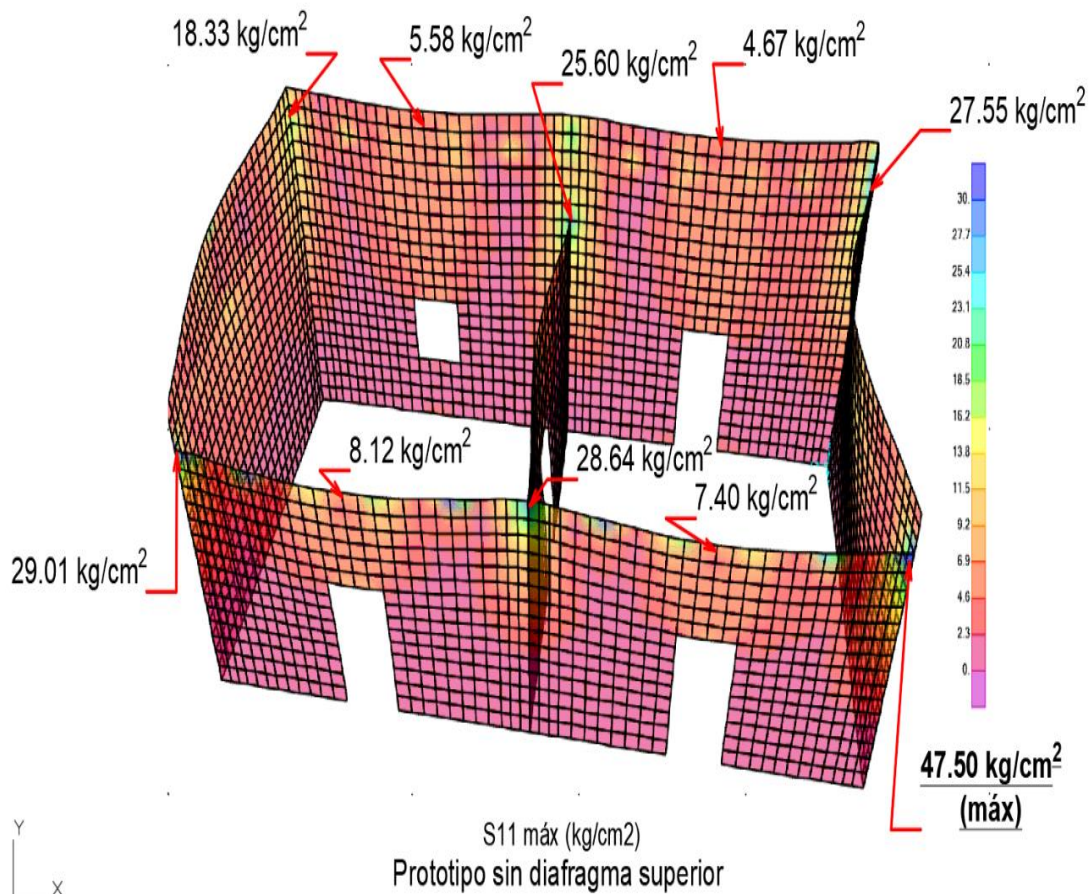


Fig. 7-5.- Deformada y esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros en el prototipo original con muros no restringidos en la parte superior.

En la determinación de los esfuerzos máximos se descartaron las zonas de apoyos directos de las vigas sobre la mampostería debido que ahí se generan concentraciones de esfuerzos elevadas que no corresponden a la distribución general. Se recomienda la colocación de elementos como parte del reforzamiento que se coloquen en estos puntos para distribuir mejor los esfuerzos.

En la figura antes citada, se observan la deformada y los esfuerzos críticos de tensión por flexión alrededor del eje vertical en las caras laterales de los muros debido a las fuerzas inerciales generadas por la masa de los muros, el peso propio de la cubierta y la carga viva sobre la cubierta ligera.

Con base a estos resultados se hacen las siguientes observaciones:

- Las zonas críticas donde se presentan los esfuerzos máximos son:
 - Bordes superiores en las zonas centrales de los muros.
 - Bordes superiores en las zonas de esquinas.
- Las zonas críticas tienen total correspondencia con las áreas donde se han presentado las fallas y colapsos de los muros de este tipo de edificaciones durante los eventos sísmicos históricos documentados en las fotografías incluidas en la introducción de este estudio y en los antecedentes citados. Ver comparativo en la Fig. 7.6.
- El valor del esfuerzo de tensión máxima por flexión fuera de plano fue de 47.50 kg/cm² localizado en el área superior de una de las esquinas de los muros.

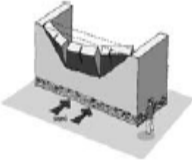

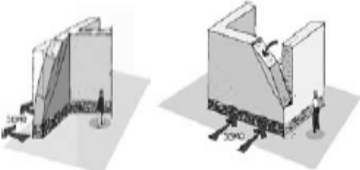
TIPO DE FALLA	ESQUEMA
Flexión perpendicular al plano del muro. Agrietamiento horizontal en la base o a una altura intermedia y agrietamientos verticales adicionales. Esto se presenta frecuentemente en muros largos.	
Falla por flexión perpendicular al plano del muro con agrietamiento vertical en la zona central. Agrietamiento diagonal que constituye el mecanismo de falla y fisuración en la parte superior.	
Falla por flexión perpendicular al plano en las esquinas no confinadas de muros suestos, o en esquinas no conectadas efectivamente con los muros transversales.	

Tabla 1:
Tipos de falla y agrietamientos asociados con fuerzas sísmicas.

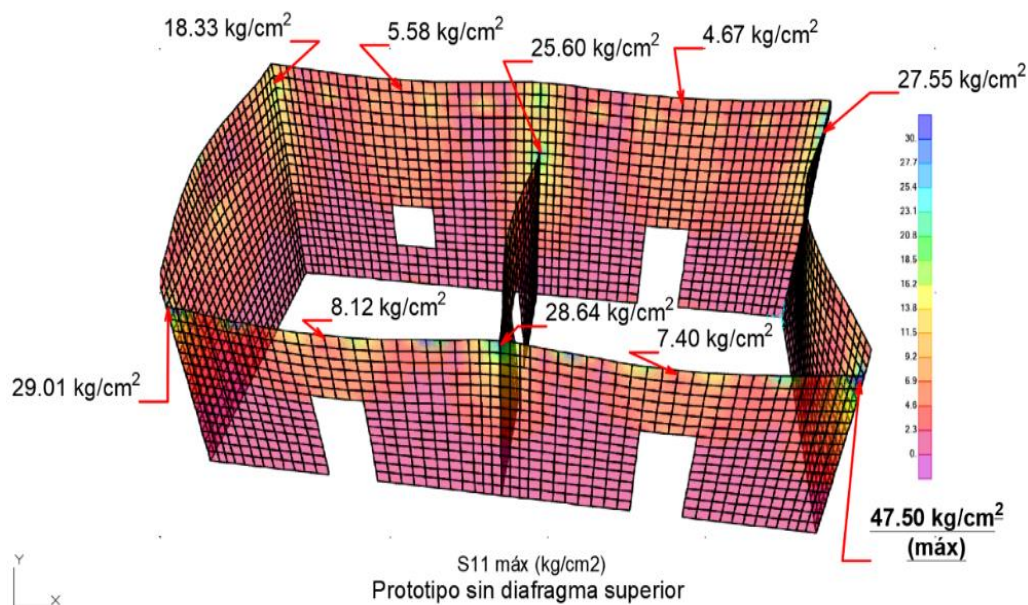


Fig. 7-6.- Comparativo de las zonas de esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en los muros del prototipo de estudio en sus condiciones originales y las zonas donde se presentan las fallas en la mampostería ante la acción de las fuerzas sísmicas.

7.5.- Análisis de esfuerzos críticos que rigen la falla del sistema en el prototipo con diafragma teórico horizontal superior infinitamente rígido en su plano.

Se definió un diafragma horizontal teórico infinitamente rígido en un plano horizontal en la zona superior de los muros, para que todos los puntos en este diafragma se desplacen como una placa superior infinitamente rígida.

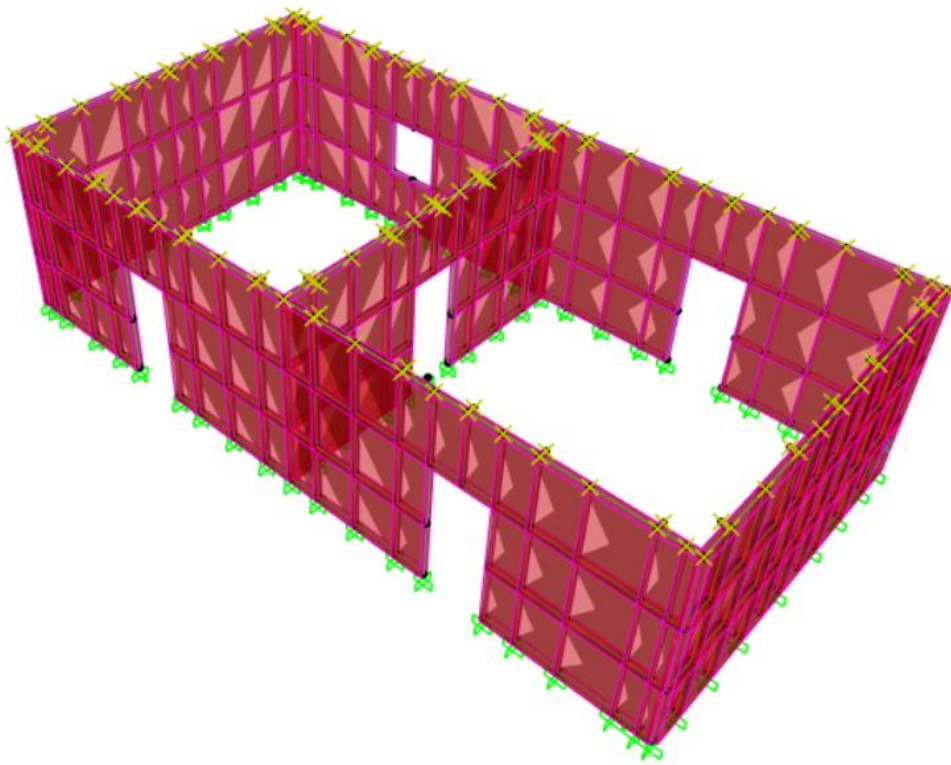


Fig. 7-7.- Diafragma horizontal teórico infinitamente rígido en su plano en la parte superior de los muros del prototipo de estudio que genera un desplazamiento horizontal en bloque de todos los puntos incluidos en el diafragma

Bajo estas condiciones los esfuerzos encontrados fueron los que se indican en la siguiente Fig. 7.8:

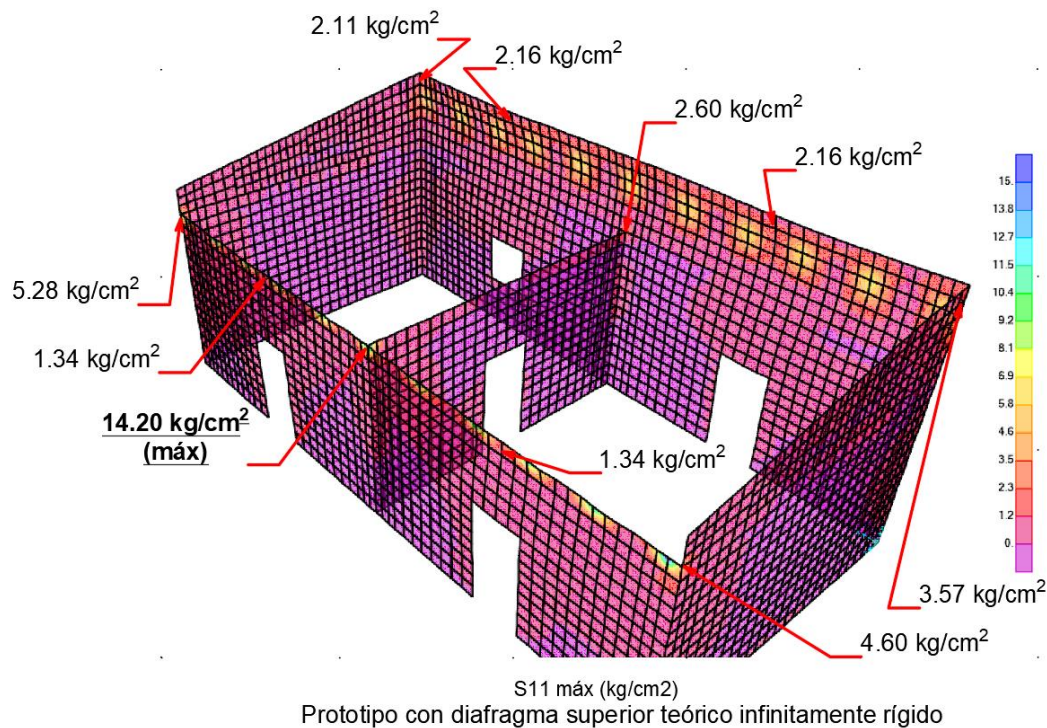


Fig. 7-8.- Deformada y esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros en el prototipo con muros restringidos en la parte superior con un diafragma horizontal infinitamente rígido.

En la determinación de los esfuerzos máximos se descartaron las zonas de apoyos directos de las vigas sobre la mampostería debido que ahí se generan concentraciones de esfuerzos elevadas que no corresponden a la distribución general. Se recomendará la colocación de elementos como parte del reforzamiento que se coloquen en estos puntos para distribuir mejor los esfuerzos.

Se observa que los esfuerzos críticos siguen siendo esfuerzos axiales de tensión por flexión alrededor del eje vertical Z-Z pero ahora con valores máximos significativamente menores

a los encontrados en el prototipo sin diafragma superior. El valor de tensión por flexión máximo fue de 14.20 kg/cm² en una esquina superior de muros.

7.6.-Determinación del coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base con el que se alcanza un esfuerzo máximo igual al módulo de rotura por tensión paralela a las juntas de la mampostería en prototipo con los muros libres en extremos superiores.

Se analizó el prototipo con los muros libres en extremos superiores utilizando diferentes coeficientes sísmicos correspondientes a espectros de respuesta paralelos al espectro base. Para cada espectro de respuesta paralelo al base se determinó el esfuerzo de tensión por flexión máximo que se presentaba en el prototipo. El proceso se repitió hasta que el esfuerzo máximo resultó igual al módulo de rotura de la mampostería. Con este proceso se determinó que para un coeficiente sísmico $C=0.197$ se alcanzó en la sección más crítica el módulo de rotura de 10.20 kg/cm².

7.7.- Determinación del coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base con el que se alcanza un esfuerzo máximo igual al módulo de rotura por tensión paralela a las juntas de la mampostería en prototipo con diafragma horizontal teórico infinitamente rígido.

Se analizó el prototipo con diafragma horizontal teórico infinitamente rígido utilizando diferentes coeficientes sísmicos correspondientes a espectros de respuesta paralelos al espectro base. Para cada espectro de respuesta paralelo al base se determinó el esfuerzo de tensión por flexión máximo que se presentaba en el prototipo. El proceso se repitió hasta que el esfuerzo máximo resultó igual al módulo de rotura de la mampostería. Con este proceso se determinó que para un coeficiente sísmico $C=0.604$ se alcanzó en la sección más crítica el módulo de rotura de 10.20 kg/cm².

7.8.- Verificación de la hipótesis.

Los resultados previamente obtenidos son congruentes con los mecanismos de falla que este tipo de edificaciones han presentado ante la acción sísmica. Así mismo existe una reducción significativa de los esfuerzos al colocar el diafragma teórico superior infinitamente rígido lo que nos aporta elementos para la comprobación de la hipótesis.

La demostración de la hipótesis se planteó a partir de los resultados de los esfuerzos críticos ante las dos condiciones analizadas que son:

- a) **Prototipo con muros libres en extremos superiores:** Los muros están empotrados en su base y sus bordes superiores están totalmente libres, tal y como se encuentran en las edificaciones objeto de estudio.
- b) **Prototipo con muros restringidos en extremos superiores con diafragma horizontal teórico infinitamente rígido en su plano:** Los muros están empotrados en su base y en un plano horizontal localizado en la zona superior de los muros se coloca un diafragma horizontal teórico infinitamente rígido en su plano en el cual todos los elementos se desplazan rígidamente en bloque.

Se establecen dos índices, el Índice de Reducción de Esfuerzos con el diafragma teórico infinitamente rígido (IRE) y el Índice de Incremento de la Capacidad Sismo Resistente con el diafragma teórico infinitamente rígido (IICSR) .

Definición del índice de reducción de esfuerzos con el diafragma teórico infinitamente rígido (IRE).

$$IRE = \frac{F_{m\acute{a}x\ B}}{F_{m\acute{a}x\ A}} \times 100$$

En donde:

IRE (%) : Índice de reducción de esfuerzo de tensión por flexión fuera de plano en muros con el diafragma teórico infinitamente rígido.

F_{máx A} (kg/cm²) : Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en muros bajo la condición A

F_{máx B} (kg/cm²) : Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en muros bajo la condición B

Definición del índice de incremento de la capacidad sismo resistente con el diafragma teórica infinitamente rígido (IICSR).

$$IICSR = \frac{C_B}{C_A}$$

En donde:

IICSR : Índice de incremento de la capacidad sismo resistente con el diafragma teórico infinitamente rígido.

C_A : Coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base en el cual el esfuerzo máximo de tensión paralela a las juntas de la mampostería por flexión fuera de plano es igual al módulo de rotura de los muros bajo la condición A.

C_B : Coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base en el cual el esfuerzo máximo de tensión paralela a las juntas de la mampostería por flexión fuera de plano es igual al módulo de rotura de los muros bajo la condición B.

Conforme a las definiciones anteriores y de los análisis correspondientes los valores de los valores determinados para los índices son los siguientes:

Determinación del IRE :

$$F_{\text{máx A}} = 47.50 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{\text{máx B}} = 14.20 \text{ kg/cm}^2$$

$$IRE = \frac{F_{\text{máx B}}}{F_{\text{máx A}}} \times 100 = \frac{14.20}{47.50} \times 100 = 29.89\%$$

Los esfuerzos se redujeron a menos del 30%

Determinación del IICSR:

$$C_A = 0.197$$

$$C_B = 0.604$$

$$IICSR = \frac{C_B}{C_A} = \frac{0.604}{0.197} = 3.06$$

La capacidad sismorresistente resultó 3.06 veces la original.

Con base a los valores calculados se verifica que IRE=29.89% es menor al 30% y el IICSR=3.06 es mayor a 3 y por lo tanto se comprueba la hipótesis.

Hipótesis comprobada:

*“Ante la acción accidental de sismo, los esfuerzos críticos que provocan la falla de tensión por flexión fuera de plano de la mampostería simple de la edificación objeto de este estudio, se pueden **disminuir al menos al 30% y triplicar su capacidad sismorresistente**, si a los muros se les construye en sus bordes superiores un diafragma horizontal rígido”.*

La comprobación de la hipótesis permite establecer la base para el desarrollo del sistema de refuerzo de este tipo de vivienda con un diafragma superior semirrígido que además sea de bajo costo y de acero prefabricable.

7.9.- Determinación del tipo de Sistema Óptimo de Diafragma Horizontal Semirrígido Liger de Acero Prefabricable (SODHSSLAP).

Para la determinación del tipo de diafragma óptimo se propuso un prototipo de evaluación formado por cuatro muros de mampostería de 15 cm de espesor con dimensiones de 6 m de longitud y 5 m de alto formando en planta un cuadro de 6 m x 6 m. Todos los muros empotrados en su base y extremos superiores libres.

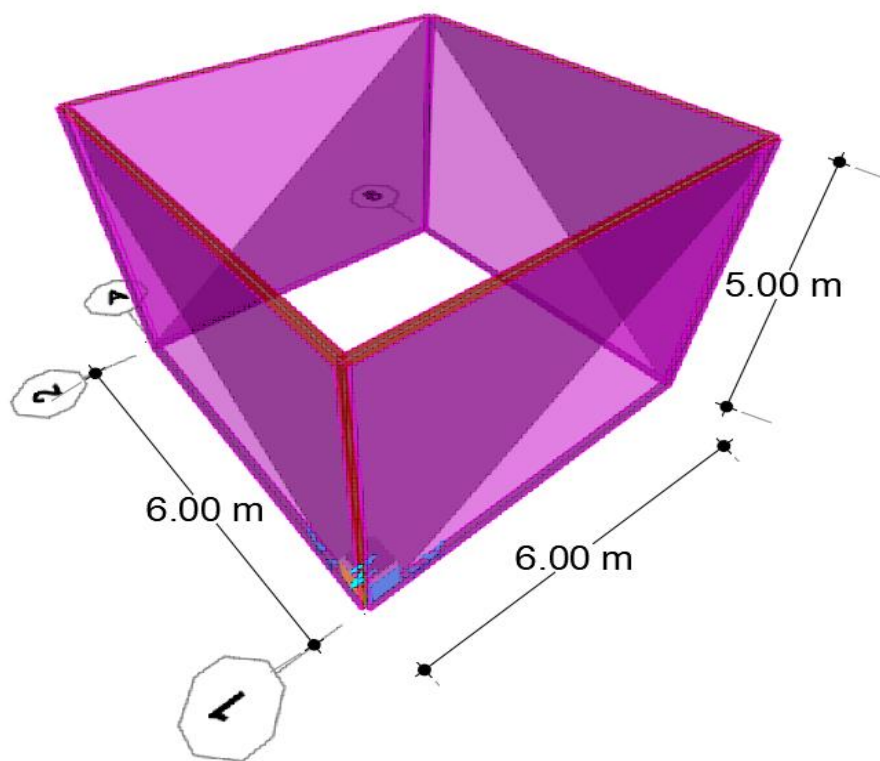


Fig. 7-9.-Prototipo de evaluación formado por cuatro muros de mampostería de 15 cm de espesor con dimensiones de 6 m de longitud y 5 m de alto formando en planta un cuadro de 6 m x 6 m. Todos los muros empotrados en su base y extremos superiores libres.

Se propusieron cuatro tipos diferentes de diafragma a evaluar. Los tipos propuesto se muestran en la Fig. 7.10. Los cuatro tipos de diafragma se constituyeron con el mismo perfil de acero que fue el tubo rectangular OR51x2.8 (4.00 kg/m) de acero A-36.

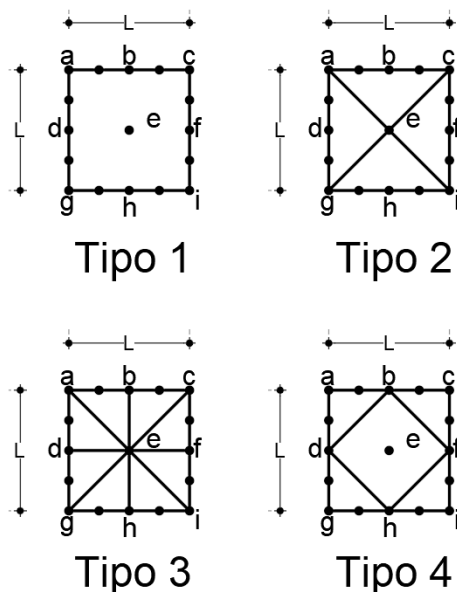


Fig. 7-10.-Cuatro tipos de diafragma semirrígido a evaluar. Todos propuestos a base del perfil de acero estructural comercial en tubo rectangular OR51x2.8 (4.00 kg/m) de acero A-36

Para cada tipo de diafragma propuesto, se analizó el prototipo de evaluación considerando la acción de sismo solamente en la dirección X y se calcularon los índices de deformación (ID), índice de esfuerzo (IF), e índice total (IT) considerando como criterio que el tipo de diafragma que resulte con un valor menor de índice total corresponde al tipo óptimo.

Según este planteamiento, el prototipo con el menor IT sería el de menor costo y peso con deformaciones más cercanas al diafragma teórico infinitamente rígido y menor esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en los muros del prototipo de evaluación con relación al esfuerzo máximo si al prototipo se le define un diafragma teórico superior infinitamente rígido.

A continuación, se presenta la definición de los índices antes mencionados.

Definición del índice total (IT)

$$IT = ID \cdot IF \cdot W$$

En donde:

ID : Índice de deformación

IF : Índice de esfuerzos

W(kg) : Peso del prototipo de diafragma semi rígido

Definición del índice de deformación de diafragma horizontal semirrígido (ID)

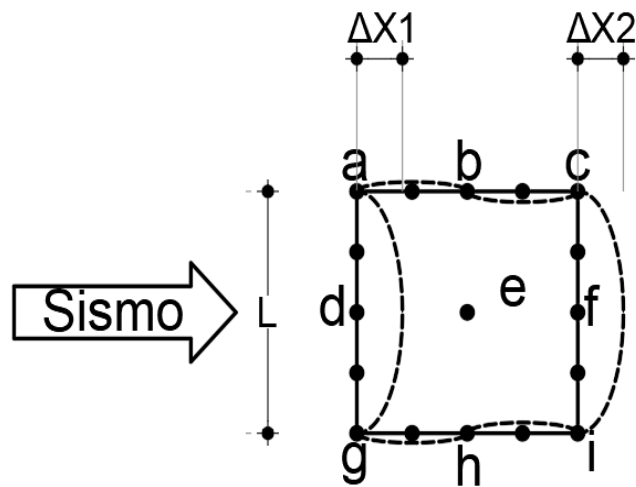


Fig. 7-11.-Definición del índice de deformación de diafragma horizontal semirrígido (ID)

$$ID = \frac{|\Delta X1 - \Delta X2|}{2L}$$

$$ID = \frac{|\Delta X1| + |\Delta X2|}{2L}$$

En donde:

ID : Índice de deformación de diafragma horizontal semirrígido

$\Delta X1$ (cm) : Flecha horizontal al centro del borde superior del muro ag perpendicular a la dirección del sismo.

$\Delta X2$ (cm) : Flecha horizontal al centro del borde superior del muro ci perpendicular a la dirección del sismo.

L (cm) : Longitud de muros perpendiculares a la dirección del sismo

Definición del índice de esfuerzo (IF)

$$IF = \frac{S_{11\text{ máx}}}{S_{11\text{ base}}}$$

En donde:

IF : Índice de esfuerzo

$S_{11\text{ máx}}$ (kg/cm²) : Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido.

$S_{11\text{ base}}$ (kg/cm²) : Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en muros del prototipo de evaluación con diafragma superior teórico infinitamente rígido.

Adicionalmente se revisaron las barras de los diafragmas semirrígidos y se verificó que la relación de esbeltez crítica no rebasara un valor establecido en 220. Este valor es un poco mayor a 200 que es el valor máximo que se fija para miembros en compresión en las NTC_CDMX. Esto se propone así debido a que las cargas de compresión no rigen en este caso el diseño.

A su vez se revisó que el coeficiente de capacidad del perfil a flexión alrededor del eje 2-2 fuese menor a 1. El coeficiente de capacidad a flexión del perfil se calculó mediante la

relación entre los módulos de sección elástico necesario y el módulo de sección elástico del perfil (teoría elástica).

Evaluación de los cuatro tipos propuestos de diafragma horizontal semirrígido.

Se analizó el prototipo de evaluación con las cuatro modalidades propuestas de diafragma. En la Fig. 7.12, se presentan los esfuerzos máximos de tensión por flexión fuera de plano en los muros del prototipo de evaluación sin diafragma superior. En las Fig.7.13, Fig.7.14, Fig.7.15, Fig.7.16 se presentan los esfuerzos máximos de tensión por flexión fuera de plano en los muros del prototipo reforzado con los diafragmas semirrígidos sujetos a evaluación tipo 1, tipo 2, tipo 3 y tipo 4 respectivamente.

En la Tabla 7.1 y tabla 7.2 se presenta el perfil propuesto, los análisis realizados y los resultados obtenidos:

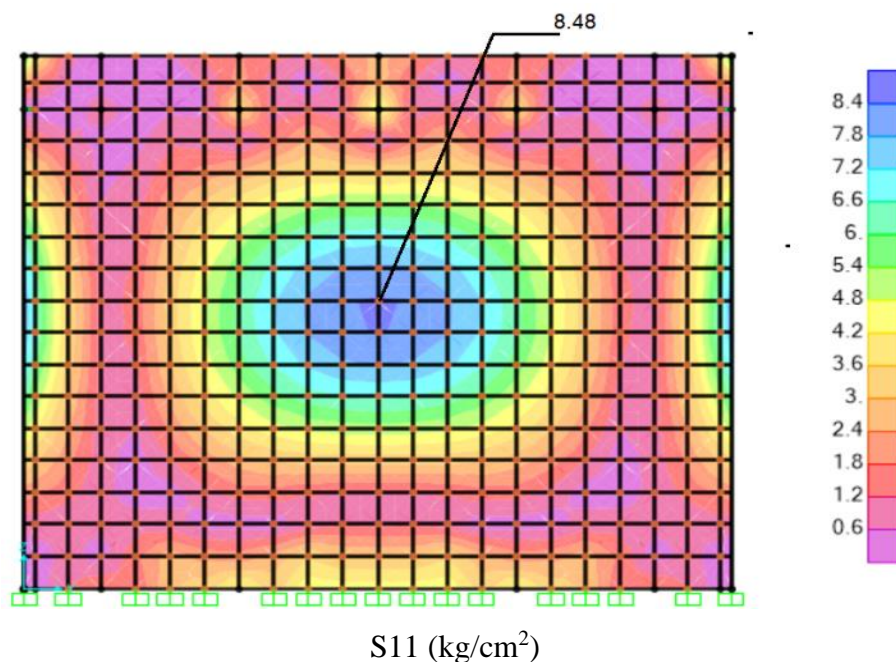
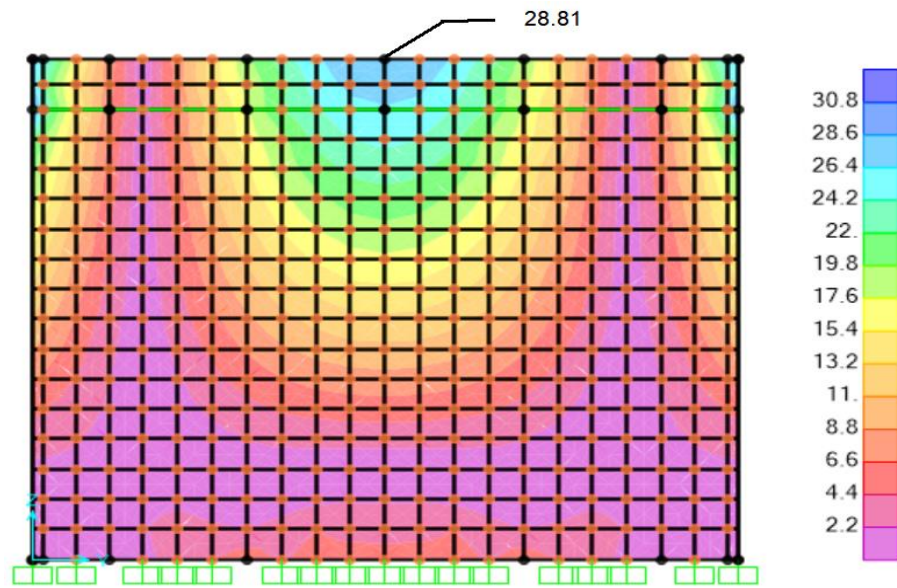
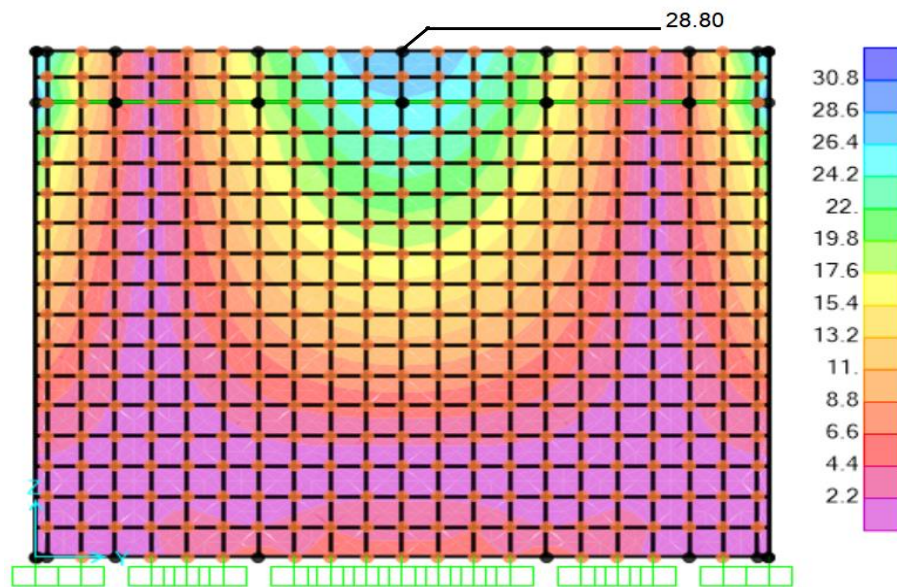


Fig. 7-12.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior teórico infinitamente rígido.



$S_{11} (\text{kg/cm}^2)$

Fig. 7-13.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 1.



$S_{11} (\text{kg/cm}^2)$

Fig. 7-14.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 2.

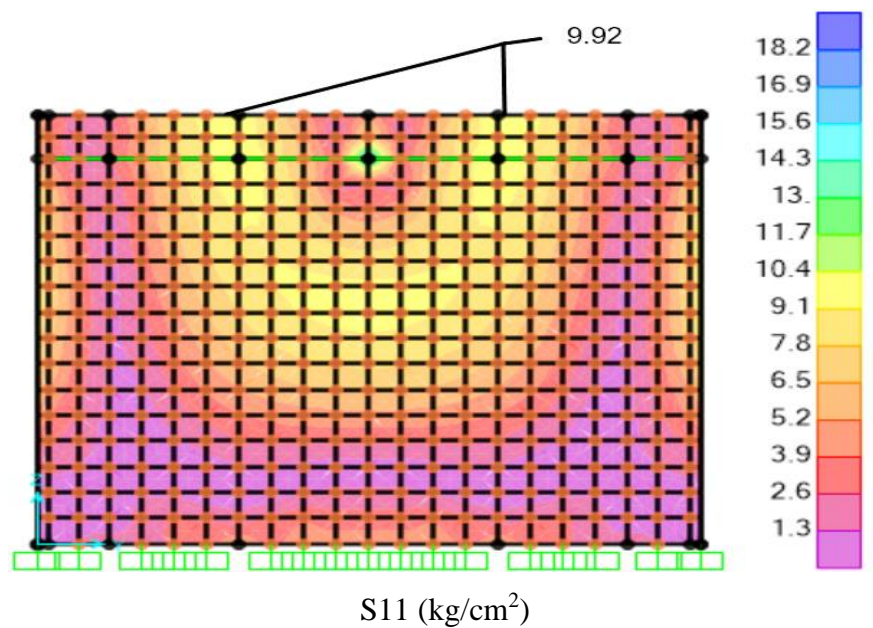


Fig. 7-15.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 3.

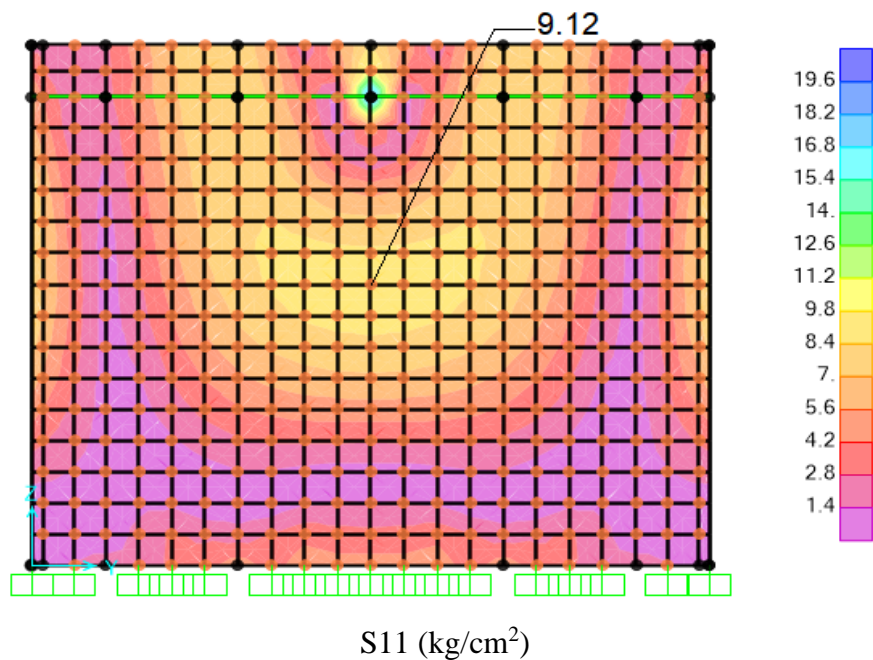


Fig. 7-16.-Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de muros del prototipo de evaluación con diafragma superior semirrígido tipo 4.

Tabla 7-2 Determinación del tipo de diafragma semirrígido óptimo

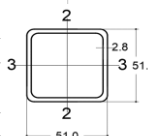
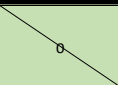




EVALUACIÓN DE TIPOS DE DIAFRAGMAS SUPERIORES RÍGIDOS								
Perfil propuesto:	OR 51X2.8 (4.00 kg/m)	r2-2(cm):	1.93					
Acero:	A-36	r3-3(cm):	1.93					
S2-2(cm³):	7.49	fb=0.60fy: (kg/cm²)	1518					
S3-3(cm³):	7.49	L(cm):	600					
fy (kg/cm²):	2530	S11 base (kg/cm2)=	8.48	Con diafragma superior infinitamente rígido				
								
		PERFIL PROPUESTO						
Tipo de diafragma semi rígido		W(kg) Peso del diafragma (perfiles)	ΔX1 (cm)	ΔX2 (cm)	ID Índice de deformación	S11máx (kg/cm2) Esfuerzo máximo en Muros	IF Índice de esfuerzo	IT= W ID IF (Índice total) (Rige el menor)
 Diafragma infinitamente rígido (Base de referencia para esfuerzos)		0	0.000	0.000	0.00E+00	8.48	1.00	-----
1		96	0.471	0.471	7.85E-04	28.81	3.40	0.26
2		163.92	0.471	0.471	7.85E-04	28.80	3.40	0.44
3		211.92	0.085	0.085	1.42E-04	9.92	1.17	0.04
4 SELECCIONADO		163.84	0.078	0.078	1.30E-04	9.12	1.08	0.02
Valor menor :		96.00			1.30E-04		1.08	0.02

Tabla 7-3 Revisión de resistencia a flexión y relación de esbeltez de las barras en los tipos de diafragmas semirrígidos evaluados

Revisión de resistencia a flexión y relación de esbeltez de las barras de diafragmas semi rígidos										
Tipo	Flexión en el perfil alrededor del eje 2-2 módulo de sección S2-2			Relaciones de esbeltez críticas en barras						
	Perfil M2-2máx (kg-cm)	S2-2nec $= \frac{M_{2-2}}{fb}$	Coeficiente de capacidad $\frac{S_{2-2nec}}{S_{2-2perfil}} < 1$	Barras crítica	Alrededor del eje 2-2			Alrededor del eje 3-3		
					L22 (cm)	r22 (cm)	RE22<220	L33 (cm)	r33 (cm)	RE33<220
1	2032.86	1.34	✓ 0.18	ag, di	150.00	1.93	✓ 77.72	150.00	1.93	✓ 77.72
2	2175.33	1.43	✓ 0.19	ge, ec, ae,ei	424.26	1.93	✓ 219.82	848.53	1.93	✗ 439.65
3	745.40	0.49	✓ 0.07	ge, ec, ae,ei	424.26	1.93	✓ 219.82	848.53	1.93	✗ 439.65
4	1130.80	0.74	✓ 0.10	db,bf,dh ,hf	424.26	1.93	✓ 219.82	424.26	1.93	✓ 219.82

Con los resultados alcanzados en las Tablas 7.2 y 7.3, **se determinó que el diafragma horizontal semirrígido óptimo es el tipo 4** en virtud de presentar el menor índice total IT con valor de 0.02 cumpliendo además con un coeficiente de capacidad <1 y relación de esbeltez menor a 220.

7.10.- Diseño del Sistema Óptimo de Diafragma Horizontal Superior Semirrígido Ligero de Acero Prefabricable (SODHSSLAP).

Con base a la forma óptima determinada de diafragma horizontal semirrígido, se buscó definir y diseñar un sistema de diafragma que esté constituido por piezas que se puedan fabricar de forma masiva en taller y que sean de muy fácil colocación en campo.

La fabricación en taller permitiría controlar la calidad de la soldadura y de la fabricación en general.

La instalación en campo sería mediante la unión de las piezas con conexiones atornilladas que requiriesen la utilización de taladro manual y herramienta menor.

Como resultado del diseño de las piezas y sus conexiones el SODHSSLAP quedó configurado con la forma, estructuración y características mostradas en Figuras Fig.7.17, Fig.7.18, Fig.7.19, Fig.7.20, Fig.7.21, Fig.7.22, Fig.7.23, y Fig.7.24.

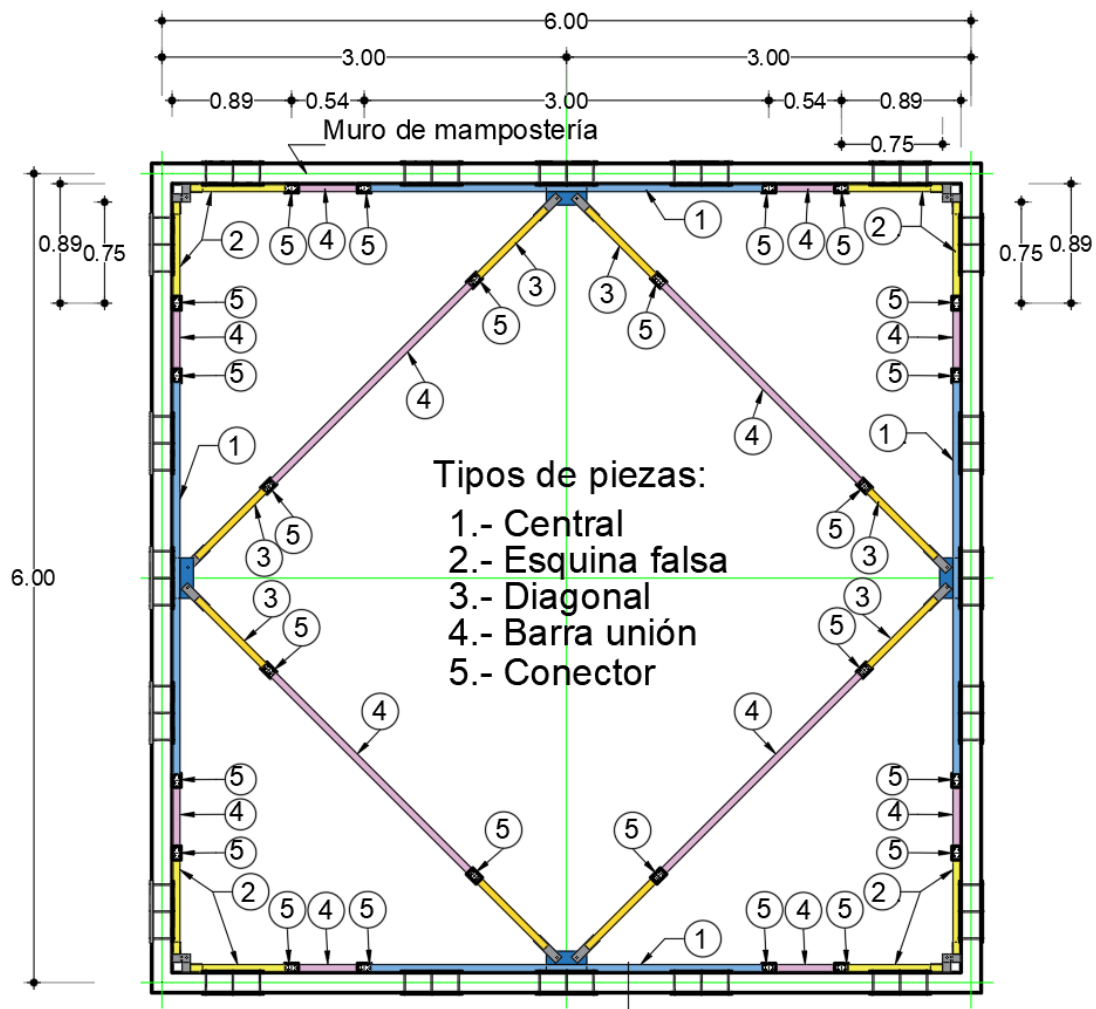


Fig. 7-17.-Sistema Óptimo de Diafragma Horizontal Superior Semirrígido Ligero de Acero Prefabricable (SODHSSLAP)

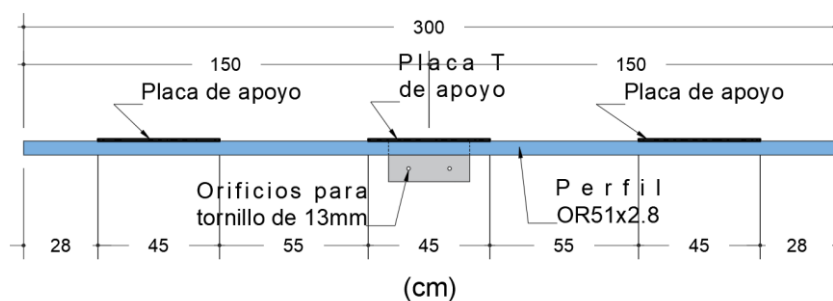
El SODHSSLAP está integrado por los cinco tipos de piezas siguientes:

- 1.- Central : Pieza de 300 cm de longitud compuesta por dos placas de apoyo, una placa T de apoyo y perfil estructural OR51x2.8. Se coloca en la zona central superior de los muros conectada a éstos a través de las dos placas de apoyo y la placa T de apoyo utilizando tornillos de espárrago calidad estructural de 10 mm de diámetro. Ver Fig.7.18

- 2.- Esquina falsa : Pieza compuesta de dos partes iguales unidas con un tornillo de 13mm permitiendo formar ángulos de magnitudes variables, cercanos a los 90° en las esquinas de los muros. Esta característica le permitirá adaptarse a las irregularidades de las edificaciones que no presenten esquinas en ángulos exactos de 90°. Cada una de las piezas es de 82 cm de largo y está compuesta por el perfil estructural OR51x2.8, placa de 8mm y una placa de apoyo. Ver Fig.7.19
- 3.- Diagonal : Pieza de 88 cm de longitud compuesta por perfil estructural OR51x2.8 y placa de 8mm que permite conectar las diagonales del sistema a la pieza central y a la barra unión. Ver Fig.7.20
- 4.- Barra unión : Pieza simple de perfil estructural OR51x2.8 de longitud variable que al unirse a las piezas diagonal, central y de esquina falsa forma las barras diagonales y marco perimetral del sistema. Ver Fig.7.21
- 5.- Conector : Pieza de 10 cm de longitud construida con el perfil estructural OR64x4.8, con orificios y tuercas soldadas para unir piezas del sistema mediante tornillos de 13 mm. Ver Fig.7.22

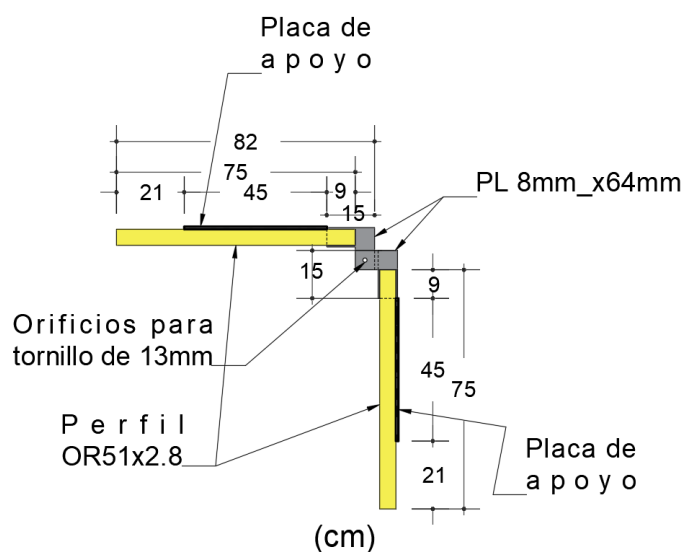
A su vez la fijación de las piezas central y esquina falsa se realiza a través de placas de apoyo y T de apoyo de placa de acero A-36 de 8 mm de espesor, que distribuyen en áreas amplias el esfuerzo en los muros con lo que se evita la concentración de estos. Ver las figuras Fig.7.23 y Fig.7.24.

En general se busca que, con esta configuración del sistema, su instalación en cada vivienda se pueda realizar de forma económico, práctica, sencillo y rápida.



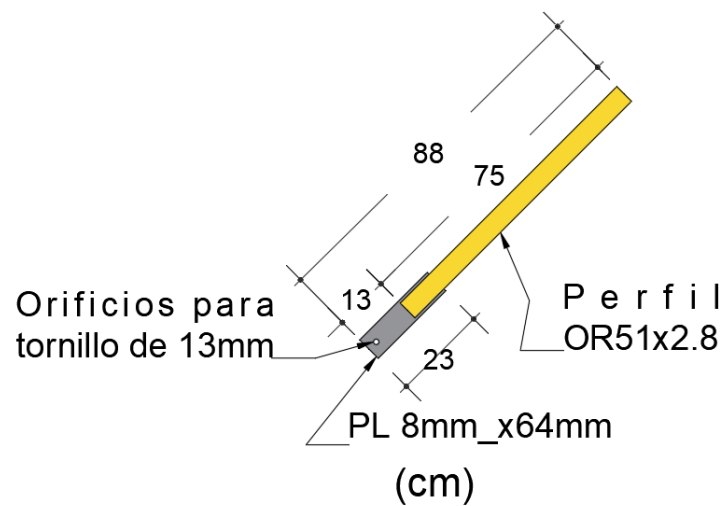
1) Central

Fig. 7-18.-Pieza central del SODHSSLAP: Pieza de 300 cm de longitud compuesta por dos placas de apoyo, una placa T de apoyo y perfil estructural OR51x2.8. Se coloca en la zona central superior de los muros conectada a éstos a través de las dos placas de apoyo y la placa T de apoyo utilizando tornillos de espárrago calidad estructural de 10 mm de diámetro.



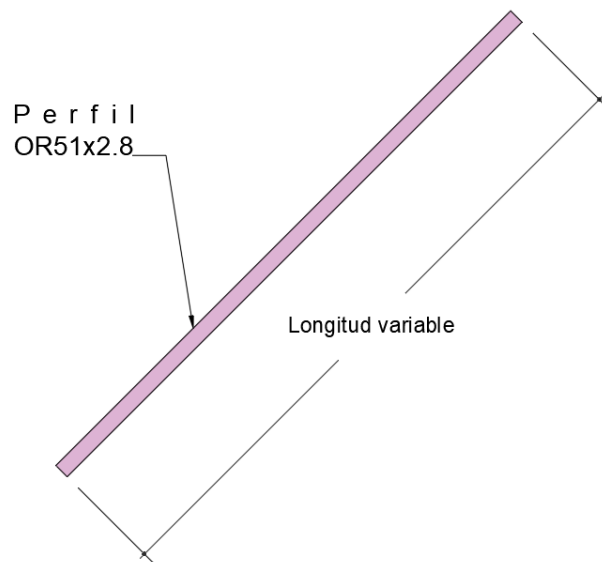
2) Esquina falsa

Fig. 7-19.-Pieza esquina falsa del SODHSSLAP: Pieza compuesta de dos partes iguales unidas con un tornillo de 13mm permitiendo formar ángulos de magnitudes variables, cercanos a los 90° en las esquinas de los muros. Esta característica le permitirá adaptarse a las irregularidades de las edificaciones que no presenten esquinas en ángulos exactos de 90°. Cada una de las piezas es de 82 cm de largo y está compuesta por el perfil estructural OR51x2.8, placa de 8mm y una placa de apoyo



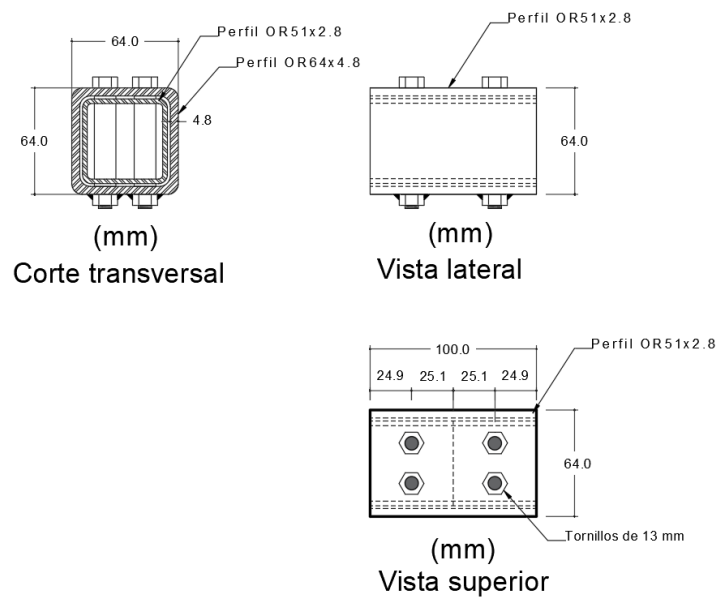
3) Diagonal

Fig. 7-20.-Pieza diagonal del SODHSSLAP: Pieza de 88 cm de longitud compuesta por perfil estructural OR51x2.8 y placa de 8mm que permite conectar las diagonales del sistema a la pieza central y a la barra unión.



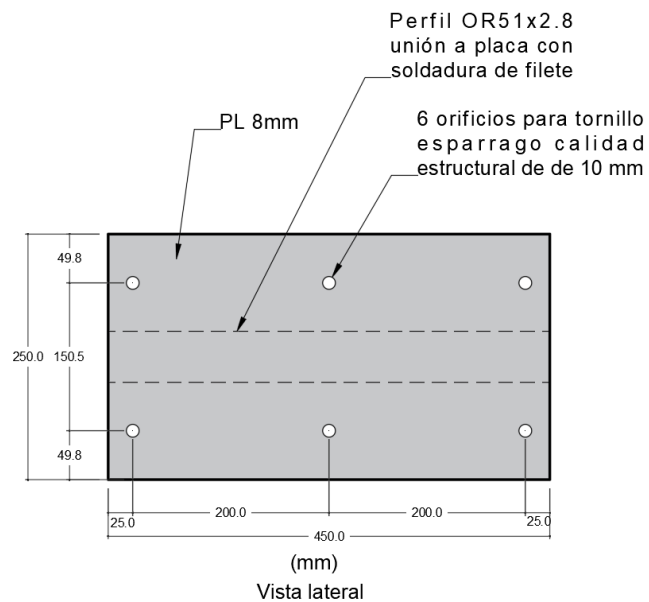
4) Barra unión

Fig. 7-21.-Pieza Barra unión del SODHSSLAP: Pieza simple de perfil estructural OR51x2.8 de longitud variable que, al unirse a las piezas diagonal, central y de esquina falsa forma las barras diagonales y marco perimetral del sistema



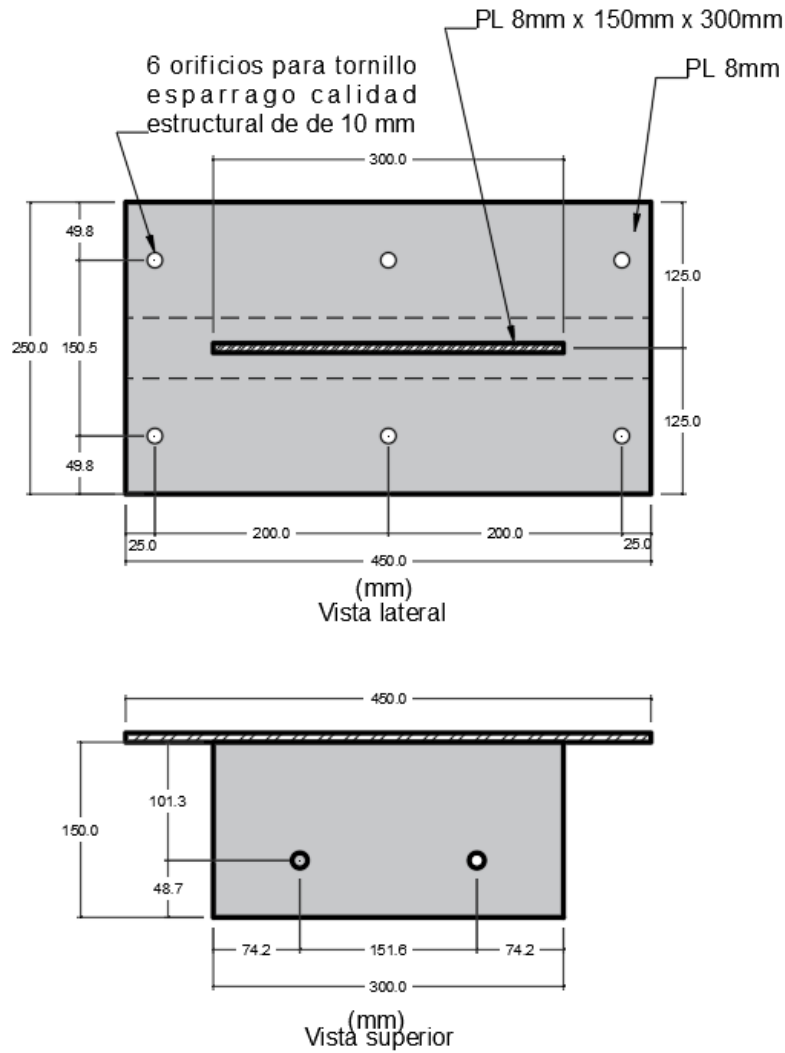
5) Conector

Fig. 7-22.-Pieza Conector del SODHSSLAP: Pieza de 10 cm de longitud construida con el perfil estructural OR64x4.8, con orificios y tuercas soldadas para unir piezas del sistema mediante tornillos de 13 mm.



Placa de apoyo

Fig. 7-23.-Placa de apoyo del SODHSSLAP: Pieza de placa de 8 mm x 250 mm x 450 mm de acero A-36 con 6 orificios para tornillo esparrago calidad estructural de 10 mm



T de apoyo

Fig. 7-24.-T de apoyo del SODHSSLAP: Conformada por dos placas de 8 mm con dimensiones de 150 mm x 300 mm y 250 mm x 450 mm, esta última con 6 orificios para tornillo esparrago calidad estructural de 10 mm

7.11.- Evaluación del desempeño del SODHSSLAP al reforzar la vivienda prototipo objeto de este estudio.

La evaluación del desempeño del SODHSSLAP en la reducción de esfuerzos de tensión por flexión fuera de plano de los muros e incremento del sismorresistencia del prototipo de vivienda objeto de este estudio, se realizó relacionando los resultados obtenidos de los análisis la estructura del prototipo en las dos configuraciones siguientes:

- a) **Prototipo de estudio con muros libres en extremos superiores:** Los muros están empotrados en su base y sus bordes superiores están totalmente libres, tal y como se encuentran en las edificaciones objeto de estudio.
- b) **Prototipo con muros restringidos en extremos superiores con el sistema óptimo de diafragma horizontal superior semirrígido ligero de acero prefabricable (SODHSSLAP):** Los muros están empotrados en su base y en un plano horizontal localizado en la zona superior de los muros se coloca el diafragma horizontal semirrígido de piezas ligeras de acero que fue determinado como el óptimo.

Para la evaluación se establecieron dos índices: el Índice de Reducción de Esfuerzos con el sistema SODHSSLAP (IRES) y el Índice de Incremento de la Capacidad Sismo Resistente con sistema SODHSSLAP (IICRS)

A continuación, se presenta la definición de los índices mencionados.

Definición del índice de reducción de esfuerzos con SODHSSLAP (IRES).

$$IRES = \frac{F_{máx B}}{F_{máx A}} \times 100$$

En donde:

IRES (%) : Índice de reducción de esfuerzo de tensión por flexión fuera de plano en muros con el SODHSSLAP.

F_{máx A} (kg/cm²) : Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en muros bajo la condición a

F_{máx B} (kg/cm²) : Esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en muros bajo la condición b

Definición del índice de incremento de la capacidad sismo resistente con el SODHSSLAP (IICSRS).

$$IICSRS = \frac{C_B}{C_A}$$

En donde:

IICSRS : Índice de incremento de la capacidad sismo resistente con SODHSSLAP.

C_A : Coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base en el cual el esfuerzo máximo de tensión paralela a las juntas de la mampostería por flexión fuera de plano es igual al módulo de rotura de los muros bajo la condición a.

C_B : Coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base en el cual el esfuerzo máximo de tensión paralela a las juntas de la mampostería por flexión fuera de plano es igual al módulo de rotura de los muros bajo la condición b.

Los esfuerzos máximos de tensión por flexión fuera de plano en los muros del prototipo bajo la condición a) se muestran en la Fig.7.25

Los esfuerzos máximos de tensión por flexión fuera de plano en los muros del prototipo con SODHSSLAP bajo la condición b) se muestran en la Fig.7.26.

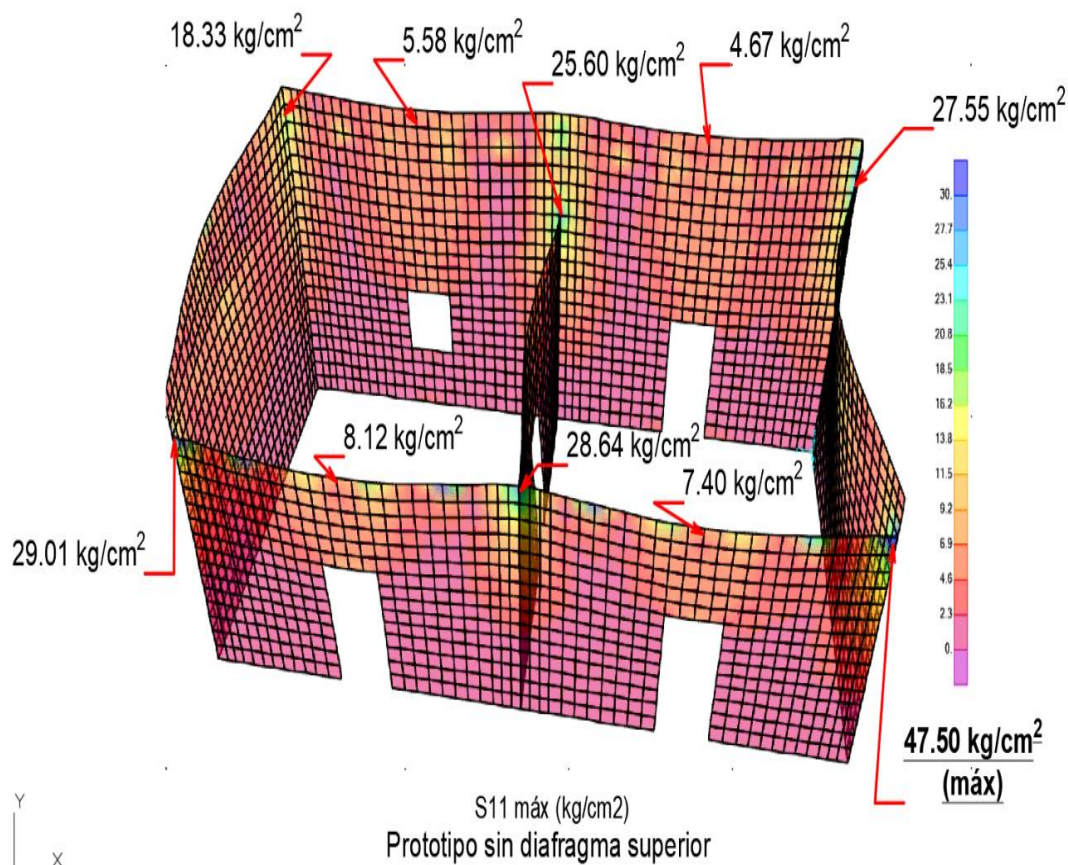


Fig. 7-25.- Deformada y esfuerzos críticos de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros en el prototipo original con muros no restringidos en la parte superior. Condición a).

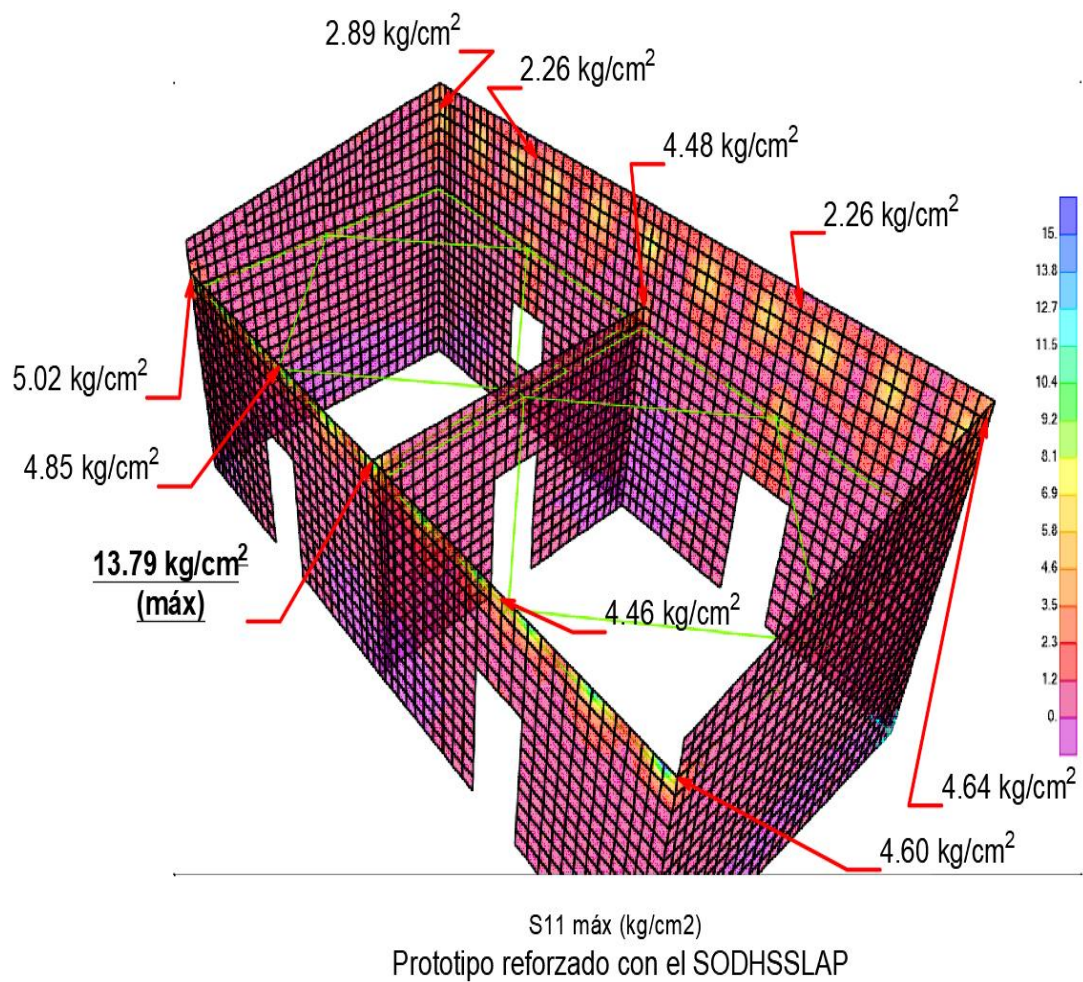


Fig. 7-26.-Esfuerzos máximos de tensión por flexión fuera de plano en muros del prototipo reforzado con el SODHSSLAP. Condición b)

Determinación de el coeficiente sísmico C_B .

En la determinación del coeficiente sísmico del espectro de respuesta paralelo al espectro base con el que se alcanza un esfuerzo máximo de tensión por flexión fuera de plano en caras laterales de los muros igual al módulo de rotura por tensión paralela a las juntas de la mampostería en el prototipo bajo la condición B, se realizó el siguiente proceso:

- Se analizó el prototipo utilizando diferentes coeficientes sísmicos correspondientes a espectros de respuesta paralelos al espectro base.
- Para cada espectro de respuesta paralelo al base se determinó el esfuerzo de tensión por flexión máximo que se presentaba en las caras de los muros del prototipo.
- Los procesos anteriores se repitieron hasta que el esfuerzo máximo de flexión por tensión fuera de plano en las caras de los muros resultó igual al módulo de rotura de la mampostería.

De esta forma se determinó que para un coeficiente sísmico $C_B = 0.642$ se alcanzó en la sección más crítica el módulo de rotura de 10.20 kg/cm^2 .

Determinación de el coeficiente sísmico C_A .

El valor de $C_A = 0.197$ se obtuvo en la sección 8.6.

Con los resultados obtenidos calcularon los valares de los índices .

Determinación del IRES :

$$F_{\text{máx A}} = 47.50 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{\text{máx B}} = 13.79 \text{ kg/cm}^2$$

$$IRES = \frac{F_{\text{máx B}}}{F_{\text{máx A}}} \times 100 = \frac{13.79}{47.50} \times 100 = 29.03\%$$

Éste valor significa que el esfuerzos máximo de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros del prototipo reforzado con el SODHSSLAP se redujo al 29.03% de los esfuerzos con el prototipo sin diafragma superior.

Determinación del ICSRS :

$$C_A = 0.197$$

$$C_B = 0.642$$

$$IICSRS = \frac{C_B}{C_A} = \frac{0.642}{0.197} = 3.26$$

Este valor significa que la capacidad sismorresistente del prototipo reforzado con el SODHSSLAP es 3.26 veces la capacidad sismorresistente del prototipo sin el diafragma superior.

Estos resultados muestran que el desempeño del sistema propuesto SODHSSLAP es muy alto superando incluso la efectividad del diafragma superior teórico infinitamente rígido en el incremento de la sismorresistencia ya que el $IICSRS = 3.26$ es superior al $IICSR=3.06$,

esto es muestra un rendimiento $(3.26/3.06=1.07)$ 7% superior. Esta situación muy probablemente se deba a que la condición de semi rigidez del diafragma permite una mejor redistribución de los esfuerzos.

En resumen, se determinó que el desempeño del SODHSSLAP es un 7% superior al del diafragma teórico infinitamente rígido, con un incremento de 3.26 veces la sismorresistencia del prototipo de estudio y una reducción de los esfuerzos máximos de tensión por flexión fuera de plano en las caras laterales de los muros del 29%

Conclusiones

El tipo de vivienda popular objeto del estudio es altamente vulnerable ante la actividad sísmica, debido a que está construida con materiales de mampostería simple de poca calidad, y poseen elementos de concreto reforzado como cadenas o castillos que confinen la mampostería o algún otro tipo de refuerzo que le proporcione mayor resistencia y ductilidad.

No obstante, el bajo peso de su cubierta, sus características y condición no son favorables para su estabilidad por la falta de restricción lateral en la parte superior de los muros de mampostería, y las fuerzas inerciales que genera su propio peso, las cuales desarrollan en las caras laterales de los muros esfuerzos de tensión por flexión fuera de plano que al rebasar el módulo de rotura de la mampostería provocan la falla frágil, el agrietamiento, y colapso parcial o total.

Con los análisis realizados al prototipo de estudio en este trabajo, se determinó que este tipo de vivienda bajo sus características y condiciones actuales tiene la capacidad de resistir un sismo con un coeficiente sísmico de 0.197 que es muy inferior al 0.86 que se consideró como base para la ciudad de Tapachula en zona II. Además, por sus características la estructura de este tipo de vivienda tiene prácticamente nula ductilidad y de presentarse la falla por flexión fuera de plano en los muros, la probabilidad de colapso inmediato es muy elevada.

Así mismo en este trabajo se demostró analíticamente que el sistema de reforzamiento desarrollado y evaluado SODHSSLAP, que es un sistema óptimo de diafragma horizontal superior semirrígido ligero de acero prefabricable, es efectivo al incrementar la sismo

resistencia de este tipo de viviendas 3.26 veces con relación a su estado actual. El prototipo de vivienda reforzado con el SODHSSLAP teóricamente sería capaz de resistir un sismo que corresponda a un espectro de respuesta con valor de $C=0.642$. Este coeficiente sísmico que teóricamente puede resistir el prototipo de vivienda reforzado con el SODHSSLAP representa el 74.7% del coeficiente sísmico de diseño base considerado de 0.86.

Adicionalmente el SODHSSLAP que está diseñado a base de perfiles de acero comerciales aportarían una ductilidad importante a la vivienda y en caso de presentarse la falla ante la acción sísmica, esta no sería frágil generándose un mecanismo de falla dúctil que evitaría el colapso y la pérdida de vidas humanas.

Sin lugar a dudas se puede disminuir el riesgo sísmico en este tipo de viviendas disminuyendo su vulnerabilidad ante la acción sísmica con la realización de un reforzamiento de las edificaciones consistente en la construcción de confinamientos de los muros simples con cadenas y castillos de concreto reforzado o con el reforzamiento en las caras de los muros de mampostería simple con capas de mortero cemento arena y malla electrosoldada conforme lo especifican las NTC del diseño y construcción de muros de mampostería de la ciudad de México. Sin embargo, el realizar este tipo de reforzamiento de las viviendas representaría costos elevados fuera del alcance de las familias de escasos recursos que las habitan además de largos periodos de tiempos de realización.

Los resultados alcanzados en el presente trabajo, indican que de manera alternativa el realizar el reforzamiento de las viviendas con el SODHSSLAP es viable y de alto impacto social, debido a que, sin pretender que las viviendas cumplan con las NTC para el diseño y construcción de estructuras de mampostería, incrementaría más de tres veces la sismorresistencia de las viviendas y les aportaría la ductilidad necesaria para mejorar su comportamiento sísmico. Todos estos beneficios se alcanzarían a muy bajo costo y muy cortos periodos de realización.

En conclusión, por sus características la alternativa de reforzamiento aquí desarrollada y propuesta con el SODHSSLAP es factible de rápida ejecución, bajo costo y alto impacto social que permitiría disminuir de manera muy importante el elevado riesgo sísmico actual por la existencia de este tipo de viviendas ubicadas principalmente en zonas rurales y urbanas de marginación económica y social.

Trabajo a futuro

En el desarrollo del SODHSSLAP se determinó analíticamente a través de modelos estructurales teóricos que es altamente efectivo para incrementar más de tres veces la sismorresistencia de las viviendas, por lo que justifica la realización de trabajos experimentales en laboratorios de pruebas que permitan ensayar prototipos físicos para corroborar los resultados obtenidos en forma teórica.

También sería muy importante el promover a nivel gubernamental un programa social de reforzamiento con el SODHSSLAP de este tipo de vivienda popular en zonas rurales y urbanas de alta marginación económica y social. Con un programa de esta naturaleza se protegería la vida de miles de personas y los daños a sus viviendas al disminuir de forma práctica, económica y rápida el alto riesgo sísmico en que actualmente se encuentran.

Referencias bibliográficas

Construcción, D. N. (2010). MANUAL DE CONSTRUCCIÓN de Edificaciones Antisísmicas de ADOBE. PERÚ: Dirección Nacional de Construcción.

Gobierno de la Ciudad de México. (2017). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA*. Ciudad de México, México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

González, R., Mora, J., Aguirre, J., & Rueda, J. (2012). *Nórmás Técnicas de diseño por sismo y mampostería para Tapachula*. Tuxtla Gutierrez, Chiapas: Secretaría de Protección Civil el Estado de Chiapas.

González, R., Tena, A., Mora, J., Borráz, M., Aguilar, J., Cruz, R., . . . Narcía, C. (2011). *El sismo de Villaflores, Chiapas: su realidad y consecuencias* (1 ed.). Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México: UNICACH.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2017). *REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA (REGLAMENTO CIRSOC501)*. Buenos Aires, Argentina: Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles.

Jaramillo, J. D. (2002). Mecanismos de transmisión de cargas perpendiculares al plano del muro en muros de mampostería no reforzada. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 67 SMIS México*, 53-78.

M. Blondet, J. V. (2011). Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica de Perú. *Informes de la Construcción*, Vol.63, 523, 41-50.

Melli, P. (2005). Experiencias en México sobre reducción de vulnerabilidad sísmica de construcciones de adobe. *Seminario sismo adobe 2005*. Lima, Perú: Universidad Javeriana.

MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO DE PERÚ. (2017). *NORMA E.080 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON TIERRA REFORZADA*. LIMA, PERU: Diario Oficial del Bicentenario El Peruano.

Romero Niveló, B. A. (2017). *Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca/Tesis Pregrado*. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27365>

Yamín, L., Phillips, C., Reyes, J., & Ruiz, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes*.